



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

AVALIAÇÃO DE VIDA ÚTIL À FADIGA EM PONTE MISTA AÇO- CONCRETO CONSIDERANDO O ESPECTRO DE VEÍCULOS REAIS

Raissa Laubenbacher Sampaio de Toledo

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Michèle Schubert Pfeil, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2011

AVALIAÇÃO DE VIDA ÚTIL À FADIGA EM PONTE MISTA AÇO-CONCRETO
CONSIDERANDO O ESPECTRO DE VEÍCULOS REAIS

Raissa Laubenbacher Sampaio de Toledo

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO
DE ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

Prof. Michèle Schubert Pfeil, D.Sc.

Prof. Francisco José Costa Reis, M.Sc.

Prof. Ricardo Valeriano Alves, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2011

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Professora Michèle Schubert Pfeil, pelo incentivo, confiança, disponibilidade e conhecimento transmitido ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À minha família, pelo constante incentivo e ajuda em todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado ao longo de toda essa jornada e foram indispensáveis para o sucesso da realização do mesmo.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

AValiação de vida útil à fadiga em ponte mista aço-concreto considerando o espectro de veículos reais

Raissa Laubenbacher Sampaio de Toledo

Fevereiro/2011

Orientador: Michèle Schubert Pfeil, D.Sc.

Curso: Engenharia Civil

As variações de tensão causadas pela passagem dos veículos em pontes executadas com perfis de aço promovem danos que se acumulam neste material, podendo levar à ocorrência de fraturas por fadiga, especialmente em juntas soldadas.

A verificação da segurança à fadiga, indicada pelas normas de projeto, considera a variação de tensões provocada pela passagem de um veículo padrão a ser limitada pela variação de tensões calculada pela curva S-N correspondente ao detalhe considerado em função do número de ciclos de carregamento esperado durante a vida útil da estrutura.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise da vida útil à fadiga de uma ponte mista em aço-concreto segundo o critério normativo e também levando em consideração o espectro de veículos que circulam nas rodovias federais brasileiras.

Para o cálculo dos esforços solicitantes produzidos, utiliza-se um modelo numérico tridimensional constituído de elementos de placa e de pórtico. A determinação do dano causado pelas variações de tensões é feita segundo a regra de Palmgren-Miner e utilizando-se as curvas S-N.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

EVALUATION OF THE FATIGUE LIFE OF A COMPOSITE BRIDGE
CONSIDERING THE SPECTRUM OF HEAVY VEHICLES

Raissa Laubenbacher Sampaio de Toledo

February/2011

Advisor: Michèle Schubert Pfeil, D.Sc.

Course: Civil Engineering

Stresses variations due to the passage of heavy vehicles on steel or composite bridges generate material damage that may eventually yield to fatigue cracks, particularly in welded joints details.

Fatigue safety code requirements are based on stress variations due to the passage of a fatigue design truck, which should be lower than an allowable stress variation, calculated according to the appropriate S-N curve and the expected number of cycles during the structure lifetime.

This work presents a fatigue life estimate of a steel-concrete composite bridge by summing the fatigue damage induced by the heavy vehicles that compose the highway traffic in Brazil.

A tridimensional refined numeric model of the bridge was built to perform the structural analysis, in which were used shell and frame elements. The damage calculation employed the Palmgren-Miner rule and the S-N curves.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	6
2. FADIGA.....	7
2.1 DEFINIÇÃO.....	7
2.2 EFEITO DA FADIGA EM PONTES.....	8
2.3 EFEITO DA FADIGA EM PERFIS METÁLICOS SOLDADOS.....	10
2.4 CURVA S-N.....	11
2.5 REGRA DE PALMGREN-MINER.....	16
3. VEÍCULOS REAIS E CARREGAMENTOS DE PROJETO	17
3.1 EVOLUÇÃO DOS VEÍCULOS.....	17
3.2 VEÍCULOS REAIS.....	18
3.2.1 CLASSES DE VEÍCULOS.....	18
3.2.2 DADOS DOS VEÍCULOS.....	19
3.3 VEÍCULOS DE PROJETO.....	23
3.3.1 TREM TIPO DA NBR-7188 [5].....	23
3.3.2 VEÍCULO DE PROJETO DA AASHTO [2].....	24
4. SISTEMA ESTRUTURAL.....	25
4.1 PONTES MISTAS EM AÇO-CONCRETO.....	25
4.1.1 INTERAÇÃO AÇO-CONCRETO.....	25
4.1.2 CONSTRUÇÃO ESCORADA E NÃO-ESCORADA.....	27
4.1.3 VERIFICAÇÕES DOS PERFIS METÁLICOS PARA A ETAPA CONSTRUTIVA.....	28
4.1.4 VERIFICAÇÃO DAS SEÇÕES MISTAS.....	29
5. EXEMPLO NUMÉRICO.....	31
5.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	31
5.2 COMPONENTES DA SEÇÃO TRANSVERSAL.....	32
5.2.1 BARREIRA LATERAL.....	34
5.2.2 LAJE.....	34
5.2.3 LONGARINAS.....	35
5.2.4 DIAFRAGMAS.....	35
5.2.5 APARELHOS DE APOIO.....	36
5.3 DESCRIÇÃO DOS MODELOS ESTRUTURAIS.....	37
5.3.1 MODELO DE GRELHA.....	37
5.3.2 MODELO REFINADO.....	42
6. RESULTADOS.....	54

6.1 MODELO DE GRELHA	54
6.2 MODELO REFINADO	55
6.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE ANÁLISE ESTRUTURAL	59
6.4 RESULTADOS DA ANÁLISE DE FADIGA.....	59
6.4.1 CRITÉRIO AASHTO [2]	59
6.4.2 CÁLCULO DOS DANOS COM O ESPECTRO DE VEÍCULOS REAIS.....	60
<u>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</u>	62
7.1 MODELOS ESTRUTURAIS	62
7.2 ANÁLISE DE FADIGA	62
7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
<u>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u>	65
<u>9. ANEXOS.....</u>	67
9.1 ANEXO A – CÁLCULO DA RIGIDEZ DO APARELHO DE APOIO	67
9.2 ANEXO B – CÁLCULO DAS PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DAS SEÇÕES MISTAS	68
9.3 ANEXO C – VERIFICAÇÕES DOS PERFIS METÁLICOS E DA SEÇÃO MISTA	84
9.4 ANEXO D – CÁLCULO DA VIDA ÚTIL À FADIGA DA PONTE.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1-Variação do estado de tensões	8
Figura 2.2 – Variação de tensões com amplitude constante.....	9
Figura 2.3- Variação de tensões com amplitude variável.....	9
Figura 2.4-Detalhe de uma trinca em uma junta soldada de topo [1].....	10
Figura 2.5 – Formato das curvas S-N (adotado pelas normas americanas e brasileiras)	11
Figura 2.6 – Curva S-N normalizada [3]	13
Figura 2.7-Trecho de uma curva S-N [3]	13
Figura 2.8- Curva S-N de projeto para o aço exposto ao ar [2].....	14
Figura 2.9 – Exemplos de detalhes referentes a este trabalho: Solda da mesa inferior com a alma (B); solda do enrijecedor transversal (C); solda de topo entre os perfis (B).[2]	15
Figura 3.1- Classificação dos veículos [4]	19
Figura 3.2- Percentuais do peso total em cada eixo dos veículos [4].....	20
Figura 3.3- Padrão usado para representar as dimensões dos veículos [4].....	20
Figura 3.4- Histograma refinado de peso - O2C [4].....	22
Figura 3.5- Histograma refinado de peso – O3C [4]	22
Figura 3.6- Histograma refinado de peso – 2C[4]	22
Figura 3.7- Histograma refinado de peso – 3C[4].....	22
Figura 3.8 - Histograma refinado de peso- 2S2[4]	22
Figura 3.9- Histograma refinado de peso- 2S3[4]	22
Figura 3.10-Trem-tipo [5].....	23
Figura 3.11- Características do TB-45[5].....	23
Figura 3.12- Características do HL-93 [2].....	24
Figura 4.1- Seção mista aço-concreto[8]	26
Figura 4.2- Flambagem local da mesa inferior e flambagem lateral com distorção da seção [7].....	27
Figura 5.1- Seção transversal da ponte.....	32
Figura 5.2- Vista da ponte em planta.....	32
Figura 5.3 – Variação da seção transversal ao longo do vão.....	33
Figura 5.4 – Seção transversal da barreira lateral.....	34
Figura 5.5 – Seção transversal da laje de concreto	34
Figura 5.6 – Seção transversal dos perfis das longarinas	35
Figura 5.7 – Perfil das diagonais	36
Figura 5.8- Perfil dos banzos.....	36

Figura 5.9 – Exemplo de seção mista aço-concreto	37
Figura 5.10 – Exemplo de seção equivalente	38
Figura 5.11- Seção homogeneizada da longarina.....	38
Figura 5.12- Seção homogeneizada do diafragma.....	39
Figura 5.13 – Malha de elementos finitos para o modelo de grelha.....	39
Figura 5.14 – Linha de influência de repartição transversal para o modelo de grelha...	41
Figura 5.15 – Carregamento da linha de influência com o trem-tipo.....	41
Figura 5.16 – Lanes criadas para a passagem do trem-tipo.....	42
Figura 5.17 – Bridge Wizard	43
Figura 5.18- Malha de elementos finitos para o modelo refinado.....	44
Figura 5.19 – Modelo tridimensional	44
Figura 5.20 - Linha de influência de repartição transversal para o modelo refinado	46
Figura 5.21 – Configuração de pista utilizada para a passagem dos veículos reais	46
Figura 5.22 –Lanes criadas para a passagem dos veículos reais	47
Figura 5.23 – Gráfico Frequência x Excentricidade do veículo em relação ao centro da faixa	50
Figura 6.1 – Diagrama de momentos fletores.....	54
Figura 6.2 – Deformada da estrutura	55
Figura 6.3 – Diagrama de momentos fletores nas vigas.....	55
Figura 6.4 – Diagrama de esforço normal longitudinal na laje	56
Figura 6.5 – Diagrama de esforço normal na viga	56
Figura 6.6 – Deformada da estrutura	57
Figura 6.7 – Esquema para a obtenção do momento total na viga	58

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Parâmetros das curvas S-N para cada classe	15
Tabela 3.1- Classe dos veículos rodoviários da base do DNIT [4]	20
Tabela 3.2- Valores usados das dimensões dos veículos[4].....	21
Tabela 3.3 – Freqüências associadas aos pesos dos veículos[4]	21
Tabela 3.4- Cargas dos veículos [5]	23
Tabela 5.1- Propriedades dos materiais	32
Tabela 5.2- Propriedades geométricas dos perfis das longarinas	35
Tabela 5.3- Propriedades dos perfis das diagonais e banzos.....	36
Tabela 5.4 - Tabelas extraída de [2] para cálculo do número de ciclos N.....	51
Tabela 6.1 - Resultados para os modelos de grelha e refinado.....	59
Tabela 6.2 – Resultados da análise da fadiga para o veículo normatizado – Classe B ..	59
Tabela 6.3 – Resultados da análise da fadiga para o veículo normatizado – Classe C ..	59
Tabela 6.4 - Resultados da análise da fadiga para o veículo normatizado – Classe D...	60
Tabela 6.5 – Resultados para veículos centrados em duas faixas	60
Tabela 6.6 – Resultados para veículos centrados em uma faixa	60
Tabela 6.7 - Resultados para veículos excêntricos em uma faixa	60
Tabela 6.8 - Resultados para veículos centrados em duas faixas ($N=1,5 \times 10^6$ [2])	61

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma análise da vida útil à fadiga de uma ponte mista em aço-concreto segundo o critério normativo e também levando em consideração o espectro de veículos que circulam nas rodovias federais brasileiras.

Para o cálculo dos esforços solicitantes produzidos, será utilizado um modelo numérico tridimensional constituído de elementos de placa e de pórtico. A determinação do dano causado pelas variações de tensões produzidas pela passagem dos veículos será feita segundo a regra de Palmgren-Miner e utilizando-se as curvas S-N.

2. FADIGA

2.1 DEFINIÇÃO

De acordo com MOURA BRANCO *et al.* [1], tem-se a seguinte definição para o fenômeno da fadiga:

“Fadiga é um processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado, que ocorre em um material sujeito a condições que produzem tensões dinâmicas em um ponto ou em vários pontos, e que podem culminar em trincas ou em uma fratura completa após um número suficiente de variações de carga”.

A fadiga de um material é a falha mais comum dentre as diferentes causas de falha de componentes mecânicos [1]. O surgimento deste fenômeno está relacionado com a atuação de cargas de natureza cíclica sobre uma estrutura, que por sua vez geram deformações plásticas em certos pontos da mesma, dando origem posteriormente a defeitos como trincas, e, quando estas não são devidamente tratadas, podem crescer até atingirem um tamanho crítico, levando a estrutura à sua ruptura final. Esta ruptura final caracteriza-se pela sua fragilidade, geralmente ocorrendo de maneira abrupta, pois a geração bem como a propagação destas trincas não provoca mudanças evidentes no comportamento estrutural em questão, não gerando assim nenhum aviso prévio de fratura.

Este processo pode ser resumido basicamente em quatro etapas:

- 1) Nucleação da trinca
- 2) Crescimento da trinca
- 3) Propagação da trinca
- 4) Ruptura final

É importante ressaltar que para peças soldadas, como as vigas abordadas neste trabalho, são desconsideradas as duas primeiras etapas, uma vez que estas já possuem trincas na forma de defeitos oriundos do processo de fabricação das mesmas, como a soldagem.

Uma estrutura que se encontra submetida a um carregamento cíclico poderá ter o aparecimento das trincas em um ponto de tensão máxima. Se houver pontos de

concentração de tensões na estrutura, como descontinuidades ou orifícios, por exemplo, e estes estiverem em região de tensão máxima de tração, a propagação da trinca poderá se desenvolver de maneira muito mais rápida, podendo, assim, levar a estrutura à ruptura por fadiga precocemente.

Pode-se dizer que a fadiga constitui um estado limite peculiar, pois este é um estado limite de serviço (ELS) que pode levar à ruína do material (ELU – estado limite último).

2.2 EFEITO DA FADIGA EM PONTES

A estrutura de uma ponte, ao longo de sua vida útil, sofre diversas ações provenientes de carregamentos cíclicos, tais como a carga móvel dos veículos e a ação do vento em variadas direções. A variação de tensões decorrentes destas ações, mesmo para valores inferiores à tensão limite de escoamento do material, é responsável pelo surgimento de danos nas pontes, o que vem a ser de fato o efeito da fadiga nas mesmas [1].

A cada passagem de veículos ocorre uma variação de tensões em relação ao estado de tensões permanente da ponte. Além disso, dependendo de certas condições, a ponte pode desenvolver vibrações durante e após o período de atuação do carregamento, como mostra a Figura 2.1.

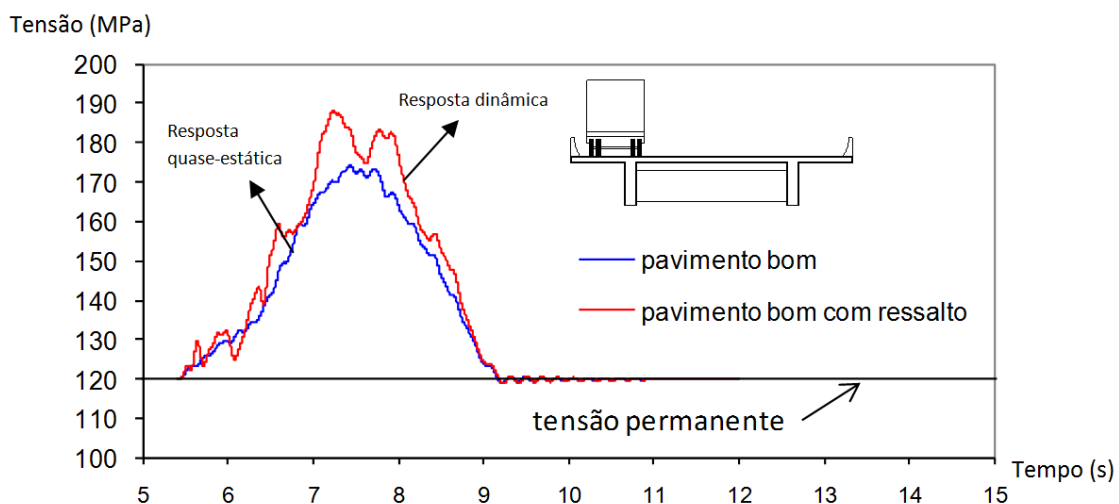


Figura 2.1-Variação do estado de tensões

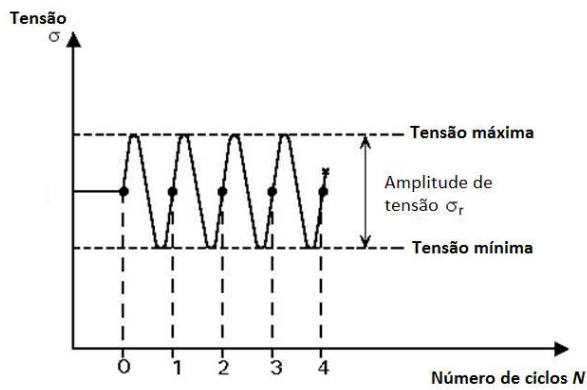


Figura 2.2 - Variação de tensões com amplitude constante

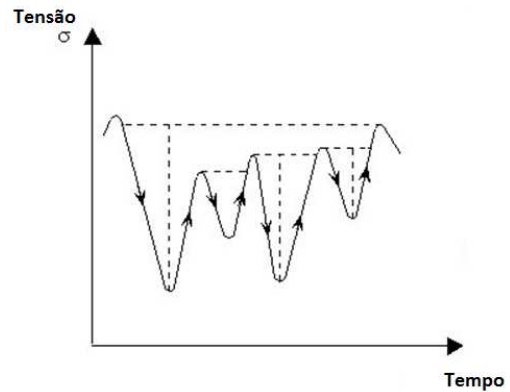


Figura 2.3 - Variação de tensões com amplitude variável

No caso de uma resposta quase-estática, dependendo do ponto onde se está observando as tensões e o tipo de veículo que trafega na ponte, tem-se para cada evento de carregamento apenas a geração de um ciclo de tensões $\Delta\sigma$, como ilustrado na Figura 2.2. Já para uma resposta dinâmica, contam-se muitos ciclos de tensões, de menor amplitude, acoplados à variação $\Delta\sigma$, conforme ilustrado na Figura 2.3.

Alguns fatores determinam o tipo de resposta da ponte à passagem do veículo, tais como:

- As características dinâmicas da estrutura, como frequências naturais e de amortecimento;
- As características dinâmicas do veículo;
- As condições de rugosidade do pavimento;
- A existência de descontinuidades, tais como ressaltos no pavimento.

O conhecimento deste número de ciclos de tensão é de extrema importância para a análise e estimativa da vida útil deste sistema estrutural. Para isto, calcula-se o valor do dano D causado à estrutura por unidade de tempo, o qual baseia-se na variação das tensões ao longo do tempo e no número de ciclos de tensão N necessários para o início da fratura, obtido com auxílio da Curva S-N (*Stress x Number of cycles*). Seguem nos itens 2.4 e 2.5 detalhes e esclarecimentos para a realização destes cálculos.

Neste trabalho, a estimativa da vida útil de uma ponte será feita com base no cálculo do efeito da fadiga nos perfis metálicos soldados que compõem as longarinas da mesma.

2.3 EFEITO DA FADIGA EM PERFIS METÁLICOS SOLDADOS

Na análise de perfis metálicos soldados, que fazem parte do escopo deste trabalho, o fenômeno da fadiga se mostra predominante nas regiões de solda, que são regiões que concentram tensões [1]. Estas regiões, que apresentam redução na resistência à fadiga quando comparada à resistência do metal base, concentram tensões devido às descontinuidades geométricas e imperfeições geradas no processo de soldagem, a partir dos quais se desenvolvem as trincas.

Outro fator predominante no efeito da fadiga é o acabamento superficial, uma vez que quanto mais lisa e regular é uma superfície, menor o efeito da fadiga sobre a mesma. No caso das soldas, as superfícies irregulares e rugosas oriundas do processo de soldagem contribuem para a concentração de tensões e conseqüente propagação das trincas.

Estas trincas, no caso de perfis emendados com solda de topo, que é o caso das vigas da ponte analisadas neste trabalho, geralmente se propagam numa direção normal à direção da tensão principal. A Figura 2.4 mostra a propagação de uma trinca em uma junta soldada.

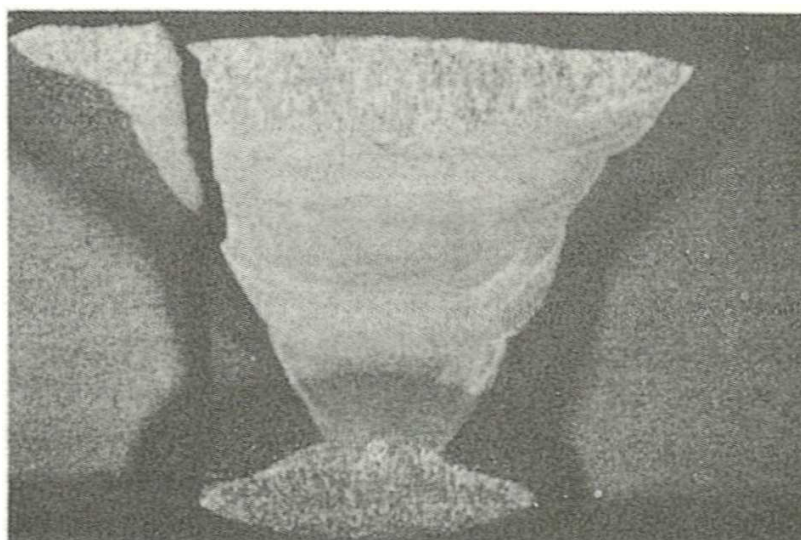


Figura 2.4 - Detalhe de uma trinca em uma junta soldada de topo [1]

2.4 CURVA S-N

O instrumento utilizado na avaliação dos efeitos de fadiga que apresenta uma relação quantitativa entre a amplitude da variação de tensão e o número de ciclos que causam a fratura por fadiga da estrutura é a chamada curva S-N, ou curva tensão-número de ciclos. Também conhecida como curva de Wöhler, esta é determinada através de ensaios experimentais utilizando diversos corpos de prova submetidos à variação de tensão. Um corpo de prova é submetido a uma amplitude de tensão constante a cada ciclo, como mostrado na Figura 2.2. Para cada valor de amplitude de tensão aplicada, computa-se o número N de ciclos que o leva à ruptura.

Para a determinação desta curva é importante que sejam utilizados diversos corpos de prova, devido ao fato destes apresentarem variações microestruturais do material, de modo que os dados experimentais dos ensaios sejam representativos e possam refletir com uma menor incerteza os resultados que darão origem às curvas.

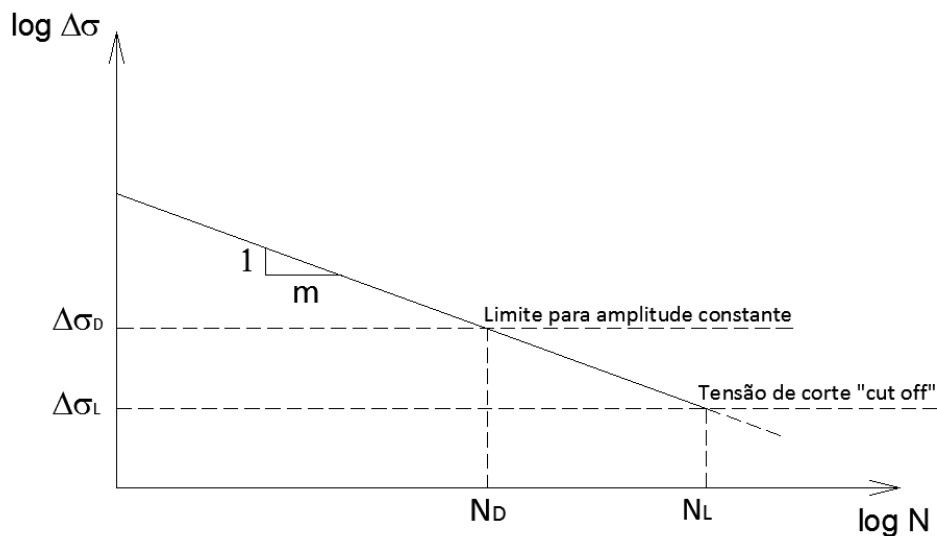


Figura 2.5 – Formato das curvas S-N (adotado pelas normas americanas e brasileiras)

Cada curva de resistência à fadiga, conforme ilustrado na Figura 2.5, é definida convencionalmente com inclinação constante, em geral 1:3, que é o melhor ajuste de reta obtido quando se considera uma grande variedade de detalhes estruturais testados quanto aos efeitos da fadiga.

Os diversos detalhes são reunidos em categorias associadas a uma determinada curva S-N. Estas categorias são designadas por letras, nas normas americanas e brasileiras, e pelo valor $\Delta\sigma_C$ nas normas européias.

Se a variação de tensões imposta pelo carregamento for de amplitude constante (Figura 2.2) um número infinito de ciclos poderá ocorrer sem a ruptura, se esta amplitude for menor do que $\Delta\sigma_D$. Portanto, $\Delta\sigma_D$ é a resistência limite de fadiga nos casos em que a variação de tensão tem amplitude constante. O número de ciclos N_D correspondente a esta condição varia conforme a categoria do detalhe a ser verificado, variando entre 2×10^6 a 10×10^6 ciclos.

Se o carregamento impõe variações de tensões de amplitude não constante, o uso da curva S-N no formato da Figura 2.5 (adotado nas normas americanas e brasileiras) obriga o cálculo dos danos correspondentes a todas as amplitudes das variações de tensões aplicadas, mesmo as de magnitudes inferiores a $\Delta\sigma_D$.

Ainda no caso de variações de tensões de amplitude não constante, se todas as magnitudes $\Delta\sigma$ forem menores do que $\Delta\sigma_L$, o número de ciclos para ruptura é “infinito”. A resistência $\Delta\sigma_L$ é chamada de tensão de corte (*cut off limit*). A norma AASHTO [2] indica $\Delta\sigma_L = \Delta\sigma_D/2$.

As normas européias utilizam um formato mais refinado para as curvas S-N, mostrado na Figura 2.6. A diferença está na presença de uma reta com inclinação maior do que 1:3 entre $\Delta\sigma_L$ e $\Delta\sigma_D$. Como citado anteriormente, as categorias segundo as normas européias são divididas de acordo com o valor de $\Delta\sigma_C$, sendo assim este o valor de referência da curva correspondente ao detalhe a ser verificado.

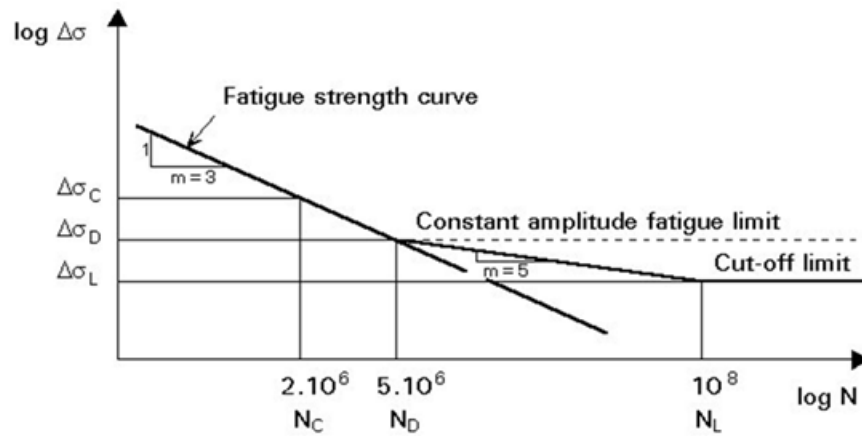


Figura 2.6 – Curva S-N normalizada [3]

A equação de cada trecho da curva S-N pode ser representada da forma ilustrada na Figura 2.7.

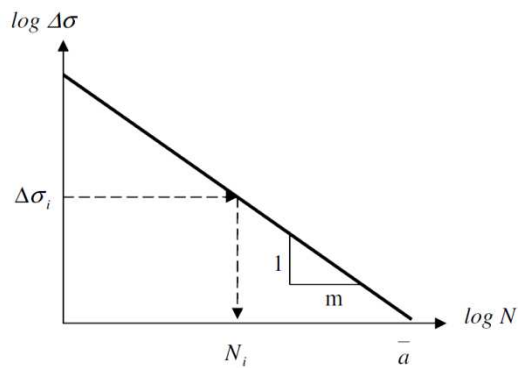


Figura 2.7-Trecho de uma curva S-N [3]

O comportamento estrutural de um elemento sob efeitos de fadiga pode ser representado pela curva da Figura 2.7, definida pela relação:

$$\log N = \log \bar{a} - m \times \log \Delta\sigma$$

Ou:

$$N = \bar{a} \times \Delta\sigma^{-m}$$

Ou ainda:

$$\Delta\sigma = \left(\frac{\bar{a}}{N}\right)^m$$

Onde,

- N é o número de ciclos que leva à ruptura estrutural;
- m é o inverso da inclinação negativa da curva S-N;
- $\log(\bar{a})$ é o ponto que intercepta o eixo das abscissas.

