

**EFEITOS DE CARGAS LOCALIZADAS EM VIGAS DE ROLAMENTO COM
ALMA SENOIDAL**

Sandra Pietrani Alpino Silva

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
ESTRUTURAS

**“EFEITOS DE CARGAS LOCALIZADAS EM VIGAS DE
ROLAMENTO COM ALMA SENOIDAL”**

Sandra Pietrani Alpino Silva

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Gilson Queiroz
DEES-UFMG – (Orientador)

Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues
DEES-UFMG

Prof. Dr. Luiz Fernando Loureiro Ribeiro
DECIV – UFOP

Belo Horizonte, 30 de agosto de 2011

Dedico este trabalho

Aos meus pais, José Carlos e Dulce,

Pela dura batalha, porém vitoriosa, na educação dos filhos

Aos meus filhos e enteada, Júlia, Rafael e Isabela,

Pela paciência na espera de uma atenção maior

Ao meu marido, Fabrício,

Por estar sempre ao meu lado

AGRADECIMENTOS:

A Deus, pela constante presença e por atender minhas preces.

Ao meu orientador Gilson, pelos momentos de paciência e otimismo que tanto me empolgavam em dias difíceis. Pela sua competência em orientar, seu dom em ensinar, com simplicidade, sabendo ouvir minhas opiniões e pelas trocas de idéias. Obrigada pela dedicação e amizade. Foi uma honra ter tido você como orientador.

Ao meu marido, pelo amor, carinho, compreensão, paciência, me incentivando sempre e compartilhando angústias nos momentos difíceis.

Aos meus filhos e enteada, pela compreensão nos muitos dias sem a minha completa presença e por tantos diálogos e passeios não realizados.

Aos meus pais, por todo apoio e motivação nos meus estudos. Vocês são meu exemplo de vida. Agradeço pelo amor, carinho e segurança, que sempre recebi.

Aos meus irmãos, família e amigos, por torcerem por mim e me incentivarem neste período.

A minha ajudante Iara, por toda a dedicação com a minha família, principalmente com meus filhos.

A Codeme, pela confiança e incentivo. Obrigada pela experiência adquirida e oportunidade de participar desse grupo de estudos sobre o perfil de alma senoidal.

Aos colegas da Codeme, que tanto ouviram meus desabaços e me consolaram em momentos de difíceis decisões. Ao Alex, Carla, Wagner, Hermes, Juliano e Janaina um especial obrigada pelas ajudas.

A funcionária Inês, por tantas vezes não me deixar desistir, me ligando sempre nos últimos dias de matrícula e me incentivando.

Aos colegas de curso Aline e Filipe, pelos estudos em grupo, compartilhando conhecimentos e pela agradável amizade.

Aos professores do departamento pela dedicação ao curso e toda colaboração e auxílio aos alunos.

RESUMO

Com os avanços da engenharia estrutural e as diversas vantagens que os perfis de alma senoidal vêm apresentando, dentre elas a economia de material e a possibilidade de fabricação em grande escala e com baixo custo, acredita-se em um aumento de utilização e de investimentos na produção desses perfis em todo o mundo. A utilização viável de tais perfis resulta no interesse por maior conhecimento de seu desempenho em diversas situações de carregamentos, gerando assim a necessidade de mais pesquisas e publicações que complementem as já existentes. Este trabalho apresenta um estudo de perfis de alma senoidal usados como vigas de rolamento, sob o efeito de forças localizadas sobre trilhos. O estudo tem grande importância, pois esse tipo de aplicação ainda não está consolidado. Foram realizadas 230 análises numéricas parametrizadas por meio de modelos de elementos finitos, utilizando-se o programa ANSYS 10.0. Os valores dos parâmetros estabelecidos estão dentro dos limites dos perfis senoidais fabricados no Brasil. Os modelos permitem determinar os efeitos causados no perfil por uma força localizada sobre um determinado trilho e a interação dessa força com a força cortante. Os resultados foram utilizados para propor procedimentos de determinação da resistência a forças localizadas e da interação entre estas e a força cortante. Tais procedimentos foram baseados em ajuste de curvas aos resultados numéricos de todas as análises e, finalmente, foram comparados com formulações já apresentadas por outros pesquisadores.

Palavras-Chave: Perfis com Alma Senoidal, Estruturas de Aço, Vigas de Rolamento.

