

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Estudo de caso da ponte em estrutura  
mista sobre o rio Arataú na BR 230/PA**

**Cristiano Hoss**

**Orientador: Inácio Benvegnu Morsch**

**Co-orientador: Jorge Luis Palomino Tamayo**

Porto Alegre  
2020

CRISTIANO HOSS

**ESTUDO DE CASO DA PONTE EM ESTRUTURA MISTA  
SOBRE O RIO ARATAÚ NA BR 230/PA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

**Orientador: Inácio Benvegnu Morsch**

**Co-orientador: Jorge Luis Palomino Tamayo**

Porto Alegre  
2020

**CRISTIANO HOSS**

**ESTUDO DE CASO DA PONTE EM ESTRUTURA MISTA  
SOBRE O RIO ARATAÚ NA BR 230/PA**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração Estruturas, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 27 de novembro de 2020

Prof. Inácio Benvegnu Morsch  
Dr. pelo PPGEC/UFRGS  
Orientador

Prof. Inácio Benvegnu Morsch  
Dr. pelo PPGEC/UFRGS  
Coorientador

Prof. Nilo Cesar Consoli  
PhD. pela University of Western Australia  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Américo Campos Filho**  
**(UFRGS)**  
Dr. pela Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo

**Prof. Zacarias Martin Chamberlain**  
**Pravia (UPF)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio de  
Janeiro

**Prof. Mauro Vasconcellos Real**  
**(FURG)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul

**Prof. Jose Rafael Yepez Aguirre**  
**(FURG)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul

Dedico este trabalho a minha esposa Giovana, fiel  
companheira, e a meus pais Lademir e Clair, meus grandes  
mestres.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela oportunidade de chegar até aqui e por cada pessoa que tive a oportunidade de conhecer neste processo.

Agradeço a minha esposa Giovana que em todos os momentos esteve ao meu lado sendo um suporte, fonte de inspiração e direcionamento.

Agradeço ao meus pais Lademir e Clair que me educaram e forneceram a base para o meu amadurecimento e desenvolvimento como pessoa. Este trabalho é fruto de todo o amor e empenho que vocês demonstraram em minha vida ao longo dos anos.

Agradeço em especial ao meu orientador Prof. Inácio Morsch, que ao longo dos anos me inspirou e se tornou uma grande referência profissional e pessoal. Sou grato por todos os conselhos, desafios, exigências, direcionamentos, conversas técnicas, conselhos e em especial pela tua amizade. Muito obrigado.

Agradeço ao meu co-orientador Jorge Tamayo pelas contribuições fundamentais no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa. Obrigado pelo seu empenho e dedicação para a pesquisa e desenvolvimento dos seus orientados.

Agradeço também em especial à toda a equipe da Deltacon Engenharia por toda a formação técnica e oportunidade de participar de tantos projetos desafiadores ao longo dos anos. Sou grato ao Eng. Martin Beier, exemplo de profissional, que alinha a prática de engenharia com a pesquisa e contribui com o desenvolvimento da engenharia nacional. Sou grato a Eng. Vera Fritsch pelo seu exemplo de resiliência profissional e por todas as conversas, parceria e amizade. Obrigado pelo consentimento do estudo de caso em questão. Obrigado a todos.

Agradeço também ao Eng. Giancarlo Tavares que com toda a sua capacidade técnica e experiência diferenciada sempre esteve disposto a discutir e contribuir com a formação alheia. Parabéns pela pessoa que és e obrigado por tudo.

Agradeço ao curso de pós-graduação em Engenharia Civil da UFRGS pela oportunidade de continuar o meu desenvolvimento profissional. Agradeço em especial a UFRGS e a todos os professores que ao longo dos anos de graduação e pós desempenharam um papel imensurável na minha formação.

Como são felizes os que perseveram na retidão,  
que sempre praticam a justiça.

*Salmos 106-3*

## RESUMO

HOSS, C. **Estudo de caso da ponte em estrutura mista sobre o Rio Arataú na BR 230/PA.** 2020. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

Pontes e viadutos com soluções em estruturas mistas são projetadas e executadas com grande recorrência no cenário nacional e mundial. Entre as pontes em estruturas mistas com vigas de alma cheia, se destacam os perfis soldados, pela grande aplicabilidade devido a sua facilidade executiva e ganho de inércia com seções variáveis. O Brasil enfrenta uma realidade de envelhecimento das estruturas que compõem sua infraestrutura, dentre elas as pontes e viadutos. A necessidade da readequação funcional e reabilitação estrutural das obras de arte especiais existentes é real e imediata. O assunto central deste trabalho discorre sobre o estudo de caso do projeto de readequação e reforço da ponte em estruturas mistas sobre o rio Arataú, localizada na BR-230 no estado Pará. A obra de arte especial possui 168,90m, com 6 vãos, e entrou em operação nos anos 1990. A ponte foi projetada para as cargas móveis estabelecidas na antiga norma NB-6 e durante a sua operação sofreu dois colapsos parciais. O projeto original das estruturas mistas foi embasado em critérios de normas internacionais dada a inexistência do código normativo nacional. Este trabalho apresenta os principais critérios adotados para a fundamentação da readequação adotada e realiza duas abordagens para a análise estrutural da nova configuração da ponte. Uma primeira abordagem analítica que considera critérios normativos da ASSHTO, EUROCODE e NBR 8800. Uma segunda abordagem considera um modelo numérico de análise desenvolvido em elementos finitos analisado com o código VIMIS desenvolvido no CEMACOM/UFRGS. O código VIMIS possui a capacidade de análise completa dos efeitos diferidos (fluência e retração), gerando resultados mais precisos de deslocamentos e tensões. Os resultados de deformação obtidos pela análise ELS não linear superam todos os valores previstos pela abordagem analítica. Para o modelo de análise ELU – não linear, as tensões de tração na viga de aço são menores que os obtidos pela abordagem analítica, e na laje de concreto, são maiores que as tensões obtidas na abordagem analítica. Os resultados mostram que o modelo com barras de pórtico associado a abordagem analítica com critérios normativos possui limitações com relação a previsão de deslocamentos e tensões para este tipo de estrutura.

**Palavras-chave:** *pontes mistas aço-concreto, vigas mistas; reforço, reabilitação.*

## ABSTRACT

HOSS, C. **Case study of the composite bridge over the Arataú river at BR-230/PA.** 2020. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

Steel-concrete composite bridges are very popular and have been widely adopted in the world. One of the most popular solutions is the welded plate girders, due to their ease construction and gain of inertia with variable sections. Like many countries of the world, Brazil is facing the reality of infrastructure aging, especially related to bridge structures. The need for functional and structural rehabilitation of some bridges is urgent. This master's thesis subject is studying the rehabilitation and structural reinforcement of the Arataú steel-concrete composite bridge, located at BR-230. The bridge is 168,90m long, with 6 spans, and was built in 1988. The live loads considered in the original project were based on the NB-6 standard, and the real structure already had two partially collapses during its lifetime. At the time of the original design, there was no Brazilian Steel-concrete composite bridge standard yet therefore, the first project was developed with international standards recommendations. This study approaches the international criteria for composite bridges design and two different methodologies for the bridge structural analysis and design. The design criteria are based on LRFD factors. The first approach relies on the standards recommendations from ASSHTO, EUROCODE and NBR 8800. The second one uses a FEM model analyzed with VIMIS code, developed by CEMACOM/UFRGS. The VIMIS code can evaluate creep and shrinkage of the concrete slab, providing stress and strain results with more accuracy for composite structures. The strain results for the FEM model with non-linear SLS analysis are greater than all the results obtained with the analytic approach. The tension stress results for the FEM model with non-linear ULS analysis at the bottom of the plate girder are lower than the results giving by the analytic methodology. The compression stresses at the concrete slab for the FEM analysis are greater than the results from the analytic approach. The results point out that a beam model with an analytic approach, using standards recommendations, has limitations to determine the displacements and stress distribution on steel-concrete composite bridge sections.

**Key-words:** *composite beams; composite steel and concrete bridges.*



## **LISTA DE SIGLAS**

ACI – American Concrete Institute

ASCE – American Society of Civil Engineers

ASSHO – American Association of State Highway Officials

ASSHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

CBCA – Centro Brasileiro de Construção em Aço

CEB – Comité Euro-International du Béton

CEMACOM – Centro de Mecânica Aplicada e Computacional

CNT – Confederação Nacional do Transporte

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte

EUROCODE – European Committee for Standardization

LRFD – Load and Resistance Factor Design

NBR – Norma Brasileira

## LISTA DE SÍMBOLOS

### I – LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS

$E_{ci}$  – módulo de elasticidade tangente aos 28 dias

$E_{cs}$  – módulo de elasticidade secante

$RH$  – umidade do ambiente (%)

$T$  – temperatura do ambiente (°C)

$F_{d,ult}$  – valor de cálculo para combinações últimas

$F_{G_i,k}$  – valor característico das ações permanentes

$F_{Q1,k}$  – valor característico da ação variável considerada principal

$F_{Q_j,k}$  – valor característico das ações variáveis

$F_{d,ser}$  – valor de cálculo para cargas em combinação de serviço

### II – LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS

$f_y$  – tensão de escoamento

$f_u$  – tensão de ruptura

$a, b$  – parâmetros da curva dos conectores

$f_{ck}$  – resistência à compressão característica do concreto

$f_{ctm}$  – resistência à tração uniaxial do concreto

$t$  – idade do concreto

$m$  – número de intervalos de tempo em uma década

$h$  – espessura fictícia da peça de concreto (mm), dada pela área da seção transversal dividido pelo perímetro da seção que está exposto à atmosfera

$s$  – fator dependente do tipo de cimento, 0,38 para endurecimento lento, 0,25 para endurecimento normal a rápido e 0,20 para endurecimento rápido e cimento de alta resistência

$b_{ef}$  – largura efetiva da laje

$b_c$  – largura geométrica da laje

### III – LETRAS GREGAS MINÚSCULAS

$\sigma_s$  – tensão em um ponto qualquer após o patamar de escoamento e antes da ruptura

$\varepsilon_s$  – deformação para tensão  $\sigma_s$

$\sigma_c$  – tensão no concreto

$\varepsilon_c$  – deformação do concreto

$\varepsilon_{cu}$  – deformação de compressão limite para o concreto

$\gamma$  – parâmetro de viscosidade do concreto

$\sigma$  – tensão atuante

$\phi(t - t')$  – coeficiente de fluência

$\phi_0$  – coeficiente de fluência devido à idade de aplicação da carga (CEB-FIP-90)

$\beta_c(t, t')$  – coeficiente que descreve a fluência devido ao tempo de aplicação da carga (CEB-FIP-90)

$\phi_{RH}$  – coeficiente devido umidade do ambiente (CEB-FIP-90)

$\alpha$  – fator relacionado com o tipo de cimento, -1 para endurecimento lento, 0 para endurecimento normal a rápido e 1 para endurecimento rápido e cimento de alta resistência

$\beta_H$  – fator devido umidade do ambiente

$\gamma_{Gi}$  – coeficiente de ponderação das forças permanentes

$\gamma_q$  – coeficiente de ponderação das forças variáveis

$\Psi_{0j,ef}$  – fator de redução para as demais ações variáveis

$\Psi_{2j}$  – fator de redução (adimensional)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS.....	22
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	23
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>25</b>
<b>3 NORMAS DE CÁLCULO.....</b>	<b>39</b>
3.1 NBR 8800/2008.....	39
3.2 AASHTO-LRFD/2012.....	40
3.3 EUROCODE.....	47
3.4 NBR 16694/2020.....	49
<b>4 DESCRIÇÃO DO CASO.....</b>	<b>51</b>
4.1 ESTRUTURA EXISTENTE.....	51
4.2 ESTRUTURA AMPLIADA.....	54
<b>5 ABORDAGEM ANALÍTICA.....</b>	<b>65</b>
5.1 PONTE SOBRE O RIO ARATAÚ - ESTRUTURAÇÃO.....	65
5.2 SUPERESTRUTURA.....	66
5.3 DIMENSIONAMENTO ANALÍTICO.....	87
<b>6 MODELO VIMIS.....</b>	<b>107</b>
6.1 ARQUIVO DE DADOS – VIMIS.....	107
6.2 MODELOS ELABORADOS.....	109

6.3 ANÁLISE NÃO-LINEAR.....	110
6.4 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	113
6.5 CARREGAMENTOS.....	116
6.6 RESULTADOS ELU – LINEAR ELÁSTICA.....	117
6.7 RESULTADOS ELU – NÃO-LINEAR.....	121
6.8 RESULTADOS ELS – LINEAR ELÁSTICO.....	122
6.9 RESULTADOS ELS – NÃO LINEAR COM FLUÊNCIA E RETRAÇÃO.....	124
<b>7 DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>126</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>132</b>
<b>APÊNDICE A – VERIFICAÇÃO DAS VIGAS DE AÇO.....</b>	<b>136</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No cenário mundial é fato que o transporte de cargas via modal rodoviário se tornou fundamental no desenvolvimento econômico e social das sociedades. No Brasil a frota de caminhões apresentou um crescimento de 77% no período de 2002 a 2017, fechando o ano com 2,6 milhões de caminhões conforme anuário de 2017 da Confederação Nacional do Transporte. O transporte de pessoas, mercadorias, cultura, é parte do dia a dia das pessoas, nesse cenário as pontes têm um papel fundamental, pois são elas que permitem a conexão entre cidades, estados e países.

Essas obras de arte especiais (OAE), como são conhecidas as pontes e os viadutos na engenharia de estruturas, uma vez executadas, carecem de manutenção constante com o objetivo de garantir o desempenho estrutural. Com a evolução da frota rodoviária, as cargas por eixo são alteradas constantemente, o que torna necessário o acompanhamento do desempenho dessas estruturas frente as novas cargas.

Parte das obras de arte existentes no Brasil são pontes e viadutos em estruturas mistas, onde a laje de concreto armado é solidarizada com os perfis de aço por meio de conectores de cisalhamento conforme figura 1.

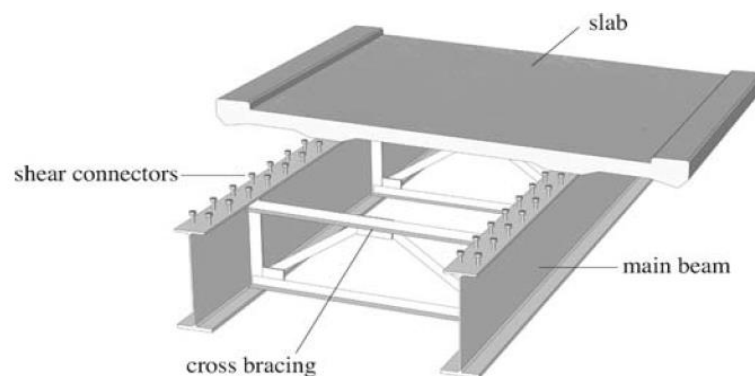


Figura 1. Seção mista de alma cheia. Tradução: *Slab* (Laje), *Main beam* (Viga Principal), *Cross Bracing* (Travamento Transversal), *Shear Connectors* (Conectores de cisalhamento) (Lebet et al, 2013)

Sua aplicação teve uma difusão internacional após o fim da Segunda Guerra Mundial, num cenário de escassez de recursos e grandes reconstruções a serem realizadas, foi necessário tornar mais efetiva a contribuição de cada material. No caso de vigas mistas, o concreto com ótima resistência à compressão e o aço com excelente desempenho à tração, essa solução racional é alcançada.

Conforme Nakamura e Collin (2010), outra razão que ajudou na popularização de estruturas mistas é o fato dos perfis de aço sozinhos serem autoportantes suportando as cargas de serviço, como por exemplo a montagem de formas, reduzindo assim o tempo de execução da obra. De Nardin e Souza (2008) mostram também que a utilização de elementos mistos como ferramenta de análise estrutural amplia de maneira considerável o conjunto de soluções possíveis em concreto armado e em aço. Na figura 2 podemos ver alguns exemplos de vigas mistas com perfis de alma cheia, tubulares e casteladas.

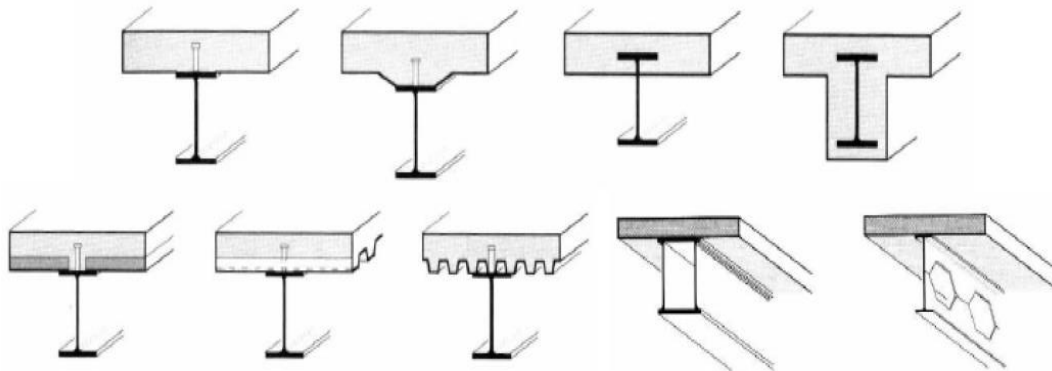


Figura 2. Exemplos de Vigas Mistas (FERRAZ, 2009)

A evolução das resistências dos aços estruturais, a melhora da capacidade industrial de fabricação de chapas de aço de diversas medidas e espessuras, o advento da solda industrial de alta qualidade, a automatização dos equipamentos de transporte na indústria, a facilidade de transporte e içamento destes elementos de aço, são os fatores conforme Lebet e Hirt (2013) que tornaram as pontes mistas, especialmente pontes com vigas de alma cheia, a solução mais difundida no universo de pontes de curto e médio vão nas últimas décadas, conforme pode-se observar na figura 3, que apresenta uma relação entre o tipo de solução estrutural e o intervalo de vãos livres típicos de cada solução.

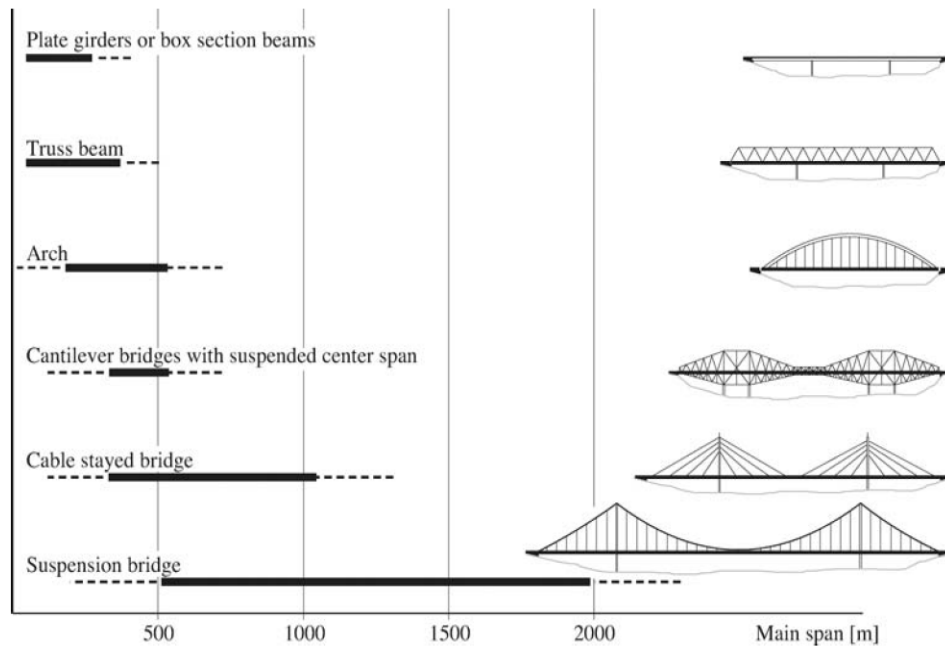


Figura 3. Relação entre as principais soluções estruturais mistas e vãos correspondentes (LEBET e HIRT, 2013)

A priori a estrutura resultante é mais leve que uma estrutura de concreto equivalente e também é mais rígida que uma estrutura de aço equivalente. Estudos comparativos de Plecknick e Ahmad (1989 *apud* Plecknick; Henriquez, 1999) com relação às cargas de pontes envolvendo tabuleiros convencionais e mistos, constataram que comparada a pontes convencionais, a estrutura mista reduz em 54% a carga permanente total da superestrutura. Ao comparar somente os tabuleiros das pontes, a diferença fica em torno de 20 a 30% menor para a carga permanente no caso de pontes mistas.

Conforme Rosignoli (2015), o peso próprio é a carga mais significativa em pontes de vão menores, o mesmo governa os custos dos equipamentos de execução, o que corresponde a grande parte do custo da obra, e ainda a redução do peso próprio fornece também uma reserva para as cargas móveis. Outro ponto importante a ser considerado é que os efeitos de deformação lenta no tempo são governados pelas cargas permanentes, assim, com a redução do peso próprio da estrutura as flechas diferidas também reduzem.

Com boa aceitabilidade e popularização, dado os pontos destacados acima, essa solução tecnológica se tornou cada vez mais aplicável em projetos de pontes e viadutos. Uma das



maiores pontes em estrutura mista construídas, com treliça de aço e laje de concreto, é a *Öresund Bridge* localizada entre Dinamarca e Suécia. A obra possui dois níveis de tabuleiro de tráfego, sendo o nível superior para quatro faixas de tráfego rodoviário e o nível inferior destinado a duas faixas de tráfego ferroviário, com vão livre da ordem de 140m (MALVEIRO, 2009). A figura 4 ilustra a seção transversal da obra. Conforme Gimsing (2010) esta obra, figura 5, é um exemplo do desenvolvimento das soluções mistas nos últimos 50 anos.

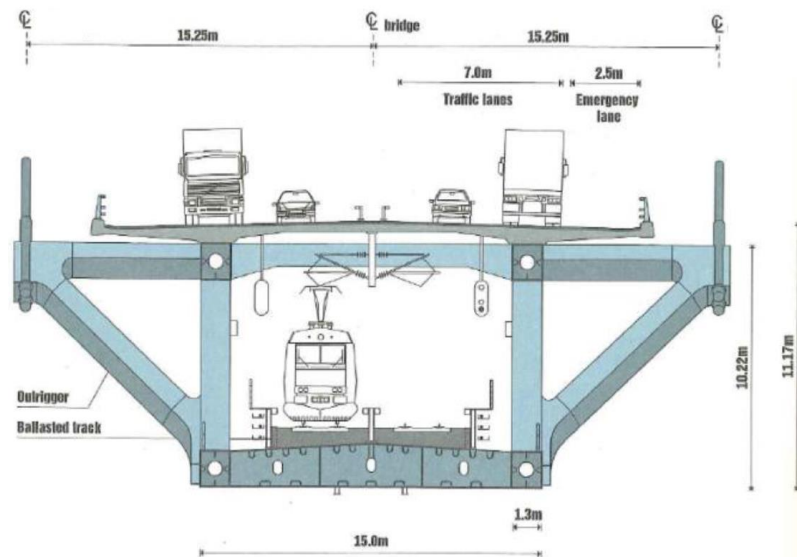


Figura 4. Seção Transversal - *Öresund Bridge* (disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-CRITICAL-ANALYSIS-OF-THE-%C3%98RESUND-BRIDGE-%2C-TO-MALM%C3%96-Hughes/a964f9ed1e5939cfcb63a066f8482cd56125b970> ; visitado em 26/01/2019 as 15:50)



Figura 5. *Öresund Bridge* (disponível em: <http://www.constructionphotography.com/Details.aspx?ID=1156&TypeID=1>; visitado em 26/01/2019 as 15:41)

Ainda na Europa, tem-se um exemplo de ponte mista com vigas de alma cheia e inércia variável, trata-se da ponte sobre o Rio Oise, na França, com extensão de 205 m, sendo um vão central sobre o Rio de 105m e dois vão extremos de 50 m, que é apresentada na figura 6.



Figura 6. *Oise Bridge* (MULLER, 1999)

Nos Estados Unidos as primeiras publicações com relação a projetos de estruturas mistas foram realizadas pela AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) no ano de 1944, fomentando assim a utilização desta solução técnica. Exemplos da aplicação desta solução são a ponte *Eel River Bridge* localizada no norte do Estado da Califórnia e executada em 1958, e a ponte *Cuyahoga River Valley Bridge* contruída em 1980 para a concessionária administradora da via em Ohio (*Ohio Turnpike Authority*), apresentadas nas figuras 7 e 8.



Figura 7. *Eel River Bridge* (ROOT, 1999)



Figura 8. *Cyahoga River Valley Bridge* (ROOT, 1999)

No Brasil as pontes em vigas de alma cheia e seção caixão foram usadas em diversas obras rodoviárias, um exemplo de grande aplicação, são os elevados da Perimetral e da Linha Vermelha, na cidade do Rio de Janeiro, com consumo de aço da ordem de 25.000 e 31.000 toneladas de aço, respectivamente. A figura 9 apresenta, em fase de execução, as obras citadas.



Figura 9. (a) Elevado da Perimetral - (b) Elevado da Linha Vermelha (PINHO, 2007)

Durante o governo Médici (1969 a 1974), com o Programa de Integração Nacional (PIN), a implantação da BR-230 com extensão de 4000 km, conhecida como Rodovia Transamazônica, foi uma das prioridades para a gestão da época e carecia de grandes obras de infraestrutura, entre elas as pontes para cruzar os diversos braços de água típicos da região Norte do país. Parte dessas obras de arte especiais foram executadas em estrutura mista com vigas de alma cheia

soldadas, dada a facilidade de transporte das vigas pré-fabricadas. As pontes sobre o Rio Puraquê e sobre o Rio Anapú são exemplos da aplicação desta solução técnica na região.



Figura 10. Ponte sobre o Rio Puraquer

No cenário mundial uma realidade que afeta tanto os países desenvolvidos quanto os países em desenvolvimento é o envelhecimento da infraestrutura e a necessidade de manter um nível mínimo adequado de conservação destas, principalmente das obras de arte especiais. A figura 11 apresenta a proporção entre investimentos em novas estruturas e investimentos em manutenção realizados por países da Europa e Ásia.

Country	New structure works	Maintenance and repair works	Total construction works
Japan*	52,5 trillion Yen (83%)	10,7 trillion Yen (17%)	63,2 trillion Yen (100%)
Korea*	116,8 trillion Won (85%)	21,1 trillion Won (15%)	137,9 trillion Won (100%)
France*	85,6 billion Euro (52%)	79,6 billion Euro (48%)	165,2 billion Euro (100%)
Germany*	99,7 billion Euro (50%)	99,0 billion Euro (50%)	198,7 billion Euro (100%)
Italy	58,6 billion Euro (43%)	76,8 billion Euro (57%)	135,4 billion Euro (100%)
UK*	60,7 billion Pounds (50%)	61,2 billion Pounds (50%)	121,9 billion Pounds (100%)
Switzerland**	29,1 billion Francs (62%)	17,9 billion Francs (38%)	47,0 billion Francs (100%)

Notes: (\*) All the figures are for Year 2004, except for Italy Year 2003, (\*\*) Year 2009

Figura 11. Manutenção e trabalhos de reparo em diferentes países. (BAKHOUM e SOBRINO, 2010)

Os Estados Unidos possuem aproximadamente 614.387 pontes com 25% destas com mais de 50 anos de vida e um total de 56.007 pontes classificadas como estruturalmente deficientes, necessitando para reabilitação destas estruturas um montante da ordem de \$123 bilhões, conforme apresentado no relatório do ASCE (*American Society of Civil Engineers*) de 2016. Na Europa a realidade da Espanha aponta que é necessário um investimento de 6.600 milhões de Euros para conservação da sua rede de infraestrutura, onde as pontes estão englobadas, conforme relatório da AEC (*Asociación Española de la Carretera*).

O Brasil enfrenta a mesma realidade, conforme Carvalho (2019) o Brasil possui um sistema rodoviário com grande parte das pontes construídas antes de 1984. Projetos estes realizados conforme recomendações da antiga NB-6 (1982). Apesar das pontes não terem completado ainda um ciclo de vida de 50 anos, previsto em normas e projetos, a sua capacidade de carga é inconsistente com a realidade das cargas do tráfego atual. No relatório publicado pela CNT (Confederação Nacional do Transporte) em 2018 é apresentado a falta de investimento como principal causa das péssimas condições que a infraestrutura rodoviária brasileira apresenta. Uma estimativa para a correção de problemas mais urgentes, envolvendo pontes em péssimo estado ou com impossibilidade de tráfego, prevê a necessidade de um investimento de R\$ 48,08 bilhões.

Além da falta de investimento na manutenção e reabilitação das pontes existentes, outro fator chave que afeta a vida útil dessas estruturas é que elas não estão dimensionadas adequadamente para a realidade dos carregamentos e a frequência de passagem atuais, sendo que muitas foram dimensionadas para as cargas da antiga norma de pontes NB-6 que utilizava o TB30 como veículo tipo. A legislação atual, conforme resoluções do CONTRAN, admitem que o peso máximo total e o peso máximo total combinado que o veículo pode transmitir ao pavimento seja de 450kN, sendo por lei permitido uma folga de 5% alegando-se falta de precisão das balanças.

Os carregamentos móveis para pontes foram revistos na NBR 7188 (2013) onde o trem-tipo de projeto é o TB45 (450kN), maior que o TB30 (300kN) adotado na antiga NB6. Isso demonstra as dificuldades e deficiências que os projetos nacionais enfrentam tanto para estruturas novas como para projetos de reabilitação e reforço de pontes mistas existentes.

A realidade da falta de investimento em manutenção e reabilitação das obras de arte especiais e o risco de colapso destas estruturas ganhou grande ênfase nos debates internacionais após o

desabamento da ponte Morandi na cidade de Genova (Itália) com um saldo de 43 mortos. A ponte colapsada é apresentada na figura 12.



Figura 12. Colapso da ponte Morandi, Gênova-Itália (Disponível em: <https://www.nytimes.com/interactive/2018/09/06/world/europe/genoa-italy-bridge.html>, acessado em 10/03/19 as 17:56).

No Brasil os colapsos totais ou parciais de pontes e viadutos também são uma realidade. A obra analisada neste estudo, a ponte mista sobre o rio Arataú, durante sua operação sofreu dois colapsos, o primeiro em agosto de 2014, neste caso a obra sofreu uma intervenção paliativa com o objetivo de liberar a mesma para operação normal. O segundo colapso ocorreu em novembro de 2015, devido ao tráfego de um caminhão carregado de madeira, com excesso de carga estimada em 90 toneladas, impossibilitando o uso da estrutura até a presente data, conforme pode-se ver na figura 13.



Figura 13. Colapso ponte sobre rio Arataú (Disponível em: <http://g1.globo.com/pa/para/noticia/2015/12/ponte-sobre-o-rio-aratau-no-para-desaba-de-novo-um-ano-apos-reparo.html>, acessado em 10/03/19 as 18:09).

Para a reabilitação e ampliação desta obra foram aplicadas no projeto as recomendações normativas das normas anteriormente citadas, sem a consideração da NBR 16694 (2020). Porém uma análise simplificada da estrutura pode não ser suficiente nesta situação que envolve materiais de idades e estados de tensões diferentes. Tendo em vista essas limitações, o presente trabalho tem como proposta uma análise mais detalhada via elementos finitos da estrutura mista em questão.

## 1.1 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

Dada a grande necessidade de recuperação e readequação das estruturas de obras de arte especiais em estruturas mistas, esse estudo de caso busca apresentar uma abordagem de projeto embasada pelos critérios normativos vigentes, e avaliar a mesma frente a análises computacionais com o método dos elementos finitos. Busca também contribuir com a contextualização do assunto, analisar e questionar procedimentos normativos e difundir algumas das soluções possíveis para este tipo de caso.

As recuperações de pontes em estruturas mistas têm grande potencial de aplicabilidade, sendo que além de aproveitar os materiais (aço e concreto) de forma eficiente, geram pouca intervenção no ambiente, possuem capacidade de execução com controle industrial e rápido, apresentam grande capacidade de carga e bom desempenho estrutural.

Assim, os objetivos deste trabalho estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

### 1.1.1 Objetivo principal

O objetivo principal desta dissertação é apresentar o processo de dimensionamento e verificação dos estados limites último e de serviço da ponte sobre o rio Arataú. Para isso é utilizada uma abordagem técnica de projeto embasada por critérios normativos, uma análise simplificada com modelo unidimensional de barras através do *software* STRAP 2013 e por fim uma análise tridimensional mais elaborada baseado no método dos elementos finitos utilizando o programa VIMIS (VIga MISta) desenvolvida no CEMACOM.

### 1.1.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- a) o entendimento do comportamento da estrutura existente reforçada e ampliada;
- b) obter os deslocamentos diferenciais das vigas existentes e novas;
- c) elaborar ferramenta de verificação estrutural para vigas mistas de alma cheia soldadas,
- d) desenvolvimento de bibliografia técnica nacional de análise de pontes em vigas mistas.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 7 capítulos, além do anexo A, que apresenta as verificações das vigas mistas para a abordagem analítica.

No primeiro capítulo é apresentado um panorama e uma contextualização da utilização de estruturas mistas, sua evolução e difusão ao longo dos anos. É abordado também a realidade nacional e mundial com relação a necessidade de investimento em manutenção e readequação de estruturas de obras de arte especiais e as consequências da negligência deste fato. Por fim são explanados a justificativa e os objetivos do trabalho.

No capítulo 2 é apresentado uma revisão bibliográfica que destaca algumas das soluções de readequação e ampliação de estruturas existentes mais difundidas no meio técnico. São apresentados diversos exemplos extraídos de literatura internacional e de práticas de projetos regionais.

O terceiro capítulo faz uma revisão dos principais critérios normativos aplicados em projetos de pontes em vigas mistas. São abordados critérios da NBR 8800, ASSHTO, EUROCODE e da norma de pontes mistas brasileira NBR 16694.

O quarto capítulo apresenta a descrição do caso, destacando a situação atual, os levantamentos necessários para o cadastramento da estrutura existente e projeto de alargamento e a geometria final da obra.

O quinto capítulo apresenta a abordagem analítica de projeto. Ele é descrito em formato de memória de cálculo para a superestrutura, apresentando um fluxograma de preparação dos dados, tratamento dos carregamentos móveis, análise das envoltórias de esforços com a consideração das fases construtivas e verificação estrutural dos elementos da superestrutura.



Apresenta também a ferramenta desenvolvida para verificação estrutural de vigas mistas de alma cheia, soldadas, para pontes.

O sexto capítulo apresenta a elaboração dos modelos de análise das vigas mistas em elementos finitos. Apresenta-se a definição da malha definida, os carregamentos considerados, as análises ELU e ELS, e os resultados obtidos.

No sétimo capítulo apresenta-se os critérios e resultados das análises, realiza-se as comparações e comentários sobre os resultados e expõem-se as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o aumento da frota de caminhões e a crescente demanda por readequação das obras de arte especiais à nova realidade modal, a abordagem de reforço e reabilitação, para pontes de aço, do ponto de vista econômico e sustentável, tem se tornado cada vez mais uma opção prevalente sobre a alternativa de demolição e reconstrução da estrutura.

É necessário aqui esclarecer as diferenças conceituais entre reforço e reabilitação. Conforme Cheng et al (2014), reforço estrutural tem como objetivo aumentar a capacidade de carga de uma estrutura existente, possibilitando condições de serviço maiores que as da estrutura original. A reabilitação envolve os processos necessários para restabelecer a capacidade de carga original da estrutura e possibilitam também uma vida útil maior que a estrutura original.

Na literatura tem-se diversos métodos de reforço e reabilitação apresentados que são aplicados em pontes mistas de aço e concreto. Uma das técnicas de reforço com grande utilização no meio técnico, no caso de vigas de aço, é a aplicação de chapas coladas externamente. O método consiste em aderir chapas adicionais nas faces externas do elemento estrutural a ser reforçado. O correto funcionamento desta técnica depende do material utilizado para efetuar a colagem da chapa de reforço e o estado de carregamento considerado no ato da execução. O adesivo estrutural deve ser capaz de transferir as tensões do elemento estrutural ao reforço adicional. Conforme Eberline et al (1988), as resinas à base epóxi são mundialmente aplicadas, dada sua compatibilidade com os materiais e fácil aplicação.

No Reino Unido a primeira aplicação desta solução foi em 1975 no reforço de quatro pontes localizadas em Quinton na rodovia M5 (Raithby, 1982). Uma verificação no projeto realizada em 1973 indicou a incapacidade dessas pontes de fornecer níveis de serviço adequado para casos de veículos pesados. As pontes em concreto armado, com laje alveolar contínua de três vãos, com vão central de 27.4m e vãos laterais com 17m, foram reforçadas com a colagem de chapas de aço externas. Antes e após a realização dos reforços foram executados testes de carga estáticos e dinâmicos nas obras, todos realizados nas primeiras horas da manhã com o objetivo de minimizar a interferência do efeito térmico.

Em laboratório foram testados modelos em escala, com as mesmas resinas e aços utilizados na obra, com controle térmico. Ambos ensaios, no local e em laboratório, mostraram que o reforço

com chapas coladas é uma boa opção para aumento da rigidez a flexão e a diminuição da abertura de fissuras. As recomendações para o uso desta técnica fazem uma ressalva quanto aos efeitos de longa duração, onde pode-se ter uma perda de capacidade portante da estrutura devido a falha da resina adesiva com tempo. Na figura 14 pode-se observar o vão lateral de um dos viadutos que foi reforçado.

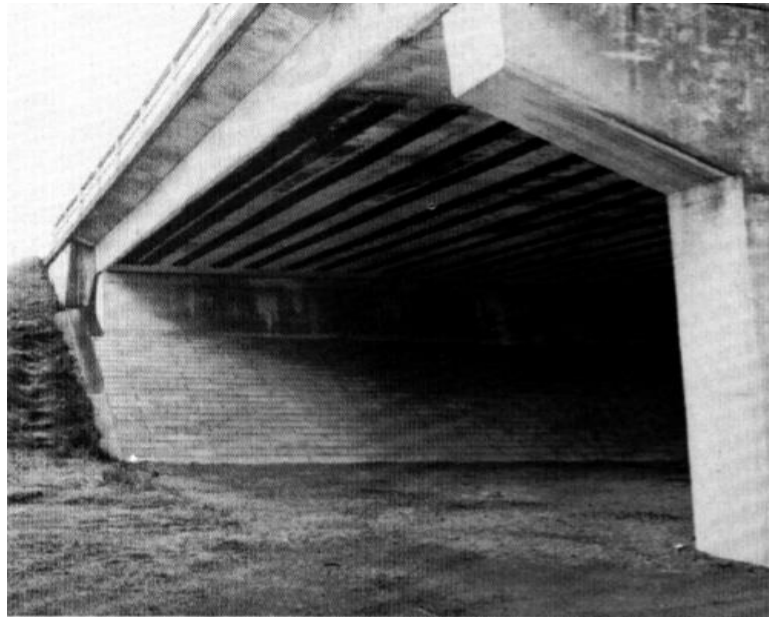


Figura 14. Vão Lateral viaduto na M5  
(RAITHBY, 1982)

Conforme Holladay e Cadei (2002), com o tempo a aplicação de chapas coladas com adesivo estrutural apresentou algumas dificuldades e desvantagens em sua aplicação, como as incertezas relacionadas com a durabilidade devido à corrosão, o fato de que as chapas necessitam uma preparação da superfície antes da colagem, a necessidade de uma espessura mínima de chapas para evitar distorções nos elementos quando transportados e a necessidade de escoramento para manter as chapas no lugar até a cura do adesivo estrutural.

Uma opção a esta técnica tem sido a aplicação de reforços de chapas externas de aço com a conexão realizada através de solda, parafusos ou rebites. A adição de chapas à seção transversal fornece um aumento de inércia, rigidez e resistência à fadiga, mantendo em geral a geometria original da peça. Algumas possibilidades de reforço são apresentadas na figura 15.

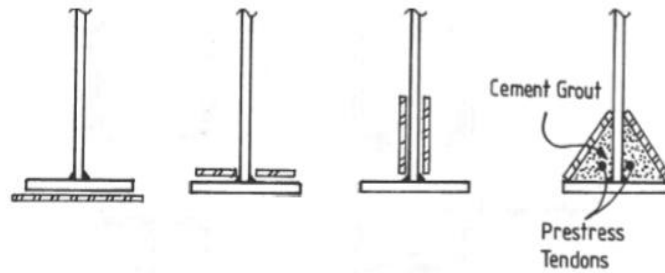


Figura 15. Exemplos de Reforço com adição de chapas. Trad.: *Cement Grout* (Graute de Cimento), *Prestress Tendons* (Cabos protendidos)  
(DEMIR, 2011)

Para uma viga contínua, não é necessário que toda a peça seja reforçada. Conforme as análises realizadas e os resultados obtidos na verificação estrutural do elemento, pode-se projetar um reforço objetivo, como ilustrado na figura 16.

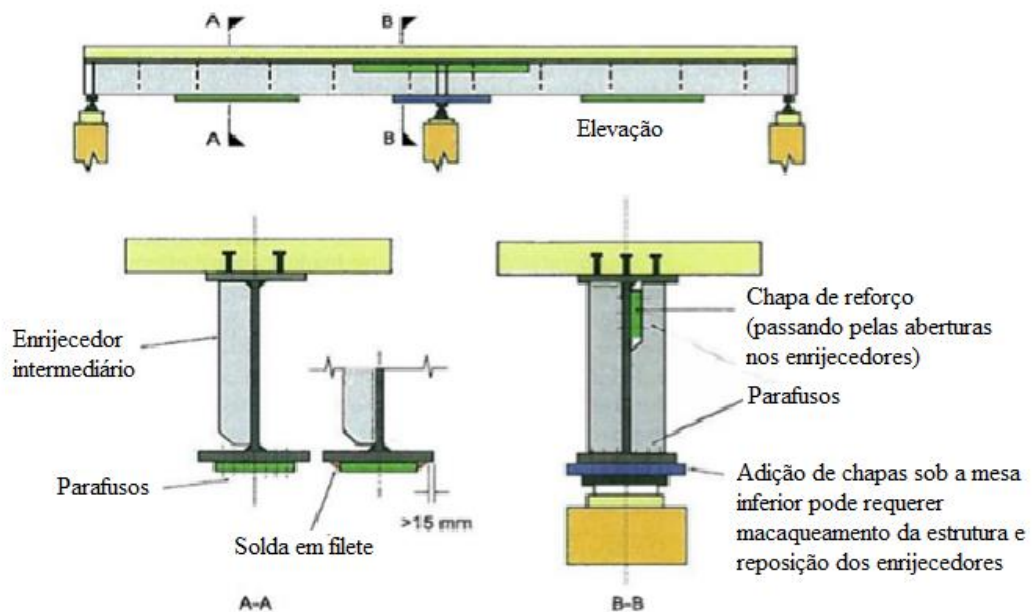


Figura 16. Reforço com chapas soldadas e parafusadas  
(Baseado em DEMIR, 2011)

Existe também a possibilidade de aplicar esta técnica de reforço para ampliar a resistência da seção transversal alterando a geometria inicial. A figura 17 apresenta exemplos de reforços com alteração da geometria original.

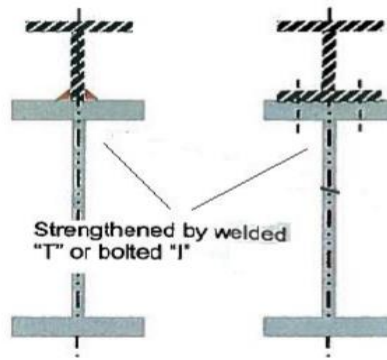


Figura 17. Exemplos de Reforço com alteração da geometria inicial.  
Trad.: Reforçado com seção T soldada ou seção I parafusada. (DEMIR, 2011)

A técnica de adição de chapas, conectadas através de soldas, rebites, parafusos ou adesivo estrutural, tem sido usada com sucesso no meio técnico (HOLLADAY e CADEI, 2002). Porém, conforme Demir (2011), a experiência tem mostrado que esses métodos necessitam de mão de obra especializada e tem custo elevados associados à sua execução, sendo que exigem equipamentos especializados para acessar os pontos de reforço e fornecer as chapas de aço que serão aplicadas como reforço, assim o tamanho e espessuras das chapas também é limitado devido ao peso próprio destes elementos. Em geral quando aplicado a viadutos, o tráfego sob o viaduto é bloqueado para a execução do trabalho e no caso de pontes a intervenção do tráfego pode ser parcial, uma via apenas. Esses fatores tornam a aplicação destas técnicas sensíveis à disponibilidade de mão de obra e as condicionantes da localização da obra.

Com o avanço da indústria de tecnologia dos materiais compósitos e a necessidade de se adotar materiais mais duráveis com melhor custo benefício, os métodos de reforço e reabilitação avançaram na utilização de materiais polímeros reforçados com fibra FRP (*Fiber Reinforced Polymers*). Conforme relato apresentado por Keller (2003), a partir de 1996 o uso de materiais polímeros reforçados com fibra apresentou acelerado crescimento, sendo exemplos de grande aplicação os EUA que em 1995 destinaram cerca de 2 bilhões de dólares para o programa de reabilitação de pontes, onde 40% deste valor foi aplicado em soluções que utilizavam materiais FRP. Outro dado que apresenta a crescente importância dos materiais compósitos na indústria civil é o fato de que nos meados dos anos 80, existiam cerca de 30 centros de estudos no mundo desenvolvendo e estudando esses materiais, e nos anos 2000 esse número passou de 300 centros.

Holladay e Cadei (2004) apresentaram uma lista das principais vantagens que a utilização dos materiais FRP trazem em relação aos métodos tradicionais com chapas coladas, como, a possibilidade de que as fibras podem ser manipuladas e introduzidas em certas posições, com volumes e direções fracionadas, com o objetivo de obter a máxima eficiência, possibilitando chapas com menores espessuras e dimensões. Como resultado os materiais FRP tem menor peso próprio, maior rigidez e resistência. O transporte, manuseio durante o processo de aplicação, são mais fáceis e requerem menos fôrmas e escoramentos para a execução, reduzindo assim o custo operacional deste sistema. Porém é preciso ressaltar que o custo de aquisição dos materiais FRP são entre 4 a 20 vezes maior que o custo das chapas de aço em termos de unidade de volume (R\$/m<sup>3</sup>).

As aplicações dos materiais FRP podem ser realizadas com objetivo de melhorar a resistência à tração, flexão, cisalhamento, rigidez estrutural e ainda aumento da resistência à fadiga. As fibras com maior aplicação técnica são as de vidro, carbono e aramida. A tabela 1 apresenta as principais propriedades desses três materiais.

Tabela 1 – Propriedades físicas

	Carbon fibre			Aramid fibre	E-glass fibre
	High-strength (HS)	High-modulus (HM)	Ultra-high modulus (UHM)		
Modulus of elasticity (GPa)	230–240	295–390	440–640	125–130	70–85
Strength (MPa)	4300–4900	2740–5940	2600–4020	3200–3600	2460–2580
Strain to failure (%)	1.9–2.1	0.7–1.9	0.4–0.8	2.4	3.5
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1800	1730–1810	1910–2120	1390–1470	2600
Coefficient of thermal expansion (parallel to fibre), (10 <sup>-6</sup> /°C)	-0.38	-0.83	-1.1	2.1	4.9

Trad.: *Strength* (Tensão de Ruptura), *Strain to failure* (Alongamento na ruptura), *High-strength* (Alta Tensão de Ruptura), *High-modulus* (Alto Modulo de Elasticidade) (DEMIR, 2011)

As chapas de fibra de carbono são as com maior aplicação na indústria da engenharia civil, visto que o carbono apresenta maior resistência aos ambientes agressivos e tem grande disponibilidade no mercado (Bjorklund e Hoglind, 2007). Um avanço da técnica de chapas

coladas é a aplicação de protensão, que é aplicada ao reforço com fibras alongando-se as chapas e ancorando as mesmas nos extremos das chapas. Com a protensão se obtém um nível de serviço maior, com diminuição de fissuras e alívio de tensões nas armaduras passivas tracionadas e aumento das tensões de compressão em pontos críticos sujeitos a fadiga. Também existe um melhor aproveitamento do material da chapa de fibra de carbono, sendo que a mesma tem grande resistência à tração. Na figura 18 ilustra o exemplo de uma viga de aço reforçada com chapas de fibra de carbono pré tensionadas, onde CG é centro geométrico da viga de aço, NA linha neutra do perfil reforçado,  $y_{NA}$  distância da NA até o bordo inferior da mesa de aço e  $y_{CG}$  a distância do centro geométrico do perfil de aço até a borda da mesa inferior,  $F$  a força de protensão com uma excentricidade  $e$ .

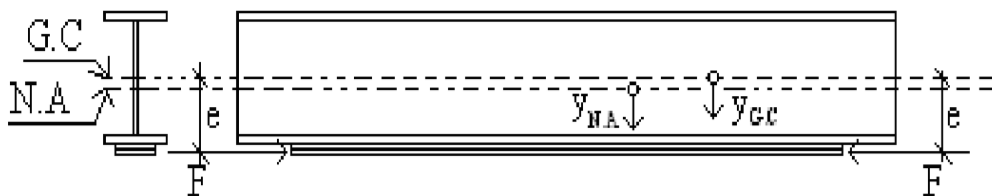


Figura 18. Reforço com CFRP pré tensionada  
(BJORKLUND e HOGLIND, 2007)

Um método aplicado em projetos de reforço e reabilitação é a pós-tensão externa com cabos e barras roscadas. Conforme Klaiber e Wipf (1999), esse método vem sendo aplicado desde 1950 com resultado positivo em vários países. A pós-tensão externa pode ser aplicada com objetivos diversos como alívio de tensões, minimizar os efeitos da fadiga, reduzir deslocamentos excessivos, alterar comportamento básico de uma ponte de vãos isostáticos para vãos contínuos e ainda aumentar a resistência última do elemento estrutural. Existem também grandes vantagens em relação aos processos executivos desta técnica como baixa ou nenhuma interrupção do tráfego da ponte e pouca preparação de campo para a instalação do sistema. A figura 19 apresenta algumas configurações de cabos externos longitudinais e a figura 20 mostra um exemplo da aplicação do sistema em uma ponte mista de 34m de vão no estado de *Iowa*, nos Estados Unidos.

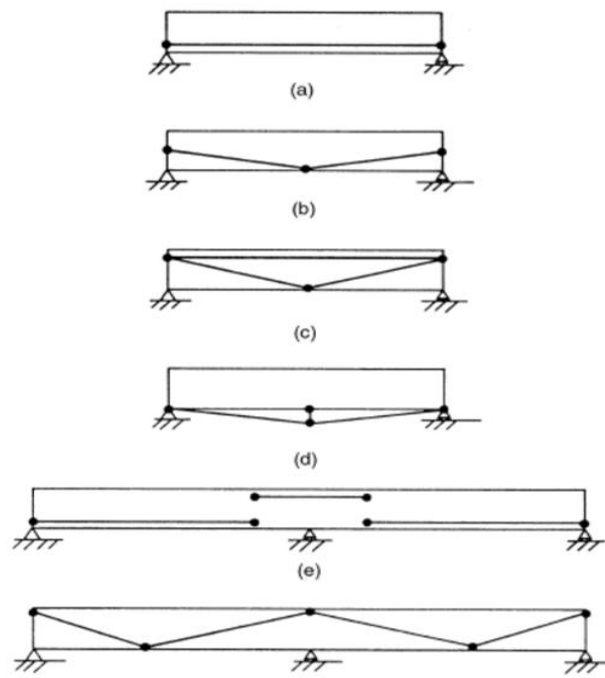


Figura 19. Configurações para aplicação da pós-tensão (KLAIBER e WIPF, 1999)



Figura 20. Ponte com vão simples reforçada com pós-tensão externa (KLAIBER e WIPF, 1999)

A aplicação da pós-tensão externa também pode ser usada para ampliar as resistências ao cisalhamento dos elementos estruturais. A figura 21 apresenta algumas configurações possíveis para reforço transversal.



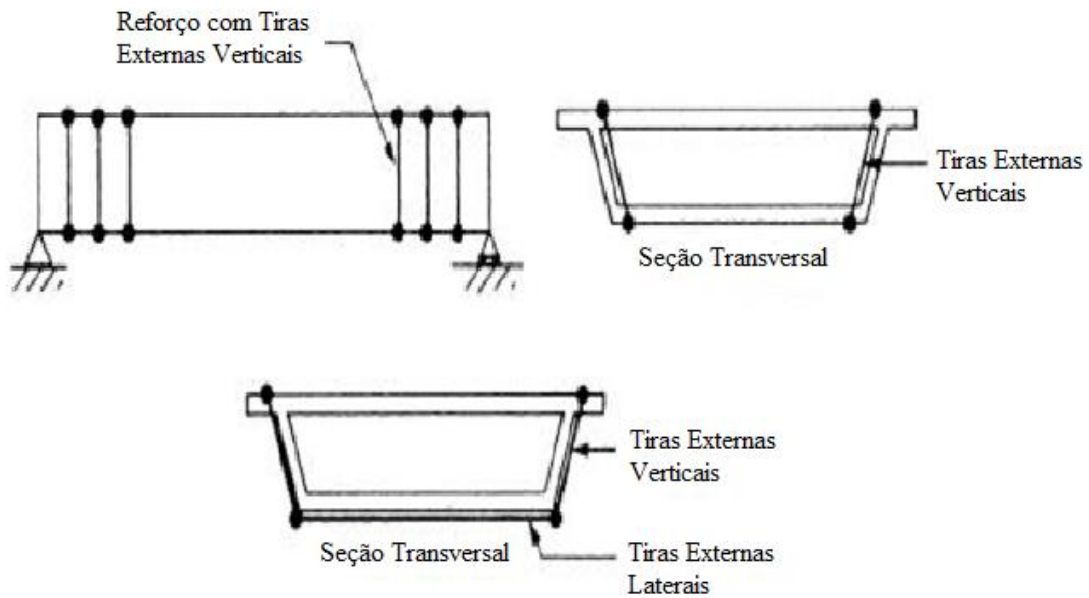


Figura 21. Pós-tensão como reforço para cisalhamento  
(Baseado em KLAIBER e WIPF, 1999)

Apesar do método de reforço com fibras de carbono pré tensionadas ser similar à protensão externa com cabos e/ou barras, o segundo método possui muito mais aplicação no meio técnico (Cheng et al, 2014). A protensão externa tem sido aplicada no reforço e reabilitação de pontes em aço e mistas desde 1950, já os registros para aplicação da técnica em pontes de concreto são de 1960. De acordo com Klaiber e Wipf (1999) a configuração (a) tem sido aplicada em várias pontes na Europa e América do Norte. A configuração (c) foi aplicada no reforço de uma ponte em aço na Checoslováquia em 1964, e a configuração (d) foi utilizada em Minnesota no ano de 1975 como reforço temporário. Já na Alemanha a configuração (e) tem sido aplicada para controle de deformações nas pontes contínuas desde 1970. Os casos citados representam a grande aplicabilidade e a efetividade desta técnica.

Uma técnica de reforço estrutural aplicada a pilares e colunas é o encamisamento (*jacketing*) destes elementos com uma superfície externa de aço ou concreto. Conforme Klaiber e Wipf (1999), esta solução de encamisamento pode ser aplicada a todo o comprimento do elemento ou apenas em seções deterioradas. Normalmente o reforço é posicionado externamente à armadura existente e é necessário dar uma continuidade entre as superfícies com idades diferentes, essa é a dificuldade que este método possui. Esta solução requer uma grande

quantidade de formas e estruturas auxiliares para sua execução. A figura 22 apresenta um reforço de um pilar com encamisamento de concreto.



Figura 22. Encamisamento de pilar  
(CHHABRA, 2013)

De acordo com Klaiber e Wipf (1999), a utilização de tabuleiros leves é uma ótima alternativa para redução significativa de peso próprio das pontes em concreto e mistas. Entre estes tabuleiros se destacam os tabuleiros em grelha de aço, preenchido ou não com concreto. Um tabuleiro em grelha com 13cm, parcialmente preenchido, tem um peso de menos da metade de um tabuleiro convencional para a mesma resistência. Na figura 23 são apresentadas as possibilidades de tabuleiros em grelha de aço.



Figura 23. Tabuleiro em grelha de aço  
(KLAIBER e WIPF, 1999)

Uma evolução dos tabuleiros em grelha são os tabuleiros exodérmicos. Conforme Klaiber e Wipf (1999), este sistema se resume a um tabuleiro pré-fabricado modular, desenvolvido em indústria com controle de qualidade, que possui uma fina camada superior de concreto sobre uma grade de aço e apresenta melhor desempenho à fadiga em relação as grelhas de aço preenchidas com concreto. Esta solução combina a resistência à compressão do concreto com

a resistência a tração do aço, resultado ótimo alcançado com estruturas mistas. A figura 24 apresenta os principais componentes de um tabuleiro exodérmico.

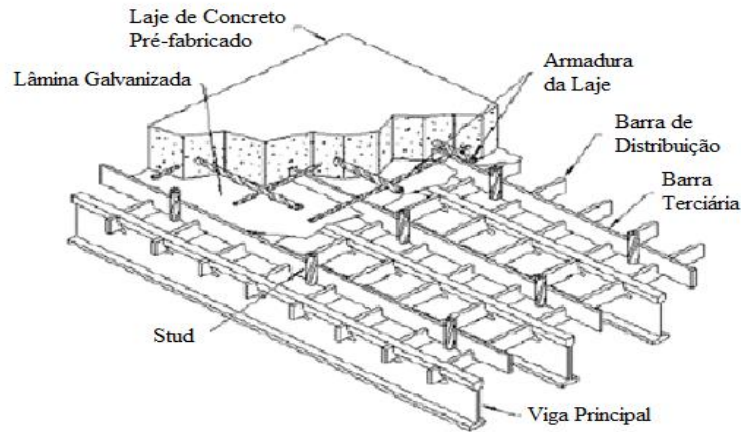


Figura 24. Tabuleiro exodérmico  
(adaptado de KLAIBER e WIPF, 1999)

Com facilidade de instalação e execução, os tabuleiros exodérmicos têm grande aplicabilidade em rodovias com grande volume de tráfego onde os trabalhos de reforço e reabilitação precisam ser executados fora dos horários de pico. Essa técnica foi empregada na ponte Driscoll (Nova Jersey – EUA) em 1984



Figura 25. Tabuleiro exodérmico, ponte Driscoll, Nova Jersey  
(DePHILLIPS, 1985)

Existe ainda a possibilidade de execução de alargamento das obras de arte com um aumento da seção transversal, com o objetivo de adaptar as mesmas para a realidade de tráfego atual. Esta técnica é aplicada em casos onde o reforço não é suficiente para resolver os problemas de capacidade de tráfego que a rodovia deve fornecer, existindo assim a necessidade de adição de faixas de rodagem e por isso a ampliação da seção transversal.

De uma forma geral, o que se realiza é a ampliação da seção transversal com elementos de mesma rigidez à flexão no caso da superestrutura e mesoestrutura. E busca-se também uma compatibilização nas soluções de fundações quanto a recalques e rotações diferenciais. Um elemento que necessita especial cuidado é a conexão entre a laje do tabuleiro existente e o novo, uma vez que a rigidez do tabuleiro influencia diretamente na distribuição transversal de cargas para os elementos adjacentes.

Um exemplo de aplicação desta solução é a ponte de *Île-Charron* na rodovia 25, na região de Montreal no Canadá. A obra foi concluída em 1967 e faz parte do percurso túnel-ponte *Louis-Hippolyte-LaFontaine*, que liga Montreal à margem sul do canal marítimo *Saint Laurent*, possuindo um VDM de mais de 130mil veículos.

A ponte é constituída de nove vãos sendo um vão sobre o canal de navegação em viga de aço com 67m de comprimento e os demais vãos com vigas de concreto protendido de 49m de comprimento. A mesoestrutura é composta por pilares de seção oblonga, com travessas protendidas no topo, engastados na fundação. A infraestrutura da obra é composta por blocos sobre estacas, para grande parte dos pilares, pilares embutidos em rocha, no trecho do canal de navegação, e na margem sul por diversos pilaretes em concreto armado. A figura 26 apresenta uma vista geral da ponte.



Figura 26. Vista geral da ponte (PILON; MERCIER, 2008)

A solução adotada, para a superestrutura foram vigas de aço com perfis de alma cheia e inércia equivalente à inércia das vigas existentes. Os blocos de fundação foram alargados sobre estacas apoiadas em rocha e ancorados ao bloco existente. Os pilares tiveram suas seções alargadas com concreto armado de maneira convencional, com a armadura do trecho novo ancorada na armadura do pilar existente. As travessas sobre os pilares foram prolongadas na ordem de 4m e reforçadas com um acréscimo de protensão em toda a extensão do elemento estrutural. A nova laje da porção do alargamento foi executada em concreto e protendida transversalmente. A sua execução se dava à medida que as vigas de aço eram posicionadas. A figura 27 apresenta a proposta de alargamento da estrutura.

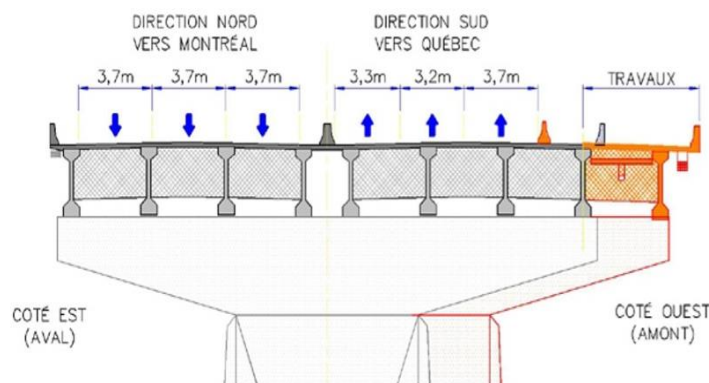


Figura 27. Proposta de Alargamento (PILON; MERCIER, 2008)

Essa solução com aumento da seção transversal foi aplicada também na adequação das obras de arte especial existentes na BR290-RS no trecho que liga a capital gaúcha à região litorânea. Devido ao aumento do fluxo intenso de veículos, principalmente nos períodos de veraneio, necessitou-se a implantação da quarta faixa de tráfego para a adequação da capacidade funcional da via.

O projeto de ampliação da obra sul, sentido Porto Alegre à Osório, do viaduto sobre a RS118 foi elaborado pelo Eng. Martin Beier com a Deltacon Engenharia. A estrutura original é constituída por 2 vãos de 19m mais 2 balanços de 4m, com extensão total de 46m e largura de tabuleiro de 13.4m. A superestrutura possui uma solução em seção caixão com 4 nervuras e altura constante de 1.25m em concreto armado moldado no local e protensão posterior. A figura 29 apresenta a seção transversal da obra sul.

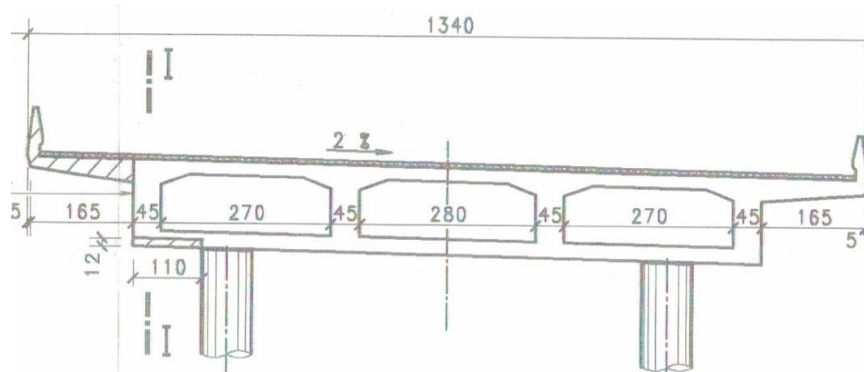


Figura 28. Seção transversal viaduto s/ RS118  
(Arquivo Deltacon Engenharia)

A obra recebeu um alargamento de 4.25m para acomodar mais uma faixa de tráfego e acostamento externo. O projeto de ampliação consistiu em acrescentar uma viga caixão pré-fabricada com protensão inicial e uma nova linha de pilares no lado interno da obra sul. A fundação já havia sido executada nos anos 1999, porém não atendia a largura necessária para o alargamento atual. Assim a fundação existente recebeu um alargamento e foi contemplada no projeto.

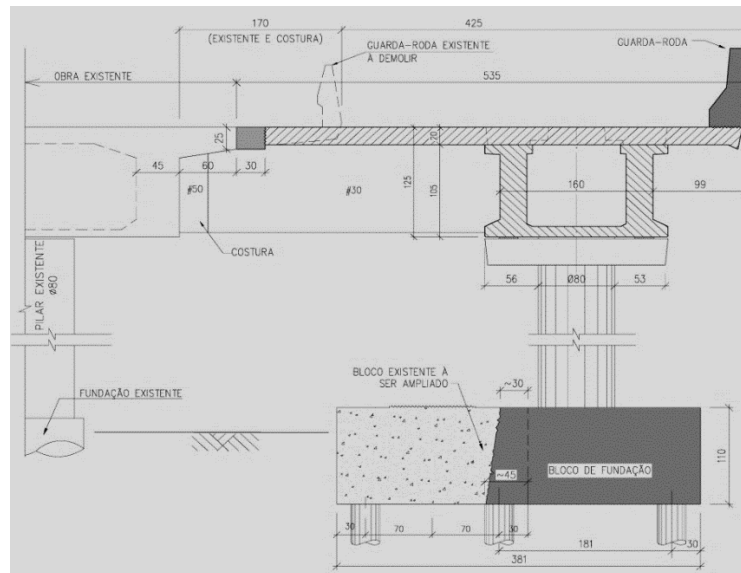


Figura 29. Ampliação viaduto s/ RS118  
(Arquivo Deltacon Engenharia)

### 3 NORMAS DE CÁLCULO

A aplicação das soluções mistas no desenvolvimento da infraestrutura nacional e internacional vem crescendo com o passar do tempo. No Brasil tem-se diversos exemplos de pontes em estrutura mista que foram executadas e ainda hoje atendem as demandas de trafegabilidade e segurança. À nível nacional foi publicada no ano de 2020 a norma NBR 16694 – Projeto de Pontes Rodoviárias de Aço e Misturas de Aço e Concreto, que aborda especificamente o projeto de pontes e viadutos em estruturas mistas, o que representa um grande ganho e avanço para a engenharia nacional.

Nesta seção são abordadas as referências normativas, nacionais e internacionais, e suas principais diretrizes para a elaboração dos projetos de pontes em estrutura mista.

#### 3.1 NBR 8800/2008

O escopo da NBR 8800 deixa claro que sua aplicabilidade é direcionada para estruturas de aço e mistas em edifícios, passarelas de pedestres e suportes de equipamentos, como pontes rolantes.

A norma apresenta os seus critérios de cálculo para estruturas mistas no seu anexo O, e limita a aplicabilidade a vigas mistas com seção de aço de perfil I simétricas ao seu eixo de flexão. É prevista também a utilização de perfis de aço em seção caixão, tubular retangular e treliças mistas, sendo necessário assim uma adaptação nas prescrições apresentadas pela norma.

No dimensionamento dos elementos mistos, biapoiados, embasado pela norma de aço é necessário que a alma da seção não seja esbelta. Limita-se assim a relação altura pela espessura da alma do perfil para que a seção possa ser considerada como compacta ou semi-compacta. A diferença principal entre as duas é a capacidade de desenvolvimento da resistência do perfil, sendo que em uma seção compacta se admite desenvolver um diagrama de tensões plásticas e uma seção semi-compacta se limita o diagrama a tensões elásticas, ambos apresentados no anexo O da referida norma.

As propriedades geométricas das seções transversais são calculadas aplicando o conceito de área equivalente do material transformado pela relação dos módulos de elasticidade longitudinais do material (aço e concreto). Nesse processo a norma considera os efeitos de longa



duração sobre o material como fluência e retração do concreto, alterando assim as propriedades geométricas da seção equivalente para casos de cargas de longa e curta duração.

A norma também estabelece critérios para definir interação completa ou parcial entre a seção de aço e a laje de concreto. A interação completa, nas seções de momento positivo, se dá caso os conectores de cisalhamento nessa região, dimensionados em estado limite último, apresentem resistência de cálculo igual ou superior à resistência resultante da parte do perfil de aço tracionado ou da resistência desenvolvida pela laje de concreto comprimida. Caso o valor da resistência seja inferior a estes limites, a interação da estrutura é considerada parcial. Cabe destacar que esse processo para a definição de conectores de cisalhamento não considera os efeitos de fadiga, uma vez que para o escopo de aplicação desta norma, edificações, as verificações à fadiga não são críticas.

Tendo em vista as limitações da aplicabilidade direta da NBR 8800 aos projetos de pontes em estrutura mista, busca-se, conforme orientação da referida norma, referências normativas estrangeiras e critérios de projeto aceitos pela comunidade técnico-científica.

### 3.2 AASHTO-LRDF/2012

A *American Association of State Highway Officials* – AASHO foi a primeira norma americana a tratar de pontes publicada em 1931. O projeto, a construção e a manutenção das pontes nos Estados Unidos ficaram sobre a responsabilidade destes departamentos, mais especificamente dos engenheiros chefes de cada departamento. Esse grupo de engenheiros de pontes foram os autores e responsáveis pela primeira publicação da norma que evoluiu para a ASSHTO. Com o tempo as publicações foram adaptadas e seu escopo ampliado com o objetivo de englobar não somente os departamentos de cada estado, mas também todos as demais autoridades e agências detentoras de pontes nos Estados Unidos.

Desde a primeira publicação, a filosofia de projeto adotada pela norma era a das tensões de trabalho admissíveis (*Working Stress Design*), abordagem essa que limitava as tensões admissíveis a uma porcentagem da tensão do material e exigia que os diversos elementos de projeto não desenvolvessem tensões superiores às admissíveis. Nos anos 1970 esta norma incorporou a filosofia de projeto dos fatores de carga (*Load Factor Design*), dado a variabilidade das cargas de vento e móveis. A última filosofia incorporada pela referida norma

foi a dos fatores de carga e resistência para projeto (*Load-and-Resistance Factor Design*) englobando assim a variabilidade das resistências dos materiais. Com isso os engenheiros tinham opções quanto a qual norma e quais critérios utilizar em seus projetos, porém, em 2007 a FHWA (*Federal Highway Administration*) e os estados estabeleceram que todos os projetos novos de pontes deviam atender as prescrições estabelecidas na ASSHTO-LRFD. Com isso os projetos de pontes passaram a ser realizados segundo o método dos estados limites últimos.