Os parâmetros m e $\log(\bar{a})$ dependem da classificação da curva S-N característica do detalhe estrutural adotado.

A Figura 2.8 mostra as curvas S-N de projeto, adotadas pela norma americana AASHTO [2] para detalhes metálicos soldados. Estes detalhes são divididos em classes, que se caracterizam pelas propriedades geométricas da solda, pela direção da tensão aplicada, meio ambiente ao qual a junta está exposta e método de fabricação.

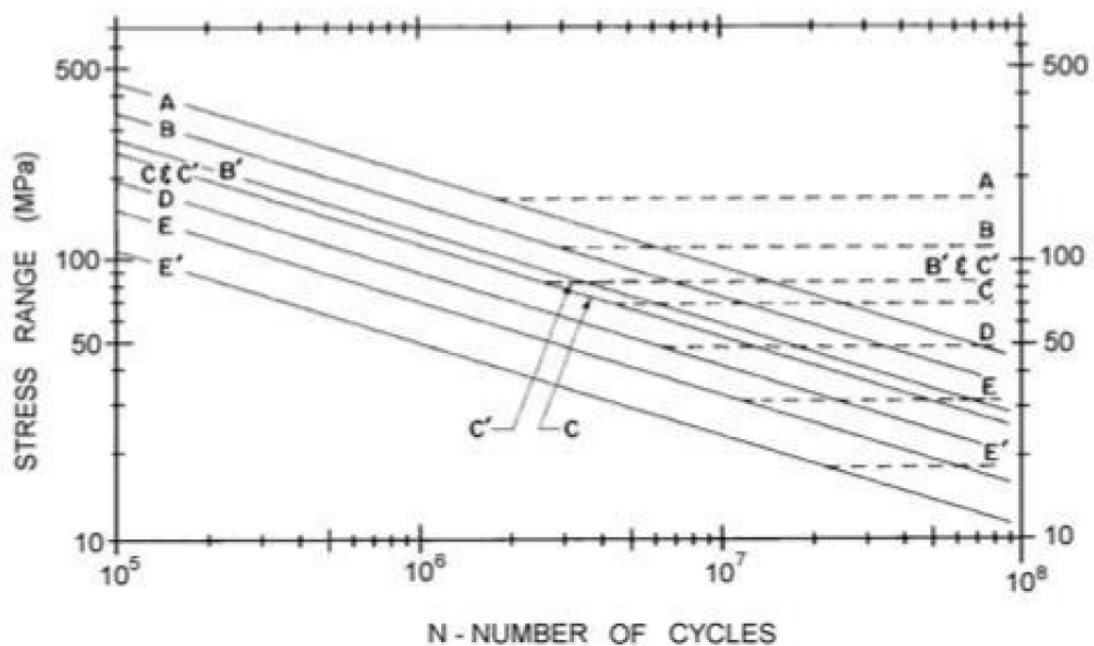


Figura 2.8- Curva S-N de projeto para o aço exposto ao ar [2]

Na Tabela 2.1, cujos valores foram extraídos da referida norma, apresentam-se os valores dos parâmetros para cada classe e na Figura 2.9 estão ilustrados alguns exemplos de detalhes, também extraídos da AASHTO [2], pertinentes a este trabalho.

Tabela 2.1- Parâmetros das curvas S-N para cada classe

CLASSE	\bar{a} ($\times 10^{11}$)	m	$\Delta\sigma_D$
A	82,0 MPa ³	3	165,0 MPa
B	39,3 MPa ³	3	110,0 MPa
B'	20,0 MPa ³	3	82,7 MPa
C	14,4 MPa ³	3	69,0 MPa
C'	14,4 MPa ³	3	82,7 MPa
D	7,21 MPa ³	3	48,3 MPa
E	3,61 MPa ³	3	31,0 MPa
E'	1,28 MPa ³	3	17,9 MPa

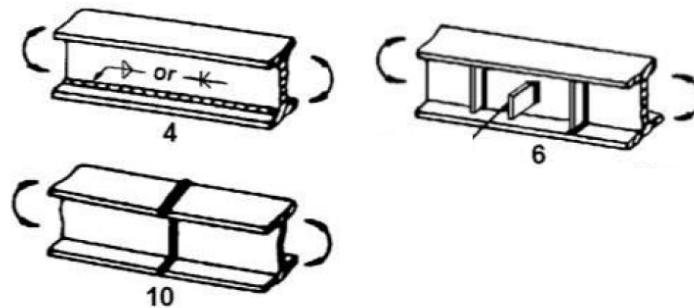


Figura 2.9 – Exemplos de detalhes referentes a este trabalho: Solda da mesa inferior com a alma (B); solda do enrijecedor transversal (C); solda de topo entre os perfis (B).[2]

2.5 REGRA DE PALMGREN-MINER

Como visto anteriormente, o número N de ciclos de tensão capaz de levar a estrutura à ruptura por fadiga é obtido com auxílio da Curva S-N. Este número N , juntamente ao número de ciclos n de tensão aplicado, são variáveis relacionadas pela regra de Palmgren-Miner [1].

A regra de Palmgren-Miner é uma regra linear proposta com o objetivo de se calcular o dano D de fadiga, provocado pelos ciclos de variação de tensão, e acumulado de forma linear segundo a razão:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i}$$

O fenômeno dos danos D acumulados, ou seja, a deterioração da resistência de um material sob aplicação de uma tensão cíclica, expressa pela fórmula apresentada, é válida para condições de carga de amplitude não apenas constante como também variável [1]. Esta razão resulta na fração de vida gasta pela ação de ciclos de tensão aplicados a um determinado nível de amplitude. Este dano acumula-se desde o início até o fim da vida de um componente.

O critério adotado para o uso da regra de Miner diz que quando se obtém um valor de D maior do que 1, para os ciclos de tensão previstos, considera-se que a ruptura ocorrerá no decorrer da vida útil da estrutura, sendo assim, deverão ser tomadas providências para se aumentar a resistência à fadiga desta.

A vida útil de um sistema estrutural à fadiga, considerando-se certa unidade de tempo, é tomada como o inverso do valor do dano acumulado por essa unidade, sendo expressa por:

$$VU = \frac{1}{D}$$

De posse deste valor, é possível se ter uma estimativa de tempo até que a estrutura sofra colapso por conta do fenômeno da fadiga. Esta estimativa se torna um instrumento indispensável para a previsão de danos à estrutura e, assim, a possibilidade da adoção de medidas preventivas para evitá-los antes que estes aconteçam.

3. VEÍCULOS REAIS E CARREGAMENTOS DE PROJETO

3.1 EVOLUÇÃO DOS VEÍCULOS

Com o passar dos anos, o desenvolvimento da malha viária no Brasil, caracterizado por novas configurações dos veículos, acarretou um acréscimo de peso bruto destes e um aumento no volume de tráfego [4].

Para acompanhar o desenvolvimento e as modificações que este causaria, a então norma brasileira de cargas móveis para pontes rodoviárias NB 6 (1960), passou por revisões que resultaram no aumento do peso dos veículos-tipo, a fim de se acompanhar este desenvolvimento. Foram substituídos os veículos-tipo de 12, 24 e 36 toneladas pelos veículos de 12, 30 e 45 toneladas, que são os veículos-tipo da norma para cargas móveis em pontes rodoviárias em vigor atualmente, NBR-7188 [5], que, contudo, foi revista em 1982. O valor da carga de multidão, que acompanha o veículo-tipo para simular o efeito da passagem simultânea de veículos na ponte, também foi aumentado.

Apesar de modificado o peso dos veículos, a configuração destes foi mantida. Tratam-se de veículos com 2 ou 3 eixos, com 6 metros de comprimento e 3 metros de largura, copiados das antigas normas alemães que foram responsáveis pela criação destas configurações. Na época destas precursoras normas, foram feitas tabelas para auxiliar no cálculo de um dimensionamento rápido e relativamente preciso de pontes ou viadutos com a configuração destes veículos-tipo e suas respectivas cargas de multidão, que corresponderiam a um tanque de guerra e à cavalaria, entre outras cargas móveis que poderiam estar em volta do tanque. Daí é que vem a explicação de como essas configurações foram concebidas, pois na época da guerra os alemães precisavam fazer pontes e viadutos o mais rápido possível para que seus exércitos pudessem se mover em território nacional, por isso foram desenvolvidos os ábacos e as normas capazes de agilizar os projetos de pontes e viadutos.

Hoje em dia, com o avanço da tecnologia e dos programas de computador, como os de análise de estruturas por elementos finitos, não se faz mais necessário o uso destes ábacos, pois os cálculos, como análises de envoltórias em vigas, por exemplo, podem hoje ser feitos de maneira muito mais rápida utilizando-se um software de análise

estrutural, sendo assim dispensada a necessidade de se manter tal configuração para qualquer simplificação nos cálculos.

Uma estrutura projetada de acordo com a norma é considerada segura, tendo-se em vista que os coeficientes de segurança foram determinados por meio de métodos probabilísticos, a fim de garantir pequena probabilidade de falha. Com a ausência de dados estatísticos sobre as ações provenientes de veículos reais em uma estrutura, utilizam-se carregamentos idealizados, como o caso do carregamento de projeto da norma NBR-7188 [5], e coeficientes de segurança determinados a partir de distribuições estatísticas idealizadas.

3.2 VEÍCULOS REAIS

3.2.1 CLASSES DE VEÍCULOS

Devido às diversas configurações apresentadas pelos veículos que compõem a malha viária brasileira, foram criadas classes para facilitar a identificação dos mesmos. Para se fazer referência a um determinado tipo de veículo, utiliza-se uma nomenclatura especial que o identifica no universo destas configurações [4].

Um veículo é denominado *simples* ou *monolítico* quando é formado por somente uma parte, como ônibus ou caminhões. Quando o veículo é formado por duas ou mais partes este é denominado *composto*. Além destas, existem outras informações sobre o veículo que devem ser apresentadas, como o tipo de conexão entre as partes do veículo e a configuração dos seus eixos. Dentre as possibilidades de conexão entre as partes do veículo, estão as do tipo semi-reboque e reboque.

A nomenclatura, usada por órgãos rodoviários, como os DERs e o antigo DNER, utilizada para se classificar estes veículos, é expedita. São representados pela letra C os veículos monolíticos e as ligações do tipo reboque, enquanto que as do tipo semi-reboque são representadas pela letra S. Tratando-se de um veículo monolítico, sendo este um ônibus ou caminhão, a nomenclatura rodoviária é da seguinte maneira: XC, onde X representa o número de eixos do veículo. No caso dos caminhões, necessitam-se de mais números posteriores à letra, a fim de se caracterizar os eixos da carreta [4].

Em linhas gerais, a nomenclatura é uma combinação de números e letras, geralmente intercalados, que indicam configurações da dianteira para a traseira do veículo [4].

A nomenclatura atualmente utilizada pelo atual órgão rodoviário, o DNIT, contém informações adicionais com relação ao padrão rodoviário geral.

3.2.2 DADOS DOS VEÍCULOS

A seguir, será apresentado o espectro de veículos utilizado para os cálculos realizados neste trabalho, totalizando seis veículos. Dentre estes estão ônibus, caminhões e reboques.

Os histogramas relacionando as frequências pelos pesos dos veículos foram retirados [4] de uma base de dados fornecida por um posto de monitoramento localizado no Espírito Santo, na altura do quilômetro 26 da rodovia federal BR-101.



Figura 3.1- Classificação dos veículos [4]

Tabela 3.1- Classe dos veículos rodoviários da base do DNIT [4]

Tipo de veículo	Classes de veículos
Leves	Automóveis
Utilitários	Utilitários
Ônibus	O2C, O3C, O4CD
Caminhões	2C, 3C, 4C, 4CD, 2C2, 2C3, 3C2 e 3C3
Semi-reboques	2S1, 2S2, 2I2, 2S3, 2I12, 2I3, 3S1, 3S2, 3I2, 3S3, 3I12, 3I3, 7rod, 8rod, 9rod
Outros	Outros

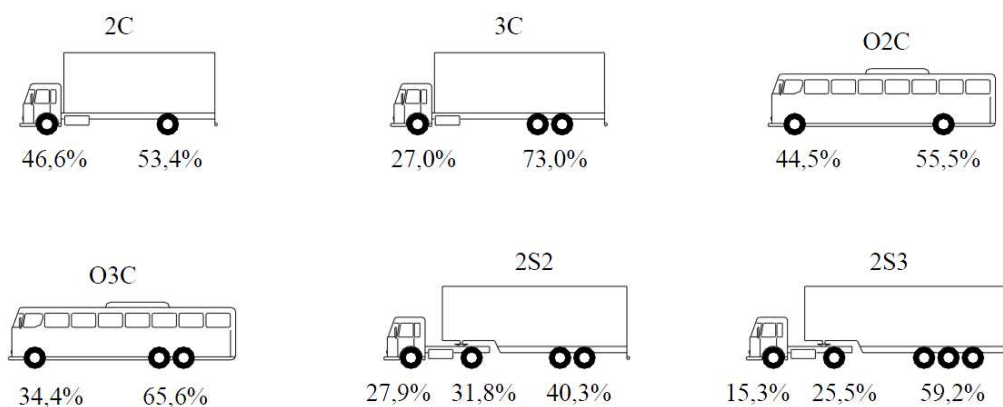


Figura 3.2- Percentuais do peso total em cada eixo dos veículos [4]

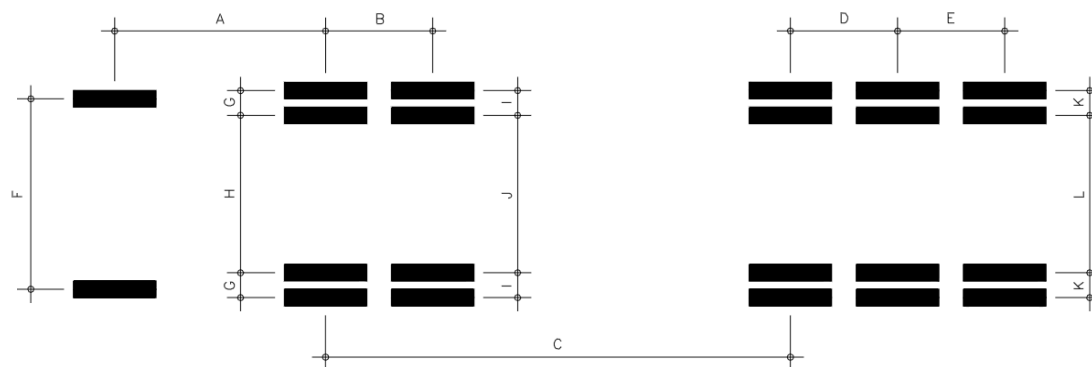


Figura 3.3- Padrão usado para representar as dimensões dos veículos [4]

Tabela 3.2- Valores usados das dimensões dos veículos[4]

Veículo	Dimensões médias (m)											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
O2C	5,9	-	-	-	-	1,9	0,3	1,5	-	-	-	-
O3C	6,0	1,3	-	-	-	2,0	-	1,8	0,3	1,5	-	-
2C	4,0	-	-	-	-	1,8	0,3	1,4	-	-	-	-
3C	4,8	1,3	-	-	-	1,9	0,3	1,5	0,3	1,8	-	-
2S2	3,9	-	8,6	1,3	-	2,0	0,3	1,5	-	-	0,3	1,7
2S3	3,9	-	5,9	1,3	1,3	2,0	0,3	1,5	-	-	0,3	1,6

Tabela 3.3 – Freqüências associadas aos pesos dos veículos[4]

CLASSE	PESO	FREQÜÊNCIA	CLASSE	PESO	FREQÜÊNCIA	CLASSE	PESO	FREQÜÊNCIA
O2C	22,3 kN	0,093%	O3C	22,3 kN	0,011%	2C	22,3 kN	7,790%
O2C	66,9 kN	1,305%	O3C	66,9 kN	0,313%	2C	66,9 kN	12,179%
O2C	116,0 kN	5,090%	O3C	116,0 kN	2,605%	2C	116,0 kN	2,526%
O2C	150,0 kN	0,260%	O3C	158,0 kN	1,627%	2C	150,0 kN	0,099%
O2C	164,0 kN	0,087%	O3C	183,0 kN	0,245%	2C	164,0 kN	0,085%
O2C	173,0 kN	0,015%	O3C	198,0 kN	0,175%	2C	173,0 kN	0,016%
O2C	180,0 kN	0,020%	O3C	207,0 kN	0,032%	2C	180,0 kN	0,042%
O2C	195,0 kN	0,031%	O3C	217,0 kN	0,191%	2C	195,0 kN	0,034%
O2C	218,0 kN	0,018%	O3C	229,0 kN	0,050%	2C	218,0 kN	0,014%
O2C	263,0 kN	0,016%	O3C	263,0 kN	0,237%	2C	263,0 kN	0,010%
O2C	332,0 kN	0,020%	O3C	332,0 kN	0,027%	2C	332,0 kN	0,003%
O2C	386,0 kN	0,008%	O3C	386,0 kN	0,001%	2C	386,0 kN	0,000%
O2C	446,0 kN	0,008%	O3C	446,0 kN	0,000%	2C	446,0 kN	0,000%
CLASSE	PESO	FREQÜÊNCIA	CLASSE	PESO	FREQÜÊNCIA	CLASSE	PESO	FREQÜÊNCIA
3C	22,3 kN	0,165%	2S2	22,3 kN	0,005%	2S3	22,3 kN	0,000%
3C	66,9 kN	11,021%	2S2	66,9 kN	0,111%	2S3	66,9 kN	0,037%
3C	116,0 kN	9,044%	2S2	116,0 kN	2,948%	2S3	116,0 kN	1,250%
3C	150,0 kN	10,934%	2S2	158,0 kN	1,268%	2S3	158,0 kN	0,882%
3C	164,0 kN	6,907%	2S2	190,0 kN	0,696%	2S3	190,0 kN	0,798%
3C	173,0 kN	1,524%	2S2	218,0 kN	0,440%	2S3	218,0 kN	0,575%
3C	180,0 kN	0,314%	2S2	263,0 kN	0,330%	2S3	263,0 kN	2,644%
3C	195,0 kN	0,402%	2S2	309,0 kN	0,026%	2S3	332,0 kN	8,451%
3C	218,0 kN	0,319%	2S2	338,0 kN	0,011%	2S3	386,0 kN	1,519%
3C	263,0 kN	0,186%	2S2	362,0 kN	0,004%	2S3	404,0 kN	0,143%
3C	332,0 kN	0,097%	2S2	376,0 kN	0,002%	2S3	426,0 kN	0,875%
3C	386,0 kN	0,002%	2S2	392,0 kN	0,003%	2S3	463,0 kN	0,451%
3C	446,0 kN	0,001%	2S2	446,0 kN	0,003%	2S3	490,0 kN	0,172%
TOTAL						2S3	508,0 kN	0,076%
O2C	O3C	2C	3C	2S2	2S3	2S3	526,0 kN	0,060%
6,97%	5,51%	22,80%	40,92%	5,85%	17,95%	2S3	549,0 kN	0,021%

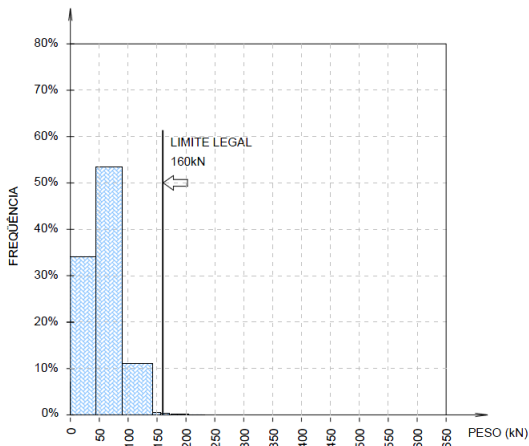


Figura 3.4- Histograma refinado de peso - O2C [4]

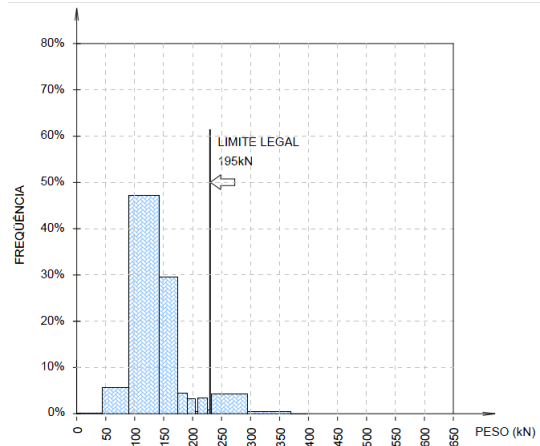


Figura 3.5- Histograma refinado de peso - O3C [4]

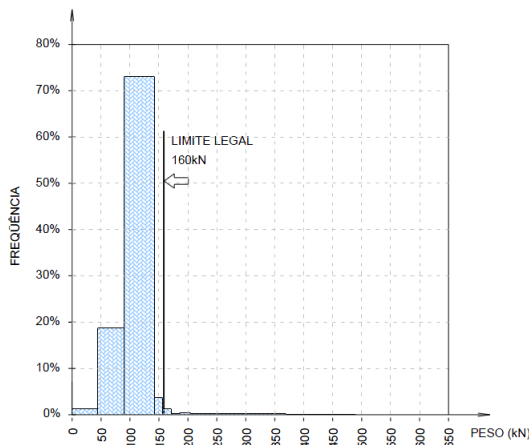


Figura 3.6- Histograma refinado de peso - 2C[4]

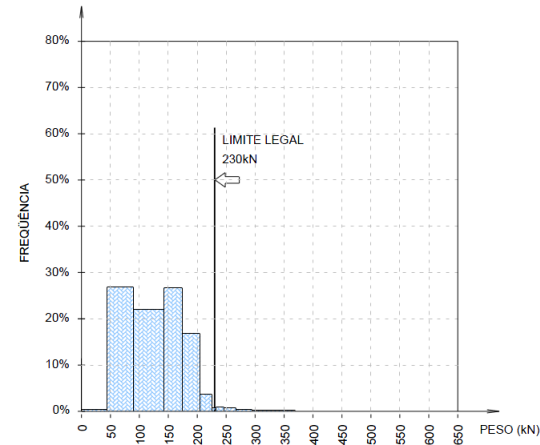


Figura 3.7- Histograma refinado de peso - 3C[4]

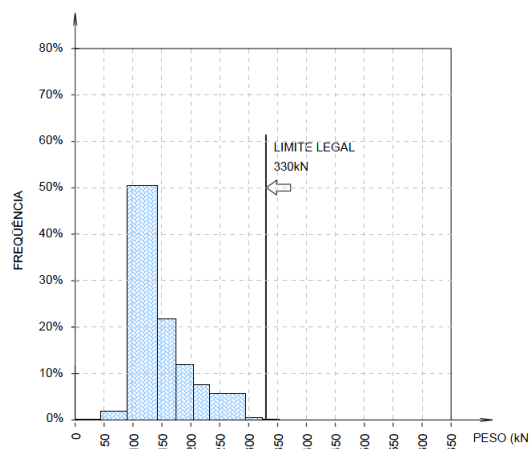


Figura 3.8 - Histograma refinado de peso - 2S2[4]

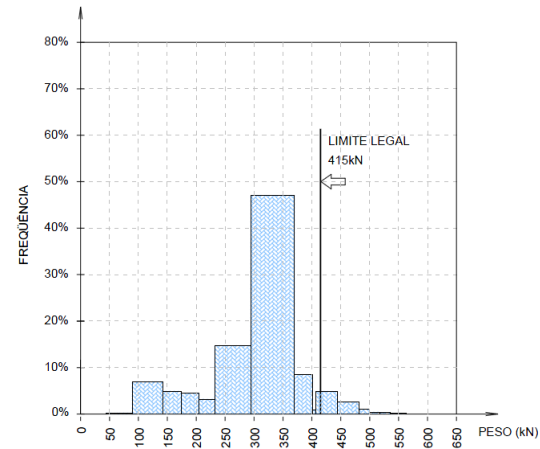


Figura 3.9- Histograma refinado de peso - 2S3[4]

3.3 VEÍCULOS DE PROJETO

3.3.1 TREM TIPO DA NBR-7188 [5]

Da norma NBR-7188 [5], constam três classes de veículo-tipo, nomeadas de acordo com os respectivos pesos brutos em toneladas, sendo estas 12, 30 e 45, conforme a Tabela 3.4. Além do peso do veículo, cada classe está associada a um valor de carga uniformemente distribuída no entorno deste, de acordo com a Tabela 3.4 e a Figura 3.10.

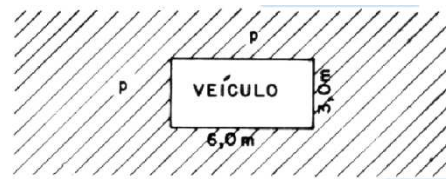


Figura 3.10-Trem-tipo [5]

Neste trabalho, a classe utilizada será a 45. O trem tipo será, então, composto por um veículo que pesa 450 kN, com três eixos equidistantes de 1,50 m e carga distribuída associada de 5 kN/m². A Figura 3.11 apresenta a configuração do TB-45.

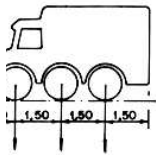
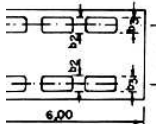
IPOS 45 E 30		Undade	Tipo 45
	Quantidade de eixos	Eixo	3
	Peso total de veículo	kN-t	450-45
	Peso de cada roda dianteira	kN-t	75-7,5
	Peso de cada roda traseira	kN-t	75-7,5
	Peso de cada roda intermediária	kN-t	75-7,5
	Largura de contato b_1 de cada roda dianteira	m	0,50
	Largura de contato b_2 de cada roda traseira	m	0,50
	Largura de contato b_3 de cada roda intermediária	m	0,50
	Comprimento de contato de cada roda	m	0,20
	Área de contato de cada roda	m ²	$0,20 \times b$
	Distância entre eixos	m	1,50
	Distância entre os centros de roda de cada eixo	m	2,00

Figura 3.11- Características do TB-45[5]

3.3.2 VEÍCULO DE PROJETO DA AASHTO [2]

O veículo de projeto, denominado HL-93, da norma americana AASHTO [2] apresenta as seguintes características, ilustradas na Figura 3.12.

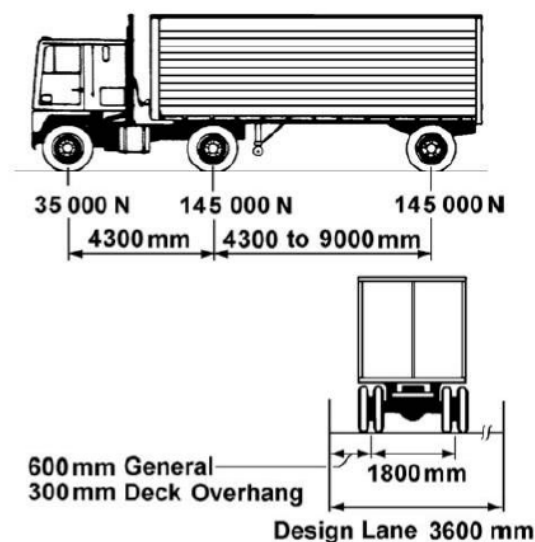


Figura 3.12- Características do HL-93 [2]

Conforme o item 3.6.1.4 da referida norma, para a análise da fadiga o veículo deverá ter espaçamento de 9 m entre os eixos de 145 kN. O coeficiente que leva em conta os efeitos dinâmicos da passagem deste veículo é determinado de acordo com o item 3.6.2.1-1 da mesma, sendo este considerado 1,15 para a avaliação da fadiga.

Este veículo foi considerado no presente trabalho para fazer a consideração dos efeitos de fadiga para um veículo normatizado, uma vez que a NBR-7188 [5] não prevê um veículo específico para esta análise. A única menção feita nas normas brasileiras sobre carregamento para análise de fadiga encontra-se na norma NBR-6118 [6] para utilização em pontes rodoviárias de concreto. Para este caso, a mesma apresenta critérios para verificação de fadiga no concreto e nas barras da armadura embebidas no concreto.

4. SISTEMA ESTRUTURAL

4.1 PONTES MISTAS EM AÇO-CONCRETO

As primeiras pontes mistas em aço-concreto começaram a surgir a partir da época da segunda guerra mundial, por volta da década de 1940. Estas pontes são constituídas por tabuleiro em concreto armado e vigas metálicas, podendo estas ser em perfil laminado, soldado ou caixão.

A idéia principal de se utilizar este tipo de sistema estrutural é a de se aproveitar o máximo de cada material, no qual cada um dos elementos estaria trabalhando desempenhando sua melhor função: o aço resistindo à tração e o concreto resistindo à compressão.

4.1.1 INTERAÇÃO AÇO-CONCRETO

No começo da utilização deste sistema estrutural, não se considerava no cálculo das pontes a interação entre a laje de concreto e as vigas metálicas, não se levando em conta a participação da laje no trabalho da viga [7].

Os responsáveis por fazer esta interação acontecer são os conectores de cisalhamento, que são dispositivos mecânicos que garantem o trabalho conjunto da viga de aço com a laje em concreto. Estes conectores absorvem os esforços cisalhantes horizontais paralelos ao eixo da laje produzidos na interface da mesma com a mesa superior do perfil de aço, evitando ainda a separação física dos dois elementos. Desta maneira, os elementos não trabalham isoladamente à flexão, de forma que, conectados, são analisados como uma seção mista em aço-concreto, cuja largura em concreto a ser considerada na interação com cada perfil de aço, denominada largura efetiva, é determinada de acordo com a norma NBR-8800 [8], conforme a Figura 4.1.