ABSTRACT

The advances in structural engineering and the many advantages that the sinusoidal profiles have presented, among them the economy of material and the possibility of large-scale manufacturing at low cost, make us believe in an increased use and investment in the production of these profiles in the world. The use of such viable profiles results in the interest of greater knowledge of their performance in many shipment situations, thereby generating the need for more research and publications that complement the existing ones. This paper presents a study of sinusoidal profiles used as crane girders, under the effects of some forces placed on rails. The study is of great importance, because this application is not consolidated yet. 230 numerical analyses were performed using parameterized models of finite elements, using the program ANSYS 10.0. The values of parameters are within the limits of sinusoidal profiles manufactured in Brazil. The models allow determining the effects caused by a force concentrated on a particular rail and the interaction of this force with the shear force. The results were used to propose procedures for determining the resistance to the concentrated forces and the interaction between them and the shear force. These procedures were based on curve fitting to the numerical results of all the analyses and, finally, were compared with formulations already presented by other researchers.

Keywords: Sinusoidal Web Profiles, Steel Structures, Crane Girders

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|----|
| 1 | Introdução | 01 |
| 2 | Objetivo, Justificativa e Metodologia | 09 |
| | 2.1 Objetivo..... | 09 |
| | 2.2 Justificativa..... | 09 |
| | 2.3 Metodologia | 11 |
| 3 | Revisão Bibliográfica | 16 |
| | 3.1 Considerações Gerais..... | 16 |
| | 3.2 Efeito de Forças Localizadas Aplicadas nas Mesas de Vigas com Almas Planas..... | 17 |
| | 3.3 Efeito de Forças Localizadas Aplicadas nas Mesas de Vigas com Almas Corrugadas..... | 18 |
| | 3.3.1 Vigas com Alma Trapezoidal..... | 18 |
| | 3.3.2 Vigas com Alma Senoidal..... | 28 |
| 4 | Análise Numérica | 48 |
| | 4.1 Parametrização..... | 48 |
| | 4.2 Programa Ansys..... | 50 |
| | 4.3 Discretização da Alma Senoidal..... | 56 |
| | 4.4 Discretização das Mesas..... | 61 |
| | 4.5 Discretização do Trilho..... | 64 |
| | 4.6 Elementos de Contato..... | 69 |
| | 4.7 Condições de Contorno..... | 70 |
| | 4.7.1 Deslocamentos..... | 70 |
| | 4.7.2 Carregamento..... | 71 |
| | 4.8 Análise Numérica..... | 72 |
| | 4.8.1 Análise Linear..... | 72 |
| | 4.8.2 Análise de Flambagem Linearizada..... | 72 |
| | 4.8.3 Análise não Linear..... | 74 |
| 5 | Resultados | 77 |
| | 5.1 Vigas carregadas com excentricidade nula..... | 77 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.1.1 | Interação com a Força Cortante..... | 84 |
| 5.1.2 | Resistência à Força Localizada..... | 94 |
| 5.1.2.1 | Resistência ao Escoamento Local da Alma..... | 98 |
| 5.1.2.2 | Resistência ao Enrugamento da Alma..... | 99 |
| 5.1.2.3 | Resistência à Flambagem..... | 100 |
| 5.1.3 | Resultados Finais..... | 101 |
| 5.1.4 | Forças Limites no Regime Elástico..... | 105 |
| 5.2 | Vigas carregadas com excentricidade de 10,75 mm..... | 112 |
| 6 | Proposições de Métodos de Cálculo e Comparações com | |
| | Resultados de Outros Pesquisadores..... | 115 |
| 6.1 | Generalidades..... | 115 |
| 6.2 | Procedimentos de Cálculo..... | 117 |
| 6.2.1 | Escoamento Local da Alma..... | 117 |
| 6.2.2 | Enrugamento da Alma..... | 122 |
| 6.2.3 | Flambagem Global da alma..... | 128 |
| 6.3 | Resultados Finais..... | 132 |
| 6.4 | Análise Estatística dos Resultado..... | 138 |
| 6.5 | Comparações com Fórmulas Propostas por outros | |
| | Pesquisadores..... | 139 |
| 6.5.1 | NOVAK e MACHACEK (1999) e NOVAK e MACHACEK (2000)..... | 139 |
| 6.5.2 | PASTERNAK e BRANKA (1999)..... | 145 |
| 7 | Conclusões e Recomendações para Trabalhos Futuros..... | 147 |
| 7.1 | Conclusões..... | 147 |
| 7.1.1 | Interações com a Força Cortante..... | 147 |
| 7.1.2 | Trilhos..... | 148 |
| 7.1.3 | Alturas das vigas..... | 149 |
| 7.1.4 | Mesas das vigas..... | 149 |
| 7.1.5 | Outras Conclusões..... | 150 |
| 7.2 | Recomendações para Trabalhos Futuros..... | 151 |
| 8 | Referências Bibliográficas..... | 153 |