### 3.2.1 Momento Fletor Resistente

Para o cálculo das propriedades geométricas e as distribuições de tensões na seção transversal, a ASSHTO realiza a transformação da seção de dois materiais diferentes em uma seção equivalente de um material, através da relação entre os módulos de elasticidade longitudinais  $n$  ( $E_s/E_c$ ).

As relações  $n$  mudam de acordo com a natureza das cargas de utilização e as fases de construção. Para o primeiro momento, perfil de aço lançado na obra, são realizadas as verificações de resistência para as cargas de construção com as propriedades do perfil de aço somente. Após a cura da laje de concreto considera-se dois casos diferentes de resistência da seção mista, uma para o caso de cargas de curta duração (móveis, vento) e o caso de cargas de longa duração (peso próprio, sobrecarga permanente, acabamentos). A figura 30 apresenta os diferentes casos de cargas e as correspondentes relações  $n$  a serem consideradas conforme a abordagem da referida norma.


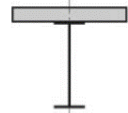
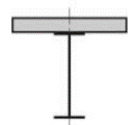

 steel	<i>Loads during erection</i> examples: self weight of the steel beam, of the concrete slab (if no temporary supports) construction loads.
 composite $n_{el} = \frac{E_a}{E_{cm}} = n_0$	<i>Short term</i> examples: traffic, temperature.
 composite $n_{el} = 3 \frac{E_a}{E_{cm}} = n_\phi$	<i>Long term</i> examples: surfacing, mechanical components, long term actions after steel-concrete connection, temporary support reactions.
 composite $n_{el} = 2 \frac{E_a}{E_{cm}} = n_s$	<i>Shrinkage or similar action effects</i> examples: support settlement and loss of prestress.

Figura 30. Relações “*n*” (LEBET; HIRT, 2013)

Com a devida relação *n* aplicada e as propriedades equivalentes calculadas para a seção transversal, faz-se a verificação da esbeltez da alma com a equação (1):

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq 3.76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (1)$$

Sendo:

$t_w$  espessura da alma do perfil de aço;

$D_{cp}$  a altura da alma comprimida para distribuição plástica;

$E$  a módulo de elasticidade do aço;

$f_y$  tensão de escoamento do aço.

E assim para os casos onde a seção é classificada como compacta, define-se a altura da linha neutra plástica do perfil e a resistência plástica da seção mista equivalente. Com o momento plástico resistente verifica-se para as combinações últimas de carga se a resistência é superior à sollicitação. A figura 31 apresenta as possíveis posições da linha neutra plástica e as forças

plásticas desenvolvidas para o equilíbrio, sendo que no Caso I a linha plástica está na alma do perfil, no Caso II a linha neutra plástica corta a mesa superior do perfil de aço e no Caso III a linha neutra plástica se encontra na laje de concreto.

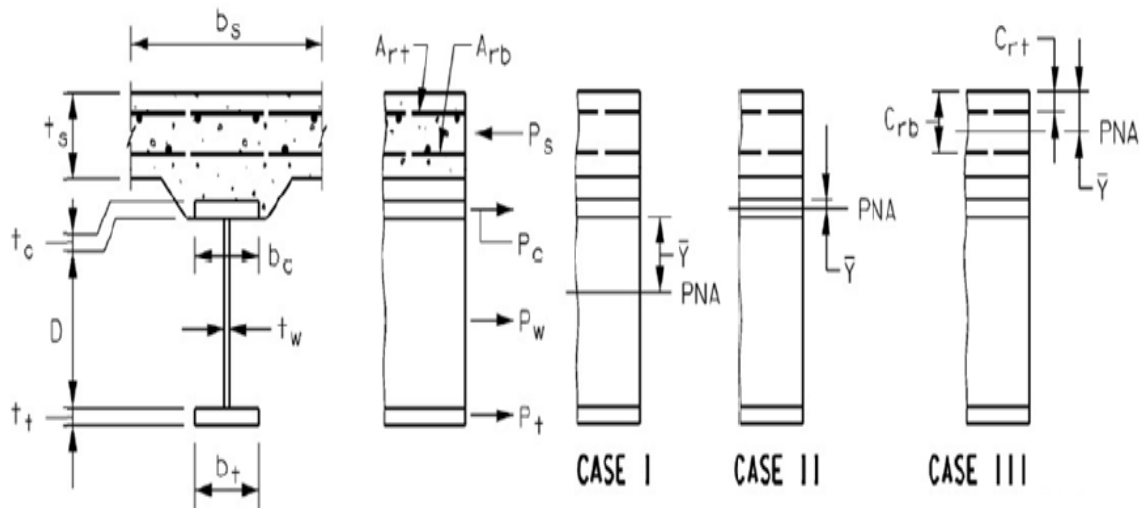


Figura 31. Forças plásticas e posições previstas para a linha neutra plástica para o equilíbrio (AASHTO, 2012)

Caso a esbeltez da alma da viga mista seja maior que o valor definido na equação 1, porém respeitando o limite dado pela equação 02.

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq \alpha_{st} \sqrt{\frac{E}{f_c}} \quad (2)$$

Sendo:

$\alpha_{st} = 6.77$  para o caso de almas sem enrijecedores longitudinais, e 11.63 para o caso de almas com enrijecedores longitudinais;

$f_c$  a tensão de compressão na alma devido às cargas majoradas.

Nesta situação a viga mista é classificada como semi-compacta e tem seu momento resistente calculado em regime elástico de tensões para cada caso de carregamento e seção equivalente

correspondente. O momento resistente total é a soma dos momentos resistentes calculados em cada situação.

### 3.2.2 Resistência ao Esforço Cortante

Semelhantemente à abordagem para cálculo da resistência à flexão, a capacidade resistente da alma da seção de aço está condicionada à esbeltez ( $\lambda$ ) da mesma que é dada pela relação entre a altura da alma e sua espessura. No cálculo da resistência ao esforço cortante existem três casos de falha que devem ser considerados:  $\lambda \leq \lambda_p$  escoamento por cisalhamento, flambagem inelástica por cisalhamento quando  $\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r$  e flambagem elástica por cisalhamento quando  $\lambda \geq \lambda_r$ , sendo que  $\lambda_p$  e  $\lambda_r$  são os limites dos regimes plásticos e inelásticos respectivamente.

No caso de almas de perfis sem enrijecedores transversais a resistência é dada ou pelo escoamento em cisalhamento, equação (3), ou pela flambagem por cisalhamento, conforme equação (4).

$$V_n = V_p = 0.58f_y \cdot h_w \cdot t_w \quad (3)$$

$$V_n = V_p = \frac{4,55 \cdot t_w^3 \cdot E}{h_w} \quad (4)$$

onde:

$h_w$  é altura da alma da seção;

$V_p$  é a resistência ao escoamento por cisalhamento;

No caso de almas de perfis com enrijecedores transversais ou longitudinais, a resistência ao cisalhamento pode ser calculada para o modo de falha com flambagem inelástica. A resistência ao cisalhamento neste caso pode ser computada somando-se a ação de viga e a ação de campo de tensão pós-flambagem ilustrada pela figura 32.

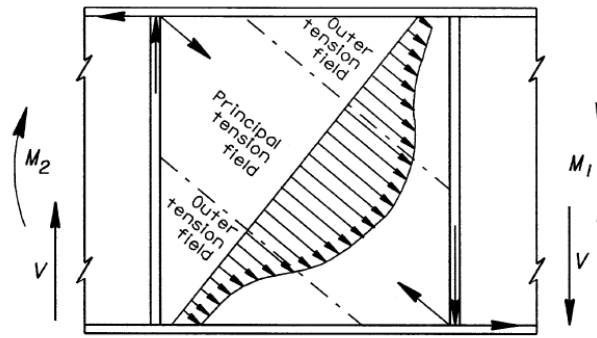


Figura 32. Ação do campo de tensões (DUAN et al. 1999)

Para que a capacidade pós-flambagem seja totalmente desenvolvida é necessário que a relação da área da alma e as áreas das mesas tracionadas e comprimidas satisfaça:

$$\frac{2h_w t_w}{(b_{fc} t_{fc} + b_{ft} t_{ft})} < 2.5 \quad (5)$$

Sendo:

$b_{fc}$  é a largura da mesa comprimida;

$t_{fc}$  é a espessura da mesa comprimida;

$b_{ft}$  é a largura da mesa tracionada;

$t_{ft}$  é a espessura da mesa tracionada.

Assim a resistência ao corte é dada por:

$$V_n = V_p \left( C + \frac{0.87(1 - C)}{\sqrt{1 + \left(\frac{d_o}{h_w}\right)^2}} \right) \quad (6)$$

em que  $d_o$  é a distância longitudinal entre os enrijecedores transversais.

Caso a relação entre a área da alma e as áreas das mesas comprimidas e tracionadas não for satisfeita, o valor da resistência ao corte é calculada como:

$$V_n = V_p \left( C + \frac{0.87(1 - C)}{\sqrt{1 + \left(\frac{d_o}{h_w}\right)^2 + \frac{d_o}{h_w}}} \right) \quad (7)$$

A relação  $C$ , entre a resistência à flambagem por cisalhamento e a resistência ao escoamento por cisalhamento, é dada por:

$$C = \begin{cases} 1 & \text{se } \frac{h_w}{t_w} \leq 1.12 \sqrt{\frac{E \cdot k}{F_y}} \\ \frac{1.12}{\frac{h_w}{t_w}} \sqrt{\frac{E \cdot k}{F_y}} & \text{se } 1.12 \sqrt{\frac{E \cdot k}{F_y}} < \frac{h_w}{t_w} \leq 1.40 \sqrt{\frac{E \cdot k}{F_y}} \\ \frac{1.57}{\left(\frac{h_w}{t_w}\right)^2} \left(\frac{E \cdot k}{F_y}\right) & \text{se } \frac{h_w}{t_w} > 1.40 \sqrt{\frac{E \cdot k}{F_y}} \end{cases} \quad (8)$$

:

$$k = 5 + \frac{5}{\left(\frac{d_o}{h_w}\right)} \quad (9)$$

em que  $k$  é o coeficiente de flambagem por cisalhamento.

### 3.2.3 Conectores de Cisalhamento

Para garantir uma ação completa da seção mista os conectores de cisalhamento são calculados para a resistir ao Estado Limite de Fadiga e necessariamente devem ser iguais ou em maior quantidade do que o número necessário para atender ao Estado Limite Último.

As combinações de fadiga consideram as entradas das cargas transientes (móveis) com seus fatores de fadiga. As propriedades da seção transversal mista são calculadas para esta verificação com a relação  $n$  para cargas de curta duração e assim calcula-se a distribuição da tensão de cisalhamento atuante na interface do aço e concreto. Definido o tipo de conector e a sua resistência ao cisalhamento, para um número de ciclos de carregamento da estrutura, determina-se o número necessário de conectores e seus espaçamentos.

Conforme Duan et al (1999), nas regiões de momentos negativos da seção mista, os conectores podem ser interrompidos caso a armadura da laje de concreto não faça parte do cálculo da resistência da seção transversal. Se a armadura passiva da laje for considerada deve-se dispor os conectores na região de momento negativo com seu espaçamento máximo.

Existem diversas soluções em conectores de cisalhamento, porém a com maior aplicabilidade são os “*studs*”, pinos com cabeça. A figura 33 apresenta algumas das possibilidades de conectores de cisalhamento aplicados no meio técnico.

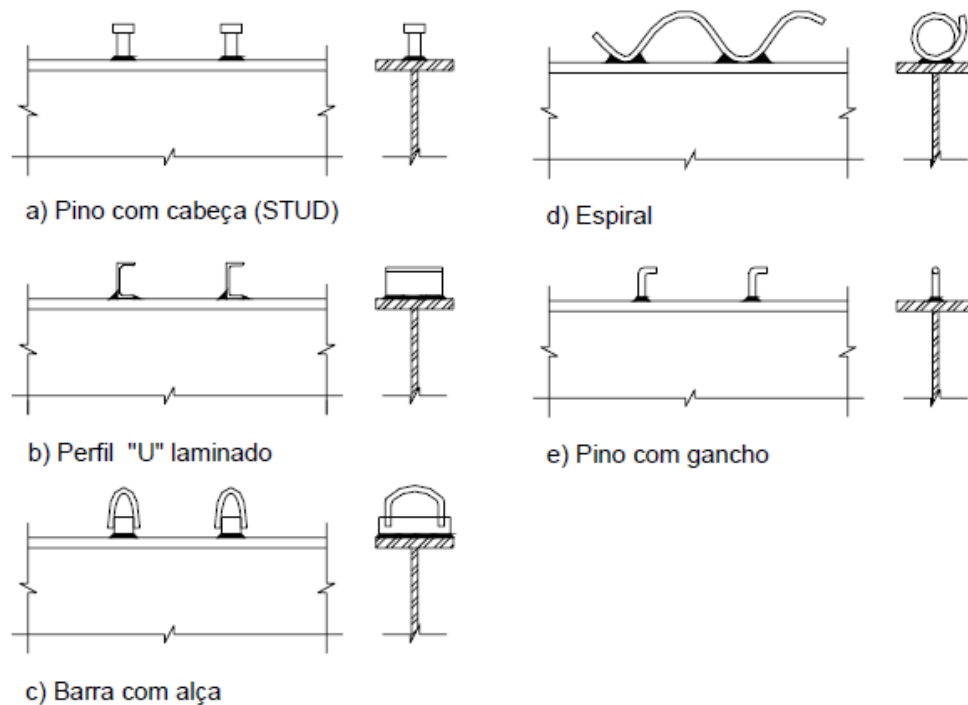


Figura 33. Conectores usuais (ALVA e MALITA, 2005)

### 3.3 EUROCODE

Os princípios gerais e requerimentos de segurança e atendimento às condições de serviço das obras de arte especial são apresentadas no Eurocode 4 – Parte 2. Os critérios apresentados na norma visam a resistência, funcionalidade, durabilidade e a resistência da estrutura ao fogo. Não são previstas nesta parte as recomendações para isolamento térmico e acústico das estruturas.



Assim como a ASSHTO, a norma europeia exige que os estágios relevantes de construção da estrutura devam ser considerados e verificados. Para o cálculo das propriedades geométricas da seção mista o Eurocode adota a relação modular  $n$  e transforma a seção mista em uma seção equivalente.

Na definição da largura colaborante da mesa de concreto, a norma permite a adoção de uma largura constante para as análises elásticas para trechos  $L_c$  de acordo com as condições de suporte dos vãos. Ela considera uma largura colaborante maior na região central do vão e uma largura colaborante menor nas regiões de apoio extremo e central, conforme apresentado nas figuras 34 e 35.

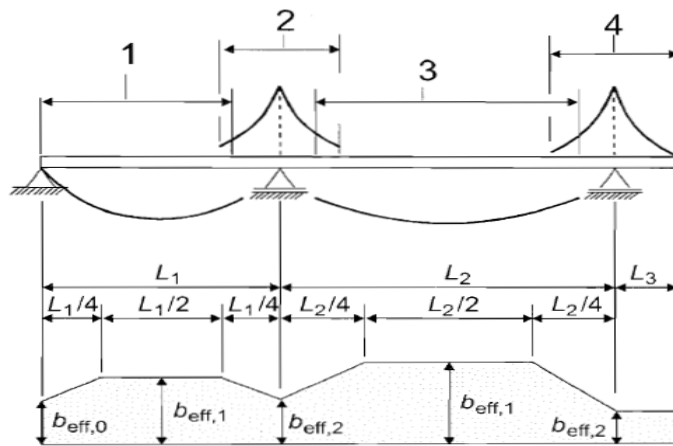


Figura 34. Regiões de distinção da largura efetiva (EUROCODE 4. Part 2, 2005)

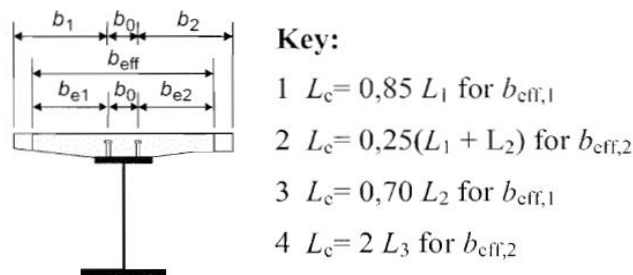


Figura 35. Largura efetiva (EUROCODE 4. Part 2, 2005)

A norma apresenta orientações para a consideração dos efeitos da fissuração da laje de concreto. Primeiro se realiza uma análise definida como “não-fissurada” com a rigidez a flexão inicial

calculada para as seções equivalentes transformadas adequadamente para cada caso de carga. Nas regiões onde a tensão de tração no concreto exceder duas vezes a resistência média do concreto à tração  $f_{ctm}$ , a rigidez à flexão deve ser reduzida. Realiza-se assim uma nova análise da estrutura com as novas rigidezes a flexão, essa análise é definida como “análise fissurada”. Essa rigidez reduzida deve ser aplicada na avaliação do estado limites último e de serviço com os esforços obtidos com a “análise fissurada”.

Os momentos fletores resistentes de cálculo dependem da classificação dos perfis de aço da estrutura mista e suas condições de contorno, como existência de enrijecedores transversais e/ou longitudinais. A norma classifica as seções em 4 classes diferentes.

Classe 1: seções transversais que possuem a capacidade de desenvolver rótulas plásticas necessárias para a análise plástica sem perda de resistência;

Classe 2: seções transversais que possuem a capacidade de desenvolver o momento plástico resistente, porém possuem limitações de rotação devido à possibilidade de flambagem local;

Classe 3: seções transversais que em uma distribuição elástica desenvolvem na fibra mais comprimida da seção de aço tensões de compressão iguais à tensão de escoamento do material;

Classe 4: seções transversais onde a flambagem local irá ocorrer antes que as tensões atinjam o limite da tensão de escoamento nas fibras mais extremas.

Assim, com as adequadas classificações das seções transversais se avalia os momentos fletores resistentes, a resistência ao cisalhamento, e verifica-se para os estados limites últimos a segurança da estrutura à ruína.

### 3.4 NBR-16694/2020

A engenharia brasileira avançou para um novo patamar com a publicação da NBR 16694 que unifica e apresenta os requisitos básicos à serem considerados no projeto de pontes e viadutos de aço e aço e mistos de aço e concreto.

O desenvolvimento do projeto de pontes de aço e mistos deve investigar o comportamento estrutural dos elementos para cada estágio: fabricação, manuseio, transporte e montagem e vida

útil da obra, buscando atender todos os estados limites aplicáveis. O projeto deve atender as condicionantes de comportamento da estrutura quanto ao uso (estados limites de serviço). São definidos parâmetros na referida norma que visam limitar tensões, deformações e fissuras sob condições normais de utilização. O estado limite de fadiga e fratura são verificações que se aplicam diretamente aos projetos de pontes e viadutos, não previstos na NBR 8800 (2008), são agora exigências da referida norma.

Conforme o texto da NBR 16694, as análises estruturais aplicáveis ao desenvolvimento de projetos de pontes e viadutos em aço e mistos são o método clássico das forças, deslocamentos, método das diferenças finitas, método de elementos finitos e método das faixas finitas. Este trabalho aborda o método clássico dos deslocamentos e o método dos elementos finitos, buscando uma comparação entre os dois. Os critérios de dimensionamento e verificação abordados na NBR 16694 e utilizados neste trabalho, estão apresentados no capítulo 5.

A norma traz algumas proporções limites para pontes em aço com longarinas de perfis I:

- almas de vigas sem enrijecedores longitudinais:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 150 \quad (10)$$

- almas de vigas com enrijecedores longitudinais:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 300 \quad (11)$$

- mesas comprimidas e tracionadas:

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq 12 \quad (12)$$

$$b_f \geq \frac{h_w}{6} \quad (13)$$

$$t_f \geq 1.1t_w \quad (14)$$

$$0.1 \geq \frac{I_{yc}}{I_y} \quad (15)$$

sendo:

$I_{yc}$  = inércia da mesa comprimida da viga de aço em relação ao eixo vertical da alma;

$I_y$  = inércia da mesa tracionada da viga de aço em relação ao eixo vertical da alma.

## 4 DESCRIÇÃO DO CASO

A estrutura da ponte a ser analisada foi projetada durante o governo Médici (1969 a 1974) e iniciou a operação nos anos 90. A obra faz parte da rodovia BR-230, conhecida como Rodovia Transamazônica, planejada e executada para integrar o Norte brasileiro com o resto do País. Essa ponte em estrutura mista está localizada na da BR-230, no perímetro urbano da vila Arataú, município de Pacajá, e liga a cidade de Pacajá a Novo Repartimento.

### 4.1 ESTRUTURA EXISTENTE

A ponte mista existente sobre o rio Arataú possui extensão total de 168.90m. A seção transversal da ponte é composta por uma faixa de rolamento de 3.30m e duas barreiras New Jersey de 0.40m, totalizando uma largura de 4.10m. O tráfego existente pode ser resumido a caminhões do tipo bitrem utilizados para transportar a madeira processada na região e tráfego local. A figura 36 ilustra a seção transversal da obra.

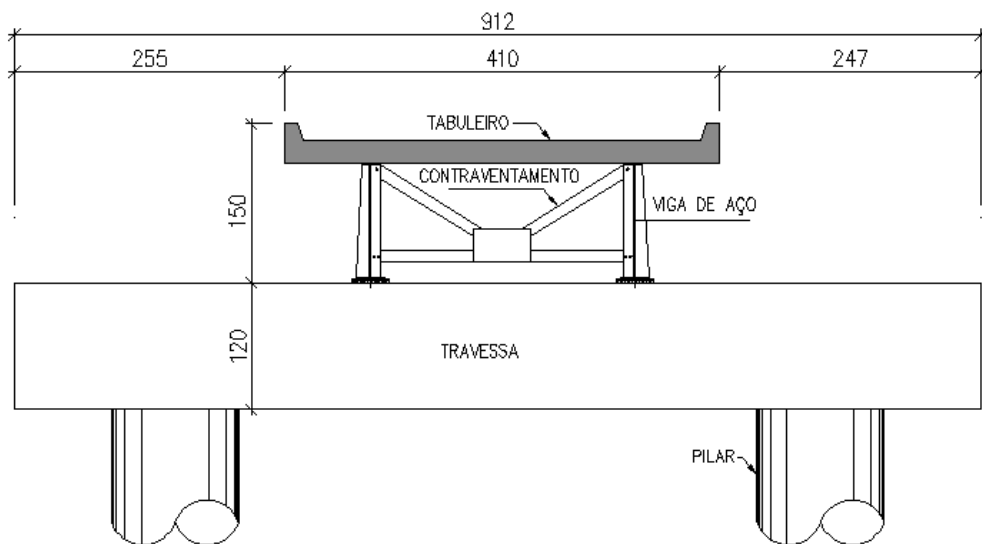


Figura 36. Seção Transversal estrutura existente [cotas em cm]

A superestrutura da obra é composta por duas vigas mistas de alma cheia com laje de concreto armado e seis vãos isostáticos variáveis. A organização dos vãos, no eixo da obra, na direção

de Marabá à Altamira (pilar PI a PVII) segue a seguinte distribuição: 22.94m, 29.88m, 30.15m, 30.11m, 29.98m, 23.04m e dois extremos em balanço de 1.40m. A altura estrutural da superestrutura, vigas de aço mais laje de concreto, é de 1.32m nos vãos extremos e de 1.67m nos vãos intermediários.

A mesoestrutura é composta por sete linhas de pilares com travessa de seção constante no topo, formando assim pórticos transversais. Os pilares extremos, PI e PVII, são pilares/tubulões escavados de base alargada com diâmetro de 1.20m. Os pilares PII e PVI possuem seção transversal de 71x81cm e travessa variável no topo de 1.65m a 1.20m para acomodar a variação de altura estrutural das vigas de aço. Os pilares PIII à PV possuem diâmetro de 1.20m e travessa constante com altura 1.20m e largura de 1.0m.

A infraestrutura da obra é composta por tubulões escavados com base alargada. Nos apoios intermediários, PIII a PV, os tubulões possuem seção de 1.40m e recebem o engaste dos pilares diretamente, sem elementos de transição. Já os pilares PII e PVI possuem tubulão com seção de 1.20m com bloco de coroamento quadrado de 1.30m x 1.30m e altura de 1.40m, que faz a transição do engaste do pilar sobre o tubulão. A figura 37 apresenta a seção longitudinal da obra e ilustra a situação pós falha da obra.

### PERFIL LONGITUDINAL

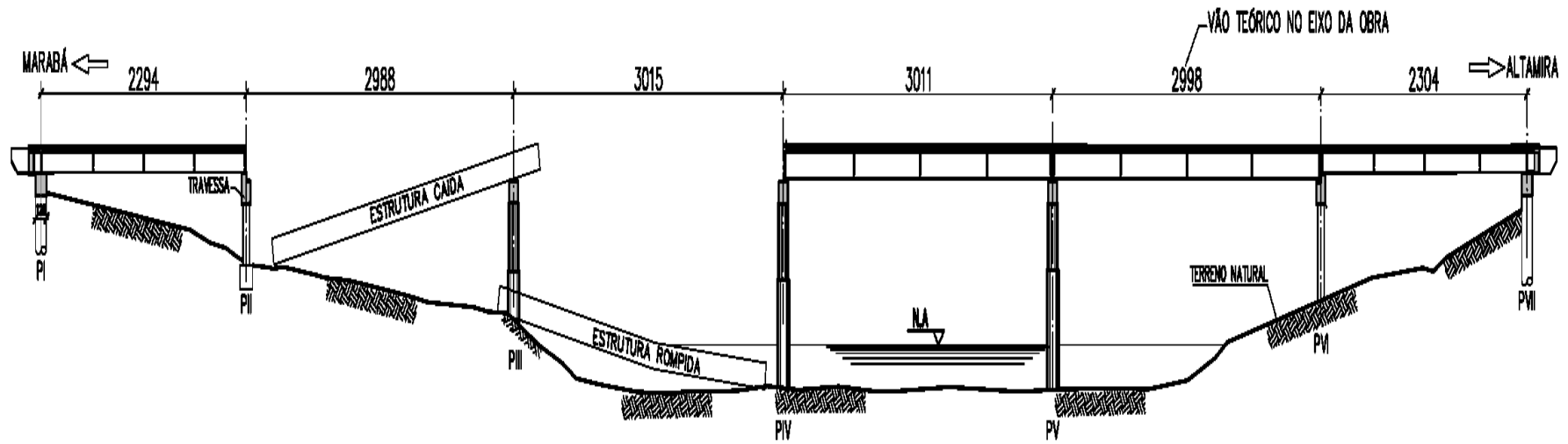


Figura 37. Situação da obra existente (Unidades cm)

## 4.2 ESTRUTURA AMPLIADA

A obra em questão faz parte do acervo de obras do DNIT que serão reforçadas e ampliadas com vista ao desenvolvimento da infraestrutura nacional. O projeto básico foi elaborado prevendo uma obra rodoviária final em estrutura mista, superestrutura com seis longarinas de aço patinado e laje de concreto armado, com largura de 14.30m e extensão de 168.90m.

A elaboração do projeto executivo para esta classe de obra é um desafio pois requer o conhecimento da resistência da estrutura existente. É necessário assim realizar um levantamento “*as built*” identificando assim as dimensões dos elementos estruturais e um conjunto de ensaios destrutivos e não-destrutivos com o objetivo de avaliar as resistências dos materiais.

### 4.2.1 Elementos de concreto armado

A identificação das geometrias dos elementos de concreto armado, da meso e infraestrutura, foram realizadas com auxílio de escavações de terra e medições locais. As armaduras existentes, seus espaçamentos e diâmetros, foram identificadas com a retirada do recobrimento de concreto com auxílio de martelos pneumáticos. As figuras 38 à 40 apresentam o processo de investigação aplicado às travessas existentes.



Figura 38. Dimensões da Travessa I (TI)  
(acervo Deltacon Engenharia)

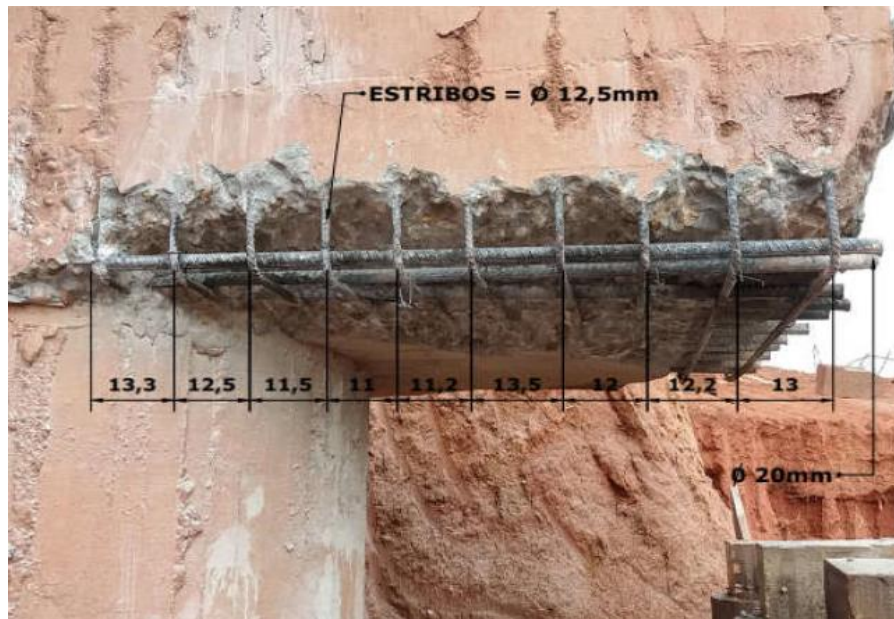


Figura 39. Armaduras flexão e cisalhamento da TI  
(acervo Deltacon Engenharia)

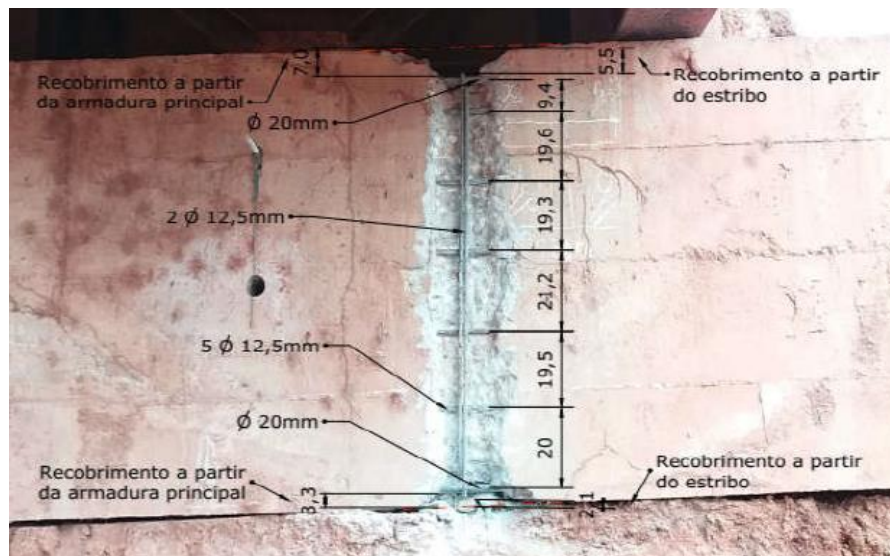


Figura 40. Armaduras flexão, distribuição e cisalhamento da TI  
(acervo Deltacon Engenharia)

Este procedimento foi realizado para todas as travessas e com isso foi possível elaborar a figura 41 que apresenta as armaduras de flexão positiva e negativa, armaduras de distribuição e de cisalhamento de todas as travessas.



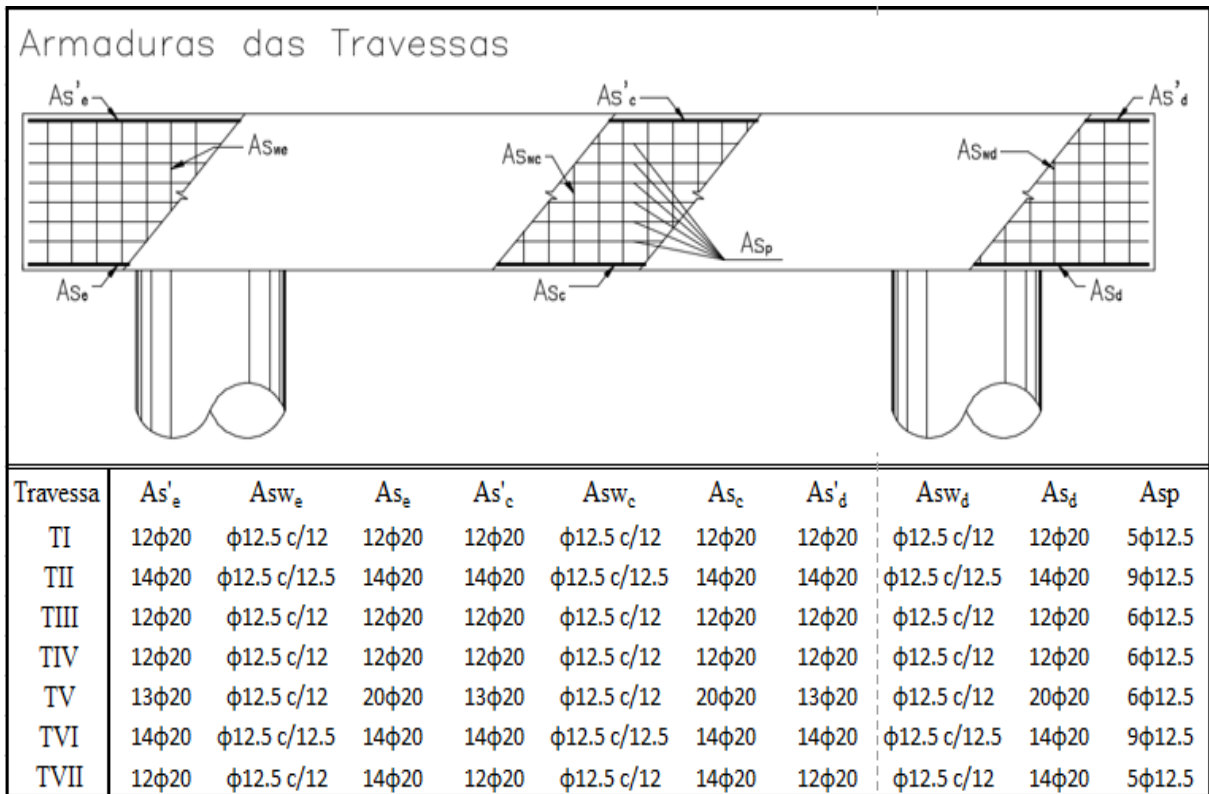


Figura 41. Armaduras das Travessas existentes  
(Asp – armadura de pele, letras e – esquerdo, c – central, d – direito)

Para o levantamento das resistências dos concretos das travessas foram realizadas extrações de corpos de provas somente nas regiões de interesse definidas para o projeto de alargamento da obra e com o objetivo de reduzir o número de extrações de corpos de prova para não afetar a integralidade dos elementos estruturais.

Os corpos de prova extraídos possuíam diâmetro médio de 5cm e altura média de 10cm, mantendo assim uma relação  $h/d=2$ . Os mesmos foram armazenados e rompidos em laboratório. As resistências à compressão axial obtidas dos ensaios de ruptura foram corrigidas conforme os critérios da NBR 7680:2015 e assim definindo a resistência corrigida dos testemunhos  $f_{ci,ext}$ . Com os resultados das resistências corrigidas individuais e sabendo o número de furos realizados em cada elemento estima-se a resistência característica do concreto para fins de verificação da segurança estrutural como sendo a média dos resultados individuais pelo número de corpos de prova extraídos. A tabela 2 apresenta a identificação dos furos, a área do corpo de prova, a carga de ruptura e o valor das resistências do concreto para cada travessa.

Tabela 2 – Resistência do Concreto das Travessas existentes

Elemento	Furo	Área CP (cm <sup>2</sup> )	Carga (kgf)	$f_{ci,ext,initial}$ (MPa)	$f_{ci,ext}$ (MPa)	$f_{ck}$ (MPa)
Travessa TI=TVII	T01S T01	19,63 19,63	7170 4840	36,5 24,7	39,4 27,8	33,6
	T02-1	19,63	4590	23,4	26,4	
Travessa TII=TVI	T02-2 T02D-1	19,63 19,63	4710 4310	24,0 22,0	27,1 24,8	25,0
	T02D-2	19,63	3750	19,1	21,6	
Travessa TIII	T03	19,63	3910	19,9	21,5	21,5
Travessa TIV	T04	19,63	4510	23,0	24,8	24,8
Travessa TV	T05	19,63	7880	40,1	43,3	43,3
$f_{ck_{med}} =$						30

No caso dos pilares foram realizadas extrações de corpos de prova e ensaios de ruptura em laboratório. Os corpos de prova foram extraídos com diâmetro médio de 4.20cm e altura média de 8.40cm, mantendo uma relação de h/d=2. A resistência à compressão axial dos pilares é aferida aplicando as correções recomendadas pela NBR 7680:2015. A tabela 03 apresenta a identificação dos furos, a área do corpo de prova, a carga de ruptura e as resistências do concreto para os pilares da obra.

Tabela 3 – Resistência do Concreto dos Pilares existentes

Elemento	Furo	Área CP (cm <sup>2</sup> )	Carga (kgf)	$f_{ci,ext,initial}$ (MPa)	$f_{ci,ext}$ (MPa)	$f_{ck}$ (MPa)
Pilar PI	F01	13,85	3340	24,1	26,00	26,0
Pilar PIII	F01	13,85	4320	31,2	35,23	33,0
	F02	13,85	3770	27,2	30,75	
Pilar PIV	F01	13,85	7350	53,1	59,95	40,9
	F02	13,85	2800	20,2	21,83	
Pilar PVII	F01	13,85	4460	32,2	34,77	34,8
$f_{ck_{med}} =$						34

#### 4.2.2 Elementos de aço

As vigas de aço existentes foram reaproveitadas no projeto de alargamento, recebendo o devido reforço para os novos carregamentos. Apenas as vigas existentes dos vãos colapsados, segundo e terceiro vão no sentido Marabá à Altamira, foram substituídas por vigas novas. Para realizar as verificações de segurança das vigas existentes é preciso conhecer a geometria do perfil e as propriedades mecânicas do aço das mesmas.

As geometrias das vigas de aço foram obtidas com inspeção em campo e realização de medições locais usando paquímetro e fita métrica. Essas possuem seção transversal com largura de mesas variáveis entre as regiões de apoio e vão central. Os nomes das vigas de aço foram definidos visando à geometria ampliada final que possui seis vigas de aço, tendo assim a nomenclatura de VA que indica viga de aço, o primeiro número indicando o vão em que ela se encontra no sentido Marabá à Altamira e o segundo número sendo a posição dessa da direita para a esquerda. Assim as vigas existentes são à VA12, VA13, VA42, VA43, VA52, VA53, VA62 e VA63 e as suas geometrias são apresentadas na figura 42.

As propriedades mecânicas do aço foram obtidas por ensaios com amostras extraídas em campo e posterior realização dos ensaios de tração conforme a norma NBR 6673:1981. As amostras foram retiradas de quatro vigas de aço existentes, uma em cada vão. Também foram realizadas análises químicas quantitativas com o objetivo de determinar os teores de carbono e demais elementos, com espectrometria de emissão óptica com fotomultiplicadora.

Com os ensaios realizados, conclui-se que o aço das vigas existentes pode ser considerado como aço de chapas grossas laminadas à quente, de baixa liga de carbono e alta resistência, resistente a corrosão atmosférica. Com tensão de escoamento mínima de  $f_y = 250$  MPa e tensão de ruptura mínima  $f_u = 380$  MPa e módulo de Elasticidade  $E = 200$  GPa.

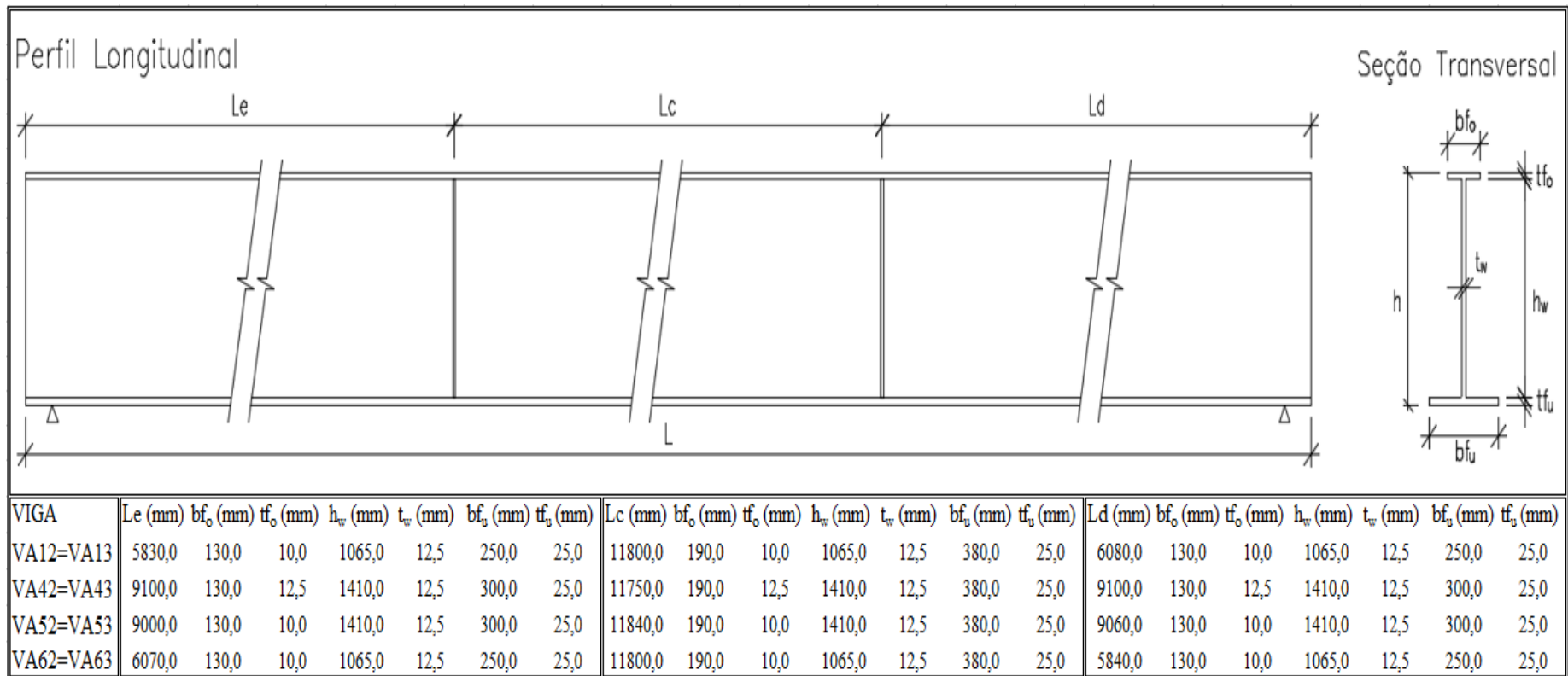


Figura 42. Geometria das vigas de aço existentes

### 4.2.3 Geometria final

Para atender a geometria final da obra prevista no projeto básico de 14.30m, foi implantada uma nova linha de pilares na extremidade esquerda da obra, sentido Marabá à Altamira. Os pilares extremos PI e PIV possuem seção retangular variável de 70cm (topo) à 110cm (base), espessura de 50cm e altura de 250cm e são engastados em blocos de concreto armado assentados sobre 4 estacas raiz com diâmetro de 40cm. Os pilares intermediários, PII à PVI, possuem seção circular constante com diâmetro de  $\varnothing 100\text{cm}$  e altura variável conforme o terreno existente. Esses pilares são engastados nos blocos de concreto armado chumbados na rocha aflorada. Somente o PV, dentre os pilares intermediários, pilar no leito do rio, é assentado sobre um bloco de concreto armado com 5 estacas raiz de diâmetro 40cm, devido a condições geotécnicas do solo e a dificuldade de execução com o nível de água existente. Nas figuras 43 e 44 são apresentadas as geometrias dos pilares e blocos de fundação.

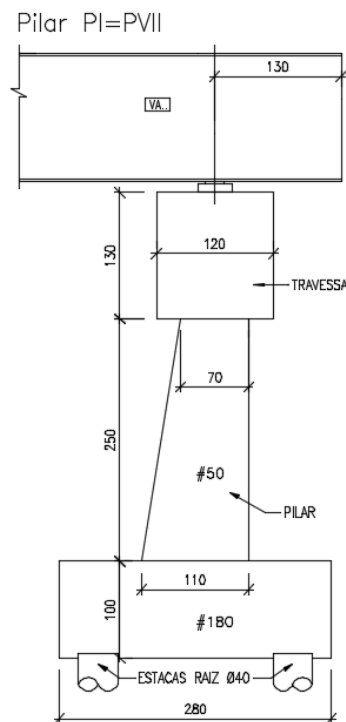


Figura 43. Pilares extremos PI e PVII  
(unidades das cotas: cm)

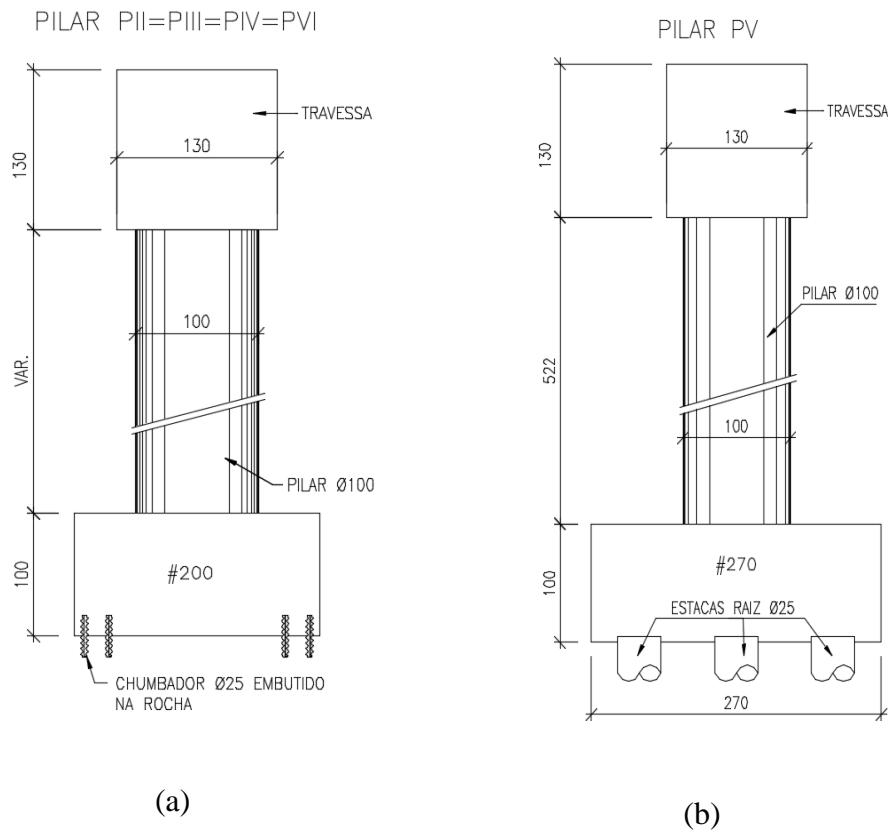
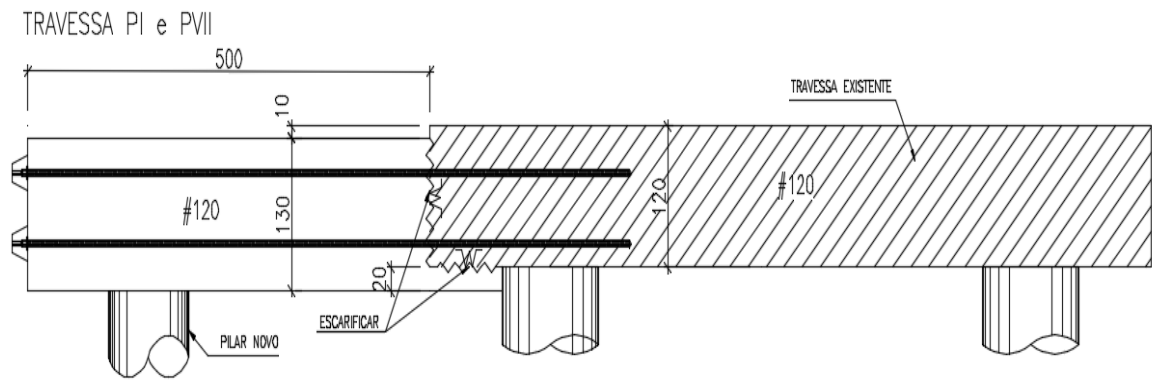
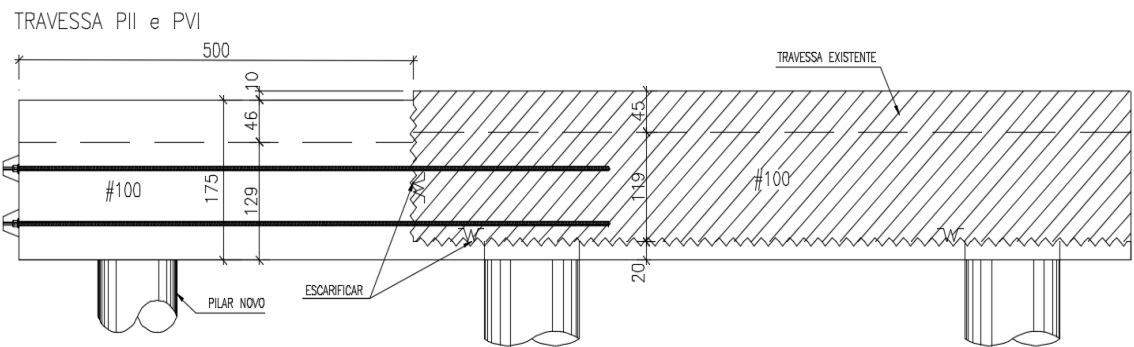


Figura 44. Pilares  
(unidades das cotas: cm)

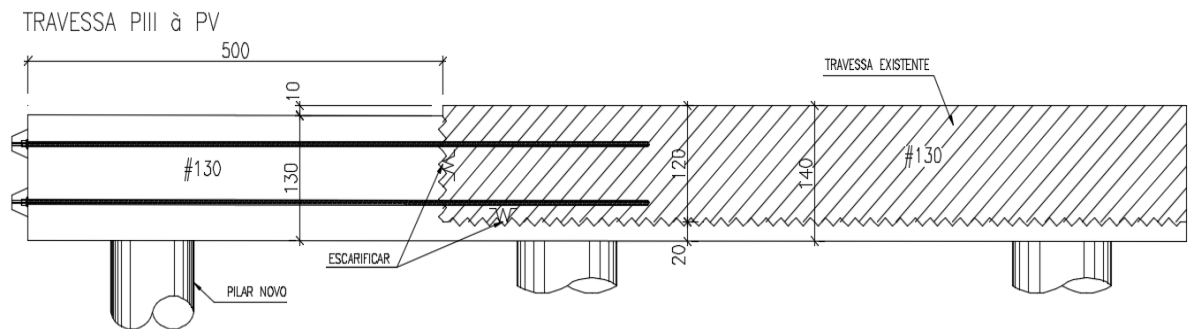
As travessas existentes receberam um aumento de seção transversal e alargamento no extremo esquerdo, sentido Marabá à Altamira para cobrir a nova largura de obra. A seção ampliada é engastada na travessa existente com protensão. A face da travessa é devidamente escarificada, mantendo-se a armadura existente, e limpa para criar uma aderência entre os concretos existente e novo. Na figura 45 são apresentadas as soluções adotadas na ampliação transversal de cada uma das travessas existentes.



(a)



(b)

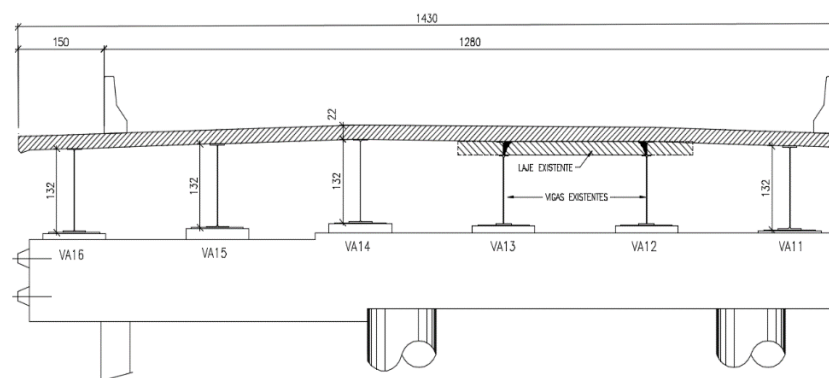


(c)

Figura 45. Travessa (unidades das cotas: cm)

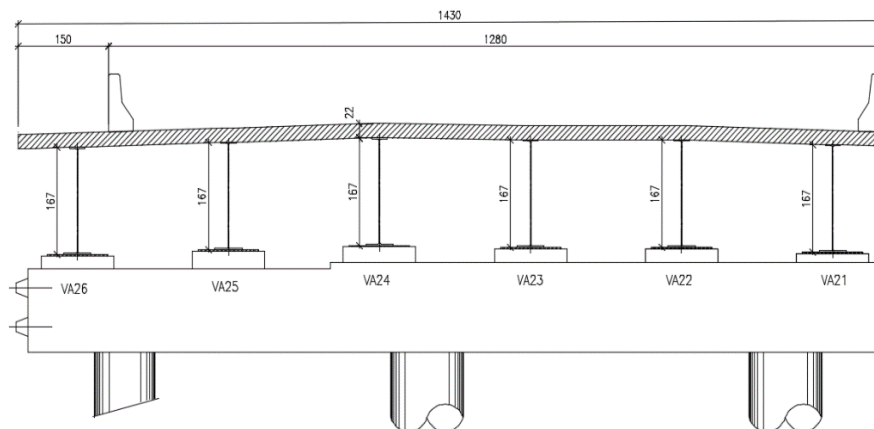
A solução adotada para a superestrutura foi a utilização de seis vigas de aço justapostas com perfil I, soldadas e seção transversal variável. Para os vãos externos entre PI-PII e PVI-PVII a viga de aço tem altura estrutural de 132cm e nos vãos intermediários a altura estrutural dos perfis de aço é de 167cm. O aço dos perfis é um aço de baixa liga e alta resistência mecânica, resistente à corrosão atmosférica com  $f_y = 290\text{MPa}$  e  $f_u = 480\text{MPa}$ , compatível com o aço das vigas existentes. Na figura 46 tem-se a seção transversal dos vãos extremos e intermediários.

SEÇÃO TRANSVERSAL – VÃOS EXTREMOS



(a)

SEÇÃO TRANSVERSAL – VÃOS INTERMEDIÁRIOS



(b)

Figura 46. Seção transversal (unidades das cotas: cm)



Por último, com o objetivo de garantir a estabilidade transversal das vigas de aço nas regiões de apoio tem-se as transversinas de apoio, que são elementos estruturais em concreto armado moldados no local. Nos apoios dos pilares PII e PVI as transversinas possuem espessura de 30cm e recebem a aplicação das juntas de elastômero armado. Sobre os pilares intermediários PII à PV as transversinas tem espessura de 25cm entre as vigas de aço e um aumento de seção nos apoios com embutimento das armaduras para articulação de concreto. Nos acessos da obra foram executadas as transversinas de entrada em concreto armado com espessura constante de 25cm e altura de 177cm. A figura 47 apresenta a transversina de apoio dos pilares intermediários.

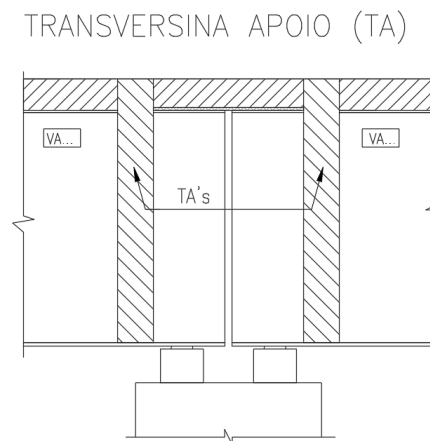


Figura 47. Transversina de apoio - vãos intermediários

## 5 ABORDAGEM ANALÍTICA

Este capítulo apresenta os conceitos básicos relacionados a subestruturas constituintes de uma ponte e suas funções, bem como as fases construtivas, os carregamentos e as solicitações oriundas de uma análise simplificada da estrutura.

### 5.1 PONTE SOBRE RIO ARATAU – ESTRUTURAÇÃO

A ponte mista sobre o rio Aratau é dividida em três grandes subestruturas. A superestrutura é composta pelas barreiras rígidas, a laje do tabuleiro, as transversinas e as longarinas em aço. A barreira rígida absorve as cargas de impacto lateral e distribui as mesmas sobre as lajes do tabuleiro. As lajes distribuem as cargas permanentes e móveis para as longarinas da obra. As longarinas são dimensionadas para absorver essas cargas e transmitir as mesmas para a mesoestrutura. Já as transversinas são projetadas com o objetivo de fornecer estabilidade lateral para as longarinas em aço.

A mesoestrutura da ponte mista sobre o rio Aratau é composta por travessas em concreto armado e pilares de seção variável conforme apresentado no capítulo anterior. As travessas formam pórticos transversais com os pilares e recebem as reações da superestrutura e distribuem as mesmas entre os pilares. A infraestrutura da ponte é composta por blocos de fundação sobre estacas e tubulões escavados, e tem por objetivo distribuir no terreno existente as solicitações oriundas da super e mesoestrutura. Nos acessos da obra de arte existem as lajes de transição, desacopladas da superestrutura com o objetivo de melhorar a distribuição dos esforços de impacto vertical das cargas móveis no encontro da estrutura com o aterro de solo.

Conforme a norma brasileira NBR 7187/2003 - Projeto e Execução de Pontes de Concreto Armado, as cargas atuantes em pontes são separadas em permanentes e variáveis. As permanentes são representadas pelo peso próprio dos elementos estruturais e também os elementos que estão permanentemente fixos à estrutura, empuxos de terra, empuxo hidráulico, as deformações impostas pelo efeito da retração, fluência e deslocamentos de apoios. As variáveis têm caráter transitório sobre a estrutura e são compostas pelas cargas de construção, pela ação do vento, empuxo provocado pelas cargas móveis, pressão dinâmica de água, variações de temperatura e as ações associadas com a passagem da carga móvel (cargas

verticais, efeitos dinâmicos, força centrífuga, frenação e aceleração). Ainda existem os casos de ações excepcionais, que são aquelas cuja ocorrência se dá em circunstâncias anormais como os casos de choques de objetos móveis, explosões e fenômenos naturais pouco frequentes.

## 5.2 SUPERESTRUTURA

### 5.2.1 Fases construtivas e propriedades das seções

As pontes e viadutos passam por diversas etapas de execução e necessitam ser verificadas quanto a sua capacidade portante durante cada fase construtiva. A infraestrutura do alargamento da obra em questão foi executada com concretagem local das estacas e blocos. Os blocos serviram de apoio para o escoramento temporário das formas da mesoestrutura que também foi executada com concretagem local.

Após a cura e liberação da mesoestrutura inicia-se a execução da superestrutura em três grandes etapas. No primeiro momento, as vigas de aço são lançadas com seus travamentos temporários e finais sem escoramento. Realiza-se lançamento das pré-lajes de concreto armado e o posicionamento da armadura final das lajes do tabuleiro. A última etapa consiste na concretagem local da capa de concreto da laje. Assim toda a superestrutura é finalizada e recebe a camada de CBUQ, a concretagem das barreiras rígidas, guarda-corpo e é liberada para o tráfego.

Conforme Linhares (2015), a avaliação das propriedades das seções transversais (momento de inércia, momentos estáticos, área e rigidez) deve ser feito para cada fase tendo em vista que cada fase irá sofrer um carregamento distinto.

Neste projeto as fases de construção/utilização são divididas em três. Na primeira fase, denominada de “Fase Inicial” tem-se somente o perfil de aço, sem escoramento, este deve possuir capacidade portante para todo o seu peso-próprio e o peso das lajes de concreto. A segunda fase, “Fase de Longa Duração”, é caracterizada pela cura do concreto da laje e a seção resistente é formada pela viga de aço mais a laje de concreto. Nesta fase são executadas as barreiras rígidas, capa de concreto asfáltico CBUQ e acessos. A terceira fase, “Fase de Curta Duração”, é a liberação da estrutura para o tráfego. A seção resistente é mesma da segunda fase, porém os carregamentos móveis são tratados como cargas transitórias e a capacidade portante da seção mista para estas cargas é maior.

As propriedades das seções mistas são então calculadas para cargas de longa e curta duração transformando-se a seção transversal em uma seção fictícia, alterando-se as relações modulares (ASSHTO-LRFD, 2012). Para definir-se as propriedades da seção mista é necessário definir a largura efetiva da laje de concreto colaborante. Com a seção transversal apresentada no capítulo anterior e os espaçamentos entre as vigas de aço define-se as mesas colaborantes para cada viga de aço conforme as orientações da NBR8800 (2008), anexo O.

Tabela 5 – Largura da mesa colaborante

Vigas	1	2=3	4=5	6
$b_e$ (cm)	207	250	250	223

As propriedades geométricas do perfil de aço para a fase inicial, da seção mista para a fase de curta duração e longa duração são calculadas conforme as recomendações normativas discutidas no capítulo 3 e apresentadas abaixo para cada viga de aço.

Tabela 6 – Propriedades para cada fase de análise

Vão	Fase/Propriedades	Vigas					
		1	2=3	4=5	6		
1 e 6	Inicial	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	0,0290	0,0348	0,0284	0,0284	
		$I_a$ (m <sup>4</sup> )	0,0077	0,0089	0,0076	0,4836	
	Curta Duração	$A_{CD}$ (m <sup>2</sup> )	0,0901	0,1086	0,1022	0,0943	
		$I_{CD}$ (m <sup>4</sup> )	0,0264	0,0288	0,0268	0,0262	
	Longa Duração	$A_{LD}$ (m <sup>2</sup> )	0,0493	0,0594	0,0530	0,0504	
		$I_{LD}$ (m <sup>4</sup> )	0,0190	0,0210	0,0199	0,0191	
	2 e 3	Inicial	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	0,0414	0,0414	0,0414	0,0414
			$I_a$ (m <sup>4</sup> )	0,0160	0,0160	0,0160	0,0160
Curta Duração		$A_{CD}$ (m <sup>2</sup> )	0,1025	0,1152	0,1152	0,1072	
		$I_{CD}$ (m <sup>4</sup> )	0,0517	0,0544	0,0544	0,0528	
Longa Duração		$A_{LD}$ (m <sup>2</sup> )	0,0617	0,0660	0,0660	0,0633	
		$I_{LD}$ (m <sup>4</sup> )	0,0357	0,0383	0,0383	0,0367	
4 e 5		Inicial	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	0,0414	0,0533	0,0414	0,0414
			$I_a$ (m <sup>4</sup> )	0,0160	0,0247	0,0160	0,0160
	Curta Duração	$A_{CD}$ (m <sup>2</sup> )	0,1025	0,1271	0,1152	0,1072	
		$I_{CD}$ (m <sup>4</sup> )	0,0517	0,0601	0,0544	0,0528	
	Longa Duração	$A_{LD}$ (m <sup>2</sup> )	0,0617	0,0779	0,0660	0,0633	
		$I_{LD}$ (m <sup>4</sup> )	0,0357	0,0439	0,0383	0,0367	

### 5.2.2 Cargas permanentes

Para avaliar a superestrutura da obra final é necessário elaborar o esquema de cargas permanentes atuantes em cada viga de aço. Para isso é preciso conhecer a seção transversal da ponte, as geometrias, espaçamentos e espessuras de cada elemento estrutural de concreto armado e aço. A figura 48 apresenta o guarda-rodas, sua geometria e materiais constituintes.

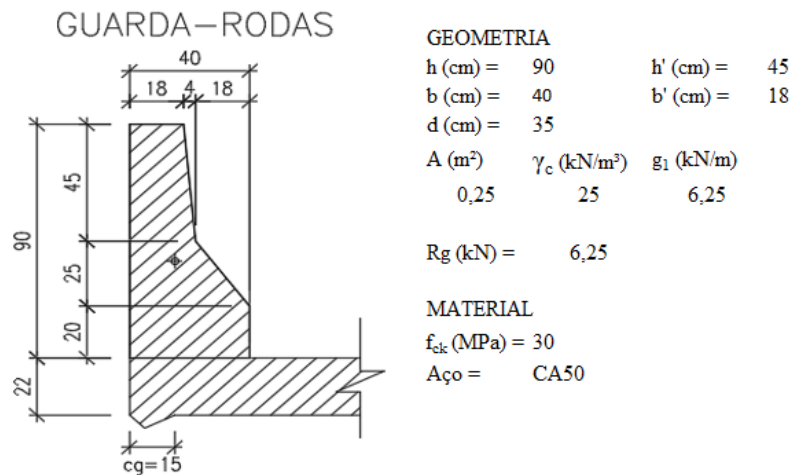


Figura 48. Guarda-Rodas  
(unidades das cotas: cm)

O tabuleiro da obra é composto de pré-lajes com espessura de 6cm e capa de concreto com espessura de 16cm totalizando na fase final uma espessura de 22cm. As pré-lajes possuem nichos especiais para solidarizar posteriormente as lajes com as vigas de aço através dos conectores de cisalhamento. A laje durante a fase de construção, lançamento e posicionamento, representa somente carga vertical sobre as vigas de aço. Ela não contribui na resistência da estrutura, enquanto não ocorrer a cura dos nichos de conexão e da capa, exige assim, das vigas de aço, capacidade portante para superar essa fase de construção. As cargas de peso-próprio das lajes são distribuídas sobre as vigas de aço através das áreas de influências de cada viga.

Na seção da pista de rolamento é executada uma camada de pavimento asfáltico de CBUQ. A espessura prevista em projeto é de sete centímetros de CBUQ, porém, é necessário ressaltar que uma das práticas comuns de manutenção dos pavimentos asfálticos, é recobrir as pistas de rolamento com nova camada de CBUQ e esse fato deve ser considerado no projeto de pontes.

Para evitar espessuras consideráveis e sobrecargas elevadas na obra de arte especial é importante limitar a camada de CBUQ e acima desse limite exigir a realização da fresagem da camada existente. A figura 49 apresenta a distribuição das cargas permanentes do tabuleiro da ponte para cada viga de aço.

SEÇÃO TRANSVERSAL – DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS

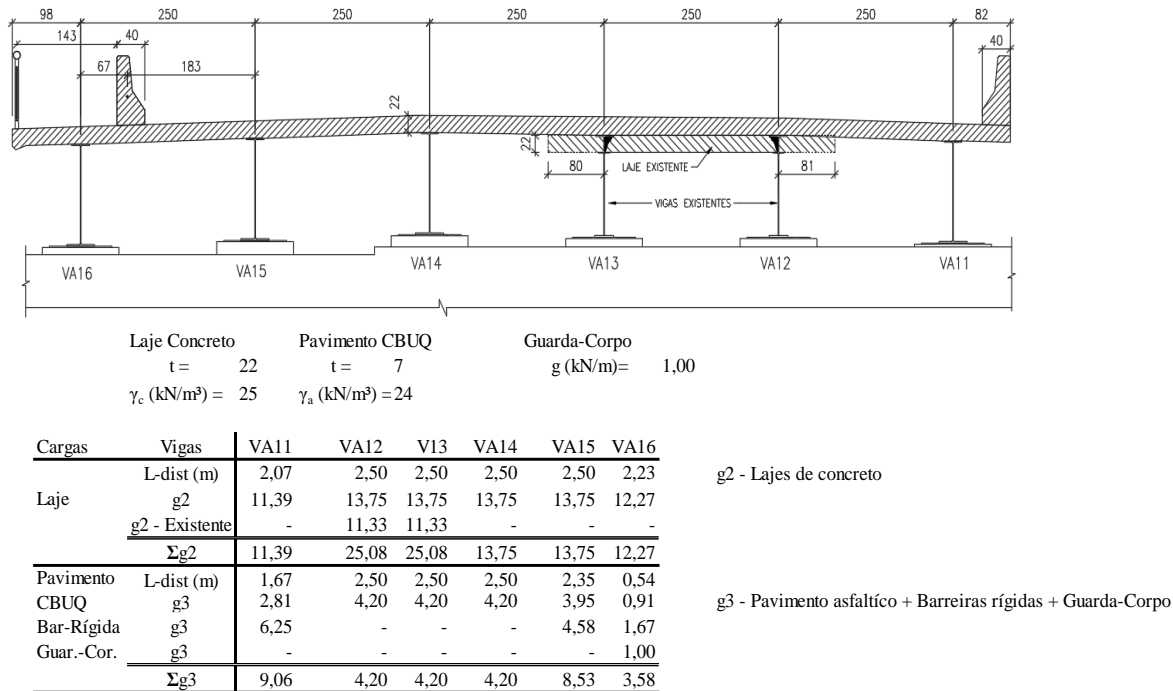
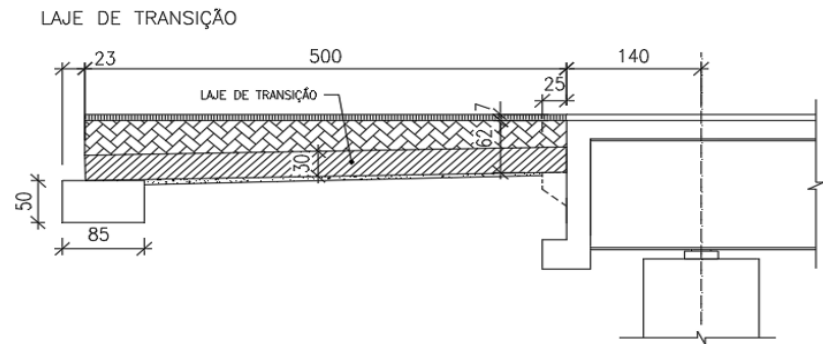


Figura 49. Distribuição de cargas do tabuleiro (unidades: cm)

Nos extremos da obra existem as transversinas de entrada, engastadas nas vigas de aço em balanço, que servem de apoio para as lajes de transição e recebem os engastes das alas de contenção do talude de acesso. Sobre a laje de transição existe uma camada de aterro e um pavimento asfáltico. É preciso quantificar estas cargas e considera-las na elaboração do esquema de cargas das vigas de aço. A geometria da laje de transição, suas condições de apoio e as cargas permanentes são apresentadas na figura 50.