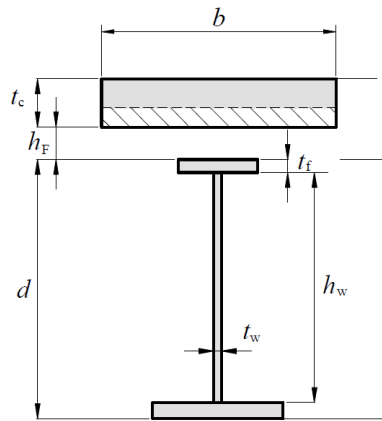


Figura 4.1- Seção mista aço-concreto[8]

Dessa forma, tem-se que na seção mista, para uma condição ideal, a linha neutra se localiza no perfil metálico. Sendo assim, quando esta seção é solicitada por um momento fletor positivo, a laje só trabalha à compressão, enquanto que a viga metálica absorve os esforços de tração mais uma parcela de compressão. Para a laje de concreto, é ideal que esta só trabalhe à compressão, uma vez que a resistência do concreto à compressão é da ordem de dez vezes maior que à tração. Já para a viga metálica, as resistências à tração e à compressão do aço não se diferenciam tanto quanto as do concreto, porém o fato do perfil estar parcialmente comprimido pode gerar instabilidade, fazendo-se necessárias verificações quanto à flambagem do mesmo na etapa anterior à cura do concreto da laje, quando a seção mista ainda não é considerada. O procedimento adotado para estas verificações se encontra em maiores detalhes no item 4.1.3.

Para a verificação da seção mista, já na etapa posterior à cura do concreto, é necessário que se faça uma homogeneização da seção mista, de forma a se obter uma seção equivalente toda em aço, transformando-se a área de concreto da laje em uma área equivalente em aço, conforme explicado no item 4.1.4.

Quando o modelo estrutural instituído for de tal maneira que apareçam solicitações de momentos fletores negativos, como em balanços ou trechos de apoio das vigas contínuas, deve-se prestar uma maior atenção quanto à instabilidade do perfil, uma vez que a sua mesa inferior, que não estará contida pela laje, estará sujeita à flambagem local e lateral, porém sem ocorrer torção. A torção do perfil é impedida pela

laje, portanto a verificação à flambagem lateral ocorreria por distorção, com a mesa inferior deslocando-se lateralmente e a alma sofrendo deformação por flexão, como apresentado na Figura 4.2.

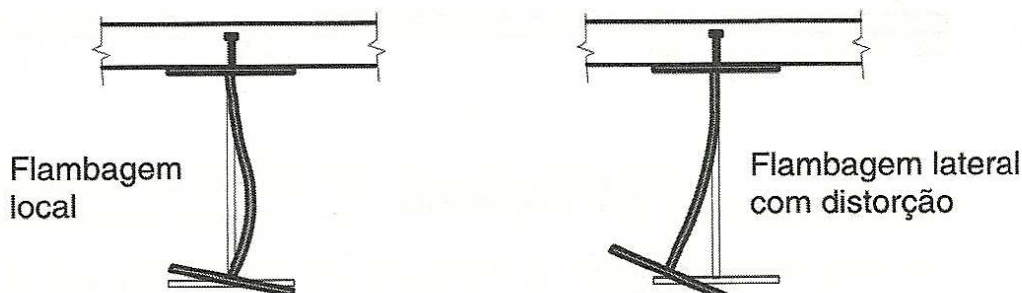


Figura 4.2- Flambagem local da mesa inferior e flambagem lateral com distorção da seção [7]

4.1.2 CONSTRUÇÃO ESCORADA E NÃO-ESCORADA

Na fase construtiva deste sistema estrutural, as vigas metálicas podem ou não ser escoradas durante a concretagem da laje [7].

Quando os perfis metálicos são escorados, estes não são solicitados durante a fase da cura do concreto, assim não se faz necessária a verificação da seção metálica para as solicitações devidas ao peso próprio do perfil e do concreto fresco da laje. Uma vez atingida a resistência necessária do concreto, o escoramento é retirado e as solicitações atuam diretamente sobre a seção mista.

Se as vigas não forem escoradas durante o processo construtivo, estas serão solicitadas antes da cura do concreto da laje, sendo assim indispensável a verificação dos perfis de aço quanto à estes esforços nesta etapa construtiva. Após o endurecimento do concreto da laje, a resistência se dá da mesma maneira que no caso da construção escorada, com a seção mista resistindo aos esforços solicitantes permanentes e/ou móveis.

As conseqüências da escolha do sistema construtivo a ser utilizado apresentam-se em termos econômicos e problemas estruturais que podem vir a ocorrer. No caso de um sistema construtivo sem escoramento das vigas, estas podem apresentar problemas

de deslocamentos excessivos durante a construção e em serviço. Porém, com a escolha deste sistema, os custos com o escoramento são nulos e ainda se evita restrições com relação ao espaço disponível no canteiro de obras.

4.1.3 VERIFICAÇÕES DOS PERFIS METÁLICOS PARA A ETAPA CONSTRUTIVA

Como citado no item 4.1.1, na etapa anterior à cura do concreto, o perfil metálico, quando sujeito à compressão, pode estar sujeito a fenômenos de instabilidade, devendo este, portanto, ser verificado.

Estes fenômenos podem ser de origem global ou local, sendo local referente aos efeitos de instabilidade os elementos constituintes do perfil, ou seja, no caso de um perfil I, as mesas ou a alma, e global referente aos efeitos no perfil como um todo.

Os procedimentos de cálculo para as verificações locais dependem das relações geométricas entre os elementos constituintes do perfil. A relação que classifica um determinado perfil quando à sua esbelteza é denominada índice de esbelteza, e pode ser obtido, no caso de um perfil I, quanto à mesa, dividindo-se a metade da largura pela espessura da mesma, e quanto à alma, dividindo-se a altura desta pela sua espessura. Estes valores são denominados λ_b , obtendo-se, então, um λ_b para a mesa e outro para a alma.

De posse destes valores, analisam-se os limites de resistência λ_r e de plastificação λ_p , cujos valores, respectivamente, são os limites inferior e superior para a caracterização da esbelteza dos elementos constituintes do perfil, da seguinte forma:

- Se $\lambda_b \leq \lambda_p$, o elemento é considerado compacto;
- Se $\lambda_p < \lambda_b \leq \lambda_r$, o elemento é considerado semi-compacto;
- Se $\lambda_b > \lambda_r$, o elemento é considerado esbelto.

A partir destas classificações se obtém o procedimento de cálculo a ser seguido para a verificação do perfil quanto à flambagem local.

Neste trabalho, as verificações para os estado limites realizadas quanto à flambagem são as seguintes:

- FLM – Flambagem local da mesa;
- FLA – Flambagem local da alma;
- Escoamento da mesa tracionada.

Para tanto, são adotados os procedimentos apresentados no Anexo G da NBR-8800 [8]. Para cada estado limite, calcula-se o momento fletor resistente de cálculo, cujo valor é comparado ao do momento fletor solicitante de cálculo.

4.1.4 VERIFICAÇÃO DAS SECÇÕES MISTAS

Na etapa posterior à cura do concreto da laje, as vigas já não absorvem sozinhas os esforços solicitantes, pois, agora em conjunto com a laje, formam seções mistas, conforme explicado no item 4.1.1. Estas seções mistas devem ser verificadas, de maneira a serem analisadas as tensões atuantes no concreto da laje e no aço do perfil metálico.

O procedimento para o cálculo destas tensões depende da esbeltez do perfil metálico. No caso abordado neste trabalho, os perfis que compõem as vigas são semi-compactos. Portanto, a descrição do procedimento a seguir será feito para este caso, onde as tensões são calculadas no regime elástico.

Para o cálculo das tensões são consideradas três etapas de carregamento. A primeira etapa consiste em se calcular apenas a tensão de tração no perfil metálico, uma vez que esta etapa é anterior à cura do concreto da laje, considerando-se o carregamento permanente. Na segunda etapa calculam-se as tensões de tração e compressão para o carregamento permanente, considerando-se o efeito da fluência, devido ao fato deste carregamento ser de longa duração. Na terceira etapa calculam-se as tensões de tração e compressão para o carregamento móvel atuante.

Para o desenvolvimento de ambas as etapas é necessário que se faça uma homogeneização da seção mista por meio do cálculo de uma seção equivalente toda em aço. Este cálculo consiste em transformar a área de concreto da laje em uma área equivalente em aço, por meio de um coeficiente α , que expressa a relação entre os

módulos de elasticidade do aço e do concreto por meio da razão primeiro pelo segundo. A área de concreto de uma seção mista é então multiplicada por este coeficiente, que a transforma em uma área de aço equivalente. Para que seja considerado o efeito da fluência, divide-se a área de concreto pelo triplo deste coeficiente, obtendo-se assim uma área de aço equivalente menor [7].

De posse destas seções em aço equivalentes, são feitos os cálculos das tensões atuantes de tração e de compressão em cada etapa, utilizando-se das propriedades geométricas das mesmas. As tensões de compressão calculadas são, então, divididas pelo coeficiente α para se analisar os efeitos desta no concreto da seção mista.

Por fim, estas tensões atuantes são somadas, obtendo-se uma tensão total de tração atuante assim como uma de compressão.

A partir disto, as verificações são feitas de maneira que estas tensões atuantes de cálculo são comparadas às tensões limites estabelecidas pela norma, conforme citado no item O.2.3.1.1.1.1 da NBR-8800 [8].

5. EXEMPLO NUMÉRICO

Neste capítulo, apresenta-se o exemplo adotado de uma ponte rodoviária de eixo reto em viga mista e um único vão, com o objetivo de se comparar o critério de verificação de segurança à fadiga apresentado pela AASHTO [2] com o cálculo da vida útil considerando o dano imposto pelo espectro de veículos reais, apresentado no item 3.2, conforme a regra de Palmgren-Miner, apresentada no item 2.5

O exemplo foi inicialmente extraído do Manual de Construção em Aço [9], tendo sofrido modificações no decorrer do trabalho.

A seção transversal é composta de quatro vigas metálicas soldadas de alma cheia e laje de concreto moldada no local, além de diafragmas metálicos de apoio e intermediários espaçados ao longo do vão.

Para a análise da estrutura, foram criados dois modelos estruturais distintos, sendo um modelo simplificado de grelha e outro mais refinado com elementos de casca plana e de pórtico. O modelo de grelha foi utilizado em uma fase de dimensionamento inicial e é aqui apresentado somente para efeitos de comparação dos esforços e deslocamentos com o modelo refinado.

As verificações dos perfis no estado limite último e quanto aos efeitos de fadiga foram feitas analisando-se a viga extrema da seção transversal, uma vez que esta é a viga mais solicitada pelos carregamentos atuantes considerados.

5.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS

As lajes e as barreiras laterais são em concreto armado C25, que apresenta resistência característica de 25 MPa ($f_{ck} = 25$ MPa).

As vigas e os diafragmas são de aço AR-350-COR, que apresenta limite de escoamento mínimo de 350 MPa e limite de ruptura de 485 MPa ($f_{yk} = 350$ MPa, $f_u = 485$ MPa), e que, segundo a NBR-7007/2002 [10], caracteriza-se por apresentar alta resistência mecânica e maior resistência à corrosão atmosférica.

Segue na Tabela 5.1 um resumo das principais propriedades dos materiais utilizados:

Tabela 5.1- Propriedades dos materiais

PROPRIEDADE	AÇO	CONCRETO ARMADO
Módulo de Elasticidade (E)	200000 MPa	23800 MPa
Coeficiente de Poisson (ν)	0,3	0,2
Coeficiente de Dilatação Térmica (α)	$1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$1,0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Massa Específica (γ)	7850 kg/m ³	2500 kg/m ³

5.2 COMPONENTES DA SEÇÃO TRANSVERSAL

Nas Figuras 5.1 e 5.2 encontram-se dimensões e detalhes da seção transversal e da vista em planta da ponte. A Figura 5.3 mostra a variação da seção transversal das longarinas ao longo do vão.

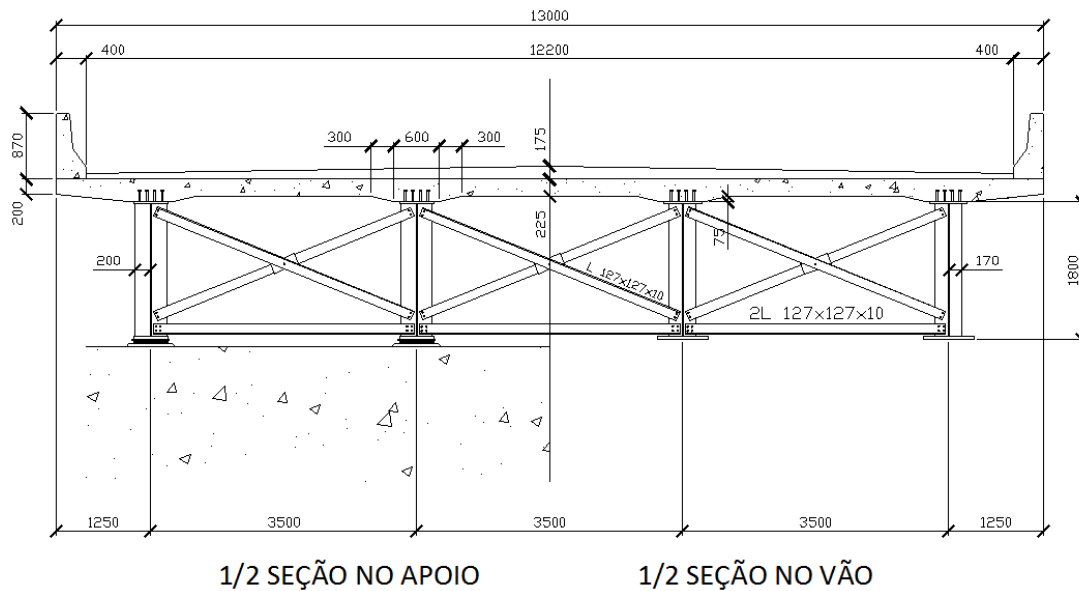


Figura 5.1- Seção transversal da ponte

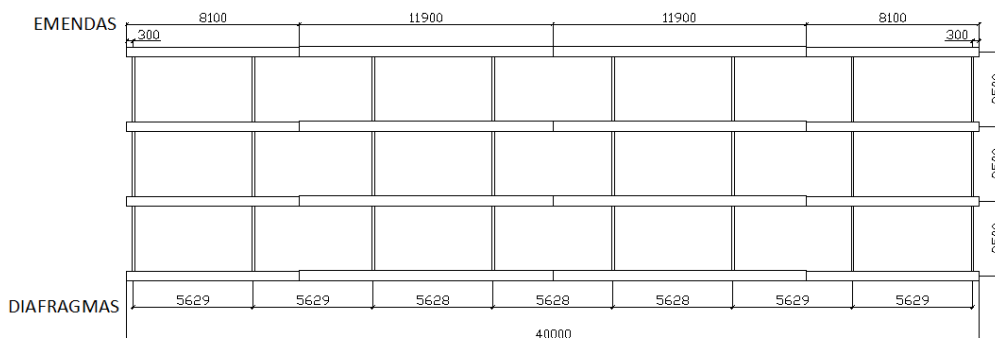


Figura 5.2 - Vista da ponte em planta

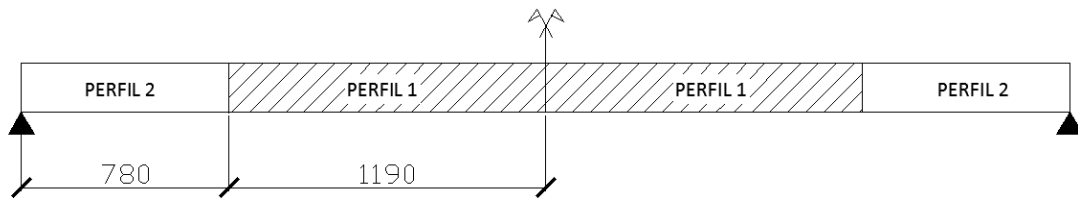


Figura 5.3 – Variação da seção transversal ao longo do vão

A seguir, os dados do projeto:

- Comprimento da ponte: 40 m;
- Largura do tabuleiro da ponte: 13 m;
- Vão teórico: 39,4 m;
- Distância entre vigas: 3,5 m;
- Espessura média da laje de concreto: 0,225 m;
- Espessura média do revestimento asfáltico: 0,125 m.

5.2.1 BARREIRA LATERAL

A barreira lateral de concreto armado, tipo “New-Jersey”, apresenta a seção transversal mostrada na Figura 5.4.

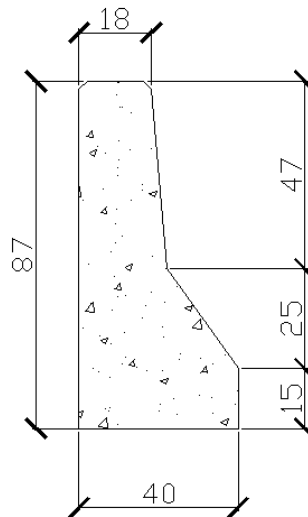


Figura 5.4 – Seção transversal da barreira lateral

5.2.2 LAJE

A laje de concreto armado possui espessura variável ao longo da seção transversal, apresentando mísulas nas regiões das longarinas conforme ilustrado na Figura 5.5.

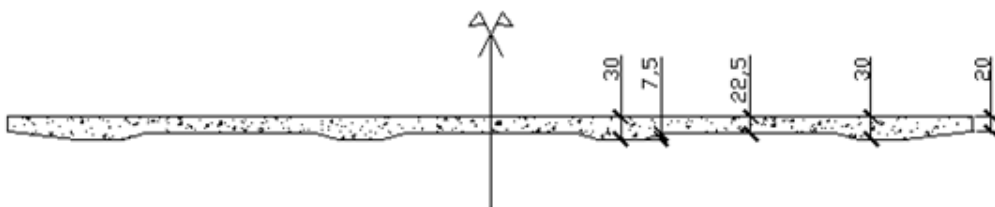


Figura 5.5 – Seção transversal da laje de concreto

5.2.3 LONGARINAS

As longarinas são compostas por dois tipos de perfis soldados de aço ao longo do vão. Nos trechos extremos da ponte é utilizado o perfil 2, e no trecho central do vão utiliza-se o perfil 1. Os perfis e algumas propriedades principais geométricas estão apresentados na Figura 5.6 e na Tabela 5.2.

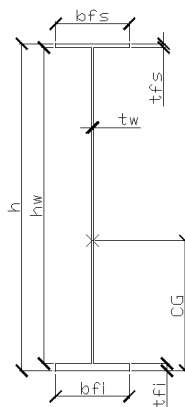


Figura 5.6 – Seção transversal dos perfis das longarinas

Tabela 5.2 - Propriedades geométricas dos perfis das longarinas

PROPRIEDADES	PERFIL 1 (VÃO)	PERFIL 2 (EXTREMOS)
bfs	500,0 mm	450,0 mm
tfs	20,0 mm	20,0 mm
tw	13,0 mm	13,0 mm
hw	1740,0 mm	1740,0 mm
h	1800,0 mm	1800,0 mm
bfi	670,0 mm	450,0 mm
tfi	40,0 mm	40,0 mm
CG	656,68 mm	746,76 mm

5.2.4 DIAFRAGMAS

Os diafragmas são compostos por diagonais de cantoneiras simples de abas iguais e banzos de cantoneiras duplas. Estes estão dispostos espaçados de 5,63 m ao longo do vão da ponte, sendo 1 diafragma em cada apoio e 6 diafragmas intermediários, totalizando 8 diafragmas. As Figuras 5.7, 5.8 e a Tabela 5.3 mostram os detalhes para os perfis dos banzos e das diagonais.

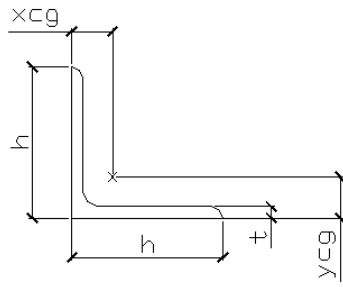


Figura 5.7 – Perfil das diagonais

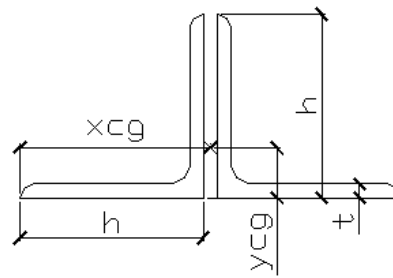


Figura 5.8- Perfil dos banzos

Tabela 5.3- Propriedades dos perfis das diagonais e banzos

PROPRIEDADES	DIAGONAIS	BANZOS
h	127,0 mm	127,0 mm
t	9,5 mm	9,5 mm
ycg	35,3 mm	34,5 mm
xcg	35,3 mm	132,0 mm
I _x	3620000 mm ⁴	7240000 mm ⁴
I _y	3620000 mm ⁴	14000000 mm ⁴

5.2.5 APARELHOS DE APOIO

Os aparelhos de apoio da ponte são retangulares em elastômero fretado com chapas de aço, cuja dimensões são 350 mm x 450 mm x 54 mm. A rigidez nas direções longitudinal e transversal é de 5000 kN/m. Os cálculos da rigidez são apresentados no Anexo A.

5.3 DESCRIÇÃO DOS MODELOS ESTRUTURAIS

A seguir, serão apresentados e detalhados os modelos numéricos citados no início do item 5. Estes foram desenvolvidos e analisados com auxílio do software comercial de elementos finitos SAP2000 [11].

5.3.1 MODELO DE GRELHA

Este modelo foi elaborado com o intuito de se fazer uma análise simplificada da estrutura. Como este modelo não contém elementos de placa, apenas de viga, a contribuição da laje foi considerada por meio do cálculo de seções mistas, que posteriormente foram transformadas em seções equivalentes em aço, conforme o procedimento descrito a seguir.

A) DETERMINAÇÃO DAS SEÇÕES EQUIVALENTES

O cálculo de seções equivalentes em aço das longarinas, que está explicitado no Anexo B, baseia-se no seguinte procedimento:

- A partir da seção transversal da Figura 5.1, foram determinadas seções compostas de aço-concreto, como ilustrada na Figura 5.9, através do cálculo da largura efetiva, de acordo com o item O.2.2.1 da NBR-8800 [8].

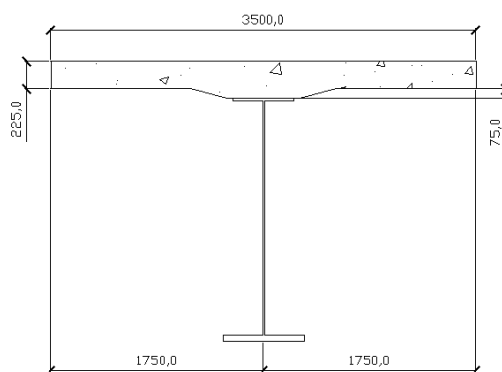


Figura 5.9 – Exemplo de seção mista aço-concreto

- De posse das seções mistas de aço-concreto, foram calculadas seções equivalentes em aço. A seção de concreto foi transformada em uma seção equivalente de aço, multiplicando sua área pela relação dada pela razão entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto. Desta maneira foram formadas as

seções compostas pelos perfis das longarinas e suas respectivas áreas equivalentes em aço. A Figura 5.10 apresenta um exemplo de seção homogeneizada.

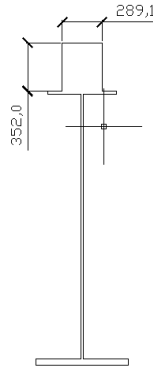


Figura 5.10 – Exemplo de seção equivalente

Para o cálculo das seções equivalentes em aço dos diafragmas foi adotado o mesmo procedimento das longarinas, porém levou-se em conta somente o montante do diafragma, composto por cantoneira dupla, uma vez que as diagonais não teriam contribuição significativa para a rigidez à flexão da seção.

As seções homogeneizadas das longarinas e dos diafragmas foram então “desenhadas” no programa, no menu *Section Designer*, e associadas às propriedades do material, no caso o aço, conforme as Figuras 5.11 e 5.12. As propriedades geométricas foram calculadas automaticamente pelo programa após a definição da geometria da seção e escolha do material base da mesma.

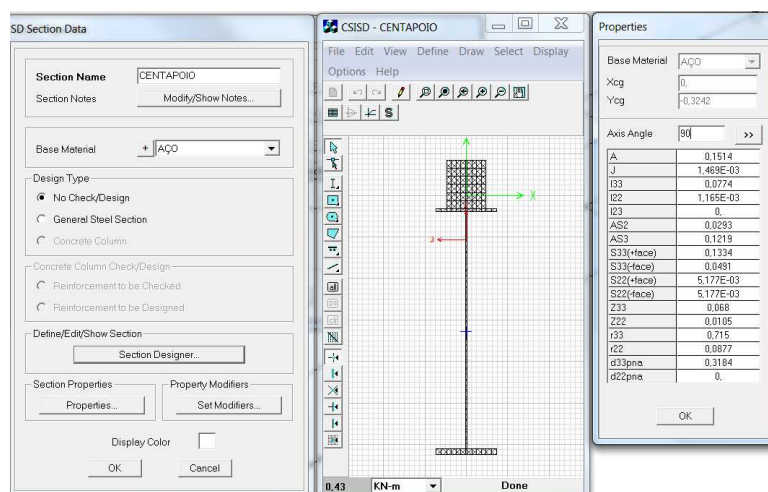


Figura 5.11- Seção homogeneizada da longarina

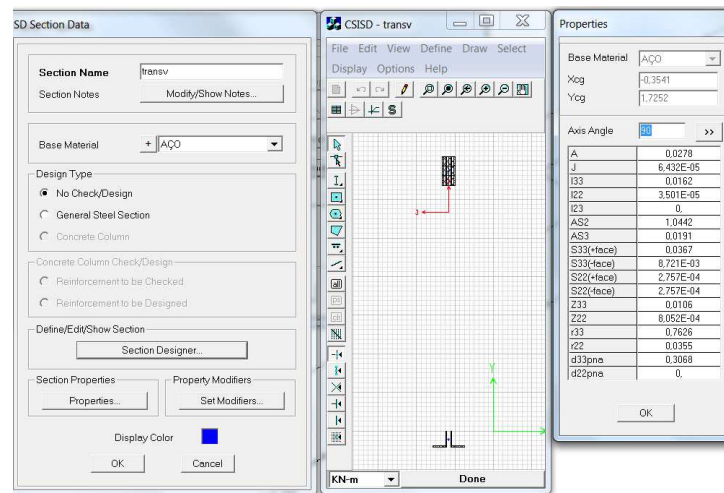


Figura 5.12- Seção homogeneizada do diafragma

A estrutura foi então modelada com elementos de viga associados a cada uma destas seções, como ilustrado na Figura 5.13.

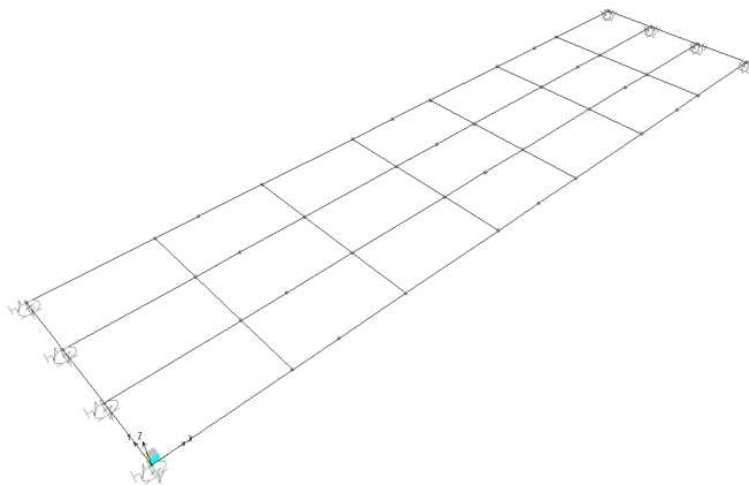


Figura 5.13 – Malha de elementos finitos para o modelo de grelha

B) CONDIÇÃO DE CONTORNO DOS APOIOS

Na região dos apoios, em ambas as extremidades, foram atribuídas as seguintes condições de contorno:

- Deslocamento em x: Mola com a rigidez longitudinal do aparelho de apoio;

- Deslocamento em y: Mola com a rigidez transversal do aparelho de apoio;
- Deslocamento em z: Fixo;
- Rotações em x, y e z: Livres.

C) CARREGAMENTOS ATUANTES

Dentre os carregamentos atuantes foram considerados o peso próprio da estrutura, calculado automaticamente pelo programa, e a carga móvel do veículo tipo TB-45 da norma NBR-7188 [5].

Para a consideração do efeito da carga móvel, foi traçada uma linha de influência da repartição transversal [12] para a viga extrema. Esta foi feita da seguinte maneira:

- Aplicou-se uma carga distribuída de 1 kN/m em uma longarina de cada vez;
- Para cada aplicação desta carga foi obtido o momento fletor máximo na viga extrema;
- Cada valor de momento foi dividido pelo momento devido à carga unitária em uma viga biapoiada simples ($qL^2/8$);
- Estes valores encontrados correspondem às ordenadas da linha de influencia de repartição transversal nas respectivas abscissas das longarinas;
- A linha de influência foi traçada ligando as ordenadas com segmentos de reta;
- Nos balanços, a linha de influência foi prolongada a partir da ordenada das vigas de extremidade.