FIGURAS

| | |
|---|----|
| 1.1 - Perfil I laminado..... | 02 |
| 1.2 - Perfil I soldado..... | 03 |
| 1.3 - Perfil de alma trapezoidal | 03 |
| 1.4 - Perfil de alma senoidal..... | 03 |
| 1.5 - Ponte e Viaduto na França..... | 04 |
| 1.6 - Ponte no Japão..... | 05 |
| 1.7 - Ponte na Coréia do Sul..... | 05 |
| 1.8 - Passarela de pedestres em Viena, Áustria..... | 05 |
| 1.9 - Galpão comercial com tesouras e pilares em perfis de almas senoidais – Galpão da Cebel fabricado pela Codeme..... | 06 |
| 1.10 - Sistema de Coberturas com tesouras em perfis de almas senoidais – Loja da Leroy Merlin, Niterói / RJ..... | 06 |
| 1.11 - Edifício Industrial com vigas em perfis de almas senoidais para processamento de cana de açúcar, João Pinheiro / MG..... | 07 |
| 1.12 - Vigas de rolamento em perfis de almas senoidais – Galpão da Codeme em Taubaté..... | 07 |
| 1.13 - Viga mista de piso em perfis de almas senoidais - Ampliação do Minas Tênis Clube em Belo Horizonte..... | 07 |
| 1.14 – Corrugador..... | 08 |
| 1.15 - Processo de soldagem..... | 08 |
| 1.16 - Perfis de almas senoidais..... | 08 |
| 2.1 - Dimensões da senóide para as almas das vigas pesquisadas, em mm..... | 14 |
| 2.2 - Dimensões e geometria dos perfis de almas senoidais fabricados no Brasil..... | 15 |
| 3.1 - Dimensões do protótipo..... | 18 |
| 3.2 - Posições das forças aplicadas..... | 19 |
| 3.3 - Força x Deslocamento – Carregamento do Caso 2..... | 21 |
| 3.4 - Definição dos parâmetros..... | 22 |
| 3.5 - Corrugação das vigas testadas na Suécia..... | 22 |
| 3.6 - Modo de falha tipo I..... | 24 |
| 3.7 - Modo de falha tipo II (com escoamento de membrana na alma)..... | 25 |

| | |
|---|----|
| 3.8 - Definição de b_{ih} , b_h , b_i e h_x | 26 |
| 3.9 - Perfis <i>WT</i> desenvolvidos pela ZEMAN + Co GmbH..... | 28 |
| 3.10 - Amostra típica com dois apoios rotulados..... | 29 |
| 3.11 - Amostra com apoio central..... | 30 |
| 3.12 - Posições variadas do carregamento na direção longitudinal, com $e = 20$ mm. | 30 |
| 3.13 - Apoios rotulados..... | 31 |
| 3.14 - Apoio central com 200 mm..... | 32 |
| 3.15 - Apoio central com 50 mm..... | 32 |
| 3.16 - Fase final do ensaio mostrando o enrugamento da alma..... | 33 |
| 3.17 - Tensões normais experimentais e numéricas no meio do vão em diferentes alturas da alma ($t_w = 2$ mm, $e = 20$ mm, apoios rotulados)..... | 34 |
| 3.18 - Teste com carregamento cíclico para cisalhamento..... | 38 |
| 3.19 - Teste com carregamento cíclico para força localizada..... | 38 |
| 3.20 - Teste com carregamento móvel..... | 39 |
| 3.21 - Mecanismo de colapso do ensaio em Viena (sem enrijecedores)..... | 41 |
| 3.22 - Protótipo de viga de alma senoidal..... | 42 |
| 3.23 - Ensaio..... | 42 |
| 3.24 - Malha da Alma..... | 43 |
| 3.25 - Comparação entre análises numérica e experimental..... | 43 |
| 3.26 - Campo de plastificação sob a força aplicada..... | 44 |
| 3.27 - Diversos tipos de corrugações para a análise paramétrica..... | 44 |
| 3.28 - Curvas Força x Deslocamento..... | 45 |
| 3.29 - Modo de falha por flambagem global da alma..... | 46 |
| 4.1 - Perfis de alma senoidal com trilhos..... | 49 |
| 4.2 - Viga discretizada no Ansys..... | 51 |
| 4.3 - Carregamento aplicado nos modelos de viga de alma plana..... | 52 |
| 4.4 - Modelos de vigas de almas planas com diferentes refinamentos..... | 53 |
| 4.5 - Coeficiente para Força de Flambagem, retirado do Ansys..... | 53 |
| 4.6 - Coeficiente para Força Última, retirado do Ansys..... | 54 |
| 4.7 - Senóide com suas dimensões, em mm..... | 57 |
| 4.8 - Senóide com nós definidos..... | 57 |
| 4.9 - Numeração dos nós de meia senóide com suas coordenadas, em mm..... | 58 |