Laje de Transição - Ações sobre TE

Peso Próprio (LT)	$f_{ck}$ (MPa) = 30	Aço = CA50	Aterro Solo (AS)	Pavimento Asfáltico (PA)
$l_x$ (cm) = 500	Aço = CA50	$h_s$ (cm) = 30,00	$h_p$ (cm) = 7,00	
$l_y$ (cm) = 1196	$V$ (m <sup>3</sup> ) = 17,94	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> ) = 18,00	$\gamma_a$ (kN/m <sup>3</sup> ) = 24,00	
$t$ (cm) = 30	$V$ (m <sup>3</sup> /m) = 1,50	$V$ (m <sup>3</sup> /m) = 1,50	$V$ (m <sup>3</sup> /m) = 0,70	
$\gamma_c$ (kN/m <sup>3</sup> ) = 25	$R_{G3}$ (kN/m) = 18,75	$R_{G3}$ (kN) = 13,50	$R_{G3}$ (kN) = 8,40	
$\Sigma R_{G3}$ (kN/m) - LT+AS+PA =				40,65
$R_{G3}$ (kN) - Guarda Rodas =				6,25

G3 - Laje de Transição + Aterro sobre LT + Pavimento + Guarda Rodas

Figura 50. Cargas na laje de transição (unidades: cm)

Um ponto importante a destacar é que as transversinas de entrada são executadas, após o lançamento e posicionamento das vigas de aço, juntamente com o posicionamento das lajes do tabuleiro. O aterro sobre a laje de transição e o pavimento asfáltico no acesso são executados somente na fase final da estrutura quando as lajes de concreto já estão solidarizadas com as vigas de aço. A quantificação das cargas do acesso sobre a transversina de entrada é feita conforme o esquema ilustrado nas figuras 51 e 52.

É necessário quantificar o peso próprio das vigas de aço dos vãos extremos e dos vãos intermediários. As vigas de aço novas possuem altura estrutural de 132cm nos vãos extremos e 167cm nos vãos intermediários. Além da variação das alturas, elas também apresentam variação de espessuras das almas e mesas. Os conectores de cisalhamento e os enrijecedores da alma não foram considerados por representarem uma fração baixa do peso próprio, em geral o valor está entre 5% a 7% do peso total. A geometria das vigas novas e suas variações são apresentadas nas figuras 53 e 54.

As vigas existentes no primeiro, quarto, quinto e sexto vãos, foram reforçadas com aumento de seção transversal, acoplando-se às mesmas uma seção T soldada na mesa superior. Assim as geometrias existentes foram alteradas com o objetivo de compatibilizar as inércias das mesmas com as das vigas novas. A figura 55 resume as geometrias finais das vigas existentes reforçadas.

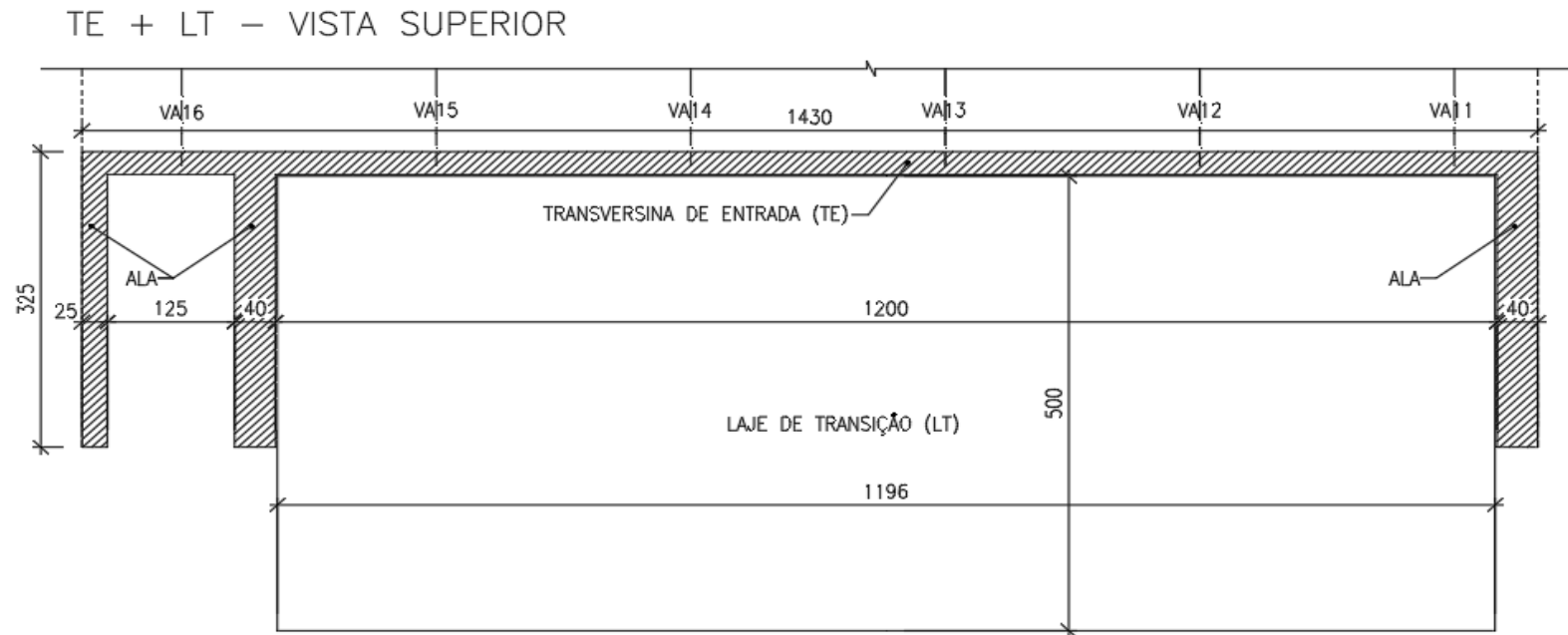
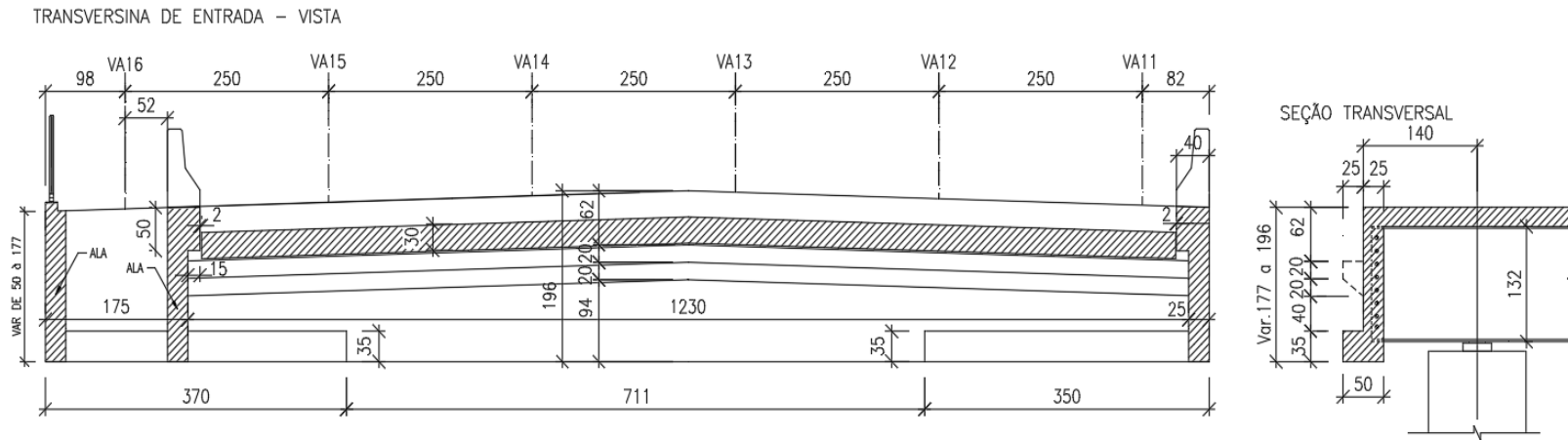


Figura 51. Planta baixa do acesso da obra (unidades: cm)





## Elementos - Cargas

Ala - Passeio	
h (cm) = 177	$f_{ck}$ (MPa) = 30
L (cm) = 300	Aço = CA50
bw (cm) = 25	A (m <sup>2</sup> ) = 3,48
$\gamma_c$ (kN/m <sup>3</sup> ) = 25	V (m <sup>3</sup> ) = 0,87
<b>Rg (kN) = 21,73</b>	

Transversina Entrada	
h (cm) = 177 a 196	
bw (cm) = 25	
L (cm) = 1430	
$g_{TE}$ (kN/m) = 14,29	

Alas - Pista	
h (cm) = 177	$f_{ck}$ (MPa) = 30
L (cm) = 300	Aço = CA50
bw (cm) 40 e 25	A (m <sup>2</sup> ) = 3,48
$\gamma_c$ (kN/m <sup>3</sup> ) = 25	V (m <sup>3</sup> ) = 1,09
<b>Rg (kN) = 27,35</b>	

Vigas	V11	V12	V13	V14	V15	V16
L-dist (m)	2,07	2,50	2,50	2,50	2,50	2,23
R_G2 - TE	29,58	35,73	35,73	35,73	35,73	31,87
R_G2 - AL	27,35	-	-	-	7,00	42,08
$\Sigma$ G2	56,93	35,73	35,73	35,73	42,73	73,94
R_G3 - LT	67,07	101,63	101,63	101,63	100,00	35,37
R_G3 - GR	6,25	-	-	-	1,62	4,63
$\Sigma$ G3	73,32	101,63	101,63	101,63	101,62	39,99

Figura 52. Distribuição de cargas do acesso para as vigas de aço (unidades: cm)

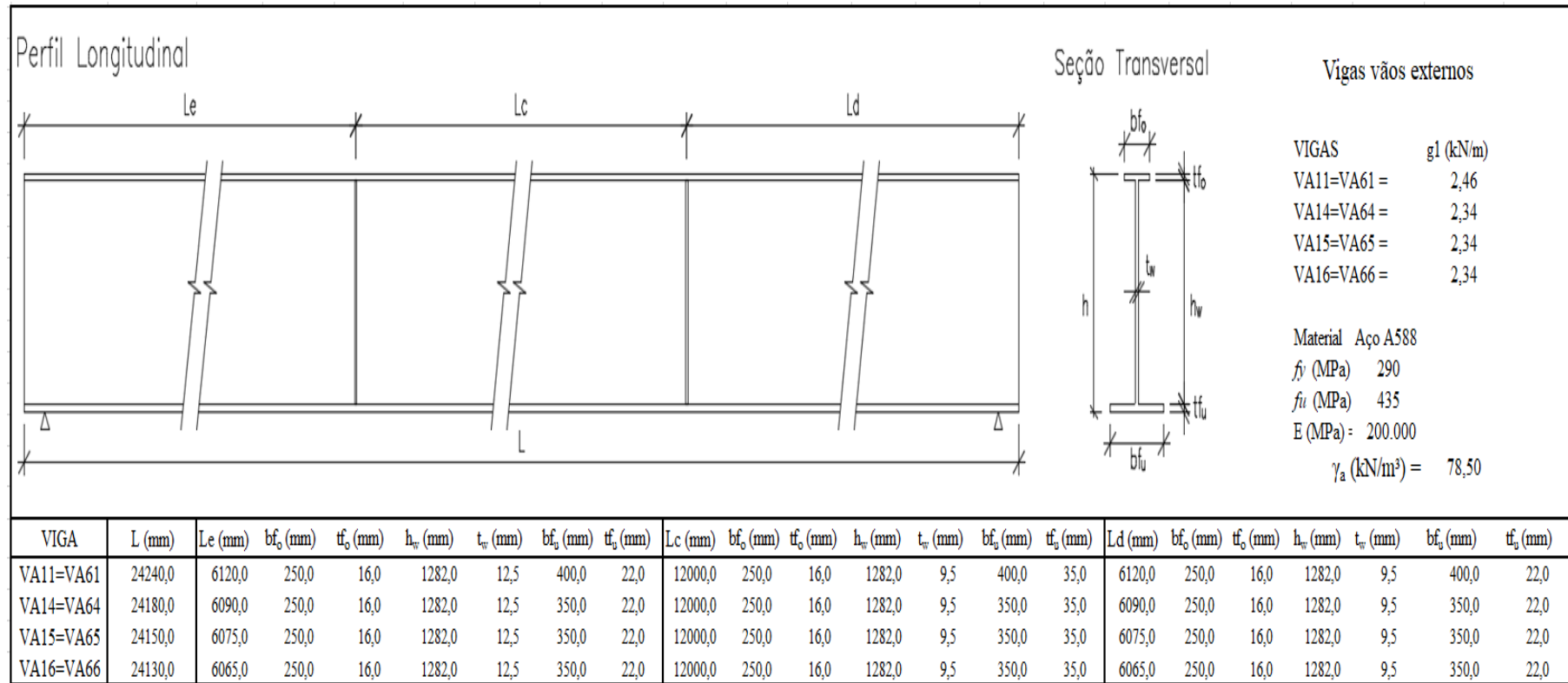


Figura 53. Vigas de aço – vãos externos

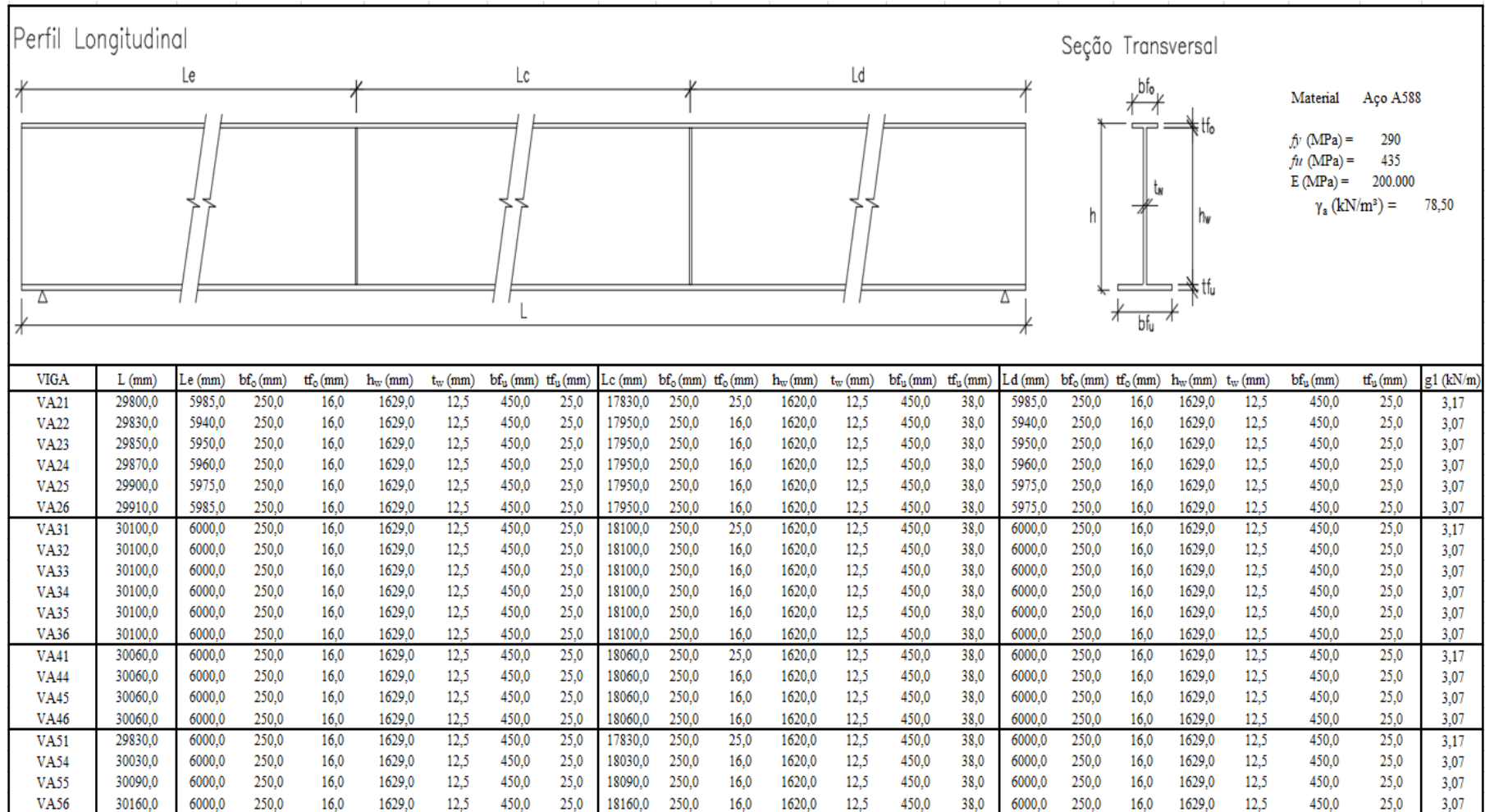


Figura 54. Vigas de aço – vãos centrais

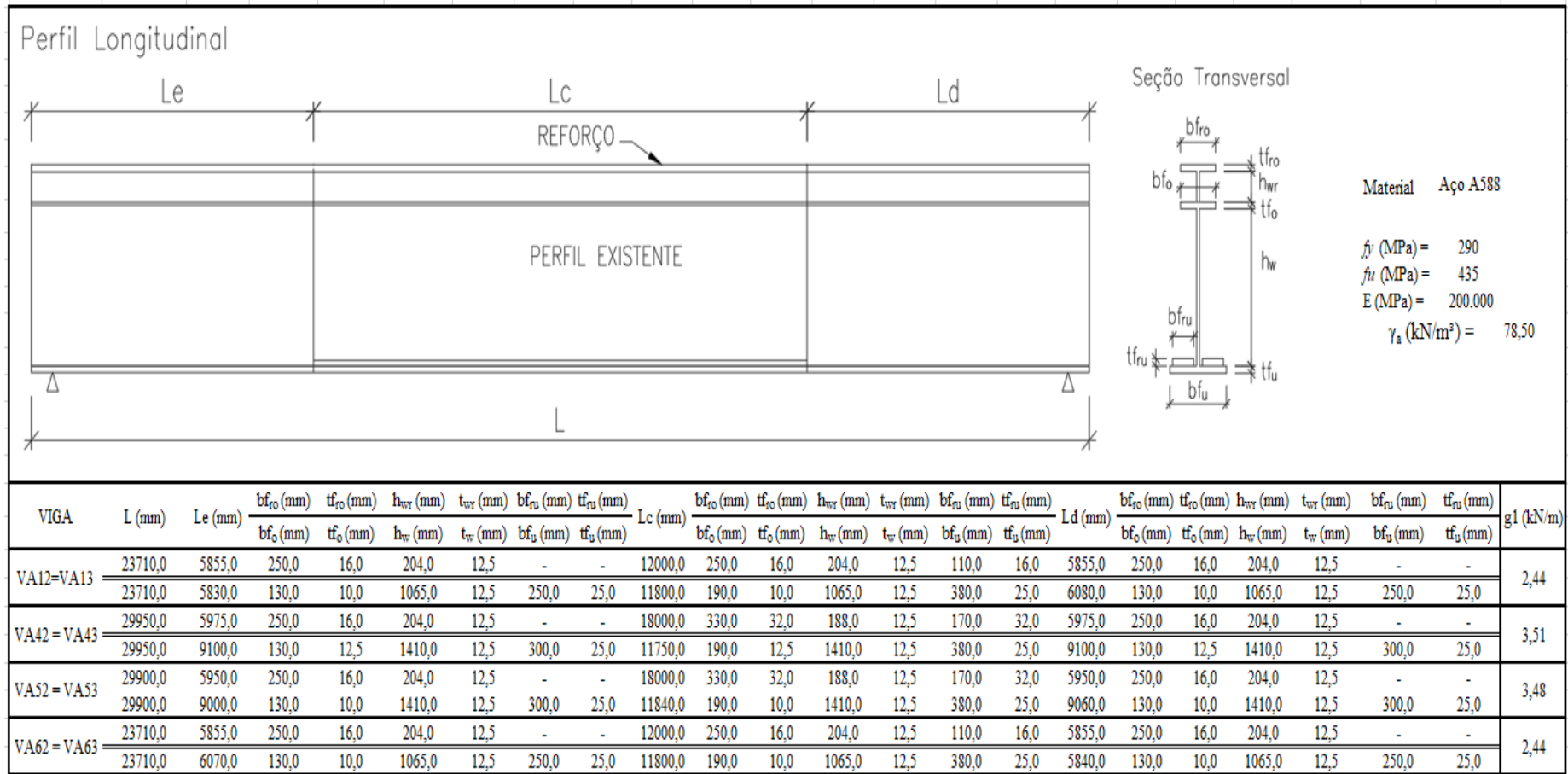


Figura 55. Vigas existentes - reforçadas

### 5.2.3 Cargas móveis

A norma NBR 7188 (2013) estabelece os valores básicos de cargas móveis e de pedestres a serem consideradas nos projetos de pontes, viadutos e passarelas. Para as obras rodoviárias a carga padrão é o TB45, com seis metros de comprimento e três de largura, ocupando uma área de 18m<sup>2</sup>. O TB45 possui três eixos afastados de 1,5m com 150kN, em cada eixo, e duas rodas por eixo afastadas de 2,0m resultando em uma carga por roda de 75kN. Concomitante a esta carga a norma exige a consideração da carga de multidão de 5kN/m<sup>2</sup> aplicada à pista de rolamento e ainda uma carga de 3kN/m<sup>2</sup> aplicada nos passeios.

Pfeil (1979) comenta que um trem de carga móvel deve ser disposto sobre o tabuleiro da ponte buscando sempre a pior posição possível para a solicitação estudada para cada elemento estrutural. A norma instrui que no projeto de obras de arte especiais o trem de carga móvel pode assumir qualquer posição da pista de rolamento, inclusive acostamento e faixas de segurança. Essas posições devem ser estudadas com o objetivo de se encontrar as envoltórias de carregamentos para cada elemento estrutural.

Estes valores característicos a serem distribuídos sobre a estrutura da ponte são majorados pelos coeficientes estabelecidos na referida norma. O coeficiente de número de faixas (CNF) deve ser aplicado sobre o valor característico das cargas móveis para o dimensionamento dos elementos longitudinais da estrutura, e não deve ser computado no dimensionamento dos elementos transversais. O coeficiente que leva em conta o efeito dinâmico das cargas móveis de forma simplificada é chamado de coeficiente de impacto vertical (CIV) e deve ser aplicado sobre a carga móvel para dimensionamento de todos os elementos estruturais. A norma ainda estabelece para as regiões em torno de juntas e descontinuidades estruturais um coeficiente de impacto adicional (CIA) definido pela tipologia da obra de arte. Os carregamentos dos passeios não são afetados pelos coeficientes de majoração relacionados acima.

O termo trem-tipo, conforme Pfeil (1979) refere-se ao quinhão de carga que cada viga de aço absorve. Com isso, dada a configuração da seção transversal da estrutura, aplicam-se os métodos de distribuição transversal de Engesser-Courbon e Fauchart para definir o trem-tipo de cada viga de aço. Para a aplicação do método de distribuição de Engesser-Courbon de forma adequada é necessário que sejam projetadas transversinas com rigidez suficiente para garantir o comportamento rígido transversal. No projeto tem-se transversinas de concreto armado sobre os apoios e transversinas de aço intermediárias espaçadas a cada 6m. Para cada vão de estrutura

tem-se então 5 transversinas. Apesar das transversinas existentes e projetadas com rigidez adequada, utiliza-se o método de Fauchart para comparação dos valores de carga móvel absorvida por cada longarina.

São realizados dois estudos das linhas de influência, um para a distribuição transversal da carga móvel e outro para as solicitações longitudinais do elemento estrutural. Em cada um deles a carga móvel deve ser posicionada nas regiões que forneçam as solicitações máximas e mínimas. Não se deve carregar regiões do tabuleiro que causem alívio nas solicitações de um determinado elemento em questão (MARCHETTI, 2008). A figura 56 adaptada de Almeida (2015) ilustra o método de Engesser-Courbon.

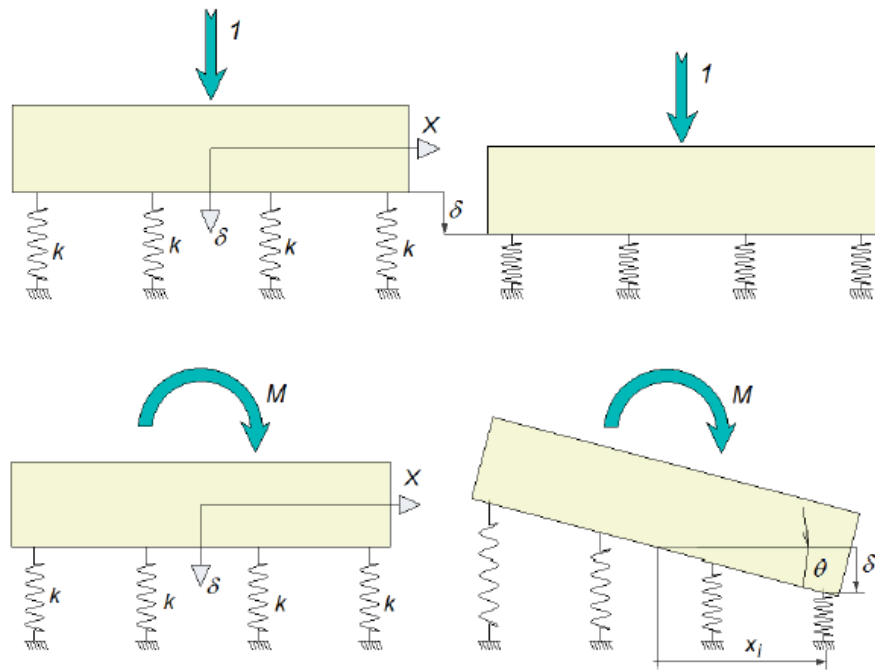


Figura 56 – Modelo Engesser-Courbon (Adaptado de ALMEIDA, 2015)

A reação para uma determinada viga é dada pela contribuição de duas parcelas do movimento de corpo rígido. Uma é a translação e a outra é a rotação. Assim as ordenadas da linha de influência para a distribuição transversal com o método de Engesser-Courbon são calculadas com a equação (16).

$$R_{i,j} = \frac{1}{n} \pm \frac{x_i x_j}{\sum x_i^2} \quad (16)$$

Sendo:

$n$  = número de longarinas;

$x_j$  = posição da carga unitária em relação ao centro elástico;

$x_i$  = distância de cada viga ao centro elástico.

O método de Fauchart é aplicado para tabuleiros múltiplos sem transversinas ou com transversinas de pouca rigidez. Este método considera a flexibilidade das lajes. Para a aplicação do método faz-se necessário a definição das constantes de mola verticais e transversais das longarinas, definidas com a equação (17) e (18).

$$K_v = \left(\frac{\pi}{L}\right)^4 EI \quad (17)$$

$$K_t = \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 GJ \quad (18)$$

Sendo:

$L$  = comprimento do vão;

$J$  = Inércia polar das seção;

$K_v$  = Coeficiente de mola vertical;

$K_t$  = Coeficiente de mola transversal;

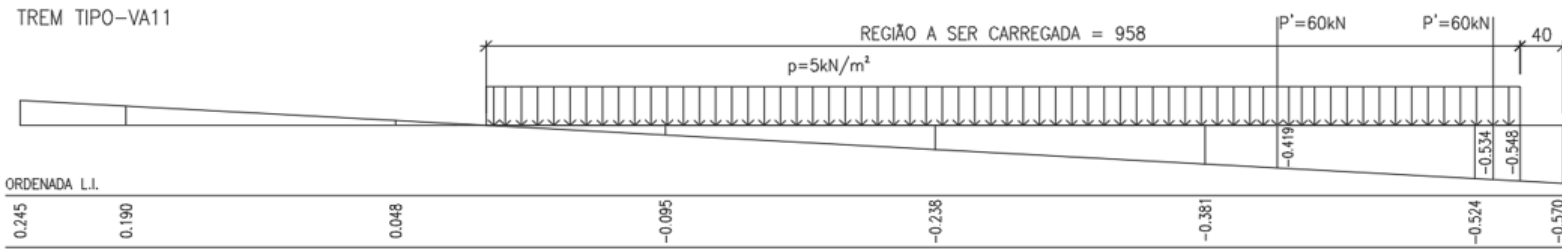
Os valores das molas calculadas pelo método de Fauchart são apresentados na tabela 7.

Tabela 7 – coeficientes de mola Fauchart

Viga	1	2	3	4	5	6
$I_{CD} [m^4]$	0,0517	0,0544	0,0544	0,0544	0,0544	0,0528
$J_a [m^4]$	0,0177	0,0177	0,0177	0,0177	0,0177	0,0177
$K_v [tf/m^2]$	124,35	130,84	130,84	130,84	130,84	126,99
$K_t [tf/m^2]$	1.494,59	1.494,59	1.494,59	1.494,59	1.494,59	1.494,59





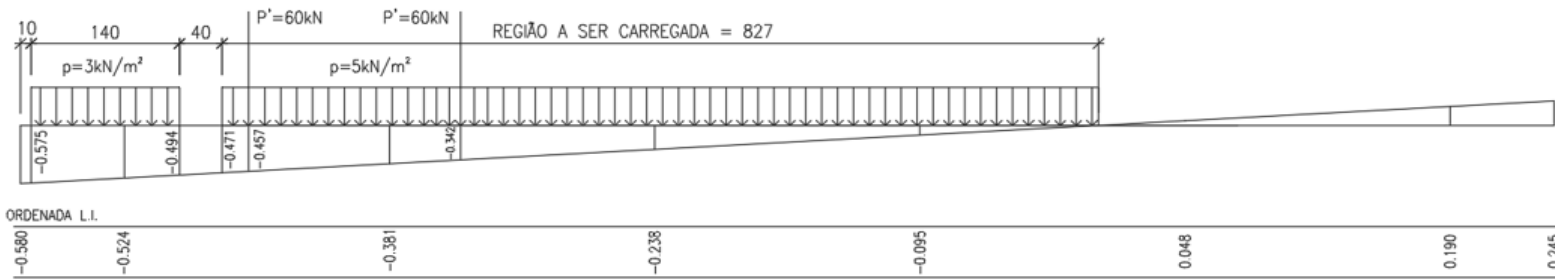


VA11

$Q \text{ (kN)} = 60 \text{ kN} * (0,534 + 0,419) * 1,27 = 72,8 \text{ kN}$

$q \text{ (kN/m)} = 5 \text{ kN/m}^2 * (0,548 * 9,58 * 0,5) * 1,27 = 16,67 \text{ kN/m}$

TREM TIPO-VA16



VA16

$Q \text{ (kN)} = 60 \text{ kN} * (0,457 + 0,342) * 1,27 = 60,9 \text{ kN}$

$q \text{ (kN/m)} = 5 \text{ kN/m}^2 * (0,471 * 8,27 * 0,5) * 1,27 + 3 \text{ kN/m}^2 * (0,575 + 0,494) * 1,40 / 2 = 14,61 \text{ kN/m}$

	VA12		VA14
$Q \text{ (kN)} =$	$60 \text{ kN} * (0,387 + 0,318) * 1,27 = 53,7 \text{ kN}$	$Q \text{ (kN)} =$	$60 \text{ kN} * (0,225 + 0,202) * 1,27 = 32,5 \text{ kN}$
$q \text{ (kN/m)} =$	$5 \text{ kN/m}^2 * (0,396 * 11,52 * 0,5) * 1,27 = 11,40 \text{ kN/m}$	$q \text{ (kN/m)} =$	$5 \text{ kN/m}^2 * (0,227 + 0,09) * 12 / 2 * 1,27 + 3 \text{ kN/m}^2 * (0,249 + 0,232) * 1,40 / 2 = 13,08 \text{ kN/m}$
	VA13		VA15
$Q \text{ (kN)} =$	$60 \text{ kN} * (0,24 + 0,218) * 1,27 = 34,9 \text{ kN}$	$Q \text{ (kN)} =$	$60 \text{ kN} * (0,340 + 0,272) * 1,27 = 46,7 \text{ kN}$
$q \text{ (kN/m)} =$	$5 \text{ kN/m}^2 * (0,243 + 1,06) * 12 / 2 * 1,27 + 3 \text{ kN/m}^2 * (0,101 + 0,085) * 1,40 / 2 = 13,68 \text{ kN/m}$	$q \text{ (kN/m)} =$	$5 \text{ kN/m}^2 * (0,349 * 10,19 * 1/2) * 1,27 + 3 \text{ kN/m}^2 * (0,413 + 0,363) * 1,40 / 2 = 12,92 \text{ kN/m}$

Figura 58 – Trem-tipo das vigas de aço – Engesser Courbon (unidades das cotas: cm)

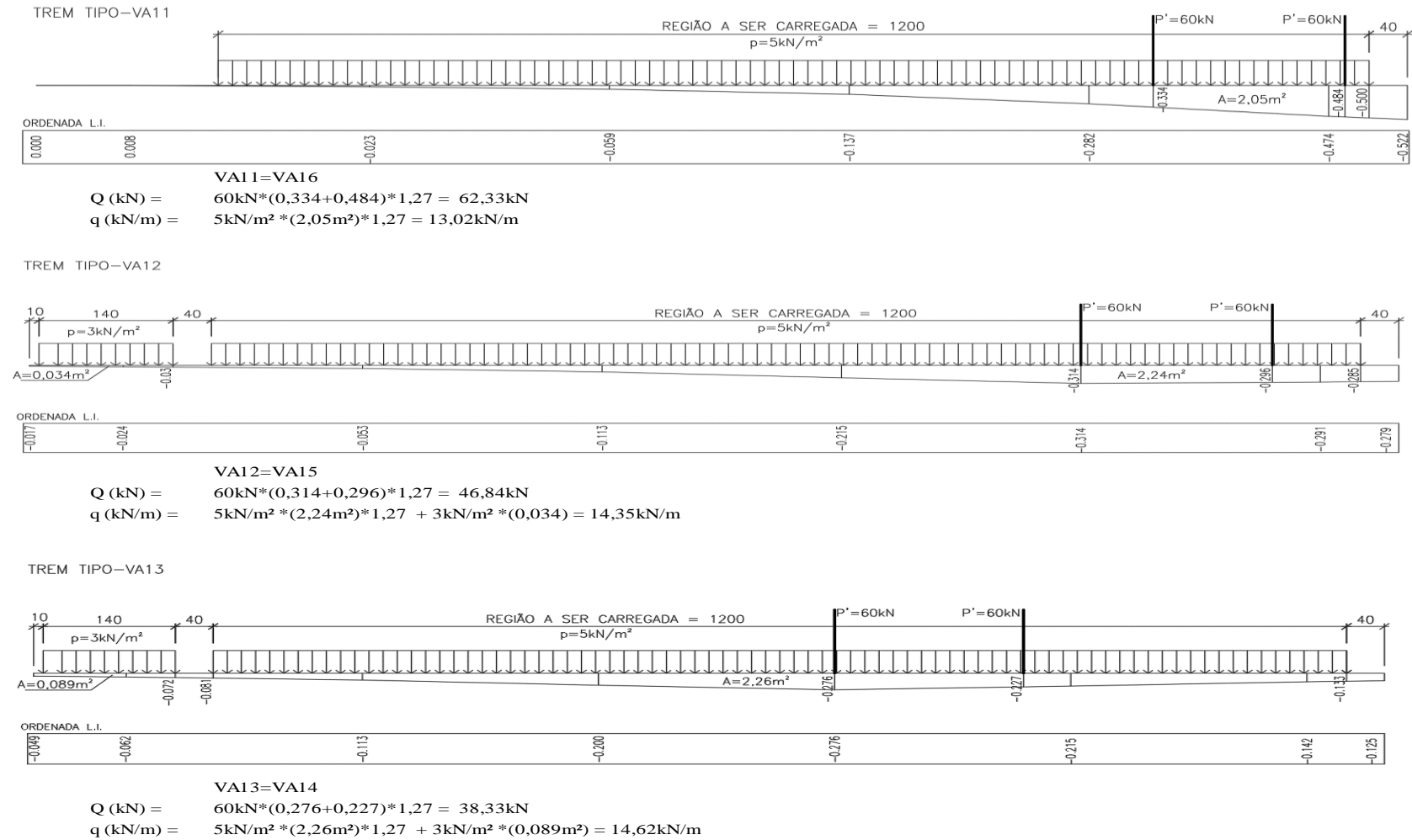


Figura 59 – Trem-tipo das vigas de aço – Fauchart (unidades das cotas: cm)

Os valores calculados pelos dois métodos são apresentados na tabela 8 para cada viga.

Tabela 8 – Resumo carregamentos, propriedades e fases

Viga		1	2	3	4	5	6
Courbon	Q (kN)	72,80	53,70	34,90	35,50	46,70	60,90
	q (kN/m)	16,77	11,40	13,68	13,08	12,92	14,61
Fauchart	Q (kN)	62,33	46,84	38,33	38,33	46,84	62,33
	q (kN/m)	13,02	14,35	14,62	14,62	14,35	13,02

A distribuição transversal calculada pelo método de Fauchart resulta em cargas menores nas vigas externas e maiores para as vigas internas, em comparação com os carregamentos obtidos pelo método de Courbon. Para o caso das vigas intermediárias as cargas concentradas e distribuídas, obtidas com Fauchart, são 9% e 7% maiores, respectivamente. As diferenças entre os carregamentos não alteram a verificação estrutural dos elementos. Assim, os carregamentos utilizados nas verificações são os obtidos pelo método de Courbon.

#### 5.2.4 Modelo de análise

Quantificados os carregamentos atuantes, as fases de atuação e as propriedades das vigas mistas em cada fase, elabora-se o modelo de análise. Para facilitar a organização do modelo de análise foi elaborado um resumo das propriedades, fases de análise e carregamentos.

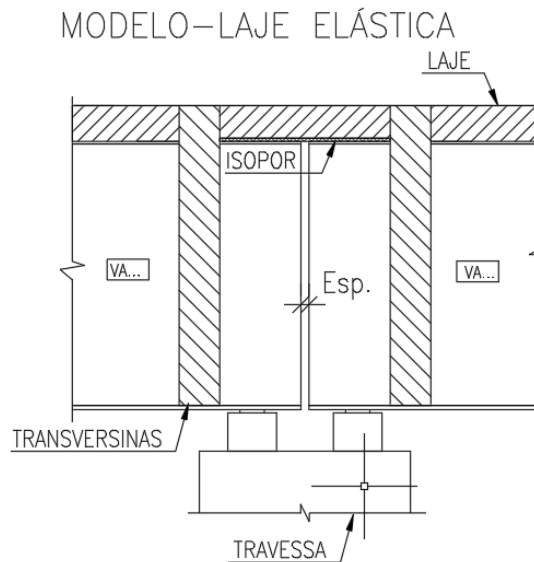
Tabela 9 – Resumo carregamentos, propriedades e fases

Vão	Fase/Propriedades	Vigas							
		1	2	3	4	5	6		
1 e 6	Inicial	$A_s$ (m <sup>2</sup> )	0,0290	0,0348	0,0348	0,0284	0,0284	0,0284	
		$I_s$ (m <sup>4</sup> )	0,0077	0,0089	0,0089	0,0076	0,0076	0,0076	
		$g_1$ (kN/m)	2,41	2,44	2,44	2,34	2,34	2,34	
		$g_2$ (kN/m)	11,39	25,08	25,08	13,75	13,75	12,27	
	Longa Duração	$A_{LD}$ (m <sup>2</sup> )	0,0493	0,0594	0,0594	0,0530	0,0530	0,0504	
		$I_{LD}$ (m <sup>4</sup> )	0,0190	0,0210	0,0210	0,0199	0,0199	0,0191	
		G2 (kN)	56,93	35,73	35,73	35,73	42,73	73,94	
		$g_3$ (kN/m)	9,06	4,20	4,20	4,20	8,53	3,58	
		G3 (kN)	73,32	101,63	101,63	101,63	101,62	39,99	
	Curta Duração	$A_{CD}$ (m <sup>2</sup> )	0,0901	0,1086	0,1086	0,1022	0,1022	0,0943	
		$I_{CD}$ (m <sup>4</sup> )	0,0264	0,0288	0,0288	0,0268	0,0268	0,0262	
		Q (kN)	72,80	53,70	34,90	32,50	46,70	60,90	
		$q$ (kN/m)	16,67	11,40	13,68	13,08	12,92	14,61	
	2 e 3	Inicial	$A_s$ (m <sup>2</sup> )	0,0414	0,0414	0,0414	0,0414	0,0414	0,0414
			$I_s$ (m <sup>4</sup> )	0,0160	0,0160	0,0160	0,0160	0,0160	0,0160
$g_1$ (kN/m)			3,17	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	
$g_2$ (kN/m)			11,39	25,08	25,08	13,75	13,75	12,27	
Longa Duração		$A_{LD}$ (m <sup>2</sup> )	0,0617	0,0660	0,0660	0,0660	0,0660	0,0633	
		$I_{LD}$ (m <sup>4</sup> )	0,0357	0,0383	0,0383	0,0383	0,0383	0,0367	
		$g_3$ (kN/m)	9,06	4,20	4,20	4,20	8,53	3,58	
		$A_{CD}$ (m <sup>2</sup> )	0,1025	0,1152	0,1152	0,1152	0,1152	0,1072	
Curta Duração		$I_{CD}$ (m <sup>4</sup> )	0,0517	0,0544	0,0544	0,0544	0,0544	0,0528	
		Q (kN)	72,80	53,70	34,90	32,50	46,70	60,90	
		$q$ (kN/m)	16,67	11,40	13,68	13,08	12,92	14,61	
4 e 5		Inicial	$A_s$ (m <sup>2</sup> )	0,0414	0,0533	0,0533	0,0414	0,0414	0,0414
			$I_s$ (m <sup>4</sup> )	0,0160	0,0247	0,0247	0,0160	0,0160	0,0160
			$g_1$ (kN/m)	3,17	3,51	3,51	3,07	3,07	3,07
			$g_2$ (kN/m)	11,39	25,08	25,08	13,75	13,75	12,27
	Longa Duração	$A_{LD}$ (m <sup>2</sup> )	0,0617	0,0779	0,0779	0,0660	0,0660	0,0633	
		$I_{LD}$ (m <sup>4</sup> )	0,0357	0,0439	0,0439	0,0383	0,0383	0,0367	
		$g_3$ (kN/m)	9,06	4,20	4,20	4,20	8,53	3,58	
		$A_{CD}$ (m <sup>2</sup> )	0,1025	0,1271	0,1271	0,1152	0,1152	0,1072	
	Curta Duração	$I_{CD}$ (m <sup>4</sup> )	0,0517	0,0601	0,0601	0,0544	0,0544	0,0528	
		Q (kN)	72,80	53,70	34,90	32,50	46,70	60,90	
		$q$ (kN/m)	16,67	11,40	13,68	13,08	12,92	14,61	

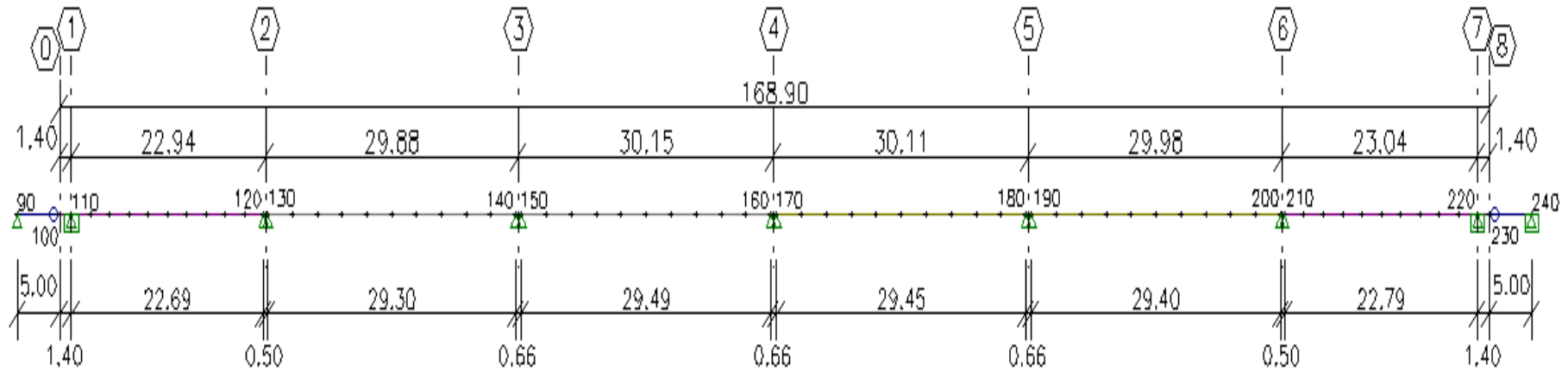
O modelo da ponte foi analisado utilizando-se o *software* STRAP 2013. Trata-se de um modelo plano com aplicação de barras de pórtico, subdividido por fases de construção e utilização. O STRAP 2013 possui uma formulação para geração das envoltórias das cargas móveis, facilitando a obtenção da envoltória de esforços finais com a aplicação da superposição das análises realizadas em cada fase.

A ponte sobre o rio Aratau possui seis vãos isostáticos. Sobre os pilares PII e PVI tem-se juntas de dilatação. Sobre os demais apoios intermediários tem-se laje elástica, que no modelo é representada por uma junta com espaçamento igual ao espaçamento existente entre os apoios

de elastômeros. Nos pilares de extremo, as vigas de aço possuem um trecho em balanço e seus apoios são chapas de aço sobre berços de concreto simples. As lajes de transição são simplesmente apoiadas nos consoles das transversinas de entrada. Os vãos foram divididos em 10 partes cada um. A figura 60 apresenta a solução adotada para a laje elástica.



Para cada viga de aço foi elaborado um modelo de análise dividido em estágios de carregamento conforme o texto apresentado acima. Os resultados obtidos são a envoltória de esforços solicitantes, deslocamentos das vigas mistas e reações sobre os aparelhos de apoio. Nas figuras 61 a 64, apresenta-se o modelo de análise e os valores característicos das solicitações nos apoios e no meio do vão, as reações e os deslocamentos.



Nó de apoio: finaliza com um múltiplo de 10 (110, 120...)

Nó central: soma 5 ao nó de apoio (115, 125...)

Figura 61 – Modelo de análise (unidades das cotas: m)

		Vigas de Aço					
Nó	Carregamento	1	2	3	4	5	6
110	$V_g$ (kN)	268	370	370	240	289	214
	$V_Q$ (kN)	392	279	253	239	277	335
	$M_g$ (kNm)	-205	-224	-224	-212	-226	-177
	$M_Q$ (kNm)	-275	-199	-157	-148	-186	-233
115	$M_g$ (kNm)	1371	1931	1931	1202	1471	1084
	$M_Q$ (kNm)	2189	1557	1415	1340	1456	1874
120	$V_g$ (kN)	-250	-350	-350	-221	-269	-199
	$V_Q$ (kN)	-387	-276	-250	-236	-265	-332
130	$V_g$ (kN)	346	474	474	308	371	277
	$V_Q$ (kN)	452	320	301	285	323	388
135	$M_g$ (kNm)	2534	3471	3471	2255	2720	2030
	$M_Q$ (kNm)	3266	2313	2176	2063	2334	2804
150	$V_g$ (kN)	348	477	477	310	374	279
	$V_Q$ (kN)	454	321	302	286	324	389
155	$M_g$ (kNm)	2567	3517	3516	2285	2756	2057
	$M_Q$ (kNm)	3301	2338	2201	2087	2360	2834
170	$V_g$ (kN)	348	476	476	310	373	279
	$V_Q$ (kN)	451	320	300	286	322	387
175	$M_g$ (kNm)	2561	3507	3507	2278	2748	2051
	$M_Q$ (kNm)	3293	2332	2195	2081	2354	2827
190	$V_g$ (kN)	347	476	476	309	373	278
	$V_Q$ (kN)	448	317	298	282	320	384
195	$M_g$ (kNm)	2552	3495	3495	2271	2738	2044
	$M_Q$ (kNm)	3285	2326	2189	2076	2348	2820
210	$V_g$ (kN)	252	352	352	222	271	200
	$V_Q$ (kN)	393	280	254	233	278	336
215	$M_g$ (kNm)	1381	1948	1948	1211	1485	1094
	$M_Q$ (kNm)	2205	1568	1426	1350	1559	1887
220	$V_g$ (kN)	-269	-371	-371	-240	-290	-215
	$V_Q$ (kN)	-392	-279	-253	-240	-277	-336
	$M_g$ (kNm)	-205	-223	-223	-212	-226	-177
	$M_Q$ (kNm)	-280	-202	-160	-150	-189	-237

Figura 62 – Solicitações características  
(g – cargas permanentes, Q – carga móvel)

		Vigas de Aço					
Nó	Carregamento	1	2	3	4	5	6
110	R <sub>g</sub> (kN)	431	551	551	405	468	354
	R <sub>Q</sub> (kN)	473	335	315	298	338	406
120	R <sub>g</sub> (kN)	250	350	350	221	269	199
	R <sub>Q</sub> (kN)	393	279	254	240	278	336
130	R <sub>g</sub> (kN)	346	476	474	310	376	279
	R <sub>Q</sub> (kN)	456	323	303	288	326	391
140	R <sub>g</sub> (kN)	346	474	474	308	371	277
	R <sub>Q</sub> (kN)	455	322	303	288	325	391
150	R <sub>g</sub> (kN)	348	480	477	313	379	281
	R <sub>Q</sub> (kN)	458	324	305	289	327	393
160	R <sub>g</sub> (kN)	348	477	477	310	374	279
	R <sub>Q</sub> (kN)	456	323	304	289	326	391
170	R <sub>g</sub> (kN)	348	479	479	312	379	281
	R <sub>Q</sub> (kN)	457	323	305	289	326	392
180	R <sub>g</sub> (kN)	348	476	476	309	373	279
	R <sub>Q</sub> (kN)	456	323	304	289	326	392
190	R <sub>g</sub> (kN)	347	478	478	312	378	281
	R <sub>Q</sub> (kN)	455	322	304	288	326	391
200	R <sub>g</sub> (kN)	347	476	476	309	373	278
	R <sub>Q</sub> (kN)	454	321	302	287	324	389
210	R <sub>g</sub> (kN)	256	354	354	224	275	201
	R <sub>Q</sub> (kN)	397	282	257	243	281	340
220	R <sub>g</sub> (kN)	432	553	553	406	469	354
	R <sub>Q</sub> (kN)	473	335	315	298	338	406

Figura 63 – Reações  
(g – cargas permanentes, Q – carga móvel)



		Vigas de Aço					
Nó	Carregamento	1	2	3	4	5	6
115	$\delta_g$ (cm)	-3,61	-5,30	-5,30	-3,70	-4,06	-3,36
	$\delta_Q$ (cm)	-2,01	-1,31	-1,21	-1,23	-1,41	-1,74
135	$\delta_g$ (cm)	-5,40	-8,66	-8,66	-5,38	-5,90	-4,89
	$\delta_Q$ (cm)	-2,56	-1,72	-1,65	-1,57	-1,75	-2,16
155	$\delta_g$ (cm)	-5,53	-8,88	-8,88	-5,52	-6,06	-5,02
	$\delta_Q$ (cm)	-2,62	-1,76	-1,69	-1,60	-1,79	-2,21
175	$\delta_g$ (cm)	-5,51	-5,85	-5,85	-5,49	-6,03	-4,99
	$\delta_Q$ (cm)	-2,61	-1,58	-1,52	1,60	-1,78	-2,20
195	$\delta_g$ (cm)	-5,47	-5,81	-5,81	-5,45	-5,98	-4,96
	$\delta_Q$ (cm)	-2,59	-1,57	-1,51	-1,59	-1,77	-2,18
215	$\delta_g$ (cm)	-3,67	-5,40	-5,40	-3,77	-4,13	-3,42
	$\delta_Q$ (cm)	-2,04	-1,33	-1,23	-1,25	-1,43	-1,76

Figura 64 – Deslocamentos  
(g – cargas permanentes, Q – carga móvel)

### 5.3 DIMENSIONAMENTO ANALÍTICO

O dimensionamento analítico dos elementos estruturais da superestrutura é realizado com base nos critérios normativos apresentados nos capítulos anteriores e descritos abaixo.

#### 5.3.1 Guarda-Rodas

Guarda-rodas são elementos de contenção lateral engastados no tabuleiro da superestrutura, conforme definição apresentada na NBR 7188. Estes dispositivos são dimensionados para impactos laterais e verticais, concomitantes, perpendiculares ao sentido do tráfego com valor igual a 100kN. Os esforços são aplicados no topo do elemento estrutural em uma largura de 50cm com espraiamento de 45° para as duas componentes. Por se tratarem de esforços com valores truncados os coeficientes de majoração para a combinação normal de estado limite último são fornecidos adequadamente pela norma NBR 8681.

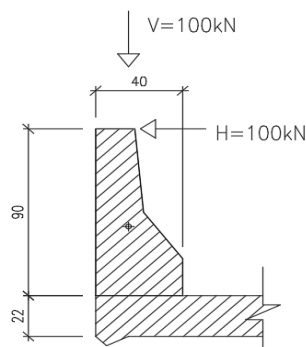


Figura 65 – Esforços no Guarda-Rodas (unidades das cotas: cm)

Esse padrão de guarda-rodas é denominado padrão ABNT e possui duas seções de interesse para o dimensionamento. A seção que se encontra na variação da largura e a seção na base de engastamento com a laje. Na combinação para ELU do guarda-rodas o fator de majoração para a carga horizontal (H) é igual a 1.5 conforme NBR 8681 (2004). Para o guarda-rodas em questão apresenta-se abaixo o cálculo da armadura necessária para um metro de estrutura.

Dados Geometria

$h$ (cm) = 90	$h'$ (cm) = 45	Material	
$b$ (cm) = 40	$b'$ (cm) = 18	$f_{ck}$ (MPa) = 30	Aço (CA50)
$d$ (cm) = 35	$d$ (cm) = 13	$f_{cd}$ (MPa) = 21,43	$f_{yk}$ (MPa) = 500

Coefficientes ELU  $\gamma_c = 1,4$   $\gamma_s = 1,15$   $\gamma_q = 1,5$

Seção Base

$$M_k = 0,9 \times 100 / (0,9 \times 2 + 0,5) = 39,13 \text{ kN/m}$$

$$M_d = 39,13 \times 1,5 = 58,70 \text{ kN/m}$$

$$A_s \text{ (cm}^2\text{/m)} = 3,99$$

Seção Meio

$$M_k = 0,45 \times 100 / (0,45 \times 2 + 0,5) = 32,14 \text{ kN/m}$$

$$M_d = 32,14 \times 1,5 = 48,21 \text{ kN/m}$$

$$A_s \text{ (cm}^2\text{)} = 9,71$$

Figura 66 – Dimensionamento: Guarda-Rodas

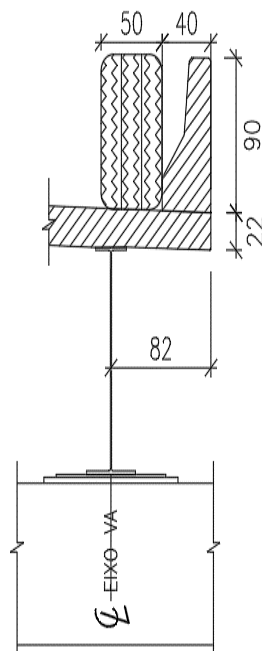
### 5.3.2 Lajes do tabuleiro

As lajes da pista de rolamento são projetadas com o objetivo de distribuir as cargas permanentes e móveis para as longarinas da estrutura. As lajes que estão localizadas na borda da pista de rolamento recebem o engastamento dos dispositivos de contenção e devem ser dimensionadas dispendo-se a carga móvel nas piores situações possíveis.

Os esforços a serem considerados no dimensionamento do trecho em balanço são as cargas de impacto na estrutura de contenção, o peso próprio do guarda-rodas, o peso próprio da laje em balanço e o peso próprio da capa de concreto asfáltica.

Para as combinações últimas são considerados duas situações distintas, uma com a carga de impacto vertical e horizontal atuando concomitantemente no topo da barreira rígida e a outra com a carga de impacto horizontal somada ao esforço gerado pela carga vertical da roda atuando na borda do guarda-rodas.

Os coeficientes de majoração para as cargas variáveis são adequados para cada combinação. A figura 67 apresenta de forma resumida os dados necessários para o cálculo dos esforços e o dimensionamento da armadura para um trecho de um metro de laje em balanço.



## RESUMO - DIMENSIONAMENTO

Seção Dimensionamento

h (cm) = 22

b (cm) = 100

d (cm) = 17

lb (cm) = 82-15 = 67

## MATERIAL

 $f_{ck}$  (MPa) = 30 $f_{cd}$  (MPa) = 21,43

Aço (CA50)

 $f_{yk}$  (MPa) = 500

TB45 (450kN)

P (kN) = 75

CIV = 1,35

Cargas

 $g_{gr}$  (kN) = 6,25 $g_{gl}$  (kN/m) = 0,22x1x25 = 5,50 $g_{cbuq}$  (kN/m) = 2x0,07x1x24 = 3,36

Coeficientes ELU

 $\gamma_c = 1,35$   $\gamma_s = 1,15$   $\gamma_g = 1,35$  $\gamma_q = 1,2$  - Ações especiais truncadas

Solicitações - Eixo da VA

 $M_{k\_gr}$  (kNm) = 0,67x6,25 = 4,19 $M_{k\_gl}$  (kNm) = 0,82x0,82/2x5,50 = 1,85 $M_{k\_gl}$  (kNm) = 0,41x0,41/2x3,36 = 0,28 $M_{k\_H}$  (kNm) = 1,01x100/(1,01x2+0,5+2x0,67) = 26,17 $M_{k\_V}$  (kNm) = 0,82x100/(1,01x2+0,5+2x0,67) = 21,24 $M_{k\_Q}$  (kNm) = 75x1,35x(0,82-0,40-0,25) = 17,21 $M_d$  (kNm) = 1,35x(4,19+1,85+0,28) + 1,3x(26,17+21,24) = 70,17 $M_d$  (kNm) = 1,35x(4,19+1,85+0,28) + 1,2x(26,17) + 1,5x(17,21) = 65,75

H (kN) = 100

V (kN) = 100

Impacto TB45 (450kN)

Impacto P (kN) = 75

CIV = 1,35 - NBR 7188/2013 vãos menores que 10m

1,3 - Ações especiais consideradas conjuntamente

1,2 - Ações especiais truncadas

1,5 - Ações variáveis combinação normal em pontes

Momento devido ao peso próprio do guarda-rodas

Momento devido ao peso próprio da laje em balanço

Momento devido ao peso próprio do pavimento asfáltico

Momento devido ao impacto horizontal no GR.

Momento devido ao impacto vertical no GR.

As (cm<sup>2</sup>/m) = 10,201As (cm<sup>2</sup>/m) = 10,198

Figura 67 – Posição da roda e dimensionamento das lajes em balanço (unidades das cotas: cm)

As lajes entre vigas de aço são dimensionadas para as cargas permanentes e para a carga do trem-tipo da ponte. As solicitações atuantes na laje central entre vigas são mensuradas com a aplicação das tabelas de Rüsç (1965) combinadas com os fatores de amplificação para a avaliação dos estados limites. O modelo adotado para as lajes centrais é o de uma laje bi-engastada com comprimento na direção do tráfego muito maior que o do vão central. Para a utilização das tabelas de Rusch é necessário fornecer o comprimento de espraçamento das pressões que as rodas do veículo exercem sobre o eixo médio da laje. Na figura 68 são apresentados os comprimentos de espraçamento na direção longitudinal e transversal da estrutura.

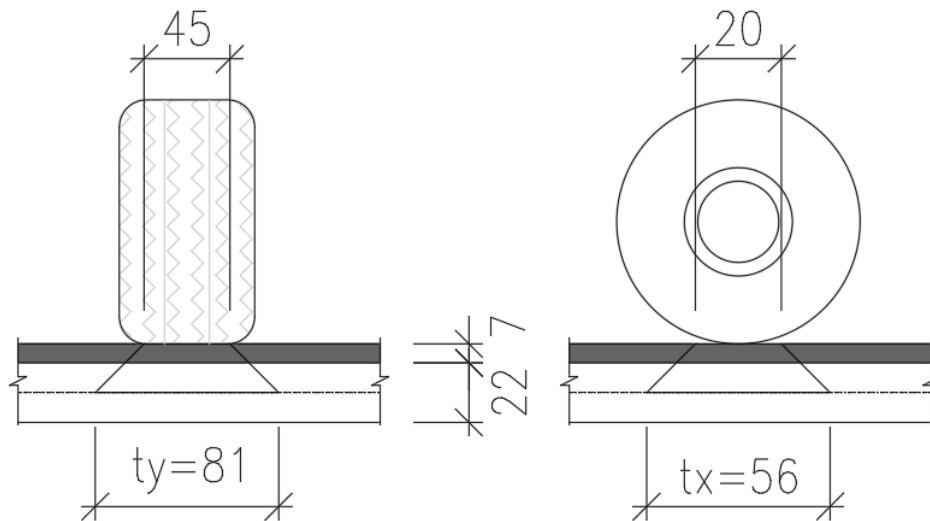


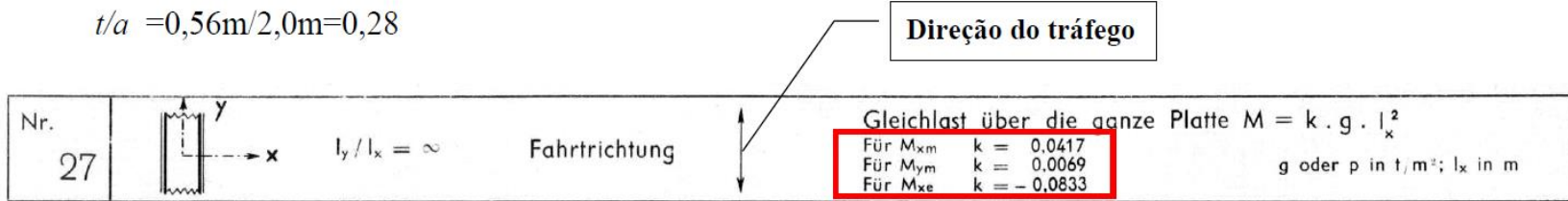
Figura 68 – Desenvolvimento das pressões da roda  
(unidades das cotas: cm)

As lajes são armadas na direção transversal ao sentido do tráfego com isso os dados para seleção da tabela de Rusch e análise de esforços são definidos nessa orientação. Os dados de entrada são o vão da laje ( $l_x = 2.50\text{m}$ ), a distância transversal entre as rodas do TB ( $a = 2.00\text{m}$ ), a relação  $l_x/a = 1,25$ , o espraçamento  $x$  ( $t_x = 56\text{cm}$ ) e a relação entre o espraçamento e a distância transversal entre rodas do TB ( $t_x/a = 0,28$ ). A tabela de Rusch aplicada nesta solução é a tabela número 27 apresentada na figura 69.

Com :

$$l_x/a = 2,50\text{m} / 2,0\text{m} = 1,25$$

$$t/a = 0,56\text{m}/2,0\text{m} = 0,28$$



Brückenklasse 30t bis 60t				Raddruck des SLW von 1,0t								Gleichlast um SLW von 1 t/m <sup>2</sup>						
$l_x/a$	$M_{xm}$ in Plattenmitte				$M_{ym}$ in Plattenmitte				$-M_{xe}$ in Randmitte				$M_{xm}$		$M_{ym}$		$M_{xe}$	
	$t/a$				$t/a$				$t/a$				für alle Werte $t/a$					
	0,125	0,250	0,50	1,0	0,125	0,250	0,50	1,0	0,125	0,250	0,50	1,0	$p$	$p'$	$p$	$p'$	$p$	$p'$
	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L						
0,50	0,118	0,083	0,041	0,020	0,097	0,051	0,031	0,008	0,250	0,190	0,120	0,050	—	—	—	0,01	—	0,10
1,00	171	129	078	061	149	091	051	023	320	260	180	090	—	—	—	01	—	28
1,50	266	216	175	120	187	134	080	038	420	400	340	250	—	0,05	—	03	—	35
2,00	332	290	250	195	215	188	098	064	58	56	51	400	—	10	—	05	0,03	35
2,50	399	357	318	264	248	198	137	096	72	70	66	55	—	27	—	13	08	37
3,00	452	415	370	330	287	239	179	141	85	84	80	78	0,30	53	0,05	24	20	80
4,00	0,56	0,52	0,485	0,440	0,361	0,315	0,262	0,222	1,06	1,06	1,01	0,98	0,80	1,11	0,13	0,57	0,55	2,20
5,00	65	62	58	53	430	389	338	295	1,21	1,21	1,18	1,14	1,25	1,79	21	83	1,00	4,25
6,00	74	71	67	63	498	457	412	370	1,32	1,32	1,30	1,26	1,65	2,90	28	1,33	1,40	7,60
7,00	82	79	75	70	56	52	479	433	1,41	1,41	1,40	1,36	2,00	4,50	33	2,03	2,00	11,80
8,00	87	85	81	76	61	58	54	490	1,47	1,47	1,47	1,44	2,40	6,30	42	2,89	2,40	16,20
9,00	91	89	85	80	66	63	59	54	1,52	1,52	1,52	1,50	2,75	8,40	48	3,82	3,00	21,60
10,00	0,94	0,91	0,87	0,82	0,71	0,67	0,63	0,58	1,54	1,54	1,54	1,53	3,12	10,55	0,56	4,85	3,50	26,30

Figura 69 – Tabela de Rusch nr. 27. Trad.: *Gleichlast über die ganze Platte* (Distribuída sobre toda a laje), *Brückenklasse* (Classe de cargas da ponte), *Plattenmitte* (Centro da laje), *Randmitte* (centro da arresta).

É necessário realizar uma interpolação para definir os valores dos coeficientes correspondentes ao caso em análise. Com isso pode-se realizar as combinações de carga móvel e permanente para o dimensionamento da armadura em cada direção. As tabelas de Rusch possuem em sua formulação uma separação para carga de multidão aplicada sobre a faixa de tráfego principal (p) e secundária (p'). A NBR 7188 (2013) estabelece uma carga uniforme sem distinção entre a faixa principal e secundária com valor definido de acordo com a categoria do trem-tipo. A ponte em questão é para trem-tipo classe 45 (TB45), com isso a carga uniforme é de 5kN/m<sup>2</sup>, o que implica que os valores p e p' da tabela de Rusch devem ser somados. A tabela 10 apresenta a definição dos coeficientes M<sub>L</sub>, M<sub>P</sub>, M<sub>P'</sub> correspondentes a laje em questão.

Tabela 10 – Coeficientes tabela de Rusch nr 27

Nr. 27	M <sub>xm</sub>				M <sub>ym</sub>				M <sub>xe</sub>			
	k/a	0,250	0,280	0,500	p + p'	0,250	0,280	0,500	p + p'	0,250	0,280	0,500
1,00	0,129	0,123	0,078	0,000	0,091	0,086	0,051	0,010	0,260	0,250	0,180	0,280
1,25	0,173	0,167	0,127	0,025	0,113	0,107	0,066	0,045	0,330	0,322	0,260	0,315
1,50	0,216	0,211	0,175	0,050	0,134	0,128	0,080	0,080	0,400	0,393	0,340	0,350

A tabela de Rusch número 27 fornece três solicitações, o momento transversal à ponte situado no meio da laje (M<sub>xm</sub>), momento transversal à ponte localizado sobre as longarinas (M<sub>xe</sub>) e o momento longitudinal localizado na laje (M<sub>ym</sub>). As solicitações e combinações realizadas para definir o momento solicitante de dimensionamento são apresentadas nas figuras 70 a 72.