A Figura 5.14 apresenta o resultado obtido no traçado desta linha de influência.

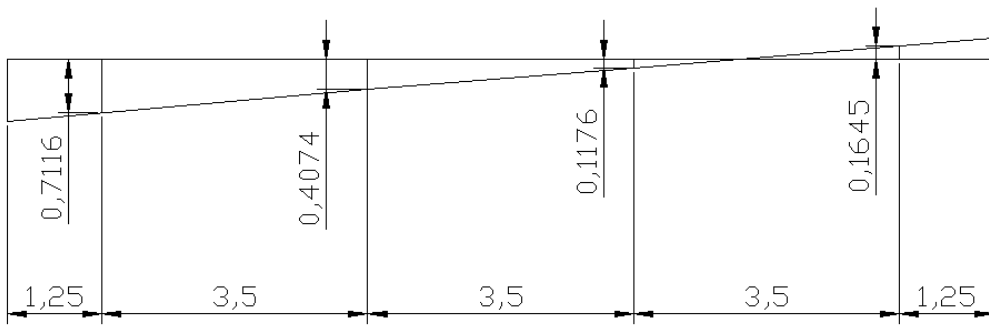


Figura 5.14 – Linha de influência de repartição transversal para o modelo de grelha

Para determinar a posição do trem tipo que causaria maior esforço na viga extrema, carregou-se a linha de influência com o veículo e a carga de multidão, conforme a Figura 5.15.

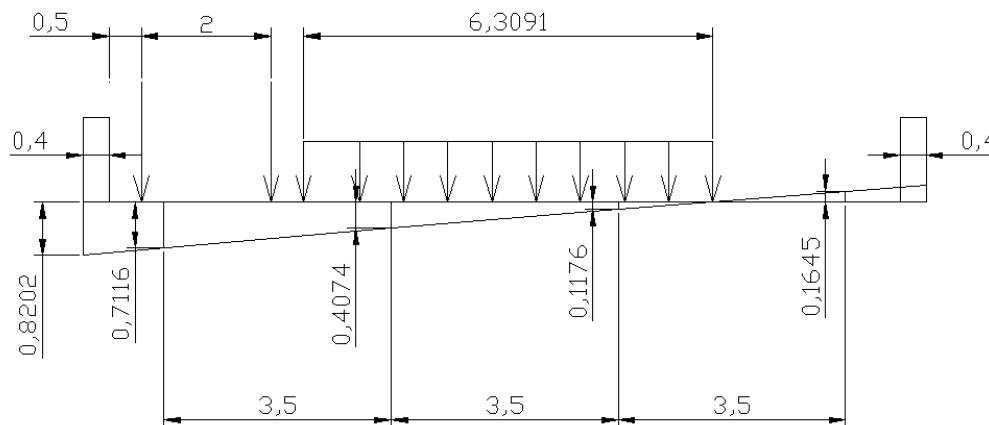


Figura 5.15 – Carregamento da linha de influência com o trem-tipo

Para a aplicação deste carregamento, foi necessária a criação de duas faixas, denominadas *Lanes* pelo programa, de maneira que uma das faixas representasse o eixo do veículo e a outra o eixo da carga de multidão, conforme a Figura 5.16.

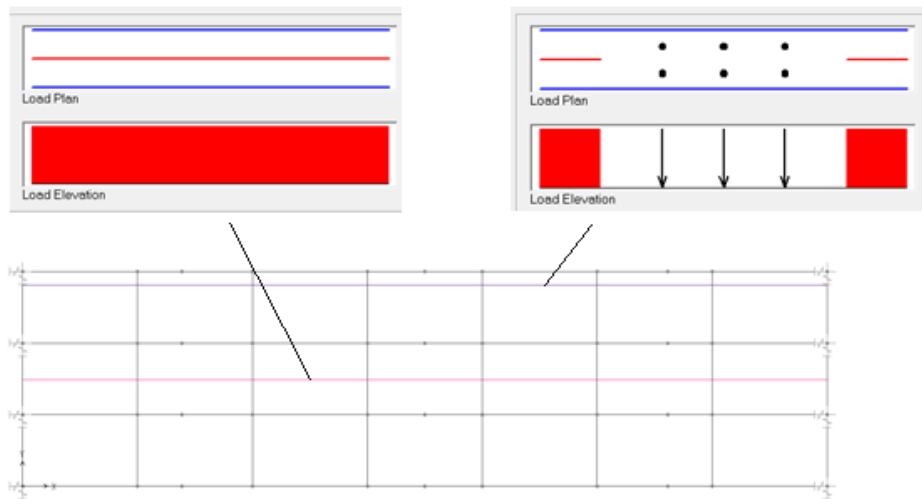


Figura 5.16 – Lanes criadas para a passagem do trem-tipo

5.3.2 MODELO REFINADO

Este modelo foi elaborado com a finalidade de se calcular os efeitos da fadiga a partir de considerações mais fiéis à realidade em relação ao modelo de grelha. Neste são utilizados elementos de placa para modelar a laje e elementos de pórtico para modelar os diafragmas e as longarinas.

Para gerar este modelo, foi utilizado um recurso especial do programa SAP2000 [11] denominado *Bridge Wizard*. Esta ferramenta facilita a geração do modelo de uma ponte, seja ela mista ou não, a partir da definição de propriedades geométricas da seção transversal da ponte assim como de seus elementos, conforme demonstrado na Figura 5.17.

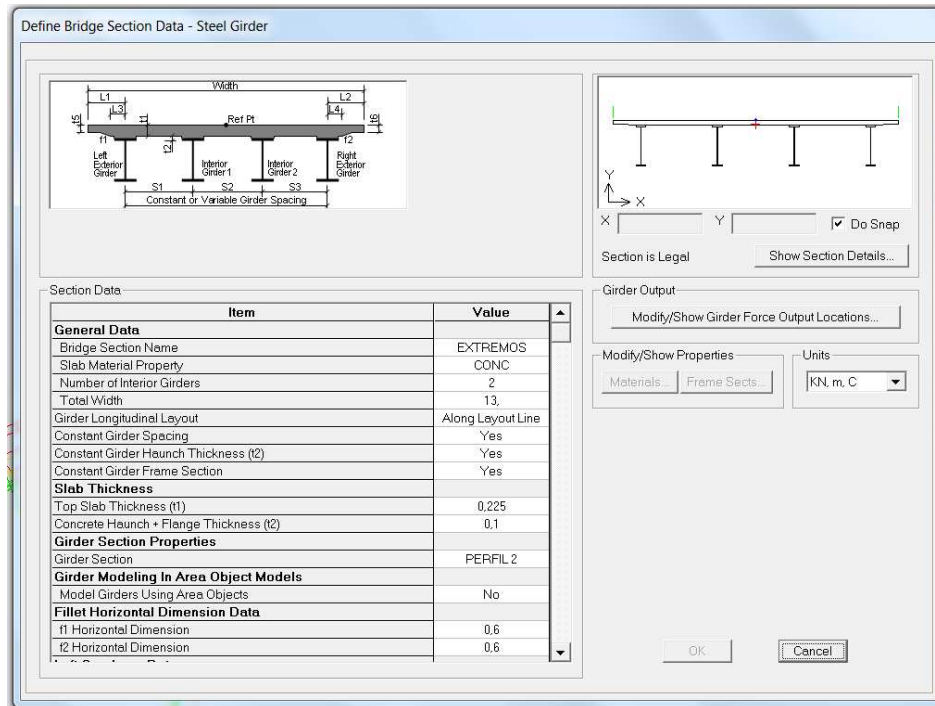


Figura 5.17 – Bridge Wizard

A) SEÇÃO TRANSVERSAL

Em virtude de os perfis utilizados nos trechos do vão e dos apoios serem diferentes, foram criadas duas seções transversais, utilizando o recurso citado anteriormente e ilustrado na Figura 5.17. Os dados de entrada para a criação de cada seção são os seguintes:

- Propriedades dos materiais da laje, das vigas e dos diafragmas, como módulo de elasticidade, tensão resistente característica, tensão limite de escoamento, peso específico e coeficiente de Poisson, explicitados na Tabela 5.1;
- Dados do modelo, tais como: comprimento do vão, número e espaçamento entre os diafragmas;
- Propriedades geométricas da seção, tais como: largura do tabuleiro, número, espaçamento e perfil das longarinas, dimensões das mísulas, espessura da laje e número, espaçamento, disposição e perfis que compõem os diafragmas;

Definidas as seções transversais, o modelo é gerado automaticamente pelo programa, conforme ilustrado nas Figuras 5.18 e 5.19.

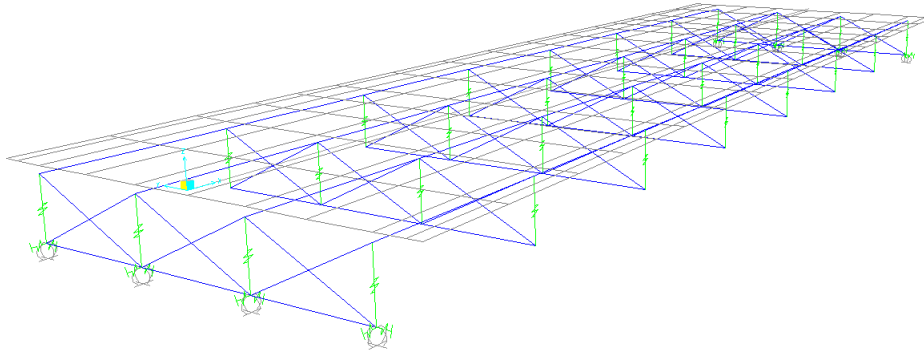


Figura 5.18- Malha de elementos finitos para o modelo refinado

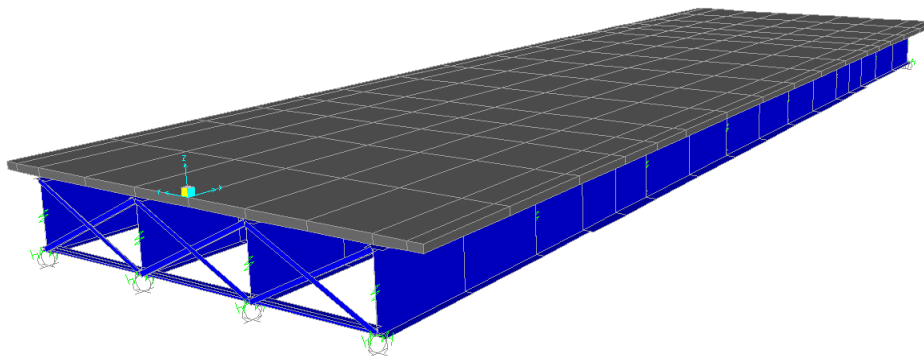


Figura 5.19 – Modelo tridimensional

A malha de elementos da casca plana foi gerada automaticamente de maneira que nas regiões de transição dos elementos de pórtico que representam os perfis e nos elementos que representam os diafragmas existam nós, que serão vinculados aos nós dos outros elementos. Como os eixos dos elementos de pórtico dos perfis de aço não coincidem com o centro de gravidade da seção de aço, atribui-se aos elementos de pórtico uma excentricidade perpendicular ao seu eixo (direção local 2 ou y).

As ligações entre os elementos de casca plana com os elementos de pórtico foram feitas utilizando-se *Constraints*, que fazem a compatibilização dos graus de liberdade dos nós conectados.

As ligações dos elementos de pórtico que representam as vigas com os elementos de pórtico que representam os banzos dos diafragmas foram feitas com auxílio de *Links*, com todos os graus de liberdade restringidos, conferindo uma rigidez à ligação, formando assim um nó de pórtico espacial.

B) CONDIÇÃO DE CONTORNO DOS APOIOS

Na região dos apoios, em ambas as extremidades, foram atribuídas as seguintes condições de contorno:

- Deslocamento em x: Mola com a rigidez longitudinal do aparelho de apoio;
- Deslocamento em y: Mola com a rigidez transversal do aparelho de apoio;
- Deslocamento em z: Fixo;
- Rotações em x, y e z: Livres.

C) CARREGAMENTOS ATUANTES

Dentre os carregamentos atuantes, foram considerados o peso próprio da estrutura, calculado automaticamente pelo programa, a carga móvel do veículo tipo TB-45, a carga móvel do veículo HL-93 para análise da fadiga e o espectro de veículos reais, detalhado no item 3.1.

Para considerar os efeitos da carga móvel proveniente do trem tipo TB-45, foi utilizado o mesmo procedimento descrito no item 5.3.1.C. A linha de influência foi feita seguindo-se o mesmo procedimento citado no item referido, conforme ilustrado na Figura 5.20.

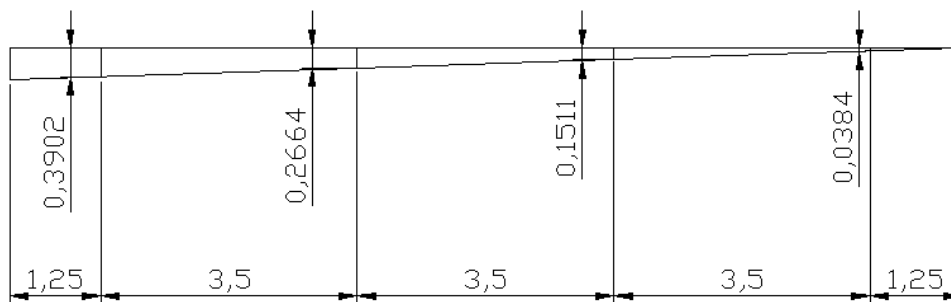


Figura 5.20 - Linha de influência de repartição transversal para o modelo refinado

Com o objetivo de se comparar resultados entre os dois modelos, foi utilizado o mesmo trem tipo, obtido para o modelo de grelha, no modelo refinado.

Na consideração dos efeitos dos veículos reais, adotou-se a premissa de que a ponte é uma via de mão dupla, conforme mostra a Figura 5.21. As faixas de rolamento consideradas possuem dimensão de 3,5 m e os acostamentos de 2,0 m.

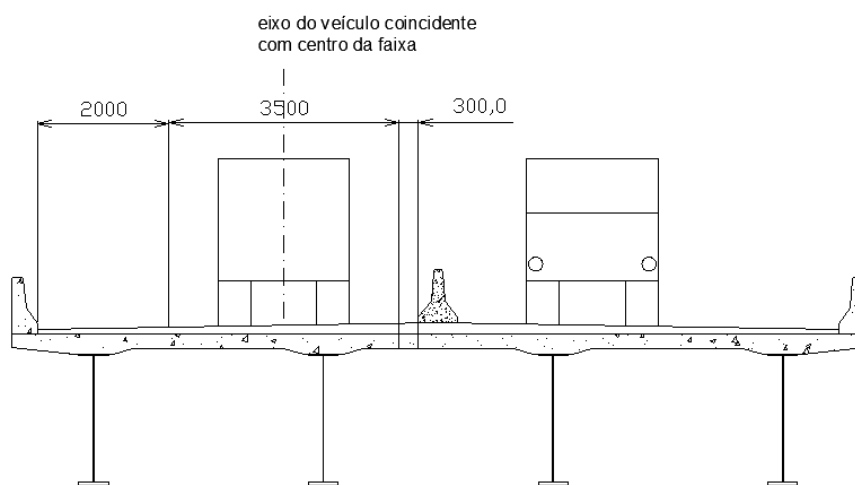


Figura 5.21 – Configuração de pista utilizada para a passagem dos veículos reais

As duas faixas de tráfego, criadas no programa SAP2000 [11] conforme ilustrado na Figura 5.22, para a passagem dos veículos reais foram posicionadas no eixo das faixas de rolamento, respeitando-se as distâncias dos acostamentos, previstas na Norma para o Projeto das Estradas de Rodagem [13].

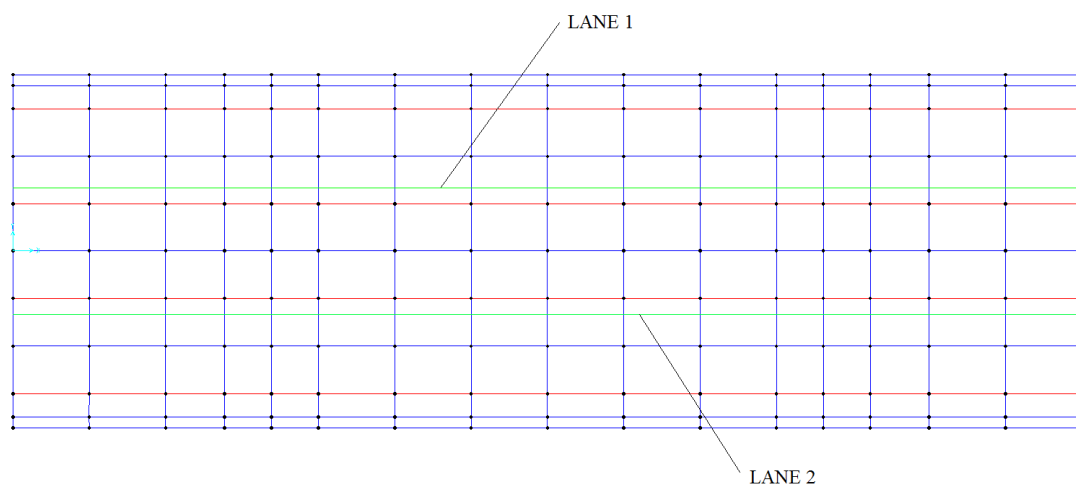


Figura 5.22 – Lanes criadas para a passagem dos veículos reais

Estes veículos foram gerados de maneira que a soma do peso de seus eixos produzisse uma resultante unitária, ou seja, a sua carga total foi considerada com valor unitário. As cargas por eixo do veículo foram calculadas conforme a porcentagem de distribuição destas, apresentadas no item 3.1. Foi adotada a hipótese de que a distribuição dos pesos por eixos do veículo é constante.

Para a consideração dos esforços oriundos da passagem de cada veículo, foi multiplicado o valor dos esforços gerados pela passagem destes veículos unitários pelos seus respectivos pesos totais correspondentes a cada frequência do espectro, uma vez que um mesmo veículo pode apresentar pesos brutos diferentes, conforme explicitado na Tabela 3.3.

Os casos analisados resumem-se primeiramente à passagem de somente um veículo de cada tipo por vez nas duas faixas separadamente, estando estes centrados nas mesmas. Além deste, analisou-se também a passagem dos veículos em apenas uma faixa, porém com quatro excentricidades diferentes do eixo do veículo com relação ao eixo desta. Estas excentricidades consideradas foram de 0,20 m e 0,40 m, para cada lado do centro da faixa.

D) VERIFICAÇÃO DOS PERFIS E SEÇÕES MISTAS

Os perfis metálicos das vigas, assim como as seções mistas, foram verificados de acordo com os procedimentos citados nos itens 4.1.3 e 4.1.4. Para isto, foram

consideradas as etapas detalhadas nos itens referidos, sendo considerado na etapa da carga móvel o trem tipo TB-45, conforme ilustrado na Figura 5.15.

Os cálculos para as verificações estão demonstrados no Anexo C. Os momentos solicitantes utilizados nestes foram obtidos a partir dos dados de saída provenientes do modelo refinado.

E) CÁLCULO DOS EFEITOS DA FADIGA

Conforme citado no item 2.3, a análise dos efeitos da fadiga será feita nos perfis metálicos soldados que compõem as longarinas da ponte. Foram avaliadas duas regiões onde há concentração de tensão, sendo uma localizada na solda da mesa inferior com a alma do perfil e outra no pé da solda do enrijecedor transversal.

Para tanto, foi considerada a hipótese de que a passagem de cada veículo sobre a ponte gera apenas um ciclo de tensão, e não vários ciclos como acontece na realidade quando estes veículos trafegam com velocidade suficiente para provocar efeitos dinâmicos, como vibrações na estrutura, gerando assim outros ciclos de tensão, conforme ilustra a Figura 2.1.

A partir desta premissa, se obteve o momento fletor máximo solicitante para cada perfil, e de posse deste, calculou-se a tensão normal de flexão nos respectivos pontos. Em virtude de as tensões cisalhantes, para as regiões em questão, apresentarem valores reduzidos face aos valores das tensões normais de flexão, estas foram desprezadas na determinação da variação das tensões principais para a consideração dos efeitos de fadiga.

A tensão normal de flexão foi calculada dividindo-se o valor do momento fletor pelo módulo de resistência à flexão W , obtido considerando-se a distância entre a linha neutra da seção equivalente e a fibra na cota do ponto analisado. Devido ao fato de os pontos nos quais foram analisados os efeitos de fadiga se localizarem em cotas iguais, o módulo de resistência à flexão apresenta o mesmo valor em ambas as situações.

Para a consideração dos efeitos dinâmicos das cargas móveis, o valor da tensão calculada para a região do vão da ponte foi multiplicado pelo coeficiente de impacto, calculado de acordo com a NBR-7187 [14], cujo cálculo é apresentado no Anexo C.

Para a região do apoio, considerou-se um coeficiente um pouco maior que este, a fim de se levar em consideração possíveis efeitos dinâmicos de transição nesta região. A consideração deste coeficiente é uma simplificação para o caso dos veículos reais, no qual o procedimento para se considerar os efeitos dinâmicos deveria levar em conta outros fatores, que não só o vão da ponte em questão, conforme descrito em [15].

E.1) VIDA ÚTIL À FADIGA CONSIDERANDO O ESPECTRO DE VEÍCULOS REAIS

O cálculo do número N de ciclos, que leva a estrutura à ruptura por fadiga, foi feito de acordo com o procedimento descrito na norma AASHTO [2], utilizando-se as curvas S-N apropriadas, que são as mesmas adotadas na norma NBR-8800 [8].

No caso dos veículos reais, visando à determinação da vida útil, cada ponto avaliado corresponde a uma categoria de tensão, a partir da qual, baseada na respectiva curva S-N, se obtém um parâmetro Cf . De posse deste parâmetro, para cada amplitude de tensão gerada pela passagem de cada veículo, calcula-se o número N de ciclos necessários para ocorrer a fratura. Por exemplo, o caso da solda da mesa inferior com a alma corresponde à categoria B, que fornece o parâmetro $Cf = 120 \times 10^8$, de acordo com a NBR-8800 [8]. Manipulando-se a equação apresentada no item K.4 da referida norma, tem-se:

$$N = \frac{327 \times Cf}{\sigma_{SR}^3}$$

Onde:

- σ_{SR} é a amplitude da variação de tensão em MPa.

Para o cálculo do número n de ciclos de tensão aplicados na passagem dos veículos, considerou-se que a média diária de tráfego da ponte em questão é de 3.300 veículos por faixa, totalizando 1.200.000 veículos por ano em uma faixa. Este número é baseado em dados atualizados em janeiro de 2011, obtidos pela Autobahn Posto PGF40 de São Paulo.

Na consideração do espectro destes veículos reais, o número de ciclos correspondente a cada veículo é associado à frequência de ocorrência do mesmo. Sendo

assim, multiplica-se o número total de veículos por ano pelas respectivas frequências, obtendo-se, assim, o número n .

O cálculo do dano feito para os veículos reais baseou-se na Regra de Palmgren-Miner, descrita no item 2.5.

Para a determinação da vida útil da estrutura em cada ponto analisado, calculou-se o dano total acumulado, somando-se os danos causados por todos os veículos, e este valor foi invertido, obtendo-se a vida útil da ponte em anos para cada detalhe analisado.

Os cálculos descritos neste item foram efetuados nas planilhas, que se encontram apresentadas no Anexo D.

Conforme dito no item C deste capítulo, foram consideradas diferentes situações de passagem dos veículos sobre a ponte. As situações que envolvem a passagem destes com diferentes excentricidades laterais foram obtidas a partir do histograma da Figura 5.23, que foi adaptado tomando como base o histograma apresentado na norma britânica BS-5400 [16].

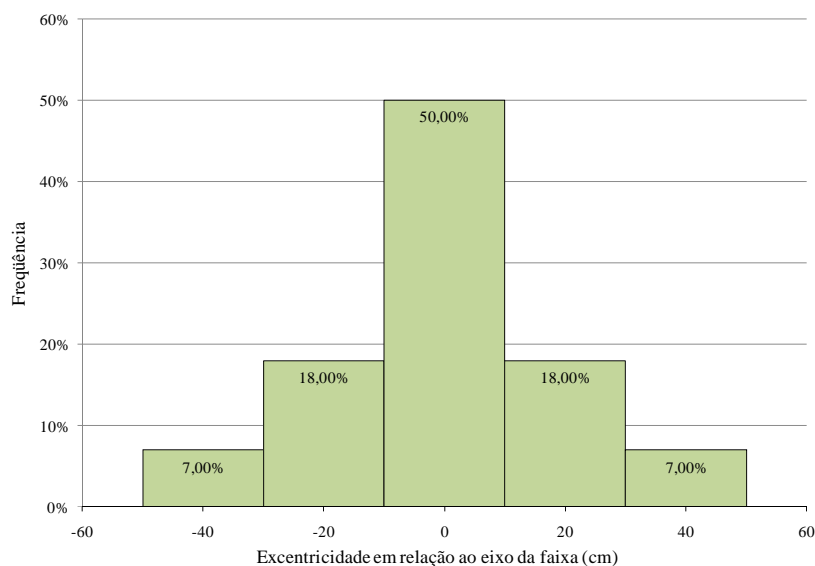


Figura 5.23 – Gráfico Frequência x Excentricidade do veículo em relação ao centro da faixa

E.2) VERIFICAÇÃO À FADIGA SEGUNDO A NORMA AASHTO [2]

Para a avaliação dos efeitos de fadiga para o caso de um veículo normatizado, foi utilizado o veículo da AASHTO [2], conforme explicado no item 3.3.2.

Considerou-se a passagem deste veículo sobre a mesma faixa de tráfego criada para o veículo tipo TB-45, uma vez que as distâncias envolvidas no posicionamento de ambos são iguais, em se tratando de posicioná-los encostados na barreira lateral.

Desta forma, foram obtidos os momentos fletores máximos produzidos pela passagem deste em cada perfil na viga extrema, e a partir destes, calculadas as tensões, conforme descrito no item E deste capítulo.

A AASHTO [2] descreve o procedimento para a consideração dos efeitos de fadiga considerando um valor de N correspondente ao número de ciclos da tensão σ_{SR} em 75 anos de vida útil.

A referida norma também estabelece um limite físico de veículos por faixa, incluindo todos os tipos de veículo, leves e pesados, de 20.000 veículos por dia. Entende-se por veículo leve carros de passeio e, por pesado, caminhões, ônibus e reboques. O valor do número de ciclos N é calculado de acordo com o item 6.6.1.2.5 da norma americana, utilizando-se as equações a seguir e a Tabela 5.4:

$$N = 365 \times 75 \times nv \times (ADTT)_{SL}$$

$$(ADTT)_{SL} = ADTT \times p$$

Tabela 5.4 - Tabelas extraída de [2] para cálculo do número de ciclos N

Longitudinal Members	Span Length	
	>12 000 mm	≤12 000 mm
Simple Span Girders	1.0	2.0
Continuous Girders		
1) near interior support	1.5	2.0
2) elsewhere	1.0	2.0
Cantilever Girders	5.0	
Trusses	1.0	
Transverse Members	Spacing	
	>6000 mm	≤6000 mm
	1.0	2.0

Number of Lanes Available to Trucks	p
1	1.00
2	0.85
3 or more	0.80

Class of Highway	Fraction of Trucks in Traffic
Rural Interstate	0.20
Urban Interstate	0.15
Other Rural	0.15
Other Urban	0.10

Onde,

- $(ADTT)_{SL}$ é o número de veículos pesados por dia em uma única faixa estimado para a vida útil de projeto;
- $ADTT$ é o número de veículos pesados por dia em uma direção estimado para a vida útil de projeto;
- n_v é o número de ciclos de tensão gerados pela passagem do veículo.

Tratando-se de uma rodovia interestadual rural, são obtidos os valores de $ADTT$, de $(ADTT)_{SL}$ e N , conforme demonstrado abaixo:

$$ADTT = 0,20 \times 20.000 = 4.000$$

$$(ADTT)_{SL} = 4.000 \times 1,00 = 4.000$$

$$N = 365 \times 75 \times 1 \times 4.000 = 110.000.000$$

Tomando-se o valor de p igual a 1,00, se obtém uma média de tráfego diária por faixa de 4.000 veículos, totalizando 1.460.000 veículos por ano.

De posse destes valores, são calculadas as variações de tensões para a passagem do veículo tipo de fadiga na posição mais desfavorável, conforme a equação abaixo:

$$\sigma_{SR} = \left(\frac{327 \times Cf}{N} \right)^{0,333}$$

Esta equação, obtida através da NBR-8800 [8], é a mesma que a utilizada pela AASHTO [2] para o cálculo destas tensões, contudo, nesta última, ao invés de se ter o coeficiente Cf , tem-se o coeficiente A , conforme a equação abaixo:

$$(\Delta F)_n = \left(\frac{A}{N} \right)^{1/3}$$

As categorias possuem os mesmos valores para estas constantes nas duas normas, portanto não fazendo diferença se utilizar a equação de uma norma ou da outra. A única diferença entre as duas normas diz respeito ao limite admissível da faixa de

variação de tensões para um número infinito de ciclos de solicitação, denominado σ_{TH} pela NBR-8800[8] e $(\Delta F)_{TH}$ pela norma americana.