| | |
|---|----|
| 4.10 - Numeração dos nós de meia senóide com suas coordenadas, em mm..... | 58 |
| 4.11 - Malha da Alma, dimensões em mm..... | 59 |
| 4.12 - Valores dos comprimentos das vigas de acordo com a altura..... | 60 |
| 4.13 - Discretização da alma senoidal no programa Ansys..... | 60 |
| 4.14 - Elementos da mesa com malha mais refinada na região da senóide..... | 61 |
| 4.15 - Discretização dos primeiros elementos da mesa, dimensões em mm..... | 61 |
| 4.16 - Discretização dos elementos da mesa em uma senóide, dimensões em mm... | 62 |
| 4.17 - Discretização dos elementos da mesa no comprimento total da viga, dimensões em mm..... | 62 |
| 4.18 - Discretização das mesas da viga no programa Ansys..... | 63 |
| 4.19 - Trilhos em forma de T sobre as vigas..... | 65 |
| 4.20 - Excentricidade aplicada pelo posicionamento do trilho, em mm..... | 65 |
| 4.21 - Dimensões dos trilhos para entrada no Ansys, em mm – Excentricidade nula..... | 66 |
| 4.22 - Dimensões dos trilhos para entrada no Ansys, em mm – Excentricidade 10,75 mm..... | 66 |
| 4.23 - Discretização dos elementos do trilho..... | 67 |
| 4.24 - Comprimentos dos trilhos para entrada no programa Ansys..... | 67 |
| 4.25 - Vigas modeladas com diferentes alturas e tipos de trilhos..... | 68 |
| 4.26 - Exemplo para aplicação do elemento de contato com duas chapas..... | 69 |
| 4.27 - Duas chapas com e sem elementos de contato..... | 70 |
| 4.28 - Condições de apoio das vigas..... | 71 |
| 4.29 - Carregamento aplicado nas vigas modeladas..... | 71 |
| 4.30 - Carregamento aplicado discretizado no Ansys..... | 72 |
| 4.31 - <i>Autovetor</i> e <i>Autovalor</i> – flambagem local da alma..... | 73 |
| 4.32 - <i>Autovetor</i> e <i>Autovalor</i> – flambagem global da alma..... | 73 |
| 4.33 - Diagrama Tensão x Deformação..... | 75 |
| 5.1 - Dimensões de uma senóide, em mm..... | 86 |
| 5.2 - Diagrama de tensão de cisalhamento no perfil | 90 |
| 5.3 - Diagramas de tensões normais verticais na alma dos perfis..... | 92 |
| 5.4 - Força cortante solicitante, V_S , considerada na interação no estudo..... | 93 |
| 5.5 - Força cortante solicitante, V_S , considerada na interação para casos gerais... | 93 |

| | |
|---|-----|
| 5.6 - Modo de falha escoamento da alma..... | 99 |
| 5.7 - Modo de falha enrugamento da alma..... | 100 |
| 5.8 - Modo de falha flambagem global da alma..... | 101 |
| 6.1 - Deformações associadas ao escoamento da alma..... | 117 |
| 6.2 - Resultados numéricos x Resultados fórmula – Escoamento da alma..... | 118 |
| 6.3 - Deformações associadas ao enrugamento da alma..... | 122 |
| 6.4 - Resultados numéricos x Resultados fórmula – Enrugamento da alma..... | 124 |
| 6.5 - Deformação associada à flambagem global da alma..... | 128 |
| 6.6 - Resultados numéricos x Resultados fórmula – Flambagem global da alma..... | 130 |
| 6.7 – Modelo típico com dois apoios rotulados..... | 142 |
| 6.8 – Dimensões e propriedades do trilho seção 50x30 mm para Ansys, em mm..... | 143 |