M<sub>xm</sub> (kNm) - Momento transversal à ponte no meio da laje

$$M_{xm} = CIV \times P \times M_L + CIV \times p \times M_{p+p'} \quad M_L = 0,167 \quad M_p = 0 \quad M_{p'} = 0,025$$

$$M_{xm} = 1,35 \times 75 \times 0,167 + 1,35 \times 5 \times 0,025 = 17,078$$

M<sub>g</sub> (kNm) - Momento transversal à ponte da carga permanente

$$M_g = k \times g \times l_k^2 \quad k = 0,0417$$

$$M_g = 0,0417 \times 8,86 \times 2,50^2 = 2,309$$

Combinação ELU

$$M_d = 1,35 \times M_g + 1,50 \times M_q$$

$$M_d = 1,35 \times 2,309 + 1,50 \times 17,078 = 28,734$$

Figura 70 – Solicitação transversal no vão da laje

Mxe (kNm) - Momento transversal à ponte sobre as longarinas  
 $M_{xe} = CIV \times P \times M_L + CIV \times p \times M_{p+p'}$       $M_L = -0,322$       $M_p = 0$       $M_{p'} = -0,315$   
 $M_{xm} = 1,35 \times 75 \times (-0,322) + 1,35 \times 5 \times (-0,315) = -34,729$   
Mg (kNm) - Momento transversal à ponte (carga permanente)  
 $M_g = k \times g \times l_k^2$       $k = -0,0833$   
 $M_g = -0,0833 \times 8,86 \times 2,50^2 = -4,613$   
Combinação ELU  
 $M_d = 1,35 \times M_g + 1,50 \times M_q$   
 $M_d = 1,35 \times (-4,613) + 1,50 \times (-34,729) = -58,321$

Figura 71 – Solicitação transversal sobre as longarinas

Mym (kNm) - Momento longitudinal na laje  
 $M_{xe} = CIV \times P \times M_L + CIV \times p \times M_{p+p'}$       $M_L = 0,107$       $M_p = 0$       $M_{p'} = 0,045$   
 $M_{xm} = 1,35 \times 75 \times 0,107 + 1,35 \times 5 \times 0,045 = 11,138$   
Mg (kNm) - Momento transversal à ponte (carga permanente)  
 $M_g = k \times g \times l_k^2$       $k = 0,0069$   
 $M_g = 0,0069 \times 8,86 \times 2,50^2 = 0,382$   
Combinação ELU  
 $M_d = 1,35 \times M_g + 1,50 \times M_q$   
 $M_d = 1,35 \times 0,382 + 1,50 \times 11,138 = 17,223$

Figura 72 – Solicitação longitudinal na laje

Nas regiões de juntas e extremos da obra, a NBR 7188 (2013) estabelece a amplificação dos esforços da carga móvel por um coeficiente adicional chamado de coeficiente de impacto adicional (CIA). Este busca computar os efeitos gerados devido às imperfeições e descontinuidades da pista de rolamento e deve ser aplicado em trechos de até 5m para cada lado das imperfeições. Com isso os esforços calculados com a tabela de Rusch são amplificados da seguinte forma:

Mxm (kNm) - Momento transversal à ponte no meio da laje  
 $M_{xm} = CIA \times CIV \times P \times M_L + CIA \times CIV \times p \times M_{p+p'}$       $M_L = 0,16$       $M_p = 0$       $M_{p'} = 0,025$   
 $M_{xm} = 1,25 \times 1,35 \times 75 \times 0,167 + 1,25 \times 1,35 \times 5 \times 0,025 = 21,347$   
Mg (kNm) - Momento transversal à ponte da carga permanente  
 $M_g = k \times g \times l_k^2$       $k = 0,0417$   
 $M_g = 0,0417 \times 8,86 \times 2,50^2 = 2,309$   
Combinação ELU  
 $M_d = 1,35 \times M_g + 1,50 \times M_q$   
 $M_d = 1,35 \times 2,309 + 1,50 \times 21,347 = 35,138$

Figura 73 – Solicitação transversal no vão da laje considerando (CIA)

Mxe (kNm) - Momento transversal à ponte sobre as longarinas  
 $M_{xe} = CIA \times CIV \times P \times M_L + CIA \times CIV \times p \times M_L = -0,322 \quad M_p = 0 \quad M_{p'} = -0,315$   
 $M_{xm} = 1,25 \times 1,35 \times 75 \times (-0,322) + 1,25 \times 1,35 \times 5 \times (-0,315) = -43,411$   
Mg (kNm) - Momento transversal à ponte (carga permanente)  
 $M_g = k \times g \times l_x^2 \quad k = -0,0833$   
 $M_g = -0,0833 \times 8,86 \times 2,50^2 = -4,613$   
Combinação ELU  
 $M_d = 1,35 \times M_g + 1,50 \times M_q$   
 $M_d = 1,35 \times (-4,613) + 1,50 \times (-43,411) = -71,344$

Figura 74 – Solicitação transversal sobre as longarinas (CIA)

Mym (kNm) - Momento longitudinal na laje  
 $M_{xe} = CIA \times CIV \times P \times M_L + CIA \times CIV \times p \times M_{p+p'} \quad M_L = 0,107 \quad M_p = 0 \quad M_{p'} = 0,045$   
 $M_{xm} = 1,25 \times 1,35 \times 75 \times 0,107 + 1,25 \times 1,35 \times 5 \times 0,045 = 13,922$   
Mg (kNm) - Momento transversal à ponte (carga permanente)  
 $M_g = k \times g \times l_x^2 \quad k = 0,0069$   
 $M_g = 0,0069 \times 8,86 \times 2,50^2 = 0,382$   
Combinação ELU  
 $M_d = 1,35 \times M_g + 1,50 \times M_q$   
 $M_d = 1,35 \times 0,382 + 1,50 \times 13,922 = 21,399$

Figura 75 – Solicitação longitudinal na laje (CIA)

### 5.3.3 Vigas de aço

O dimensionamento das vigas de aço consiste na realidade em uma verificação, comparando os esforços atuantes com a capacidade resistente das geometrias e seções transversais de aço empregadas no projeto da ponte mista. O processo construtivo definido para a execução da estrutura afeta diretamente as fases de verificação da seção de aço e mista como já foi descrito nos capítulos anteriores.

A NBR 16694: Projeto de Pontes de Aço e Mistas de Aço e Concreto, publicada no ano de 2020, estabelece os seguintes processos de verificação de acordo com as fases construtivas. Na primeira fase, em pontes construídas sem escoramento, aonde somente as vigas de aço compõem o sistema de sustentação, as verificações do estado limite último devem ser realizadas conforme as recomendações do Anexo G e H da NBR 8800 (2008).

Na segunda fase, após o lançamento das lajes de concreto armado e a cura do concreto, as vigas mistas devem ser verificadas como vigas mistas de acordo com os critérios estabelecidos no



anexo O da NBR 8800 (2008). A NBR 16694 (2020) não permite interação parcial entre a laje de concreto e os perfis de aço, somente interação completa, o que exige um número maior de conectores de cisalhamento.

A NBR 16694 (2020) estabelece a verificação dos conectores de cisalhamento considerando o fluxo de cisalhamento longitudinal, que deve ser obtido em regime elástico. O fluxo de cisalhamento é fruto do deslizamento que ocorre entre a laje de concreto e a mesa superior do perfil de aço, quando estes são submetidos a flexão e pode ser calculado com as propriedades da seção mista homogeneizada para cargas de curta duração, conforme equação 19.

$$q = \frac{VQ_{CD}}{I_{CD}} \quad (19)$$

Sendo:

$V$  = esforço cortante na seção;

$Q_{CD}$  = momento estático da seção mista para cargas de curta duração;

$I_{CD}$  = momento de inércia da seção mista para cargas de curta duração;

O dimensionamento dos conectores deve ser realizado para combinação de fadiga adotando os coeficientes de ponderação recomendados pela NBR 8681 para a carga móvel e a força resistente para o conector em função do ciclo de uso da estrutura. A verificação é dispensável caso a faixa de variação de tensões em regime elástico seja inferior a  $\sigma_{TH}$ . Para conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça, aplicados por processo automático de solda ou por soldas de filete, o valor da faixa de tensões é  $\sigma_{TH} = 69\text{MPa}$ , conforme NBR 16694.

A prática de projeto então se resume a adotar um número de conectores suficientes para manter a faixa de tensões dentro do limite que garanta resistência a fadiga infinita. O número de conectores é calculado conforme equação 20.

$$n_{cs,q} = \frac{q}{A_{cs} * \sigma_{cs\_fad}} \quad (20)$$

onde:

$q$  = fluxo de cisalhamento horizontal;

$A_{cs}$  = área transversal do conector de cisalhamento;

$\sigma_{cs\_fad}$  = tensão limite de fadiga ( $\sigma_{TH}$ );

O número de conectores calculados com a consideração do fluxo de cisalhamento horizontal deve ser maior ou igual ao número de conectores de cisalhamento calculados conforme abordagem da NBR 8800 para o estado limite último, que por definição se aplica a estruturas com cargas estáticas (edifícios). A distribuição longitudinal dos conectores também sofre alterações ao considerar-se o fluxo de cisalhamento horizontal. Nas regiões dos apoios tem-se um número maior de conectores quando comparado a região central da viga biapoiada. Os espaçamentos máximos e mínimos, transversais e longitudinais, são apresentados nas verificações de cada viga de aço.

Para cada viga de aço mista foram realizadas as análises conforme recomendações da NBR 16694 (2020) e os esforços resistentes calculados foram comparados com as solicitações de cálculo provenientes das combinações para ELU. As combinações são realizadas para a fase construtiva e para a fase de uso da estrutura. Os coeficientes de majoração para a fase construtiva são estabelecidos conforme a NBR 8800 (2008), com o valor de 1.15 (peso próprio das vigas de aço) e 1.25 (elementos de concreto executados *in loco*). Para a fase de utilização os coeficientes para majoração das solicitações permanentes e móvel, fornecidos pela NBR 8681 (2004), possuem o valor de 1.35 (cargas permanentes agrupadas) e 1.50 respectivamente. As análises para estabelecer os esforços resistentes de cada viga de aço são realizadas pela rotina desenvolvida no *Mathcad Prime 4.0*. A rotina contempla a programação do anexo G, H e O da NBR 8800 (2008) e os critérios estabelecidos na NBR 16694 (2020).

A rotina de cálculo possui uma entrada de dados de materiais (aço, concreto e conector), a geometria do perfil soldado com adaptações para a implementação de reforços na seção transversal, as solicitações atuantes em cada seção e fase da estrutura. A formulação inicial permite uma entrada de até três seções transversais diferentes.

Finalizada a entrada de dados, o código realiza o cálculo das propriedades geométricas dos perfis de aço e da seção mista com a aplicação da integral de Green. Com estas propriedades e as informações de contorno da seção transversal (“Lb” e “a”), é possível definir os esforços resistentes da seção de aço para os estados limites de flambagem lateral da alma, flambagem lateral da mesa e flambagem lateral por torção. Com as informações geométricas a rotina também realiza uma verificação quanto ao atendimento dos limites de esbeltez estabelecidos na NBR 8800 (2008) no anexo H.

A seção mista é classificada conforme a relação de esbeltez da sua alma e com isso realiza-se os cálculos dos esforços resistentes em regime elástico ou plástico da seção mista conforme recomendações do anexo O da NBR 8800 (2008).

Na parte final da rotina de cálculo são verificados o fluxo de cisalhamento e o número de conectores necessários, as tensões de fadiga no perfil e a relação de esforços resistentes pelos esforços solicitantes. A NBR 8800 estabelece um número mínimo de conectores de cisalhamento para garantir a interação completa. A rotina calcula o número mínimo e apresenta o número necessário para atender a verificação do fluxo de cisalhamento. Este número em geral é maior que o número mínimo, uma vez que a rotina adota o pico do esforço de cisalhamento para cada trecho de verificação.

Com o resumo da capacidade de trabalho da seção mista é possível verificar se as seções transversais adotadas possuem capacidade portante suficiente para cada fase de solicitações que a estrutura estará sujeita.

Apresenta-se abaixo a verificação realizada para a viga de aço VA11. As demais verificações são apresentadas no anexo A.

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

VIGA DE AÇO: VA11

1 - Dados dos Materiais

Aço	$f_y$	$f_u$	$E_a$	$G_a$	$\rho_a$	$esp_{sac}$	$\gamma_{a1}$	$\gamma_{a2}$	$\beta_{vm}$	$\sigma_{a\_fad}$
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	(mm)				(MPa)
"A588"	290	435	200000	77000	7.85	0	1.10	1.35	1	69

Concreto	$f_{ck}$	$\gamma_c$	$\rho_c$	$\alpha_c$	$T_{c,r}$	$\gamma_{retr}$	$\alpha_B$	Aço	$f_{ys}$	$\gamma_s$	
	(MPa)		$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	$\left(\frac{1}{1^\circ C}\right)$	(°C)				(MPa)		
"C30"	30	1.4	2.50	$10^{-5}$	-5	1.2	1.0	"CA50"	500	1.15	$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio $\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaissé $\alpha_E = 0,9$ para calcário $\alpha_E = 0,7$ para arenito

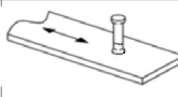
$E_{ca} = 30672.46 \text{ MPa}$        $E_{cb} = 26838.41 \text{ MPa}$

Conector	$\phi_{ce}$	$n_{ce}$	$f_{uce}$	$\gamma_{ce}$	$R_g$	$R_p$	$\sigma_{ce\_fad}$
	(mm)		(MPa)				(MPa)
"Stud"	25	1	415	1.25	1	0.8	69

9.3 Conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça, aplicados por processo automático de solda ou por soldas de filete

69

Ruptura do conector por cisalhamento

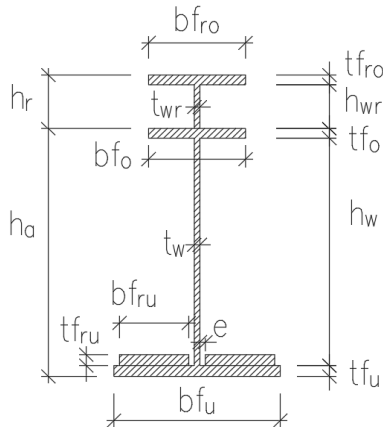


- Rg:
- 1,00 - para qualquer número de conectores conectados em uma linha soldado diretamente no perfil de aço;
  - 0,85 - para dois conectores soldados perpendicular ao perfil de aço
  - 0,70 - para três ou mais conectores soldados perpendicular ao perfil de aço
- Rp:
- 1,00 - para conectores soldados diretamente no perfil de aço;
  - 0,75 - para conectores soldados e embutidos em uma laje mista

2 - Geometria Perfil de aço

S	Trec.	$b_{fu}$	$t_{fu}$	$h_w$	$t_w$	$b_{fo}$	$t_{fo}$	$b_{fru}$	$t_{fru}$	e	$h_{wr}$	$t_{wr}$	$b_{fro}$	$t_{fro}$	$b_{fc}$	$h_{laje}$	$L_o$	a
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
1	"S1"	400	22	1282	12.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	207	22	500	100
2	"S2"	400	22	1282	12.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	207	22	500	150
3	"S3"	400	35	1282	9.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	207	22	500	200

Seção Transversal



a = distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores adjacentes NBR 8800 - 5.4.3.1

$$h_a := t_{fu} + h_w + t_{fo} = \begin{bmatrix} 1320 \\ 1320 \\ 1333 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_r := h_{wr} + t_{fro} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_{at} := h_a + h_r = \begin{bmatrix} 1320 \\ 1320 \\ 1333 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h := h_a + h_r + h_{laje} = \begin{bmatrix} 1540 \\ 1540 \\ 1553 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

### 3 - Solicitações Características (Sem majoração)

O programa admite até três seções transversais diferentes.

Seção	$M_{g1}$ (tf·m)	$M_{g2}$ (tf·m)	$M_{g3}$ (tf·m)	$M_Q$ (tf·m)	$V_{Sd\_cst}$ (tf)	$M_{Sd\_cst}$ (tf·m)
1	0.00	0.00	0	0.00	19.4	0.00
2	5.37	25.4	19.1	79.3	15.5	37.9
3	15.4	72.7	49.7	218.9	0	108.6

Combinações consideradas:

$$V_{Sd\_cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2}$$

$$V_{Sd\_cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2} + \gamma_q * V_Q$$

$$M_{Sd\_cst} = \gamma_g * M_{g1} + \gamma_g * M_{g2}$$

$$M_{Sd} = \gamma_g * (M_{g1} + M_{g2} + M_{g3}) + \gamma_q * M_Q$$

Esforço cortante para verificação do fluxo de cisalhamento horizontal nos conectores:

Nó	$P_{\text{erf}_V}$	$V_{g1}$ (tf)	$V_{g2}$ (tf)	$V_{g3}$ (tf)	$V_Q$ (tf)	$V_{Sd}$ (tf)
10	1	2.74	13.0	11.1	39.2	95
11	2	2.20	10.4	9.07	33.5	79.4
12	3	1.65	7.8	7.01	28.1	64.4
13	3	1.11	5.22	4.95	23.2	50.0
14	3	0.56	2.63	2.90	18.6	36.1
15	3	0.00	0.00	0.00	14.3	22.7

Coefficientes de Majoração dos Esforços - NBR 8681/2004

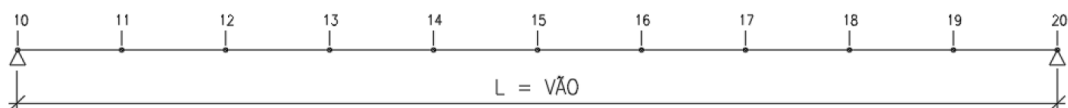
Fase	$\gamma_{g\_Vg1}$	$\gamma_{g\_Vg2}$	$\gamma_{g\_Vg3}$	$\gamma_{q\_VQ}$	$\gamma_{g\_Mg1}$	$\gamma_{g\_Mg2}$	$\gamma_{g\_Mg3}$	$\gamma_{q\_MQ}$
"Const"	1.15	1.15	0	0	1.15	1.25	0	0
"ELU"	1.35	1.35	1.35	1.5	1.35	1.35	1.35	1.5

$$\frac{L_{v\tilde{a}o}}{(m)}$$

$$\frac{23.00}{10}$$

$$l_{\text{barra}} := \frac{L_{v\tilde{a}o}}{d\tilde{i}v} = 2.3 \text{ m}$$

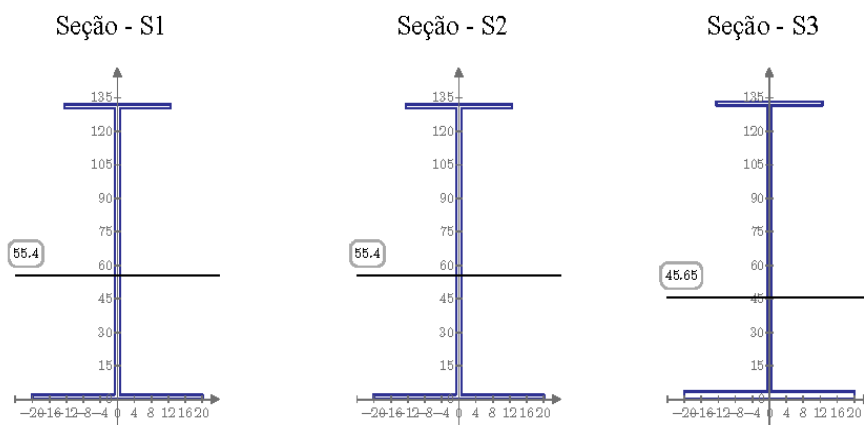
MODELO-NUMERAÇÃO DOS NÓS



Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

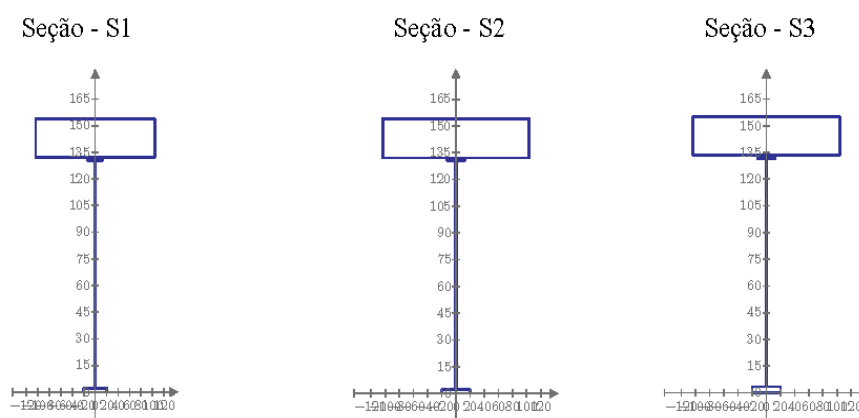
#### 4 - Propriedades do Perfil de Aço



$Prop\_Aço$	"S"	"Aa (m <sup>2</sup> )"	"ycg_u (m)"	"Ia (m <sup>4</sup> )"	"Wao (m <sup>3</sup> )"	"Wau (m <sup>3</sup> )"
1	0.0288	0.554	0.0073	0.0095	0.0131	
2	0.0288	0.554	0.0073	0.0095	0.0131	
3	0.0302	0.4565	0.008	0.0091	0.0175	

#### 5 - Propriedades da Seção Mista

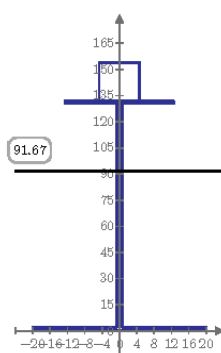
##### 5.1 - Seção Mista



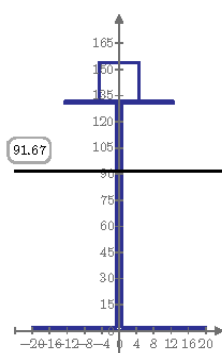
## 5.2 - Propriedades da Seção Mista - Longa Duração

$$n_{LD} := 3 (E_a \div E_{cs}) = 22.356$$

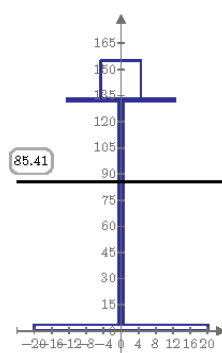
Seção - S1



Seção - S2



Seção - S3

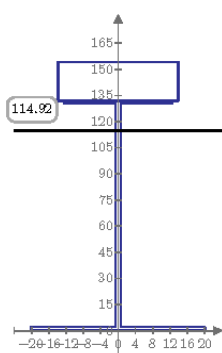


Prop_LD	"S"	"A_LD (m²)"	"ycg_u_LD (m)"	"I_LD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1		0.0492	0.9167	0.0165	0.0265	0.041	0.018
2		0.0492	0.9167	0.0165	0.0265	0.041	0.018
3		0.0505	0.8541	0.0199	0.0285	0.0415	0.0233

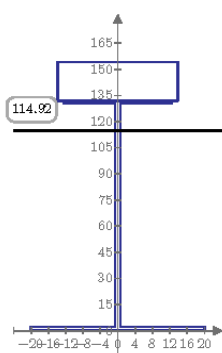
## 5.3 - Propriedades da Seção Mista - Curta Duração

$$n_{CD} := (E_a \div E_{cs}) = 7.45$$

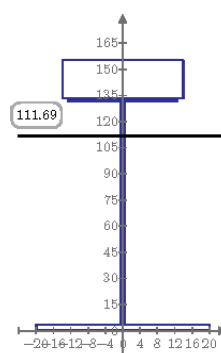
Seção - S1



Seção - S2



Seção - S3



Prop_CD	"S"	"A_CD (m²)"	"ycg_u_CD (m)"	"I_CD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1		0.0899	1.1492	0.0226	0.0577	0.1321	0.0196
2		0.0899	1.1492	0.0226	0.0577	0.1321	0.0196
3		0.0913	1.1169	0.0279	0.0639	0.129	0.025

## 6 - ESFORÇOS RESISTENTES

### 6.1 - Momento Fletor Resistente do Perfil de aço

$$ELU_{FLT} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 126 & 46 & 146 & \text{"SMC"} & 213 \\ 2 & 126 & 46 & 146 & \text{"SMC"} & 213 \\ 3 & 90 & 29 & 99 & \text{"SMC"} & 177 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLM} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 8 & 10 & 19 & \text{"CMP"} & 350 \\ 2 & 8 & 10 & 19 & \text{"CMP"} & 350 \\ 3 & 8 & 10 & 18 & \text{"CMP"} & 240 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLA} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 120 & 56 & 150 & \text{"SMC"} & 285 \\ 2 & 120 & 56 & 150 & \text{"SMC"} & 285 \\ 3 & 181 & 41 & 150 & \text{"ESB"} & 367 \end{bmatrix}$$

#### 6.1.1 - Verificação dos limites da NBR 8800 (Vigas Esbeltas):

$$VERIF_{ms} = \begin{bmatrix} \text{"a"} & \text{"b"} & \text{"c"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 6.2 - Esforço Cortante Resistente do Perfil de Aço

$$ELU_{VRA} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"a_max (cm)"} & \text{"VRd (tf)"} \\ 1.00 & 102.56 & 105.02 & 130.80 & 289.66 & 162.13 & 266.15 \\ 2.00 & 102.56 & 84.97 & 105.83 & 289.66 & 162.13 & 220.50 \\ 3.00 & 134.95 & 76.73 & 95.56 & 289.66 & 95.19 & 81.88 \end{bmatrix}$$

### 6.3 - Classificação da Seção Mista

$$CLAS\_SEÇÃO_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_{cmp}\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"Verf"} \\ 1.00 & 102.56 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 2.00 & 102.56 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 3.00 & 134.95 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \end{bmatrix}$$

#### 6.3.1 - Mrd - Seção Mista

$$MRd_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1.00 & \text{"SMC"} & 527.61 \\ 2.00 & \text{"SMC"} & 504.80 \\ 3.00 & \text{"SMC"} & 615.10 \end{bmatrix}$$

#### 6.3.2 - Vrd - Seção Mista

$$V_{Ra,SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"a_max (cm)"} & \text{"VRd_{SM} (tf)"} \\ 1.00 & 102.56 & 105.02 & 130.80 & 289.66 & 162.13 & 266.15 \\ 2.00 & 102.56 & 84.97 & 105.83 & 289.66 & 162.13 & 220.50 \\ 3.00 & 134.95 & 76.73 & 95.56 & 289.66 & 95.19 & 81.88 \end{bmatrix}$$



## 7 - CONECTORES DE CISALHAMENTO

Critérios conforme a NBR 8800/2008 seção O.4.

- Conectores do tipo pino com cabeça devem possuir comprimento mínimo quatro vezes o diâmetro do conector ( $h_{pc} = 4x\phi$ ).
- Os conectores tipo pino com cabeça não podem ter diâmetro maior que 2.5 vezes a espessura da mesa a qual forem soldadas, a menos que sejam colocados diretamente no eixo da alma do perfil.
- O cobrimento lateral de concreto para qualquer tipo de conector deve ser no mínimo 25mm.
- O espaçamento máximo entre linhas de centro de conectores deve ser igual a 8 vezes a espessura total da laje.
- O espaçamento mínimo entre linhas de centro de conectores do tipo pino com cabeça deve ser igual a 6 $\phi$  diâmetros ao longo do vão da viga. O espaçamento mínimo transversal deve ser de 4 $\phi$  diâmetros.

### 7.1 - Dados Conectores "Stud"

$$S_{ca} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi\_es \text{ (mm)}\text{"} & \text{"}A\_es \text{ (cm}^2\text{)}\text{"} & \text{"}nes\_min\text{"} & \text{"}esp\_long-max \text{ (cm)}\text{"} & \text{"}esp\_long-min \text{ (cm)}\text{"} & \text{"}esp\_tran-max \text{ (cm)}\text{"} \\ 25.00 & 4.91 & 123.00 & 176.00 & 15.00 & 10.00 \end{bmatrix}$$

### 7.2 - Verificação do Fluxo de Cisalhamento e Número de Conectores por trecho:

	"Trecho"	"1"	"2"	"3"	"4"	"5"	"6"	"7"	"8"	"9"	"10"
$S_{ca\_tr}$	"Seção"	1	2	3	3	3	3	3	3	2	1
	"hec (cm)"	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
	"Q (cm <sup>3</sup> )"	127858	127858	148509	148509	148509	148509	148509	148509	127858	127858
	"I (cm <sup>4</sup> )"	2255480	2255480	2787692	2787692	2787692	2787692	2787692	2787692	2255480	2255480
	"qd (tf/m)"	72	60	49	38	27	27	38	49	60	72
	"qk_Q (tf/m)"	30	25	21	18	14	14	18	21	25	30
	"nes_trecho"	20	17	14	12	9	9	12	14	17	20

### 7.3 - Número total de Conectores

$$n_{ca\_total} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi\_es \text{ (mm)}\text{"} & \text{"}nes\_total\text{"} \\ 25 & 144 \end{bmatrix}$$

## 8 - FADIGA

A tensão limite da faixa de variações de tensões, para um número infinito de ciclos de solicitação, varia conforme os elementos estruturais. Nenhuma verificação de resistência à fadiga é necessária se a faixa de variação de tensões, analisada em regime elástico, for inferior ao limite estabelecido na NBR 16694/2020 em seu anexo A.

$$S_{fad} = \begin{bmatrix} \text{"}perfil\text{"} & \text{"}\sigma_{fad,VQ} \text{ (MPa)}\text{"} & \text{"}\text{"} & \text{"}\sigma_{fad,MQ} \text{ (MPa)}\text{"} & \text{"}\text{"} \\ 1 & 23.3 & \text{"}ok\text{"} & 0 & \text{"}ok\text{"} \\ 2 & 19.91 & \text{"}ok\text{"} & 5.89 & \text{"}ok\text{"} \\ 3 & 21.76 & \text{"}ok\text{"} & 16.64 & \text{"}ok\text{"} \end{bmatrix}$$

## 9 - VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRABALHO DAS SEÇÕES DE AÇO

### 9.1 - Verificação na fase construtiva

$$VERIF_{ct} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd (tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 266.15 & 0.07 & \text{"ok"} & 0.00 & 212.61 & 0.00 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 220.50 & 0.07 & \text{"ok"} & 37.90 & 212.61 & 0.18 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 81.88 & 0.00 & \text{"ok"} & 108.60 & 176.76 & 0.61 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 9.1 - Verificação na fase de utilização

$$VERIF_{ut} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VSd (tf)} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd (tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 95.00 & 266.15 & 0.36 & \text{"ok"} & 43.86 & 527.61 & 0.08 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 79.40 & 220.50 & 0.36 & \text{"ok"} & 230.14 & 504.80 & 0.46 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 64.40 & 81.88 & 0.79 & \text{"ok"} & 564.71 & 615.10 & 0.92 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

#### 9.1.1 - Verificação das tensões na fase de utilização para seções semi-compactas

$$\sigma_{SM\_smc} = \begin{bmatrix} \text{"Perf"} & \text{"MSd/Wxo"} & \text{"fed (MPa)} & \text{""} & \text{"MSd/Wxu"} & \text{"fyd (MPa)} & \text{""} & \text{"R"} \\ 1 & 0.73 & 21.43 & \text{"ok"} & 23.87 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 2 & 3.86 & 21.43 & \text{"ok"} & 128.35 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 3 & 8.57 & 21.43 & \text{"ok"} & 245.26 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \end{bmatrix}$$

As demais vigas de aço foram agrupadas por vãos e seções transversais iguais e verificadas para as máximas solicitações de cada grupo. As vigas existentes que recebem reforço na seção transversal também foram analisadas agrupadas por vão para as cargas máximas de cada grupo. A tabela 11 apresenta um resumo das tensões atuantes na seção central do vão. As tensões são apresentadas no bordo inferior da viga de aço e no bordo superior da laje de concreto.

Tabela 11 – Resumo Tensões ELU – Abordagem Analítica

VIGA	$\sigma_{au}$	$\sigma_{co}$	Tensões Limites	
VA11 = VA61	2,45E+05	-8,57E+03	Aço A588	2,64E+05
VA12 = VA62	2,51E+05	-4,97E+03	Concreto	-2,14E+04
VA13 = VA63	2,51E+05	-4,97E+03		
VA14 = VA64	2,38E+05	-5,86E+03		
VA15 = VA65	2,38E+05	-5,86E+03		
VA16 = VA66	2,33E+05	-6,71E+03		
VA21 = VA31 = VA41 = VA51	2,44E+05	-9,34E+03		
VA22 = VA32	2,67E+05	-5,90E+03		
VA23 = VA33	2,67E+05	-5,90E+03		
VA24 = VA34 = VA44 = VA54	2,67E+05	-5,90E+03		
VA25 = VA35 = VA45 = VA55	2,67E+05	-5,90E+03		
VA26 = VA36 = VA46 = VA56	2,16E+05	-7,33E+03		
VA42 = VA52	2,19E+05	-5,20E+03		
VA43 = VA53	2,19E+05	-5,20E+03		
	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>		

Na tabela 12 apresenta-se um resumo dos esforços resistentes. Os esforços resistentes de cisalhamento  $V_{rd}$  são apresentados para a seção do apoio e os esforços resistentes de momento fletor  $M_{rd}$  são apresentados para a seção central do vão.

Tabela 12 – Resumo dimensionamento VA's (unidades: kN e m)

VIGA	Vão	Larg. Colab.		Perfil de Aço				Seção Mista		Solicitações	
	L (m)	$h_{aje}$	$b_{fc}$	$V_{Rd}$	$M_{Rd\_FLT}$	$M_{Rd\_FLM}$	$M_{Rd\_FLA}$	$V_{Rd}$	$M_{Rd}$	$V_{sd}$	$M_{sd}$
VA11	23,00	0,22	2,07	2661,5	1777,0	2400,0	3670,0	2661,5	6151,0	950,0	5647,1
VA12 = VA13 - Exist/Refor.	23,00	0,22	2,50	2661,5	2580,0	4260,0	3290,0	2661,5	5615,8	879,0	5290,9
VA14 e VA15	23,00	0,22	2,50	2661,5	1750,0	2370,0	3610,0	2661,5	5465,9	806,0	4844,0
VA16	23,00	0,22	2,23	2661,5	1750,0	2370,0	3610,0	2661,5	5526,0	792,0	4779,7
VA21	30,00	0,22	2,07	3190,1	3500,0	4740,0	7170,0	3190,1	9836,1	1146,0	8991,1
VA22 a VA25	30,00	0,22	2,50	3190,1	2610,0	3890,0	5910,0	3190,1	8844,1	1121,0	8930,4
VA26	30,00	0,22	2,23	3190,1	2610,0	3890,0	5910,0	3190,1	9673,9	957,0	7668,1
VA31	30,00	0,22	2,07	3190,1	3500,0	4740,0	7170,0	3190,1	9836,1	1146,0	8991,1
VA32 a VA35	30,00	0,22	2,50	3190,1	2610,0	3890,0	5910,0	3190,1	8844,1	1146,0	8991,1
VA36	30,00	0,22	2,23	3190,1	2610,0	3890,0	5910,0	3190,1	9673,9	957,0	7668,1
VA41	30,00	0,22	2,07	3190,1	3500,0	4740,0	7170,0	3190,1	9836,1	1146,0	8991,1
VA42 = VA43 - Exist/Refor.	30,00	0,22	2,50	3193,5	7760,0	8960,0	6980,0	3193,5	10868,7	1121,0	8767,2
VA44 e VA45	30,00	0,22	2,50	3190,1	2610,0	3890,0	5910,0	3190,1	8844,1	1146,0	8991,1
VA46	30,00	0,22	2,23	3190,1	2610,0	3890,0	5910,0	3190,1	9673,9	957,0	7668,1
VA51	30,00	0,22	2,07	3190,1	3500,0	4740,0	7170,0	3190,1	9836,1	1146,0	8991,1
VA52 = VA53 - Exist/Refor.	30,00	0,22	2,50	3188,7	7660,0	8830,0	6840,0	3188,7	10834,1	1118,0	8961,2
VA54 e VA55	30,00	0,22	2,50	3190,1	2610,0	3890,0	5910,0	3190,1	8844,1	1146,0	8991,1
VA56	30,00	0,22	2,23	3190,1	2610,0	3890,0	5910,0	3190,1	9673,9	957,0	7668,1
VA61	23,00	0,22	2,07	2661,5	1777,0	2400,0	3670,0	2661,5	6146,8	929,0	5675,5
VA62 = VA63 - Exist/Refor.	23,00	0,22	2,50	2661,5	2580,0	4260,0	3290,0	2661,5	5642,0	894,0	5543,4
VA64 e VA65	23,00	0,22	2,50	2661,5	1750,0	2370,0	3610,0	2661,5	5459,5	752,0	4880,9
VA66	23,00	0,22	2,23	2661,5	1750,0	2370,0	3610,0	2661,5	5520,5	774,0	4814,4

## 6 MODELO VIMIS

Este capítulo apresenta o desenvolvimento dos modelos em elementos finitos elaborados e analisados pelo código VIMIS. Foram analisadas as vigas isoladas com os quinhões de carga permanente e móvel de projeto já definidas. Os modelos desenvolvidos têm o objetivo de verificar o comportamento dos elementos estruturais para duas situações de simulação. A primeira situação é equivalente ao Estado Limite Último de dimensionamento, com a aplicação das cargas e resistências de projeto. A segunda abordagem é equivalente à verificação do Estado Limite de Serviço normativo, com os carregamentos aplicados em valores característicos e consideração do efeito do tempo.

### 6.1 ARQUIVO DE DADOS – VIMIS

O código de análise de vigas mistas “VIMIS” é fruto da pesquisa desenvolvida no PPGEC/UFRGS, sendo iniciada por Tamayo (2011) e desenvolvida por Dias (2013), Moreno (2016), Wayar (2016), De Franco (2018), Sanches (2020), em pesquisas realizadas no programa ao longo dos anos. A formulação do problema, os elementos finitos utilizados, as relações constitutivas de todos os materiais empregados podem ser consultados nos trabalhos supracitados, disponíveis no repositório digital da UFRGS.

Diferentes elementos finitos são empregados na elaboração do modelo de vigas mistas. A laje de concreto é modelada com elementos quadriláteros de casca degenerada com oito nós sendo que, cada nó tem 5 graus de liberdade, três deslocamentos e duas rotações. As vigas de aço e os enrijecedores são modelados com elementos de casca plana de quatro nós, com 6 graus de liberdade por nó. Os conectores de cisalhamento “*stud bolts*” são representados por elementos de barra conectando a viga de aço à laje de concreto. A figura 76 ilustra o modelo adotado para as vigas mistas.

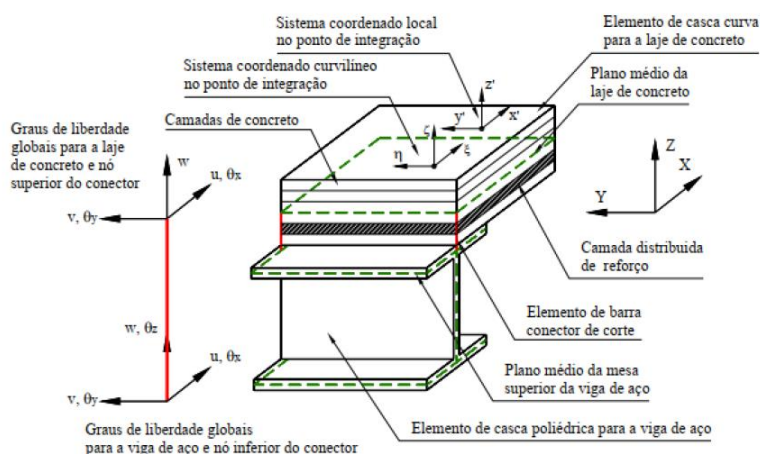


Figura 76 – Modelo numérico para vigas mistas (fonte: TAMAYO, et al, 2011).

Cabe destacar que os elementos de casca são posicionados na superfície média das mesas e da alma do perfil e o mesmo ocorre para os elementos de casca que representam a laje de concreto. Portanto os conectores de cisalhamento apresentam um comprimento igual à soma da metade da espessura da laje com a metade da espessura da mesa superior do perfil.

O código computacional VIMIS necessita que as informações correspondentes a geometria, condições de contorno, histórico de cargas e demais parâmetros lhe sejam fornecidos por um arquivo de dados gerado com auxílio do *software* GiD, que é uma ferramenta para pré e pós processamento de simulações numéricas desenvolvido pelo *International Center for Numerical Methods in Engineering* (MORENO, 2016). Com a ferramenta GiD é possível gerar a malha, atribuir as propriedades dos materiais, definir as condições de contorno, inserir as cargas nodais e distribuídas por área e exportar essas informações para o arquivo de dados a ser analisado no VIMIS. De Franco (2018) apresenta um manual de passos necessários para a preparação dos dados do problema.

Na definição do *Problem-Type*, existem dois tipos de análise disponíveis: linear e a não-linear. A diferença entre a análise linear e não-linear está nas relações constitutivas dos materiais. Não são verificadas as imperfeições geométricas (flambagem local) pois as mesmas foram implementadas no código por Sanches (2020).

Neste trabalho realizou-se as duas análises (ELU e ELS), com o objetivo de verificar o comportamento dos elementos estruturais para os carregamentos de projeto e comparar com o método analítico normativo.

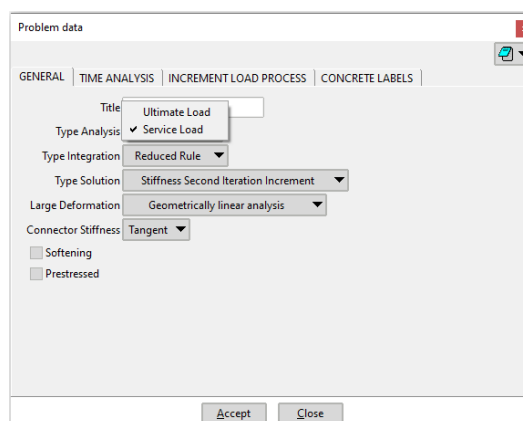


Figura 77 – Análises ELU e ELS

## 6.2 MODELOS ELABORADOS

A ponte sobre o rio Aratau possui um total de 36 vigas mistas, sendo seis vigas por vão e seis vãos isostáticos. Destas vigas 8 são existentes reforçadas e 28 são novas. Foram elaborados 14 modelos para a representação do conjunto total. No primeiro grupo foram modeladas as vigas mistas novas com a largura colaborante de laje calculada pelas recomendações normativas. O segundo grupo é formado pelas vigas mistas reforçadas, também modeladas com a largura efetiva normativa.

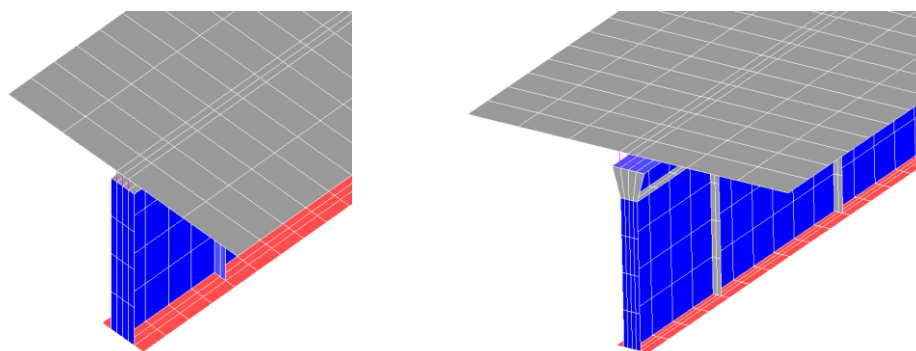


Figura 78 – Modelo vigas mistas isoladas novas e reforçadas

O modelo em elementos finitos é desenvolvido com uma malha suficientemente adequada para representar o contínuo por pequenos elementos conectados por nós. O tamanho de malha utilizado para a discretização da geometria da estrutura foi definido na direção longitudinal com elementos com 25cm de comprimento, buscando compatibilizar a laje, *studs* e viga de aço, com o auxílio do software GID. Os *studs* possuem espaçamentos diferenciados, sendo que nos extremos das vigas

temos 2 *studs* Ø 25 a cada 25cm e no vão central das vigas 2 *studs* Ø 25 a cada 50cm. Os enrijecedores também são espaçados com múltiplos de 25cm (ex. 100, 150, 200 e 250cm). Na direção transversal as malhas foram divididas em um número suficiente para alinhar os extremos e as posições dos diferentes elementos conectados, exemplo, a malha da laje nas bordas possui dimensões maiores porém junto aos conectores a malha é refinada. A laje de concreto armado é modelada com 10 camadas de concreto e 4 camadas de armadura distribuída.

Os carregamentos dos modelos de análise são os pesos próprios dos elementos estruturais e as cargas móveis. As cargas permanentes são modeladas com uma carga equivalente de pressão atuando sobre a laje de concreto e dividida pela largura colaborante da laje de concreto.

Para o caso de cargas móveis, o VIMIS, não possui a implementação automatizada para o cálculo dos esforços em cada seção. Com isso optou-se por modelar a carga do trem tipo e de multidão da NBR 7188 (2013) como cargas estáticas equivalentes nodais e distribuídas, respectivamente. As cargas nodais representam o peso próprio do veículo dividido por cada roda. A carga distribuída representa a carga de multidão prevista na referida norma. Para cada viga mista analisada utilizou-se o trem tipo (quinhão de carga) definido no capítulo 5. Posicionou-se o veículo de referência nas posições mais desfavoráveis para cada viga de aço. Os valores de cargas móveis são inseridos no modelo com a majoração dos coeficientes de impacto vertical e o coeficiente do número de faixas calculados conforme critérios da NBR 7188 (2013).

É preciso mencionar ainda que o projeto de recuperação da ponte, foi executado com vigas de aço não escoradas. Os elementos são lançados em sua posição final e utilizadas como suporte para a execução da ponte. O código VIMIS não possui em sua versão atual a análise das fases construtivas. Com isso a carga é aplicada conforme o histórico de carregamento, porém, sempre sobre o perfil misto completo, equivalente à execução da estrutura totalmente escorada. Todos os modelos são analisados desta forma. Este ponto configura uma limitação deste trabalho de análise.

### 6.3 ANÁLISE NÃO LINEAR

Na teoria de análise estrutural admite-se o concreto como um material elástico até certo limite (DIAS, 2016). A NBR 8800 (2008) admite um nível de solicitações limites para que a análise



elástica possa ser considerada válida e no projeto analítico este critério foi observado. Apesar da limitação das solicitações nas análises regidas pela referida norma sabe-se que uma peça de concreto submetida a uma carga externa apresenta deformações instantâneas e diferidas.

O concreto é definido como um material visco-elástico, pois apresenta um aumento gradual das deformações sobre tensão constante e uma diminuição gradual da tensão sob deformação constante (MORENO, 2016). Essa deformação lenta e contínua representa a fluência do concreto. Esse fenômeno é influenciado por diversos fatores além do tempo, como temperatura, umidade relativa do ar, superfície de exposição da peça, nível de tensões aplicadas e relação água/cimento no lançamento do concreto (LINHARES, 2015).

A característica da deformação por fluência ser proporcional à deformação instantânea se dá até um limite de tensões de 40% da resistência característica do concreto. Quando estas tensões são superadas a fluência apresenta comportamento não linear, e os incrementos de deformação são obtidos com velocidade maior conforme o aumento do nível de tensões aplicadas. As deformações por fluência não são reversíveis, e apresentam resíduos de deformação para carga aplicada, mesmo que por um curto período de tempo. A figura 79 apresenta o comportamento típico de um elemento de concreto submetido a compressão uniaxial.

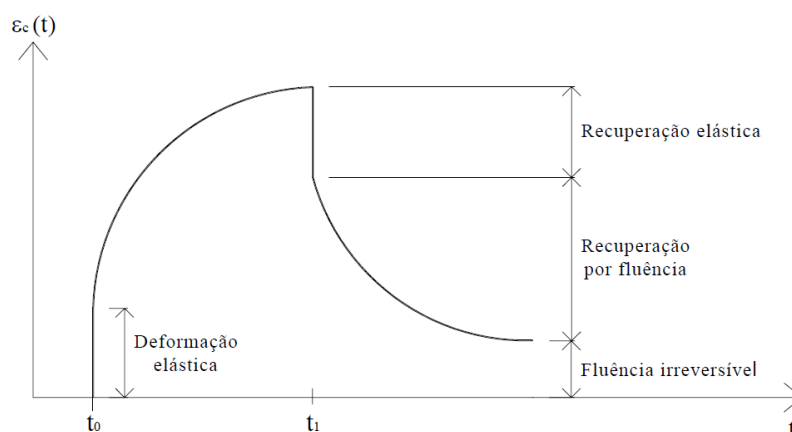


Figura 79 – Deformação por fluência (fonte: DIAS, 2016).

A retração complementa os efeitos diferidos do concreto e é definida como a variação do comprimento ou volume ao longo do tempo devido à perda de água do elemento de concreto. Conforme Furnas (1997) a retração pode se apresentar em quatro formas: a retração por secagem, retração autógena, a retração por carbonatação e a retração plástica.

A retração por secagem ou hidráulica, é irreversível e ocorre devido a variação de umidade. A retração autógena ocorre devido a remoção da umidade dos poros capilares na hidratação do cimento. Conforme Kalintzis (2000) a redução do volume devido a retração autógena pode chegar a contrações da ordem de 25% do volume inicial. A retração por carbonatação ocorre devido a reação do concreto com o dióxido de carbono no ar. A retração plástica tem caráter imediato, ocorre na fase de execução da estrutura, com absorção de água pelos agregados/solo e evaporação (MORENO, 2016). A retração é relacionada diretamente com as condições ambientais, execução e dos materiais aplicados na execução da estrutura. A figura 80 representa o fenômeno de retração.

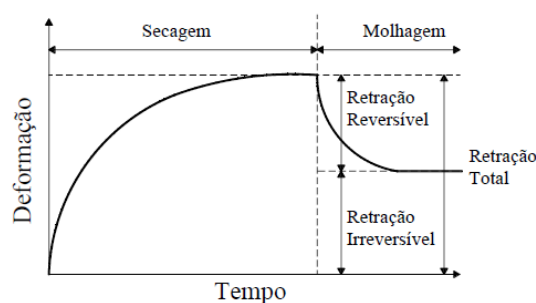


Figura 80 – Deformação por fluência (fonte: DIAS, 2016).

O código VIMIS possui em sua programação os modelos para predição da fluência e da retração do ACI 209R-92 (ACI Committee 209, 2008), CEB MC90 (CEB, 1991, 1993), CEB MC90-99 (CEB, 1999), Bazant-Baweja B3 (Bazant e Baweja, 1995, 2000) e GL2000 (Gardner e Lockman, 2001). Esses modelos com ampla aplicação na literatura técnica permitem estimar a deformação por retração e o coeficiente de fluência. Para o presente trabalho aplicou-se o método do CEB MC90, com temperatura ambiente de  $T=20^{\circ}$  e umidade relativa do ar de 70%, característicos do ambiente em que a ponte foi executada.

Os parâmetros necessários para a aplicação destes modelos são: a idade do concreto em que se inicia a secagem, idade da aplicação da carga, umidade relativa do ambiente, tipo de cimento e relação entre volume-superfície ou espessura média (MORENO, 2016). A área transversal de concreto e perímetro exposto são apresentados para cada viga na tabela 10.

Neste trabalho, a laje é executada em duas etapas. Na primeira etapa são pré-lajes pré-moldadas no pé da obra e transportadas para sua posição final, adota-se 15 dias para esta etapa. A segunda

etapa é a concretagem local da capa da laje após lançamento de todas as pré-lajes e posicionamento da armadura final da estrutura. Considera-se para este processo um tempo de execução da capa de concreto de 15 dias após o posicionamento das pré-lajes, com isso, o tempo inicial do processo de secagem é de 30 dias e o tempo final estipulado em 1800 dias (~5 anos).

Tabela 13 – Propriedades para análise de fluência e retração

VIGA	$A_c$ (m <sup>2</sup> )	$U_c$ (m)
VA11 = VA61	4,55E-01	4,11E+00
VA12 = VA62	5,50E-01	4,75E+00
VA13 = VA63	5,50E-01	4,75E+00
VA14 = VA64	5,50E-01	4,75E+00
VA15 = VA65	5,50E-01	4,75E+00
VA16 = VA66	4,91E-01	4,43E+00
VA21 = VA31 = VA41 = VA51	4,55E-01	4,11E+00
VA22 = VA32	5,50E-01	4,75E+00
VA23 = VA33	5,50E-01	4,75E+00
VA24 = VA34 = VA44 = VA54	5,50E-01	4,75E+00
VA25 = VA35 = VA45 = VA55	5,50E-01	4,75E+00
VA26 = VA36 = VA46 = VA56	4,91E-01	4,43E+00
VA42 = VA52	5,50E-01	4,75E+00
VA43 = VA53	5,50E-01	4,75E+00

Os carregamentos são aplicados em etapas diferentes. Aos 30 dias a carga permanente ( $g_1+g_2+g_3$ ) é toda aplicada sobre a estrutura. A liberação da obra ao tráfego ocorre 30 dias após a finalização da concretagem da capa, tempo necessário para acabamentos, desmobilização e remoção de canteiro, o que representa o tempo total de 60 dias.

## 6.4 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

As propriedades dos materiais empregados nos modelos numéricos: aço das vigas, aço passivo da laje, concreto da laje e conectores de cisalhamento devem ser informadas. As vigas de aço são elementos soldados com espessuras variáveis. As variações de espessura são modeladas com uma área equivalente mantendo fixa sempre a largura da peça e adotando assim uma espessura equivalente. Os elementos em aço existentes são considerados como aço resistente à corrosão atmosférica, conforme resultado de ensaios descritos no item 4.2.2, mantendo assim, as mesmas propriedades do aço das vigas novas. Para cada espessura de aço a entrada de dados requer a definição de uma propriedade diferente, representadas no GID por numerações. A figura 81 apresenta uma viga com a indicação das variações de espessuras de aço modeladas,

separadas por numerações e cores, sendo que a numeração indica a propriedade utilizada, não a espessura da propriedade.

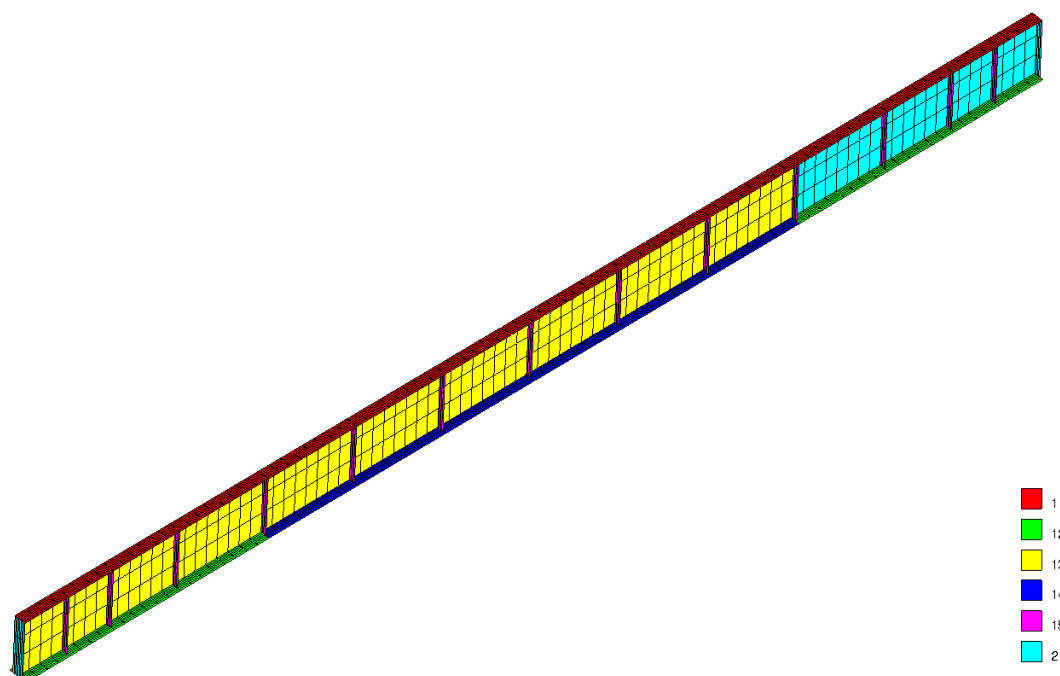


Figura 81 –Viga com diferentes espessuras.

A laje de concreto possui uma altura de 22cm, foi modelada com 10 camadas de 2,2cm, e resistência característica do concreto de  $f_{ck} = 30\text{MPa}$ , adotado aqui para manter as mesmas condições da abordagem analítica. A armadura passiva, CA-50, da laje foi modelada como sendo distribuída e uma espessura normalizada, calculada conforme De Franco (2018). Para tal é calculada uma espessura normalizada equivalente à área de aço da armadura. As camadas de armadura são posicionadas considerando que a laje varia entre os limites normalizados de -1 a 1, sendo 0 o eixo do elemento. Também deve ser informado o ângulo que a armadura faz com o eixo longitudinal do modelo, caracterizando armadura de reforço transversal ou longitudinal. A figura 82 ilustra as camadas para um modelo de laje de concreto discretizado em elementos finitos.

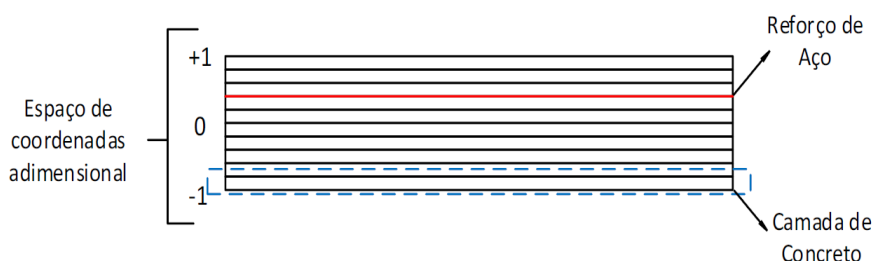


Figura 82 – Camadas da laje de concreto (fonte: WAYAR, 2016).

Os conectores de cisalhamento são do tipo *stud*, são modelados com diâmetro de  $\varnothing=25\text{mm}$  e altura igual a diferença entre os planos médios da laje de concreto e da aba superior das vigas de aço. Este elemento tem a função de resistir ao cisalhamento horizontal no sentido longitudinal e transversal. A figura 83 ilustra o modelo adotado.

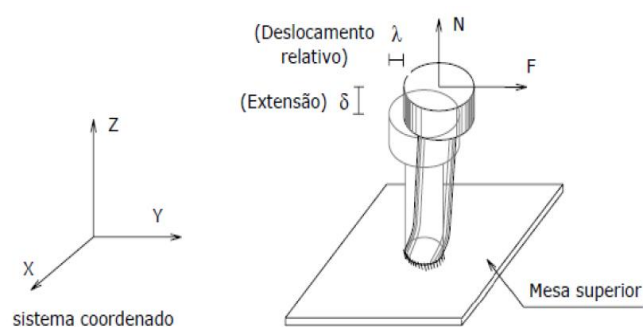


Figura 83 – Conector de cisalhamento (fonte: TAMAYO, 2011).

Para o desenvolvimento dos modelos, o valor adotado para as tensões de escoamento, módulo de deformação longitudinal, tensão de ruptura, Poisson, deformações limites, resistência a compressão e a tração do concreto são apresentados na tabela 14. Para o modelo numérico correspondente ao estado limite último, as propriedades são divididas pelos seus respectivos coeficientes de minoração conforme as recomendações normativas da NBR 8800 e NBR 8681.

Tabela 14 – Resumo das propriedades dos materiais

Material	Propriedades	ELS	Coef. Norma	ELU	Unidades
Aço Estrutural (Perfil)	Módulo de Elasticidade	$E =$	2,00E+08		kN/m <sup>2</sup>
	Tensão de Escoamento	$f_y =$	2,90E+05	1,10E+00	2,64E+05 kN/m <sup>2</sup>
	Tensão de Ruptura	$f_u =$	4,35E+05	1,35E+00	3,22E+05 kN/m <sup>2</sup>
	Poisson	$\nu =$	3,00E-01		
	Deformação Última	$\varepsilon_u =$	2,18E-03		%
Aço armadura passiva	Módulo de Elasticidade	$E =$	2,00E+08		kN/m <sup>2</sup>
CA 50	Módulo de Elasticidade	$E' =$	2,00E+06		kN/m <sup>2</sup>
	Tensão de Escoamento	$f_y =$	5,00E+05	1,15E+00	4,35E+05 kN/m <sup>2</sup>
	Tensão de Ruptura	$f_u =$	5,40E+05	1,15E+00	4,70E+05 kN/m <sup>2</sup>
	Poisson	$\nu =$	3,00E-01		
	Deformação Última	$\varepsilon_u =$	1,00E-02		
Concreto	Resistência à Compressão	$f_{ck} =$	3,00E+04	1,40E+00	2,14E+04 kN/m <sup>2</sup>
	Módulo de Elasticidade Tangente	$E_{ct} =$	3,07E+07		kN/m <sup>2</sup>
	Módulo de Elasticidade Secante	$E_{cs} =$	2,61E+07		kN/m <sup>2</sup>
	Resistência à Tração	$f_{ctk,inf} =$	2,02E+03	1,40E+00	1,44E+03 kN/m <sup>2</sup>
	Poisson	$\nu =$	2,00E-01		
	Deformação Última (Encurtamento)	$\varepsilon_{cu} =$	3,50E-03		
	Deformação Última (Tração)	$\varepsilon_{ct} =$	1,50E-04		
Conector (Stud)	Diâmetro x Altura	$d \times h$	25 x 177		mm
	Poisson	$\nu =$	3,00E-01		
	Tensão de Ruptura	$f_u =$	4,15E+05	1,25E+00	3,32E+05 kN/m <sup>2</sup>

## 6.5 CARREGAMENTOS

Para a representação completa da ponte, foram elaborados 14 modelos de vigas isoladas. Os carregamentos aplicados aos modelos de vigas isoladas são apresentados abaixo.

As cargas são divididas em peso próprio dos elementos de aço e concreto “g”, cargas de multidão “q” e as cargas do veículo tipo “Q”, previstas pela NBR 7188 (2013). Os carregamentos móveis já estão fatorados pelo coeficiente de impacto vertical. Para a combinação de ELU os fatores de majoração das cargas móveis são  $\gamma_g = 1,35$  e  $\gamma_q = 1,50$ , conforme a NBR 8681 (2004).

Tabela 15 – Resumo dos carregamentos – Modelo vigas isoladas

VIGA	bfc (m)	g (kN/m)	q (kN/m)	ELS		ELU	
				(g+q) <sub>k</sub>	Q (kN)	(g+q) <sub>d</sub>	Q <sub>d</sub>
VA11 = VA61	2,07	22,86	16,67	19,10	72,80	26,99	109,20
VA12 = VA62	2,50	31,72	11,40	17,25	53,70	23,97	80,55
VA13 = VA63	2,50	31,72	13,68	18,16	34,90	25,34	52,35
VA14 = VA64	2,50	20,29	13,08	13,35	32,50	18,80	48,75
VA15 = VA65	2,50	24,62	12,92	15,02	46,70	21,05	70,05
VA16 = VA66	2,23	18,19	14,61	14,71	60,90	20,84	91,35
VA21 = VA31 = VA41 = VA51	2,07	23,62	16,67	19,46	72,80	27,48	109,20
VA22 = VA32	2,50	32,35	11,40	17,50	53,70	24,31	80,55
VA23 = VA33	2,50	32,35	13,68	18,41	34,90	25,68	52,35
VA24 = VA34 = VA44 = VA54	2,50	21,02	13,08	13,64	32,50	19,20	48,75
VA25 = VA35 = VA45 = VA55	2,50	25,35	12,92	15,31	46,70	21,44	70,05
VA26 = VA36 = VA46 = VA56	2,23	18,92	14,61	15,04	60,90	21,28	91,35
VA42 = VA52	2,50	32,79	11,40	17,68	53,70	24,55	80,55
VA43 = VA53	2,50	32,79	13,68	18,59	34,90	25,91	52,35
				[kN/m <sup>2</sup> ]	kN	[kN/m <sup>2</sup> ]	kN

As cargas são inseridas nos modelos de vigas isoladas como uma carga distribuída (g+q) sobre a laje de concreto e três cargas nodais (Q) espaçadas de 1,5m posicionadas no centro do vão.

## 6.6 RESULTADOS ELU – LINEAR ELÁSTICA

Este modelo avalia o comportamento das vigas mistas com uma análise linear para as relações constitutivas dos materiais, a aplicação dos carregamentos majorados e as resistências minoradas pelos coeficientes normativos. Estes resultados fornecem um parâmetro de comparação com a abordagem analítica embasada pelos critérios da NBR 8800, que admitem validade da análise elástica até um certo nível de solicitações. Esta análise via elementos finitos não faz sentido do ponto de vista conceitual, porém serve como parâmetro para o estudo da resposta da seção transversal em termos de tensões.

Os resultados de tensões são apresentados para os casos de carga do veículo no centro do vão (máxima flexão) e do veículo posicionado sobre o apoio (máximo cisalhamento). As tensões normais na seção mista são apresentadas na mesa inferior da viga de aço ( $\sigma_{au}$ ), na mesa superior da viga de aço ( $\sigma_{ao}$ ), na mesa superior do reforço de aço ( $\sigma_{aro}$ ) e na borda superior da mesa de concreto ( $\sigma_{co}$ ). A figura 84 ilustra os pontos de controle das tensão normais.

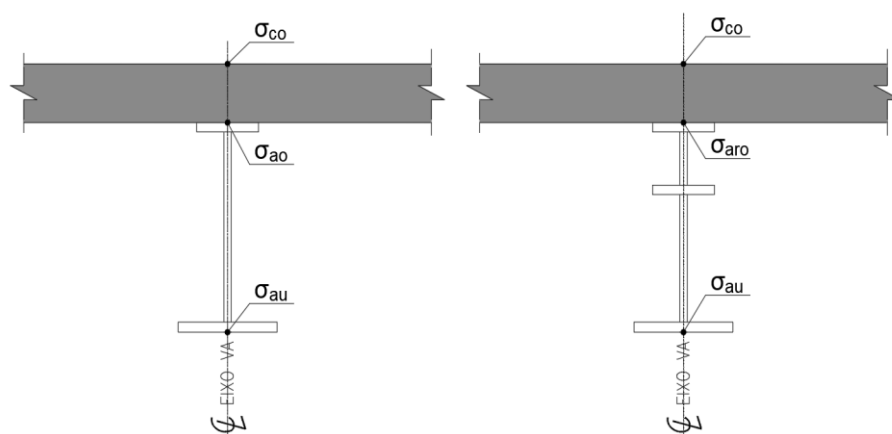


Figura 84 – Tensões normais ELU.

As tensões normais da viga de aço VA11, viga de borda do primeiro vão, modelo de viga isolada com largura colaborante, para o caso de carregamento com o trem tipo de maior flexão são apresentadas na figura 85.

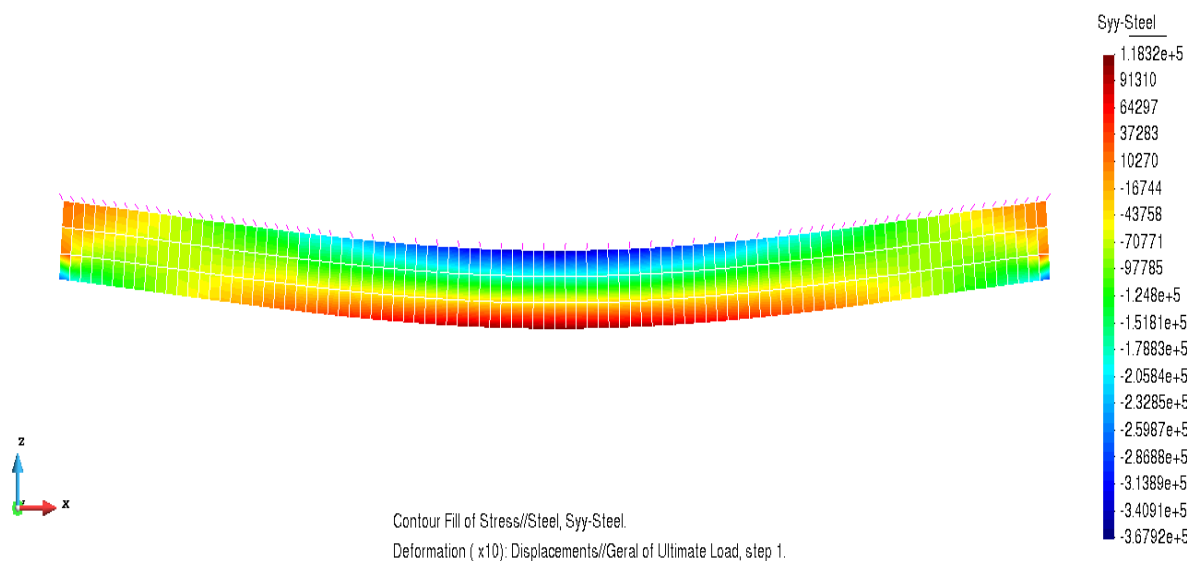


Figura 85 – Tensões normais ELU no perfil de aço (max. Flexão) – VA11 [kN/m<sup>2</sup>].

As tensões na borda superior da laje de concreto armado, da viga mista VA11, modelo de viga mista isolada, para o caso de carregamento de maior flexão são apresentadas na figura 86.



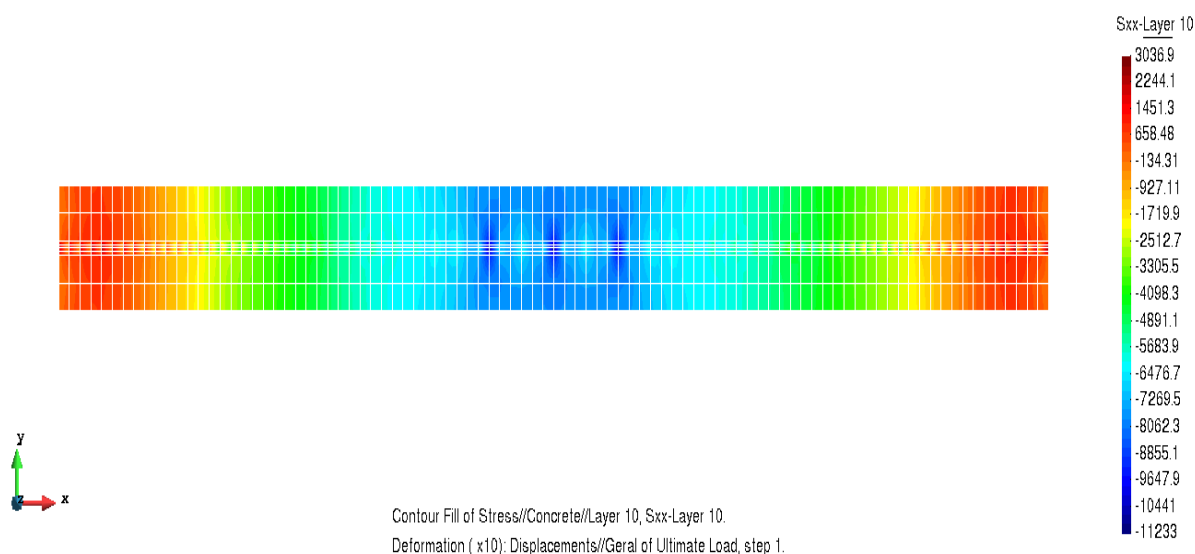


Figura 86 – Tensões normais ELU na laje de concreto (max. Flexão) – VA11 [kN/m<sup>2</sup>].

As tensões normais da viga de aço VA11, viga de borda do primeiro vão, modelo de viga isolada com largura colaborante, para o caso de carregamento com o trem tipo de maior cisalhamento são apresentadas na figura 87.

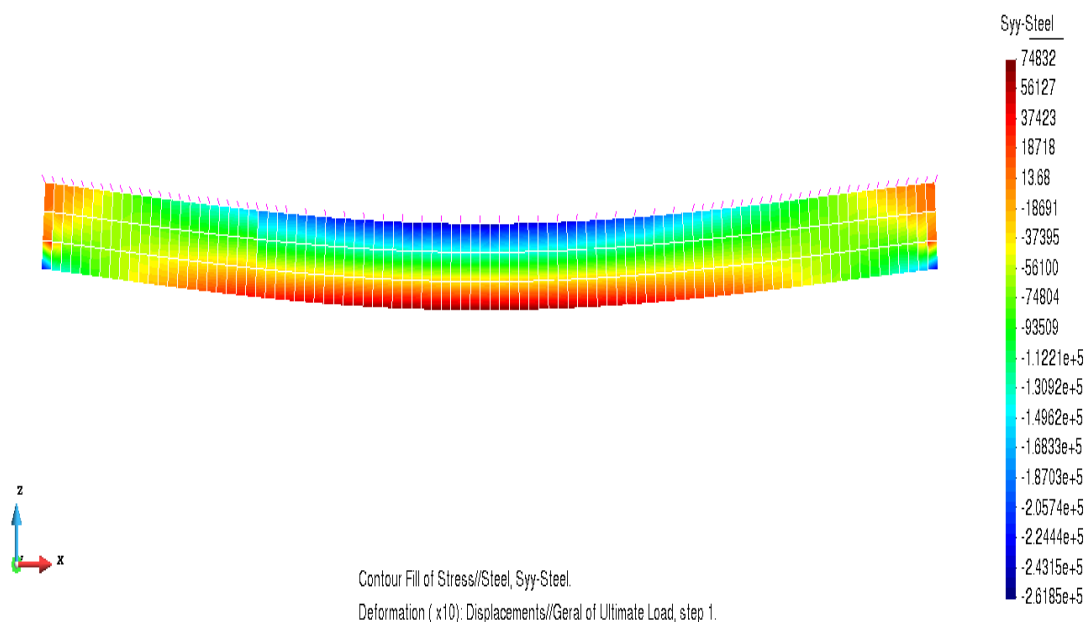


Figura 87 – Tensões normais ELU no perfil de aço (max. Cisalhamento) – VA11 [kN/m<sup>2</sup>].