Este limite é tomado pela AASHTO [2] como sendo a metade do valor tomado pela norma brasileira. Dessa maneira, tem-se:

$$(\Delta F)_n = \left(\frac{A}{N}\right)^{1/3} \geq \frac{(\Delta F)_{TH}}{2} \quad (\text{AASHTO})$$

$$\sigma_{SR} = \left(\frac{327 \times Cf}{N}\right)^{0,333} \geq \sigma_{TH} \quad (\text{NBR-8800})$$

Dessa maneira, utilizou-se o limite apresentado pela norma americana, já que os cálculos estão sendo feitos para o veículo da mesma.

6. RESULTADOS

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos para os modelos analisados. Para o modelo de grelha, item 6.1, serão ilustrados os diagramas de momentos fletores das vigas e a deformada da estrutura para o carregamento do trem tipo TB-45. Para o modelo refinado, item 6.2, serão apresentados os diagramas de momentos fletores e esforço normal das vigas, diagrama de esforço normal na direção longitudinal da laje e a deformada para o mesmo carregamento citado anteriormente.

Nos itens 6.3 e 6.4, serão apresentadas tabelas contendo a comparação entre os momentos e deslocamentos máximos obtidos para cada modelo e um resumo dos resultados referentes aos cálculos de vida útil à fadiga para cada caso analisado, detalhados no item 5.3.2.C.

6.1 MODELO DE GRELHA

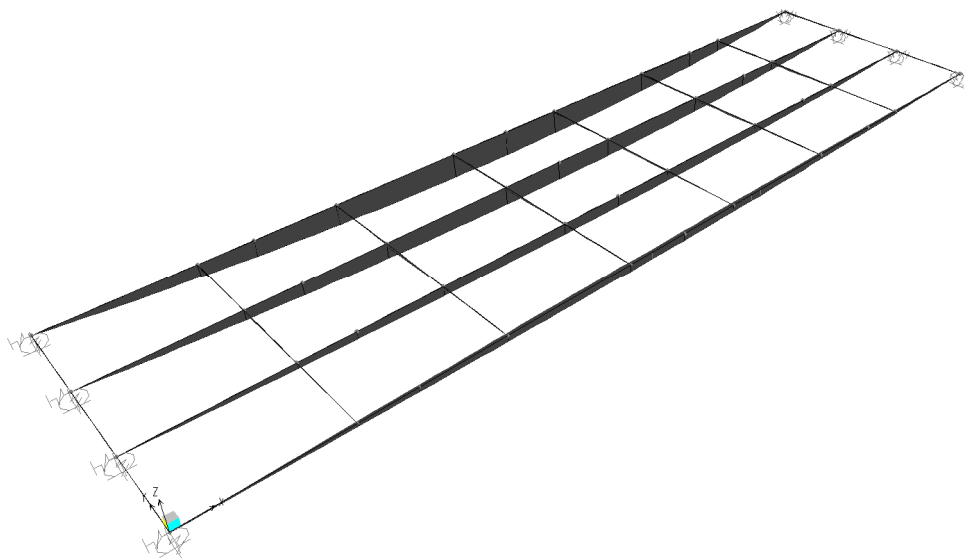


Figura 6.1 – Diagrama de momentos fletores

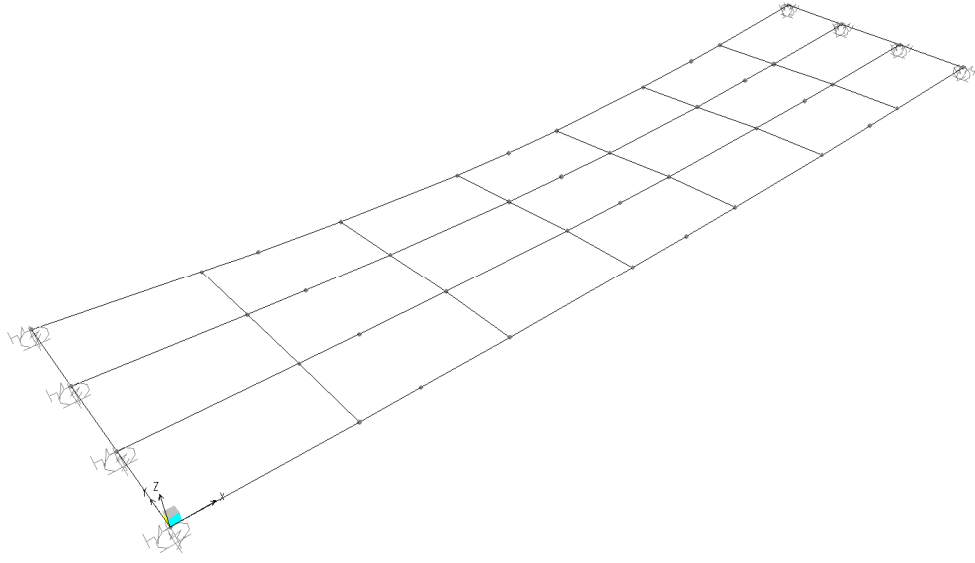


Figura 6.2 – Deformada da estrutura

6.2 MODELO REFINADO

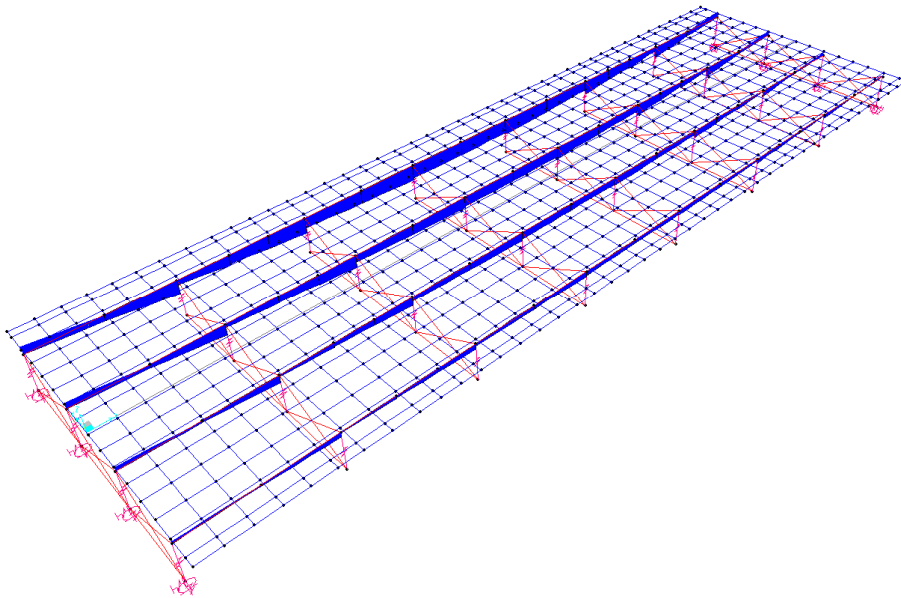


Figura 6.3 – Diagrama de momentos fletores nas vigas

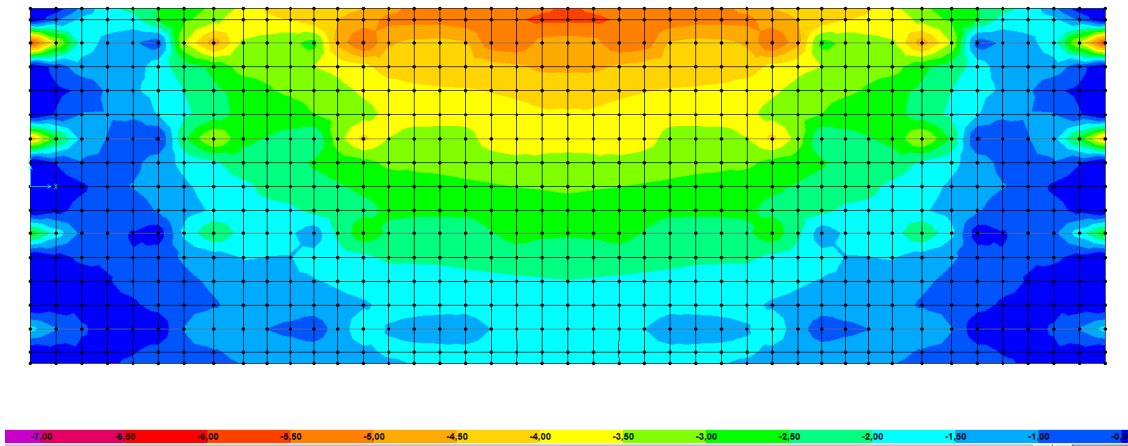


Figura 6.4 – Diagrama de esforço normal longitudinal na laje

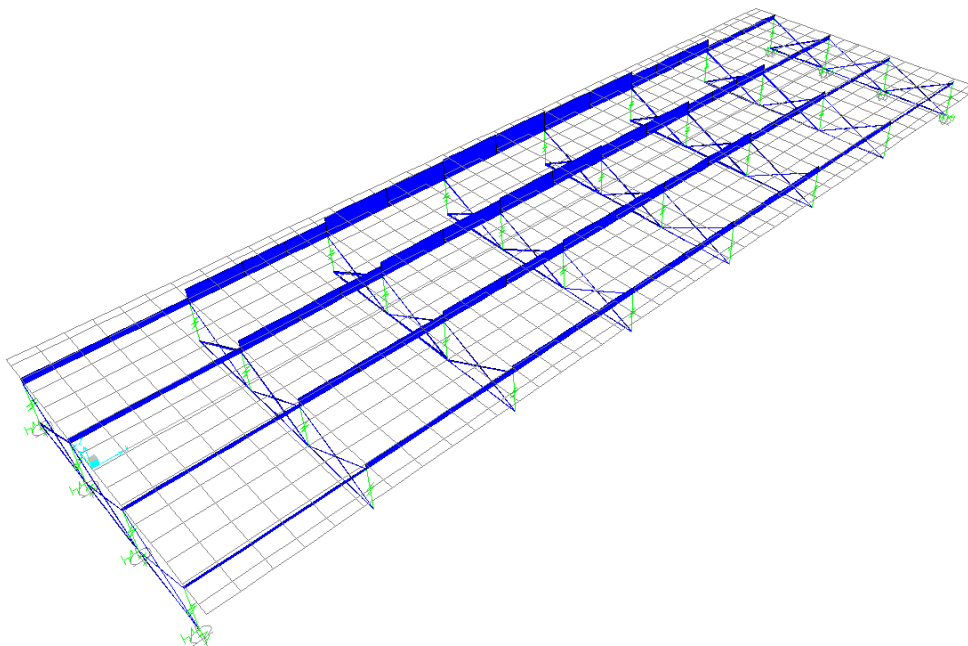


Figura 6.5 – Diagrama de esforço normal na viga

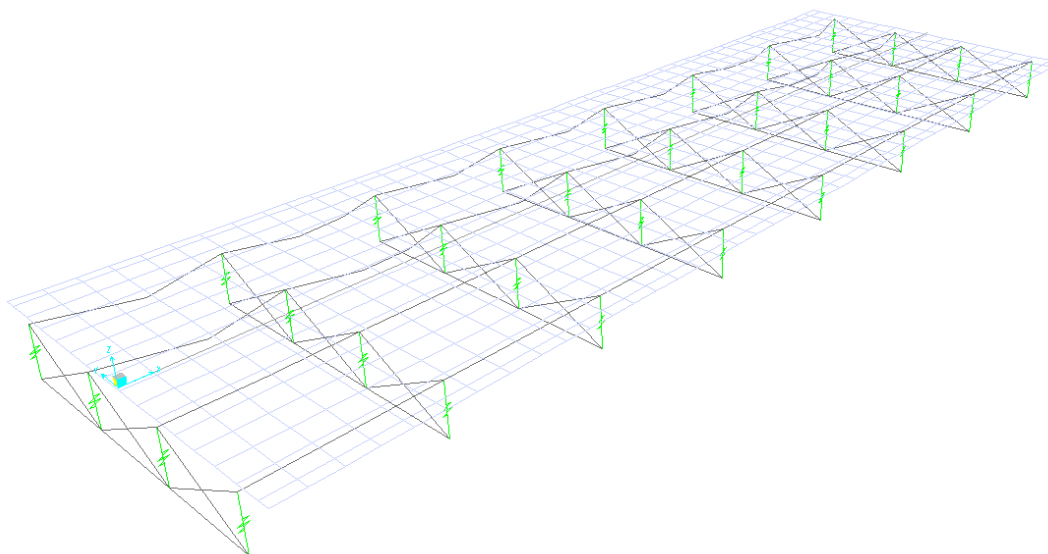


Figura 6.6 – Deformada da estrutura

Os diagramas ilustrados nas Figura 6.3 e 6.5 apresentam um comportamento descontínuo. O diagrama de momentos fletores exibe momentos negativos na região dos apoios. Isto acontece em decorrência da premissa adotada nos trechos de ligação entre os elementos da casca plana e os elementos de pórtico dos perfis.

A ligação perfil de aço-laje está simulada através da compatibilidade de deslocamentos (*body constraints*) entre nós dos elementos de pórtico (que representam o perfil de aço) e os nós da laje, de mesmas coordenadas x e y . Em função da discretização do perfil de aço, esta compatibilidade está definida somente nos planos dos diafragmas e nos pontos onde há mudança de seção transversal do perfil. Nestes pontos, observam-se na Figura 6.3 as discontinuidades do diagrama de momento fletores decorrentes dos poucos pontos de ligação perfil de aço-laje na discretização.

Sendo assim, para se obter o momento fletor total na viga, é necessário considerar a contribuição do esforço normal na laje, conforme o esquema ilustrado na Figura 6.7 e o procedimento descrito a seguir.

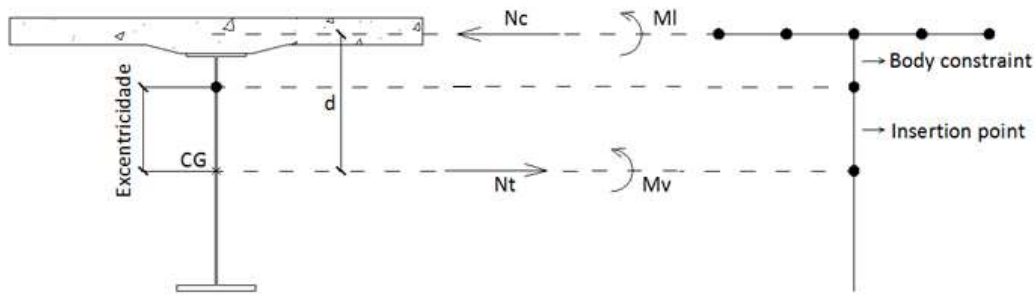


Figura 6.7 – Esquema para a obtenção do momento total na viga

$$\sum F_N = 0 \quad N_C = N_T$$

$$\sum M = M \quad M = N_C \times d + M_v + M_l$$

- Para uma dada seção mista obtêm-se os valores de esforço normal nos elementos de casca plana compreendidos na largura considerada;
- Em virtude do esforço normal de um elemento de casca plana ser dado em unidade de força por unidade de comprimento, para se obter a força normal em cada elemento, deve-se integrar os valores apresentados para cada e multiplicá-los pela dimensão do mesmo na direção analisada;
- O esforço normal total para a seção é calculado através do somatório dos esforços obtidos para cada elemento compreendido na largura considerada;
- Este esforço normal total é, então, multiplicado pela distância entre os centros de gravidade dos elementos de pórtico que representam as vigas e dos elementos de casca plana produzindo um momento, que acrescido ao obtido pelo diagrama apresentado na Figura 6.3 resulta no momento fletor total atuante.

Desta forma, pôde-se verificar que o momento negativo produzido na região dos apoios é anulado pelo momento proveniente da parcela do esforço normal da laje, refletindo, assim, o comportamento esperado para uma viga biapoiada.

6.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE ANÁLISE ESTRUTURAL

Na Tabela 6.1 encontram-se os valores dos momentos fletores máximos obtidos para a viga extrema devido ao carregamento do trem tipo TB-45 e os valores dos deslocamentos máximos, relativos à mesma seção, para ambos os modelos estruturais analisados. Verifica-se que os valores obtidos para o modelo de grelha foram consideravelmente superiores aos obtidos para o modelo refinado.

Tabela 6.1 - Resultados para os modelos de grelha e refinado

MODELO	Mmax	δ_{max}
GRELHA	5495,27 kNm	46,2 mm
REFINADO	4855,82 kNm	38,6 mm
ERRO RELATIVO	13,17%	19,69%

6.4 RESULTADOS DA ANÁLISE DE FADIGA

6.4.1 CRITÉRIO AASHTO [2]

Nas Tabelas 6.2, 6.3 e 6.4 apresentam-se os valores referentes à vida útil calculada para as categorias B, C e D.

Tabela 6.2 – Resultados da análise da fadiga para o veículo normatizado – Classe B

CLASSE B - SOLDA MESA INFERIOR COM A ALMA					
PERFIL	Mmax	$\Delta\sigma$	N (ciclos)	σ_sR	$\sigma_{TH}/2$
1	1498,00 kNm	25,42 MPa	110.000.000	32,8 MPa	55,0 MPa
2	1113,97 kNm	28,96 MPa	110.000.000	32,8 MPa	55,0 MPa

Tabela 6.3 – Resultados da análise da fadiga para o veículo normatizado – Classe C

CLASSE C - PÉ DA SOLDA DO ENRIJECADOR TRANSVERSAL					
PERFIL	Mmax	$\Delta\sigma$	N (ciclos)	σ_sR	$\sigma_{TH}/2$
1	1498,00 kNm	25,42 MPa	110.000.000	23,5 MPa	34,5 MPa
2	1113,97 kNm	28,96 MPa	110.000.000	23,5 MPa	34,5 MPa

Tabela 6.4 - Resultados da análise da fadiga para o veículo normalizado – Classe D

CLASSE D - PÉ DA SOLDA DO ENRIJECEDOR TRANSVERSAL (com falha na execução)					
PERFIL	Mmax	$\Delta\sigma$	N (ciclos)	σ_{SR}	$\sigma_{TH}/2$
1	1498,00 kNm	25,42 MPa	110.000.000	18,6 MPa	24,0 MPa
2	1113,97 kNm	28,96 MPa	110.000.000	18,6 MPa	24,0 MPa

De acordo com as Tabelas 6.2, 6.3 e 6.4, pode-se perceber que para as classes B, C e D tem-se $\sigma_{SR} < \sigma_{TH}/2$. Dessa forma, a verificação é feita com $\Delta\sigma < \sigma_{TH}/2$, tendo esta sido atendida pelos perfis 1 e 2 nas classes B e C. Isto significa que a vida útil à fadiga é maior do que 75 anos nestes casos. Para a classe D obteve-se $\Delta\sigma > \sigma_{TH}/2$, configurando-se uma vida útil maior do que 75 anos.

6.4.2 CÁLCULO DOS DANOS COM O ESPECTRO DE VEÍCULOS REAIS

Tabela 6.5 – Resultados para veículos centrados em duas faixas

VEICULO CENTRADO - 2 FAIXAS		
CLASSE	VIDA ÚTIL	
	PERFIL 1	PERFIL 2
B	2573 anos	2834 anos
C	943 anos	1039 anos
D	472 anos	520 anos

Tabela 6.6 – Resultados para veículos centrados em uma faixa

VEICULO CENTRADO - 1 FAIXA		
CLASSE	VIDA ÚTIL	
	PERFIL 1	PERFIL 2
B	2604 anos	2891 anos
C	955 anos	1060 anos
D	477 anos	530 anos

Tabela 6.7 - Resultados para veículos excêntricos em uma faixa

VEÍCULO EXCENTRICO - 1 FAIXA	
CLASSE	VIDA ÚTIL
	PERFIL 1
B	2755 anos
C	1010 anos
D	505 anos

Tabela 6.8 - Resultados para veículos centrados em duas faixas ($N=1,5 \times 10^6$ [2])

VEICULO CENTRADO - 2 FAIXAS		
CLASSE	VIDA ÚTIL	
	PERFIL 1	PERFIL 2
B	2058 anos	2268 anos
C	755 anos	831 anos
D	377 anos	416 anos

A Tabela 6.5 mostra o resumo da vida útil obtida considerando o espectro de veículos reais trafegando centrados nas duas faixas e o volume de tráfego por ano de $1,2 \times 10^6$ veículos. Verifica-se que os detalhes correspondentes às três classes têm vida útil bem maior do que 75 anos.

A Tabela 6.6 mostra o resultado considerando apenas a contribuição de uma faixa. Verifica-se que a parcela de danos produzida pelos veículos trafegando na faixa oposta à da viga analisada é desprezível neste caso.

Com os resultados mostrados na Tabela 6.7 pode-se perceber a influência da consideração dos veículos trafegando com excentricidade na faixa. A vida útil do perfil 1 resultou um pouco maior do que para o mesmo perfil considerando-se os veículos centrados na faixa.

A Tabela 6.8 apresenta o resultado da vida útil para as duas faixas considerando-se o veículo centrado com o volume de tráfego igual ao adotado pelo critério da AASHTO [2] para este tipo de rodovia (rural e interestadual). Houve uma considerável redução da vida útil em comparação com os resultados da Tabela 6.5 para o volume de tráfego medido em 2011, como explicado no item 5.3.1.E.1.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 MODELOS ESTRUTURAIS

Analisando os resultados obtidos para os dois modelos estruturais utilizados, pode-se observar uma diferença considerável entre os valores obtidos para os momentos fletores e deslocamentos máximos em cada modelo. Estas diferenças podem ser atribuídas à simplificação intrínseca ao modelo de grelha, no qual o comportamento estrutural da laje é assumido como o de um elemento de pórtico a partir do momento em que se considera uma seção mista, que gera variações nos resultados em virtude da distribuição transversal dos esforços ser diferente nos modelos considerados.

Outro fator importante que gera diferenças no resultado é a modelagem da cota dos apoios no modelo refinado, que se situam abaixo do plano médio da laje e do centro de gravidade dos perfis metálicos que compõem as vigas, diferentemente dos apoios modelados no modelo de grelha, que se situam no plano médio das seções equivalentes.

Conforme mostrado pelas linhas de influência de repartição transversal de ambos os modelos, respectivamente ilustradas nas Figuras 5.14 e 5.20, verifica-se que os esforços são mais bem distribuídos entre as vigas no modelo refinado do que no modelo de grelha. Além disto, constata-se que a ordenada da linha de influência correspondente à localização da viga extrema analisada é maior no modelo de grelha do que no modelo refinado. Espera-se, portanto, que uma maior parcela do carregamento seja absorvida por esta viga e, conseqüentemente, esta apresente valores de momento fletor e deslocamentos superiores aos verificados no modelo refinado.

7.2 ANÁLISE DE FADIGA

Com relação aos resultados obtidos para os cálculos da vida útil à fadiga, foram consideradas três categorias correspondentes aos respectivos detalhes:

- Categoria B: solda da mesa inferior com a alma;
- Categoria C: pé da solda do enrijecedor transversal;
- Categoria D: pé da solda do enrijecedor transversal considerando-se falha na execução da solda.

Esta última foi analisada para verificar a influência da categoria do detalhe na vida útil da estrutura. Para tanto, foi considerada esta hipótese, que simula um processo de soldagem realizado fora de um ambiente que tenha rigoroso controle da soldagem.

Verifica-se que nos detalhes de classe B e C as variações de tensões $\Delta\sigma$ foram menores do que a “tensão de corte” (*cut off limit*) prescrito pela AASHTO [2], indicando uma vida útil à fadiga maior do que a vida útil de projeto de 75 anos. Já para a classe D, este critério não foi atendido, prevendo-se, então, uma vida útil inferior a 75 anos.

Com o cálculo de danos produzidos pelos veículos reais obtiveram-se resultados de vida útil à fadiga bem maiores do que 75 anos. Tal constatação refletiria a abordagem conservadora dos critérios normativos referentes aos efeitos da fadiga, frente aos valores obtidos para o espectro de veículos reais. Entretanto, diversas hipóteses simplificadoras foram adotadas nos cálculos dos danos, algumas delas subestimam os danos reais. Por exemplo, a hipótese da geração de 1 ciclo de tensão por passagem de veículo e a adoção do coeficiente de impacto da NBR-7187 [14], que é calculado em função do vão da estrutura, que nem sempre representa a realidade da resposta dinâmica da estrutura.

Outro aspecto observado foi o da influência da consideração do tráfego de veículos em uma ou duas faixas. Analisando-se as Tabelas 6.5 e 6.6, percebe-se uma diferença pouco considerável na vida útil obtida para estas duas configurações. Portanto, a consideração do tráfego em duas faixas não acarreta significativa redução da vida útil da estrutura quando comparada com a hipótese do tráfego em apenas uma faixa.

Também foi constatada a influência da excentricidade lateral do veículo em relação ao centro da faixa de tráfego. Observando-se as Tabelas 6.6 e 6.7, pode-se concluir que a análise com o veículo centrado na faixa é uma boa aproximação para o cálculo da vida útil da estrutura, uma vez que os resultados obtidos para este caso foram mais desfavoráveis do que para o caso do veículo excêntrico. Portanto, é válida a hipótese de se analisar o veículo centrado na faixa.

Por fim, analisando-se os valores obtidos para todos os casos, é evidente a influência da categoria no cálculo da vida útil à fadiga. Quando se analisa um mesmo detalhe para duas categorias diferentes, como citado anteriormente para o caso do pé da

solda do enrijecedor, percebe-se uma significativa diferença no resultado referente à vida útil da estrutura, refletindo a sensibilidade desta classificação na avaliação dos efeitos da fadiga.

7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Primeiramente, sugere-se como objeto de continuidade dos estudos deste trabalho, o refinamento do modelo estrutural através do cálculo da rigidez vertical do aparelho de apoio, a fim de se obter resultados mais precisos e condizentes com a realidade da estrutura analisada.

Outra sugestão seria a de se analisar os mesmos efeitos abordados neste trabalho para uma ponte de concreto armado, a fim de se obter uma comparação entre os dois sistemas estruturais.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRANCO, C.M., FERNANDES, A.A., CASTRO, P.M.S.T., *Fadiga de Estruturas Soldadas*, Lisboa, Portugal, Editora Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
- [2] _____, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, American Association of State Highway and Transportation Officials, EUA, 2007.
- [3] _____, *ESDEP – European Steel Design Education Programme*, (<http://www.esdep.org>)
- [4] ROSSIGALI, C.E., *Estudo Probabilístico para Modelos de Cargas Móveis em Pontes Rodoviárias no Brasil*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1996.
- [5] _____, *NBR7188 – Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestre*, ABNT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1982.
- [6] _____, *NBR6118 – Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento*, ABNT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [7] PFEIL, M.S., PFEIL, W., *Estruturas de Aço – Dimensionamento Prático*, 8 ed., Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Editora LTC, 2009.
- [8] _____, *NBR8800 – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios*, ABNT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- [9] BELLEI, I.H., PINHO, F.O., *Pontes e Viadutos em Vigas Mistas – Série Manual de Construção em Aço*, Vol. 6, IBS/CBCA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Editora Interciência, 2007.
- [10] _____, *NBR7007 – Aços-Carbono e Microligados para Uso Estrutural e Geral*, ABNT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.
- [11] SAP2000 v14.1.0 Advanced, Computers and Structures Inc., 2009.

- [12] LEONHARDT, F., *Construções de Concreto – Principios Básicos da Construção de Pontes de Concreto*, In: *State of the Art Paper*, 16th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Osaka, Japan, 2005.
- [13] ____, *Norma para o Projeto das Estradas de Rodagem*, DNIT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1973.
- [14] ____, *NBR7187 – Projeto e execução de pontes de concreto armado e protendido*, ABNT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [15] PFEIL, M.S., MELO, E.S., BATTISTA, R.C, *Efeitos Dinâmicos de Veículos em Pontes Rodoviárias*, Anais do II Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- [16] ____, BS-5400, “*Fatigue Design Rules For Metallic Bridges*”, British Standards Institution, 1980.
- [17] AUTOCAD 2010, Autodesk, 2010.

9. ANEXOS

9.1 ANEXO A – CÁLCULO DA RIGIDEZ DO APARELHO DE APOIO

Objetivo:

Determinar a rigidez do aparelhos de apoio de neoprene utilizado na ponte contida no escopo deste trabalho.