TABELAS

| | |
|--|-----|
| 3.1 - Comparação entre o resultado experimental e o resultado numérico..... | 20 |
| 3.2 - Detalhes das amostras ensaiadas na Suécia..... | 22 |
| 3.3 - Comparação entre os resultados experimental e numérico para as amostras testadas na Suécia..... | 23 |
| 3.4 - Força de colapso média para perfis com alma senoidal de 2,0 mm..... | 33 |
| 4.1 - Valores dos parâmetros para vigas com excentricidade nula..... | 50 |
| 4.2 - Valores dos parâmetros para vigas com excentricidade de 10,75 mm..... | 50 |
| 4.3 - Passos de incrementos de forças no Ansys..... | 76 |
| 5.1 - Resultados retirados do Ansys ($t_w=2,0$ mm e trilho barra quadrada 50 mm).... | 78 |
| 5.2 - Resultados retirados do Ansys ($t_w=2,0$ mm e trilho TR-25)..... | 79 |
| 5.3 - Resultados retirados do Ansys ($t_w=2,0$ mm e trilho TR-37)..... | 80 |
| 5.4 - Resultados retirados do Ansys ($t_w=3,0$ mm e trilho barra quadrada 50 mm).... | 81 |
| 5.5 - Resultados retirados do Ansys ($t_w=3,0$ mm e trilho TR-25)..... | 82 |
| 5.6 - Resultados retirados do Ansys ($t_w=3,0$ mm e trilho TR-37)..... | 83 |
| 5.7 - Resultados das resistências à força cortante..... | 91 |
| 5.8 - Resultados necessários para determinar os valores de P_R para trilho barra quadrada 50 mm..... | 95 |
| 5.9 - Resultados necessários para determinar os valores de P_R para trilho TR-25.... | 96 |
| 5.10 - Resultados necessários para determinar os valores de P_R para trilho TR-37.. | 97 |
| 5.11 - Definição final dos modos de Falhas para trilho barra quadrada 50 mm..... | 102 |
| 5.12 - Definição final dos modos de Falhas para trilho TR-25..... | 103 |
| 5.13 - Definição final dos modos de Falhas para trilho TR-37..... | 104 |
| 5.14 - Forças de início de escoamento ($t_w=2,0$ mm e trilho barra quadrada 50 mm). | 106 |
| 5.15 - Forças de início de escoamento ($t_w=2,0$ mm e trilho TR-25)..... | 107 |
| 5.16 - Forças de início de escoamento ($t_w=2,0$ mm e trilho TR-37)..... | 108 |
| 5.17 - Forças de início de escoamento ($t_w=3,0$ mm e trilho barra quadrada 50 mm). | 109 |
| 5.18 - Forças de início de escoamento ($t_w=3,0$ mm e trilho TR-25)..... | 110 |
| 5.19 - Forças de início de escoamento ($t_w=3,0$ mm e trilho TR-37)..... | 111 |

| | |
|--|-----|
| 5.20 - Resultados para vigas sujeitas a carregamento com excentricidade $e = 10,75$ mm ($t_w = 2,0$ mm)..... | 113 |
| 5.21 - Resultados para vigas sujeitas a carregamento com excentricidade $e = 10,75$ mm ($t_w = 3,0$ mm)..... | 114 |
| 6.1 - Resultados numéricos x Resultados fórmula – Trilho barra quadrada 50 mm - Escoamento da alma..... | 119 |
| 6.2 - Resultados numéricos x Resultados fórmula – Trilho TR-25 - Escoamento da alma..... | 120 |
| 6.3 - Resultados numéricos x Resultados fórmula – Trilho TR-37 - Escoamento da alma..... | 121 |
| 6.4 - Resultados numéricos x Resultados fórmula – Trilho barra quadrada 50 mm - Enrugamento da alma..... | 125 |
| 6.5 - Resultados numéricos x Resultados fórmula – Trilho TR-25 – Enrugamento da alma..... | 126 |
| 6.6 - Resultados numéricos x Resultados fórmula – Trilho TR-37 – Enrugamento da alma..... | 127 |
| 6.7 - Resultados numéricos x Resultados fórmula – Trilho TR-37 – Flambagem global da alma..... | 131 |
| 6.8 - Resistências, Equações de Interação e Modos de Falha ($t_w = 2,0$ mm e trilho barra quadrada 50 mm)..... | 132 |
| 6.9 - Resistências, Equações de Interação e Modos de Falha ($t_w = 2,0$ mm e trilho TR-25) | 133 |
| 6.10 - Resistências, Equações de Interação e Modos de Falha ($t_w = 2,0$ mm e trilho TR-37) | 134 |
| 6.11 - Resistências, Equações de Interação e Modos de Falha ($t_w = 3,0$ mm e trilho barra quadrada 50 mm)..... | 135 |
| 6.12 - Resistências, Equações de Interação e Modos de Falha ($t_w = 3,0$ mm e trilho TR-25) | 136 |
| 6.13 - Resistências, Equações de Interação e Modos de Falha ($t_w = 3,0$ mm e trilho TR-37)..... | 137 |
| 6.14 – Comparações com NOVAK e MACHACEK (2000) ($t_w = 2,0$ mm e trilho barra quadrada 50 mm)..... | 140 |