As tensões na borda superior da laje de concreto armado, da viga mista VA11, modelo de viga mista isolada, para o caso de carregamento de maior cisalhamento são apresentadas na figura 88.

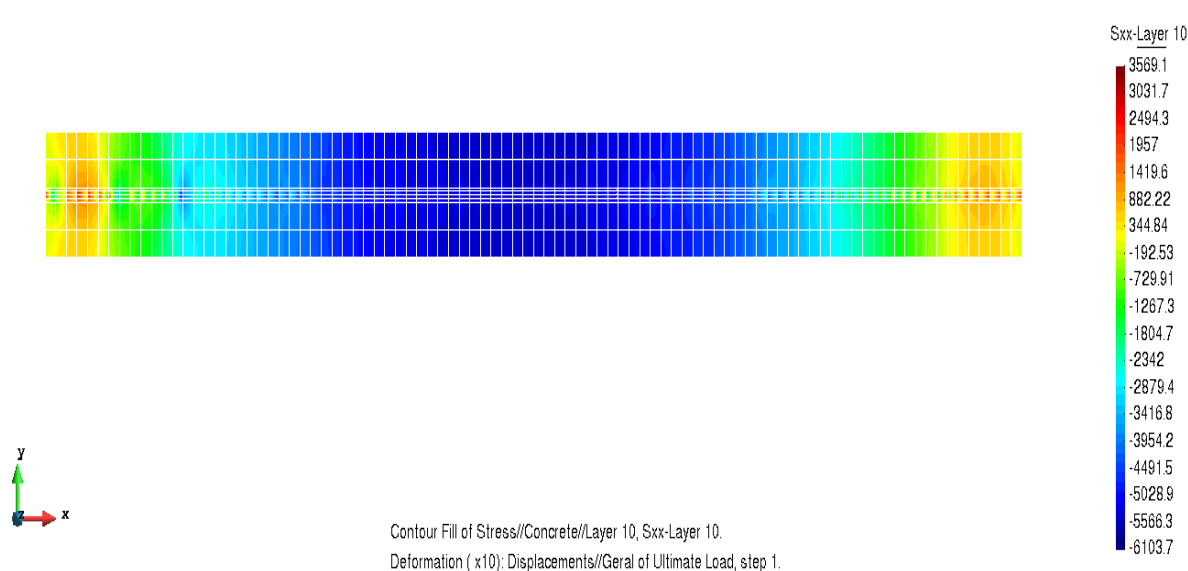


Figura 88 – Tensões normais ELU na laje de concreto (max. Cisalhamento) – VA11 [kN/m<sup>2</sup>].

O resumo das tensões normais para os casos de carregamentos extremos são apresentados na tabela 16 para todos as vigas do modelo.

Tabela 16 – Resumo das tensões ELU [kN/m<sup>2</sup>]

VIGA	max. Flexão				max. Cisalhamento			
	$\sigma_{au}$	$\sigma_{ao}$	$\sigma_{aro}$	$\sigma_{co}$	$\sigma_{au}$	$\sigma_{ao}$	$\sigma_{aro}$	$\sigma_{co}$
VA11 = VA61	9,90E+04	-2,02E+05	-	-1,12E+04	7,48E+04	-2,62E+05	-	-6,10E+03
VA12 = VA62	1,07E+05	-	-2,78E+05	-8,91E+03	8,44E+04	-	-3,50E+05	-5,07E+03
VA13 = VA63	1,11E+05	-	-2,32E+05	-7,74E+03	8,86E+04	-	-2,08E+05	-5,22E+03
VA14 = VA64	8,77E+04	-2,67E+05	-	-6,03E+03	6,67E+04	-2,37E+05	-	-4,32E+03
VA15 = VA65	8,18E+04	-2,27E+05	-	-7,43E+03	7,47E+04	-2,68E+05	-	-4,87E+03
VA16 = VA66	1,07E+05	-2,26E+05	-	-8,19E+03	6,71E+04	-2,38E+05	-	-5,23E+03
VA21 = VA31 = VA41 = VA51	9,89E+04	-2,24E+05	-	-9,29E+03	7,70E+04	-2,74E+05	-	-5,98E+03
VA22 = VA32	9,93E+04	-3,01E+05	-	-8,36E+03	8,49E+04	-2,86E+05	-	-5,74E+03
VA23 = VA33	9,45E+04	-2,98E+05	-	-7,54E+03	8,64E+04	-2,95E+05	-	-6,00E+03
VA24 = VA34 = VA44 = VA54	7,37E+04	-1,60E+05	-	-6,02E+03	6,69E+04	-2,23E+05	-	-4,51E+03
VA25 = VA35 = VA45 = VA55	8,73E+04	-2,71E+05	-	-7,33E+03	7,49E+04	-5,24E+04	-	-5,06E+03
VA26 = VA36 = VA46 = VA56	8,68E+04	-2,66E+05	-	-8,07E+03	6,66E+04	-2,30E+05	-	-4,95E+03
VA42 = VA52	9,89E+04	-	-2,87E+05	-8,94E+03	8,39E+05	-	-2,22E+05	-5,34E+03
VA43 = VA53	9,45E+04	-	-2,65E+05	-7,90E+03	8,81E+04	-	-2,28E+05	-5,58E+03
	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>

## 6.7 RESULTADOS ELU – NÃO LINEAR

Para esta análise não linear as cargas foram divididas em 10 incrementos, com critério de convergência de 0,1% por passo de carga. Os resultados de tensões são apresentados para os casos de carga do veículo no centro do vão (máxima flexão). As tensões normais na seção mista são apresentadas na mesa inferior da viga de aço ( $\sigma_{au}$ ), na mesa superior da viga de aço ( $\sigma_{ao}$ ), na mesa superior do reforço de aço ( $\sigma_{aro}$ ) e na borda superior da mesa de concreto ( $\sigma_{co}$ ). As figuras 89 e 90 ilustram os pontos de tensão normais no perfil e na laje de concreto.

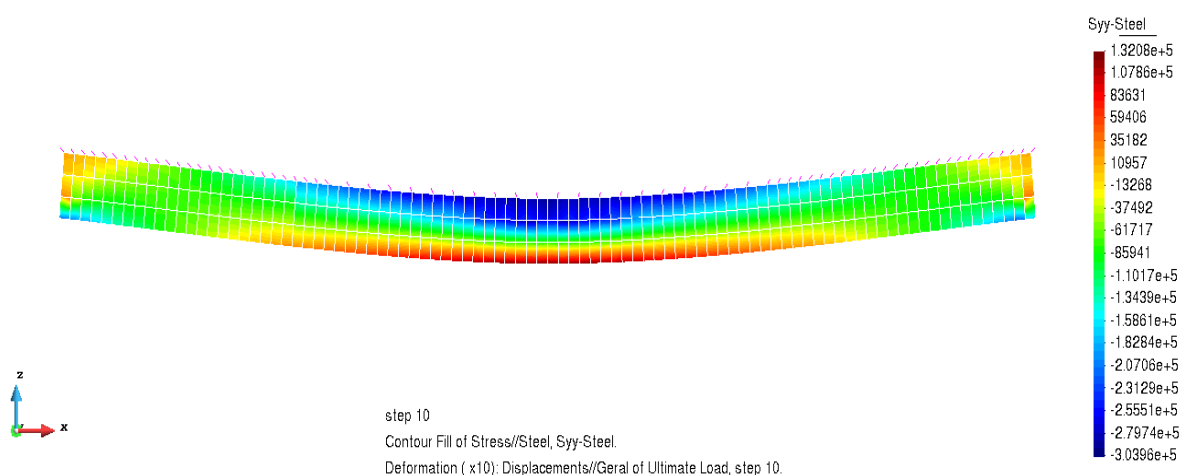


Figura 89 – Tensões normais ELU-NL no perfil de aço (max. Flexão) – VA11 [kN/m²].

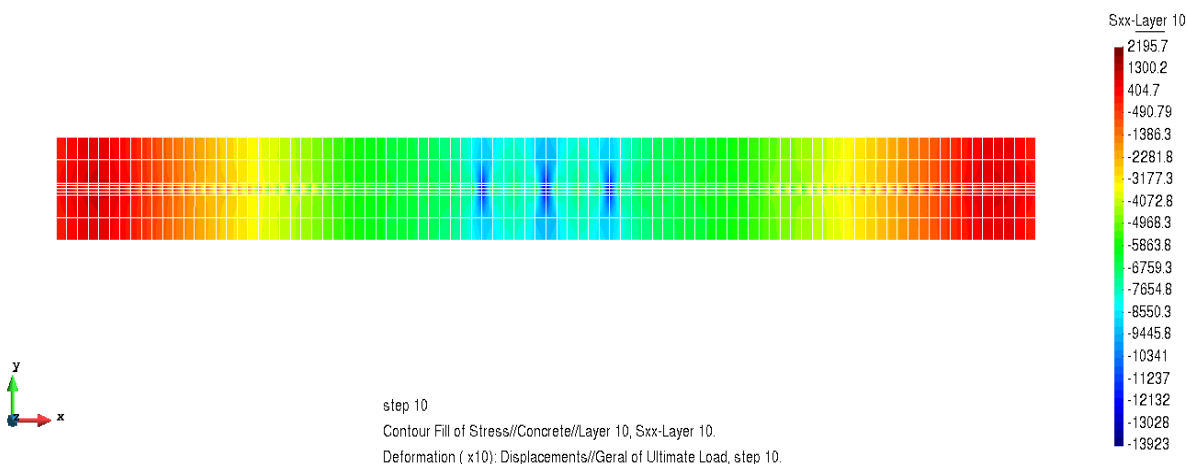


Figura 90 – Tensões normais ELU-NL na laje de concreto (max. Flexão) – VA11 [kN/m²].

O resumo das tensões normais para os casos de carregamentos extremos são apresentados na tabela 17 para todos as vigas do modelo.

Tabela 17 – Resumo das tensões ELU-NL [kN/m<sup>2</sup>]

VIGA	ELU - NÃO LINEAR			
	$\sigma_{au}$	$\sigma_{ao}$	$\sigma_{aro}$	$\sigma_{co}$
VA11 = VA61	1,32E+05	-3,10E+05	-	-1,39E+04
VA12 = VA62	1,33E+05	-	-3,07E+05	-1,01E+04
VA13 = VA63	1,21E+05	-	-3,07E+05	-8,71E+03
VA14 = VA64	8,82E+04	-2,59E+05	-	-6,60E+03
VA15 = VA65	1,07E+05	-2,98E+05	-	-2,20E+03
VA16 = VA66	1,08E+05	-2,98E+05	-	-9,12E+03
VA21 = VA31 = VA41 = VA51	1,16E+05	-3,01E+05	-	-8,89E+03
VA22 = VA32	1,19E+05	-3,02E+05	-	-8,38E+03
VA23 = VA33	1,12E+05	-3,00E+05	-	-7,59E+03
VA24 = VA34 = VA44 = VA54	8,42E+04	-2,55E+05	-	-5,99E+03
VA25 = VA35 = VA45 = VA55	9,99E+04	-2,97E+05	-	-7,17E+03
VA26 = VA36 = VA46 = VA56	9,90E+04	-2,94E+05	-	-7,78E+03
VA42 = VA52	2,38E+05	-	-3,07E+05	-9,02E+03
VA43 = VA53	2,55E+05	-	-3,07E+05	-7,87E+03
	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>

## 6.8 RESULTADOS ELS – LINEAR ELÁSTICA

Nesta análise são avaliados os efeitos da retração e fluência considerando o comportamento linear elástico das relações constitutivas dos materiais. Sendo possível com isso a obtenção das deformações elásticas finais da estrutura.

Os resultados de deslocamentos na direção z são apresentados para o caso de carga do veículo no centro do vão (máximo deslocamento vertical). A análise realizada é elástica linear, considerando os efeitos de fluência e retração conforme modelo CEB90.

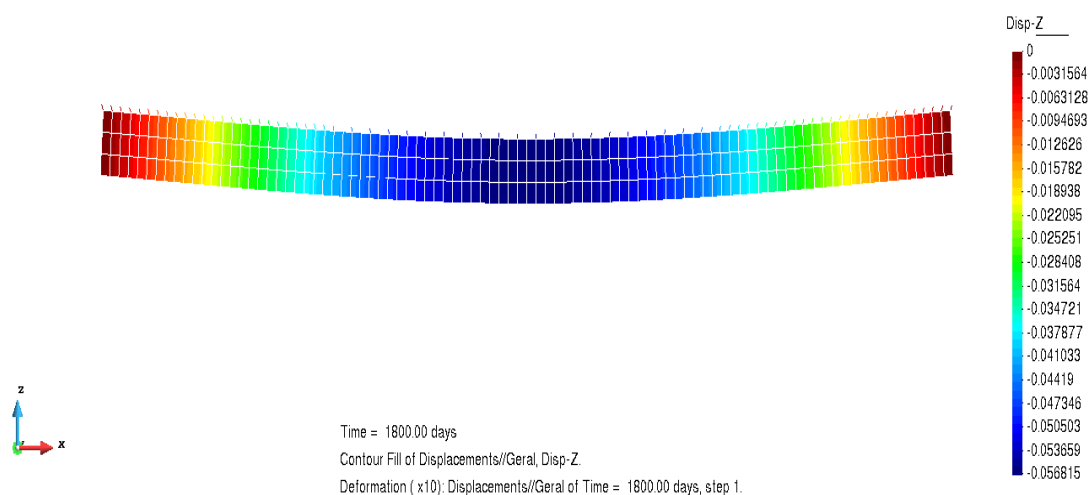


Figura 91 – Deslocamentos verticais ELS-LE (max. Flexão) – VA11 [m].

O resumo dos deslocamentos verticais para os casos de carregamentos extremos são apresentados na tabela 18 para todos as vigas do modelo.

Tabela 18 – Resumo dos deslocamentos ELS-LE

VIGA	$\delta_v$
VA11 = VA61	5,68E+00
VA12 = VA62	7,87E+00
VA13 = VA63	5,04E+00
VA14 = VA64	6,52E+00
VA15 = VA65	4,92E+00
VA16 = VA66	4,83E+00
VA21 = VA31 = VA41 = VA51	6,91E+00
VA22 = VA32	7,50E+00
VA23 = VA33	7,39E+00
VA24 = VA34 = VA44 = VA54	5,85E+00
VA25 = VA35 = VA45 = VA55	6,77E+00
VA26 = VA36 = VA46 = VA56	6,43E+00
VA42 = VA52	7,22E+00
VA43 = VA53	7,11E+00
	[cm]

As tensões normais na viga de aço e na laje de concreto são apresentadas para o caso de máxima flexão, trem tipo posicionado no centro do vão. Os valores são apresentados nos bordos inferiores e superiores da viga de aço e também na laje de concreto.

Tabela 19 – Tensões máxima flexão ELS-LE

VIGA	ELS Linear Elástica - Máxima Flexão			
	$\sigma_{au}$	$\sigma_{ao}$	$\sigma_{aro}$	$\sigma_{co}$
VA11 = VA61	7,22E+04	-2,53E+05	-	-2,58E+04
VA12 = VA62	2,41E+05	-	-4,01E+05	-2,84E+04
VA13 = VA63	7,77E+04	-	-2,62E+05	-2,04E+04
VA14 = VA64	1,34E+05	-1,84E+05	-	-2,29E+04
VA15 = VA65	6,34E+04	-2,13E+05	-	-2,03E+04
VA16 = VA66	6,42E+04	-2,12E+05	-	-2,11E+04
VA21 = VA31 = VA41 = VA51	7,53E+04	-2,22E+05	-	-1,96E+04
VA22 = VA32	7,48E+04	-2,49E+05	-	-1,98E+04
VA23 = VA33	7,17E+04	-2,43E+05	-	-1,86E+04
VA24 = VA34 = VA44 = VA54	5,56E+04	-1,93E+05	-	-1,46E+04
VA25 = VA35 = VA45 = VA55	6,61E+04	-2,25E+05	-	-1,63E+04
VA26 = VA36 = VA46 = VA56	6,46E+04	-2,16E+05	-	-1,78E+04
VA42 = VA52	7,35E+04	-	-2,93E+05	-1,91E+04
VA43 = VA53	7,07E+04	-	-2,91E+05	-1,79E+04
	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>

## 6.9 RESULTADOS ELS – NÃO LINEAR COM FLUÊNCIA E RETRAÇÃO

Os resultados de deslocamentos na direção z são apresentados para o caso de carga do veículo no centro do vão (máximo deslocamento vertical). Nesta análise os carregamentos são inseridos com seus valores característicos (sem fatoração dos coeficientes normativos). A análise realizada considera o comportamento não-linear para as relações constitutivas dos materiais e a consideração do tempo, cargas aplicadas em idades de 30 e 60 dias. Neste modelo são considerados os efeitos de fluência e retração conforme o modelo CEB90.

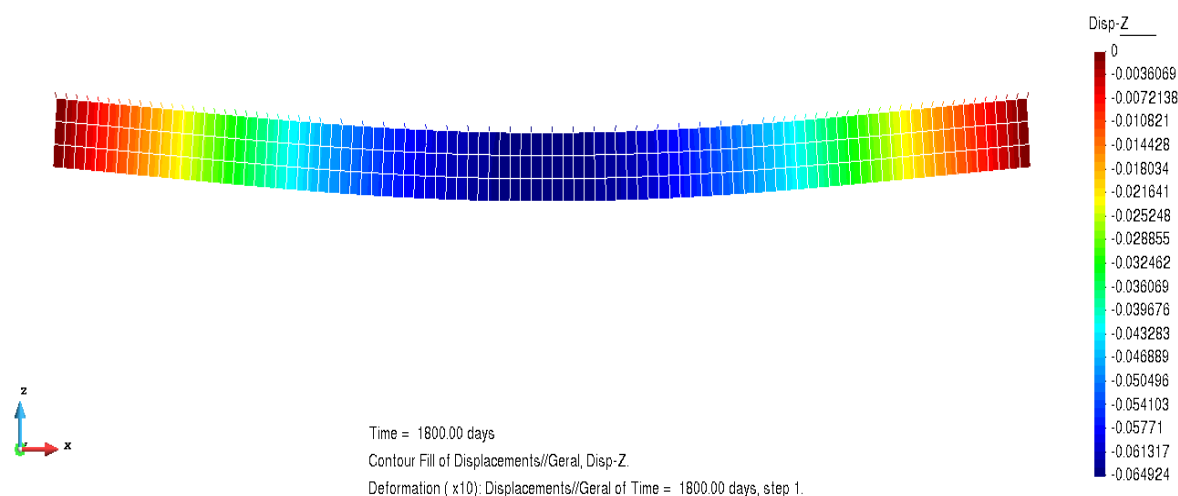


Figura 92 – Deslocamentos verticais ELS-NL com Fluência (max. Flexão) – VA11 [m].

O resumo dos deslocamentos verticais para os casos de carregamentos extremos são apresentados na tabela 20 para todos as vigas do modelo.

Tabela 20 – Resumo dos deslocamentos ELS-NL [m]

VIGA	$\delta_v$
VA11 = VA61	6,49E+00
VA12 = VA62	9,57E+00
VA13 = VA63	5,71E+00
VA14 = VA64	7,87E+00
VA15 = VA65	5,69E+00
VA16 = VA66	5,53E+00
VA21 = VA31 = VA41 = VA51	7,58E+00
VA22 = VA32	8,37E+00
VA23 = VA33	8,26E+00
VA24 = VA34 = VA44 = VA54	6,46E+00
VA25 = VA35 = VA45 = VA55	7,51E+00
VA26 = VA36 = VA46 = VA56	7,11E+00
VA42 = VA52	7,98E+00
VA43 = VA53	7,85E+00
	[cm]

## 7 DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

No que se refere a infraestrutura nacional, o Brasil enfrenta a realidade observada em todo o mundo de uma necessidade imediata de reabilitação das obras de arte especiais. Para o caso das pontes em estruturas mistas, a publicação da NBR 16694 (2020) representa um marco de avanço da engenharia nacional e a relevância que estas soluções possuem no cenário nacional. A publicação do código brasileiro de pontes em estruturas mistas contribui diretamente com a difusão de novos projetos e manutenção das obras de arte existentes.

As estruturas mistas oferecem diversas vantagens na execução de obras de arte especiais e possibilitam diversas soluções com ganho econômico e velocidade de execução, o que representa um ponto positivo quando aplicadas em processos de recuperação e reabilitação de obras de arte especiais.

O estudo desenvolvido neste trabalho analisa o comportamento de uma estrutura existente reforçada e alargada com a aplicação dos critérios normativos e compara os mesmos com as respostas obtidas pelos modelos numéricos desenvolvidos em elementos finitos. Com este trabalho busca-se além de comparar as respostas das duas abordagens, fornecer também uma contribuição no desenvolvimento de referências bibliográficas nacionais em estudos de caso para obras de arte em estruturas mistas.

Na abordagem analítica realizada, foram verificadas as fases construtivas e de uso da ponte sobre o rio Aratau, com os carregamentos e seções resistentes correspondentes. As respostas obtidas são em momentos resistentes que possibilitam a verificação direta da segurança estrutural ao comparar os momentos atuantes para as combinações de cálculo. Por se tratarem de vigas semi-compactas, as tensões para as combinações de ELU, são calculadas com distribuição de tensões em regime elástico, conforme critérios normativos da NBR 8800. Estas tensões obtidas pela abordagem analítica são comparadas com as tensões obtidas nos modelos de elementos finitos e são apresentados na tabela 21.

Ao se comparar as tensões obtidas pelos métodos distintos de análise percebe-se que os modelos em elementos finitos apresentam tensões atuantes menores que os valores encontrados na abordagem analítica. Uma possível justificativa é fato do VIMIS não levar em conta as fases



construtivas e com isso a seção resistente para os carregamentos é sempre a seção mista completa.

Tabela 21 – Tensões ELU

VIGA	Analítica		ELU - Linear Elástica		ELU - Não Linear	
	$\sigma_{au}$	$\sigma_{co}$	$\sigma_{au}$	$\sigma_{co}$	$\sigma_{au}$	$\sigma_{co}$
VA11 = VA61	2,45E+05	-8,57E+03	9,90E+04	-1,12E+04	1,32E+05	-1,39E+04
VA12 = VA62	2,51E+05	-4,97E+03	1,07E+05	-8,91E+03	1,33E+05	-1,01E+04
VA13 = VA63	2,51E+05	-4,97E+03	1,11E+05	-7,74E+03	1,21E+05	-8,71E+03
VA14 = VA64	2,38E+05	-5,86E+03	8,77E+04	-6,03E+03	8,82E+04	-6,60E+03
VA15 = VA65	2,38E+05	-5,86E+03	8,18E+04	-7,43E+03	1,07E+05	-2,20E+03
VA16 = VA66	2,33E+05	-6,71E+03	1,07E+05	-8,19E+03	1,08E+05	-9,12E+03
VA21 = VA31 = VA41 = VA51	2,44E+05	-9,34E+03	9,89E+04	-9,29E+03	1,16E+05	-8,89E+03
VA22 = VA32	2,67E+05	-5,90E+03	9,93E+04	-8,36E+03	1,19E+05	-8,38E+03
VA23 = VA33	2,67E+05	-5,90E+03	9,45E+04	-7,54E+03	1,12E+05	-7,59E+03
VA24 = VA34 = VA44 = VA54	2,67E+05	-5,90E+03	7,37E+04	-6,02E+03	8,42E+04	-5,99E+03
VA25 = VA35 = VA45 = VA55	2,67E+05	-5,90E+03	8,73E+04	-7,33E+03	9,99E+04	-7,17E+03
VA26 = VA36 = VA46 = VA56	2,16E+05	-7,33E+03	8,68E+04	-8,07E+03	9,90E+04	-7,78E+03
VA42 = VA52	2,19E+05	-5,20E+03	9,89E+04	-8,94E+03	2,38E+05	-9,02E+03
VA43 = VA53	2,19E+05	-5,20E+03	9,45E+04	-7,90E+03	2,55E+05	-7,87E+03
	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>
Tensões Limites - fyd	Aço	2,64E+05		Concreto	-2,14E+04	

Nas análises de tensões atuantes para as combinações de Estado Limite Último, os valores se encontram dentro dos limites admissíveis por normas. Na abordagem analítica, as tensões de tração na mesa inferior da viga mista, para as vigas VA22 a VA24, VA32 a VA34, VA44 a VA46 e VA54 a VA56, superam a tensão de escoamento. Porém com os modelos em MEF estas vigas apresentam tensões menores que os limites estabelecidos. Com isso conclui-se que as vigas possuem capacidade portante para as solicitações de cálculo. Caso não se possua os resultados dos modelos em MEF se faz necessário uma nova análise dos modelos analíticos destas vigas mistas.

Os conectores de cisalhamento foram verificados em duas situações, fadiga e retração. O dimensionamento dos conectores foi realizado conforme os critérios normativos da NBR 16694 para as duas situações, sendo que o número de conectores de cisalhamento atende

simultaneamente o ELU e a fadiga. O número de conectores para cada viga mista e sua distribuição é apresentado no anexo A.

Um dos objetivos deste trabalho foi obter os deslocamentos das vigas mistas para os carregamentos atuantes. Para isso foram modeladas as vigas mistas no *software* STRAP 2013, considerando as fases construtivas, e os modelos em MEF com as cargas características. Os valores dos deslocamentos no centro do vão são apresentados na tabela 22 para todas as análises realizadas.

Tabela 22 – Deformações máximas ELS

VIGA	A.A.-E.L.	L.E.+F.R.	N.L.+T.A.+F.R.
	$\delta_v$	$\delta_v$	$\delta_v$
VA11 = VA61	5,62E+00	5,68E+00	6,49E+00
VA12 = VA62	6,61E+00	7,87E+00	9,57E+00
VA13 = VA63	5,51E+00	5,04E+00	5,71E+00
VA14 = VA64	4,93E+00	6,52E+00	7,87E+00
VA15 = VA65	5,47E+00	4,92E+00	5,69E+00
VA16 = VA66	5,10E+00	4,83E+00	5,53E+00
VA21 = VA31 = VA41 = VA51	7,96E+00	6,91E+00	7,58E+00
VA22 = VA32	1,04E+01	7,50E+00	8,37E+00
VA23 = VA33	1,06E+01	7,39E+00	8,26E+00
VA24 = VA34 = VA44 = VA54	6,95E+00	5,85E+00	6,46E+00
VA25 = VA35 = VA45 = VA55	7,65E+00	6,77E+00	7,51E+00
VA26 = VA36 = VA46 = VA56	7,05E+00	6,43E+00	7,11E+00
VA42 = VA52	7,43E+00	7,22E+00	7,98E+00
VA43 = VA53	7,37E+00	7,11E+00	7,85E+00
	[cm]	[cm]	[cm]

A.A. - Abordagem Analítica

L.E.+F.R. - Linear Elástico com Fluência e Retração

N.L.+T.A.+F.R. - Não Linear com Análise no Tempo considerando Fluência e Retração

A NBR 16694 em seu anexo C apresenta as limitações de deslocamentos para os diferentes casos de pontes. Para o caso da ponte Aratau o limite estabelecido é dado pela relação  $L/800$ . Para os dois vãos extremos, as flechas máximas permitidas são 2,83cm e para os vãos intermediários o valor limite é igual à 3,75cm.

Pela tabela de deformações apresentadas é possível observar que os valores são superiores aos limites da NBR 16694. Os limites estabelecidos pela norma levam à necessidade de maior inércia dos perfis compostos, o que na situação em estudo implica em maior consumo de aço, tornando o sistema construtivo sem escoramento mais oneroso e diminuindo sua

competitividade. Conforme Ghosh (2002) o serviço de reabilitação de estruturas existentes é facilitado quando o aço é utilizado como material de construção, sem a necessidade de escoramentos, já em sua posição final.

Com relação aos resultados de deformações obtidos nos diferentes modelos de análise cabe destacar que os valores do modelo não-linear em MEF considerando os efeitos de fluência e retração são, em geral, maiores que os obtidos pela abordagem analítica embasada pelos critérios normativos, para a grande maioria das vigas mistas. Conforme Fu e Lu (2003) os deslocamentos obtidos por modelos de elementos finitos com abordagem não-linear, fornecem valores maiores que os deslocamentos obtidos pela análise prática de projeto embasados na metodologia da transformação da área pela relação modular, devendo ser questionado se os valores recomendados pelas referidas normas para a relação modular “n” são suficientes e adequados para computar os efeitos diferidos de maneira coerente.

Uma explicação para os casos em que os valores de deformação obtidos pela abordagem analítica superam os valores obtidos pelos modelos em MEF é o fato da consideração das fases construtivas. Os modelos em MEF não contemplam estas fases e ao analisarmos o modelo de barras elaborado no *software* STRAP a maior contribuição da deformação é gerada quando o perfil é carregado com as lajes pré-fabricadas e não trabalha como uma seção mista. Os deslocamentos correspondentes a cada caso de carga são apresentados na figura abaixo para os nós 115 (primeiro vão) e 135 (segundo vão).

Nó	Carreg.	X1	X2	X6
115	1	0.0000000	-0.0045302	-0.0000012
	2	0.0000000	-0.0465645	-0.0000120
	3	0.0000000	-0.0019200	-0.0000400
	4	0.0000000	0.0008364	0.0001353
	5	0.0000000	-0.0121222	-0.0001450

Nó	Carreg.	X1	X2	X6
135	1	0.0000000	-0.0088841	0.0000000
	2	0.0000000	-0.0725774	0.0000000
	3	0.0000000	-0.0051071	-0.0000001
	4	0.0000000	0.0000608	0.0001388
	5	0.0000000	-0.0165132	-0.0001391

Figura 93 – Deslocamentos parciais por carregamento (m).

A publicação sobre pontes mistas do Pinho e Bellei (2007) apresenta uma metodologia de dimensionamento considerando os níveis de tensões admissíveis para verificações com cargas características. Essa abordagem não está no escopo na NBR 16694 (2020), porém, na prática de projetos é utilizada como metodologia de pré-dimensionamento em estruturas mistas, com as devidas simplificações. Os níveis para tensões normais, com análise linear elástica e adoção do método de transformação das áreas pela relação dos módulos de deformação longitudinal,

são limitadas nos perfis de aço a  $0,55f_y$  e no concreto a  $0,40f_{ck}$ . Ao se analisar as tensões obtidas para a análise ELS linear elástica com cargas características e consideração dos efeitos de fluência e retração, pode-se observar que as tensões não respeitam estes limites.

Tabela 23 – Tensões normais no aço e no concreto

VIGA	ELS Linear Elástica - Máxima Flexão			
	$\sigma_{au}$	$\sigma_{ao}$	$\sigma_{aro}$	$\sigma_{co}$
VA11 = VA61	7,22E+04	-2,53E+05	-	-2,58E+04
VA12 = VA62	2,41E+05	-	-4,01E+05	-2,84E+04
VA13 = VA63	7,77E+04	-	-2,62E+05	-2,04E+04
VA14 = VA64	1,34E+05	-1,84E+05	-	-2,29E+04
VA15 = VA65	6,34E+04	-2,13E+05	-	-2,03E+04
VA16 = VA66	6,42E+04	-2,12E+05	-	-2,11E+04
VA21 = VA31 = VA41 = VA51	7,53E+04	-2,22E+05	-	-1,96E+04
VA22 = VA32	7,48E+04	-2,49E+05	-	-1,98E+04
VA23 = VA33	7,17E+04	-2,43E+05	-	-1,86E+04
VA24 = VA34 = VA44 = VA54	5,56E+04	-1,93E+05	-	-1,46E+04
VA25 = VA35 = VA45 = VA55	6,61E+04	-2,25E+05	-	-1,63E+04
VA26 = VA36 = VA46 = VA56	6,46E+04	-2,16E+05	-	-1,78E+04
VA42 = VA52	7,35E+04	-	-2,93E+05	-1,91E+04
VA43 = VA53	7,07E+04	-	-2,91E+05	-1,79E+04
	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>

Limite de Tensão no Aço

$0,55f_y$  [kN/m<sup>2</sup>] = 1,60E+05       $f_y$  [MPa] = 290

Limite de Tensão no Concreto

$0,4f_{ck}$  [kN/m<sup>2</sup>] = -1,20E+04       $f_{ck}$  [MPa] = 30

Considera-se que os objetivos estabelecidos como escopo deste trabalho são atendidos com os resultados apresentados. A aplicação da abordagem normativa estabelecida na NBR 16694 (2020) para o projeto de pontes mistas forneceu valores de tensões e deformações adequados quando comparados com os resultados obtidos nos modelos de elementos finitos. Apesar de o código de análise estrutural VIMIS não possuir a capacidade de análise das fases construtivas os resultados obtidos são satisfatórios pois é possível observar a capacidade portante dos elementos mistos frente as cargas atuantes e entender melhor o comportamento dos elementos do projeto.

Para trabalhos futuros apresenta-se aqui algumas sugestões a serem exploradas:

- Análise das fases executivas em modelos de elementos finitos;
- Análise do modelo completo considerando no modelo as lajes de continuidade;

- Estudo da capacidade dos conectores de cisalhamento à fadiga considerando os ciclos de carregamento;
- Análise não linear geométrica considerando as imperfeições geométricas e possibilidade de falha por flambagem local;
- Verificação da carga de ruptura via MEF e definição de coeficiente de segurança global;
- Análise de confiabilidade do projeto de readequação e reforço.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, V. de S. **Influência da distribuição transversal de cargas no projeto de vigas protendidas de pontes.** Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

ALVA, G.M.S., MALITE, M. **Comportamento estrutural e dimensionamento de elementos mistos aço-concreto.** Cadernos de Engenharia de Estruturas São Carlos, v. 7, n.25, p. 51-84, 2005.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **ASSHTO-LRFD: Bridge Design Specifications.** Washington, 2012.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Infrastructure report card.** Washington DC, p.27-30, 2017.

ASSOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA CARRETERA. **Necessidades de inversión en conservación.** Madrid, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681:** ações e segurança nas estruturas – procedimento. Rio de Janeiro, 2003, revisão 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 8800:** projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 7187:** Projeto e execução de pontes de concreto armado. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 7188:** Carga móvel de ponte rodoviária e passarela de pedestres. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 16694:** Projeto de pontes rodoviárias de aço e mistas de aço e concreto. Rio de Janeiro, 2020.

\_\_\_\_\_. **NBR 7680:** Concreto – Extração, prepare, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 1: Resistência a compressão axial. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 6673:** Produtos planos de aço – Determinação das propriedades mecânicas à tração. Rio de Janeiro, 1981.

\_\_\_\_\_. **NB 6:** Cargas móveis em pontes rodoviárias. Rio de Janeiro, 1960.

BACKHOUM, M. M.; SOBRINO, J. A. Structural Engineering Documents: Case Studies of Rehabilitation, Repair, Retrofitting, and Strengthening of Structures Introduction. **International Association for Bridge and Structural Engineer.** (IABSE), Zurich, n. 12, p. 3, 2010.

BJÖRKLUND, A., HÖGLIND, J. **Strengthening of steel structures with bonded prestressed laminates:** numerical analyses of alternative techniques for reducing the interfacial stresses.

2007. 199 f. Master's Thesis – International Master's Programme Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2007.

CARVALHO, D. M.; CALIXTO J. M. F. Analysis of strengthening procedures of reinforced concrete highway bridges: a Brazilian case study. **IBRACON Structures and Materials Journal**. v. 12, 199-209, 2019.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model code 1990**. Lausanne, 1993.

CHHABRA, Y. Bridge rehabilitation techniques. The DS Brown Company. Singapore, 2013.

CHEN, X., DUAN, L., NAJJAR, W. S. Rehabilitation and strengthening of highway bridge superstructures. In: CHEN, W. F.; DUAN, L. **Bridge Engineering: Handbook**. New York: CRC Press, 2014. p. 443-488.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Anuário CNT do Transporte: estatísticas consolidadas 2017**. Brasília: CNT, 2017.

DEMIR, H. **Strengthening and repair of steel bridges**. 2011. 133 f. Master of Science Thesis – Master programme structural engineering and building performance design, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2011.

DePHILLIPS, F. C., **Bridge deck installed in record time**, Public Works, 116(1), 76–77, 1985.

De FRANCO, M. I. E. **Análise numérica de vigas mistas aço-concreto com protensão aderente e não aderente pelo método dos elementos finitos**. 2018. 177 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

De NARDIN, S.; SOUZA, A. S. Sistema de vigas mistas contínuas e semicontínuas para edifícios. In: **XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural**. Santiago de Chile: Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles, . p. 1-17, 2008.

DIAS, M. M. **Análise numérica de vigas mistas aço-concreto pelo método dos elementos finitos: efeitos de longa duração**. 2013. 177 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

DUAN, L., SALEH, Y., ALTMAN, S. Steel-Concrete composite I-girder bridges. In: CHEN, W.F., DUAN, L. **Bridge Engineering Handbook**. New York: CRC Press, 1999, p.64/1-64/43.

EBERLINE, D.K., KLAIBER, F.W. DUNKER, K. **Bridge strengthening with epoxy-bonded steel plates**. Transportation Research Record, nº 1180, p. 7-11, 1988.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 4** – design of composite steel and concrete structures – part 2: general rules and rules for bridges. Brussels, 2005.

FERRAZ, A. M. S. **Dimensionamento Ótimo de Pontes Mistas Rodoviárias de Pequeno Vão**. 2009. f. 20. Dissertação (Mestre em Estruturas de Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Fevereiro, 2009.

FU, K. C., LU, F. Nonlinear finite-element analysis for highway bridge superstructures. **Journal of Bridge Engineering**. p.173-179, June 2003

FURNAS, E. D. Laboratório de Concreto. **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. Pacelli de Andrade, W., ed. São Paulo, Pini, 1997.

GIMSING, N. J. The Perspective for Composite Bridge. **Structural Engineering International**: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), Zurich, v. 20, n. 2, p. 125, May 2010.

HOLLAWAY, L. C., CADEI, J., Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites. **Progress in structural engineering and materials**. Vol. 4, p. 131-148, 2002.

KALINTZIS, C. Estudo da fluência do concreto de elevado desempenho. **EPUSP–Escola Politécnica de São Paulo-Dissertação de mestrado-São Paulo**, 2000.

KLAIBER, F.W., WIPF, T.J. Strengthening and Rehabilitation. In: CHEN, W.F., DUAN, L. Bridge Engineering Handbook. New York: CRC Press, 1999. p. 50/1-50/42.

LINHARES, B. T. **Análise de pontes em estrutura mista aço-concreto de seção caixão com protensão externa**. 2015. 200 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MALVEIRO, J. P. de C. **Comportamento estrutural de uma ponte em arco treliçado em aço e tabuleiro em betão armado**. 2009. p. 20. Dissertação (Mestre em Estruturas de Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Junho, 2009.

MARCHETI, O. **Pontes de concreto armado**. São Paulo: Blucher, 2008.

MORENO, J. C. A. **Análise numérica de vigas mistas aço-concreto pelo método dos elementos finitos**: modelos para os efeitos de longa duração e protensão interna. 2016. 181 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.



MULLER, J. M. Design Practice in Europe. In: CHEN, W. F.; DUAN, L. **Bridge Engineering: Handbook**. New York: CRC Press, 1999. p. 64/1-64/43.

NAKAMURA, S.; COLLIN, P. Steel Concrete Composite Structures (Part II): Introduction. **Structural Engineering International: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)**, Zurich, v. 20, n. 2, p. 126, May 2010.

PILON, B.; MERCIER, C. Élargissement du pont de l'Île-Charron sur l'autoroute 25. **Transports Québec**, p. 1-13, 2008. Disponível em:  
<[http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/Librairie/Publications/fr/ministere/recherche/14colloque/8\\_mai\\_14h30.pdf](http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/Librairie/Publications/fr/ministere/recherche/14colloque/8_mai_14h30.pdf)>

PLECNIK, J. M.; HENRIQUEZ, O. Applications of Composite in Highway Bridges. In: CHEN, W. F.; DUAN, L. **Bridge Engineering: Handbook**. New York: CRC Press, 1999. p. 51/1-51-17.

PFEIL, W. **Pontes em concreto armado: Elementos de projetos, solicitações e dimensionamento**. Rio de Janeiro: LTC, 1979.

PINHO, F. O. **Pontes e viadutos em vigas mistas**. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2007.

RAITHBY, K. D., Strengthening of concrete bridges decks with epoxy-bonded steel plates. **International Journal of Adhesion and Adhesives**. Vol. II, p. 115-118, 1982.

ROOT, N. F. The Evolution of Bridges in the United States. In: CHEN, W. F.; DUAN, L. **Bridge Engineering: Handbook**. New York: CRC Press, 1999. p. 67/1-64/50.

ROSIGNOLI, M. Prestressed Composite Bridges with Steel Corrugated-Plate Webs. **Bridge Engineering eManuals**. November, 2015.

RÜSCH, H. Tabelas de cálculo para lajes retangulares de pontes, Berlim, 1965.

SANCHES, B. S. **Implementação de análise não linear geométrica em programa de vigas mistas**. 2020. 182 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

TAMAYO, J. L. P. **Análise numérica de vigas mistas pelo método dos elementos finitos**. 2011. 147 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

WAYAR, A. M. M. **Análise numérica de vigas mistas aço-concreto pelo método dos elementos finitos: protensão externa**. 2016. 124 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## **ANEXO A – *Verificação Vigas de Aço***

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO

Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

VIGA DE AÇO: VA12 e VA13 - Existentes e Reforçadas

1 - Dados dos Materiais

Aço	$f_y$	$f_u$	$E_a$	$G_a$	$\rho_a$	$esp_{sac}$	$\gamma_{a1}$	$\gamma_{a2}$	$\beta_{vm}$	$\sigma_{a\_fad}$
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	(mm)				(MPa)

"A588"	290	435	200000	77000	7.85	0	1.10	1.35	1	69
--------	-----	-----	--------	-------	------	---	------	------	---	----

Concreto	$f_{ck}$	$\gamma_c$	$\rho_c$	$\alpha_c$	$T_{c,r}$	$\gamma_{retr}$	$\alpha_E$	Aço	$f_{ys}$	$\gamma_s$	
	(MPa)		$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	$\left(\frac{1}{1\ ^\circ C}\right)$	( $^\circ C$ )				(MPa)		

"C30"	30	1.4	2.50	$10^{-5}$	-5	1.2	1.0	"CA50"	500	1.15	
-------	----	-----	------	-----------	----	-----	-----	--------	-----	------	--

$\alpha_E = 1,2$  para basalto e diabásio  
 $\alpha_E = 1,0$  para granito e gnaissé  
 $\alpha_E = 0,9$  para calcário  
 $\alpha_E = 0,7$  para arenito

$E_{ca} = 30672.463\ MPa$       $E_{ca} = 26838.405\ MPa$

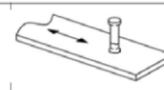
Conector	$\phi_{ca}$	$n_{ca}$	$f_{uce}$	$\gamma_{ce}$	$R_g$	$R_p$	$\sigma_{ca\_fad}$
	(mm)		(MPa)				(MPa)

"Stud"	25	1	415	1.25	1	0.8	69
--------	----	---	-----	------	---	-----	----

9.3 Conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça, aplicados por processo automático de solda ou por soldas de filete

69

Ruptura do conector por cisalhamento



Rg:

1,00 - para qualquer número de conectores conectados em uma linha soldado diretamente no perfil de aço;  
 0,85 - para dois conectores soldados perpendicular ao perfil de aço

Rp:

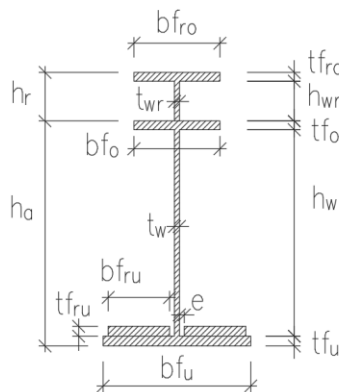
0,70 - para três ou mais conectores soldados perpendicular ao perfil de aço;  
 1,00 - para conectores soldados diretamente no perfil de aço;  
 0,75 - para conectores soldados e embutidos em uma laje mista

2 - Geometria Perfil de aço

S	Trec.	$b_{fu}$	$t_{fu}$	$h_w$	$t_w$	$b_{fo}$	$t_{fo}$	$b_{fru}$	$t_{fru}$	e	$h_{wr}$	$t_{wr}$	$b_{fro}$	$t_{fro}$	$b_{fc}$	$h_{iaje}$	$L_b$	a
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)

1	"S1"	250	25	1065	12.5	130	10	0	0	0	204	12.5	250	16	250	22	500	100
2	"S2"	250	25	1065	12.5	130	10	0	0	0	204	12.5	250	16	250	22	500	150
3	"S3"	380	25	1065	12.5	190	10	110	16	30	204	12.5	250	16	250	22	500	200

Seção Transversal



a = distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores adjacentes NBR 8800 - 5.4.3.1

$$h_a := t_{fu} + h_w + t_{fo} = \begin{bmatrix} 1100 \\ 1100 \\ 1100 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_r := h_{wr} + t_{fro} = \begin{bmatrix} 220 \\ 220 \\ 220 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_{at} := h_a + h_r = \begin{bmatrix} 1320 \\ 1320 \\ 1320 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h := h_a + h_r + h_{iaje} = \begin{bmatrix} 1540 \\ 1540 \\ 1540 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

### 3 - Solicitações Características (Sem majoração)

O programa admite até três seções transversais difentes.

Seção	$M_{g1}$ (tf·m)	$M_{g2}$ (tf·m)	$M_{g3}$ (tf·m)	$M_Q$ (tf·m)	$V_{Sd\_cst}$ (tf)	$M_{Sd\_cst}$ (tf·m)
1	0	0	0	0	38.9	0
2	5.44	55.9	7.77	51.2	31.1	76.1
3	15.6	160.2	18.1	141.5	0	218.1

Combinações consideradas:

$$V_{Sd\_cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2}$$

$$V_{Sd\_cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2} + \gamma_q * V_Q$$

$$M_{Sd\_cst} = \gamma_g * M_{g1} + \gamma_g * M_{g2}$$

$$M_{Sd} = \gamma_g * (M_{g1} + M_{g2} + M_{g3}) + \gamma_q * M_Q$$

Esforço cortante para verificação do fluxo de cisalhamento horizontal nos conectores:

Nó	$P_{ef,V}$	$V_{g1}$ (tf)	$V_{g2}$ (tf)	$V_{g3}$ (tf)	$V_Q$ (tf)	$V_{Sd}$ (tf)
10	1	2.78	28.6	5.63	25.3	87.9
11	2	2.23	22.9	4.68	21.3	72.2
12	2	1.67	17.2	3.72	17.7	57.0
13	3	1.12	11.5	2.77	14.4	42.3
14	3	0.56	5.8	1.82	11.3	28.0
15	3	0	0	0	8.6	14.2

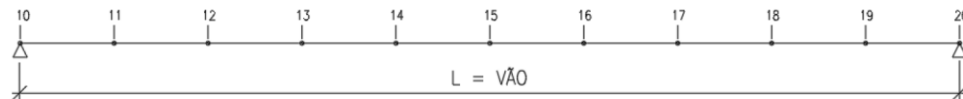
Coefficientes de Majoração dos Esforços - NBR 8681/2004

Fase	$\gamma_{g\_Vg1}$	$\gamma_{g\_Vg2}$	$\gamma_{g\_Vg3}$	$\gamma_{q\_VQ}$	$\gamma_{g\_Mg1}$	$\gamma_{g\_Mg2}$	$\gamma_{g\_Mg3}$	$\gamma_{q\_MQ}$
"Const"	1.15	1.15	0	0	1.15	1.25	0	0
"ELU"	1.35	1.35	1.35	1.5	1.35	1.35	1.35	1.5

$L_{vão}$  div

$$\frac{(m)}{23.00} \cdot 10 \quad i_{barra} = \frac{L_{vão}}{div} = 2.3 \text{ m}$$

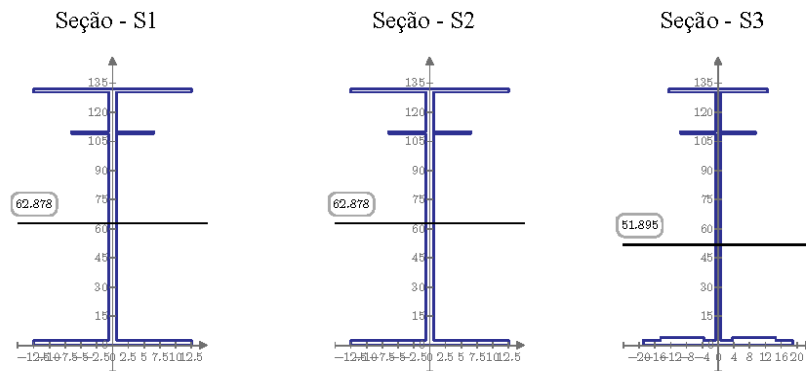
MODELO-NUMERAÇÃO DOS NÓS



Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

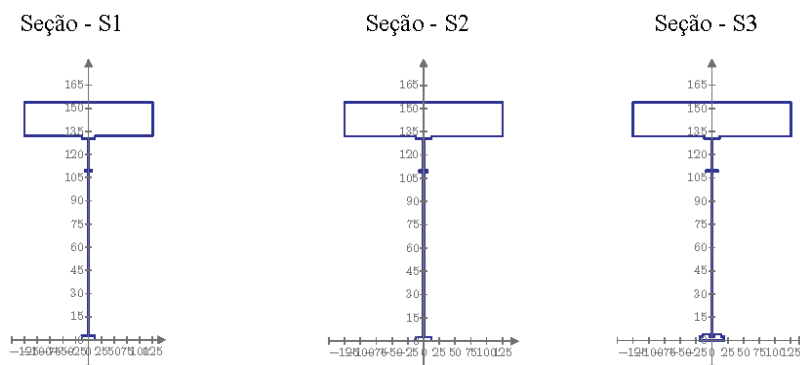
4 - Propriedades do Perfil de Aço



Prop_Aço =	"S"	"Aa (m²)"	"ycg_u (m)"	"Ia (m⁴)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.0274	0.6288	0.0067	0.0097	0.0107	
2	0.0274	0.6288	0.0067	0.0097	0.0107	
3	0.0348	0.5189	0.0089	0.0111	0.0171	

5 - Propriedades da Seção Mista

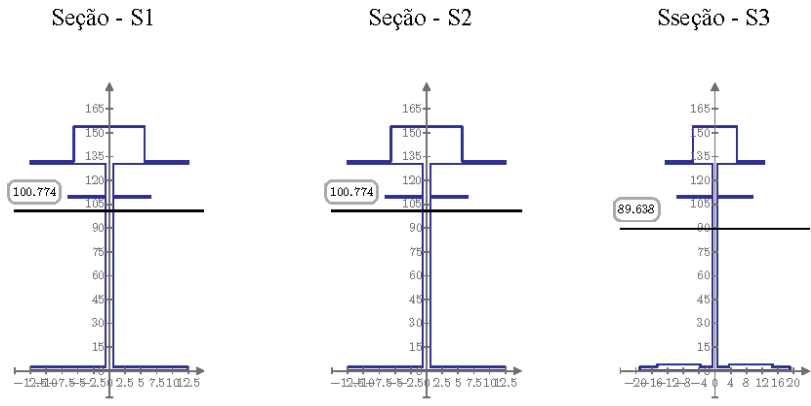
5.1 - Seção Mista



Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

5.2 - Propriedades da Seção Mista - Longa Duração

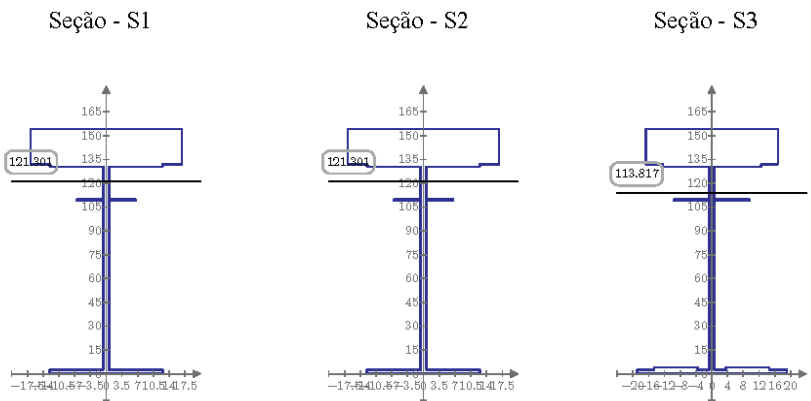
$$n_{LD} := 3 (E_a \div E_{cs}) = 22.356$$



Prop_LD	"S"	"A_LD (m²)"	"ycg_u_LD (m)"	"I_LD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.052	1.0077	0.0151	0.0284	0.0484	0.015	
2	0.052	1.0077	0.0151	0.0284	0.0484	0.015	
3	0.0594	0.8964	0.021	0.0326	0.0495	0.0234	

5.3 - Propriedades da Seção Mista - Curta Duração

$$n_{CD} := (E_a \div E_{cs}) = 7.452$$



Prop_CD	"S"	"A_CD (m²)"	"ycg_u_CD (m)"	"I_CD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.1012	1.213	0.0198	0.0606	0.1853	0.0163	
2	0.1012	1.213	0.0198	0.0606	0.1853	0.0163	
3	0.1086	1.1382	0.0288	0.0717	0.1585	0.0253	

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

## 6 - ESFORÇOS RESISTENTES

### 6.1 - Momento Fletor Resistente do Perfil de aço

$$ELU_{FLT} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 122 & 46 & 139 & \text{"SMC"} & 209 \\ 2 & 122 & 46 & 139 & \text{"SMC"} & 209 \\ 3 & 121 & 46 & 143 & \text{"SMC"} & 258 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLM} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 8 & 10 & 19 & \text{"CMP"} & 330 \\ 2 & 8 & 10 & 19 & \text{"CMP"} & 330 \\ 3 & 8 & 10 & 19 & \text{"CMP"} & 426 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLA} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 108 & 74 & 150 & \text{"SMC"} & 298 \\ 2 & 108 & 74 & 150 & \text{"SMC"} & 298 \\ 3 & 126 & 48 & 150 & \text{"SMC"} & 329 \end{bmatrix}$$

#### 6.1.1 - Verificação dos limites da NBR 8800 (Vigas Esbeltas):

$$VERIF_{H1s} = \begin{bmatrix} \text{"a"} & \text{"b"} & \text{"c"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 6.2 - Esforço Cortante Resistente do Perfil de Aço

$$ELU_{VRM} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"a_max (cm)"} & \text{"VRd (tf)"} \\ 1.00 & 101.52 & 104.36 & 129.98 & 289.66 & 164.87 & 266.15 \\ 2.00 & 101.52 & 84.61 & 105.38 & 289.66 & 164.87 & 221.81 \\ 3.00 & 101.52 & 76.50 & 95.28 & 289.66 & 164.87 & 187.39 \end{bmatrix}$$

### 6.3 - Classificação da Seção Mista

$$CLAS\_SEÇÃO_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_{comp}\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"Verif"} \\ 1.00 & 101.52 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 2.00 & 101.52 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 3.00 & 101.52 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \end{bmatrix}$$

#### 6.3.1 - Mrd - Seção Mista

$$MRd_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1.00 & \text{"SMC"} & 439.39 \\ 2.00 & \text{"SMC"} & 394.18 \\ 3.00 & \text{"SMC"} & 565.18 \end{bmatrix}$$

#### 6.3.2 - Vrd - Seção Mista

$$V_{Ra_{SM}} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"a_max (cm)"} & \text{"VRd_{SM} (tf)"} \\ 1.00 & 101.52 & 104.36 & 129.98 & 289.66 & 164.87 & 266.15 \\ 2.00 & 101.52 & 84.61 & 105.38 & 289.66 & 164.87 & 221.81 \\ 3.00 & 101.52 & 76.50 & 95.28 & 289.66 & 164.87 & 187.39 \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

## 7 - CONECTORES DE CISALHAMENTO

Critérios conforme a NBR 8800/2008 seção O.4.

- Conectores do tipo pino com cabeça devem possuir comprimento mínimo quatro vezes o diâmetro do conector ( $h_{pc} = 4x\phi$ ).

- Os conectores tipo pino com cabeça não podem ter diâmetro maior que 2.5 vezes a espessura da mesa a qual forem soldadas, a menos que sejam colocados diretamente no eixo da alma do perfil.

- O cobrimento lateral de concreto para qualquer tipo de conector deve ser no mínimo 25mm.

- O espaçamento máximo entre linhas de centro de conectores deve ser igual a 8 vezes a espessura total da laje.

- O espaçamento mínimo entre linhas de centro de conectores do tipo pino com cabeça deve ser igual a 6 $\phi$  diâmetros ao longo do vão da viga. O espaçamento mínimo transversal deve ser de 4 $\phi$  diâmetros.

### 7.1 - Dados Conectores "Stud"

$$S_{ca} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi_{es} \text{ (mm)}\text{"} & \text{"}A_{es} \text{ (cm}^2\text{)}\text{"} & \text{"}nes_{min}\text{"} & \text{"}esp_{long-max} \text{ (cm)}\text{"} & \text{"}esp_{long-min} \text{ (cm)}\text{"} & \text{"}esp_{tran-max} \text{ (cm)}\text{"} \\ 25.00 & 4.91 & 141.00 & 176.00 & 15.00 & 10.00 \end{bmatrix}$$

### 7.2 - Verificação do Fluxo de Cisalhamento e Número de Conectores por trecho:

$$S_{ca_{tr}} = \begin{bmatrix} \text{"}Trecho\text{"} & \text{"}1\text{"} & \text{"}2\text{"} & \text{"}3\text{"} & \text{"}4\text{"} & \text{"}5\text{"} & \text{"}6\text{"} & \text{"}7\text{"} & \text{"}8\text{"} & \text{"}9\text{"} & \text{"}10\text{"} \\ \text{"}Seção\text{"} & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 2 & 1 \\ \text{"}hec \text{ (cm)}\text{"} & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 \\ \text{"}Q \text{ (cm}^3\text{)}\text{"} & 119345 & 119345 & 119345 & 160504 & 160504 & 160504 & 160504 & 119345 & 119345 & 119345 \\ \text{"}I \text{ (cm}^4\text{)}\text{"} & 1982589 & 1982589 & 1982589 & 2881168 & 2881168 & 2881168 & 2881168 & 1982589 & 1982589 & 1982589 \\ \text{"}qd \text{ (tf/m)}\text{"} & 71 & 58 & 46 & 34 & 23 & 23 & 34 & 46 & 58 & 71 \\ \text{"}qk_Q \text{ (tf/m)}\text{"} & 20 & 17 & 14 & 12 & 9 & 9 & 12 & 14 & 17 & 20 \\ \text{"}nes_{trecho}\text{"} & 14 & 11 & 10 & 8 & 6 & 6 & 8 & 10 & 11 & 14 \end{bmatrix}$$

### 7.3 - Número total de Conectores

$$n_{ca_{total}} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi_{es} \text{ (mm)}\text{"} & \text{"}nes_{total}\text{"} \\ 25 & 97 \end{bmatrix}$$

## 8 - FADIGA

A tensão limite da faixa de variações de tensões, para um número infinito de ciclos de solicitação, varia conforme os elementos estruturais. Nenhuma verificação de resistência à fadiga é necessária se a faixa de variação de tensões, analisada em regime elástico, for inferior ao limite estabelecido na NBR 16694/2020 em seu anexo A.

$$S_{fad} = \begin{bmatrix} \text{"}perfil\text{"} & \text{"}\sigma_{fad,VQ} \text{ (MPa)}\text{"} & \text{"}\text{"} & \text{"}\sigma_{fad,MQ} \text{ (MPa)}\text{"} & \text{"}\text{"} \\ 1.00 & 15.04 & \text{"}ok\text{"} & 0.00 & \text{"}ok\text{"} \\ 2.00 & 12.66 & \text{"}ok\text{"} & 2.71 & \text{"}ok\text{"} \\ 3.00 & 10.52 & \text{"}ok\text{"} & 8.76 & \text{"}ok\text{"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)



## 9 - VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRABALHO DAS SEÇÕES DE AÇO

### 9.1 - Verificação na fase construtiva

$$VERIF_{ctf} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd(tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 266.15 & 0.15 & \text{"ok"} & 0.00 & 209.07 & 0.00 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 221.81 & 0.14 & \text{"ok"} & 76.10 & 209.07 & 0.36 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 187.39 & 0.00 & \text{"ok"} & 218.10 & 258.37 & 0.84 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 9.1 - Verificação na fase de utilização

$$VERIF_{ut} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VSd (tf)} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd(tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 87.90 & 266.15 & 0.33 & \text{"ok"} & 43.58 & 439.39 & 0.10 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 72.20 & 221.81 & 0.33 & \text{"ok"} & 213.68 & 394.18 & 0.54 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 57.00 & 187.39 & 0.30 & \text{"ok"} & 529.09 & 565.18 & 0.94 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

#### 9.1.1 - Verificação das tensões na fase de utilização para seções semi-compactas

$$\sigma_{SM\_smc} = \begin{bmatrix} \text{"Perf"} & \text{"MSd/Wxo"} & \text{"fed (MPa)} & \text{""} & \text{"MSd/Wxu"} & \text{"fyd (MPa)} & \text{""} & \text{"R"} \\ 1 & 0.673 & 21.429 & \text{"ok"} & 28.488 & 263.636 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 2 & 2.502 & 21.429 & \text{"ok"} & 157.676 & 263.636 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 3 & 4.967 & 21.429 & \text{"ok"} & 251.426 & 263.636 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO

Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

VIGA DE AÇO: VA14 e VA15

1 - Dados dos Materiais

Aço	$f_y$	$f_u$	$E_a$	$G_a$	$\rho_a$	$esp_{sac}$	$\gamma_{a1}$	$\gamma_{a2}$	$\beta_{vm}$	$\sigma_{a\_fad}$
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	(mm)				(MPa)

"A588"	290	435	200000	77000	7.85	0	1.10	1.35	1	69
--------	-----	-----	--------	-------	------	---	------	------	---	----

Concreto	$f_{ck}$	$\gamma_c$	$\rho_c$	$\alpha_c$	$T_{c,r}$	$\gamma_{retr}$	$\alpha_E$	Aço	$f_{ys}$	$\gamma_s$	$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio $\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaiss $\alpha_E = 0,9$ para calcário $\alpha_E = 0,7$ para arenito
	(MPa)		$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	$\left(\frac{1}{1\ ^\circ C}\right)$	( $^\circ C$ )				(MPa)		

"C30"	30	1.4	2.50	$10^{-5}$	-5	1.2	1.0	"CA50"	500	1.15	
-------	----	-----	------	-----------	----	-----	-----	--------	-----	------	--

$E_{ca} = 30672.46\ MPa$        $E_{ca} = 26838.41\ MPa$

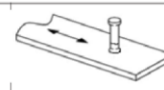
Conector	$\phi_{ca}$	$n_{ca}$	$f_{uce}$	$\gamma_{ce}$	$R_g$	$R_p$	$\sigma_{ca\_fad}$
	(mm)		(MPa)				(MPa)

"Stud"	25	1	415	1.25	1	0.8	69
--------	----	---	-----	------	---	-----	----

9.3 Conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça, aplicados por processo automático de solda ou por soldas de filete

69

Ruptura do conector por cisalhamento



Rg:

1,00 - para qualquer número de conectores conectados em uma linha soldado diretamente no perfil de aço;  
0,85 - para dois conectores soldados perpendicular ao perfil de aço

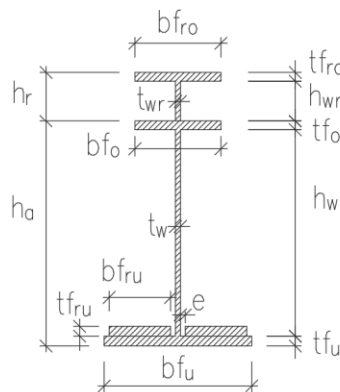
Rp:

0,70 - para três ou mais conectores soldados perpendicular ao perfil de aço;  
1,00 - para conectores soldados diretamente no perfil de aço;  
0,75 - para conectores soldados e embutidos em uma laje mista

2 - Geometria Perfil de aço

S	Trec.	$b_{fu}$	$t_{fu}$	$h_w$	$t_w$	$b_{fo}$	$t_{fo}$	$b_{fru}$	$t_{fru}$	$e$	$h_{wr}$	$t_{wr}$	$b_{fro}$	$t_{fro}$	$b_{fc}$	$h_{iaje}$	$L_b$	$a$
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	"S1"	350	22	1282	12.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	250	22	500	100
2	"S2"	350	22	1282	12.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	250	22	500	150
3	"S3"	350	35	1282	9.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	250	22	500	200

Seção Transversal



$a =$  distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores adjacentes NBR 8800 - 5.4.3.1

$$h_a := t_{fu} + h_w + t_{fo} = \begin{bmatrix} 1320 \\ 1333 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_r := h_{wr} + t_{fro} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_{at} := h_a + h_r = \begin{bmatrix} 1320 \\ 1320 \\ 1333 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h := h_a + h_r + h_{iaje} = \begin{bmatrix} 1540 \\ 1540 \\ 1553 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

3 - Solicitações Características (Sem majoração)

O programa admite até três seções transversais difentes.