DADOS DE ENTRADA

ORIGIN := 1

G := 1MPa (Módulo de elasticidade transversal do neoprene)

a_n := 300mm (Base do aparelho de apoio de neoprene)

b_n := 450mm (Largura do aparelho de apoio de neoprene)

d_n := 54mm (Altura do aparelho de apoio de neoprene)

$k_a := \frac{2 \cdot G \cdot a_n \cdot b_n}{d_n} = 5000 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$ (Rigidez do aparelho de apoio de neoprene)

9.2 ANEXO B – CÁLCULO DAS PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DAS SEÇÕES MISTAS

Objetivo:

Determinar as propriedades geométricas de uma seção em aço equivalente à seção mista em aço e concreto

DADOS DE ENTRADA

ORIGIN := 1

MODELO

L := 39.40m (Vão teórico da viga mista)
Lv := 3.50m (Distância entre vigas)
Lb := 1.25m (Distância entre a viga extrema e a borda do balanço)

MATERIAIS

$E_{\text{aço}} := 200000\text{MPa}$ (Módulo de elasticidade do aço)
 $E_{\text{concreto}} := 23800\text{MPa}$ (Módulo de elasticidade do concreto com $f_{ck} = 25\text{MPa}$)

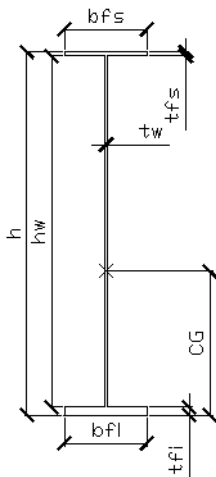
PERFIS

Perfil 1 - VÃO

$bf_{s1} := 500\text{mm}$
 $bf_{i1} := 670\text{mm}$
 $t_{fs1} := 20\text{mm}$
 $tf_{i1} := 40\text{mm}$
 $tw_1 := 13\text{mm}$
 $h_1 := 1800\text{mm}$
 $hw_1 := h_1 - (t_{fs1} + tf_{i1}) = 1740.0\text{mm}$

Perfil 2 - APOIOS

$bf_{s2} := 450\text{mm}$
 $bf_{i2} := 450\text{mm}$
 $t_{fs2} := 20\text{mm}$
 $tf_{i2} := 40\text{mm}$
 $tw_2 := 13\text{mm}$
 $h_2 := 1800\text{mm}$
 $hw_2 := h_2 - (t_{fs2} + tf_{i2}) = 1740.0\text{mm}$



CÁLCULOS

1 - Cálculo das propriedades geométricas dos perfis de aço

1.1 - Área da seção transversal

$$\text{Area}_i := t\bar{f}_i \times b\bar{f}_i + t w_i \times h w_i + (t f_s \times b f_s)$$

1.2 - Coordenada y do centro de gravidade tomada a partir do bordo externo da mesa inferior

$$y_{cg_i} := \frac{\left(\frac{t\bar{f}_i}{2}\right) \times (t\bar{f}_i \times b\bar{f}_i) + \left(t\bar{f}_i + \frac{h w_i}{2}\right) \times (t w_i \times h w_i) + \left(h_i - \frac{t f_s}{2}\right) \times (t f_s \times b f_s)}{(t\bar{f}_i \times b\bar{f}_i) + (t w_i \times h w_i) + (t f_s \times b f_s)}$$

1.3 - Momento de inércia em torno do eixo x

$$I_x := \left[\frac{b\bar{f}_i \times (t\bar{f}_i)^3}{12} + (b\bar{f}_i \times t\bar{f}_i) \times \left(y_{cg_i} - \frac{t\bar{f}_i}{2}\right)^2 \right] + \left[\frac{t w_i \times (h w_i)^3}{12} + (t w_i \times h w_i) \times \left(t\bar{f}_i + \frac{h w_i}{2} - y_{cg_i}\right)^2 \right] + \left[\frac{b f_s \times (t f_s)^3}{12} + (b f_s \times t f_s) \times \left(h_i - \frac{t f_s}{2} - y_{cg_i}\right)^2 \right]$$

1.4 - Momento de inércia em torno do eixo y

$$I_y := \frac{t\bar{f}_i \times (b\bar{f}_i)^3}{12} + \frac{h w_i \times (t w_i)^3}{12} + \frac{t f_s \times (b f_s)^3}{12}$$

1.5 - Raio de giração em torno do eixo x 1.6 - Raio de giração em torno do eixo y

$$r_{x_i} := \sqrt{\frac{I_x}{\text{Area}_i}}$$

$$r_{y_i} := \sqrt{\frac{I_y}{\text{Area}_i}}$$

1.7 - Módulo de resistência à flexão em relação às fibras inferiores

$$W_{inf_i} := \frac{I_x}{y_{cg_i}}$$

1.8 - Módulo de resistência à flexão em relação às fibras superiores

$$W_{sup_i} := \frac{I_x}{h_i - y_{cg_i}}$$

1.9 - Distância do centro de gravidade da área inferior à linha neutra plástica

$$h_{lnp_i} := \begin{cases} h_{lnp} \leftarrow \frac{\frac{\text{Area}_i}{2} + t\bar{f}_i \times (t w_i - b\bar{f}_i)}{t w_i} & \text{if } b\bar{f}_i \times t\bar{f}_i < \frac{\text{Area}_i}{2} \\ h_{lnp} \leftarrow \frac{\text{Area}_i}{2 \times b\bar{f}_i} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$h_{lnp.inf_i} := \begin{cases} h_{lnp.inf} \leftarrow h_{lnp_i} - \frac{(b\bar{f}_i \times t\bar{f}_i) \times \frac{t\bar{f}_i}{2} + (h_{lnp_i} - t\bar{f}_i) \times t w_i \times \left[t\bar{f}_i + \left(\frac{h_{lnp_i} - t\bar{f}_i}{2} \right) \right]}{b\bar{f}_i \times t\bar{f}_i + (h_{lnp_i} - t\bar{f}_i) \times t w_i} & \text{if } b\bar{f}_i \times t\bar{f}_i < \frac{\text{Area}_i}{2} \\ h_{lnp.inf} \leftarrow h_{lnp_i} - \frac{h_{lnp_i}}{2} & \text{otherwise} \end{cases}$$

1.10 - Distância do centro de gravidade da área superior à linha neutra plástica

$$h_{\text{Inp.sup}} := \begin{cases} h_{\text{Inp.sup}} \leftarrow \frac{\frac{(h_i - h_{\text{Inp}_1} - t_{\text{fs}})^2}{2} \times t_{\text{wi}} + (b_{\text{fs}} \times t_{\text{fs}}) \times \left(h_i - h_{\text{Inp}_1} - \frac{t_{\text{fs}}}{2}\right)}{(h_i - h_{\text{Inp}_1} - t_{\text{fs}}) \times t_{\text{wi}} + (b_{\text{fs}} \times t_{\text{fs}})} & \text{if } b_{\text{fi}} \times t_{\text{fi}} < \frac{\text{Area}_i}{2} \\ h_{\text{Inp.sup}} \leftarrow \frac{\frac{(t_{\text{fi}} - h_{\text{Inp}_1})^2}{2} \times b_{\text{fi}} + (h_{\text{wi}} \times t_{\text{wi}}) \times \left(t_{\text{fi}} - h_{\text{Inp}_1} + \frac{h_{\text{wi}}}{2}\right) + (b_{\text{fs}} \times t_{\text{fs}}) \times \left(h_i - h_{\text{Inp}_1} - \frac{t_{\text{fs}}}{2}\right)}{(t_{\text{fi}} - h_{\text{Inp}_1}) \times b_{\text{fi}} + (h_{\text{wi}} \times t_{\text{wi}}) + (b_{\text{fs}} \times t_{\text{fs}})} & \text{otherwise} \end{cases}$$

1.11 - Módulo plástico da seção

$$Z_i := \frac{\text{Area}_i}{2} \times (h_{\text{Inp.in}_1} + h_{\text{Inp.sup}})$$

1.12 - Resumo das propriedades dos perfis de aço

Perfil 1 - VÃO

$$\text{Area}_1 = 59420 \times \text{mm}^2$$

$$y_{\text{cg}_1} = 656.685 \times \text{mm}$$

$$I_{x_1} = 30870309536.407 \times \text{mm}^4$$

$$I_{y_1} = 1211195231.667 \times \text{mm}^4$$

$$r_{x_1} = 720.8 \times \text{mm}$$

$$r_{y_1} = 142.8 \times \text{mm}$$

$$W_{\text{inf}_1} = 47009338.6 \times \text{mm}^3$$

$$W_{\text{sup}_1} = 27000694.7 \times \text{mm}^3$$

$$h_{\text{Inp.in}_1} = 230.9 \times \text{mm}$$

$$h_{\text{Inp.sup}_1} = 1016.6 \times \text{mm}$$

$$Z_1 = 37064007.7 \times \text{mm}^3$$

Perfil 2 - APOIO

$$\text{Area}_2 = 49620 \times \text{mm}^2$$

$$y_{\text{cg}_2} = 746.8 \times \text{mm}$$

$$I_{x_2} = 25614876906.892 \times \text{mm}^4$$

$$I_{y_2} = 455943565 \times \text{mm}^4$$

$$r_{x_2} = 718.5 \times \text{mm}$$

$$r_{y_2} = 95.9 \times \text{mm}$$

$$W_{\text{inf}_2} = 34301379.9 \times \text{mm}^3$$

$$W_{\text{sup}_2} = 24320061.5 \times \text{mm}^3$$

$$h_{\text{Inp.in}_2} = 466.5 \times \text{mm}$$

$$h_{\text{Inp.sup}_2} = 832.3 \times \text{mm}$$

$$Z_2 = 32222007.7 \times \text{mm}^3$$

2 - Determinação da largura efetiva

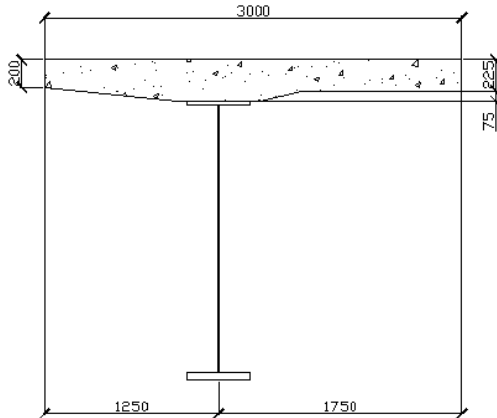
De acordo com o item O.2.2.1 da NBR 8800:2008 - Largura efetiva de vigas mistas biapoiadas: A largura efetiva da mesa de concreto, de cada lado da linha de centro da viga, deve ser igual ao menor dos seguintes valores:

- 1/8 do vão da viga mista, considerado entre linhas de centro dos apoios;
- metade da distância entre a linha de centro da viga analisada e a linha de centro da viga adjacente;
- distância da linha de centro da viga à borda de uma laje em balanço.

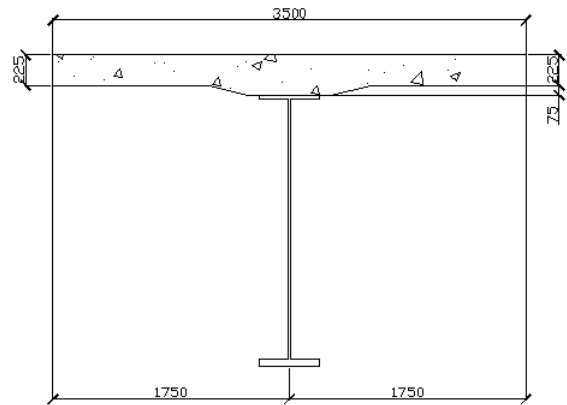
$$b_e := \min\left(\frac{1}{8} \times L, \frac{1}{2} \times L_v\right) = 1.8 \text{ m}$$

3 - Seções mistas de aço e concreto

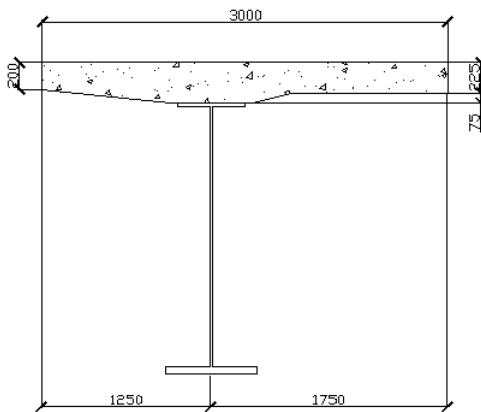
3.1 - Seção extrema no apoio



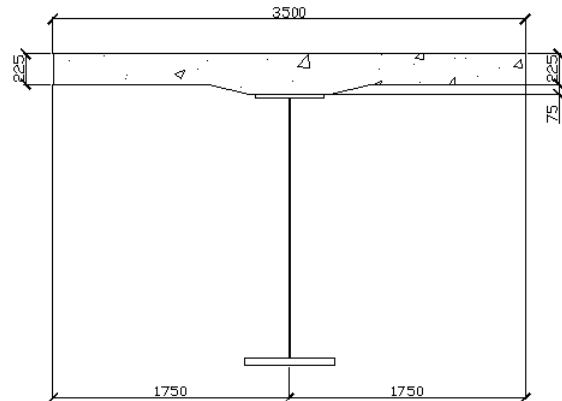
3.2 - Seção central no apoio



3.3 - Seção extrema no vão



3.4 - Seção central no vão



4 - Determinação da seção em aço equivalente ao trecho da seção em concreto

Para o cálculo de uma seção em aço equivalente ao trecho da seção em concreto, deve-se determinar as dimensões de uma seção retangular de aço que mantenha a coordenada vertical do centro de gravidade igual à da seção de concreto de modo que o momento de inércia em torno do eixo horizontal (X) se mantenha o mesmo.

Deve-se calcular a área de aço equivalente à de concreto através da divisão desta pela relação entre os módulos de elasticidade de aço e de concreto (a).

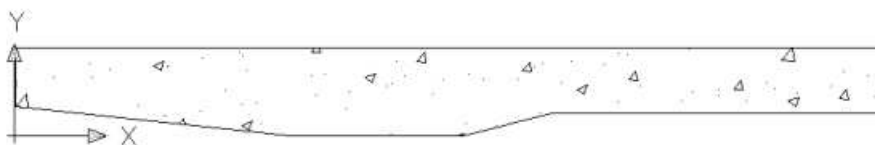
Para o cálculo de tensões e deformações devidas a cargas de curta duração, utiliza-se o fator α . Para o cálculo de tensões e deformações devidas a cargas permanentes, utiliza-se o fator 3α para considerar o efeito da fluência do concreto.

$$\alpha := \frac{E_{\text{aço}}}{E_{\text{concreto}}} = 8.4$$

Os dados referentes à área e centro de gravidade do trecho da seção em concreto foram obtidos com auxílio do software comercial AutoCAD [17].

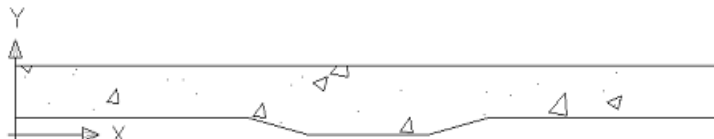
4.1 - Cálculos das seções para os efeitos das cargas de curta duração

4.1.1 - Seção extrema no apoio e no vão



$$\begin{aligned} \text{Area}_{se} &:= 755000\text{mm}^2 && \text{(Área do trecho em concreto da seção extrema sem a barreira)} \\ y_{g.se} &:= 172.05\text{mm} && \text{(Ordenada do centro de gravidade em relação ao sistema de coordenadas da figura)} \\ h_{eqcd.se} &:= 2 \times y_{g.se} = 344.1 \times \text{mm} && \text{(Altura da seção equivalente em aço)} \\ b_{eqcd.se} &:= \frac{\text{Area}_{se}}{h_{eqcd.se} \times \alpha} = 261.1 \times \text{mm} && \text{(Largura da seção equivalente em aço)} \end{aligned}$$

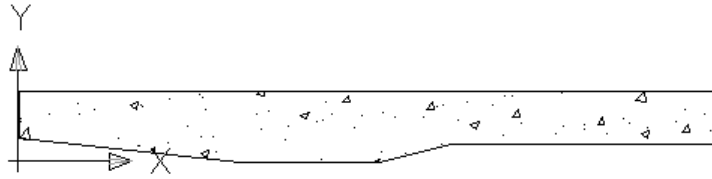
4.1.2 - Seção central no apoio e no vão



$$\begin{aligned} \text{Area}_{sc} &:= 855000\text{mm}^2 && \text{(Área do trecho em concreto da seção central)} \\ y_{g.sc} &:= 175.99\text{mm} && \text{(Ordenada do centro de gravidade em relação ao sistema de coordenadas da figura)} \\ h_{eqcd.sc} &:= 2 \times y_{g.sc} = 352.0 \times \text{mm} && \text{(Altura da seção equivalente em aço)} \\ b_{eqcd.sc} &:= \frac{\text{Area}_{sc}}{h_{eqcd.sc} \times \alpha} = 289.1 \times \text{mm} && \text{(Largura da seção equivalente em aço)} \end{aligned}$$

4.2 - Cálculos das seções para os efeitos das cargas de longa duração

4.2.1 - Seção extrema no apoio e no vão



$$Area_{se} := 755000 \text{ mm}^2$$

(Área do trecho em concreto da seção extrema sem a barreira)

$$y_{g.se} := 172.05 \text{ mm}$$

(Ordenada do centro de gravidade em relação ao sistema de coordenadas da figura)

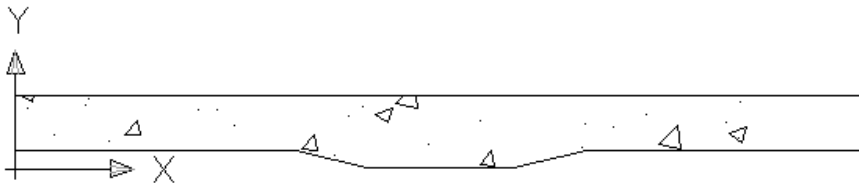
$$h_{eqld.se} := 2 \times y_{g.se} = 344.1 \times \text{mm}$$

(Altura da seção equivalente em aço)

$$b_{eqld.se} := \frac{Area_{se}}{h_{eqld.se} \times 3\alpha} = 87.0 \times \text{mm}$$

(Largura da seção equivalente em aço)

4.2.2 - Seção central no apoio e no vão



$$Area_{sc} := 855000 \text{ mm}^2$$

(Área do trecho em concreto da seção central)

$$y_{g.sc} := 175.99 \text{ mm}$$

(Ordenada do centro de gravidade em relação ao sistema de coordenadas da figura)

$$h_{eqld.sc} := 2 \times y_{g.sc} = 352.0 \times \text{mm}$$

(Altura da seção equivalente em aço)

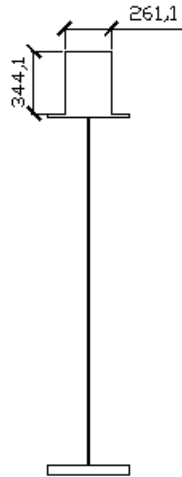
$$b_{eqld.sc} := \frac{Area_{sc}}{h_{eqld.sc} \times 3\alpha} = 96.4 \times \text{mm}$$

(Largura da seção equivalente em aço)

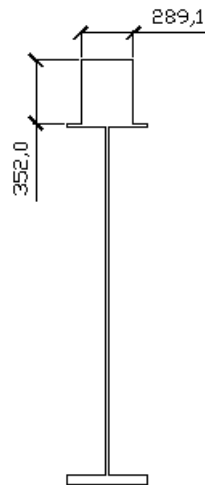
5 - Seções equivalentes

5.1 - Seções para os efeitos das cargas de curta duração

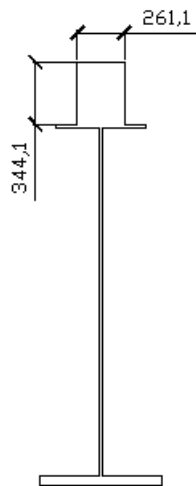
5.1.1 - Seção extrema no apoio



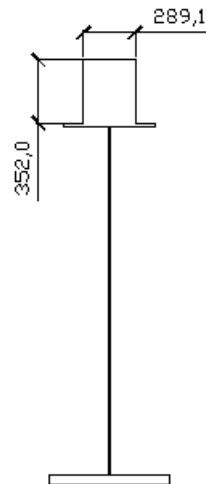
5.1.2 - Seção central no apoio



5.1.3 - Seção extrema no vão

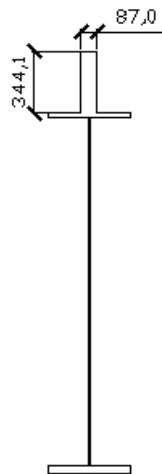


5.1.4 - Seção central no vão

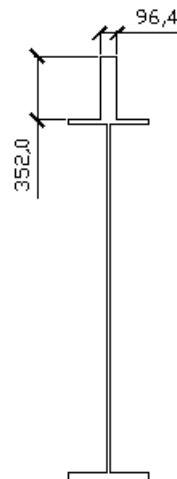


5.2 - Seções para os efeitos das cargas de longa duração

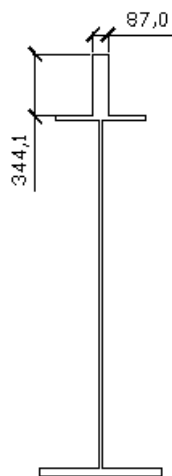
5.2.1 - Seção extrema no apoio



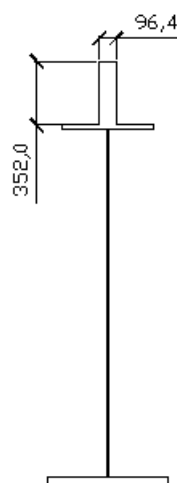
5.2.2 - Seção central no apoio



5.2.3 - Seção extrema no vão



5.2.4 - Seção central no vão



6 - Cálculo das propriedades geométricas das seções equivalentes

6.1 - Seções para os efeitos das cargas de curta duração

6.1.1 - Seção extrema no apoio

6.1.1.1 - Área da seção transversal

$$Area_{cd.sea} := h_{eqcd.se} \times b_{eqcd.se} + Area_2 = 139465 \times mm^2$$

6.1.1.2 - Coordenada y do centro de gravidade

$$y_{cd.sea} := \frac{y_{cg_2} \times Area_2 + \left(h_2 + \frac{h_{eqcd.se}}{2} \right) \times (h_{eqcd.se} \times b_{eqcd.se})}{h_{eqcd.se} \times b_{eqcd.se} + Area_2} = 1536.1 \times mm$$

6.1.1.3 - Momento de inércia em torno do eixo x

$$I_{x_{cd.sea}} := I_{x_2} + Area_2 \times (y_{cd.sea} - y_{cg_2})^2 + \frac{b_{eqcd.se} \times h_{eqcd.se}^3}{12} + (b_{eqcd.se} \times h_{eqcd.se}) \times \left(h_2 + \frac{h_{eqcd.se}}{2} - y_{cd.sea} \right)^2 = 74492810817.2 \times mm^4$$

6.1.1.4 - Momento de inércia em torno do eixo y

$$I_{y_{cd.sea}} := I_{y_2} + \frac{h_{eqcd.se} \times b_{eqcd.se}^3}{12} = 966367636.9 \times mm^4$$

6.1.1.5 - Raio de giração em torno do eixo x

$$r_{x_{cd.sea}} := \sqrt{\frac{I_{x_{cd.sea}}}{Area_{cd.sea}}} = 730.8 \times mm$$

6.1.1.6 - Raio de giração em torno do eixo y

$$r_{y_{cd.sea}} := \sqrt{\frac{I_{y_{cd.sea}}}{Area_{cd.sea}}} = 83.2 \times mm$$

6.1.1.7 - Módulo de resistência à flexão em relação às fibras inferiores

$$W_{inf_{cd.sea}} := \frac{I_{x_{cd.sea}}}{y_{cd.sea}} = 48494575.0 \times mm^3$$

6.1.1.8 - Módulo de resistência à flexão em relação às fibras superiores

$$W_{sup_{cd.sea}} := \frac{I_{x_{cd.sea}}}{h_2 + h_{eqcd.se} - y_{cd.sea}} = 122522292.5 \times mm^3$$

6.1.2 - Seção central no apoio

6.1.2.1 - Área da seção transversal

$$Area_{cd.sca} := h_{eqcd.sc} \times b_{eqcd.sc} + Area_2 = 151365 \times mm^2$$

6.1.2.2 - Coordenada y do centro de gravidade

$$y_{cd.sca} := \frac{y_{cg_2} \times Area_2 + \left(h_2 + \frac{h_{eqcd.sc}}{2} \right) \times (h_{eqcd.sc} \times b_{eqcd.sc})}{h_{eqcd.sc} \times b_{eqcd.sc} + Area_2} = 1573.0 \times mm$$

6.1.2.3 - Momento de inércia em torno do eixo x

$$I_{x_{cd.sca}} := I_{x2} + Area_2 \times (y_{cd.sca} - y_{cg_2})^2 + \frac{b_{eqcd.sc} \times h_{eqcd.sc}^3}{12} + (b_{eqcd.sc} \times h_{eqcd.sc}) \times \left(h_2 + \frac{h_{eqcd.sc}}{2} - y_{cd.sca} \right)^2 = 77063054978.9 \times mm^4$$

6.1.2.4 - Momento de inércia em torno do eixo y

$$I_{y_{cd.sca}} := I_{y2} + \frac{h_{eqcd.sc} \times b_{eqcd.sc}^3}{12} = 1164414451.7 \times mm^4$$

6.1.2.5 - Raio de giração em torno do eixo x

$$r_{x_{cd.sca}} := \sqrt{\frac{I_{x_{cd.sca}}}{Area_{cd.sca}}} = 713.5 \times mm$$

6.1.2.6 - Raio de giração em torno do eixo y

$$r_{y_{cd.sca}} := \sqrt{\frac{I_{y_{cd.sca}}}{Area_{cd.sca}}} = 87.7 \times mm$$

6.1.2.7 - Módulo de resistência à flexão em relação às fibras inferiores

$$W_{inf_{cd.sca}} := \frac{I_{x_{cd.sca}}}{y_{cd.sca}} = 48990279.3 \times mm^3$$

6.1.2.8 - Módulo de resistência à flexão em relação às fibras superiores

$$W_{sup_{cd.sca}} := \frac{I_{x_{cd.sca}}}{h_2 + h_{eqcd.sc} - y_{cd.sca}} = 133107725.8 \times mm^3$$

6.1.3 - Seção extrema no vão

6.1.3.1 - Área da seção transversal

$$Area_{cd.sev} := h_{eqcd.se} \times b_{eqcd.se} + Area_1 = 149265 \times mm^2$$

6.1.3.2 - Coordenada y do centro de gravidade

$$y_{cd.sev} := \frac{y_{cg_1} \times Area_1 + \left(h_1 + \frac{h_{eqcd.se}}{2} \right) \times (h_{eqcd.se} \times b_{eqcd.se})}{h_{eqcd.se} \times b_{eqcd.se} + Area_1} = 1448.4 \times mm$$

6.1.3.3 - Momento de inércia em torno do eixo x

$$I_{x_{cd.sev}} := I_{x1} + Area_1 \times (y_{cd.sev} - y_{cg_1})^2 + \frac{b_{eqcd.se} \times h_{eqcd.se}^3}{12} + (b_{eqcd.se} \times h_{eqcd.se}) \times \left(h_1 + \frac{h_{eqcd.se}}{2} - y_{cd.sev} \right)^2 = 93638395794.3 \times mm^4$$

6.1.3.4 - Momento de inércia em torno do eixo y

$$I_{y_{cd.sev}} := I_{y1} + \frac{h_{eqcd.se} \times b_{eqcd.se}^3}{12} = 1721619303.6 \times mm^4$$

6.1.3.5 - Raio de giração em torno do eixo x

$$r_{x_{cd.sev}} := \sqrt{\frac{I_{x_{cd.sev}}}{Area_{cd.sev}}} = 792.0 \times mm$$

6.1.3.6 - Raio de giração em torno do eixo y

$$r_{y_{cd.sev}} := \sqrt{\frac{I_{y_{cd.sev}}}{Area_{cd.sev}}} = 107.4 \times mm$$

6.1.3.7 - Módulo de resistência à flexão em relação às fibras inferiores

$$W_{\text{inf}_{\text{cd.scv}}} := \frac{I_{\text{cd.scv}}}{y_{\text{cd.scv}}} = 64648463.1 \times \text{mm}^3$$

6.1.3.8 - Módulo de resistência à flexão em relação às fibras superiores

$$W_{\text{sup}_{\text{cd.scv}}} := \frac{I_{\text{cd.scv}}}{h_1 + h_{\text{eqcd.sc}} - y_{\text{cd.scv}}} = 134600614.9 \times \text{mm}^3$$

6.1.4 - Seção central no vão

6.1.4.1 - Área da seção transversal

$$\text{Area}_{\text{cd.scv}} := h_{\text{eqcd.sc}} \times b_{\text{eqcd.sc}} + \text{Area}_1 = 161165 \times \text{mm}^2$$

6.1.4.2 - Coordenada y do centro de gravidade

$$y_{\text{cd.scv}} := \frac{y_{\text{cg}_1} \times \text{Area}_1 + \left(h_1 + \frac{h_{\text{eqcd.sc}}}{2} \right) \times (h_{\text{eqcd.sc}} \times b_{\text{eqcd.sc}})}{h_{\text{eqcd.sc}} \times b_{\text{eqcd.sc}} + \text{Area}_1} = 1489.6 \times \text{mm}$$

6.1.4.3 - Momento de inércia em torno do eixo x

$$I_{\text{cd.scv}} := I_{x1} + \text{Area}_1 \times (y_{\text{cd.scv}} - y_{\text{cg}_1})^2 + \frac{b_{\text{eqcd.sc}} \times h_{\text{eqcd.sc}}^3}{12} + (b_{\text{eqcd.sc}} \times h_{\text{eqcd.sc}}) \times \left(h_1 + \frac{h_{\text{eqcd.sc}}}{2} - y_{\text{cd.scv}} \right)^2 = 97213596243.1 \times \text{mm}^4$$

6.1.4.4 - Momento de inércia em torno do eixo y

$$I_{y_{\text{cd.scv}}} := I_{y1} + \frac{h_{\text{eqcd.sc}} \times b_{\text{eqcd.sc}}^3}{12} = 1919666118.3 \times \text{mm}^4$$

6.1.4.5 - Raio de giração em torno do eixo x

$$r_{x_{\text{cd.scv}}} := \sqrt{\frac{I_{x_{\text{cd.scv}}}}{\text{Area}_{\text{cd.scv}}}} = 776.7 \times \text{mm}$$