| | |
|--|-----|
| 6.15 – Comparações com NOVAK e MACHACEK (2000) ($t_w=2,0\text{mm}$ e trilho TR-25)..... | 141 |
| 6.16 – Resultados retirados do Ansys para a viga do ensaio de NOVAK e MACHACEK (2000)..... | 144 |
| 6.17 – Força de colapso média dos ensaios em perfis com alma senoidal de 2,0 mm..... | 144 |
| 6.18 – Comparações com PASTERNAK e BRANKA (1999)..... | 143 |

NOTAÇÕES EM GERAL

A amplitude da onda da senóide

A_g área da seção longitudinal da alma senoidal

b_f largura da mesa do perfil I

b_w dobro da amplitude de uma senóide

C constante a ser definida para as equações de interações

D_x rigidez à flexão da corrugação por unidade de comprimento

D_y rigidez à flexão da corrugação por unidade de comprimento

e excentricidade da força aplicada

E módulo de elasticidade do aço

E_t módulo de elasticidade tangente do aço

f_y resistência ao escoamento do aço

f_{yf} resistência ao escoamento do aço da mesa do perfil

f_{yw} resistência ao escoamento do aço da alma do perfil

F_{es} força correspondente ao início do escoamento da alma

F_f força de cisalhamento no flange

F_{fl} força de flambagem elástica

F_{RK} força localizada resistente nominal em Novak e Machacek (2000)

F_{Rd} força localizada resistente de cálculo em Novak e Machacek (2000)

F_{Sd} força localizada atuante em Novak e Machacek (2000)

F_u força última, retirada do Ansys

- F_{ult} força última em Pasternak e Branka (1999)
- h altura do painel em Elgaaly e Seshadri (1997)
- h_{tr} altura do trilho
- h_{ref} altura do trilho de referência, definido como a barra quadrada 50 mm
- H altura do perfil I
- H_{ref} altura da viga de referência, definida como 1200 mm
- I_f momento de inércia da mesa, em relação ao seu eixo horizontal
- I_R momento de inércia do trilho, em relação ao seu eixo horizontal
- I_R^* momento de inércia da barra usada em ensaios, 50x30 mm
- $I_{x,tr}$ momento de inércia do trilho em relação ao eixo x
- I_{wy} momento de inércia de uma senóide em relação ao eixo longitudinal
- κ_t coeficiente de redução, função de λ_p .
- K coeficiente de flambagem de barras comprimidas
- l comprimento do painel em Elgaaly e Seshadri (1997)
- L comprimento do vão da viga
- L' comprimento de distribuição da força sobre a viga
- L'_{es} comprimento de distribuição da força sobre a viga para cálculo da resistência ao escoamento da alma
- L'_{en} comprimento de distribuição da força sobre a viga para cálculo da resistência ao enrugamento da alma
- L'_{fl} comprimento de distribuição da força sobre a viga para cálculo da resistência à flambagem global da alma
- L_{ref} comprimento de distribuição de forças de referência, definida igual a 100 cm
- M momento atuante em Elgaaly e Seshadri (1997)
- M_u momento último resistente em Elgaaly e Seshadri (1997)
- M_{Sd} momento atuante em Novak e Machacek (2000)
- M_{Rd} momento último resistente em Novak e Machacek (2000)
- N comprimento de aplicação da força
- N_e força axial de flambagem elástica
- P força aplicada
- P_c força localizada resistente ao enrugamento, em Elgaaly e Seshadri (1997)
- P_e força última encontrada na análise experimental de Elgaaly e Seshadri (1997)