Seção	$M_{g1}$ (tf·m)	$M_{g2}$ (tf·m)	$M_{g3}$ (tf·m)	$M_Q$ (tf·m)	$V_{Sd,cst}$ (tf)	$M_{Sd,cst}$ (tf·m)
1	0.00	0.00	0	0	22.6	0.00
2	5.21	31.7	1.77	56.0	18.1	44.3
3	14.9	87.8	44.9	154.7	0	127.0

Combinações consideradas:

$$V_{Sd,cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2}$$

$$V_{Sd,cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2} + \gamma_q * V_Q$$

$$M_{Sd,cst} = \gamma_g * M_{g1} + \gamma_g * M_{g2}$$

$$M_{Sd} = \gamma_g * (M_{g1} + M_{g2} + M_{g3}) + \gamma_q * M_Q$$

Esforço cortante para verificação do fluxo de cisalhamento horizontal nos conectores:

Nó	$P_{ef,V}$	$V_{g1}$	$V_{g2}$	$V_{g3}$	$V_Q$	$V_{Sd}$
		(tf)	(tf)	(tf)	(tf)	(tf)
10	1	2.66	5.7	10.6	27.7	80.6
11	2	2.13	12.5	8.67	23.5	66.8
12	3	1.6	9.42	6.73	19.7	53.5
13	3	1.07	6.3	4.8	16.1	40.6
14	3	0.54	3.18	2.86	12.9	28.2
15	3	0	0	0	9.87	16.2

Coefficientes de Majoração dos Esforços - NBR 8681/2004

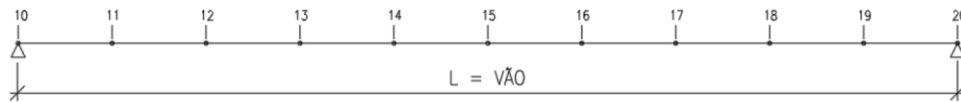
Fase	$\gamma_{g,Vg1}$	$\gamma_{g,Vg2}$	$\gamma_{g,Vg3}$	$\gamma_{q,VQ}$	$\gamma_{g,Mg1}$	$\gamma_{g,Mg2}$	$\gamma_{g,Mg3}$	$\gamma_{q,MQ}$
"Const"	1.15	1.15	0	0	1.15	1.25	0	0
"ELU"	1.35	1.35	1.35	1.5	1.35	1.35	1.35	1.5

$L_{vão}$  div

$$\frac{(m)}{23.00} \cdot 10$$

$$l_{barra} = \frac{L_{vão}}{div} = 2.3 \text{ m}$$

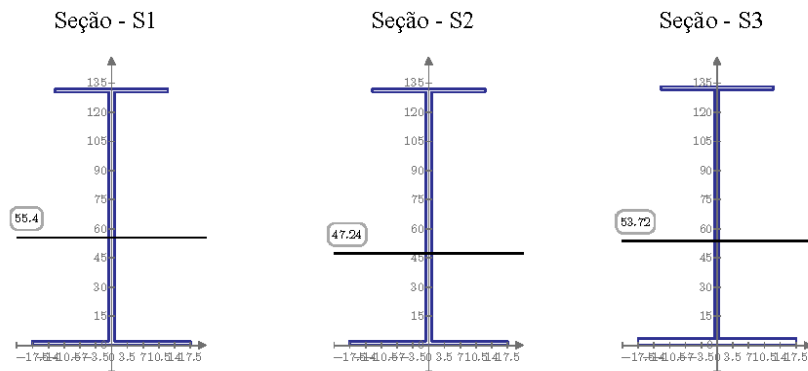
MODELO-NUMERAÇÃO DOS NÓS



Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

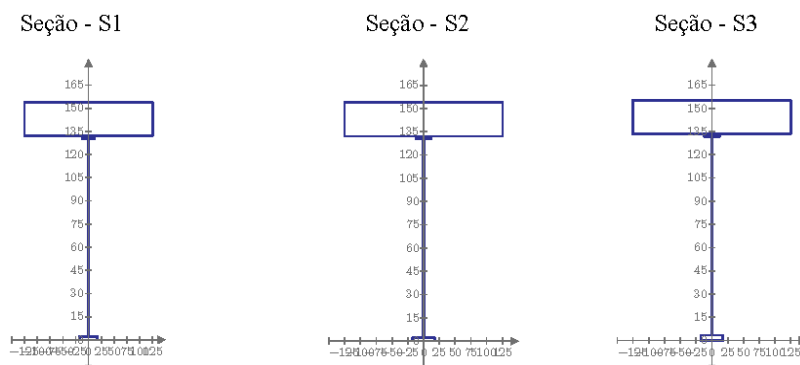
4 - Propriedades do Perfil de Aço



Prop_Aço =	"S"	"Aa (m²)"	"ycg_u (m)"	"Ia (m⁴)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.0277	0.5756	0.0069	0.0093	0.0121	0.0121
2	0.0277	0.5756	0.0069	0.0093	0.0121	0.0121
3	0.0284	0.4836	0.0076	0.009	0.0157	0.0157

5 - Propriedades da Seção Mista

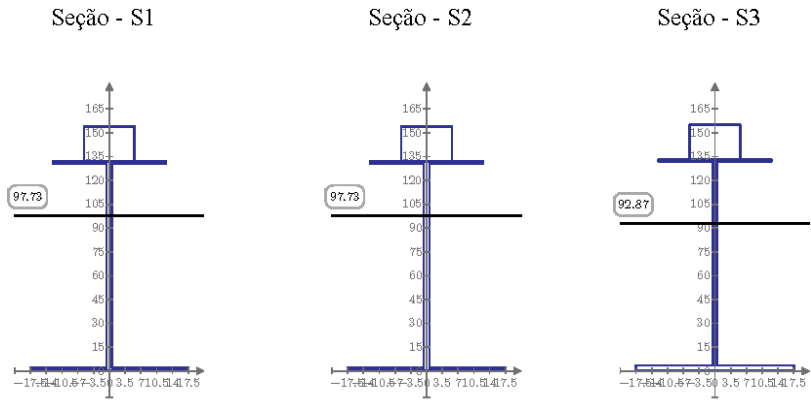
5.1 - Seção Mista



Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

5.2 - Propriedades da Seção Mista - Longa Duração

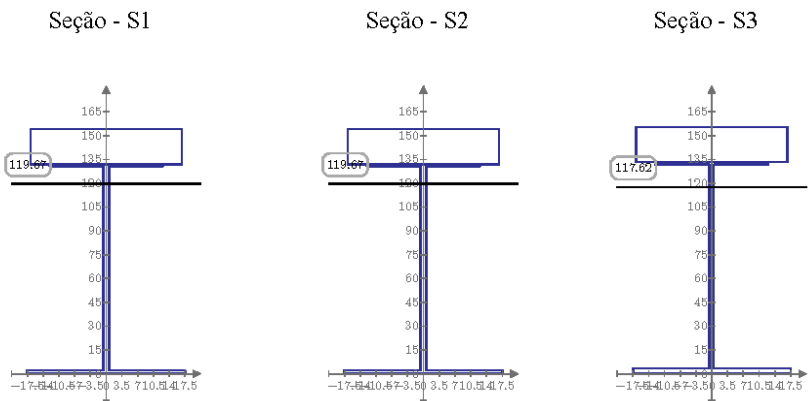
$$n_{LD} := 3 (E_a \div E_{cs}) = 22.356$$



Prop_LD	"S"	"A_LD (m²)"	"ycg_u_LD (m)"	"I_LD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.0523	0.9773	0.0166	0.0294	0.0483	0.0169	
2	0.0523	0.9773	0.0166	0.0294	0.0483	0.0169	
3	0.053	0.9287	0.0199	0.0318	0.0491	0.0214	

5.3 - Propriedades da Seção Mista - Curta Duração

$$n_{CD} := (E_a \div E_{cs}) = 7.45$$



Prop_CD	"S"	"A_CD (m²)"	"ycg_u_CD (m)"	"I_CD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.1015	1.1967	0.022	0.0639	0.178	0.0183	
2	0.1015	1.1967	0.022	0.0639	0.178	0.0183	
3	0.1022	1.1762	0.0268	0.0711	0.1709	0.0228	

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

## 6 - ESFORÇOS RESISTENTES

### 6.1 - Momento Fletor Resistente do Perfil de aço

$$ELU_{FET} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 125 & 46 & 144 & \text{"SMC"} & 207 \\ 2 & 125 & 46 & 144 & \text{"SMC"} & 207 \\ 3 & 89 & 29 & 99 & \text{"SMC"} & 175 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLM} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 8 & 10 & 19 & \text{"CMP"} & 335 \\ 2 & 8 & 10 & 19 & \text{"CMP"} & 335 \\ 3 & 8 & 10 & 18 & \text{"CMP"} & 237 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLA} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 117 & 61 & 150 & \text{"SMC"} & 282 \\ 2 & 117 & 61 & 150 & \text{"SMC"} & 282 \\ 3 & 175 & 44 & 150 & \text{"ESB"} & 361 \end{bmatrix}$$

#### 6.1.1 - Verificação dos limites da NBR 8800 (Vigas Esbeltas):

$$VERIF_{H13} = \begin{bmatrix} \text{"a"} & \text{"b"} & \text{"c"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 6.2 - Esforço Cortante Resistente do Perfil de Aço

$$ELU_{VRd} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"a_max (cm)"} & \text{"VRd (tf)"} \\ 1.00 & 102.56 & 105.02 & 130.80 & 289.66 & 162.13 & 266.15 \\ 2.00 & 102.56 & 84.97 & 105.83 & 289.66 & 162.13 & 220.50 \\ 3.00 & 134.95 & 76.73 & 95.56 & 289.66 & 95.19 & 81.88 \end{bmatrix}$$

### 6.3 - Classificação da Seção Mista

$$CLAS\_SEÇÃO_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_{comp}\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"Verif"} \\ 1.00 & 102.56 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 2.00 & 102.56 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 3.00 & 134.95 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \end{bmatrix}$$

#### 6.3.1 - Mrd - Seção Mista

$$MRd_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1.00 & \text{"SMC"} & 493.18 \\ 2.00 & \text{"SMC"} & 467.01 \\ 3.00 & \text{"SMC"} & 546.59 \end{bmatrix}$$

#### 6.3.2 - Vrd - Seção Mista

$$V_{Ra_{SM}} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"a_max (cm)"} & \text{"VRd_{SM} (tf)"} \\ 1.00 & 102.56 & 105.02 & 130.80 & 289.66 & 162.13 & 266.15 \\ 2.00 & 102.56 & 84.97 & 105.83 & 289.66 & 162.13 & 220.50 \\ 3.00 & 134.95 & 76.73 & 95.56 & 289.66 & 95.19 & 81.88 \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

## 7 - CONECTORES DE CISALHAMENTO

Critérios conforme a NBR 8800/2008 seção O.4.

- Conectores do tipo pino com cabeça devem possuir comprimento mínimo quatro vezes o diâmetro do conector ( $h_{pc} = 4x\phi$ ).

- Os conectores tipo pino com cabeça não podem ter diâmetro maior que 2.5 vezes a espessura da mesa a qual forem soldadas, a menos que sejam colocados diretamente no eixo da alma do perfil.

- O cobrimento lateral de concreto para qualquer tipo de conector deve ser no mínimo 25mm.

- O espaçamento máximo entre linhas de centro de conectores deve ser igual a 8 vezes a espessura total da laje.

- O espaçamento mínimo entre linhas de centro de conectores do tipo pino com cabeça deve ser igual a 6 $\phi$  diâmetros ao longo do vão da viga. O espaçamento mínimo transversal deve ser de 4 $\phi$  diâmetros.

### 7.1 - Dados Conectores "Stud"

$$S_{ca} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi_{es} \text{ (mm)}\text{"} & \text{"}A_{es} \text{ (cm}^2\text{)}\text{"} & \text{"}nes_{min}\text{"} & \text{"}esp_{long-max} \text{ (cm)}\text{"} & \text{"}esp_{long-min} \text{ (cm)}\text{"} & \text{"}esp_{tran-max} \text{ (cm)}\text{"} \\ 25.00 & 4.91 & 115.00 & 176.00 & 15.00 & 10.00 \end{bmatrix}$$

### 7.2 - Verificação do Fluxo de Cisalhamento e Número de Conectores por trecho:

$$S_{ca_{tr}} = \begin{bmatrix} \text{"}Trecho\text{"} & \text{"}1\text{"} & \text{"}2\text{"} & \text{"}3\text{"} & \text{"}4\text{"} & \text{"}5\text{"} & \text{"}6\text{"} & \text{"}7\text{"} & \text{"}8\text{"} & \text{"}9\text{"} & \text{"}10\text{"} \\ \text{"}Seção\text{"} & 1 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 1 \\ \text{"}hee \text{ (cm)}\text{"} & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 \\ \text{"}Q \text{ (cm}^3\text{)}\text{"} & 128328 & 128328 & 146737 & 146737 & 146737 & 146737 & 146737 & 146737 & 128328 & 128328 \\ \text{"}I \text{ (cm}^4\text{)}\text{"} & 2195300 & 2195300 & 2680313 & 2680313 & 2680313 & 2680313 & 2680313 & 2680313 & 2195300 & 2195300 \\ \text{"}qd \text{ (tf/m)}\text{"} & 63 & 52 & 42 & 32 & 22 & 22 & 32 & 42 & 52 & 63 \\ \text{"}qk_Q \text{ (tf/m)}\text{"} & 22 & 18 & 15 & 13 & 10 & 10 & 13 & 15 & 18 & 22 \\ \text{"}nes_{trecho}\text{"} & 14 & 12 & 10 & 8 & 7 & 7 & 8 & 10 & 12 & 14 \end{bmatrix}$$

### 7.3 - Número total de Conectores

$$n_{ca_{total}} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi_{es} \text{ (mm)}\text{"} & \text{"}nes_{total}\text{"} \\ 25 & 104 \end{bmatrix}$$

## 8 - FADIGA

A tensão limite da faixa de variações de tensões, para um número infinito de ciclos de solicitação, varia conforme os elementos estruturais. Nenhuma verificação de resistência à fadiga é necessária se a faixa de variação de tensões, analisada em regime elástico, for inferior ao limite estabelecido na NBR 16694/2020 em seu anexo A.

$$S_{fad} = \begin{bmatrix} \text{"}perfil\text{"} & \text{"}\sigma_{fad,VQ} \text{ (MPa)}\text{"} & \text{"}\text{"} & \text{"}\sigma_{fad,MQ} \text{ (MPa)}\text{"} & \text{"}\text{"} \\ 1 & 16.46 & \text{"}ok\text{"} & 0 & \text{"}ok\text{"} \\ 2 & 13.97 & \text{"}ok\text{"} & 3.09 & \text{"}ok\text{"} \\ 3 & 15.26 & \text{"}ok\text{"} & 8.87 & \text{"}ok\text{"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

## 9 - VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRABALHO DAS SEÇÕES DE AÇO

---

### 9.1 - Verificação na fase construtiva

$$VERIF_{ctf} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd(tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 266.15 & 0.08 & \text{"ok"} & 0.00 & 207.11 & 0.00 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 220.50 & 0.08 & \text{"ok"} & 44.30 & 207.11 & 0.21 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 81.88 & 0.00 & \text{"ok"} & 127.00 & 175.41 & 0.72 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 9.1 - Verificação na fase de utilização

$$VERIF_{ut} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VSd (tf)} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd(tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 80.60 & 266.15 & 0.30 & \text{"ok"} & 46.73 & 493.18 & 0.09 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 66.80 & 220.50 & 0.30 & \text{"ok"} & 182.95 & 467.01 & 0.39 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 53.50 & 81.88 & 0.65 & \text{"ok"} & 484.40 & 546.59 & 0.89 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

#### 9.1.1 - Verificação das tensões na fase de utilização para seções semi-compactas

$$\sigma_{SM\_smc} = \begin{bmatrix} \text{"Perf"} & \text{"MSd/Wxo"} & \text{"fed (MPa)} & \text{""} & \text{"MSd/Wxu"} & \text{"fyd (MPa)} & \text{""} & \text{"R"} \\ 1 & 0.7 & 21.43 & \text{"ok"} & 27.05 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 2 & 2.46 & 21.43 & \text{"ok"} & 113.85 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 3 & 5.86 & 21.43 & \text{"ok"} & 238.38 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)



PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO

Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

VIGA DE AÇO: VA16

1 - Dados dos Materiais

Aço	$f_y$	$f_u$	$E_a$	$G_a$	$\rho_a$	$esp_{sac}$	$\gamma_{a1}$	$\gamma_{a2}$	$\beta_{vm}$	$\sigma_{a\_fad}$
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	(mm)				(MPa)

"A588"	290	435	200000	77000	7.85	0	1.10	1.35	1	69
--------	-----	-----	--------	-------	------	---	------	------	---	----

Concreto	$f_{ck}$	$\gamma_c$	$\rho_c$	$\alpha_c$	$T_{c,r}$	$\gamma_{retr}$	$\alpha_E$	Aço	$f_{ys}$	$\gamma_s$	$\alpha_E$
	(MPa)		$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	$\left(\frac{1}{1^\circ C}\right)$	(°C)				(MPa)		

"C30"	30	1.4	2.50	$10^{-5}$	-5	1.2	1.0	"CA50"	500	1.15	
-------	----	-----	------	-----------	----	-----	-----	--------	-----	------	--

$\alpha_E = 1,2$  para basalto e diabásio  
 $\alpha_E = 1,0$  para granito e gnaíse  
 $\alpha_E = 0,9$  para calcário  
 $\alpha_E = 0,7$  para arenito

$E_{ca} = 30672.46 \text{ MPa}$        $E_{cs} = 26838.41 \text{ MPa}$

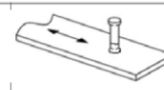
Conector	$\phi_{ca}$	$n_{ca}$	$f_{uce}$	$\gamma_{ce}$	$R_g$	$R_p$	$\sigma_{ca\_fad}$
	(mm)		(MPa)				(MPa)

"Stud"	25	1	415	1.25	1	0.8	69
--------	----	---	-----	------	---	-----	----

9.3 Conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça, aplicados por processo automático de solda ou por soldas de filete

69

Ruptura do conector por cisalhamento



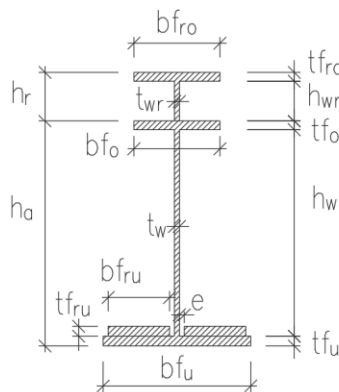
Rg: 1,00 - para qualquer número de conectores conectados em uma linha soldado diretamente no perfil de aço;  
 0,85 - para dois conectores soldados perpendicular ao perfil de aço  
 Rp: 0,70 - para três ou mais conectores soldados perpendicular ao perfil de aço;  
 1,00 - para conectores soldados diretamente no perfil de aço;  
 0,75 - para conectores soldados e embutidos em uma laje mista

2 - Geometria Perfil de aço

S	Trec.	$b_{fu}$	$t_{fu}$	$h_w$	$t_w$	$b_{fo}$	$t_{fo}$	$b_{fru}$	$t_{fru}$	e	$h_{wr}$	$t_{wr}$	$b_{fro}$	$t_{fro}$	$b_{fc}$	$h_{iaje}$	$L_b$	a
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)

1	"S1"	350	22	1282	12.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	223	22	500	100
2	"S2"	350	22	1282	12.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	223	22	500	150
3	"S3"	350	35	1282	9.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	223	22	500	200

Seção Transversal



a = distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores adjacentes NBR 8800 - 5.4.3.1

$$h_a := t_{fu} + h_w + t_{fo} = \begin{bmatrix} 1320 \\ 1333 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_r := h_{wr} + t_{fro} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_{at} := h_a + h_r = \begin{bmatrix} 1320 \\ 1320 \\ 1333 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h := h_a + h_r + h_{iaje} = \begin{bmatrix} 1540 \\ 1540 \\ 1553 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

### 3 - Solicitações Características (Sem majoração)

O programa admite até três seções transversais difentes.

Seção	$M_{g1}$ (tf·m)	$M_{g2}$ (tf·m)	$M_{g3}$ (tf·m)	$M_Q$ (tf·m)	$V_{Sd\_cst}$ (tf)	$M_{Sd\_cst}$ (tf·m)
1	0.00	0.00	0	0.00	20.5	0.00
2	5.21	27.3	6.66	67.9	16.4	40.2
3	14.9	78.4	15.6	187.4	0	115.1

Combinações consideradas:

$$V_{Sd\_cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2}$$

$$V_{Sd\_cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2} + \gamma_q * V_Q$$

$$M_{Sd\_cst} = \gamma_g * M_{g1} + \gamma_g * M_{g2}$$

$$M_{Sd} = \gamma_g * (M_{g1} + M_{g2} + M_{g3}) + \gamma_q * M_Q$$

Esforço cortante para verificação do fluxo de cisalhamento horizontal nos conectores:

Nó	$P_{ef,V}$	$V_{g1}$ (tf)	$V_{g2}$ (tf)	$V_{g3}$ (tf)	$V_Q$ (tf)	$V_{Sd}$ (tf)
10	1	2.66	14	4.78	33.5	79.2
11	2	2.13	11.2	3.97	28.6	66.3
12	2	1.6	8.41	3.16	24	53.8
13	3	1.07	5.62	2.34	19.8	41.8
14	3	0.54	2.84	1.53	15.8	30.3
15	3	0	0	0	12.2	19.4

Coefficientes de Majoração dos Esforços - NBR 8681/2004

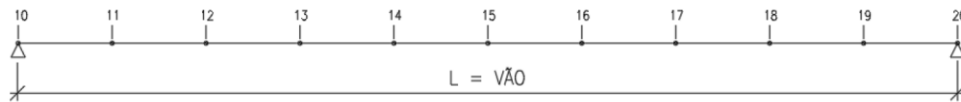
Fase	$\gamma_{g\_Vg1}$	$\gamma_{g\_Vg2}$	$\gamma_{g\_Vg3}$	$\gamma_{q\_VQ}$	$\gamma_{g\_Mg1}$	$\gamma_{g\_Mg2}$	$\gamma_{g\_Mg3}$	$\gamma_{q\_MQ}$
"Const"	1.15	1.15	0	0	1.15	1.25	0	0
"ELU"	1.35	1.35	1.35	1.5	1.35	1.35	1.35	1.5

$L_{vão}$  div

$$\frac{(m)}{23.00} \quad 10$$

$$l_{barra} = \frac{L_{vão}}{div} = 2.3 \text{ m}$$

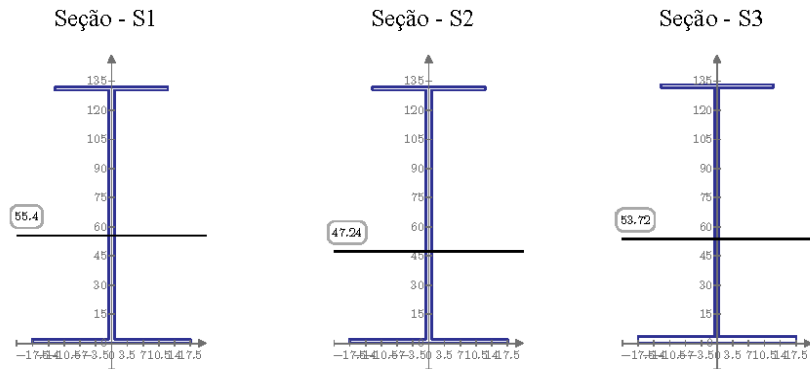
MODELO-NUMERAÇÃO DOS NÓS



Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

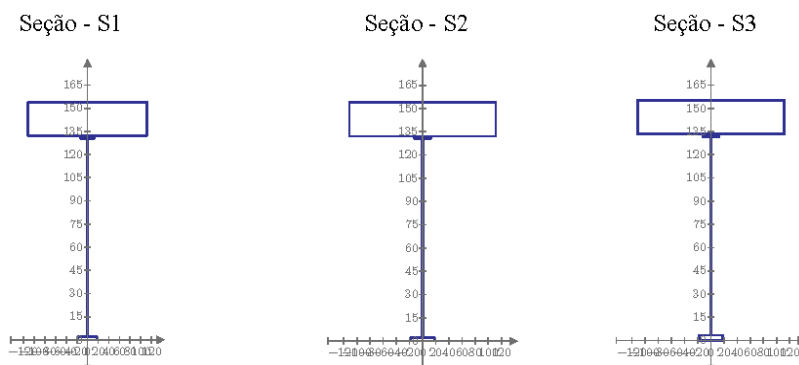
4 - Propriedades do Perfil de Aço



Prop_Aço =	"S"	"Aa (m²)"	"ycg_u (m)"	"Ia (m^4)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.0277	0.5756	0.0069	0.0093	0.0121	
2	0.0277	0.5756	0.0069	0.0093	0.0121	
3	0.0284	0.4836	0.0076	0.009	0.0157	

5 - Propriedades da Seção Mista

5.1 - Seção Mista

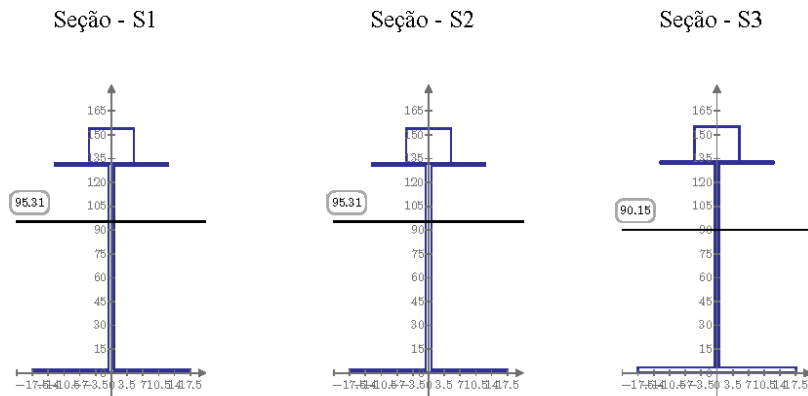


Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

### 5.2 - Propriedades da Seção Mista - Longa Duração

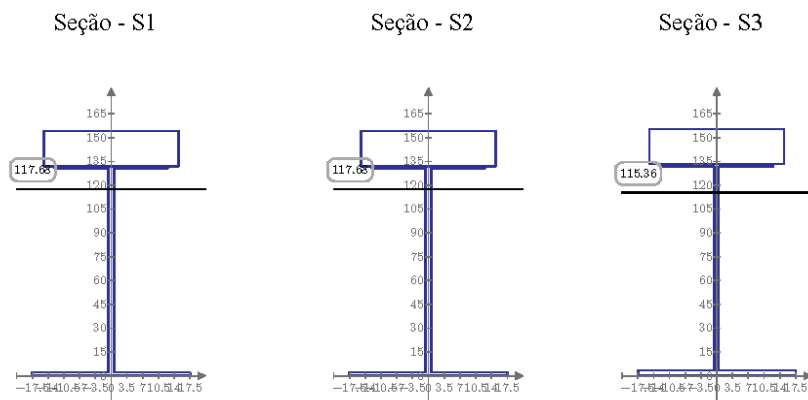
$$n_{LD} := 3 (E_a \div E_{cs}) = 22.356$$



Prop_LD	"S"	"A_LD (m²)"	"ycg_u_LD (m)"	"I_LD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.0497	0.9531	0.016	0.0272	0.0435	0.0168	
2	0.0497	0.9531	0.016	0.0272	0.0435	0.0168	
3	0.0504	0.9015	0.0191	0.0293	0.0443	0.0212	

### 5.3 - Propriedades da Seção Mista - Curta Duração

$$n_{CD} := (E_a \div E_{cs}) = 7.45$$



Prop_CD	"S"	"A_CD (m²)"	"ycg_u_CD (m)"	"I_CD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.0936	1.1768	0.0214	0.0591	0.1498	0.0182	
2	0.0936	1.1768	0.0214	0.0591	0.1498	0.0182	
3	0.0943	1.1536	0.0262	0.0655	0.1458	0.0227	

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

## 6 - ESFORÇOS RESISTENTES

### 6.1 - Momento Fletor Resistente do Perfil de aço

$$ELU_{FET} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 125 & 46 & 144 & \text{"SMC"} & 207 \\ 2 & 125 & 46 & 144 & \text{"SMC"} & 207 \\ 3 & 89 & 29 & 99 & \text{"SMC"} & 175 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLM} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 8 & 10 & 19 & \text{"CMP"} & 335 \\ 2 & 8 & 10 & 19 & \text{"CMP"} & 335 \\ 3 & 8 & 10 & 18 & \text{"CMP"} & 237 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLA} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 117 & 61 & 150 & \text{"SMC"} & 282 \\ 2 & 117 & 61 & 150 & \text{"SMC"} & 282 \\ 3 & 175 & 44 & 150 & \text{"ESB"} & 361 \end{bmatrix}$$

#### 6.1.1 - Verificação dos limites da NBR 8800 (Vigas Esbeltas):

$$VERIF_{H13} = \begin{bmatrix} \text{"a"} & \text{"b"} & \text{"c"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 6.2 - Esforço Cortante Resistente do Perfil de Aço

$$ELU_{VRd} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"a_max (cm)"} & \text{"VRd (tf)"} \\ 1.00 & 102.56 & 105.02 & 130.80 & 289.66 & 162.13 & 266.15 \\ 2.00 & 102.56 & 84.97 & 105.83 & 289.66 & 162.13 & 220.50 \\ 3.00 & 134.95 & 76.73 & 95.56 & 289.66 & 95.19 & 81.88 \end{bmatrix}$$

### 6.3 - Classificação da Seção Mista

$$CLAS\_SEÇÃO_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_{comp}\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"Verif"} \\ 1.00 & 102.56 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 2.00 & 102.56 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 3.00 & 134.95 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \end{bmatrix}$$

#### 6.3.1 - Mrd - Seção Mista

$$MRd_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1.00 & \text{"SMC"} & 490.01 \\ 2.00 & \text{"SMC"} & 466.78 \\ 3.00 & \text{"SMC"} & 552.60 \end{bmatrix}$$

#### 6.3.2 - Vrd - Seção Mista

$$V_{Ra_{SM}} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"a_max (cm)"} & \text{"VRd_{SM} (tf)"} \\ 1.00 & 102.56 & 105.02 & 130.80 & 289.66 & 162.13 & 266.15 \\ 2.00 & 102.56 & 84.97 & 105.83 & 289.66 & 162.13 & 220.50 \\ 3.00 & 134.95 & 76.73 & 95.56 & 289.66 & 95.19 & 81.88 \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

## 7 - CONECTORES DE CISALHAMENTO

Critérios conforme a NBR 8800/2008 seção O.4.

- Conectores do tipo pino com cabeça devem possuir comprimento mínimo quatro vezes o diâmetro do conector ( $h_{pc} = 4x\phi$ ).

- Os conectores tipo pino com cabeça não podem ter diâmetro maior que 2.5 vezes a espessura da mesa a qual forem soldadas, a menos que sejam colocados diretamente no eixo da alma do perfil.

- O cobrimento lateral de concreto para qualquer tipo de conector deve ser no mínimo 25mm.

- O espaçamento máximo entre linhas de centro de conectores deve ser igual a 8 vezes a espessura total da laje.

- O espaçamento mínimo entre linhas de centro de conectores do tipo pino com cabeça deve ser igual a 6 $\phi$  diâmetros ao longo do vão da viga. O espaçamento mínimo transversal deve ser de 4 $\phi$  diâmetros.

### 7.1 - Dados Conectores "Stud"

$$S_{ca} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi_{es} \text{ (mm)}\text{"} & \text{"}A_{es} \text{ (cm}^2\text{)}\text{"} & \text{"}nes_{min}\text{"} & \text{"}esp_{long-max} \text{ (cm)}\text{"} & \text{"}esp_{long-min} \text{ (cm)}\text{"} & \text{"}esp_{tran-max} \text{ (cm)}\text{"} \\ 25.00 & 4.91 & 115.00 & 176.00 & 15.00 & 10.00 \end{bmatrix}$$

### 7.2 - Verificação do Fluxo de Cisalhamento e Número de Conectores por trecho:

$$S_{ca_{tr}} = \begin{bmatrix} \text{"}Trecho\text{"} & \text{"}1\text{"} & \text{"}2\text{"} & \text{"}3\text{"} & \text{"}4\text{"} & \text{"}5\text{"} & \text{"}6\text{"} & \text{"}7\text{"} & \text{"}8\text{"} & \text{"}9\text{"} & \text{"}10\text{"} \\ \text{"}Seção\text{"} & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 2 & 1 \\ \text{"}hee \text{ (cm)}\text{"} & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 \\ \text{"}Q \text{ (cm}^3\text{)}\text{"} & 124221 & 124221 & 124221 & 141958 & 141958 & 141958 & 141958 & 124221 & 124221 & 124221 \\ \text{"}I \text{ (cm}^4\text{)}\text{"} & 2144994 & 2144994 & 2144994 & 2615563 & 2615563 & 2615563 & 2615563 & 2144994 & 2144994 & 2144994 \\ \text{"}qd \text{ (tf/m)}\text{"} & 62 & 52 & 42 & 32 & 24 & 24 & 32 & 42 & 52 & 62 \\ \text{"}qk_Q \text{ (tf/m)}\text{"} & 26 & 22 & 19 & 15 & 12 & 12 & 15 & 19 & 22 & 26 \\ \text{"}nes_{trecho}\text{"} & 17 & 15 & 12 & 10 & 8 & 8 & 10 & 12 & 15 & 17 \end{bmatrix}$$

### 7.3 - Número total de Conectores

$$n_{ca_{total}} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi_{es} \text{ (mm)}\text{"} & \text{"}nes_{total}\text{"} \\ 25 & 126 \end{bmatrix}$$

## 8 - FADIGA

A tensão limite da faixa de variações de tensões, para um número infinito de ciclos de solicitação, varia conforme os elementos estruturais. Nenhuma verificação de resistência à fadiga é necessária se a faixa de variação de tensões, analisada em regime elástico, for inferior ao limite estabelecido na NBR 16694/2020 em seu anexo A.

$$S_{fad} = \begin{bmatrix} \text{"}perfil\text{"} & \text{"}\sigma_{fad,VQ} \text{ (MPa)}\text{"} & \text{"}\text{"} & \text{"}\sigma_{fad,MQ} \text{ (MPa)}\text{"} & \text{"}\text{"} \\ 1 & 19.91 & \text{"}ok\text{"} & 0 & \text{"}ok\text{"} \\ 2 & 17 & \text{"}ok\text{"} & 4.45 & \text{"}ok\text{"} \\ 3 & 18.59 & \text{"}ok\text{"} & 12.6 & \text{"}ok\text{"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

## 9 - VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRABALHO DAS SEÇÕES DE AÇO

---

### 9.1 - Verificação na fase construtiva

$$VERIF_{ctf} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd(tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 266.15 & 0.08 & \text{"ok"} & 0.00 & 207.11 & 0.00 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 220.50 & 0.07 & \text{"ok"} & 40.20 & 207.11 & 0.19 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 81.88 & 0.00 & \text{"ok"} & 115.10 & 175.41 & 0.66 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 9.1 - Verificação na fase de utilização

$$VERIF_{ut} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VSd (tf)} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd(tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 79.20 & 266.15 & 0.30 & \text{"ok"} & 43.91 & 490.01 & 0.09 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 66.30 & 220.50 & 0.30 & \text{"ok"} & 198.64 & 466.78 & 0.43 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 53.80 & 81.88 & 0.66 & \text{"ok"} & 477.97 & 552.60 & 0.86 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

#### 9.1.1 - Verificação das tensões na fase de utilização para seções semi-compactas

$$\sigma_{SM\_smc} = \begin{bmatrix} \text{"Perf"} & \text{"MSd/Wxo"} & \text{"fed (MPa)} & \text{""} & \text{"MSd/Wxu"} & \text{"fyd (MPa)} & \text{""} & \text{"R"} \\ 1 & 0.71 & 21.43 & \text{"ok"} & 25.69 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 2 & 3.12 & 21.43 & \text{"ok"} & 121.44 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 3 & 6.71 & 21.43 & \text{"ok"} & 232.86 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO

Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

VIGA DE AÇO: VA21,VA31,VA41 e VA51

1 - Dados dos Materiais

Aço	$f_y$	$f_u$	$E_a$	$G_a$	$\rho_a$	$esp_{sac}$	$\gamma_{a1}$	$\gamma_{a2}$	$\beta_{vm}$	$\sigma_{a\_fad}$
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	(mm)				(MPa)

"A588"	290	435	200000	77000	7.85	0	1.10	1.35	1	69
--------	-----	-----	--------	-------	------	---	------	------	---	----

Concreto	$f_{ck}$	$\gamma_c$	$\rho_c$	$\alpha_c$	$T_{c,r}$	$\gamma_{retr}$	$\alpha_E$	Aço	$f_{ys}$	$\gamma_s$	$\alpha_E$
	(MPa)		$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	$\left(\frac{1}{1^\circ C}\right)$	(°C)				(MPa)		

"C30"	30	1.4	2.50	$10^{-5}$	-5	1.2	1.0	"CA50"	500	1.15	
-------	----	-----	------	-----------	----	-----	-----	--------	-----	------	--

$\alpha_E = 1,2$  para basalto e diabásio  
 $\alpha_E = 1,0$  para granito e gnaiss  
 $\alpha_E = 0,9$  para calcário  
 $\alpha_E = 0,7$  para arenito

$E_{ca} = 30672.46 \text{ MPa}$        $E_{cs} = 26838.41 \text{ MPa}$

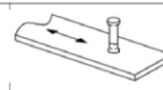
Conector	$\phi_{ca}$	$n_{ca}$	$f_{uce}$	$\gamma_{ce}$	$R_g$	$R_p$	$\sigma_{ca\_fad}$
	(mm)		(MPa)				(MPa)

"Stud"	25	1	415	1.25	1	0.8	69
--------	----	---	-----	------	---	-----	----

9.3 Conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça, aplicados por processo automático de solda ou por soldas de filete

69

Ruptura do conector por cisalhamento



Rg:

1,00 - para qualquer número de conectores conectados em uma linha soldado diretamente no perfil de aço;  
 0,85 - para dois conectores soldados perpendicular ao perfil de aço

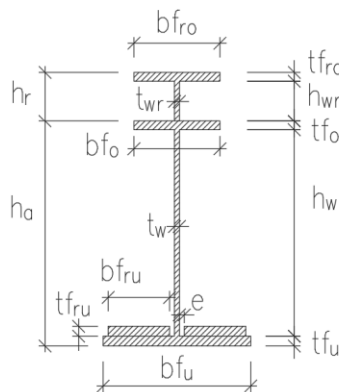
Rp:

0,70 - para três ou mais conectores soldados perpendicular ao perfil de aço;  
 1,00 - para conectores soldados diretamente no perfil de aço;  
 0,75 - para conectores soldados e embutidos em uma laje mista

2 - Geometria Perfil de aço

S	Trec.	$b_{fu}$	$t_{fu}$	$h_w$	$t_w$	$b_{fo}$	$t_{fo}$	$b_{fru}$	$t_{fru}$	$e$	$h_{wr}$	$t_{wr}$	$b_{fro}$	$t_{fro}$	$b_{fc}$	$h_{iaje}$	$L_b$	$a$
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	"S1"	450	25	1629	12.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	207	22	500	100
2	"S2"	450	25	1629	12.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	207	22	500	150
3	"S3"	450	38	1620	12.5	250	25	0	0	0	0	0	0	0	207	22	500	200

Seção Transversal



$a$  = distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores adjacentes NBR 8800 - 5.4.3.1

$$h_a := t_{fu} + h_w + t_{fo} = \begin{bmatrix} 1670 \\ 1683 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_r := h_{wr} + t_{fro} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_{at} := h_a + h_r = \begin{bmatrix} 1670 \\ 1670 \\ 1683 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h := h_a + h_r + h_{iaje} = \begin{bmatrix} 1890 \\ 1890 \\ 1903 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)



PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

### 3 - Solicitações Características (Sem majoração)

O programa admite até três seções transversais difentes.

Seção	$M_{g1}$ (tf·m)	$M_{g2}$ (tf·m)	$M_{g3}$ (tf·m)	$M_Q$ (tf·m)	$V_{Sd\_cst}$ (tf)	$M_{Sd\_cst}$ (tf·m)
1	0.00	0.00	0	0.00	26.2	0.00
2	12.2	44.0	34.9	118.3	21.0	69.1
3	34	122.2	97.2	326.6	0	191.9

Combinações consideradas:

$$V_{Sd\_cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2}$$

$$V_{Sd\_cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2} + \gamma_q * V_Q$$

$$M_{Sd\_cst} = \gamma_g * M_{g1} + \gamma_g * M_{g2}$$

$$M_{Sd} = \gamma_g * (M_{g1} + M_{g2} + M_{g3}) + \gamma_q * M_Q$$

Esforço cortante para verificação do fluxo de cisalhamento horizontal nos conectores:

Nó	$P_{ef,V}$	$V_{g1}$ (tf)	$V_{g2}$ (tf)	$V_{g3}$ (tf)	$V_Q$ (tf)	$V_{Sd}$ (tf)
10	1	4.64	16.7	13.3	45.2	114.6
11	2	3.72	13.3	10.6	38.3	94.8
12	3	2.79	10.0	7.97	31.8	75.7
13	3	1.86	6.67	5.31	25.8	57.4
14	3	0.93	3.34	2.66	20.8	40.5
15	3	0	0	0	15.8	23.7

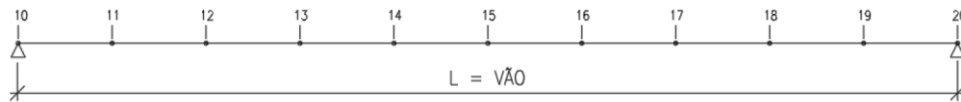
Coefficientes de Majoração dos Esforços - NBR 8681/2004

Fase	$\gamma_{g\_Vg1}$	$\gamma_{g\_Vg2}$	$\gamma_{g\_Vg3}$	$\gamma_{q\_VQ}$	$\gamma_{g\_Mg1}$	$\gamma_{g\_Mg2}$	$\gamma_{g\_Mg3}$	$\gamma_{q\_MQ}$
"Const"	1.15	1.15	0	0	1.15	1.25	0	0
"ELU"	1.35	1.35	1.35	1.5	1.35	1.35	1.35	1.5

$L_{vão}$  div

$$\frac{(m)}{30} \quad 10 \quad i_{barra} = \frac{L_{vão}}{div} = 3 \text{ m}$$

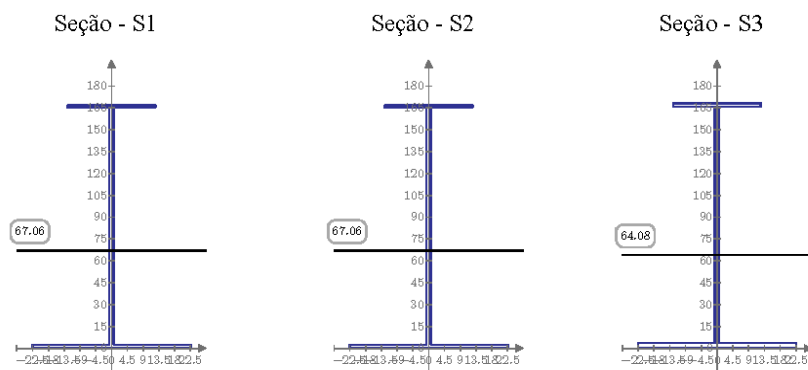
MODELO-NUMERAÇÃO DOS NÓS



Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

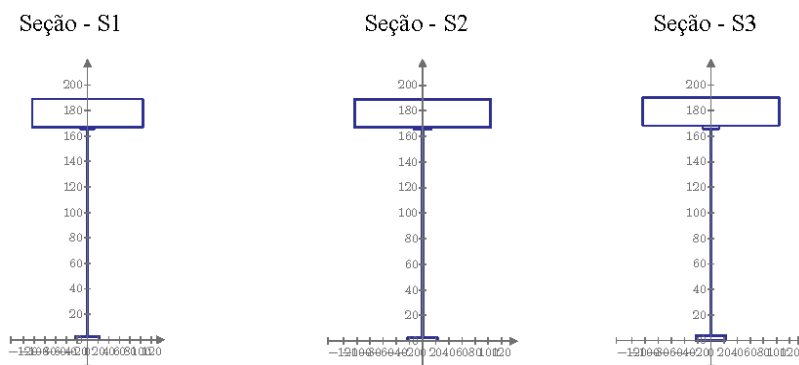
4 - Propriedades do Perfil de Aço



Prop_Aço	"S"	"Aa (m²)"	"ycg_u (m)"	"Ia (m^4)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.0356	0.6706	0.0139	0.0139	0.0207	
2	0.0356	0.6706	0.0139	0.0139	0.0207	
3	0.0436	0.6408	0.0185	0.0178	0.0289	

5 - Propriedades da Seção Mista

5.1 - Seção Mista

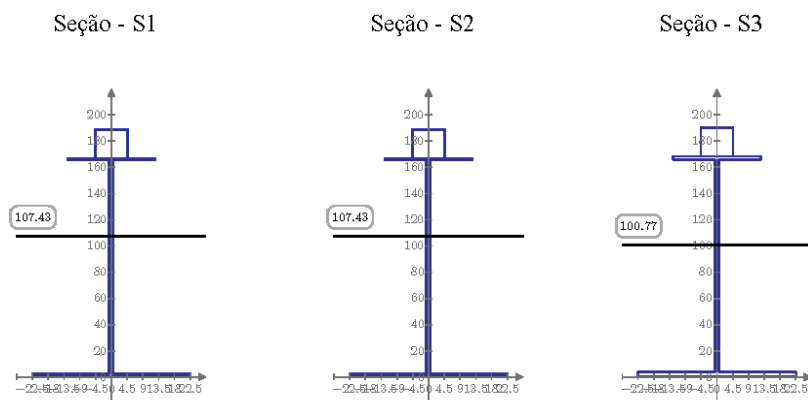


Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

### 5.2 - Propriedades da Seção Mista - Longa Duração

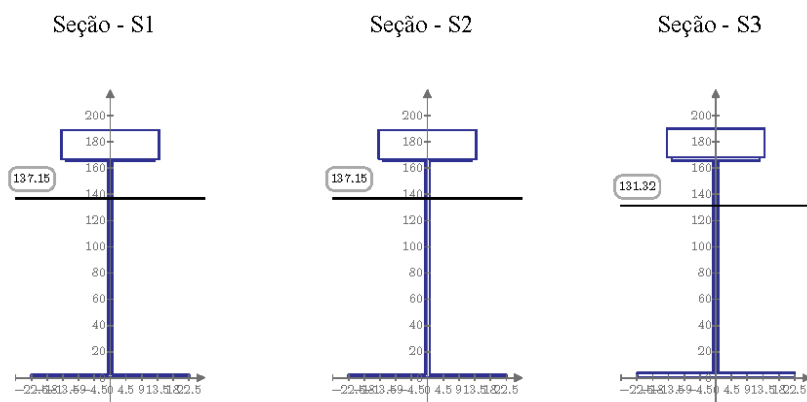
$$n_{LD} := 3 (E_a \div E_{cs}) = 22.356$$



Prop_LD	"S"	"A_LD (m²)"	"ycg_u_LD (m)"	"I_LD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.056	1.0743	0.0299	0.0367	0.0502	0.0278	
2	0.056	1.0743	0.0299	0.0367	0.0502	0.0278	
3	0.064	1.0077	0.0371	0.0414	0.0549	0.0368	

### 5.3 - Propriedades da Seção Mista - Curta Duração

$$n_{CD} := (E_a \div E_{cs}) = 7.45$$



Prop_CD	"S"	"A_CD (m²)"	"ycg_u_CD (m)"	"I_CD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.0967	1.3715	0.0418	0.0807	0.1401	0.0305	
2	0.0967	1.3715	0.0418	0.0807	0.1401	0.0305	
3	0.1047	1.3132	0.0526	0.0891	0.1422	0.04	

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

## 6 - ESFORÇOS RESISTENTES

### 6.1 - Momento Fletor Resistente do Perfil de aço

$$ELU_{FET} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_p"} & \text{"\lambda_r"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)} \\ 1 & 98 & 29 & 99 & \text{"SMC"} & 260 \\ 2 & 98 & 29 & 99 & \text{"SMC"} & 260 \\ 3 & 90 & 29 & 99 & \text{"SMC"} & 350 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLM} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_p"} & \text{"\lambda_r"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)} \\ 1 & 8 & 10 & 18 & \text{"CMP"} & 372 \\ 2 & 8 & 10 & 18 & \text{"CMP"} & 372 \\ 3 & 5 & 10 & 18 & \text{"CMP"} & 474 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLA} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_p"} & \text{"\lambda_r"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)} \\ 1 & 157 & 50 & 150 & \text{"ESB"} & 557 \\ 2 & 157 & 50 & 150 & \text{"ESB"} & 557 \\ 3 & 163 & 47 & 150 & \text{"ESB"} & 717 \end{bmatrix}$$

#### 6.1.1 - Verificação dos limites da NBR 8800 (Vigas Esbeltas):

$$VERIF_{H13} = \begin{bmatrix} \text{"a"} & \text{"b"} & \text{"c"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 6.2 - Esforço Cortante Resistente do Perfil de Aço

$$ELU_{VRd} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_p"} & \text{"\lambda_r"} & \text{"\lambda_{max}} & \text{"a_{max} (cm)} & \text{"VRd (tf)} \\ 1.00 & 130.32 & 123.47 & 153.77 & 289.66 & 127.83 & 319.01 \\ 2.00 & 130.32 & 95.36 & 118.77 & 289.66 & 127.83 & 223.56 \\ 3.00 & 129.60 & 83.13 & 103.53 & 289.66 & 128.27 & 173.11 \end{bmatrix}$$

### 6.3 - Classificação da Seção Mista

$$CLAS\_SEÇÃO_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_{comp}} & \text{"\lambda_{max}} & \text{"Verif"} \\ 1.00 & 130.32 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 2.00 & 130.32 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 3.00 & 129.60 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \end{bmatrix}$$

#### 6.3.1 - Mrd - Seção Mista

$$MRd_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)} \\ 1.00 & \text{"SMC"} & 819.82 \\ 2.00 & \text{"SMC"} & 779.49 \\ 3.00 & \text{"SMC"} & 983.61 \end{bmatrix}$$

#### 6.3.2 - Vrd - Seção Mista

$$V_{Ra_{SM}} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_p"} & \text{"\lambda_r"} & \text{"\lambda_{max}} & \text{"a_{max} (cm)} & \text{"VRd_{SM} (tf)} \\ 1.00 & 130.32 & 123.47 & 153.77 & 289.66 & 127.83 & 319.01 \\ 2.00 & 130.32 & 95.36 & 118.77 & 289.66 & 127.83 & 223.56 \\ 3.00 & 129.60 & 83.13 & 103.53 & 289.66 & 128.27 & 173.11 \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

## 7 - CONECTORES DE CISALHAMENTO

Critérios conforme a NBR 8800/2008 seção O.4.

- Conectores do tipo pino com cabeça devem possuir comprimento mínimo quatro vezes o diâmetro do conector ( $h_{pc} = 4x\phi$ ).

- Os conectores tipo pino com cabeça não podem ter diâmetro maior que 2.5 vezes a espessura da mesa a qual forem soldadas, a menos que sejam colocados diretamente no eixo da alma do perfil.

- O cobrimento lateral de concreto para qualquer tipo de conector deve ser no mínimo 25mm.

- O espaçamento máximo entre linhas de centro de conectores deve ser igual a 8 vezes a espessura total da laje.

- O espaçamento mínimo entre linhas de centro de conectores do tipo pino com cabeça deve ser igual a 6 $\phi$  diâmetros ao longo do vão da viga. O espaçamento mínimo transversal deve ser de 4 $\phi$  diâmetros.

### 7.1 - Dados Conectores "Stud"

$$S_{ca} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi_{es} \text{ (mm)}\text{"} & \text{"}A_{es} \text{ (cm}^2\text{)}\text{"} & \text{"}nes_{min}\text{"} & \text{"}esp_{long-max} \text{ (cm)}\text{"} & \text{"}esp_{long-min} \text{ (cm)}\text{"} & \text{"}esp_{tran-max} \text{ (cm)}\text{"} \\ 25.00 & 4.91 & 128.00 & 176.00 & 15.00 & 10.00 \end{bmatrix}$$

### 7.2 - Verificação do Fluxo de Cisalhamento e Número de Conectores por trecho:

$$S_{ca_{tr}} = \begin{bmatrix} \text{"}Trecho\text{"} & \text{"}1\text{"} & \text{"}2\text{"} & \text{"}3\text{"} & \text{"}4\text{"} & \text{"}5\text{"} & \text{"}6\text{"} & \text{"}7\text{"} & \text{"}8\text{"} & \text{"}9\text{"} & \text{"}10\text{"} \\ \text{"}Seção\text{"} & 1 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 1 \\ \text{"}hee \text{ (cm)}\text{"} & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 \\ \text{"}Q \text{ (cm}^3\text{)}\text{"} & 186011 & 186011 & 218487 & 218487 & 218487 & 218487 & 218487 & 218487 & 186011 & 186011 \\ \text{"}I \text{ (cm}^4\text{)}\text{"} & 4182584 & 4182584 & 5256772 & 5256772 & 5256772 & 5256772 & 5256772 & 5256772 & 4182584 & 4182584 \\ \text{"}qd \text{ (tf/m)}\text{"} & 68 & 57 & 45 & 34 & 24 & 24 & 34 & 45 & 57 & 68 \\ \text{"}qk_Q \text{ (tf/m)}\text{"} & 27 & 23 & 19 & 15 & 12 & 12 & 15 & 19 & 23 & 27 \\ \text{"}nes_{trecho}\text{"} & 23 & 20 & 16 & 13 & 11 & 11 & 13 & 16 & 20 & 23 \end{bmatrix}$$

### 7.3 - Número total de Conectores

$$n_{ca_{total}} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi_{es} \text{ (mm)}\text{"} & \text{"}nes_{total}\text{"} \\ 25 & 168 \end{bmatrix}$$

## 8 - FADIGA

A tensão limite da faixa de variações de tensões, para um número infinito de ciclos de solicitação, varia conforme os elementos estruturais. Nenhuma verificação de resistência à fadiga é necessária se a faixa de variação de tensões, analisada em regime elástico, for inferior ao limite estabelecido na NBR 16694/2020 em seu anexo A.

$$S_{fad} = \begin{bmatrix} \text{"}perfil\text{"} & \text{"}\sigma_{fad,VQ} \text{ (MPa)}\text{"} & \text{"}\text{"} & \text{"}\sigma_{fad,MQ} \text{ (MPa)}\text{"} & \text{"}\text{"} \\ 1 & 21.23 & \text{"}ok\text{"} & 0 & \text{"}ok\text{"} \\ 2 & 17.99 & \text{"}ok\text{"} & 8.28 & \text{"}ok\text{"} \\ 3 & 14.82 & \text{"}ok\text{"} & 22.53 & \text{"}ok\text{"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

## 9 - VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRABALHO DAS SEÇÕES DE AÇO

---

### 9.1 - Verificação na fase construtiva

$$VERIF_{ctf} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd(tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 319.01 & 0.08 & \text{"ok"} & 0.00 & 260.46 & 0.00 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 223.56 & 0.09 & \text{"ok"} & 69.10 & 260.46 & 0.27 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 173.11 & 0.00 & \text{"ok"} & 191.90 & 350.08 & 0.55 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 9.1 - Verificação na fase de utilização

$$VERIF_{ut} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VSd (tf)} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd(tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 114.60 & 319.01 & 0.36 & \text{"ok"} & 60.31 & 819.82 & 0.07 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 94.80 & 223.56 & 0.42 & \text{"ok"} & 360.75 & 779.49 & 0.46 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 75.70 & 173.11 & 0.44 & \text{"ok"} & 899.11 & 983.61 & 0.91 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

#### 9.1.1 - Verificação das tensões na fase de utilização para seções semi-compactas

$$\sigma_{SM\_smc} = \begin{bmatrix} \text{"Perf"} & \text{"MSd/Wxo"} & \text{"fed (MPa)} & \text{""} & \text{"MSd/Wxu"} & \text{"fyd (MPa)} & \text{""} & \text{"R"} \\ 1 & 0.72 & 21.43 & \text{"ok"} & 21.24 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 2 & 4.18 & 21.43 & \text{"ok"} & 130.82 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 3 & 9.34 & 21.43 & \text{"ok"} & 244.39 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO

Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

VIGA DE AÇO: VA22,VA23,VA24,VA25,VA32,VA33,VA34,VA35,VA44,VA45,VA54 e VA55

1 - Dados dos Materiais

Aço	$f_y$	$f_u$	$E_a$	$G_a$	$\rho_a$	$esp_{sac}$	$\gamma_{a1}$	$\gamma_{a2}$	$\beta_{vm}$	$\sigma_{a\_fad}$
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	(mm)				(MPa)

"A588"	290	435	200000	77000	7.85	0	1.10	1.35	1	69
--------	-----	-----	--------	-------	------	---	------	------	---	----

Concreto	$f_{ck}$	$\gamma_c$	$\rho_c$	$\alpha_c$	$T_{c,r}$	$\gamma_{retr}$	$\alpha_E$	Aço	$f_{ys}$	$\gamma_s$	$\alpha_E$
	(MPa)		$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	$\left(\frac{1}{1^\circ C}\right)$	(°C)				(MPa)		

"C30"	30	1.4	2.50	$10^{-5}$	-5	1.2	1.0	"CA50"	500	1.15	
-------	----	-----	------	-----------	----	-----	-----	--------	-----	------	--

$\alpha_E = 1,2$  para basalto e diabásio  
 $\alpha_E = 1,0$  para granito e gnaissse  
 $\alpha_E = 0,9$  para calcário  
 $\alpha_E = 0,7$  para arenito

$E_{ca} = 30672.46 \text{ MPa}$        $E_{cs} = 26838.41 \text{ MPa}$

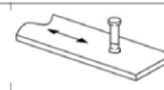
Conector	$\phi_{ca}$	$n_{ca}$	$f_{uce}$	$\gamma_{ce}$	$R_g$	$R_p$	$\sigma_{ca\_fad}$
	(mm)		(MPa)				(MPa)

"Stud"	25	1	415	1.25	1	0.8	69
--------	----	---	-----	------	---	-----	----

9.3 Conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça, aplicados por processo automático de solda ou por soldas de filete

69

Ruptura do conector por cisalhamento



Rg:

1,00 - para qualquer número de conectores conectados em uma linha soldado diretamente no perfil de aço;  
 0,85 - para dois conectores soldados perpendicular ao perfil de aço

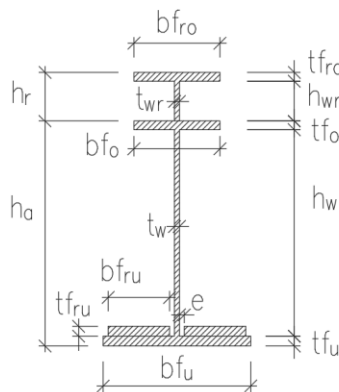
Rp:

0,70 - para três ou mais conectores soldados perpendicular ao perfil de aço;  
 1,00 - para conectores soldados diretamente no perfil de aço;  
 0,75 - para conectores soldados e embutidos em uma laje mista

2 - Geometria Perfil de aço

S	Trec.	$b_{fu}$	$t_{fu}$	$h_w$	$t_w$	$b_{fo}$	$t_{fo}$	$b_{fru}$	$t_{fru}$	e	$h_{wr}$	$t_{wr}$	$b_{fro}$	$t_{fro}$	$b_{fc}$	$h_{iaje}$	$L_b$	a
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	"S1"	450	25	1629	12.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	250	22	500	100
2	"S2"	450	25	1629	12.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	250	22	500	150
3	"S3"	450	38	1620	12.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	250	22	500	200

Seção Transversal



a = distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores adjacentes NBR 8800 - 5.4.3.1

$$h_a := t_{fu} + h_w + t_{fo} = \begin{bmatrix} 1670 \\ 1674 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_r := h_{wr} + t_{fro} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_{at} := h_a + h_r = \begin{bmatrix} 1670 \\ 1670 \\ 1674 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h := h_a + h_r + h_{iaje} = \begin{bmatrix} 1890 \\ 1890 \\ 1894 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

### 3 - Solicitações Características (Sem majoração)

O programa admite até três seções transversais difentes.

Seção	$M_{g1}$ (tf·m)	$M_{g2}$ (tf·m)	$M_{g3}$ (tf·m)	$M_Q$ (tf·m)	$V_{Sd\_cst}$ (tf)	$M_{Sd\_cst}$ (tf·m)
1	0	0	0	0	51.1	0
2	11.9	96.9	16.2	83.8	40.9	134.8
3	32.9	269.1	45.0	231.3	0	374.3

Combinações consideradas:

$$V_{Sd\_cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2}$$

$$V_{Sd\_cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2} + \gamma_q * V_Q$$

$$M_{Sd\_cst} = \gamma_g * M_{g1} + \gamma_g * M_{g2}$$

$$M_{Sd} = \gamma_g * (M_{g1} + M_{g2} + M_{g3}) + \gamma_q * M_Q$$

Esforço cortante para verificação do fluxo de cisalhamento horizontal nos conectores:

Nó	$P_{ef,V}$	$V_{g1}$ (tf)	$V_{g2}$ (tf)	$V_{g3}$ (tf)	$V_Q$ (tf)	$V_{Sd}$ (tf)
10	1	4.5	36.7	6.15	32.0	112.1
11	2	3.6	29.4	4.92	27.2	91.9
12	3	2.7	22.0	3.69	22.6	72.3
13	3	1.8	14.7	4.26	18.4	53.2
14	3	0.9	7.35	1.23	14.8	35.1
15	3	0	0	0	11.3	17.0

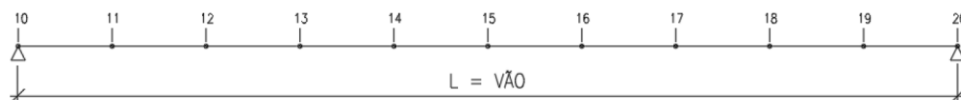
Coefficientes de Majoração dos Esforços - NBR 8681/2004

Fase	$\gamma_{g\_Vg1}$	$\gamma_{g\_Vg2}$	$\gamma_{g\_Vg3}$	$\gamma_{q\_VQ}$	$\gamma_{g\_Mg1}$	$\gamma_{g\_Mg2}$	$\gamma_{g\_Mg3}$	$\gamma_{q\_MQ}$
"Const"	1.15	1.15	0	0	1.15	1.25	0	0
"ELU"	1.35	1.35	1.35	1.5	1.35	1.35	1.35	1.5

$L_{vão} \text{ div}$

$$\frac{(m)}{30.0 \quad 10} \quad i_{barra} = \frac{L_{vão}}{div} = 3 \text{ m}$$

MODELO-NUMERAÇÃO DOS NÓS

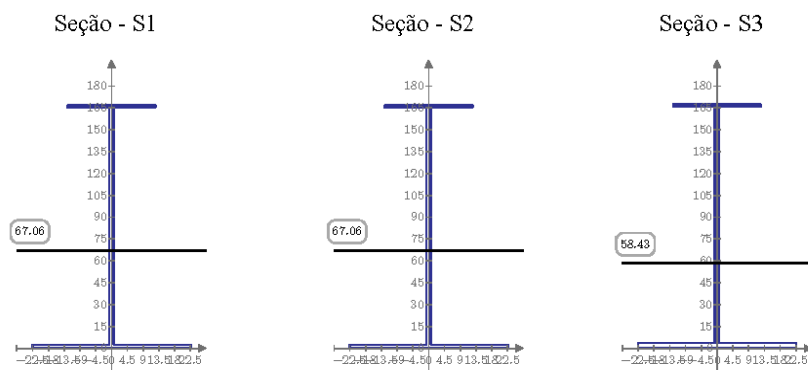


Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)



PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

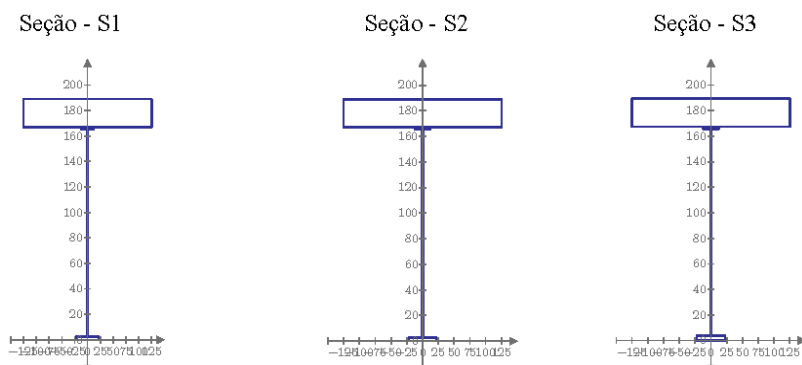
4 - Propriedades do Perfil de Aço



Prop_Aço =	"S"	"Aa (m²)"	"ycg_u (m)"	"Ia (m <sup>4</sup> )"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.0356	0.6706	0.0139	0.0139	0.0207	
2	0.0356	0.6706	0.0139	0.0139	0.0207	
3	0.0414	0.5843	0.016	0.0147	0.0274	

5 - Propriedades da Seção Mista

5.1 - Seção Mista

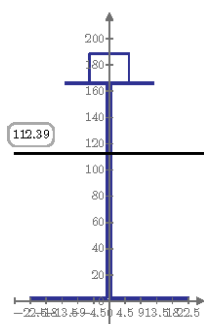


Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

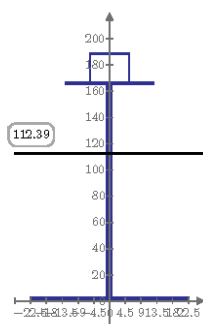
### 5.2 - Propriedades da Seção Mista - Longa Duração

$$n_{LD} := 3 (E_a \div E_{cs}) = 22.356$$

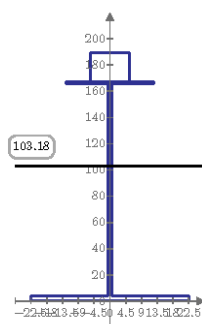
Seção - S1



Seção - S2



Seção - S3

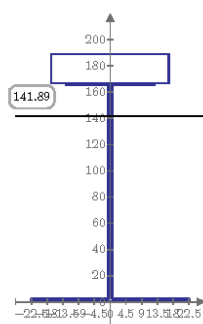


Prop_LD	"S"	"A_LD (m²)"	"ycg_u_LD (m)"	"I_LD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.0602	1.1239	0.0319	0.0416	0.0584	0.0284	
2	0.0602	1.1239	0.0319	0.0416	0.0584	0.0284	
3	0.066	1.0318	0.0383	0.0444	0.0596	0.0371	

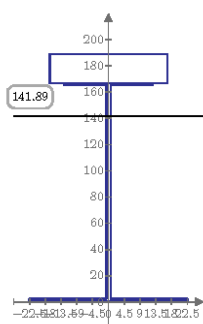
### 5.3 - Propriedades da Seção Mista - Curta Duração

$$n_{CD} := (E_a \div E_{cs}) = 7.45$$

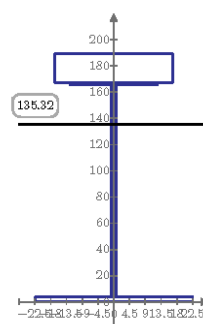
Seção - S1



Seção - S2



Seção - S3



Prop_CD	"S"	"A_CD (m²)"	"ycg_u_CD (m)"	"I_CD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.1094	1.4189	0.0437	0.0929	0.1743	0.0308	
2	0.1094	1.4189	0.0437	0.0929	0.1743	0.0308	
3	0.1152	1.3532	0.0544	0.1006	0.1697	0.0402	

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

## 6 - ESFORÇOS RESISTENTES

### 6.1 - Momento Fletor Resistente do Perfil de aço

$$ELU_{FET} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_p"} & \text{"\lambda_r"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)} \\ 1 & 98 & 29 & 99 & \text{"SMC"} & 260 \\ 2 & 98 & 29 & 99 & \text{"SMC"} & 260 \\ 3 & 101 & 29 & 99 & \text{"ESB"} & 261 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLM} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_p"} & \text{"\lambda_r"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)} \\ 1 & 8 & 10 & 18 & \text{"CMP"} & 372 \\ 2 & 8 & 10 & 18 & \text{"CMP"} & 372 \\ 3 & 8 & 10 & 18 & \text{"CMP"} & 389 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLA} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_p"} & \text{"\lambda_r"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)} \\ 1 & 157 & 50 & 150 & \text{"ESB"} & 557 \\ 2 & 157 & 50 & 150 & \text{"ESB"} & 557 \\ 3 & 172 & 40 & 150 & \text{"ESB"} & 591 \end{bmatrix}$$

#### 6.1.1 - Verificação dos limites da NBR 8800 (Vigas Esbeltas):

$$VERIF_{H13} = \begin{bmatrix} \text{"a"} & \text{"b"} & \text{"c"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 6.2 - Esforço Cortante Resistente do Perfil de Aço

$$ELU_{VRd} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_p"} & \text{"\lambda_r"} & \text{"\lambda_{max}} & \text{"a_{max} (cm)} & \text{"VRd (tf)} \\ 1.00 & 130.32 & 123.47 & 153.77 & 289.66 & 127.83 & 319.01 \\ 2.00 & 130.32 & 95.36 & 118.77 & 289.66 & 127.83 & 223.56 \\ 3.00 & 129.60 & 83.13 & 103.53 & 289.66 & 128.27 & 172.18 \end{bmatrix}$$

### 6.3 - Classificação da Seção Mista

$$CLAS\_SEÇÃO_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_{comp}} & \text{"\lambda_{max}} & \text{"Verf"} \\ 1.00 & 130.32 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 2.00 & 130.32 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 3.00 & 129.60 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \end{bmatrix}$$

#### 6.3.1 - Mrd - Seção Mista

$$MRd_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)} \\ 1.00 & \text{"SMC"} & 828.88 \\ 2.00 & \text{"SMC"} & 755.19 \\ 3.00 & \text{"SMC"} & 884.41 \end{bmatrix}$$

#### 6.3.2 - Vrd - Seção Mista

$$V_{Ra_{SM}} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_p"} & \text{"\lambda_r"} & \text{"\lambda_{max}} & \text{"a_{max} (cm)} & \text{"VRd_{SM} (tf)} \\ 1.00 & 130.32 & 123.47 & 153.77 & 289.66 & 127.83 & 319.01 \\ 2.00 & 130.32 & 95.36 & 118.77 & 289.66 & 127.83 & 223.56 \\ 3.00 & 129.60 & 83.13 & 103.53 & 289.66 & 128.27 & 172.18 \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

## 7 - CONECTORES DE CISALHAMENTO

Critérios conforme a NBR 8800/2008 seção O.4.

- Conectores do tipo pino com cabeça devem possuir comprimento mínimo quatro vezes o diâmetro do conector ( $h_{pc} = 4x\phi$ ).

- Os conectores tipo pino com cabeça não podem ter diâmetro maior que 2.5 vezes a espessura da mesa a qual forem soldadas, a menos que sejam colocados diretamente no eixo da alma do perfil.

- O cobrimento lateral de concreto para qualquer tipo de conector deve ser no mínimo 25mm.

- O espaçamento máximo entre linhas de centro de conectores deve ser igual a 8 vezes a espessura total da laje.

- O espaçamento mínimo entre linhas de centro de conectores do tipo pino com cabeça deve ser igual a 6 $\phi$  diâmetros ao longo do vão da viga. O espaçamento mínimo transversal deve ser de 4 $\phi$  diâmetros.