6.1.4.6 - Raio de giração em torno do eixo y

$$r_{y_{\text{cd.scv}}} := \sqrt{\frac{I_{y_{\text{cd.scv}}}}{\text{Area}_{\text{cd.scv}}}} = 109.1 \times \text{mm}$$

6.1.4.7 - Módulo de resistência à flexão em relação às fibras inferiores

$$W_{inf_{cd.scv}} := \frac{I_{x_{cd.scv}}}{y_{cd.scv}} = 65262653.7 \times \text{mm}^3$$

6.1.4.8 - Módulo de resistência à flexão em relação às fibras superiores

$$W_{sup_{cd.scv}} := \frac{I_{x_{cd.scv}}}{h_1 + h_{eq_{cd.sc}} - y_{cd.scv}} = 146758476.5 \times \text{mm}^3$$

6.2 - Seções para os efeitos das cargas de longa duração

6.2.1 - Seção extrema no apoio

6.2.1.1 - Área da seção transversal

$$Area_{1d.sea} := h_{eq_{1d.se}} \times b_{eq_{1d.se}} + Area_2 = 79568.3 \times \text{mm}^2$$

6.2.1.2 - Coordenada y do centro de gravidade

$$y_{1d.sea} := \frac{y_{cg_2} \times Area_2 + \left(h_2 + \frac{h_{eq_{1d.se}}}{2} \right) \times (h_{eq_{1d.se}} \times b_{eq_{1d.se}})}{h_{eq_{1d.se}} \times b_{eq_{1d.se}} + Area_2} = 1207.9 \times \text{mm}$$

6.2.1.3 - Momento de inércia em torno do eixo x

$$I_{x_{1d.sea}} := I_{x_2} + Area_2 \times (y_{1d.sea} - y_{cg_2})^2 + \frac{b_{eq_{1d.se}} \times h_{eq_{1d.se}}^3}{12} + (b_{eq_{1d.se}} \times h_{eq_{1d.se}}) \times \left(h_2 + \frac{h_{eq_{1d.se}}}{2} - y_{1d.sea} \right)^2 = 53949692925.5 \times \text{mm}^4$$

6.2.1.4 - Momento de inércia em torno do eixo y

$$I_{y_{1d.sea}} := I_{y_2} + \frac{h_{eq_{1d.se}} \times b_{eq_{1d.se}}^3}{12} = 474848160.3 \times \text{mm}^4$$

6.2.1.5 - Raio de giração em torno do eixo x

$$r_{x_{1d.sea}} := \sqrt{\frac{I_{x_{1d.sea}}}{Area_{1d.sea}}} = 823.4 \times \text{mm}$$

6.2.1.6 - Raio de giração em torno do eixo y

$$r_{y_{1d.sea}} := \sqrt{\frac{I_{y_{1d.sea}}}{Area_{1d.sea}}} = 77.3 \times \text{mm}$$

6.2.1.7 - Módulo de resistência à flexão em relação às fibras inferiores

$$W_{inf_{1d.sea}} := \frac{I_{x_{1d.sea}}}{y_{1d.sea}} = 44662542.4 \times \text{mm}^3$$

6.2.1.8 - Módulo de resistência à flexão em relação às fibras superiores

$$W_{sup_{1d.sea}} := \frac{I_{x_{1d.sea}}}{h_2 + h_{eq_{1d.se}} - y_{1d.sea}} = 57628739.3 \times \text{mm}^3$$

6.2.2 - Seção central no apoio

6.2.2.1 - Área da seção transversal

$$Area_{1d.sca} := h_{eq_{1d.sc}} \times b_{eq_{1d.sc}} + Area_2 = 83535 \times \text{mm}^2$$

6.2.2.2 - Coordenada y do centro de gravidade

$$y_{1d.sca} := \frac{y_{cg2} \times Area_2 + \left(h_2 + \frac{h_{eqld.sc}}{2} \right) \times (h_{eqld.sc} \times b_{eqld.sc})}{h_{eqld.sc} \times b_{eqld.sc} + Area_2} = 1245.8 \times \text{mm}$$

6.2.2.3 - Momento de inércia em torno do eixo x

$$I_{x1d.sca} := I_{x2} + Area_2 \times (y_{1d.sca} - y_{cg2})^2 + \frac{b_{eqld.sc} \times h_{eqld.sc}^3}{12} + (b_{eqld.sc} \times h_{eqld.sc}) \times \left(h_2 + \frac{h_{eqld.sc}}{2} - y_{1d.sca} \right)^2 = 56405175161.9 \times \text{mm}^4$$

6.2.2.4 - Momento de inércia em torno do eixo y

$$I_{y1d.sca} := I_{y2} + \frac{h_{eqld.sc} \times b_{eqld.sc}^3}{12} = 482183227.5 \times \text{mm}^4$$

6.2.2.5 - Raio de giração em torno do eixo x 6.2.2.6 - Raio de giração em torno do eixo y

$$r_{x1d.sca} := \sqrt{\frac{I_{x1d.sca}}{Area_{1d.sca}}} = 821.7 \times \text{mm} \qquad r_{y1d.sca} := \sqrt{\frac{I_{y1d.sca}}{Area_{1d.sca}}} = 76.0 \times \text{mm}$$

6.2.2.7 - Módulo de resistência à flexão em relação às fibras inferiores

$$W_{inf1d.sca} := \frac{I_{x1d.sca}}{y_{1d.sca}} = 45275399.2 \times \text{mm}^3$$

6.2.2.8 - Módulo de resistência à flexão em relação às fibras superiores

$$W_{sup1d.sca} := \frac{I_{x1d.sca}}{h_2 + h_{eqld.sc} - y_{1d.sca}} = 62246644.0 \times \text{mm}^3$$

6.2.3 - Seção extrema no vão

6.2.3.1 - Área da seção transversal

$$Area_{1d.sev} := h_{eqld.se} \times b_{eqld.se} + Area_1 = 89368.3 \times \text{mm}^2$$

6.2.3.2 - Coordenada y do centro de gravidade

$$y_{1d.sev} := \frac{y_{cg1} \times Area_1 + \left(h_1 + \frac{h_{eqld.se}}{2} \right) \times (h_{eqld.se} \times b_{eqld.se})}{h_{eqld.se} \times b_{eqld.se} + Area_1} = 1097.5 \times \text{mm}$$

6.2.3.3 - Momento de inércia em torno do eixo x

$$I_{x1d.sev} := I_{x1} + Area_1 \times (y_{1d.sev} - y_{cg1})^2 + \frac{b_{eqld.se} \times h_{eqld.se}^3}{12} + (b_{eqld.se} \times h_{eqld.se}) \times \left(h_1 + \frac{h_{eqld.se}}{2} - y_{1d.sev} \right)^2 = 65617813686.6 \times \text{mm}^4$$

6.2.3.4 - Momento de inércia em torno do eixo y

$$I_{y1d.sev} := I_{y1} + \frac{h_{eqld.se} \times b_{eqld.se}^3}{12} = 1230099826.9 \times \text{mm}^4$$

6.2.3.5 - Raio de giração em torno do eixo x

$$r_{x_{ld.sev}} := \sqrt{\frac{I_{x_{ld.sev}}}{Area_{ld.sev}}} = 856.9 \times \text{mm}$$

6.2.3.6 - Raio de giração em torno do eixo y

$$r_{y_{ld.sev}} := \sqrt{\frac{I_{y_{ld.sev}}}{Area_{ld.sev}}} = 117.3 \times \text{mm}$$

6.2.3.7 - Módulo de resistência à flexão em relação às fibras inferiores

$$W_{inf_{ld.sev}} := \frac{I_{x_{ld.sev}}}{y_{ld.sev}} = 59789620.3 \times \text{mm}^3$$

6.2.3.8 - Módulo de resistência à flexão em relação às fibras superiores

$$W_{sup_{ld.sev}} := \frac{I_{x_{ld.sev}}}{h_1 + h_{eqld.sc} - y_{ld.sev}} = 62694875.0 \times \text{mm}^3$$

6.2.4 - Seção central no vão**6.2.4.1 - Área da seção transversal**

$$Area_{ld.scv} := h_{eqld.sc} \times b_{eqld.sc} + Area_1 = 93335 \times \text{mm}^2$$

6.2.4.2 - Coordenada y do centro de gravidade

$$y_{ld.scv} := \frac{y_{cg_1} \times Area_1 + \left(h_1 + \frac{h_{eqld.sc}}{2} \right) \times (h_{eqld.sc} \times b_{eqld.sc})}{h_{eqld.sc} \times b_{eqld.sc} + Area_1} = 1136.1 \times \text{mm}$$

6.2.4.3 - Momento de inércia em torno do eixo x

$$I_{x_{ld.scv}} := I_x + Area_1 \times (y_{ld.scv} - y_{cg_1})^2 + \frac{b_{eqld.sc} \times h_{eqld.sc}^3}{12} + (b_{eqld.sc} \times h_{eqld.sc}) \times \left(h_1 + \frac{h_{eqld.sc}}{2} - y_{ld.scv} \right)^2 = 68801650128.2 \times \text{mm}^4$$

6.2.4.4 - Momento de inércia em torno do eixo y

$$I_{y_{ld.scv}} := I_y + \frac{h_{eqld.sc} \times b_{eqld.sc}^3}{12} = 1237434894.1 \times \text{mm}^4$$

6.2.4.5 - Raio de giração em torno do eixo x

$$r_{x_{ld.scv}} := \sqrt{\frac{I_{x_{ld.scv}}}{Area_{ld.scv}}} = 858.6 \times \text{mm}$$

6.2.4.6 - Raio de giração em torno do eixo y

$$r_{y_{ld.scv}} := \sqrt{\frac{I_{y_{ld.scv}}}{Area_{ld.scv}}} = 115.1 \times \text{mm}$$

6.2.4.7 - Módulo de resistência à flexão em relação às fibras inferiores

$$W_{inf_{ld.scv}} := \frac{I_{x_{ld.scv}}}{y_{ld.scv}} = 60560640.0 \times \text{mm}^3$$

6.2.4.8 - Módulo de resistência à flexão em relação às fibras superiores

$$W_{sup_{ld.scv}} := \frac{I_{x_{ld.scv}}}{h_1 + h_{eqld.sc} - y_{ld.scv}} = 67724735.4 \times \text{mm}^3$$

6.3 - Resumo das propriedades das seções equivalentes

6.3.1 - Seções para os efeitos das cargas de curta duração

6.3.1.1 - Seção extrema no apoio

$$Area_{cd.sea} = 139465.0 \times mm^2$$

$$y_{cd.sea} = 1536.1 \times mm$$

$$Ix_{cd.sea} = 74492810817.2 \times mm^4$$

$$Iy_{cd.sea} = 966367636.9 \times mm^4$$

$$rx_{cd.sea} = 730.8 \times mm$$

$$ry_{cd.sea} = 83.2 \times mm$$

$$Winf_{cd.sea} = 48494575.0 \times mm^3$$

$$Wsup_{cd.sea} = 122522292.5 \times mm^3$$

6.3.1.2 - Seção central no apoio

$$Area_{cd.sca} = 151365 \times mm^2$$

$$y_{cd.sca} = 1573.0 \times mm$$

$$Ix_{cd.sca} = 77063054978.9 \times mm^4$$

$$Iy_{cd.sca} = 1164414451.7 \times mm^4$$

$$rx_{cd.sca} = 713.5 \times mm$$

$$ry_{cd.sca} = 87.7 \times mm$$

$$Winf_{cd.sca} = 48990279.3 \times mm^3$$

$$Wsup_{cd.sca} = 133107725.8 \times mm^3$$

6.3.1.3 - Seção extrema no vão

$$Area_{cd.sev} = 149265 \times mm^2$$

$$y_{cd.sev} = 1448.4 \times mm$$

$$Ix_{cd.sev} = 93638395794.3 \times mm^4$$

$$Iy_{cd.sev} = 1721619303.6 \times mm^4$$

$$rx_{cd.sev} = 792.0 \times mm$$

$$ry_{cd.sev} = 107.4 \times mm$$

$$Winf_{cd.sev} = 64648463.1 \times mm^3$$

$$Wsup_{cd.sev} = 134600614.9 \times mm^3$$

6.3.1.4 - Seção central no vão

$$Area_{cd.scv} = 161165 \times mm^2$$

$$y_{cd.scv} = 1489.6 \times mm$$

$$Ix_{cd.scv} = 97213596243.1 \times mm^4$$

$$Iy_{cd.scv} = 1919666118.3 \times mm^4$$

$$rx_{cd.scv} = 776.7 \times mm$$

$$ry_{cd.scv} = 109.1 \times mm$$

$$Winf_{cd.scv} = 65262653.7 \times mm^3$$

$$Wsup_{cd.scv} = 146758476.5 \times mm^3$$

6.3.2 - Seções para os efeitos das cargas de longa duração

6.3.2.1 - Seção extrema no apoio

$$Area_{ld.sea} = 79568.333 \times mm^2$$

$$y_{ld.sea} = 1207.9 \times mm$$

$$Ix_{ld.sea} = 53949692925.5 \times mm^4$$

$$Iy_{ld.sea} = 474848160.3 \times mm^4$$

$$rx_{ld.sea} = 823.4 \times mm$$

$$ry_{ld.sea} = 77.3 \times mm$$

$$Winf_{ld.sea} = 44662542.4 \times mm^3$$

$$Wsup_{ld.sea} = 57628739.3 \times mm^3$$

6.3.2.2 - Seção central no apoio

$$Area_{ld.sca} = 83535 \times mm^2$$

$$y_{ld.sca} = 1245.8 \times mm$$

$$Ix_{ld.sca} = 56405175161.9 \times mm^4$$

$$Iy_{ld.sca} = 482183227.5 \times mm^4$$

$$rx_{ld.sca} = 821.7 \times mm$$

$$ry_{ld.sca} = 76.0 \times mm$$

$$Winf_{ld.sca} = 45275399.2 \times mm^3$$

$$Wsup_{ld.sca} = 62246644.0 \times mm^3$$

6.3.2.3 - Seção extrema no vão

$$Area_{ld.sev} = 89368.333 \times mm^2$$

$$y_{ld.sev} = 1097.5 \times mm$$

$$Ix_{ld.sev} = 65617813686.6 \times mm^4$$

$$Iy_{ld.sev} = 1230099826.9 \times mm^4$$

$$rx_{ld.sev} = 856.9 \times mm$$

$$ry_{ld.sev} = 117.3 \times mm$$

$$Winf_{ld.sev} = 59789620.3 \times mm^3$$

$$Wsup_{ld.sev} = 62694875.0 \times mm^3$$

6.3.2.4 - Seção central no vão

$$Area_{ld.scv} = 93335 \times mm^2$$

$$y_{ld.scv} = 1136.1 \times mm$$

$$Ix_{ld.scv} = 68801650128.2 \times mm^4$$

$$Iy_{ld.scv} = 1237434894.1 \times mm^4$$

$$rx_{ld.scv} = 858.6 \times mm$$

$$ry_{ld.scv} = 115.1 \times mm$$

$$Winf_{ld.scv} = 60560640.0 \times mm^3$$

$$Wsup_{ld.scv} = 67724735.4 \times mm^3$$

9.3 ANEXO C – VERIFICAÇÕES DOS PERFIS METÁLICOS E DA SECÃO

MISTA

Objetivo:

Verificar o perfil metálico soldado para os estados limites de flambagem local da alma e da mesa escoamento da mesa tracionada para a situação de etapa construtiva. Fazer a verificação para a seção mista aço-concreto, levando em consideração a fluência na etapa do carregamento permanente e depois sem considerar o efeito da fluência na etapa do carregamento móvel.

DADOS DE ENTRADA

DADOS GEOMÉTRICOS DO MODELO:

$L_t := 13\text{m}$	(Largura do tabuleiro)
$t_c := 0.225\text{m}$	(Espessura da laje)
$t_r := 0.125\text{m}$	(Espessura do revestimento asfáltico)
$A_{\text{barreira}} := 0.23\text{m}^2$	(Área da barreira lateral)
$L_{\text{barreira}} := 0.40\text{m}$	(Largura da barreira lateral)
$N_{\text{longarinas}} := 4$	(Número de longarinas)

MATERIAIS:

$$\gamma_{\text{concreto}} := 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$f_{ck} := 25\text{MPa}$$

$$E_{\text{concreto}} := 0.85 \times 5600 \times \sqrt{f_{ck}} \times \text{MPa}^{0.5} = 23800.0 \times \text{MPa}$$

$$\gamma_{\text{aço}} := 78.50 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$f_{yk} := 350\text{MPa}$$

$$E_{\text{aço}} := 200\text{GPa}$$

$$\gamma_{\text{asfalto}} := 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

COEFICIENTES DE PONDERAÇÃO DAS AÇÕES:

De acordo com a Tabela 1 da NBR-8800 [8]:

$$\gamma_{a.1} := 1.10 \quad \gamma_{g.\text{concreto}} := 1.4 \quad \gamma_q := 1.5$$

$$\gamma_{c.1} := 1.4 \quad \gamma_{g.\text{metalica}} := 1.25 \quad \gamma_{g.\text{asfalto}} := 1.35$$

ESFORÇOS SOLICITANTES:

Os esforços abaixo foram obtidos diretamente dos dados de saída do programa SAP2000 [11]. Os que estão com o índice 1 correspondem ao momento máximo que solicita o perfil 1, e os com índice 2 o perfil

$Msd1_{vão} := 6043.37kN \times m$	(Momento devido à carga permanente na etapa construtiva)
$Msd2_{vão} := 2532.43kN \times m$	(Momento devido à carga permanente na etapa 2 - após a cura do concreto da laje)
$Ms3_{vão} := 4651.63kN \times m$	(Momento devido à carga móvel)
$Msd1_{apoio} := 3748.19kN \times m$	(Momento devido à carga permanente na etapa construtiva)
$Msd2_{apoio} := 1570.34kN \times m$	(Momento devido à carga permanente na etapa 2 - após a cura do concreto da laje)
$Ms3_{apoio} := 3144.96kN \times m$	(Momento devido à carga móvel)

1. CÁLCULO DAS CARGAS ATUANTES

1.1. ETAPA CONSTRUTIVA - CARGA PERMANENTE ANTERIOR À CURA DO CONCRETO

Nesta etapa, anterior à cura do concreto da laje, a viga metálica absorve os esforços provenientes da carga permanente sozinha, sem contar com a largura efetiva da laje de concreto.

1. CÁLCULO DAS CARGAS ATUANTES

1.1. ETAPA CONSTRUTIVA - CARGA PERMANENTE ANTERIOR À CURA DO CONCRETO

Nesta etapa, anterior à cura do concreto da laje, a viga metálica absorve os esforços provenientes da carga permanente sozinha, sem contar com a largura efetiva da laje de concreto.

- Carregamento permanente

$$Q1_{laje} := tc \times \frac{Lt}{4} \times \gamma_{concreto} = 18.3 \times \frac{kN}{m} \quad \text{(Carga proveniente do peso próprio da laje)}$$
$$Q1_{vigas} := \gamma_{aço} \times \frac{(0.6Area_1 + 0.4 \times Area_2)}{Lt} \times N_{longarinas} = 1.3 \times \frac{kN}{m^2} \quad \text{(Carga proveniente do peso próprio das vigas)}$$
$$Q1_{esc} := 0.2 \times \frac{kN}{m^2} \quad \text{(Carga proveniente do peso próprio do escoramento)}$$
$$Q1_{metalica} := (Q1_{vigas} + Q1_{esc}) \times \frac{Lt}{N_{longarinas}} = 5.0 \times \frac{kN}{m} \quad \text{(Carga total da estrutura metálica)}$$
$$Q1 := \gamma_{g.concreto} \times Q1_{laje} + \gamma_{g.metalica} \times Q1_{metalica} = 31.9 \times \frac{kN}{m} \quad \text{Carga permanente total atuante em (cada viga)}$$

1.2. ETAPA POSTERIOR À CURA DO CONCRETO

Nesta etapa, o concreto da laje já está curado, e agora a estrutura recebe a carga permanente das barreiras laterais e do revestimento asfáltico. Agora a viga metálica trabalhará em conjunto com a laje, tendo o funcionamento de uma viga mista em aço-concreto.

- Carregamento permanente

$$Q2_{\text{barreira}} := A_{\text{barreira}} \times \gamma_{\text{concreto}} \times \frac{2}{N_{\text{longarinas}}} = 2.9 \times \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (\text{Carga proveniente do peso próprio da barreira lateral})$$

$$Q2_{\text{asfalto}} := \gamma_{\text{asfalto}} \times t_r \times (L_t - 2 \times L_{\text{barreira}}) \times \frac{1}{4} = 6.9 \times \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (\text{Carga proveniente do peso próprio do revestimento asfáltico})$$

$$Q2 := \gamma_{\text{g.concreto}} \times Q2_{\text{barreira}} + \gamma_{\text{g.asfalto}} \times Q2_{\text{asfalto}} = 13.3 \times \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (\text{Carga permanente total atuante em cada viga})$$

1.3. ETAPA CARGA MÓVEL

Nesta etapa, a estrutura recebe os carregamentos móveis provenientes do veículo que sobre ela passa. Trata-se do trem tipo TB-45, cujo efeito da passagem é majorada por um coeficiente de impacto calculado conforme a NBR-7187.

- Carregamento móvel

$$\phi := 1.4 - 0.007 \times \frac{L}{1\text{m}} = 1.12 \quad (\text{Coeficiente de impacto})$$

$$Msd3_{\text{vão}} := \phi \times \gamma_q \times Ms3_{\text{vão}} = 7844.0 \times \text{kN} \times \text{m}$$

$$Msd3_{\text{apoio}} := \phi \times \gamma_q \times Ms3_{\text{apoio}} = 5303.3 \times \text{kN} \times \text{m}$$

2 - VERIFICAÇÕES DOS PERFIS PARA A ETAPA CONSTRUTIVA:

2.1 - ESTADO LIMITE DE FLAMBAGEM LOCAL DA MESA (FLM)

$$\sigma_r := 0.3 \times f_{yk} = 105.0 \times \text{MPa} \quad (\text{Tensão residual de compressão nas mesas})$$

$$Kc_i := \begin{cases} Kc_i \leftarrow 0.35 & \text{if } \frac{4}{\sqrt{\frac{hw_i}{tw_i}}} < 0.35 \\ Kc_i \leftarrow \frac{4}{\sqrt{\frac{hw_i}{tw_i}}} & \text{if } 0.35 \leq \frac{4}{\sqrt{\frac{hw_i}{tw_i}}} \leq 0.76 \\ Kc_i \leftarrow 0.76 & \text{if } \frac{4}{\sqrt{\frac{hw_i}{tw_i}}} > 0.76 \end{cases}$$

$$Kc = \begin{pmatrix} 0.35 \\ 0.35 \end{pmatrix}$$

- Cálculo da esbeltez limite

$$\lambda_{b\text{mesa}_i} := \frac{bfs_i}{2 \times tfs_i} \quad \lambda_{p\text{mesa}_i} := 0.38 \times \sqrt{\frac{E_{aço}}{f_{yk}}} \quad \lambda_{r\text{mesa}_i} := 0.95 \times \sqrt{\frac{E_{aço}}{(f_{yk} - \sigma_r) Kc_i}}$$

$$\lambda_{b\text{mesa}} = \begin{pmatrix} 12.50 \\ 11.25 \end{pmatrix} \quad \lambda_{p\text{mesa}} = \begin{pmatrix} 9.08 \\ 9.08 \end{pmatrix} \quad \lambda_{r\text{mesa}} = \begin{pmatrix} 16.06 \\ 16.06 \end{pmatrix}$$

$$Mesa_i := \begin{cases} \text{"Compacta"} & \text{if } \lambda_{b_{mesa_i}} \leq \lambda_{p_{mesa_i}} \\ \text{"Semi-compacta"} & \text{if } \lambda_{p_{mesa_i}} < \lambda_{b_{mesa_i}} \leq \lambda_{r_{mesa_i}} \\ \text{"Esbelta"} & \text{if } \lambda_{b_{mesa_i}} > \lambda_{r_{mesa_i}} \end{cases}$$

$$Mesa = \begin{pmatrix} \text{"Semi-compacta"} \\ \text{"Semi-compacta"} \end{pmatrix}$$

$$Mr_i := W_{sup_i} \times (f_{yk} - \sigma_r)$$

$$Mr = \begin{pmatrix} 6615.2 \\ 5958.4 \end{pmatrix} \times \text{kN} \times \text{m}$$

$$Mp_i := Z_i \times f_{yk}$$

$$Mp = \begin{pmatrix} 12972.4 \\ 11277.7 \end{pmatrix} \times \text{kN} \times \text{m}$$

$$Mn_{mesa_i} := \begin{cases} Mp_i & \text{if } Mesa_i = \text{"Compacta"} \\ \left[Mp_i - (Mp_i - Mr_i) \times \frac{\lambda_{b_{mesa_i}} - \lambda_{p_{mesa_i}}}{\lambda_{r_{mesa_i}} - \lambda_{p_{mesa_i}}} \right] & \text{if } Mesa_i = \text{"Semi-compacta"} \\ \text{"Ver anexo H da NBR 8800:2008"} & \text{if } Mesa_i = \text{"Esbelta"} \end{cases}$$

$$Mn_{mesa} = \begin{pmatrix} 9858.4 \\ 9625.5 \end{pmatrix} \times \text{kN} \times \text{m}$$

$$Mrd_{mesacomprimada_i} := \frac{Mn_{mesa_i}}{\gamma_{a.1}}$$

$$Mrd_{mesacomprimada} = \begin{pmatrix} 8962.1 \\ 8750.4 \end{pmatrix} \times \text{kN} \times \text{m}$$

$$Verifica\c{c}o_mesacomprimada_i := \begin{cases} \text{if } i = 1 \\ \left| \begin{array}{l} a \leftarrow \text{"OK"} \text{ if } Mrd_{mesacomprimada_i} \geq Msd1_{v\tilde{a}o} \\ a \leftarrow \text{"N\tilde{A}O_OK"} \text{ if } Mrd_{mesacomprimada_i} < Msd1_{v\tilde{a}o} \end{array} \right. \\ \text{if } i = 2 \\ \left| \begin{array}{l} a \leftarrow \text{"OK"} \text{ if } Mrd_{mesacomprimada_i} \geq Msd1_{apoio} \\ a \leftarrow \text{"N\tilde{A}O_OK"} \text{ if } Mrd_{mesacomprimada_i} < Msd1_{apoio} \end{array} \right. \\ a \end{cases}$$

$$Verifica\c{c}o_mesacomprimada = \begin{pmatrix} \text{"OK"} \\ \text{"OK"} \end{pmatrix}$$

2.2 - ESCOAMENTO DA MESA TRACIONADA

$$M_{res_i} := Winf_i \times fyk$$

$$M_{res} = \begin{pmatrix} 16453.3 \\ 12005.5 \end{pmatrix} \times kN \times m$$

$$Mrd_{mesatracionada_i} := \frac{M_{res_i}}{\gamma_{a.1}}$$

$$Mrd_{mesatracionada} = \begin{pmatrix} 14957.5 \\ 10914.1 \end{pmatrix} \times kN \times m$$

$$Verificação_mesatracionada_i := \begin{cases} \text{if } i = 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} a \leftarrow \text{"OK"} \text{ if } Mrd_{mesatracionada_i} \geq Msd1_{vão} \\ a \leftarrow \text{"NÃO_OK"} \text{ if } Mrd_{mesatracionada_i} < Msd1_{vão} \end{array} \right. \\ \text{if } i = 2 \\ \quad \left| \begin{array}{l} a \leftarrow \text{"OK"} \text{ if } Mrd_{mesatracionada_i} \geq Msd1_{apoio} \\ a \leftarrow \text{"NÃO_OK"} \text{ if } Mrd_{mesatracionada_i} < Msd1_{apoio} \end{array} \right. \\ a \end{cases}$$

$$Verificação_mesatracionada = \begin{pmatrix} \text{"OK"} \\ \text{"OK"} \end{pmatrix}$$