- P_f força última encontrada na análise numérica de Elgaaly e Seshadri (1997)
- P_{fl} força última resistente das mesas, em Elgaaly e Seshadri (1997)
- P_R força localizada resistente
- P_{RF} força localizada resistente calculada pelas fórmulas propostas
- P_{Rmax} força localizada resistente máxima, encontrada pela interação dos resultados do Ansys
- P_{Rmin} força localizada resistente mínima, encontrada pela interação dos resultados do Ansys
- P_S força localizada solicitante
- P_u força última resistente das fórmulas de Elgaaly e Seshadri (1997)
- P_y força localizada resistente ao escoamento, em Elgaaly e Seshadri (1997)
- P_w força última resistente da alma, em Elgaaly e Seshadri (1997)
- Q fator de redução associado à flambagem local
- s perímetro de uma senóide
- t_f espessura da mesa do perfil I
- $t_{f,ref}$ espessura da mesa de referência, definida como 12,5 mm
- t_w espessura da alma do perfil I
- $t_{w,ref}$ espessura da alma de referência, definida como 2,0 mm
- V força cortante atuante em Elgaaly e Seshadri (1997)
- $V1$ reação de apoio na extremidade 1 da viga
- $V2$ reação de apoio na extremidade 2 da viga
- V_{alma} força cortante resistente nominal da alma
- V_{max} máxima reação de apoio da viga
- V_R força cortante resistente nominal total da viga
- V_{RK} força cortante resistente nominal da alma, igual a V_{alma}
- V_S força cortante solicitante
- V_u força cortante última resistente em Elgaaly e Seshadri (1997)
- w comprimento de uma senóide
- W_{el} módulo de resistência da mesa carregada com relação ao seu eixo de menor inércia;

α constante a ser definida para as equações de interações

β constante a ser definida para as equações de interações

ε deformação

σ tensão

$\bar{\lambda}_p$ índice de esbeltez reduzido

$\tau_{pi,g}$ tensão de flambagem crítica

χ fator de redução associado à resistência à compressão

τ_f tensão de cisalhamento no flange

1

INTRODUÇÃO

As estruturas metálicas começaram com aplicações do ferro fundido. No século XII, foram utilizadas discretas peças auxiliares para telhados, igrejas e pontes, porém com toda a limitação da resistência a tração desse material.

No início do século XIX, a produção industrializada deu lugar ao ferro laminado. Em seguida surge a produção de aço em larga escala, na segunda metade do século XIX.

A partir de então, o aço se destaca como o melhor metal ferroso para a construção, sendo o responsável pelo grande avanço da engenharia estrutural, avanço esse apresentado com grandes obras em aço.

O Brasil é um grande produtor de aço e, assim como em outros países, possui diversas usinas siderúrgicas que fabricam e fornecem, além do próprio aço, uma grande variedade de perfis estruturais.

Dentre muitas formas de perfis, como cantoneiras, perfis U, I, tubulares, T e outros, os perfis que aparecem com mais frequência nos projetos estruturais são os perfis I. Isto se deve ao fácil processo de fabricação e principalmente à possibilidade de grandes

relações entre sua inércia e seu peso, vantagem em elementos estruturais, tais como as vigas onde a flexão predomina. Através dos laminadores, que processam de forma mecânica a mudança na forma de um corpo metálico, surgem os perfis I laminados de mesas paralelas, mundialmente conhecidos e utilizados, ver FIG.1.1. Porém esses perfis podem se tornar antieconômicos para estruturas de grandes vãos, onde a necessidade do aumento na altura do perfil também resulta em almas mais espessas (conforme dimensões disponíveis no mercado) e, portanto perfis pesados, para obter a resistência desejada.

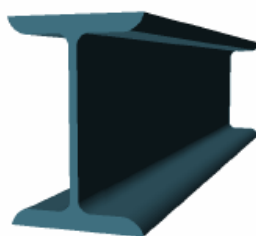


FIGURA 1.1 – Perfil I laminado [SOUZA (2006)]

Devido a essa limitação é que os perfis I soldados de alma plana são bastante utilizados. Eles são compostos por três chapas planas, as duas mesas e a alma, e podem ser fabricados com espessuras e larguras variadas, de acordo com a necessidade do projeto, ver FIG.1.2. Isso reduz muito o peso da estrutura, porém, assim como o I laminado, o I soldado também tem suas limitações que surgem à medida que necessitam de grandes inércias, grandes alturas. Nesses casos os perfis podem apresentar problemas de instabilidade da alma e a utilização de espessuras de almas maiores geraria peças pesadas e de alto custo. Enrijecedores soldados nas almas também resolveriam o problema de instabilidade da alma, porém com alto custo de mão de obra.