### 7.1 - Dados Conectores "Stud"

$$S_{ca} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi\text{" (mm)} & \text{"}A\text{" (cm}^2\text{)} & \text{"}nes\text{"}_{min} & \text{"}esp\_long\text{"}_{max} \text{ (cm)} & \text{"}esp\_long\text{"}_{min} \text{ (cm)} & \text{"}esp\_tran\text{"}_{max} \text{ (cm)} \\ 25.00 & 4.91 & 154.00 & 176.00 & 15.00 & 10.00 \end{bmatrix}$$

### 7.2 - Verificação do Fluxo de Cisalhamento e Número de Conectores por trecho:

$$S_{ca\_tr} = \begin{bmatrix} \text{"}Trecho\text{"} & \text{"}1\text{"} & \text{"}2\text{"} & \text{"}3\text{"} & \text{"}4\text{"} & \text{"}5\text{"} & \text{"}6\text{"} & \text{"}7\text{"} & \text{"}8\text{"} & \text{"}9\text{"} & \text{"}10\text{"} \\ \text{"}Seção\text{"} & 1 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 1 \\ \text{"}hee \text{ (cm)}\text{"} & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 \\ \text{"}Q \text{ (cm}^3\text{)}\text{"} & 198587 & 198587 & 236933 & 236933 & 236933 & 236933 & 236933 & 236933 & 198587 & 198587 \\ \text{"}I \text{ (cm}^4\text{)}\text{"} & 4374923 & 4374923 & 5442524 & 5442524 & 5442524 & 5442524 & 5442524 & 5442524 & 4374923 & 4374923 \\ \text{"}qd \text{ (tf/m)}\text{"} & 68 & 56 & 44 & 32 & 21 & 21 & 32 & 44 & 56 & 68 \\ \text{"}qk\_Q \text{ (tf/m)}\text{"} & 19 & 17 & 14 & 11 & 9 & 9 & 11 & 14 & 17 & 19 \\ \text{"}nes\_trecho\text{"} & 17 & 14 & 12 & 10 & 8 & 8 & 10 & 12 & 14 & 17 \end{bmatrix}$$

### 7.3 - Número total de Conectores

$$n_{ca\_total} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi\text{" (mm)} & \text{"}nes\text{"}_{total} \\ 25 & 122 \end{bmatrix}$$

## 8 - FADIGA

A tensão limite da faixa de variações de tensões, para um número infinito de ciclos de solicitação, varia conforme os elementos estruturais. Nenhuma verificação de resistência à fadiga é necessária se a faixa de variação de tensões, analisada em regime elástico, for inferior ao limite estabelecido na NBR 16694/2020 em seu anexo A.

$$S_{fad} = \begin{bmatrix} \text{"}perfil\text{"} & \text{"}\sigma\text{"}_{fad,VQ} \text{ (MPa)} & \text{"} & \text{"}\sigma\text{"}_{fad,MQ} \text{ (MPa)} & \text{"} \\ 1 & 15.03 & \text{"}ok\text{"} & 0 & \text{"}ok\text{"} \\ 2 & 12.78 & \text{"}ok\text{"} & 4.72 & \text{"}ok\text{"} \\ 3 & 10.59 & \text{"}ok\text{"} & 13.37 & \text{"}ok\text{"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

## 9 - VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRABALHO DAS SEÇÕES DE AÇO

---

### 9.1 - Verificação na fase construtiva

$$VERIF_{ctf} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd(tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 319.01 & 0.16 & \text{"ok"} & 0.00 & 260.46 & 0.00 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 223.56 & 0.18 & \text{"ok"} & 134.80 & 260.46 & 0.52 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 172.18 & 0.00 & \text{"ok"} & 374.30 & 260.90 & 1.43 & \text{"nv"} \end{bmatrix}$$

### 9.1 - Verificação na fase de utilização

$$VERIF_{ut} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VSd (tf)} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd(tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 112.10 & 319.01 & 0.35 & \text{"ok"} & 67.72 & 828.88 & 0.08 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 91.90 & 223.56 & 0.41 & \text{"ok"} & 362.17 & 755.19 & 0.48 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 72.30 & 172.18 & 0.42 & \text{"ok"} & 893.04 & 884.41 & 1.01 & \text{"nv"} \end{bmatrix}$$

#### 9.1.1 - Verificação das tensões na fase de utilização para seções semi-compactas

$$\sigma_{SM\_smc} = \begin{bmatrix} \text{"Perf"} & \text{"MSd/Wxo"} & \text{"fed (MPa)} & \text{"σ"} & \text{"MSd/Wxu"} & \text{"fyd (MPa)} & \text{"σ"} & \text{"R"} \\ 1 & 0.71 & 21.43 & \text{"ok"} & 23.4 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 2 & 2.73 & 21.43 & \text{"ok"} & 140.49 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 3 & 5.9 & 21.43 & \text{"ok"} & 267.33 & 263.64 & \text{"nv"} & \text{"NV"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO

Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

VIGA DE AÇO: VA26, VA36, VA46, VA56

1 - Dados dos Materiais

Aço	$f_y$	$f_u$	$E_a$	$G_a$	$\rho_a$	$esp_{sac}$	$\gamma_{a1}$	$\gamma_{a2}$	$\beta_{vm}$	$\sigma_{a\_fad}$
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	(mm)				(MPa)

"A588"	290	435	200000	77000	7.85	0	1.10	1.35	1	69
--------	-----	-----	--------	-------	------	---	------	------	---	----

Concreto	$f_{ck}$	$\gamma_c$	$\rho_c$	$\alpha_c$	$T_{c,r}$	$\gamma_{retr}$	$\alpha_E$	Aço	$f_{ys}$	$\gamma_s$	$\alpha_E$
	(MPa)		$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	$\left(\frac{1}{1^\circ C}\right)$	(°C)				(MPa)		

"C30"	30	1.4	2.50	$10^{-5}$	-5	1.2	1.0	"CA50"	500	1.15	
-------	----	-----	------	-----------	----	-----	-----	--------	-----	------	--

$\alpha_E = 1,2$  para basalto e diabásio  
 $\alpha_E = 1,0$  para granito e gnaiss  
 $\alpha_E = 0,9$  para calcário  
 $\alpha_E = 0,7$  para arenito

$E_{ca} = 30672.46 \text{ MPa}$        $E_{ca} = 26838.41 \text{ MPa}$

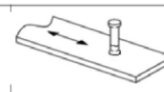
Conector	$\phi_{ca}$	$n_{ca}$	$f_{uce}$	$\gamma_{ce}$	$R_g$	$R_p$	$\sigma_{ca\_fad}$
	(mm)		(MPa)				(MPa)

"Stud"	25	1	415	1.25	1	0.8	69
--------	----	---	-----	------	---	-----	----

9.3 Conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça, aplicados por processo automático de solda ou por soldas de filete

69

Ruptura do conector por cisalhamento



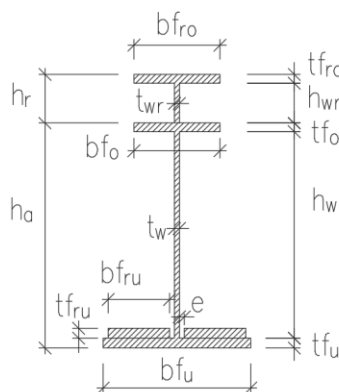
Rg: 1,00 - para qualquer número de conectores conectados em uma linha soldado diretamente no perfil de aço;  
 0,85 - para dois conectores soldados perpendicular ao perfil de aço  
 Rp: 0,70 - para três ou mais conectores soldados perpendicular ao perfil de aço  
 1,00 - para conectores soldados diretamente no perfil de aço;  
 0,75 - para conectores soldados e embutidos em uma laje mista

2 - Geometria Perfil de aço

S	Trec.	$b_{fu}$	$t_{fu}$	$h_w$	$t_w$	$b_{fo}$	$t_{fo}$	$b_{fru}$	$t_{fru}$	$e$	$h_{wr}$	$t_{wr}$	$b_{fro}$	$t_{fro}$	$b_{fc}$	$h_{iaje}$	$L_b$	$a$
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)

1	"S1"	450	25	1629	12.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	223	22	500	100
2	"S2"	450	25	1629	12.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	223	22	500	150
3	"S3"	450	38	1620	12.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	223	22	500	200

Seção Transversal



$a =$  distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores adjacentes NBR 8800 - 5.4.3.1

$$h_a := t_{fu} + h_w + t_{fo} = \begin{bmatrix} 1670 \\ 1674 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_r := h_{wr} + t_{fro} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_{at} := h_a + h_r = \begin{bmatrix} 1670 \\ 1670 \\ 1674 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h := h_a + h_r + h_{iaje} = \begin{bmatrix} 1890 \\ 1890 \\ 1894 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

3 - Solicitações Características (Sem majoração)

O programa admite até três seções transversais difentes.

Seção	$M_{g1}$ (tf·m)	$M_{g2}$ (tf·m)	$M_{g3}$ (tf·m)	$M_Q$ (tf·m)	$V_{Sd\_cst}$ (tf)	$M_{Sd\_cst}$ (tf·m)
1	0	0	0	0	27.6	0
2	11.9	47.4	13.8	101.6	22.1	72.9
3	32.9	131.7	38.4	280.4	0	202.5

Combinações consideradas:

$$V_{Sd\_cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2}$$

$$V_{Sd\_cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2} + \gamma_q * V_Q$$

$$M_{Sd\_cst} = \gamma_g * M_{g1} + \gamma_g * M_{g2}$$

$$M_{Sd} = \gamma_g * (M_{g1} + M_{g2} + M_{g3}) + \gamma_q * M_Q$$

Esforço cortante para verificação do fluxo de cisalhamento horizontal nos conectores:

Nó	$P_{ef,V}$	$V_{g1}$ (tf)	$V_{g2}$ (tf)	$V_{g3}$ (tf)	$V_Q$ (tf)	$V_{Sd}$ (tf)
10	1	4.5	18	5.25	38.8	95.7
11	2	3.6	14.4	4.20	32.8	7.91
12	3	2.7	10.8	3.15	27.2	63.3
13	3	1.8	7.19	2.10	22.1	48.1
14	3	0.9	3.6	1.05	17.7	34.1
15	3	0	0	0	13.4	20.2

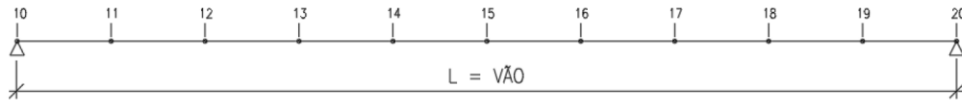
Coefficientes de Majoração dos Esforços - NBR 8681/2004

Fase	$\gamma_{g\_Vg1}$	$\gamma_{g\_Vg2}$	$\gamma_{g\_Vg3}$	$\gamma_{q\_VQ}$	$\gamma_{g\_Mg1}$	$\gamma_{g\_Mg2}$	$\gamma_{g\_Mg3}$	$\gamma_{q\_MQ}$
"Const"	1.15	1.15	0	0	1.15	1.25	0	0
"ELU"	1.35	1.35	1.35	1.5	1.35	1.35	1.35	1.5

$L_{vão} \text{ div}$

$$\frac{(m)}{30.0 \quad 10} \quad i_{barra} = \frac{L_{vão}}{div} = 3 \text{ m}$$

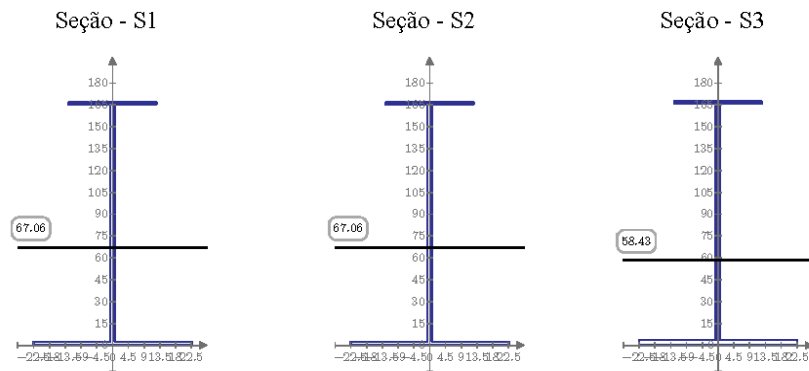
MODELO-NUMERAÇÃO DOS NÓS



Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

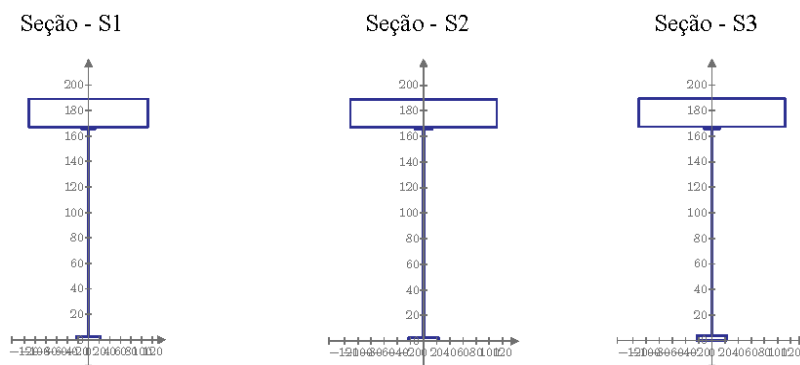
4 - Propriedades do Perfil de Aço



Prop_Aço =	"S"	"Aa (m²)"	"ycg_u (m)"	"Ia (m⁴)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.0356	0.6706	0.0139	0.0139	0.0207	
2	0.0356	0.6706	0.0139	0.0139	0.0207	
3	0.0414	0.5843	0.016	0.0147	0.0274	

5 - Propriedades da Seção Mista

5.1 - Seção Mista



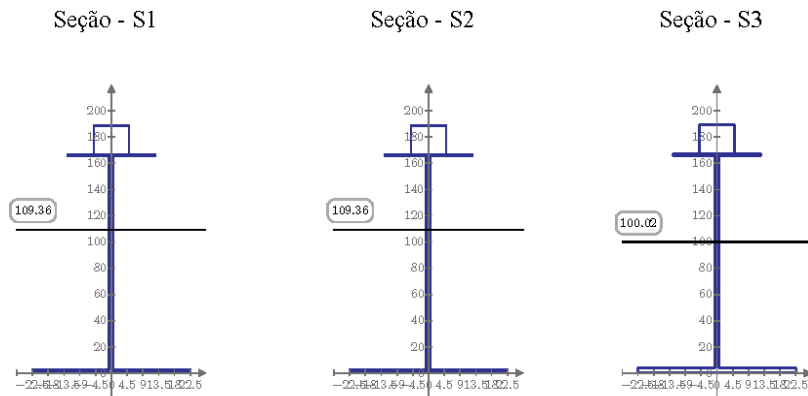
Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)



PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

5.2 - Propriedades da Seção Mista - Longa Duração

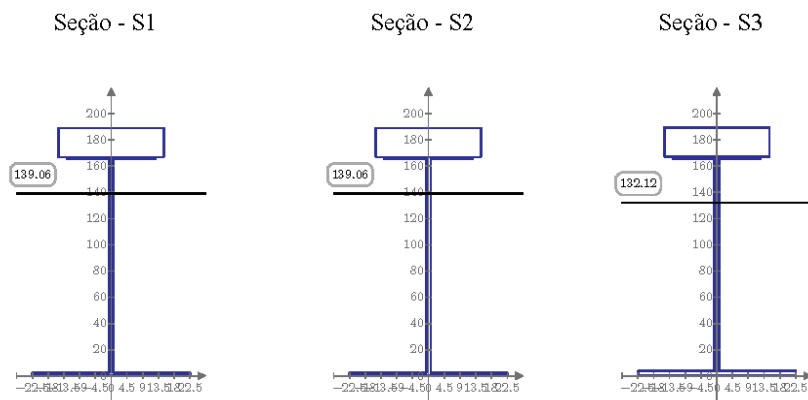
$$n_{LD} := 3 (E_a \div E_{cs}) = 22.356$$



Prop_LD	"S"	"A_LD (m²)"	"ycg_u_LD (m)"	"I_LD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	1	0.0576	1.0936	0.0307	0.0385	0.0532	0.0281
2	2	0.0576	1.0936	0.0307	0.0385	0.0532	0.0281
3	3	0.0633	1.0002	0.0367	0.0411	0.0545	0.0367

5.3 - Propriedades da Seção Mista - Curta Duração

$$n_{CD} := (E_a \div E_{cs}) = 7.45$$



Prop_CD	"S"	"A_CD (m²)"	"ycg_u_CD (m)"	"I_CD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	1	0.1014	1.3906	0.0426	0.0853	0.1524	0.0306
2	2	0.1014	1.3906	0.0426	0.0853	0.1524	0.0306
3	3	0.1072	1.3212	0.0528	0.0922	0.1497	0.04

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

## 6 - ESFORÇOS RESISTENTES

### 6.1 - Momento Fletor Resistente do Perfil de aço

$$ELU_{FET} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_p"} & \text{"\lambda_r"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)} \\ 1 & 98 & 29 & 99 & \text{"SMC"} & 260 \\ 2 & 98 & 29 & 99 & \text{"SMC"} & 260 \\ 3 & 101 & 29 & 99 & \text{"ESB"} & 261 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLM} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_p"} & \text{"\lambda_r"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)} \\ 1 & 8 & 10 & 18 & \text{"CMP"} & 372 \\ 2 & 8 & 10 & 18 & \text{"CMP"} & 372 \\ 3 & 8 & 10 & 18 & \text{"CMP"} & 389 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLA} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_p"} & \text{"\lambda_r"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)} \\ 1 & 157 & 50 & 150 & \text{"ESB"} & 557 \\ 2 & 157 & 50 & 150 & \text{"ESB"} & 557 \\ 3 & 172 & 40 & 150 & \text{"ESB"} & 591 \end{bmatrix}$$

#### 6.1.1 - Verificação dos limites da NBR 8800 (Vigas Esbeltas):

$$VERIF_{H13} = \begin{bmatrix} \text{"a"} & \text{"b"} & \text{"c"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 6.2 - Esforço Cortante Resistente do Perfil de Aço

$$ELU_{VRd} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_p"} & \text{"\lambda_r"} & \text{"\lambda_{max}} & \text{"a_{max} (cm)} & \text{"VRd (tf)} \\ 1.00 & 130.32 & 123.47 & 153.77 & 289.66 & 127.83 & 319.01 \\ 2.00 & 130.32 & 95.36 & 118.77 & 289.66 & 127.83 & 223.56 \\ 3.00 & 129.60 & 83.13 & 103.53 & 289.66 & 128.27 & 172.18 \end{bmatrix}$$

### 6.3 - Classificação da Seção Mista

$$CLAS\_SEÇÃO_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_{comp}} & \text{"\lambda_{max}} & \text{"Verf"} \\ 1.00 & 130.32 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 2.00 & 130.32 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 3.00 & 129.60 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \end{bmatrix}$$

#### 6.3.1 - Mrd - Seção Mista

$$MRd_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)} \\ 1.00 & \text{"SMC"} & 823.50 \\ 2.00 & \text{"SMC"} & 783.44 \\ 3.00 & \text{"SMC"} & 967.39 \end{bmatrix}$$

#### 6.3.2 - Vrd - Seção Mista

$$V_{Ra_{SM}} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_p"} & \text{"\lambda_r"} & \text{"\lambda_{max}} & \text{"a_{max} (cm)} & \text{"VRd_{SM} (tf)} \\ 1.00 & 130.32 & 123.47 & 153.77 & 289.66 & 127.83 & 319.01 \\ 2.00 & 130.32 & 95.36 & 118.77 & 289.66 & 127.83 & 223.56 \\ 3.00 & 129.60 & 83.13 & 103.53 & 289.66 & 128.27 & 172.18 \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

## 7 - CONECTORES DE CISALHAMENTO

Critérios conforme a NBR 8800/2008 seção O.4.

- Conectores do tipo pino com cabeça devem possuir comprimento mínimo quatro vezes o diâmetro do conector ( $h_{pc} = 4x\phi$ ).

- Os conectores tipo pino com cabeça não podem ter diâmetro maior que 2.5 vezes a espessura da mesa a qual forem soldadas, a menos que sejam colocados diretamente no eixo da alma do perfil.

- O cobrimento lateral de concreto para qualquer tipo de conector deve ser no mínimo 25mm.

- O espaçamento máximo entre linhas de centro de conectores deve ser igual a 8 vezes a espessura total da laje.

- O espaçamento mínimo entre linhas de centro de conectores do tipo pino com cabeça deve ser igual a 6 $\phi$  diâmetros ao longo do vão da viga. O espaçamento mínimo transversal deve ser de 4 $\phi$  diâmetros.

### 7.1 - Dados Conectores "Stud"

$$S_{ca} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi_{es} \text{ (mm)}\text{"} & \text{"}A_{es} \text{ (cm}^2\text{)}\text{"} & \text{"}nes_{min}\text{"} & \text{"}esp_{long-max} \text{ (cm)}\text{"} & \text{"}esp_{long-min} \text{ (cm)}\text{"} & \text{"}esp_{tran-max} \text{ (cm)}\text{"} \\ 25.00 & 4.91 & 138.00 & 176.00 & 15.00 & 10.00 \end{bmatrix}$$

### 7.2 - Verificação do Fluxo de Cisalhamento e Número de Conectores por trecho:

	"Trecho"	"1"	"2"	"3"	"4"	"5"	"6"	"7"	"8"	"9"	"10"
$S_{ca_{tr}}$	"Seção"	1	2	3	3	3	3	3	3	2	1
	"hee (cm)"	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
	"Q (cm <sup>3</sup> )"	191058	191058	227061	227061	227061	227061	227061	227061	191058	191058
	"I (cm <sup>4</sup> )"	4259626	4259626	5280385	5280385	5280385	5280385	5280385	5280385	4259626	4259626
	"qd (tf/m)"	58	5	38	29	21	21	29	38	5	58
	"qk_Q (tf/m)"	23	20	16	13	11	11	13	16	20	23
	"nes_trecho"	20	17	14	12	9	9	12	14	17	20

### 7.3 - Número total de Conectores

$$n_{ca_{total}} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi_{es} \text{ (mm)}\text{"} & \text{"}nes_{total}\text{"} \\ 25 & 145 \end{bmatrix}$$

## 8 - FADIGA

A tensão limite da faixa de variações de tensões, para um número infinito de ciclos de solicitação, varia conforme os elementos estruturais. Nenhuma verificação de resistência à fadiga é necessária se a faixa de variação de tensões, analisada em regime elástico, for inferior ao limite estabelecido na NBR 16694/2020 em seu anexo A.

$S_{fad}$	"perfil"	" $\sigma_{fad,VQ}$ (MPa)"	"	" $\sigma_{fad,MQ}$ (MPa)"	"
1		18.23	"ok"	0	"ok"
2		15.41	"ok"	6.54	"ok"
3		12.75	"ok"	18.37	"ok"

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

## 9 - VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRABALHO DAS SEÇÕES DE AÇO

---

### 9.1 - Verificação na fase construtiva

$$VERIF_{ctf} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd (tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 319.01 & 0.09 & \text{"ok"} & 0.00 & 260.46 & 0.00 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 223.56 & 0.10 & \text{"ok"} & 72.90 & 260.46 & 0.28 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 172.18 & 0.00 & \text{"ok"} & 202.50 & 260.90 & 0.78 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 9.1 - Verificação na fase de utilização

$$VERIF_{ut} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VSd (tf)} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd (tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 95.70 & 319.01 & 0.30 & \text{"ok"} & 63.20 & 823.50 & 0.08 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 7.91 & 223.56 & 0.04 & \text{"ok"} & 314.28 & 783.44 & 0.40 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 63.30 & 172.18 & 0.37 & \text{"ok"} & 766.81 & 967.39 & 0.79 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

#### 9.1.1 - Verificação das tensões na fase de utilização para seções semi-compactas

$$\sigma_{SM\_smc} = \begin{bmatrix} \text{"Perf"} & \text{"MSd/Wxo"} & \text{"fed (MPa)} & \text{""} & \text{"MSd/Wxu"} & \text{"fyd (MPa)} & \text{""} & \text{"R"} \\ 1 & 0.72 & 21.43 & \text{"ok"} & 22.09 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 2 & 3.28 & 21.43 & \text{"ok"} & 115.29 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 3 & 7.33 & 21.43 & \text{"ok"} & 216 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO

Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

VIGA DE AÇO: VA42, VA43 - Existentes e Reforçadas

1 - Dados dos Materiais

Aço	$f_y$	$f_u$	$E_a$	$G_a$	$\rho_a$	$esp_{sac}$	$\gamma_{a1}$	$\gamma_{a2}$	$\beta_{vm}$	$\sigma_{a\_fad}$
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	(mm)				(MPa)
"A588"	290	435	200000	77000	7.85	0	1.10	1.35	1	69

Concreto	$f_{ck}$	$\gamma_c$	$\rho_c$	$\alpha_c$	$T_{c,r}$	$\gamma_{retr}$	$\alpha_E$	Aço	$f_{ys}$	$\gamma_s$	$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio $\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaissé $\alpha_E = 0,9$ para calcário $\alpha_E = 0,7$ para arenito
	(MPa)		$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	$\left(\frac{1}{1^\circ C}\right)$	(°C)				(MPa)		
"C30"	30	1.4	2.50	$10^{-5}$	-5	1.2	1.0	"CA50"	500	1.15	

$E_{ca} = 30672.463 \text{ MPa}$      $E_{ca} = 26838.405 \text{ MPa}$

Conector	$\phi_{ca}$	$n_{ca}$	$f_{uce}$	$\gamma_{ce}$	$R_g$	$R_p$	$\sigma_{ca\_fad}$
	(mm)		(MPa)				(MPa)
"Stud"	25	1	415	1.25	1	0.8	69

9.3 Conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça, aplicados por processo automático de solda ou por soldas de filete

69

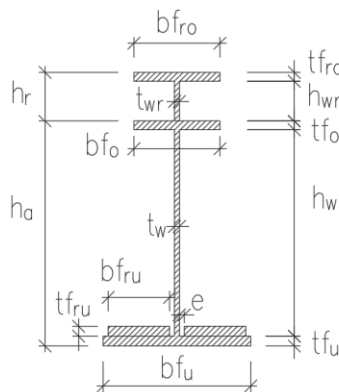
Ruptura do conector por cisalhamento

- Rg:  
 1,00 - para qualquer número de conectores conectados em uma linha soldado diretamente no perfil de aço;  
 0,85 - para dois conectores soldados perpendicular ao perfil de aço  
 0,70 - para três ou mais conectores soldados perpendicular ao perfil de aço
- Rp:  
 1,00 - para conectores soldados diretamente no perfil de aço;  
 0,75 - para conectores soldados e embutidos em uma laje mista

2 - Geometria Perfil de aço

S	Trec.	$b_{fu}$	$t_{fu}$	$h_w$	$t_w$	$b_{fo}$	$t_{fo}$	$b_{fru}$	$t_{fru}$	e	$h_{wr}$	$t_{wr}$	$b_{fro}$	$t_{fro}$	$b_{fc}$	$h_{iaje}$	$L_b$	a
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	"S1"	300	25	1410	12.5	130	12.5	0	0	0	204	12.5	250	16	250	22	500	100
2	"S2"	300	25	1410	12.5	130	12.5	0	0	0	204	12.5	250	16	250	22	500	150
3	"S3"	380	25	1410	12.5	190	12.5	170	32	30	188	12.5	330	32	250	22	500	200

Seção Transversal



a = distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores adjacentes NBR 8800 - 5.4.3.1

$$h_a := t_{fu} + h_w + t_{fo} = \begin{bmatrix} 1447.5 \\ 1447.5 \\ 1447.5 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_r := h_{wr} + t_{fro} = \begin{bmatrix} 220 \\ 220 \\ 220 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_{at} := h_a + h_r = \begin{bmatrix} 1667.5 \\ 1667.5 \\ 1667.5 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h := h_a + h_r + h_{iaje} = \begin{bmatrix} 1887.5 \\ 1887.5 \\ 1887.5 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

### 3 - Solicitações Características (Sem majoração)

O programa admite até três seções transversais difentes.

Seção	$M_{g1}$ (tf·m)	$M_{g2}$ (tf·m)	$M_{g3}$ (tf·m)	$M_Q$ (tf·m)	$V_{Sd\_cst}$ (tf)	$M_{Sd\_cst}$ (tf·m)
1	0	0	0	0	51.1	0
2	11.9	96.9	16.2	83.8	40.9	134.8
3	32.9	269.1	45.0	222.0	0	374.3

Combinações consideradas:

$$V_{Sd\_cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2}$$

$$V_{Sd\_cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2} + \gamma_q * V_Q$$

$$M_{Sd\_cst} = \gamma_g * M_{g1} + \gamma_g * M_{g2}$$

$$M_{Sd} = \gamma_g * (M_{g1} + M_{g2} + M_{g3}) + \gamma_q * M_Q$$

Esforço cortante para verificação do fluxo de cisalhamento horizontal nos conectores:

Nó	$P_{ef,V}$	$V_{g1}$ (tf)	$V_{g2}$ (tf)	$V_{g3}$ (tf)	$V_Q$ (tf)	$V_{Sd}$ (tf)
10	1	4.5	36.7	6.15	32.0	112.1
11	2	3.6	29.4	4.92	27.2	91.9
12	2	2.7	22.0	3.69	22.6	72.3
13	3	1.8	14.7	2.46	18.4	53.2
14	3	0.9	7.35	1.23	14.8	35.1
15	3	0	0	0	11.3	17.0

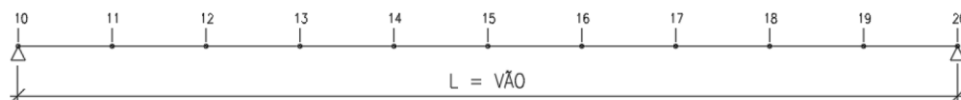
Coefficientes de Majoração dos Esforços - NBR 8681/2004

Fase	$\gamma_{g\_Vg1}$	$\gamma_{g\_Vg2}$	$\gamma_{g\_Vg3}$	$\gamma_{q\_VQ}$	$\gamma_{g\_Mg1}$	$\gamma_{g\_Mg2}$	$\gamma_{g\_Mg3}$	$\gamma_{q\_MQ}$
"Const"	1.15	1.15	0	0	1.15	1.25	0	0
"ELU"	1.35	1.35	1.35	1.5	1.35	1.35	1.35	1.5

$L_{vão}$  div

$$\frac{(m)}{30.00} \quad 10 \quad i_{barra} = \frac{L_{vão}}{div} = 3 \text{ m}$$

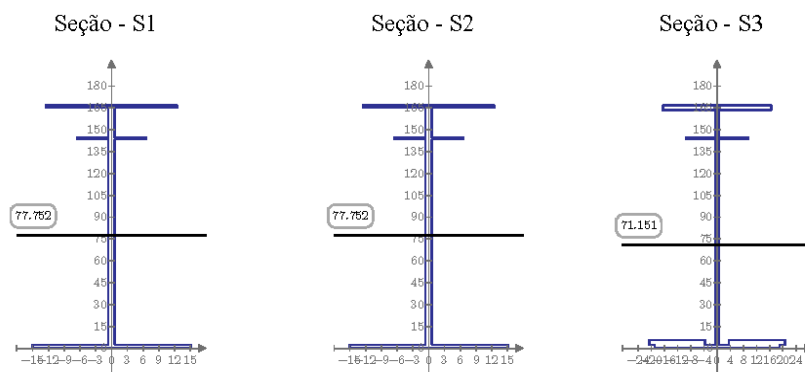
MODELO-NUMERAÇÃO DOS NÓS



Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

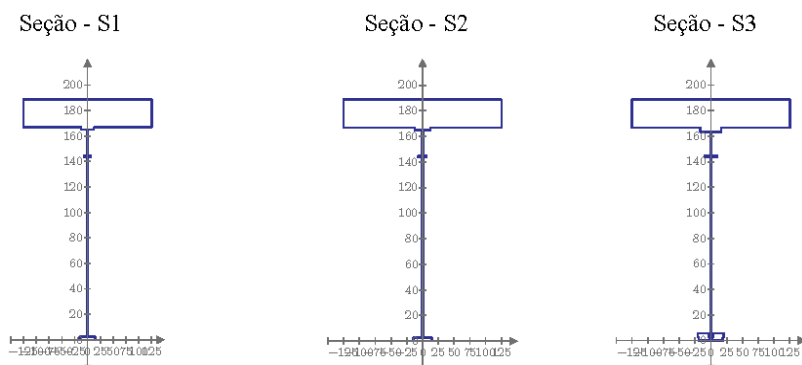
4 - Propriedades do Perfil de Aço



$Prop\_Aço$	"S"	"Aa (m <sup>2</sup> )"	"ycg_u (m)"	"Ia (m <sup>4</sup> )"	"Wao (m <sup>3</sup> )"	"Wau (m <sup>3</sup> )"
1	0.0333	0.7775	0.0127	0.0143	0.0163	
2	0.0333	0.7775	0.0127	0.0143	0.0163	
3	0.0533	0.7115	0.0247	0.0258	0.0347	

5 - Propriedades da Seção Mista

5.1 - Seção Mista

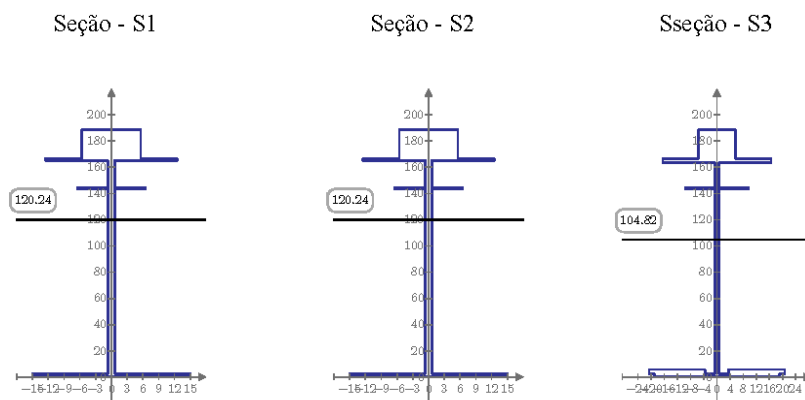


Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

### 5.2 - Propriedades da Seção Mista - Longa Duração

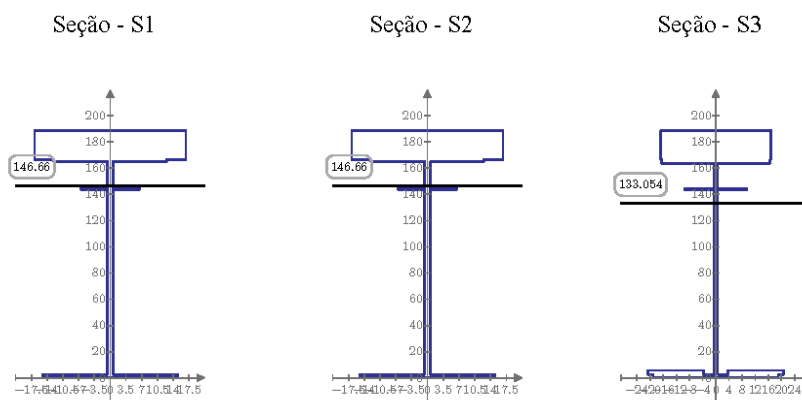
$$n_{LD} := 3 (E_a \div E_{cs}) = 22.356$$



Prop_LD	"S"	"A_LD (m²)"	"ycg_u_LD (m)"	"I_LD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	1	0.0579	1.2024	0.027	0.0393	0.058	0.0224
2	2	0.0579	1.2024	0.027	0.0393	0.058	0.0224
3	3	0.0779	1.0482	0.0439	0.0523	0.0709	0.0419

### 5.3 - Propriedades da Seção Mista - Curta Duração

$$n_{CD} := (E_a \div E_{cs}) = 7.452$$



Prop_CD	"S"	"A_CD (m²)"	"ycg_u_CD (m)"	"I_CD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	1	0.1071	1.4666	0.0359	0.0854	0.1789	0.0245
2	2	0.1071	1.4666	0.0359	0.0854	0.1789	0.0245
3	3	0.1271	1.3305	0.0601	0.108	0.1785	0.0452

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)



PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

## 6 - ESFORÇOS RESISTENTES

### 6.1 - Momento Fletor Resistente do Perfil de aço

$$ELU_{FLX} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 133 & 46 & 141 & \text{"SMC"} & 288 \\ 2 & 133 & 46 & 141 & \text{"SMC"} & 288 \\ 3 & 77 & 46 & 151 & \text{"SMC"} & 776 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLM} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 8 & 10 & 18 & \text{"CMP"} & 499 \\ 2 & 8 & 10 & 18 & \text{"CMP"} & 499 \\ 3 & 5 & 10 & 18 & \text{"CMP"} & 896 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLA} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 140 & 69 & 150 & \text{"SMC"} & 398 \\ 2 & 140 & 69 & 150 & \text{"SMC"} & 398 \\ 3 & 148 & 59 & 150 & \text{"SMC"} & 698 \end{bmatrix}$$

#### 6.1.1 - Verificação dos limites da NBR 8800 (Vigas Esbeltas):

$$VERIF_{H1b} = \begin{bmatrix} \text{"a"} & \text{"b"} & \text{"c"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 6.2 - Esforço Cortante Resistente do Perfil de Aço

$$ELU_{VRM} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"a_max (cm)"} & \text{"VRd (tf)"} \\ 1.00 & 129.12 & 122.64 & 152.75 & 289.66 & 128.57 & 319.35 \\ 2.00 & 129.12 & 94.88 & 118.17 & 289.66 & 128.57 & 225.13 \\ 3.00 & 127.84 & 82.68 & 102.97 & 289.66 & 129.40 & 174.38 \end{bmatrix}$$

### 6.3 - Classificação da Seção Mista

$$CLAS\_SEÇÃO_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_{comp}\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"Verif"} \\ 1.00 & 129.12 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 2.00 & 129.12 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 3.00 & 127.84 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \end{bmatrix}$$

#### 6.3.1 - Mrd - Seção Mista

$$MRd_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1.00 & \text{"SMC"} & 658.97 \\ 2.00 & \text{"SMC"} & 583.49 \\ 3.00 & \text{"SMC"} & 1086.87 \end{bmatrix}$$

#### 6.3.2 - Vrd - Seção Mista

$$V_{Ra_{SM}} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"a_max (cm)"} & \text{"VRd_{SM} (tf)"} \\ 1.00 & 129.12 & 122.64 & 152.75 & 289.66 & 128.57 & 319.35 \\ 2.00 & 129.12 & 94.88 & 118.17 & 289.66 & 128.57 & 225.13 \\ 3.00 & 127.84 & 82.68 & 102.97 & 289.66 & 129.40 & 174.38 \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

## 7 - CONECTORES DE CISALHAMENTO

Critérios conforme a NBR 8800/2008 seção O.4.

- Conectores do tipo pino com cabeça devem possuir comprimento mínimo quatro vezes o diâmetro do conector ( $h_{pc} = 4x\phi$ ).

- Os conectores tipo pino com cabeça não podem ter diâmetro maior que 2.5 vezes a espessura da mesa a qual forem soldadas, a menos que sejam colocados diretamente no eixo da alma do perfil.

- O cobrimento lateral de concreto para qualquer tipo de conector deve ser no mínimo 25mm.

- O espaçamento máximo entre linhas de centro de conectores deve ser igual a 8 vezes a espessura total da laje.

- O espaçamento mínimo entre linhas de centro de conectores do tipo pino com cabeça deve ser igual a 6 $\phi$  diâmetros ao longo do vão da viga. O espaçamento mínimo transversal deve ser de 4 $\phi$  diâmetros.

### 7.1 - Dados Conectores "Stud"

$$S_{ca} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi_{es} \text{ (mm)}\text{"} & \text{"}A_{es} \text{ (cm}^2\text{)}\text{"} & \text{"}nes_{min}\text{"} & \text{"}esp_{long-max} \text{ (cm)}\text{"} & \text{"}esp_{long-min} \text{ (cm)}\text{"} & \text{"}esp_{tran-max} \text{ (cm)}\text{"} \\ 25.00 & 4.91 & 154.00 & 176.00 & 15.00 & 10.00 \end{bmatrix}$$

### 7.2 - Verificação do Fluxo de Cisalhamento e Número de Conectores por trecho:

$$S_{ca_{tr}} = \begin{bmatrix} \text{"}Trecho\text{"} & \text{"}1\text{"} & \text{"}2\text{"} & \text{"}3\text{"} & \text{"}4\text{"} & \text{"}5\text{"} & \text{"}6\text{"} & \text{"}7\text{"} & \text{"}8\text{"} & \text{"}9\text{"} & \text{"}10\text{"} \\ \text{"}Seção\text{"} & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 2 & 1 \\ \text{"}hee \text{ (cm)}\text{"} & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 \\ \text{"}Q \text{ (cm}^3\text{)}\text{"} & 170997 & 170997 & 170997 & 245828 & 245828 & 245828 & 245828 & 170997 & 170997 & 170997 \\ \text{"}I \text{ (cm}^4\text{)}\text{"} & 3594943 & 3594943 & 3594943 & 6014551 & 6014551 & 6014551 & 6014551 & 3594943 & 3594943 & 3594943 \\ \text{"}qd \text{ (tf/m)}\text{"} & 72 & 59 & 46 & 34 & 22 & 22 & 34 & 46 & 59 & 72 \\ \text{"}qk_Q \text{ (tf/m)}\text{"} & 20 & 17 & 14 & 12 & 9 & 9 & 12 & 14 & 17 & 20 \\ \text{"}nes_{trecho}\text{"} & 18 & 15 & 13 & 10 & 8 & 8 & 10 & 13 & 15 & 18 \end{bmatrix}$$

### 7.3 - Número total de Conectores

$$n_{ca_{total}} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi_{es} \text{ (mm)}\text{"} & \text{"}nes_{total}\text{"} \\ 25 & 128 \end{bmatrix}$$

## 8 - FADIGA

A tensão limite da faixa de variações de tensões, para um número infinito de ciclos de solicitação, varia conforme os elementos estruturais. Nenhuma verificação de resistência à fadiga é necessária se a faixa de variação de tensões, analisada em regime elástico, for inferior ao limite estabelecido na NBR 16694/2020 em seu anexo A.

$$S_{fad} = \begin{bmatrix} \text{"}perfil\text{"} & \text{"}\sigma_{fad,VQ} \text{ (MPa)}\text{"} & \text{"}\text{"} & \text{"}\sigma_{fad,MQ} \text{ (MPa)}\text{"} & \text{"}\text{"} \\ 1.00 & 15.06 & \text{"}ok\text{"} & 0.00 & \text{"}ok\text{"} \\ 2.00 & 12.80 & \text{"}ok\text{"} & 4.59 & \text{"}ok\text{"} \\ 3.00 & 10.63 & \text{"}ok\text{"} & 12.20 & \text{"}ok\text{"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

## 9 - VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRABALHO DAS SEÇÕES DE AÇO

---

### 9.1 - Verificação na fase construtiva

$$VERIF_{ctf} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd(tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 319.35 & 0.16 & \text{"ok"} & 0.00 & 288.02 & 0.00 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 225.13 & 0.18 & \text{"ok"} & 134.80 & 288.02 & 0.47 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 174.38 & 0.00 & \text{"ok"} & 374.30 & 698.25 & 0.54 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 9.1 - Verificação na fase de utilização

$$VERIF_{ut} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VSd (tf)} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd(tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 112.10 & 319.35 & 0.35 & \text{"ok"} & 59.36 & 658.97 & 0.09 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 91.90 & 225.13 & 0.41 & \text{"ok"} & 353.81 & 583.49 & 0.61 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 72.30 & 174.38 & 0.41 & \text{"ok"} & 876.72 & 1086.87 & 0.81 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

#### 9.1.1 - Verificação das tensões na fase de utilização para seções semi-compactas

$$\sigma_{SM\_smc} = \begin{bmatrix} \text{"Perf"} & \text{"MSd/Wxo"} & \text{"fed (MPa)} & \text{""} & \text{"MSd/Wxu"} & \text{"fyd (MPa)} & \text{""} & \text{"R"} \\ 1 & 0.662 & 21.429 & \text{"ok"} & 25.968 & 263.636 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 2 & 2.842 & 21.429 & \text{"ok"} & 173.969 & 263.636 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 3 & 5.199 & 21.429 & \text{"ok"} & 219.338 & 263.636 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO

Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

VIGA DE AÇO: VA52 e VA53 - Existentes e Reforçadas

1 - Dados dos Materiais

Aço	$f_y$	$f_u$	$E_a$	$G_a$	$\rho_a$	$esp_{sac}$	$\gamma_{a1}$	$\gamma_{a2}$	$\beta_{vm}$	$\sigma_{a\_fad}$
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	(mm)				(MPa)
"A588"	290	435	200000	77000	7.85	0	1.10	1.35	1	69

Concreto	$f_{ck}$	$\gamma_c$	$\rho_c$	$\alpha_c$	$T_{c,r}$	$\gamma_{retr}$	$\alpha_E$	Aço	$f_{ys}$	$\gamma_s$	$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio $\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaiss $\alpha_E = 0,9$ para calcário $\alpha_E = 0,7$ para arenito
	(MPa)		$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	$\left(\frac{1}{1^\circ C}\right)$	(°C)				(MPa)		
"C30"	30	1.4	2.50	$10^{-5}$	-5	1.2	1.0	"CA50"	500	1.15	

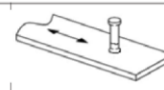
$E_{ca} = 30672.463 \text{ MPa}$       $E_{ca} = 26838.405 \text{ MPa}$

Conector	$\phi_{ca}$	$n_{ca}$	$f_{uce}$	$\gamma_{ce}$	$R_g$	$R_p$	$\sigma_{ca\_fad}$
	(mm)		(MPa)				(MPa)
"Stud"	25	1	415	1.25	1	0.8	69

9.3 Conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça, aplicados por processo automático de solda ou por soldas de filete

69

Ruptura do conector por cisalhamento

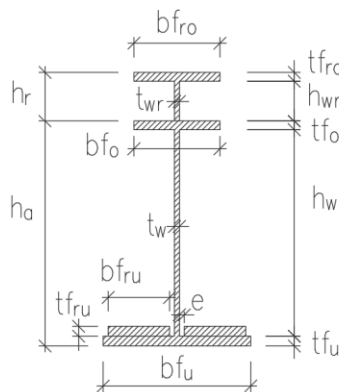


- Rg:  
 1,00 - para qualquer número de conectores conectados em uma linha soldado diretamente no perfil de aço;  
 0,85 - para dois conectores soldados perpendicular ao perfil de aço  
 0,70 - para três ou mais conectores soldados perpendicular ao perfil de aço
- Rp:  
 1,00 - para conectores soldados diretamente no perfil de aço;  
 0,75 - para conectores soldados e embutidos em uma laje mista

2 - Geometria Perfil de aço

S	Trec.	$b_{fu}$	$t_{fu}$	$h_w$	$t_w$	$b_{fo}$	$t_{fo}$	$b_{fru}$	$t_{fru}$	e	$h_{wr}$	$t_{wr}$	$b_{fro}$	$t_{fro}$	$b_{fc}$	$h_{iaje}$	$L_b$	a
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
1	"S1"	300	25	1410	12.5	130	10	0	0	0	204	12.5	250	16	250	22	500	100
2	"S2"	300	25	1410	12.5	130	10	0	0	0	204	12.5	250	16	250	22	500	150
3	"S3"	380	25	1410	12.5	190	10	170	32	30	188	12.5	330	32	250	22	500	200

Seção Transversal



a = distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores adjacentes NBR 8800 - 5.4.3.1

$$h_a := t_{fu} + h_w + t_{fo} = \begin{bmatrix} 1445 \\ 1445 \\ 1445 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_r := h_{wr} + t_{fro} = \begin{bmatrix} 220 \\ 220 \\ 220 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_{at} := h_a + h_r = \begin{bmatrix} 1665 \\ 1665 \\ 1665 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h := h_a + h_r + h_{iaje} = \begin{bmatrix} 1885 \\ 1885 \\ 1885 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

3 - Solicitações Características (Sem majoração)

O programa admite até três seções transversais difentes.

Seção	$M_{g1}$ (tf·m)	$M_{g2}$ (tf·m)	$M_{g3}$ (tf·m)	$M_Q$ (tf·m)	$V_{Sd\_cst}$ (tf)	$M_{Sd\_cst}$ (tf·m)
1	0	0	0	0	51.3	0
2	11.9	97.6	16.3	84.3	41.0	135.7
3	33.2	271	45.3	232.6	0	376.9

Combinações consideradas:

$$V_{Sd\_cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2}$$

$$V_{Sd\_cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2} + \gamma_q * V_Q$$

$$M_{Sd\_cst} = \gamma_g * M_{g1} + \gamma_g * M_{g2}$$

$$M_{Sd} = \gamma_g * (M_{g1} + M_{g2} + M_{g3}) + \gamma_q * M_Q$$

Esforço cortante para verificação do fluxo de cisalhamento horizontal nos conectores:

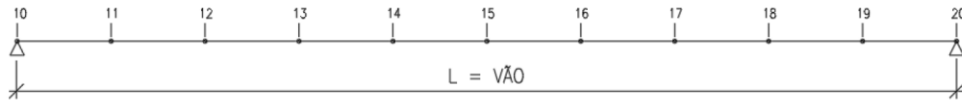
Nó	$P_{ef,V}$	$V_{g1}$ (tf)	$V_{g2}$ (tf)	$V_{g3}$ (tf)	$V_Q$ (tf)	$V_{Sd}$ (tf)
10	1	4.51	36.9	6.18	31.7	111.8
11	2	3.61	29.5	4.94	27.2	92.2
12	2	2.71	22.1	3.71	22.7	72.6
13	3	18.1	14.7	2.47	18.5	53.4
14	3	0.9	7.37	1.24	14.6	34.8
15	3	0	0	0	11.4	17.1

Coefficientes de Majoração dos Esforços - NBR 8681/2004

Fase	$\gamma_{g\_Vg1}$	$\gamma_{g\_Vg2}$	$\gamma_{g\_Vg3}$	$\gamma_{q\_VQ}$	$\gamma_{g\_Mg1}$	$\gamma_{g\_Mg2}$	$\gamma_{g\_Mg3}$	$\gamma_{q\_MQ}$
"Const"	1.15	1.15	0	0	1.15	1.25	0	0
"ELU"	1.35	1.35	1.35	1.5	1.35	1.35	1.35	1.5

$$i_{barra} = \frac{L_{vão}}{div} = 3 \text{ m}$$

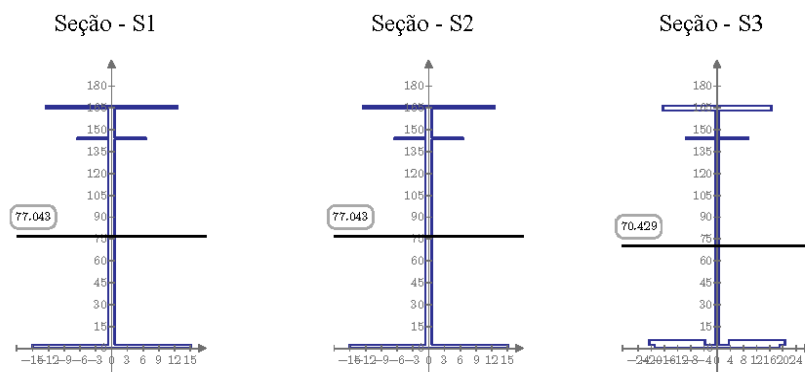
MODELO-NUMERAÇÃO DOS NÓS



Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

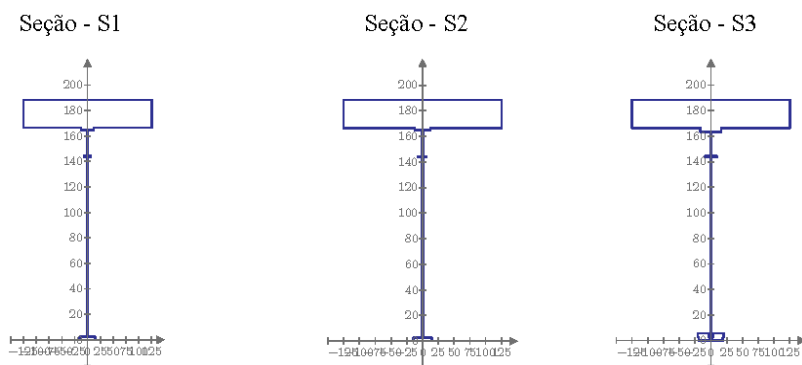
4 - Propriedades do Perfil de Aço



$Prop\_Aço =$	"S"	"Aa (m <sup>2</sup> )"	"ycg_u (m)"	"Ia (m <sup>4</sup> )"	"Wao (m <sup>3</sup> )"	"Wau (m <sup>3</sup> )"
1	0.033	0.7704	0.0125	0.014	0.0163	
2	0.033	0.7704	0.0125	0.014	0.0163	
3	0.0528	0.7043	0.0244	0.0254	0.0346	

5 - Propriedades da Seção Mista

5.1 - Seção Mista



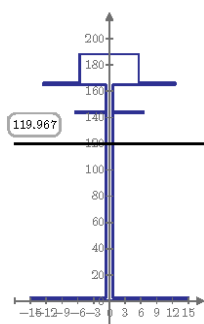
Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

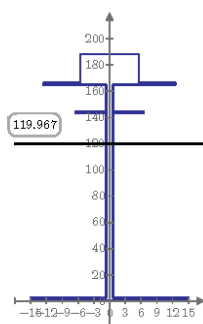
### 5.2 - Propriedades da Seção Mista - Longa Duração

$$n_{LD} := 3 (E_a \div E_{cs}) = 22.356$$

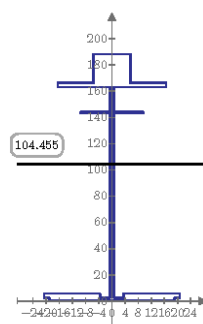
Seção - S1



Seção - S2



Sseção - S3

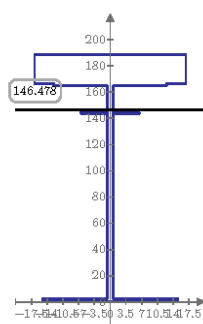


Prop_LD	"S"	"A_LD (m²)"	"ycg_u_LD (m)"	"I_LD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	1	0.0576	1.1997	0.0268	0.0392	0.0577	0.0224
2	2	0.0576	1.1997	0.0268	0.0392	0.0577	0.0224
3	3	0.0774	1.0445	0.0437	0.052	0.0704	0.0418

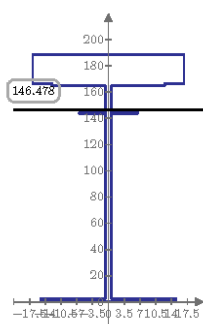
### 5.3 - Propriedades da Seção Mista - Curta Duração

$$n_{CD} := (E_a \div E_{cs}) = 7.452$$

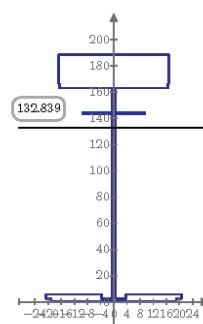
Seção - S1



Seção - S2



Seção - S3



Prop_CD	"S"	"A_CD (m²)"	"ycg_u_CD (m)"	"I_CD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	1	0.1068	1.4648	0.0358	0.0853	0.1789	0.0245
2	2	0.1068	1.4648	0.0358	0.0853	0.1789	0.0245
3	3	0.1266	1.3284	0.06	0.1077	0.1781	0.0451

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

## 6 - ESFORÇOS RESISTENTES

### 6.1 - Momento Fletor Resistente do Perfil de aço

$$ELU_{FLT} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 133 & 46 & 142 & \text{"SMC"} & 285 \\ 2 & 133 & 46 & 142 & \text{"SMC"} & 285 \\ 3 & 77 & 46 & 152 & \text{"SMC"} & 766 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLM} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 8 & 10 & 18 & \text{"CMP"} & 492 \\ 2 & 8 & 10 & 18 & \text{"CMP"} & 492 \\ 3 & 5 & 10 & 18 & \text{"CMP"} & 883 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLA} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 141 & 67 & 150 & \text{"SMC"} & 389 \\ 2 & 141 & 67 & 150 & \text{"SMC"} & 389 \\ 3 & 149 & 58 & 150 & \text{"SMC"} & 684 \end{bmatrix}$$

#### 6.1.1 - Verificação dos limites da NBR 8800 (Vigas Esbeltas):

$$VERIF_{H1b} = \begin{bmatrix} \text{"a"} & \text{"b"} & \text{"c"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 6.2 - Esforço Cortante Resistente do Perfil de Aço

$$ELU_{VRM} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"a_max (cm)"} & \text{"VRd (tf)"} \\ 1.00 & 129.12 & 122.64 & 152.75 & 289.66 & 128.57 & 318.87 \\ 2.00 & 129.12 & 94.88 & 118.17 & 289.66 & 128.57 & 224.80 \\ 3.00 & 127.84 & 82.68 & 102.97 & 289.66 & 129.40 & 174.12 \end{bmatrix}$$

### 6.3 - Classificação da Seção Mista

$$CLAS\_SEÇÃO_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_{comp}\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"Verif"} \\ 1.00 & 129.12 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 2.00 & 129.12 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 3.00 & 127.84 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \end{bmatrix}$$

#### 6.3.1 - Mrd - Seção Mista

$$MRd_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1.00 & \text{"SMC"} & 657.59 \\ 2.00 & \text{"SMC"} & 581.06 \\ 3.00 & \text{"SMC"} & 1083.41 \end{bmatrix}$$

#### 6.3.2 - Vrd - Seção Mista

$$V_{Ra_{SM}} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"a_max (cm)"} & \text{"VRd_{SM} (tf)"} \\ 1.00 & 129.12 & 122.64 & 152.75 & 289.66 & 128.57 & 318.87 \\ 2.00 & 129.12 & 94.88 & 118.17 & 289.66 & 128.57 & 224.80 \\ 3.00 & 127.84 & 82.68 & 102.97 & 289.66 & 129.40 & 174.12 \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)



PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

## 7 - CONECTORES DE CISALHAMENTO

Critérios conforme a NBR 8800/2008 seção O.4.

- Conectores do tipo pino com cabeça devem possuir comprimento mínimo quatro vezes o diâmetro do conector ( $h_{pc} = 4x\phi$ ).

- Os conectores tipo pino com cabeça não podem ter diâmetro maior que 2.5 vezes a espessura da mesa a qual forem soldadas, a menos que sejam colocados diretamente no eixo da alma do perfil.

- O cobrimento lateral de concreto para qualquer tipo de conector deve ser no mínimo 25mm.

- O espaçamento máximo entre linhas de centro de conectores deve ser igual a 8 vezes a espessura total da laje.

- O espaçamento mínimo entre linhas de centro de conectores do tipo pino com cabeça deve ser igual a 6 $\phi$  diâmetros ao longo do vão da viga. O espaçamento mínimo transversal deve ser de 4 $\phi$  diâmetros.

### 7.1 - Dados Conectores "Stud"

$$S_{ca} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi_{es} \text{ (mm)}\text{"} & \text{"}A_{es} \text{ (cm}^2\text{)}\text{"} & \text{"}nes_{min}\text{"} & \text{"}esp_{long-max} \text{ (cm)}\text{"} & \text{"}esp_{long-min} \text{ (cm)}\text{"} & \text{"}esp_{tran-max} \text{ (cm)}\text{"} \\ 25.00 & 4.91 & 154.00 & 176.00 & 15.00 & 10.00 \end{bmatrix}$$

### 7.2 - Verificação do Fluxo de Cisalhamento e Número de Conectores por trecho:

$$S_{ca_{tr}} = \begin{bmatrix} \text{"}Trecho\text{"} & \text{"}1\text{"} & \text{"}2\text{"} & \text{"}3\text{"} & \text{"}4\text{"} & \text{"}5\text{"} & \text{"}6\text{"} & \text{"}7\text{"} & \text{"}8\text{"} & \text{"}9\text{"} & \text{"}10\text{"} \\ \text{"}Seção\text{"} & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 2 & 1 \\ \text{"}hee \text{ (cm)}\text{"} & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 \\ \text{"}Q \text{ (cm}^3\text{)}\text{"} & 170623 & 170623 & 170623 & 245633 & 245633 & 245633 & 245633 & 170623 & 170623 & 170623 \\ \text{"}I \text{ (cm}^4\text{)}\text{"} & 3582980 & 3582980 & 3582980 & 5995474 & 5995474 & 5995474 & 5995474 & 3582980 & 3582980 & 3582980 \\ \text{"}qd \text{ (tf/m)}\text{"} & 71 & 59 & 46 & 34 & 22 & 22 & 34 & 46 & 59 & 71 \\ \text{"}qk_Q \text{ (tf/m)}\text{"} & 20 & 17 & 15 & 12 & 9 & 9 & 12 & 15 & 17 & 20 \\ \text{"}nes_{trecho}\text{"} & 18 & 15 & 13 & 10 & 8 & 8 & 10 & 13 & 15 & 18 \end{bmatrix}$$

### 7.3 - Número total de Conectores

$$n_{ca_{total}} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi_{es} \text{ (mm)}\text{"} & \text{"}nes_{total}\text{"} \\ 25 & 127 \end{bmatrix}$$

## 8 - FADIGA

A tensão limite da faixa de variações de tensões, para um número infinito de ciclos de solicitação, varia conforme os elementos estruturais. Nenhuma verificação de resistência à fadiga é necessária se a faixa de variação de tensões, analisada em regime elástico, for inferior ao limite estabelecido na NBR 16694/2020 em seu anexo A.

$$S_{fad} = \begin{bmatrix} \text{"}perfil\text{"} & \text{"}\sigma_{fad,VQ} \text{ (MPa)}\text{"} & \text{"}\text{"} & \text{"}\sigma_{fad,MQ} \text{ (MPa)}\text{"} & \text{"}\text{"} \\ 1.00 & 14.94 & \text{"}ok\text{"} & 0.00 & \text{"}ok\text{"} \\ 2.00 & 12.82 & \text{"}ok\text{"} & 4.62 & \text{"}ok\text{"} \\ 3.00 & 10.70 & \text{"}ok\text{"} & 12.81 & \text{"}ok\text{"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

## 9 - VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRABALHO DAS SEÇÕES DE AÇO

---

### 9.1 - Verificação na fase construtiva

$$VERIF_{ctf} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd(tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 318.87 & 0.16 & \text{"ok"} & 0.00 & 285.25 & 0.00 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 224.80 & 0.18 & \text{"ok"} & 135.70 & 285.25 & 0.48 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 174.12 & 0.00 & \text{"ok"} & 376.90 & 684.20 & 0.55 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 9.1 - Verificação na fase de utilização

$$VERIF_{ut} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VSd (tf)} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd(tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 111.80 & 318.87 & 0.35 & \text{"ok"} & 59.38 & 657.59 & 0.09 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 92.20 & 224.80 & 0.41 & \text{"ok"} & 355.66 & 581.06 & 0.61 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 72.60 & 174.12 & 0.42 & \text{"ok"} & 896.12 & 1083.41 & 0.83 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

#### 9.1.1 - Verificação das tensões na fase de utilização para seções semi-compactas

$$\sigma_{SM\_smc} = \begin{bmatrix} \text{"Perf"} & \text{"MSd/Wxo"} & \text{"fed (MPa)} & \text{""} & \text{"MSd/Wxu"} & \text{"fyd (MPa)} & \text{""} & \text{"R"} \\ 1 & 0.665 & 21.429 & \text{"ok"} & 26.02 & 263.636 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 2 & 2.863 & 21.429 & \text{"ok"} & 175.484 & 263.636 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 3 & 5.414 & 21.429 & \text{"ok"} & 224.229 & 263.636 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO

Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

VIGA DE AÇO: VA61

1 - Dados dos Materiais

Aço	$f_y$	$f_u$	$E_a$	$G_a$	$\rho_a$	$esp_{sac}$	$\gamma_{a1}$	$\gamma_{a2}$	$\beta_{vm}$	$\sigma_{a\_fad}$
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	(mm)				(MPa)

"A588"	290	435	200000	77000	7.85	0	1.10	1.35	1	69
--------	-----	-----	--------	-------	------	---	------	------	---	----

Concreto	$f_{ck}$	$\gamma_c$	$\rho_c$	$\alpha_c$	$T_{c,r}$	$\gamma_{retr}$	$\alpha_E$	Aço	$f_{ys}$	$\gamma_s$	$\alpha_E$
	(MPa)		$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	$\left(\frac{1}{1\ ^\circ C}\right)$	(°C)				(MPa)		

"C30"	30	1.4	2.50	$10^{-5}$	-5	1.2	1.0	"CA50"	500	1.15	
-------	----	-----	------	-----------	----	-----	-----	--------	-----	------	--

$\alpha_E = 1,2$  para basalto e diabásio  
 $\alpha_E = 1,0$  para granito e gnaiss  
 $\alpha_E = 0,9$  para calcário  
 $\alpha_E = 0,7$  para arenito

$E_{ca} = 30672.46\ MPa$        $E_{ca} = 26838.41\ MPa$

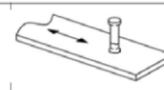
Conector	$\phi_{ca}$	$n_{ca}$	$f_{uce}$	$\gamma_{ce}$	$R_g$	$R_p$	$\sigma_{ca\_fad}$
	(mm)		(MPa)				(MPa)

"Stud"	25	1	415	1.25	1	0.8	69
--------	----	---	-----	------	---	-----	----

9.3 Conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça, aplicados por processo automático de solda ou por soldas de filete

69

Ruptura do conector por cisalhamento



Rg:

1,00 - para qualquer número de conectores conectados em uma linha soldado diretamente no perfil de aço;  
 0,85 - para dois conectores soldados perpendicular ao perfil de aço

Rp:

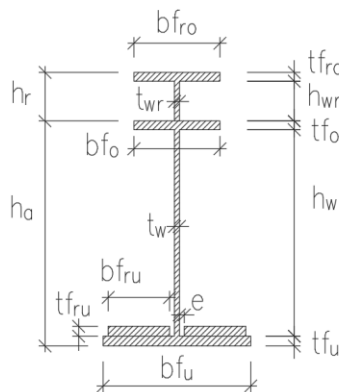
0,70 - para três ou mais conectores soldados perpendicular ao perfil de aço;  
 1,00 - para conectores soldados diretamente no perfil de aço;  
 0,75 - para conectores soldados e embutidos em uma laje mista

2 - Geometria Perfil de aço

S	Trec.	$b_{fu}$	$t_{fu}$	$h_w$	$t_w$	$b_{fo}$	$t_{fo}$	$b_{fru}$	$t_{fru}$	e	$h_{wr}$	$t_{wr}$	$b_{fro}$	$t_{fro}$	$b_{fc}$	$h_{iaje}$	$L_b$	a
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)

1	"S1"	400	22	1282	12.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	207	22	500	100
2	"S2"	400	22	1282	12.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	207	22	500	150
3	"S3"	400	35	1282	9.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	207	22	500	200

Seção Transversal



a = distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores adjacentes NBR 8800 - 5.4.3.1

$$h_a := t_{fu} + h_w + t_{fo} = \begin{bmatrix} 1320 \\ 1333 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_r := h_{wr} + t_{fro} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_{at} := h_a + h_r = \begin{bmatrix} 1320 \\ 1320 \\ 1333 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h := h_a + h_r + h_{iaje} = \begin{bmatrix} 1540 \\ 1540 \\ 1553 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

### 3 - Solicitações Características (Sem majoração)

O programa admite até três seções transversais difentes.

Seção	$M_{g1}$ (tf·m)	$M_{g2}$ (tf·m)	$M_{g3}$ (tf·m)	$M_Q$ (tf·m)	$V_{Sd,cst}$ (tf)	$M_{Sd,cst}$ (tf·m)
1	0.00	0.00	0	0.00	19.3	0.00
2	5.61	26.5	19.2	80.2	15.4	36.9
3	15.5	73.4	49.2	220.5	0	109.6

Combinações consideradas:

$$V_{Sd,cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2}$$

$$V_{Sd,cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2} + \gamma_q * V_Q$$

$$M_{Sd,cst} = \gamma_g * M_{g1} + \gamma_g * M_{g2}$$

$$M_{Sd} = \gamma_g * (M_{g1} + M_{g2} + M_{g3}) + \gamma_q * M_Q$$

Esforço cortante para verificação do fluxo de cisalhamento horizontal nos conectores:

Nó	$P_{ef,V}$	$V_{g1}$ (tf)	$V_{g2}$ (tf)	$V_{g3}$ (tf)	$V_Q$ (tf)	$V_{Sd}$ (tf)
10	1	2.74	12.9	9.49	39.3	92.9
11	2	2.19	10.3	7.42	33.6	77.3
12	3	1.64	7.74	5.36	28.2	62.2
13	3	1.09	5.14	3.3	22.7	46.9
14	3	0.54	2.55	1.23	18.1	33.0
15	3	0	0	0	13.9	19.7

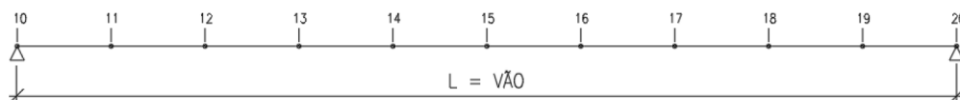
Coefficientes de Majoração dos Esforços - NBR 8681/2004

Fase	$\gamma_{g,Vg1}$	$\gamma_{g,Vg2}$	$\gamma_{g,Vg3}$	$\gamma_{q,VQ}$	$\gamma_{g,Mg1}$	$\gamma_{g,Mg2}$	$\gamma_{g,Mg3}$	$\gamma_{q,MQ}$
"Const"	1.15	1.15	0	0	1.15	1.25	0	0
"ELU"	1.35	1.35	1.35	1.5	1.35	1.35	1.35	1.5

$L_{vão}$  div

$$\frac{(m)}{23.00} \cdot 10 \quad i_{barra} = \frac{L_{vão}}{div} = 2.3 \text{ m}$$

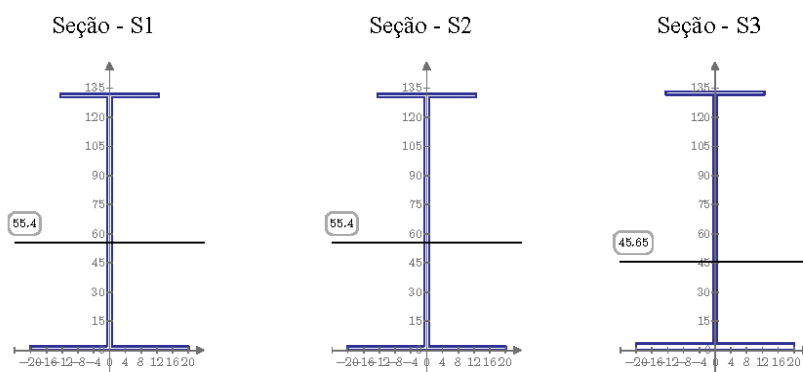
MODELO-NUMERAÇÃO DOS NÓS



Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

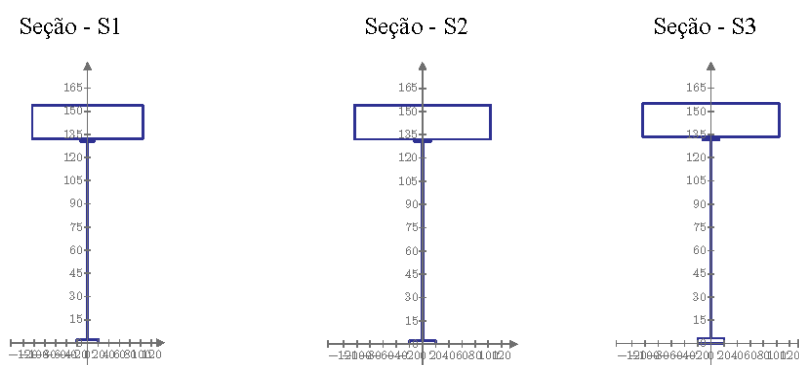
4 - Propriedades do Perfil de Aço



$Prop\_Aço$	"S"	"Aa (m <sup>2</sup> )"	"ycg_u (m)"	"Ia (m <sup>4</sup> )"	"Wao (m <sup>3</sup> )"	"Wau (m <sup>3</sup> )"
1	0.0288	0.554	0.0073	0.0095	0.0131	
2	0.0288	0.554	0.0073	0.0095	0.0131	
3	0.0302	0.4565	0.008	0.0091	0.0175	

5 - Propriedades da Seção Mista

5.1 - Seção Mista



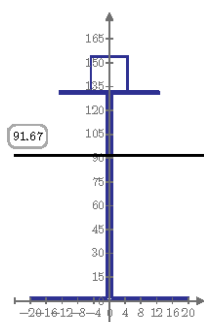
Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

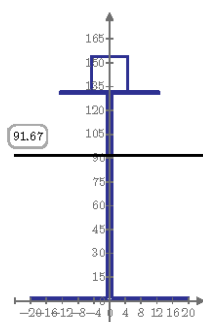
### 5.2 - Propriedades da Seção Mista - Longa Duração

$$n_{LD} := 3 (E_a \div E_{cs}) = 22.356$$

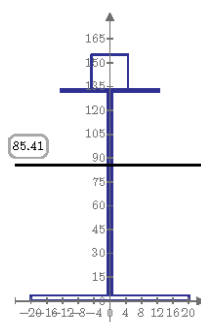
Seção - S1



Seção - S2



Seção - S3

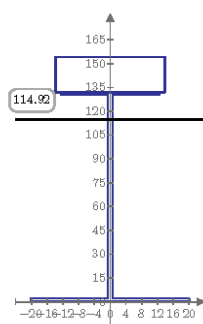


Prop_LD	"S"	"A_LD (m²)"	"ycg_u_LD (m)"	"I_LD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.0492	0.9167	0.0165	0.0265	0.041	0.018	
2	0.0492	0.9167	0.0165	0.0265	0.041	0.018	
3	0.0505	0.8541	0.0199	0.0285	0.0415	0.0233	

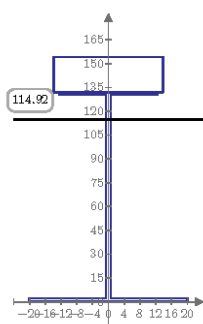
### 5.3 - Propriedades da Seção Mista - Curta Duração

$$n_{CD} := (E_a \div E_{cs}) = 7.45$$

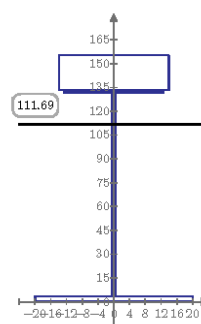
Seção - S1



Seção - S2



Seção - S3



Prop_CD	"S"	"A_CD (m²)"	"ycg_u_CD (m)"	"I_CD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.0899	1.1492	0.0226	0.0577	0.1321	0.0196	
2	0.0899	1.1492	0.0226	0.0577	0.1321	0.0196	
3	0.0913	1.1169	0.0279	0.0639	0.129	0.025	

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

## 6 - ESFORÇOS RESISTENTES

### 6.1 - Momento Fletor Resistente do Perfil de aço

$$ELU_{FFI} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_p"} & \text{"\lambda_r"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)} \\ 1 & 126 & 46 & 146 & \text{"SMC"} & 213 \\ 2 & 126 & 46 & 146 & \text{"SMC"} & 213 \\ 3 & 90 & 29 & 99 & \text{"SMC"} & 177 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLM} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_p"} & \text{"\lambda_r"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)} \\ 1 & 8 & 10 & 19 & \text{"CMP"} & 350 \\ 2 & 8 & 10 & 19 & \text{"CMP"} & 350 \\ 3 & 8 & 10 & 18 & \text{"CMP"} & 240 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLA} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_p"} & \text{"\lambda_r"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)} \\ 1 & 120 & 56 & 150 & \text{"SMC"} & 285 \\ 2 & 120 & 56 & 150 & \text{"SMC"} & 285 \\ 3 & 181 & 41 & 150 & \text{"ESB"} & 367 \end{bmatrix}$$

#### 6.1.1 - Verificação dos limites da NBR 8800 (Vigas Esbeltas):

$$VERIF_{H13} = \begin{bmatrix} \text{"a"} & \text{"b"} & \text{"c"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 6.2 - Esforço Cortante Resistente do Perfil de Aço

$$ELU_{VRd} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_p"} & \text{"\lambda_r"} & \text{"\lambda_{max}} & \text{"a_{max} (cm)} & \text{"VRd (tf)} \\ 1.00 & 102.56 & 105.02 & 130.80 & 289.66 & 162.13 & 266.15 \\ 2.00 & 102.56 & 84.97 & 105.83 & 289.66 & 162.13 & 220.50 \\ 3.00 & 134.95 & 76.73 & 95.56 & 289.66 & 95.19 & 81.88 \end{bmatrix}$$

### 6.3 - Classificação da Seção Mista

$$CLAS\_SEÇÃO_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_{comp}} & \text{"\lambda_{max}} & \text{"Verif"} \\ 1.00 & 102.56 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 2.00 & 102.56 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 3.00 & 134.95 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \end{bmatrix}$$

#### 6.3.1 - Mrd - Seção Mista

$$MRd_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)} \\ 1.00 & \text{"SMC"} & 527.61 \\ 2.00 & \text{"SMC"} & 503.89 \\ 3.00 & \text{"SMC"} & 614.68 \end{bmatrix}$$

#### 6.3.2 - Vrd - Seção Mista

$$V_{Ra_{SM}} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"\lambda"} & \text{"\lambda_p"} & \text{"\lambda_r"} & \text{"\lambda_{max}} & \text{"a_{max} (cm)} & \text{"VRd_{SM} (tf)} \\ 1.00 & 102.56 & 105.02 & 130.80 & 289.66 & 162.13 & 266.15 \\ 2.00 & 102.56 & 84.97 & 105.83 & 289.66 & 162.13 & 220.50 \\ 3.00 & 134.95 & 76.73 & 95.56 & 289.66 & 95.19 & 81.88 \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

## 7 - CONECTORES DE CISALHAMENTO

Critérios conforme a NBR 8800/2008 seção O.4.