2.3 - ESTADO LIMITE DE FLAMBAGEM LOCAL DA ALMA (FLA)

$$hc_i := 2 \times (h_i - y_{cg_i} - tfs_i)$$

$$hp_i := 2 \times (h_i - h_{lnp_i} - tfs_i)$$

$$\lambda_{p_alma_i} := \frac{\frac{hc_i}{hp_i} \times \sqrt{\frac{E_{aço}}{fyk}}}{\left[0.54 \times \frac{Mp_i}{\min(Wsup_i, Winf_i) \times (fyk - \sigma_r)} - 0.09 \right]^2} \quad \lambda_{r_alma_i} := 5.7 \times \sqrt{\frac{E_{aço}}{fyk}}$$

$$\lambda_{b_alma_i} := \frac{hw_i}{tw_i}$$

$$\lambda_{p_alma} = \begin{pmatrix} 18.9 \\ 23.4 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_{r_alma} = \begin{pmatrix} 136.3 \\ 136.3 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_{b_alma} = \begin{pmatrix} 133.8 \\ 133.8 \end{pmatrix}$$

$$Esbeltez_alma_i := \begin{cases} \text{"Compacta"} \text{ if } \lambda_{b_alma_i} \leq \lambda_{p_alma_i} \\ \text{"Semi-compacta"} \text{ if } \lambda_{p_alma_i} < \lambda_{b_alma_i} \leq \lambda_{r_alma_i} \\ \text{"Esbelta"} \text{ if } \lambda_{b_alma_i} > \lambda_{r_alma_i} \end{cases}$$

$$\text{Esbeltez_alma} = \begin{pmatrix} \text{"Semi-compacta"} \\ \text{"Semi-compacta"} \end{pmatrix}$$

$$\text{Mr}_{\text{alma}_i} := \begin{cases} f_{yk} \times W_{\text{sup}_i} & \text{if } W_{\text{sup}_i} < W_{\text{inf}_i} \\ f_{yk} \times W_{\text{inf}_i} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Mr}_{\text{alma}} = \begin{pmatrix} 9450.2 \\ 8512.0 \end{pmatrix} \times \text{kN} \times \text{m}$$

$$\text{Mn}_{\text{alma}_i} := \text{M}_{p_i} - (\text{M}_{p_i} - \text{Mr}_{\text{alma}_i}) \times \frac{\lambda_{b_{\text{alma}_i}} - \lambda_{p_{\text{alma}_i}}}{\lambda_{r_{\text{alma}_i}} - \lambda_{p_{\text{alma}_i}}}$$

$$\text{Mn}_{\text{alma}} = \begin{pmatrix} 9522.5 \\ 8571.1 \end{pmatrix} \times \text{kN} \times \text{m}$$

$$\text{Mrd}_{\text{alma}_i} := \frac{\text{Mn}_{\text{alma}_i}}{\gamma_{a.1}}$$

$$\text{Mrd}_{\text{alma}} = \begin{pmatrix} 8656.9 \\ 7791.9 \end{pmatrix} \times \text{kN} \times \text{m}$$

$$\text{Verificação_alma}_i := \begin{cases} \text{if } i = 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} a \leftarrow \text{"OK"} \text{ if } \text{Mrd}_{\text{alma}_i} \geq \text{Msd1}_{\text{vão}} \\ a \leftarrow \text{"NÃO_OK"} \text{ if } \text{Mrd}_{\text{alma}_i} < \text{Msd1}_{\text{vão}} \end{array} \right. \\ \text{if } i = 2 \\ \quad \left| \begin{array}{l} a \leftarrow \text{"OK"} \text{ if } \text{Mrd}_{\text{alma}_i} \geq \text{Msd1}_{\text{apoio}} \\ a \leftarrow \text{"NÃO_OK"} \text{ if } \text{Mrd}_{\text{alma}_i} < \text{Msd1}_{\text{apoio}} \end{array} \right. \\ a \end{cases}$$

$$\text{Verificação_alma} = \begin{pmatrix} \text{"OK"} \\ \text{"OK"} \end{pmatrix}$$

3 - VERIFICAÇÕES DOS PERFIS PARA A ETAPAPOSTERIOR À CURA DO CONCRETO:

3.1 - Cálculo das tensões devidas ao efeito da carga permanente

$$\sigma_{\text{td}2.\text{vão}} := \frac{\text{Msd2}_{\text{vão}}}{W_{\text{inf}_{\text{id.sev}}}} = 42.4 \times \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{td}2.\text{apoio}} := \frac{\text{Msd2}_{\text{apoio}}}{W_{\text{inf}_{\text{id.sea}}}} = 35.2 \times \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{cd}2.\text{vão}} := \frac{\text{Msd2}_{\text{vão}}}{W_{\text{sup}_{\text{id.sev}}} \times \alpha} = 4.8 \times \text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{cd}2.\text{apoio}} := \frac{\text{Msd2}_{\text{apoio}}}{W_{\text{sup}_{\text{id.sea}}} \times \alpha} = 3.2 \times \text{MPa}$$

3.2 - Cálculo das tensões devidas ao efeito da carga móvel

$$\sigma_{td3.v\tilde{a}o} := \frac{Msd3_{v\tilde{a}o}}{Winf_{cd.sev}} = 121.3 \times \text{MPa}$$

$$\sigma_{td3.apoio} := \frac{Msd3_{apoio}}{Winf_{cd.sea}} = 109.4 \times \text{MPa}$$

$$\sigma_{cd3.v\tilde{a}o} := \frac{Msd3_{v\tilde{a}o}}{Wsup_{cd.sev} \times \alpha} = 6.9 \times \text{MPa}$$

$$\sigma_{cd3.apoio} := \frac{Msd3_{apoio}}{Wsup_{cd.sea} \times \alpha} = 5.2 \times \text{MPa}$$

3.3 - Verificação das tensões

$$\sigma_{td1.v\tilde{a}o} := \frac{Msd1_{v\tilde{a}o}}{Winf_1} = 128.6 \times \text{MPa}$$

$$\sigma_{cd_{v\tilde{a}o}} := \sigma_{cd2.v\tilde{a}o} + \sigma_{cd3.v\tilde{a}o} = 11.7 \times \text{MPa}$$

$$\sigma_{td_{v\tilde{a}o}} := \sigma_{td1.v\tilde{a}o} + \sigma_{td2.v\tilde{a}o} + \sigma_{td3.v\tilde{a}o} = 292.2 \times \text{MPa}$$

$$\text{Verificação_compress\~{a}o_concreto.v\tilde{a}o} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \sigma_{cd_{v\tilde{a}o}} \leq 0.85 \times \frac{fck}{\gamma_{c.1}} \\ \text{"N\~{A}O_OK"} & \text{if } \sigma_{cd_{v\tilde{a}o}} > 0.85 \times \frac{fck}{\gamma_{c.1}} \end{cases}$$

$$\text{Verificação_compress\~{a}o_concreto.v\tilde{a}o} = \text{"OK"}$$

$$\text{Verificação_a\~{c}o_v\tilde{a}o} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \sigma_{td_{v\tilde{a}o}} \leq \frac{f_{yk}}{\gamma_{a.1}} \\ \text{"N\~{A}O_OK"} & \text{if } \sigma_{td_{v\tilde{a}o}} > \frac{f_{yk}}{\gamma_{a.1}} \end{cases}$$

$$\text{Verificação_a\~{c}o_v\tilde{a}o} = \text{"OK"}$$

$$0.85 \times \frac{fck}{\gamma_{c.1}} = 15.2 \times \text{MPa}$$

$$\frac{f_{yk}}{\gamma_{a.1}} = 318.2 \times \text{MPa}$$

$$\sigma_{td1.apoio} := \frac{Msd1_{apoio}}{Winf_2} = 109.3 \times \text{MPa}$$

$$\sigma_{cd_{apoio}} := \sigma_{cd2.apoio} + \sigma_{cd3.apoio} = 8.4 \times \text{MPa}$$

$$\sigma_{td_{apoio}} := \sigma_{td1.apoio} + \sigma_{td2.apoio} + \sigma_{td3.apoio} = 253.8 \times \text{MPa}$$

$$\text{Verificação_compress\~{a}o_concreto.apoio} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \sigma_{cd_{apoio}} \leq 0.85 \times \frac{fck}{\gamma_{c.1}} \\ \text{"N\~{A}O_OK"} & \text{if } \sigma_{cd_{apoio}} > 0.85 \times \frac{fck}{\gamma_{c.1}} \end{cases}$$

Verificação_compressão_concreto.apoio = "OK"

$$\text{Verificação}_aço_{\text{apoio}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \sigma_{\text{td}_{\text{apoio}}} \leq \frac{f_{yk}}{\gamma_{a.1}} \\ \text{"NÃO_OK"} & \text{if } \sigma_{\text{td}_{\text{apoio}}} > \frac{f_{yk}}{\gamma_{a.1}} \end{cases}$$

Verificação_aço_apoio = "OK"

9.4 ANEXO D – CÁLCULO DA VIDA ÚTIL À FADIGA DA PONTE

Neste anexo, serão apresentadas somente as planilhas de um caso representativo para o cálculo da vida útil à fadiga da ponte. Os demais casos foram calculados seguindo os mesmos procedimentos.

Caso apresentado: Perfil 1 – 1 faixa – Veículo centrado

Módulo Elástico W		CATEGORIA	Cf		NÚMERO TOTAL DE VEÍCULOS POR ANO	1,20E+06
W (solda - mesa inferior)	0,066 m ³	B	Solda mesa inferior	1,2E+10		
W(pé da solda - enrijecedor)	0,066 m ³	C	Pé da solda - enrijecedor transversal	4,4E+09		
		D	Pé da solda - enrijecedor transversal (falha na execução)	2,2E+09		

CLASSE	PESO	FREQÜÊNCIA	M (unitário)	M	$\Delta\sigma$ - solda enrijecedor	$\Delta\sigma$ - pé da solda enrijecedor	$\Delta\sigma$ - pé da solda enrijecedor (falha execução)	N - solda	N - pé solda enrijecedor	N - pé da solda enrijecedor (falha execução)	n	Dano - solda	Dano - pé da solda enrijecedor	Dano - pé da solda enrijecedor (falha execução)
O2C	22,3 kN	0,093%		74,80 kNm	1,27 MPa	1,27 MPa	1,27 MPa	1,91898E+12	7,03627E+11	3,51814E+11	1116	0,00000000	0,00000000	0,00000000
O2C	66,9 kN	1,305%		224,39 kNm	3,81 MPa	3,81 MPa	3,81 MPa	7,10735E+10	2,60603E+10	1,30301E+10	15660	0,00000022	0,00000060	0,00000120
O2C	116,0 kN	5,090%		389,07 kNm	6,60 MPa	6,60 MPa	6,60 MPa	1,36336E+10	4,99900E+09	2,49950E+09	61080	0,00000048	0,00001222	0,00002444
O2C	150,0 kN	0,260%		503,11 kNm	8,54 MPa	8,54 MPa	8,54 MPa	6,30539E+09	2,31198E+09	1,15599E+09	3120	0,00000049	0,00000135	0,00000270
O2C	164,0 kN	0,087%		550,07 kNm	9,33 MPa	9,33 MPa	9,33 MPa	4,82452E+09	1,76899E+09	8,84496E+08	1044	0,00000022	0,00000059	0,00000118
O2C	173,0 kN	0,015%		580,26 kNm	9,85 MPa	9,85 MPa	9,85 MPa	4,11005E+09	1,50702E+09	7,55510E+08	180	0,00000004	0,00000012	0,00000024
O2C	180,0 kN	0,020%	32,87 kNm	603,73 kNm	10,25 MPa	10,25 MPa	10,25 MPa	3,64895E+09	1,33795E+09	6,68975E+08	240	0,00000007	0,00000018	0,00000036
O2C	195,0 kN	0,031%		654,05 kNm	11,10 MPa	11,10 MPa	11,10 MPa	2,87000E+09	1,05233E+09	5,26167E+08	372	0,00000013	0,00000035	0,00000071
O2C	218,0 kN	0,018%		731,19 kNm	12,41 MPa	12,41 MPa	12,41 MPa	2,05408E+09	7,53161E+08	3,76580E+08	216	0,00000011	0,00000029	0,00000057
O2C	263,0 kN	0,016%		882,12 kNm	14,97 MPa	14,97 MPa	14,97 MPa	1,16982E+09	4,28934E+08	2,14467E+08	192	0,00000016	0,00000045	0,00000090
O2C	332,0 kN	0,020%		1113,56 kNm	18,90 MPa	18,90 MPa	18,90 MPa	5,81529E+08	2,13227E+08	1,06614E+08	240	0,00000041	0,00000113	0,00000225
O2C	386,0 kN	0,008%		1294,68 kNm	21,97 MPa	21,97 MPa	21,97 MPa	3,70019E+08	1,35674E+08	6,78368E+07	96	0,00000026	0,00000071	0,00000142
O2C	446,0 kN	0,008%		1495,92 kNm	25,39 MPa	25,39 MPa	25,39 MPa	2,39873E+08	8,79534E+07	4,39767E+07	96	0,00000040	0,00000109	0,00000218
Σ		6,971%										0,00000699	0,00001907	0,00003814

CLASSE	PESO	FREQÜÊNCIA	M (unitário)	M	$\Delta\sigma$ - solda enrijecedor	$\Delta\sigma$ - pé da solda enrijecedor	$\Delta\sigma$ - pé da solda enrijecedor (falha execução)	N - solda	N - pé solda enrijecedor	N - pé da solda enrijecedor (falha execução)	n	Dano - solda	Dano - pé da solda enrijecedor	Dano - pé da solda enrijecedor (falha execução)
O3C	22,3 kN	0,011%		74,07 kNm	1,26 MPa	1,26 MPa	1,26 MPa	1,97614E+12	7,24584E+11	3,62292E+11	132	0,00000000	0,00000000	0,00000000
O3C	66,9 kN	0,313%		222,20 kNm	3,77 MPa	3,77 MPa	3,77 MPa	7,31903E+10	2,68364E+10	1,34182E+10	3756	0,00000005	0,00000014	0,00000028
O3C	116,0 kN	2,605%		385,29 kNm	6,54 MPa	6,54 MPa	6,54 MPa	1,40397E+10	5,14789E+09	2,57395E+09	31260	0,00000223	0,00000607	0,00001214
O3C	158,0 kN	1,627%		524,79 kNm	8,91 MPa	8,91 MPa	8,91 MPa	5,55598E+09	2,03719E+09	1,01860E+09	19524	0,00000351	0,00000958	0,00001917
O3C	183,0 kN	0,245%		607,82 kNm	10,31 MPa	10,31 MPa	10,31 MPa	3,57585E+09	1,31114E+09	6,55572E+08	2940	0,00000082	0,00000224	0,00000448
O3C	198,0 kN	0,175%		657,64 kNm	11,16 MPa	11,16 MPa	11,16 MPa	2,82317E+09	1,03516E+09	5,17580E+08	2100	0,00000074	0,00000203	0,00000406
O3C	207,0 kN	0,032%	32,55 kNm	687,54 kNm	11,67 MPa	11,67 MPa	11,67 MPa	2,47071E+09	9,05925E+08	4,52963E+08	384	0,00000016	0,00000042	0,00000085
O3C	217,0 kN	0,191%		720,75 kNm	12,23 MPa	12,23 MPa	12,23 MPa	2,14463E+09	7,86365E+08	3,93183E+08	2292	0,00000107	0,00000291	0,00000583
O3C	229,0 kN	0,050%		760,61 kNm	12,91 MPa	12,91 MPa	12,91 MPa	1,82484E+09	6,69109E+08	3,34555E+08	600	0,00000033	0,00000090	0,00000179
O3C	263,0 kN	0,237%		873,54 kNm	14,82 MPa	14,82 MPa	14,82 MPa	1,20466E+09	4,41709E+08	2,20854E+08	2844	0,00000236	0,00000644	0,00001288
O3C	332,0 kN	0,027%		1102,71 kNm	18,71 MPa	18,71 MPa	18,71 MPa	5,98850E+08	2,19578E+08	1,09789E+08	324	0,00000054	0,00000148	0,00000295
O3C	386,0 kN	0,001%		1282,07 kNm	21,76 MPa	21,76 MPa	21,76 MPa	3,81040E+08	1,39715E+08	6,98573E+07	12	0,00000003	0,00000009	0,00000017
O3C	446,0 kN	0,000%		1481,36 kNm	25,14 MPa	25,14 MPa	25,14 MPa	2,47017E+08	9,05730E+07	4,52865E+07	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000
Σ		5,514%										0,00001184	0,00003230	0,00006461

CLASSE	PESO	FREQÜÊNCIA	CAMINHÃO RÍGIDO		M (unitário)	M	$\Delta\sigma$ - solda enrijecedor	$\Delta\sigma$ - pé da solda enrijecedor	$\Delta\sigma$ - pé da solda enrijecedor (falha execução)	N - solda	N - pé solda enrijecedor	N - pé da solda enrijecedor (falha execução)	n	Dano - solda	Dano - pé da solda enrijecedor	Dano - pé da solda enrijecedor (falha execução)
2C	22,3 kN	7,790%				77,28 kNm	1,31 MPa	1,31 MPa	1,31 MPa	1,74007E+12	6,38027E+11	3,19013E+11	93480	0,00000005	0,00000015	0,00000029
2C	66,9 kN	12,179%				231,83 kNm	3,93 MPa	3,93 MPa	3,93 MPa	6,44471E+10	2,36306E+10	1,18153E+10	#####	0,00000227	0,00000618	0,00001237
2C	116,0 kN	2,526%				401,98 kNm	6,82 MPa	6,82 MPa	6,82 MPa	1,23625E+10	4,53293E+09	2,26647E+09	30312	0,00000245	0,00000669	0,00001337
2C	150,0 kN	0,099%				519,80 kNm	8,82 MPa	8,82 MPa	8,82 MPa	5,71753E+09	2,09643E+09	1,04821E+09	1188	0,00000021	0,00000057	0,00000113
2C	164,0 kN	0,085%				568,31 kNm	9,64 MPa	9,64 MPa	9,64 MPa	4,37472E+09	1,60406E+09	8,20323E+08	1020	0,00000023	0,00000064	0,00000127
2C	173,0 kN	0,016%				599,50 kNm	10,17 MPa	10,17 MPa	10,17 MPa	3,72686E+09	1,36652E+09	6,83259E+08	192	0,00000005	0,00000014	0,00000028
2C	180,0 kN	0,042%			33,96 kNm	623,76 kNm	10,58 MPa	10,58 MPa	10,58 MPa	3,30875E+09	1,21321E+09	6,06605E+08	504	0,00000015	0,00000042	0,00000083
2C	195,0 kN	0,034%				675,73 kNm	11,47 MPa	11,47 MPa	11,47 MPa	2,60242E+09	9,54222E+08	4,77111E+08	408	0,00000016	0,00000043	0,00000086
2C	218,0 kN	0,014%				755,44 kNm	12,82 MPa	12,82 MPa	12,82 MPa	1,86257E+09	6,82942E+08	3,41471E+08	168	0,00000009	0,00000025	0,00000049
2C	263,0 kN	0,010%				911,38 kNm	15,47 MPa	15,47 MPa	15,47 MPa	1,06075E+09	3,88943E+08	1,94472E+08	120	0,00000011	0,00000031	0,00000062
2C	332,0 kN	0,003%				1150,48 kNm	19,52 MPa	19,52 MPa	19,52 MPa	5,27312E+08	1,93348E+08	9,66739E+07	36	0,00000007	0,00000019	0,00000037
2C	386,0 kN	0,000%				1337,61 kNm	22,70 MPa	22,70 MPa	22,70 MPa	3,35521E+08	1,23024E+08	6,15122E+07	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000
2C	446,0 kN	0,000%				1545,53 kNm	26,23 MPa	26,23 MPa	26,23 MPa	2,17509E+08	7,97533E+07	3,98767E+07	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000
Σ		22,798%												0,00000585	0,00001595	0,00003189

CLASSE	PESO	FREQÜÊNCIA	CAMINHÃO RÍGIDO		M (unitário)	M	$\Delta\sigma$ - solda enrijecedor	$\Delta\sigma$ - pé da solda enrijecedor	$\Delta\sigma$ - pé da solda enrijecedor (falha execução)	N - solda	N - pé solda enrijecedor	N - pé da solda enrijecedor (falha execução)	n	Dano - solda	Dano - pé da solda enrijecedor	Dano - pé da solda enrijecedor (falha execução)
3C	22,3 kN	0,165%				76,41 kNm	1,30 MPa	1,30 MPa	1,30 MPa	1,79982E+12	6,59933E+11	3,29966E+11	1980	0,00000000	0,00000000	0,00000001
3C	66,9 kN	11,021%				229,23 kNm	3,89 MPa	3,89 MPa	3,89 MPa	6,66599E+10	2,44420E+10	1,22210E+10	#####	0,00000198	0,00000541	0,00001082
3C	116,0 kN	9,044%				397,48 kNm	6,75 MPa	6,75 MPa	6,75 MPa	1,27870E+10	4,68857E+09	2,34428E+09	#####	0,00000849	0,00002315	0,00004629
3C	150,0 kN	10,934%				513,98 kNm	8,72 MPa	8,72 MPa	8,72 MPa	5,91383E+09	2,16841E+09	1,08420E+09	#####	0,00002219	0,00006051	0,00012102
3C	164,0 kN	6,907%				561,95 kNm	9,54 MPa	9,54 MPa	9,54 MPa	4,52492E+09	1,65914E+09	8,29570E+08	82884	0,00001832	0,00004996	0,00009991
3C	173,0 kN	1,524%				592,79 kNm	10,06 MPa	10,06 MPa	10,06 MPa	3,85482E+09	1,41344E+09	7,06718E+08	18288	0,00000474	0,00001294	0,00002588
3C	180,0 kN	0,314%			33,58 kNm	616,78 kNm	10,47 MPa	10,47 MPa	10,47 MPa	3,42236E+09	1,25486E+09	6,27432E+08	3768	0,00000110	0,00000300	0,00000601
3C	195,0 kN	0,402%				668,17 kNm	11,34 MPa	11,34 MPa	11,34 MPa	2,69178E+09	9,86985E+08	4,93492E+08	4824	0,00000179	0,00000489	0,00000978
3C	218,0 kN	0,319%				746,98 kNm	12,68 MPa	12,68 MPa	12,68 MPa	1,92652E+09	7,06390E+08	3,53195E+08	3828	0,00000199	0,00000542	0,00001084
3C	263,0 kN	0,186%				901,18 kNm	15,29 MPa	15,29 MPa	15,29 MPa	1,09717E+09	4,02297E+08	2,01149E+08	2232	0,00000203	0,00000555	0,00001110
3C	332,0 kN	0,097%				1137,61 kNm	19,30 MPa	19,30 MPa	19,30 MPa	5,45417E+08	1,99986E+08	9,99931E+07	1164	0,00000213	0,00000582	0,00001164
3C	386,0 kN	0,002%				1322,64 kNm	22,44 MPa	22,44 MPa	22,44 MPa	3,47041E+08	1,27248E+08	6,36242E+07	24	0,00000007	0,00000019	0,00000038
3C	446,0 kN	0,001%				1528,23 kNm	25,93 MPa	25,93 MPa	25,93 MPa	2,24977E+08	8,24916E+07	4,12458E+07	12	0,00000005	0,00000015	0,00000029
Σ		40,916%												0,00006489	0,00017698	0,00035395

CLASSE	SEMI-REBOQUE		M (unitário)	M	$\Delta\sigma$ - solda enrijecedor	$\Delta\sigma$ - pé da solda enrijecedor	$\Delta\sigma$ - pé da solda (falha execução)	N - solda	N - pé solda enrijecedor	N - pé da solda enrijecedor (falha execução)	n	Dano - solda	Dano - pé da solda enrijecedor	Dano - pé da solda enrijecedor (falha execução)
	PESO	FREQÜÊNCIA												
252	22,3 kN	0,005%		61,26 kNm	1,04 MPa	1,04 MPa	1,04 MPa	3,49338E+12	1,28090E+12	6,40452E+11	60	0,00000000	0,00000000	0,00000000
252	66,9 kN	0,111%		183,77 kNm	3,12 MPa	3,12 MPa	3,12 MPa	1,29384E+11	4,74409E+10	2,37204E+10	1332	0,00000001	0,00000003	0,00000006
252	116,0 kN	2,948%		318,64 kNm	5,41 MPa	5,41 MPa	5,41 MPa	2,48191E+10	9,10033E+09	4,55017E+09	35376	0,00000143	0,00000389	0,00000777
252	158,0 kN	1,268%		434,02 kNm	7,37 MPa	7,37 MPa	7,37 MPa	7,82174E+09	3,60131E+09	1,80065E+09	15216	0,00000155	0,00000423	0,00000845
252	190,0 kN	0,696%		521,92 kNm	8,86 MPa	8,86 MPa	8,86 MPa	5,64806E+09	2,07095E+09	1,03548E+09	8352	0,00000148	0,00000403	0,00000807
252	218,0 kN	0,440%		598,83 kNm	10,16 MPa	10,16 MPa	10,16 MPa	3,73930E+09	1,37108E+09	6,85538E+08	5280	0,00000141	0,00000385	0,00000770
252	263,0 kN	0,330%	26,92 kNm	722,44 kNm	12,26 MPa	12,26 MPa	12,26 MPa	2,12957E+09	7,80843E+08	3,90422E+08	3960	0,00000186	0,00000507	0,00001014
252	309,0 kN	0,026%		848,80 kNm	14,40 MPa	14,40 MPa	14,40 MPa	1,31306E+09	4,81455E+08	2,40728E+08	312	0,00000024	0,00000065	0,00000130
252	338,0 kN	0,011%		928,47 kNm	15,76 MPa	15,76 MPa	15,76 MPa	1,00325E+09	3,67859E+08	1,83929E+08	132	0,00000013	0,00000036	0,00000072
252	362,0 kN	0,004%		994,39 kNm	16,87 MPa	16,87 MPa	16,87 MPa	8,16646E+08	2,99437E+08	1,49719E+08	48	0,00000006	0,00000016	0,00000032
252	376,0 kN	0,002%		1032,85 kNm	17,53 MPa	17,53 MPa	17,53 MPa	7,28780E+08	2,67219E+08	1,33610E+08	24	0,00000003	0,00000009	0,00000018
252	392,0 kN	0,003%		1076,80 kNm	18,27 MPa	18,27 MPa	18,27 MPa	6,43134E+08	2,35816E+08	1,17908E+08	36	0,00000006	0,00000015	0,00000031
252	446,0 kN	0,003%		1225,13 kNm	20,79 MPa	20,79 MPa	20,79 MPa	4,36672E+08	1,60113E+08	8,00565E+07	36	0,00000008	0,00000022	0,00000045
Σ		5,847%										0,00000833	0,00002273	0,00004546

CLASSE	SEMI-REBOQUE		M (unitário)	M	$\Delta\sigma$ - solda enrijecedor	$\Delta\sigma$ - pé da solda enrijecedor	$\Delta\sigma$ - pé da solda (falha execução)	N - solda	N - pé solda enrijecedor	N - pé da solda enrijecedor (falha execução)	n	Dano - solda	Dano - pé da solda enrijecedor	Dano - pé da solda enrijecedor (falha)
	PESO	FREQÜÊNCIA												
253	22,3 kN	0,000%		69,74 kNm	1,18 MPa	1,18 MPa	1,18 MPa	2,36689E+12	8,67861E+11	4,33931E+11	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000
253	66,9 kN	0,037%		209,23 kNm	3,55 MPa	3,55 MPa	3,55 MPa	8,76628E+10	3,21430E+10	1,60715E+10	444	0,00000001	0,00000001	0,00000003
253	116,0 kN	1,250%		362,80 kNm	6,16 MPa	6,16 MPa	6,16 MPa	1,68159E+10	6,16582E+09	3,08291E+09	15000	0,00000089	0,00000243	0,00000487
253	158,0 kN	0,882%		494,15 kNm	8,39 MPa	8,39 MPa	8,39 MPa	6,65460E+09	2,44002E+09	1,22001E+09	10584	0,00000159	0,00000434	0,00000868
253	190,0 kN	0,798%		594,23 kNm	10,08 MPa	10,08 MPa	10,08 MPa	3,82677E+09	1,40315E+09	7,01575E+08	9576	0,00000250	0,00000682	0,00001365
253	218,0 kN	0,575%		681,81 kNm	11,57 MPa	11,57 MPa	11,57 MPa	2,53352E+09	9,28957E+08	4,64478E+08	6900	0,00000272	0,00000743	0,00001486
253	263,0 kN	2,644%		822,55 kNm	13,96 MPa	13,96 MPa	13,96 MPa	1,44287E+09	5,29051E+08	2,64526E+08	31728	0,00002199	0,00005997	0,00011994
253	332,0 kN	8,451%	30,65 kNm	1038,35 kNm	17,62 MPa	17,62 MPa	17,62 MPa	7,17264E+08	2,62997E+08	1,31498E+08	#####	0,00014139	0,00038560	0,00077120
253	386,0 kN	1,519%		1207,23 kNm	20,49 MPa	20,49 MPa	20,49 MPa	4,56385E+08	1,67341E+08	8,36706E+07	18228	0,00003994	0,00010893	0,00021785
253	404,0 kN	0,143%		1263,53 kNm	21,44 MPa	21,44 MPa	21,44 MPa	3,98061E+08	1,45956E+08	7,29778E+07	1716	0,00000431	0,00001176	0,00002351
253	426,0 kN	0,875%		1332,34 kNm	22,61 MPa	22,61 MPa	22,61 MPa	3,39520E+08	1,24490E+08	6,22452E+07	10500	0,00003093	0,00008434	0,00016869
253	463,0 kN	0,451%		1448,06 kNm	24,57 MPa	24,57 MPa	24,57 MPa	2,64454E+08	9,69666E+07	4,84833E+07	5412	0,00002046	0,00005581	0,00011163
253	490,0 kN	0,172%		1532,50 kNm	26,01 MPa	26,01 MPa	26,01 MPa	2,23103E+08	8,18044E+07	4,09022E+07	2064	0,00000925	0,00002523	0,00005046
253	508,0 kN	0,076%		1588,80 kNm	26,96 MPa	26,96 MPa	26,96 MPa	2,00218E+08	7,34131E+07	3,67066E+07	912	0,00000456	0,00001242	0,00002485
253	526,0 kN	0,060%		1645,09 kNm	27,92 MPa	27,92 MPa	27,92 MPa	1,80358E+08	6,61314E+07	3,30657E+07	720	0,00000399	0,00001089	0,00002177
253	549,0 kN	0,021%		1717,03 kNm	29,14 MPa	29,14 MPa	29,14 MPa	1,58627E+08	5,81632E+07	2,90816E+07	252	0,00000159	0,00000433	0,00000867
Σ		17,954%										0,00028612	0,00078032	0,00156065