- Conectores do tipo pino com cabeça devem possuir comprimento mínimo quatro vezes o diâmetro do conector ( $h_{pc} = 4x\phi$ ).

- Os conectores tipo pino com cabeça não podem ter diâmetro maior que 2.5 vezes a espessura da mesa a qual forem soldadas, a menos que sejam colocados diretamente no eixo da alma do perfil.

- O cobrimento lateral de concreto para qualquer tipo de conector deve ser no mínimo 25mm.

- O espaçamento máximo entre linhas de centro de conectores deve ser igual a 8 vezes a espessura total da laje.

- O espaçamento mínimo entre linhas de centro de conectores do tipo pino com cabeça deve ser igual a 6 $\phi$  diâmetros ao longo do vão da viga. O espaçamento mínimo transversal deve ser de 4 $\phi$  diâmetros.

### 7.1 - Dados Conectores "Stud"

$$S_{ca} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi_{es} \text{ (mm)}\text{"} & \text{"}A_{es} \text{ (cm}^2\text{)}\text{"} & \text{"}nes_{min}\text{"} & \text{"}esp_{long-max} \text{ (cm)}\text{"} & \text{"}esp_{long-min} \text{ (cm)}\text{"} & \text{"}esp_{tran-max} \text{ (cm)}\text{"} \\ 25.00 & 4.91 & 123.00 & 176.00 & 15.00 & 10.00 \end{bmatrix}$$

### 7.2 - Verificação do Fluxo de Cisalhamento e Número de Conectores por trecho:

$$S_{ca_{tr}} = \begin{bmatrix} \text{"}Trecho\text{"} & \text{"}1\text{"} & \text{"}2\text{"} & \text{"}3\text{"} & \text{"}4\text{"} & \text{"}5\text{"} & \text{"}6\text{"} & \text{"}7\text{"} & \text{"}8\text{"} & \text{"}9\text{"} & \text{"}10\text{"} \\ \text{"}Seção\text{"} & 1 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 1 \\ \text{"}hee \text{ (cm)}\text{"} & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 \\ \text{"}Q \text{ (cm}^3\text{)}\text{"} & 127858 & 127858 & 148509 & 148509 & 148509 & 148509 & 148509 & 148509 & 127858 & 127858 \\ \text{"}I \text{ (cm}^4\text{)}\text{"} & 2255480 & 2255480 & 2787692 & 2787692 & 2787692 & 2787692 & 2787692 & 2787692 & 2255480 & 2255480 \\ \text{"}qd \text{ (tf/m)}\text{"} & 71 & 59 & 47 & 36 & 25 & 25 & 36 & 47 & 59 & 71 \\ \text{"}qk_Q \text{ (tf/m)}\text{"} & 30 & 26 & 21 & 17 & 14 & 14 & 17 & 21 & 26 & 30 \\ \text{"}nes_{trecho}\text{"} & 20 & 17 & 14 & 11 & 9 & 9 & 11 & 14 & 17 & 20 \end{bmatrix}$$

### 7.3 - Número total de Conectores

$$n_{ca_{total}} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi_{es} \text{ (mm)}\text{"} & \text{"}nes_{total}\text{"} \\ 25 & 144 \end{bmatrix}$$

## 8 - FADIGA

A tensão limite da faixa de variações de tensões, para um número infinito de ciclos de solicitação, varia conforme os elementos estruturais. Nenhuma verificação de resistência à fadiga é necessária se a faixa de variação de tensões, analisada em regime elástico, for inferior ao limite estabelecido na NBR 16694/2020 em seu anexo A.

$$S_{fad} = \begin{bmatrix} \text{"}perfil\text{"} & \text{"}\sigma_{fad,VQ} \text{ (MPa)}\text{"} & \text{"}\text{"} & \text{"}\sigma_{fad,MQ} \text{ (MPa)}\text{"} & \text{"}\text{"} \\ 1 & 23.36 & \text{"}ok\text{"} & 0 & \text{"}ok\text{"} \\ 2 & 19.97 & \text{"}ok\text{"} & 5.95 & \text{"}ok\text{"} \\ 3 & 21.84 & \text{"}ok\text{"} & 16.76 & \text{"}ok\text{"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)



## 9 - VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRABALHO DAS SEÇÕES DE AÇO

### 9.1 - Verificação na fase construtiva

$VERIF_{ct}$	"Seção"	"VRd (tf)"	"VRd/VSd"	"RV"	"MSd(tfm)"	"MRd (tfm)"	"MSd/MRd"	"RM"
	1.00	266.15	0.07	"ok"	0.00	212.61	0.00	"ok"
	2.00	220.50	0.07	"ok"	36.90	212.61	0.17	"ok"
	3.00	81.88	0.00	"ok"	109.60	176.76	0.62	"ok"

### 9.1 - Verificação na fase de utilização

$VERIF_{ut}$	"Seção"	"VSd (tf)"	"VRd (tf)"	"VRd/VSd"	"RV"	"MSd(tfm)"	"MRd (tfm)"	"MSd/MRd"	"RM"
	1.00	92.90	266.15	0.35	"ok"	43.86	527.61	0.08	"ok"
	2.00	77.30	220.50	0.35	"ok"	233.43	503.89	0.46	"ok"
	3.00	62.20	81.88	0.76	"ok"	567.52	614.68	0.92	"ok"

#### 9.1.1 - Verificação das tensões na fase de utilização para seções semi-compactas

$\sigma_{SM\_smc}$	"Perf"	"MSd/Wxo"	"fed (MPa)"	"σ"	"MSd/Wxu"	"fyd (MPa)"	"σ"	"R"
	1	0.73	21.43	"ok"	23.87	263.64	"ok"	"OK"
	2	3.9	21.43	"ok"	130.45	263.64	"ok"	"OK"
	3	8.61	21.43	"ok"	246.53	263.64	"ok"	"OK"

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO

Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

VIGA DE AÇO: VA62 e VA63 - Existentes e Reforçadas

1 - Dados dos Materiais

Aço	$f_y$	$f_u$	$E_a$	$G_a$	$\rho_a$	$esp_{sac}$	$\gamma_{a1}$	$\gamma_{a2}$	$\beta_{vm}$	$\sigma_{a\_fad}$
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	(mm)				(MPa)

"A588"	290	435	200000	77000	7.85	0	1.10	1.35	1	69
--------	-----	-----	--------	-------	------	---	------	------	---	----

Concreto	$f_{ck}$	$\gamma_c$	$\rho_c$	$\alpha_c$	$T_{c,r}$	$\gamma_{retr}$	$\alpha_E$	Aço	$f_{ys}$	$\gamma_s$	$\alpha_E$
	(MPa)		$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	$\left(\frac{1}{1^\circ C}\right)$	(°C)				(MPa)		

"C30"	30	1.4	2.50	$10^{-5}$	-5	1.2	1.0	"CA50"	500	1.15	
-------	----	-----	------	-----------	----	-----	-----	--------	-----	------	--

$\alpha_E = 1,2$  para basalto e diabásio  
 $\alpha_E = 1,0$  para granito e gnaiss  
 $\alpha_E = 0,9$  para calcário  
 $\alpha_E = 0,7$  para arenito

$E_{ca} = 30672.463 \text{ MPa}$       $E_{ca} = 26838.405 \text{ MPa}$

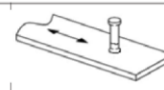
Conector	$\phi_{ca}$	$n_{ca}$	$f_{uce}$	$\gamma_{ce}$	$R_g$	$R_p$	$\sigma_{ca\_fad}$
	(mm)		(MPa)				(MPa)

"Stud"	25	1	415	1.25	1	0.8	69
--------	----	---	-----	------	---	-----	----

9.3 Conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça, aplicados por processo automático de solda ou por soldas de filete

69

Ruptura do conector por cisalhamento



Rg:

1,00 - para qualquer número de conectores conectados em uma linha soldado diretamente no perfil de aço;  
 0,85 - para dois conectores soldados perpendicular ao perfil de aço

Rp:

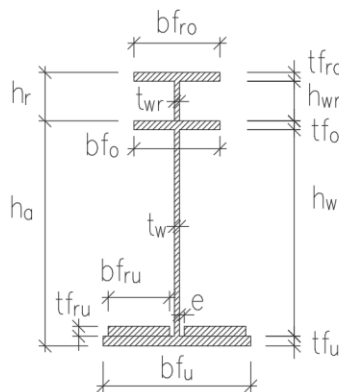
0,70 - para três ou mais conectores soldados perpendicular ao perfil de aço;  
 1,00 - para conectores soldados diretamente no perfil de aço;  
 0,75 - para conectores soldados e embutidos em uma laje mista

2 - Geometria Perfil de aço

S	Trec.	$b_{fu}$	$t_{fu}$	$h_w$	$t_w$	$b_{fo}$	$t_{fo}$	$b_{fru}$	$t_{fru}$	e	$h_{wr}$	$t_{wr}$	$b_{fro}$	$t_{fro}$	$b_{fc}$	$h_{iaje}$	$L_b$	a
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)

1	"S1"	250	25	1065	12.5	130	10	0	0	0	204	12.5	250	16	250	22	500	100
2	"S2"	250	25	1065	12.5	130	10	0	0	0	204	12.5	250	16	250	22	500	150
3	"S3"	380	25	1065	12.5	190	10	110	16	30	204	12.5	250	16	250	22	500	200

Seção Transversal



a = distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores adjacentes NBR 8800 - 5.4.3.1

$$h_a := t_{fu} + h_w + t_{fo} = \begin{bmatrix} 1100 \\ 1100 \\ 1100 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_r := h_{wr} + t_{fro} = \begin{bmatrix} 220 \\ 220 \\ 220 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_{at} := h_a + h_r = \begin{bmatrix} 1320 \\ 1320 \\ 1320 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h := h_a + h_r + h_{iaje} = \begin{bmatrix} 1540 \\ 1540 \\ 1540 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

3 - Solicitações Características (Sem majoração)

O programa admite até três seções transversais difentes.

Seção	$M_{g1}$ (tf·m)	$M_{g2}$ (tf·m)	$M_{g3}$ (tf·m)	$M_Q$ (tf·m)	$V_{Sd,cst}$ (tf)	$M_{Sd,cst}$ (tf·m)
1	0	0	0	0	38.8	0
2	5.68	58.4	7.8	57	31.0	79.5
3	15.7	161.6	18.3	156.8	0	220.1

Combinações consideradas:

$$V_{Sd,cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2}$$

$$V_{Sd,cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2} + \gamma_q * V_Q$$

$$M_{Sd,cst} = \gamma_g * M_{g1} + \gamma_g * M_{g2}$$

$$M_{Sd} = \gamma_g * (M_{g1} + M_{g2} + M_{g3}) + \gamma_q * M_Q$$

Esforço cortante para verificação do fluxo de cisalhamento horizontal nos conectores:

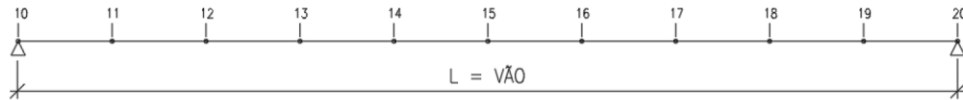
Nó	$P_{ef,V}$	$V_{g1}$ (tf)	$V_{g2}$ (tf)	$V_{g3}$ (tf)	$V_Q$ (tf)	$V_{Sd}$ (tf)
10	1	2.71	2.85	5.65	28	89.4
11	2	2.21	2.28	4.69	23.9	73.6
12	2	1.66	1.70	3.73	20.2	58.2
13	3	1.1	1.13	2.77	16.3	42.6
14	3	0.55	5.61	1.82	13	28
15	3	0	0	0	10	13.7

Coefficientes de Majoração dos Esforços - NBR 8681/2004

Fase	$\gamma_{g,Vg1}$	$\gamma_{g,Vg2}$	$\gamma_{g,Vg3}$	$\gamma_{q,VQ}$	$\gamma_{g,Mg1}$	$\gamma_{g,Mg2}$	$\gamma_{g,Mg3}$	$\gamma_{q,MQ}$
"Const"	1.15	1.15	0	0	1.15	1.25	0	0
"ELU"	1.35	1.35	1.35	1.5	1.35	1.35	1.35	1.5

$$i_{barra} = \frac{L_{vão}}{div} = 2.3 \text{ m}$$

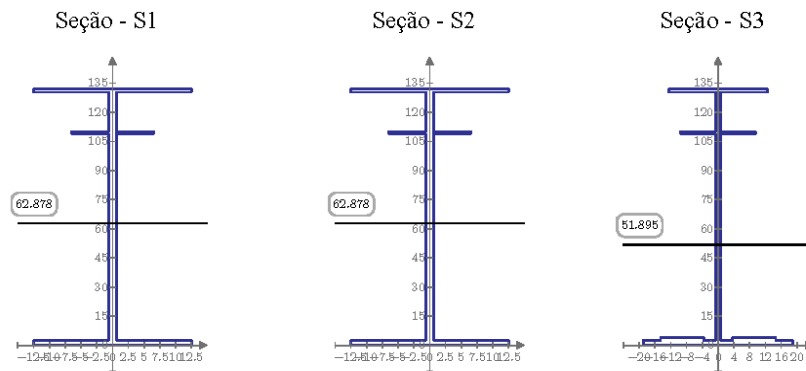
MODELO-NUMERAÇÃO DOS NÓS



Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

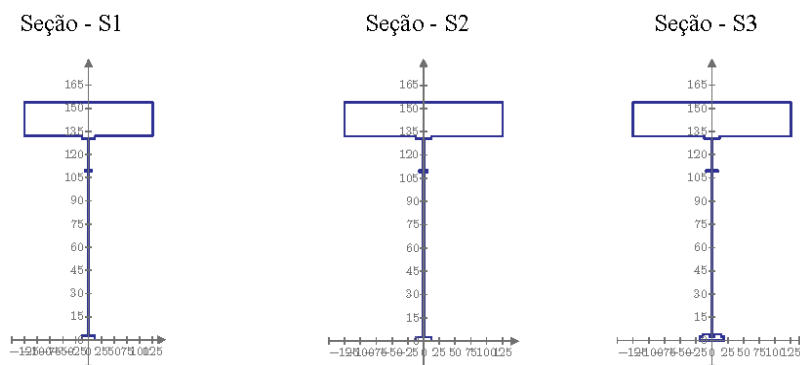
4 - Propriedades do Perfil de Aço



Prop_Aço =	"S"	"Aa (m²)"	"ycg_u (m)"	"Ia (m⁴)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.0274	0.6288	0.0067	0.0097	0.0107	
2	0.0274	0.6288	0.0067	0.0097	0.0107	
3	0.0348	0.5189	0.0089	0.0111	0.0171	

5 - Propriedades da Seção Mista

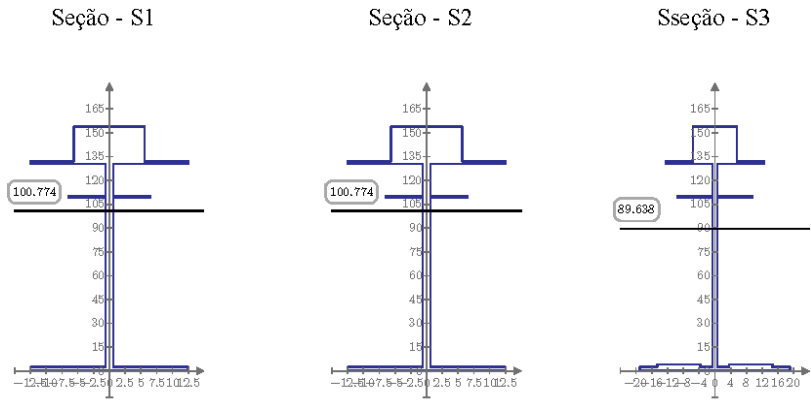
5.1 - Seção Mista



Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

5.2 - Propriedades da Seção Mista - Longa Duração

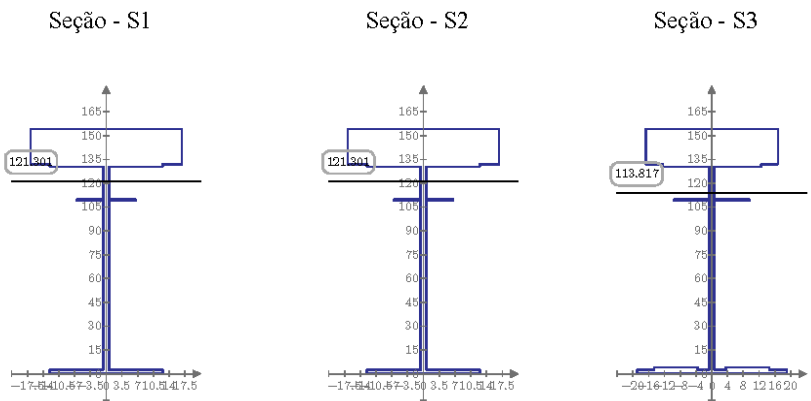
$$n_{LD} := 3 (E_a \div E_{cs}) = 22.356$$



Prop_LD	"S"	"A_LD (m²)"	"ycg_u_LD (m)"	"I_LD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.052	1.0077	0.0151	0.0284	0.0484	0.015	
2	0.052	1.0077	0.0151	0.0284	0.0484	0.015	
3	0.0594	0.8964	0.021	0.0326	0.0495	0.0234	

5.3 - Propriedades da Seção Mista - Curta Duração

$$n_{CD} := (E_a \div E_{cs}) = 7.452$$



Prop_CD	"S"	"A_CD (m²)"	"ycg_u_CD (m)"	"I_CD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.1012	1.213	0.0198	0.0606	0.1853	0.0163	
2	0.1012	1.213	0.0198	0.0606	0.1853	0.0163	
3	0.1086	1.1382	0.0288	0.0717	0.1585	0.0253	

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

6 - ESFORÇOS RESISTENTES

6.1 - Momento Fletor Resistente do Perfil de aço

$$ELU_{FLX} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 122 & 46 & 139 & \text{"SMC"} & 209 \\ 2 & 122 & 46 & 139 & \text{"SMC"} & 209 \\ 3 & 121 & 46 & 143 & \text{"SMC"} & 258 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLM} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 8 & 10 & 19 & \text{"CMP"} & 330 \\ 2 & 8 & 10 & 19 & \text{"CMP"} & 330 \\ 3 & 8 & 10 & 19 & \text{"CMP"} & 426 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLA} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 108 & 74 & 150 & \text{"SMC"} & 298 \\ 2 & 108 & 74 & 150 & \text{"SMC"} & 298 \\ 3 & 126 & 48 & 150 & \text{"SMC"} & 329 \end{bmatrix}$$

6.1.1 - Verificação dos limites da NBR 8800 (Vigas Esbeltas):

$$VERIF_{H18} = \begin{bmatrix} \text{"a"} & \text{"b"} & \text{"c"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

6.2 - Esforço Cortante Resistente do Perfil de Aço

$$ELU_{VRM} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"a_max (cm)"} & \text{"VRd (tf)"} \\ 1.00 & 101.52 & 104.36 & 129.98 & 289.66 & 164.87 & 266.15 \\ 2.00 & 101.52 & 84.61 & 105.38 & 289.66 & 164.87 & 221.81 \\ 3.00 & 101.52 & 76.50 & 95.28 & 289.66 & 164.87 & 187.39 \end{bmatrix}$$

6.3 - Classificação da Seção Mista

$$CLAS\_SEÇÃO_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_{comp}\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"Verif"} \\ 1.00 & 101.52 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 2.00 & 101.52 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 3.00 & 101.52 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \end{bmatrix}$$

6.3.1 - Mrd - Seção Mista

$$MRd_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1.00 & \text{"SMC"} & 439.39 \\ 2.00 & \text{"SMC"} & 392.20 \\ 3.00 & \text{"SMC"} & 564.20 \end{bmatrix}$$

6.3.2 - Vrd - Seção Mista

$$V_{Ra_{SM}} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"a_max (cm)"} & \text{"VRd_{SM} (tf)"} \\ 1.00 & 101.52 & 104.36 & 129.98 & 289.66 & 164.87 & 266.15 \\ 2.00 & 101.52 & 84.61 & 105.38 & 289.66 & 164.87 & 221.81 \\ 3.00 & 101.52 & 76.50 & 95.28 & 289.66 & 164.87 & 187.39 \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

## 7 - CONECTORES DE CISALHAMENTO

Critérios conforme a NBR 8800/2008 seção O.4.

- Conectores do tipo pino com cabeça devem possuir comprimento mínimo quatro vezes o diâmetro do conector ( $h_{pc} = 4x\phi$ ).

- Os conectores tipo pino com cabeça não podem ter diâmetro maior que 2.5 vezes a espessura da mesa a qual forem soldadas, a menos que sejam colocados diretamente no eixo da alma do perfil.

- O cobrimento lateral de concreto para qualquer tipo de conector deve ser no mínimo 25mm.

- O espaçamento máximo entre linhas de centro de conectores deve ser igual a 8 vezes a espessura total da laje.

- O espaçamento mínimo entre linhas de centro de conectores do tipo pino com cabeça deve ser igual a 6 $\phi$  diâmetros ao longo do vão da viga. O espaçamento mínimo transversal deve ser de 4 $\phi$  diâmetros.

### 7.1 - Dados Conectores "Stud"

$$S_{ca} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi_{es} \text{ (mm)}\text{"} & \text{"}A_{es} \text{ (cm}^2\text{)}\text{"} & \text{"}nes_{min}\text{"} & \text{"}esp_{long-max} \text{ (cm)}\text{"} & \text{"}esp_{long-min} \text{ (cm)}\text{"} & \text{"}esp_{tran-max} \text{ (cm)}\text{"} \\ 25.00 & 4.91 & 141.00 & 176.00 & 15.00 & 10.00 \end{bmatrix}$$

### 7.2 - Verificação do Fluxo de Cisalhamento e Número de Conectores por trecho:

$$S_{ca_{tr}} = \begin{bmatrix} \text{"}Trecho\text{"} & \text{"}1\text{"} & \text{"}2\text{"} & \text{"}3\text{"} & \text{"}4\text{"} & \text{"}5\text{"} & \text{"}6\text{"} & \text{"}7\text{"} & \text{"}8\text{"} & \text{"}9\text{"} & \text{"}10\text{"} \\ \text{"}Seção\text{"} & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 2 & 1 \\ \text{"}hec \text{ (cm)}\text{"} & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 \\ \text{"}Q \text{ (cm}^3\text{)}\text{"} & 119345 & 119345 & 119345 & 160504 & 160504 & 160504 & 160504 & 119345 & 119345 & 119345 \\ \text{"}I \text{ (cm}^4\text{)}\text{"} & 1982589 & 1982589 & 1982589 & 2881168 & 2881168 & 2881168 & 2881168 & 1982589 & 1982589 & 1982589 \\ \text{"}qd \text{ (tf/m)}\text{"} & 72 & 59 & 47 & 34 & 23 & 23 & 34 & 47 & 59 & 72 \\ \text{"}qk_Q \text{ (tf/m)}\text{"} & 23 & 19 & 16 & 13 & 11 & 11 & 13 & 16 & 19 & 23 \\ \text{"}nes_{trecho}\text{"} & 15 & 13 & 11 & 9 & 7 & 7 & 9 & 11 & 13 & 15 \end{bmatrix}$$

### 7.3 - Número total de Conectores

$$n_{ca_{total}} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi_{es} \text{ (mm)}\text{"} & \text{"}nes_{total}\text{"} \\ 25 & 109 \end{bmatrix}$$

## 8 - FADIGA

A tensão limite da faixa de variações de tensões, para um número infinito de ciclos de solicitação, varia conforme os elementos estruturais. Nenhuma verificação de resistência à fadiga é necessária se a faixa de variação de tensões, analisada em regime elástico, for inferior ao limite estabelecido na NBR 16694/2020 em seu anexo A.

$$S_{fad} = \begin{bmatrix} \text{"}perfil\text{"} & \text{"}\sigma_{fad,VQ} \text{ (MPa)}\text{"} & \text{"}\text{"} & \text{"}\sigma_{fad,MQ} \text{ (MPa)}\text{"} & \text{"}\text{"} \\ 1.00 & 16.64 & \text{"}ok\text{"} & 0.00 & \text{"}ok\text{"} \\ 2.00 & 14.20 & \text{"}ok\text{"} & 3.02 & \text{"}ok\text{"} \\ 3.00 & 12.01 & \text{"}ok\text{"} & 9.70 & \text{"}ok\text{"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

## 9 - VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRABALHO DAS SEÇÕES DE AÇO

### 9.1 - Verificação na fase construtiva

$$VERIF_{ctf} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd(tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 266.15 & 0.15 & \text{"ok"} & 0.00 & 209.07 & 0.00 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 221.81 & 0.14 & \text{"ok"} & 79.50 & 209.07 & 0.38 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 187.39 & 0.00 & \text{"ok"} & 220.10 & 258.37 & 0.85 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 9.1 - Verificação na fase de utilização

$$VERIF_{ut} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VSd (tf)} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd(tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 89.40 & 266.15 & 0.34 & \text{"ok"} & 43.58 & 439.39 & 0.10 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 73.60 & 221.81 & 0.33 & \text{"ok"} & 226.12 & 392.20 & 0.58 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 58.20 & 187.39 & 0.31 & \text{"ok"} & 554.34 & 564.20 & 0.98 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 9.1.1 - Verificação das tensões na fase de utilização para seções semi-compactas

$$\sigma_{SM\_smc} = \begin{bmatrix} \text{"Perf"} & \text{"MSd/Wxo"} & \text{"fed (MPa)} & \text{""} & \text{"MSd/Wxu"} & \text{"fyd (MPa)} & \text{""} & \text{"R"} \\ 1 & 0.673 & 21.429 & \text{"ok"} & 28.488 & 263.636 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 2 & 2.691 & 21.429 & \text{"ok"} & 166.328 & 263.636 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 3 & 5.392 & 21.429 & \text{"ok"} & 261.589 & 263.636 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)



PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO

Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

VIGA DE AÇO: VA64 e VA65

1 - Dados dos Materiais

Aço	$f_y$	$f_u$	$E_a$	$G_a$	$\rho_a$	$esp_{sac}$	$\gamma_{a1}$	$\gamma_{a2}$	$\beta_{vm}$	$\sigma_{a\_fad}$
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	(mm)				(MPa)

"A588"	290	435	200000	77000	7.85	0	1.10	1.35	1	69
--------	-----	-----	--------	-------	------	---	------	------	---	----

Concreto	$f_{ck}$	$\gamma_c$	$\rho_c$	$\alpha_c$	$T_{c,r}$	$\gamma_{retr}$	$\alpha_E$	Aço	$f_{ys}$	$\gamma_s$	$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio $\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaíse $\alpha_E = 0,9$ para calcário $\alpha_E = 0,7$ para arenito
	(MPa)		$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	$\left(\frac{1}{1\ ^\circ C}\right)$	( $^\circ C$ )				(MPa)		

"C30"	30	1.4	2.50	$10^{-5}$	-5	1.2	1.0	"CA50"	500	1.15	
-------	----	-----	------	-----------	----	-----	-----	--------	-----	------	--

$E_{ca} = 30672.46\ MPa$        $E_{ca} = 26838.41\ MPa$

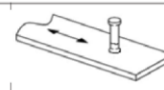
Conector	$\phi_{ca}$	$n_{ca}$	$f_{uce}$	$\gamma_{ce}$	$R_g$	$R_p$	$\sigma_{ca\_fad}$
	(mm)		(MPa)				(MPa)

"Stud"	25	1	415	1.25	1	0.8	69
--------	----	---	-----	------	---	-----	----

9.3 Conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça, aplicados por processo automático de solda ou por soldas de filete

69

Ruptura do conector por cisalhamento



Rg:

- 1,00 - para qualquer número de conectores conectados em uma linha soldado diretamente no perfil de aço;
- 0,85 - para dois conectores soldados perpendicular ao perfil de aço

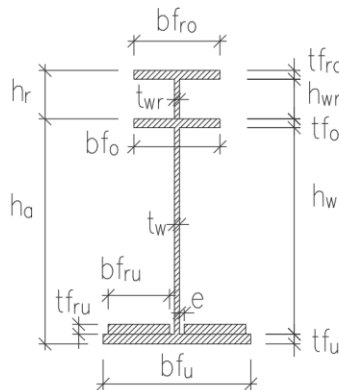
Rp:

- 1,00 - para conectores soldados diretamente no perfil de aço;
- 0,75 - para conectores soldados e embutidos em uma laje mista

2 - Geometria Perfil de aço

S	Trec.	$b_{fu}$	$t_{fu}$	$h_w$	$t_w$	$b_{fo}$	$t_{fo}$	$b_{fru}$	$t_{fru}$	e	$h_{wr}$	$t_{wr}$	$b_{fro}$	$t_{fro}$	$b_{fc}$	$h_{iaje}$	$L_b$	a
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
1	"S1"	350	22	1282	12.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	250	22	500	100
2	"S2"	350	22	1282	12.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	250	22	500	150
3	"S3"	350	35	1282	9.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	250	22	500	200

Seção Transversal



a = distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores adjacentes NBR 8800 - 5.4.3.1

$$h_a := t_{fu} + h_w + t_{fo} = \begin{bmatrix} 1320 \\ 1333 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_r := h_{wr} + t_{fro} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_{at} := h_a + h_r = \begin{bmatrix} 1320 \\ 1320 \\ 1333 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h := h_a + h_r + h_{iaje} = \begin{bmatrix} 1540 \\ 1540 \\ 1553 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

3 - Solicitações Características (Sem majoração)

O programa admite até três seções transversais difentes.

Seção	$M_{g1}$ (tf·m)	$M_{g2}$ (tf·m)	$M_{g3}$ (tf·m)	$M_Q$ (tf·m)	$V_{Sd,cst}$ (tf)	$M_{Sd,cst}$ (tf·m)
1	0.00	0.00	0	0	22.6	0.00
2	5.45	32.0	17.7	56.6	18.0	46.3
3	15.1	88.6	45.3	155.9	0	128.1

Combinações consideradas:

$$V_{Sd,cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2}$$

$$V_{Sd,cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2} + \gamma_q * V_Q$$

$$M_{Sd,cst} = \gamma_g * M_{g1} + \gamma_g * M_{g2}$$

$$M_{Sd} = \gamma_g * (M_{g1} + M_{g2} + M_{g3}) + \gamma_q * M_Q$$

Esforço cortante para verificação do fluxo de cisalhamento horizontal nos conectores:

Nó	$P_{ef,V}$	$V_{g1}$	$V_{g2}$	$V_{g3}$	$V_Q$	$V_{Sd}$
		(tf)	(tf)	(tf)	(tf)	(tf)
10	1	2.66	15.6	10.6	27.8	78.2
11	2	2.12	12.5	8.69	23.6	64.4
12	3	1.59	9.34	6.75	19.7	51.0
13	3	1.06	6.21	4.81	15.8	37.5
14	3	0.52	3.07	2.86	12.5	25.1
15	3	0	0	0	9.57	13.0

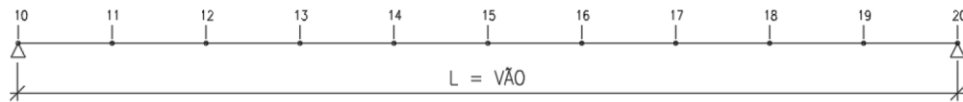
Coefficientes de Majoração dos Esforços - NBR 8681/2004

Fase	$\gamma_{g,Vg1}$	$\gamma_{g,Vg2}$	$\gamma_{g,Vg3}$	$\gamma_{q,VQ}$	$\gamma_{g,Mg1}$	$\gamma_{g,Mg2}$	$\gamma_{g,Mg3}$	$\gamma_{q,MQ}$
“Const”	1.15	1.15	0	0	1.15	1.25	0	0
“ELU”	1.35	1.35	1.35	1.5	1.35	1.35	1.35	1.5

$$i_{barra} = \frac{L_{vão}}{div} = 2.3 \text{ m}$$

$\frac{L_{vão}}{div} = \frac{23.00}{10}$

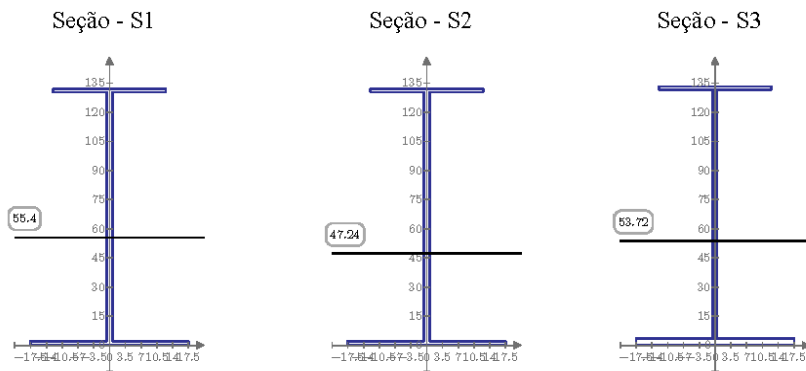
MODELO-NUMERAÇÃO DOS NÓS



Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

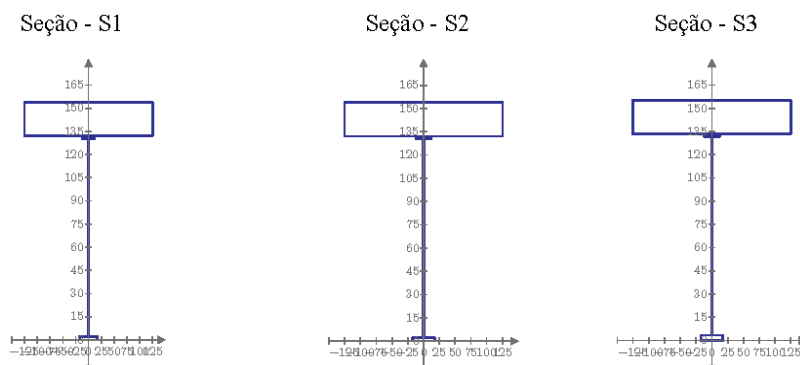
4 - Propriedades do Perfil de Aço



Prop_Aço =	"S"	"Aa (m <sup>2</sup> )"	"ycg_u (m)"	"Ia (m <sup>4</sup> )"	"Wao (m <sup>3</sup> )"	"Wau (m <sup>3</sup> )"
1	0.0277	0.5756	0.0069	0.0093	0.0121	0.0121
2	0.0277	0.5756	0.0069	0.0093	0.0121	0.0121
3	0.0284	0.4836	0.0076	0.009	0.0157	0.0157

5 - Propriedades da Seção Mista

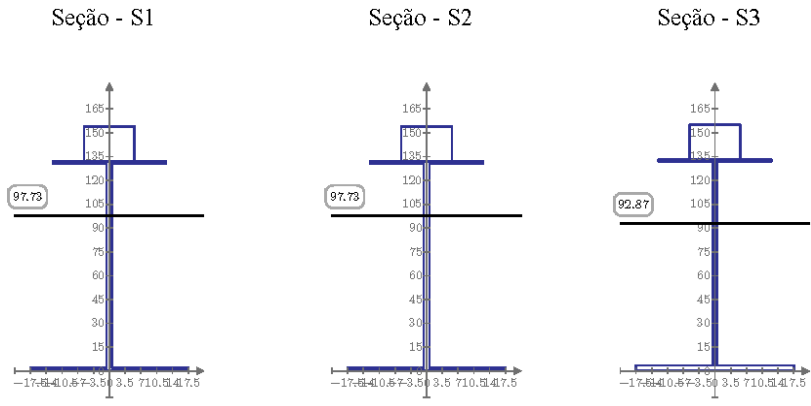
5.1 - Seção Mista



Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

5.2 - Propriedades da Seção Mista - Longa Duração

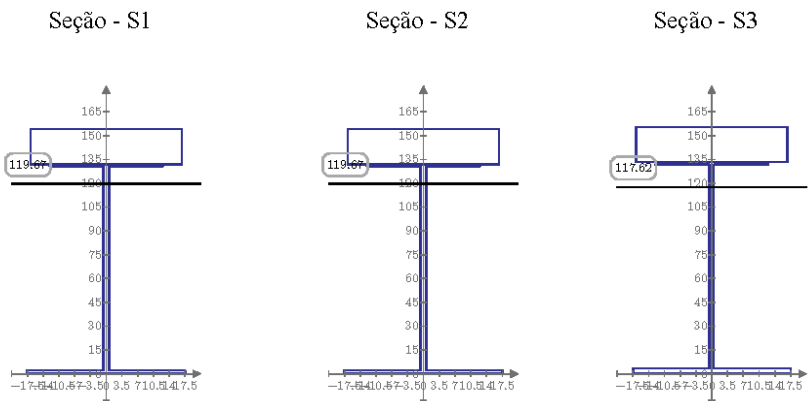
$$n_{LD} := 3 (E_a \div E_{cs}) = 22.356$$



Prop_LD	"S"	"A_LD (m²)"	"ycg_u_LD (m)"	"I_LD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.0523	0.9773	0.0166	0.0294	0.0483	0.0169	
2	0.0523	0.9773	0.0166	0.0294	0.0483	0.0169	
3	0.053	0.9287	0.0199	0.0318	0.0491	0.0214	

5.3 - Propriedades da Seção Mista - Curta Duração

$$n_{CD} := (E_a \div E_{cs}) = 7.45$$



Prop_CD	"S"	"A_CD (m²)"	"ycg_u_CD (m)"	"I_CD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.1015	1.1967	0.022	0.0639	0.178	0.0183	
2	0.1015	1.1967	0.022	0.0639	0.178	0.0183	
3	0.1022	1.1762	0.0268	0.0711	0.1709	0.0228	

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

## 6 - ESFORÇOS RESISTENTES

### 6.1 - Momento Fletor Resistente do Perfil de aço

$$ELU_{FET} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 125 & 46 & 144 & \text{"SMC"} & 207 \\ 2 & 125 & 46 & 144 & \text{"SMC"} & 207 \\ 3 & 89 & 29 & 99 & \text{"SMC"} & 175 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLM} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 8 & 10 & 19 & \text{"CMP"} & 335 \\ 2 & 8 & 10 & 19 & \text{"CMP"} & 335 \\ 3 & 8 & 10 & 18 & \text{"CMP"} & 237 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLA} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 117 & 61 & 150 & \text{"SMC"} & 282 \\ 2 & 117 & 61 & 150 & \text{"SMC"} & 282 \\ 3 & 175 & 44 & 150 & \text{"ESB"} & 361 \end{bmatrix}$$

#### 6.1.1 - Verificação dos limites da NBR 8800 (Vigas Esbeltas):

$$VERIF_{H13} = \begin{bmatrix} \text{"a"} & \text{"b"} & \text{"c"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 6.2 - Esforço Cortante Resistente do Perfil de Aço

$$ELU_{VRd} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"a_max (cm)"} & \text{"VRd (tf)"} \\ 1.00 & 102.56 & 105.02 & 130.80 & 289.66 & 162.13 & 266.15 \\ 2.00 & 102.56 & 84.97 & 105.83 & 289.66 & 162.13 & 220.50 \\ 3.00 & 134.95 & 76.73 & 95.56 & 289.66 & 95.19 & 81.88 \end{bmatrix}$$

### 6.3 - Classificação da Seção Mista

$$CLAS\_SEÇÃO_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_{comp}\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"Verif"} \\ 1.00 & 102.56 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 2.00 & 102.56 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 3.00 & 134.95 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \end{bmatrix}$$

#### 6.3.1 - Mrd - Seção Mista

$$MRd_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1.00 & \text{"SMC"} & 493.18 \\ 2.00 & \text{"SMC"} & 464.85 \\ 3.00 & \text{"SMC"} & 545.95 \end{bmatrix}$$

#### 6.3.2 - Vrd - Seção Mista

$$V_{Ra_{SM}} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"a_max (cm)"} & \text{"VRd_{SM} (tf)"} \\ 1.00 & 102.56 & 105.02 & 130.80 & 289.66 & 162.13 & 266.15 \\ 2.00 & 102.56 & 84.97 & 105.83 & 289.66 & 162.13 & 220.50 \\ 3.00 & 134.95 & 76.73 & 95.56 & 289.66 & 95.19 & 81.88 \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

## 7 - CONECTORES DE CISALHAMENTO

Critérios conforme a NBR 8800/2008 seção O.4.

- Conectores do tipo pino com cabeça devem possuir comprimento mínimo quatro vezes o diâmetro do conector ( $h_{pc} = 4x\phi$ ).

- Os conectores tipo pino com cabeça não podem ter diâmetro maior que 2.5 vezes a espessura da mesa a qual forem soldadas, a menos que sejam colocados diretamente no eixo da alma do perfil.

- O cobrimento lateral de concreto para qualquer tipo de conector deve ser no mínimo 25mm.

- O espaçamento máximo entre linhas de centro de conectores deve ser igual a 8 vezes a espessura total da laje.

- O espaçamento mínimo entre linhas de centro de conectores do tipo pino com cabeça deve ser igual a 6 $\phi$  diâmetros ao longo do vão da viga. O espaçamento mínimo transversal deve ser de 4 $\phi$  diâmetros.

### 7.1 - Dados Conectores "Stud"

$$S_{ca} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi\text{" (mm)} & \text{"}A\text{" (cm}^2\text{)} & \text{"}nes\_min\text{"} & \text{"}esp\_long-max\text{" (cm)} & \text{"}esp\_long-min\text{" (cm)} & \text{"}esp\_tran-max\text{" (cm)} \\ 25.00 & 4.91 & 115.00 & 176.00 & 15.00 & 10.00 \end{bmatrix}$$

### 7.2 - Verificação do Fluxo de Cisalhamento e Número de Conectores por trecho:

$$S_{ca\_tr} = \begin{bmatrix} \text{"}Trecho\text{"} & \text{"}1\text{"} & \text{"}2\text{"} & \text{"}3\text{"} & \text{"}4\text{"} & \text{"}5\text{"} & \text{"}6\text{"} & \text{"}7\text{"} & \text{"}8\text{"} & \text{"}9\text{"} & \text{"}10\text{"} \\ \text{"}Seção\text{"} & 1 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 1 \\ \text{"}hee (cm)\text{"} & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 \\ \text{"}Q (cm}^3\text{)}\text{"} & 128328 & 128328 & 146737 & 146737 & 146737 & 146737 & 146737 & 146737 & 128328 & 128328 \\ \text{"}I (cm}^4\text{)}\text{"} & 2195300 & 2195300 & 2680313 & 2680313 & 2680313 & 2680313 & 2680313 & 2680313 & 2195300 & 2195300 \\ \text{"}qd (tf/m)\text{"} & 61 & 51 & 40 & 29 & 20 & 20 & 29 & 40 & 51 & 61 \\ \text{"}qk\_Q (tf/m)\text{"} & 22 & 19 & 15 & 12 & 10 & 10 & 12 & 15 & 19 & 22 \\ \text{"}nes\_trecho\text{"} & 15 & 12 & 10 & 8 & 7 & 7 & 8 & 10 & 12 & 15 \end{bmatrix}$$

### 7.3 - Número total de Conectores

$$n_{ca\_total} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi\text{" (mm)} & \text{"}nes\_total\text{"} \\ 25 & 104 \end{bmatrix}$$

## 8 - FADIGA

A tensão limite da faixa de variações de tensões, para um número infinito de ciclos de solicitação, varia conforme os elementos estruturais. Nenhuma verificação de resistência à fadiga é necessária se a faixa de variação de tensões, analisada em regime elástico, for inferior ao limite estabelecido na NBR 16694/2020 em seu anexo A.

$$S_{fad} = \begin{bmatrix} \text{"}perfil\text{"} & \text{"}\sigma_{fad,VQ}\text{" (MPa)} & \text{"}" & \text{"}\sigma_{fad,MQ}\text{" (MPa)} & \text{"}" \\ 1 & 16.52 & \text{"}ok\text{"} & 0 & \text{"}ok\text{"} \\ 2 & 14.03 & \text{"}ok\text{"} & 3.12 & \text{"}ok\text{"} \\ 3 & 15.26 & \text{"}ok\text{"} & 8.94 & \text{"}ok\text{"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

## 9 - VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRABALHO DAS SEÇÕES DE AÇO

---

### 9.1 - Verificação na fase construtiva

$$VERIF_{ctf} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd(tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 266.15 & 0.08 & \text{"ok"} & 0.00 & 207.11 & 0.00 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 220.50 & 0.08 & \text{"ok"} & 46.30 & 207.11 & 0.22 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 81.88 & 0.00 & \text{"ok"} & 128.10 & 175.41 & 0.73 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 9.1 - Verificação na fase de utilização

$$VERIF_{ut} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VSd (tf)} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd(tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 78.20 & 266.15 & 0.29 & \text{"ok"} & 46.73 & 493.18 & 0.09 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 64.40 & 220.50 & 0.29 & \text{"ok"} & 206.08 & 464.85 & 0.44 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 51.00 & 81.88 & 0.62 & \text{"ok"} & 488.09 & 545.95 & 0.89 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

#### 9.1.1 - Verificação das tensões na fase de utilização para seções semi-compactas

$$\sigma_{SM\_smc} = \begin{bmatrix} \text{"Perf"} & \text{"MSd/Wxo"} & \text{"fed (MPa)} & \text{""} & \text{"MSd/Wxu"} & \text{"fyd (MPa)} & \text{""} & \text{"R"} \\ 1 & 0.7 & 21.43 & \text{"ok"} & 27.05 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 2 & 2.8 & 21.43 & \text{"ok"} & 127.37 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 3 & 5.9 & 21.43 & \text{"ok"} & 240.24 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO

Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

VIGA DE AÇO: VA66

1 - Dados dos Materiais

Aço	$f_y$	$f_u$	$E_a$	$G_a$	$\rho_a$	$esp_{sac}$	$\gamma_{a1}$	$\gamma_{a2}$	$\beta_{vm}$	$\sigma_{a\_fad}$
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	(mm)				(MPa)

"A588"	290	435	200000	77000	7.85	0	1.10	1.35	1	69
--------	-----	-----	--------	-------	------	---	------	------	---	----

Concreto	$f_{ck}$	$\gamma_c$	$\rho_c$	$\alpha_c$	$T_{c,r}$	$\gamma_{retr}$	$\alpha_E$	Aço	$f_{ys}$	$\gamma_s$	$\alpha_E$
	(MPa)		$\left(\frac{tf}{m^3}\right)$	$\left(\frac{1}{1^\circ C}\right)$	(°C)				(MPa)		

"C30"	30	1.4	2.50	$10^{-5}$	-5	1.2	1.0	"CA50"	500	1.15	
-------	----	-----	------	-----------	----	-----	-----	--------	-----	------	--

$\alpha_E = 1,2$  para basalto e diabásio  
 $\alpha_E = 1,0$  para granito e gnaissé  
 $\alpha_E = 0,9$  para calcário  
 $\alpha_E = 0,7$  para arenito

$E_{ca} = 30672.46 \text{ MPa}$        $E_{ca} = 26838.41 \text{ MPa}$

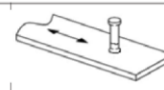
Conector	$\phi_{ca}$	$n_{ca}$	$f_{uce}$	$\gamma_{ce}$	$R_g$	$R_p$	$\sigma_{ca\_fad}$
	(mm)		(MPa)				(MPa)

"Stud"	25	1	415	1.25	1	0.8	69
--------	----	---	-----	------	---	-----	----

9.3 Conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça, aplicados por processo automático de solda ou por soldas de filete

69

Ruptura do conector por cisalhamento



Rg:

1,00 - para qualquer número de conectores conectados em uma linha soldado diretamente no perfil de aço;  
 0,85 - para dois conectores soldados perpendicular ao perfil de aço

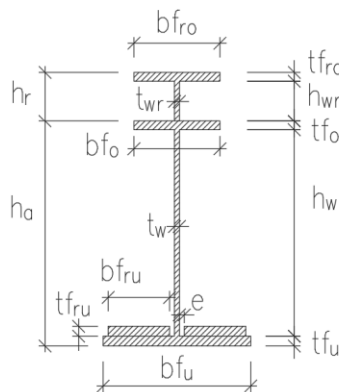
Rp:

0,70 - para três ou mais conectores soldados perpendicular ao perfil de aço;  
 1,00 - para conectores soldados diretamente no perfil de aço;  
 0,75 - para conectores soldados e embutidos em uma laje mista

2 - Geometria Perfil de aço

S	Trec.	$b_{fu}$	$t_{fu}$	$h_w$	$t_w$	$b_{fo}$	$t_{fo}$	$b_{fru}$	$t_{fru}$	e	$h_{wr}$	$t_{wr}$	$b_{fro}$	$t_{fro}$	$b_{fc}$	$h_{iaje}$	$L_b$	a
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	"S1"	350	22	1282	12.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	223	22	500	100
2	"S2"	350	22	1282	12.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	223	22	500	150
3	"S3"	350	35	1282	9.5	250	16	0	0	0	0	0	0	0	223	22	500	200

Seção Transversal



a = distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores adjacentes NBR 8800 - 5.4.3.1

$$h_a := t_{fu} + h_w + t_{fo} = \begin{bmatrix} 1320 \\ 1333 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_r := h_{wr} + t_{fro} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h_{at} := h_a + h_r = \begin{bmatrix} 1320 \\ 1320 \\ 1333 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$h := h_a + h_r + h_{iaje} = \begin{bmatrix} 1540 \\ 1540 \\ 1553 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)



PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

3 - Solicitações Características (Sem majoração)

O programa admite até três seções transversais difentes.

Seção	$M_{g1}$ (tf·m)	$M_{g2}$ (tf·m)	$M_{g3}$ (tf·m)	$M_Q$ (tf·m)	$V_{Sd,cst}$ (tf)	$M_{Sd,cst}$ (tf·m)
1	0.00	0.00	0	0.00	20.5	0.00
2	5.45	28.6	6.7	6.86	16.4	42
3	15.1	79.1	15.8	188.7	0	116.2

Combinações consideradas:

$$V_{Sd,cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2}$$

$$V_{Sd,cst} = \gamma_g * V_{g1} + \gamma_{g2} * V_{g2} + \gamma_q * V_Q$$

$$M_{Sd,cst} = \gamma_g * M_{g1} + \gamma_g * M_{g2}$$

$$M_{Sd} = \gamma_g * (M_{g1} + M_{g2} + M_{g3}) + \gamma_q * M_Q$$

Esforço cortante para verificação do fluxo de cisalhamento horizontal nos conectores:

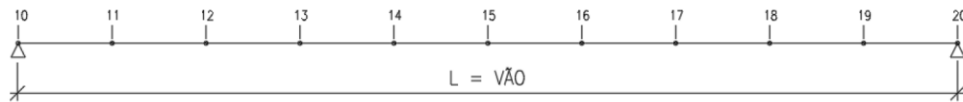
Nó	$P_{ef,V}$	$V_{g1}$ (tf)	$V_{g2}$ (tf)	$V_{g3}$ (tf)	$V_Q$ (tf)	$V_{Sd}$ (tf)
10	1	2.66	13.9	4.79	33.6	77.4
11	2	2.12	11.1	3.98	28.7	64.4
12	2	1.59	8.34	3.16	24.1	51.9
13	3	1.06	5.54	2.35	19.4	39.2
14	3	0.52	2.74	1.53	15.5	27.7
15	3	0	0	0	11.9	16.7

Coefficientes de Majoração dos Esforços - NBR 8681/2004

Fase	$\gamma_{g,Vg1}$	$\gamma_{g,Vg2}$	$\gamma_{g,Vg3}$	$\gamma_{q,VQ}$	$\gamma_{g,Mg1}$	$\gamma_{g,Mg2}$	$\gamma_{g,Mg3}$	$\gamma_{q,MQ}$
"Const"	1.15	1.15	0	0	1.15	1.25	0	0
"ELU"	1.35	1.35	1.35	1.5	1.35	1.35	1.35	1.5

$$i_{barra} = \frac{L_{vão}}{div} = 2.3 \text{ m}$$

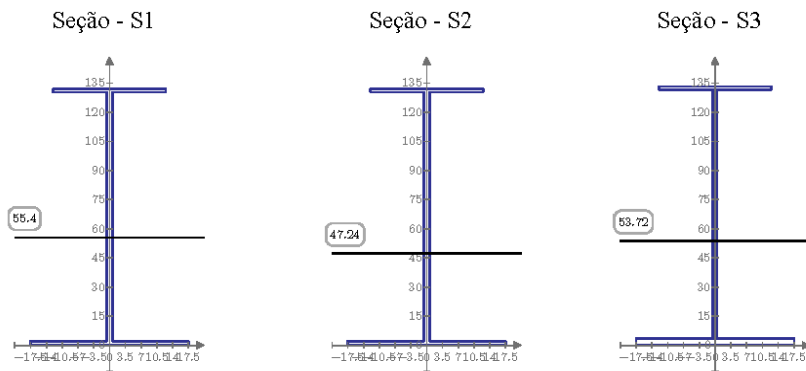
MODELO-NUMERAÇÃO DOS NÓS



Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

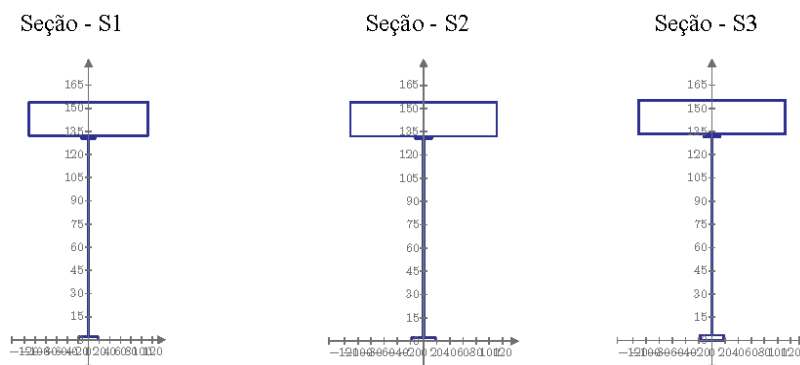
4 - Propriedades do Perfil de Aço



Prop_Aço =	"S"	"Aa (m²)"	"ycg_u (m)"	"Ia (m⁴)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	0.0277	0.5756	0.0069	0.0093	0.0121	
2	0.0277	0.5756	0.0069	0.0093	0.0121	
3	0.0284	0.4836	0.0076	0.009	0.0157	

5 - Propriedades da Seção Mista

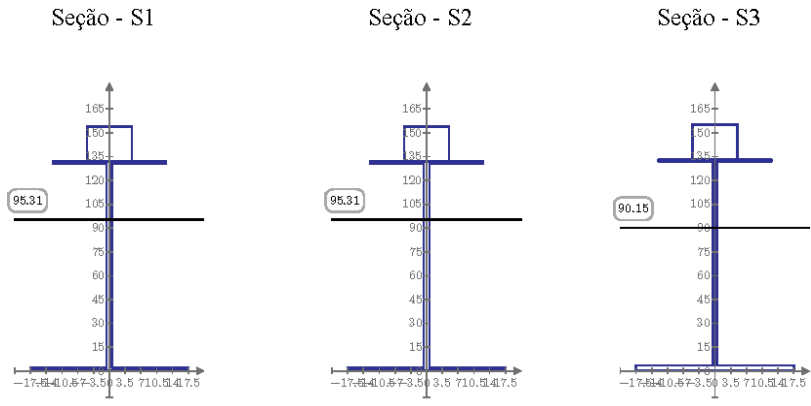
5.1 - Seção Mista



Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

5.2 - Propriedades da Seção Mista - Longa Duração

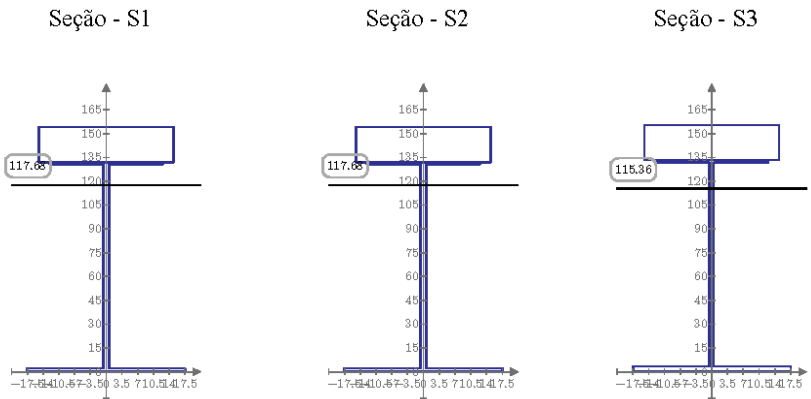
$$n_{LD} := 3 (E_a \div E_{cs}) = 22.356$$



Prop_LD	"S"	"A_LD (m²)"	"ycg_u_LD (m)"	"I_LD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	1	0.0497	0.9531	0.016	0.0272	0.0435	0.0168
2	2	0.0497	0.9531	0.016	0.0272	0.0435	0.0168
3	3	0.0504	0.9015	0.0191	0.0293	0.0443	0.0212

5.3 - Propriedades da Seção Mista - Curta Duração

$$n_{CD} := (E_a \div E_{cs}) = 7.45$$



Prop_CD	"S"	"A_CD (m²)"	"ycg_u_CD (m)"	"I_CD (m⁴)"	"Wco (m³)"	"Wao (m³)"	"Wau (m³)"
1	1	0.0936	1.1768	0.0214	0.0591	0.1498	0.0182
2	2	0.0936	1.1768	0.0214	0.0591	0.1498	0.0182
3	3	0.0943	1.1536	0.0262	0.0655	0.1458	0.0227

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

## 6 - ESFORÇOS RESISTENTES

### 6.1 - Momento Fletor Resistente do Perfil de aço

$$ELU_{FET} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 125 & 46 & 144 & \text{"SMC"} & 207 \\ 2 & 125 & 46 & 144 & \text{"SMC"} & 207 \\ 3 & 89 & 29 & 99 & \text{"SMC"} & 175 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLM} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 8 & 10 & 19 & \text{"CMP"} & 335 \\ 2 & 8 & 10 & 19 & \text{"CMP"} & 335 \\ 3 & 8 & 10 & 18 & \text{"CMP"} & 237 \end{bmatrix}$$

$$ELU_{FLA} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1 & 117 & 61 & 150 & \text{"SMC"} & 282 \\ 2 & 117 & 61 & 150 & \text{"SMC"} & 282 \\ 3 & 175 & 44 & 150 & \text{"ESB"} & 361 \end{bmatrix}$$

#### 6.1.1 - Verificação dos limites da NBR 8800 (Vigas Esbeltas):

$$VERIF_{H13} = \begin{bmatrix} \text{"a"} & \text{"b"} & \text{"c"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \\ \text{"ok"} & \text{"ok"} & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 6.2 - Esforço Cortante Resistente do Perfil de Aço

$$ELU_{VRd} = \begin{bmatrix} \text{"S"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"a_max (cm)"} & \text{"VRd (tf)"} \\ 1.00 & 102.56 & 105.02 & 130.80 & 289.66 & 162.13 & 266.15 \\ 2.00 & 102.56 & 84.97 & 105.83 & 289.66 & 162.13 & 220.50 \\ 3.00 & 134.95 & 76.73 & 95.56 & 289.66 & 95.19 & 81.88 \end{bmatrix}$$

### 6.3 - Classificação da Seção Mista

$$CLAS\_SEÇÃO_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_{comp}\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"Verif"} \\ 1.00 & 102.56 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 2.00 & 102.56 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \\ 3.00 & 134.95 & 98.74 & 149.69 & \text{"SMC"} \end{bmatrix}$$

#### 6.3.1 - Mrd - Seção Mista

$$MRd_{SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"Clas.Seção"} & \text{"MRd (tfm)"} \\ 1.00 & \text{"SMC"} & 490.01 \\ 2.00 & \text{"SMC"} & 465.72 \\ 3.00 & \text{"SMC"} & 552.05 \end{bmatrix}$$

#### 6.3.2 - Vrd - Seção Mista

$$V_{Ra,SM} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"}\lambda\text{"} & \text{"}\lambda_p\text{"} & \text{"}\lambda_r\text{"} & \text{"}\lambda_{max}\text{"} & \text{"a_max (cm)"} & \text{"VRd_{SM} (tf)"} \\ 1.00 & 102.56 & 105.02 & 130.80 & 289.66 & 162.13 & 266.15 \\ 2.00 & 102.56 & 84.97 & 105.83 & 289.66 & 162.13 & 220.50 \\ 3.00 & 134.95 & 76.73 & 95.56 & 289.66 & 95.19 & 81.88 \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

PROGRAMA DE VIGAS MISTAS PERFIL I SOLDADO - DIMENSIONAMENTO  
 Created By: MSc. Eng. Civil Cristiano Hoss

## 7 - CONECTORES DE CISALHAMENTO

Critérios conforme a NBR 8800/2008 seção O.4.

- Conectores do tipo pino com cabeça devem possuir comprimento mínimo quatro vezes o diâmetro do conector ( $h_{pc} = 4x\phi$ ).

- Os conectores tipo pino com cabeça não podem ter diâmetro maior que 2.5 vezes a espessura da mesa a qual forem soldadas, a menos que sejam colocados diretamente no eixo da alma do perfil.

- O cobrimento lateral de concreto para qualquer tipo de conector deve ser no mínimo 25mm.

- O espaçamento máximo entre linhas de centro de conectores deve ser igual a 8 vezes a espessura total da laje.

- O espaçamento mínimo entre linhas de centro de conectores do tipo pino com cabeça deve ser igual a  $6\phi$  diâmetros ao longo do vão da viga. O espaçamento mínimo transversal deve ser de  $4\phi$  diâmetros.

### 7.1 - Dados Conectores "Stud"

$$S_{ca} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi\text{" (mm)} & \text{"}A\text{" (cm}^2\text{)} & \text{"}nes\text{"}_{min} & \text{"}esp\_long\text{"}_{max} \text{(cm)} & \text{"}esp\_long\text{"}_{min} \text{(cm)} & \text{"}esp\_tran\text{"}_{max} \text{(cm)} \\ 25.00 & 4.91 & 115.00 & 176.00 & 15.00 & 10.00 \end{bmatrix}$$

### 7.2 - Verificação do Fluxo de Cisalhamento e Número de Conectores por trecho:

$$S_{ca\_tr} = \begin{bmatrix} \text{"}Trecho\text{"} & \text{"}1\text{"} & \text{"}2\text{"} & \text{"}3\text{"} & \text{"}4\text{"} & \text{"}5\text{"} & \text{"}6\text{"} & \text{"}7\text{"} & \text{"}8\text{"} & \text{"}9\text{"} & \text{"}10\text{"} \\ \text{"}Seção\text{"} & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 2 & 1 \\ \text{"}hee \text{(cm)}\text{"} & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 & 22 \\ \text{"}Q \text{(cm}^3\text{)}\text{"} & 124221 & 124221 & 124221 & 141958 & 141958 & 141958 & 141958 & 124221 & 124221 & 124221 \\ \text{"}I \text{(cm}^4\text{)}\text{"} & 2144994 & 2144994 & 2144994 & 2615563 & 2615563 & 2615563 & 2615563 & 2144994 & 2144994 & 2144994 \\ \text{"}qd \text{(tf/m)}\text{"} & 60 & 50 & 40 & 30 & 22 & 22 & 30 & 40 & 50 & 60 \\ \text{"}qk\_Q \text{(tf/m)}\text{"} & 26 & 22 & 19 & 15 & 12 & 12 & 15 & 19 & 22 & 26 \\ \text{"}nes\_trecho\text{"} & 17 & 15 & 12 & 10 & 8 & 8 & 10 & 12 & 15 & 17 \end{bmatrix}$$

### 7.3 - Número total de Conectores

$$n_{ca\_total} = \begin{bmatrix} \text{"}\phi\text{" (mm)} & \text{"}nes\_total\text{"} \\ 25 & 126 \end{bmatrix}$$

## 8 - FADIGA

A tensão limite da faixa de variações de tensões, para um número infinito de ciclos de solicitação, varia conforme os elementos estruturais. Nenhuma verificação de resistência à fadiga é necessária se a faixa de variação de tensões, analisada em regime elástico, for inferior ao limite estabelecido na NBR 16694/2020 em seu anexo A.

$$S_{fad} = \begin{bmatrix} \text{"}perfil\text{"} & \text{"}\sigma\text{"}_{fad,VQ} \text{(MPa)} & \text{"} & \text{"}\sigma\text{"}_{fad,MQ} \text{(MPa)} & \text{"} \\ 1 & 19.97 & \text{"}ok\text{"} & 0 & \text{"}ok\text{"} \\ 2 & 17.06 & \text{"}ok\text{"} & 0.45 & \text{"}ok\text{"} \\ 3 & 18.66 & \text{"}ok\text{"} & 12.69 & \text{"}ok\text{"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)

## 9 - VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE TRABALHO DAS SEÇÕES DE AÇO

---

### 9.1 - Verificação na fase construtiva

$$VERIF_{ctf} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd(tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 266.15 & 0.08 & \text{"ok"} & 0.00 & 207.11 & 0.00 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 220.50 & 0.07 & \text{"ok"} & 42.00 & 207.11 & 0.20 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 81.88 & 0.00 & \text{"ok"} & 116.20 & 175.41 & 0.66 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

### 9.1 - Verificação na fase de utilização

$$VERIF_{ut} = \begin{bmatrix} \text{"Seção"} & \text{"VSd (tf)} & \text{"VRd (tf)} & \text{"VRd/VSd"} & \text{"RV"} & \text{"MSd(tfm)} & \text{"MRd (tfm)} & \text{"MSd/MRd"} & \text{"RM"} \\ 1.00 & 77.40 & 266.15 & 0.29 & \text{"ok"} & 43.91 & 490.01 & 0.09 & \text{"ok"} \\ 2.00 & 64.40 & 220.50 & 0.29 & \text{"ok"} & 109.21 & 465.72 & 0.23 & \text{"ok"} \\ 3.00 & 51.90 & 81.88 & 0.63 & \text{"ok"} & 481.40 & 552.05 & 0.87 & \text{"ok"} \end{bmatrix}$$

#### 9.1.1 - Verificação das tensões na fase de utilização para seções semi-compactas

$$\sigma_{SM\_smc} = \begin{bmatrix} \text{"Perf"} & \text{"MSd/Wxo"} & \text{"fed (MPa)} & \text{""} & \text{"MSd/Wxu"} & \text{"fyd (MPa)} & \text{""} & \text{"R"} \\ 1 & 0.71 & 21.43 & \text{"ok"} & 25.69 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 2 & 1.08 & 21.43 & \text{"ok"} & 73.9 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \\ 3 & 6.75 & 21.43 & \text{"ok"} & 234.59 & 263.64 & \text{"ok"} & \text{"OK"} \end{bmatrix}$$

Programa dimensionamento de vigas mistas soldadas perfil I de pontes (iteração completa)