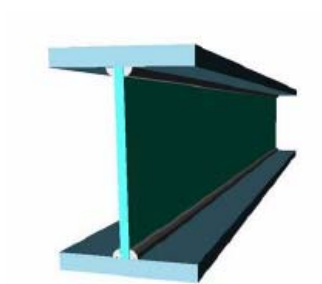


FIGURA 1.2 – Perfil I soldado [SOUZA (2006)]

Com o objetivo de sempre obter menor peso próprio da estrutura, com grandes inércias e mão de obra reduzida, os perfis de alma corrugada surgem como uma boa opção. Esses perfis são formados por duas mesas de chapas planas soldadas a uma alma de chapa fina com diversas dobras, seja em forma de trapézio, alma trapezoidal (FIG.1.3), ou senóide, alma senoidal (FIG.1.4).

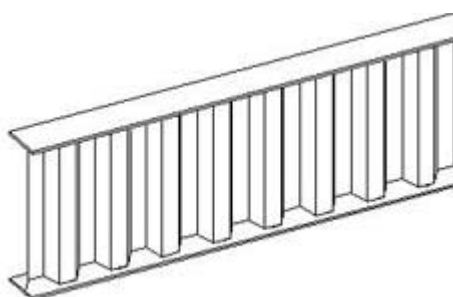


FIGURA 1.3 - Perfil de alma trapezoidal
[GLP-Corrugated Plate Industry]



FIGURA 1.4 – Perfil de alma senoidal
[PLAIS 2009]

As corrugações nas almas fornecem grande rigidez lateral aumentando consideravelmente a resistência ao cisalhamento, podendo atingir a resistência plástica, permitindo assim alturas maiores e com relação altura/espessura bem superior às dos perfis de alma plana.

O comportamento do perfil de alma corrugada pode ser comparado ao de uma treliça. Despreza-se a alma para a resistência a forças normais. Esses esforços, assim como os momentos fletores, são resistidos apenas pelas mesas (que seriam as cordas de uma treliça) e os esforços cortantes são resistidos pela alma corrugada (que seriam os montantes e diagonais de uma treliça).

Com essas características, são muitas as vantagens do perfil de alma corrugada.

Algumas delas são citadas abaixo:

- * Permite vencer grandes vãos, reduzindo o número de pilares da obra;
- * Menor peso próprio da estrutura;
- * Boa resistência à fadiga, com a ausência dos enrijecedores transversais, soldados nas vigas;
- * Baixo custo de fabricação se comparado com as vigas treliçadas, também capazes de vencer grandes vãos com baixo peso, porém com maior mão de obra.

Com todas essas vantagens apresentadas, muitos países investem nesse tipo de perfil. Segundo PIMENTA (2008), a idéia para utilização desses perfis teve início em 1966 na empresa sueca *Ranabalken*, com intuito de reduzir peso em estruturas como as pontes, sua especialidade. A partir de então, com os mesmos planos, surgem outras empresas nesse mercado, como a *GLP Corrugated Plate Industry* dos Países Baixos e a *Zeman & Co*, da Áustria. Em 1986 essa idéia é concretizada com a construção de diversas pontes e passarelas na França, FIG.1.5, Japão, FIG.1.6, Coréia do Sul, FIG.1.7, Áustria, FIG.1.8, etc.



FIGURA 1.5 – Ponte e Viaduto na França [PIMENTA (2008)]



FIGURA 1.6 – Ponte no Japão [PIMENTA (2008)]



FIGURA 1.7 – Ponte na Coréia do Sul [PIMENTA (2008)]



FIGURA 1.8 – Passarela de pedestres em Viena, Áustria [PIMENTA (2008)]

No Brasil, desde 2005, apenas a empresa Codeme Engenharia fabrica o perfil de alma senoidal. São diversas as aplicações desses perfis para a empresa, que devido ao excelente comportamento mecânico e à elevada eficiência estrutural e produtiva deste perfil, além de galpões comerciais, FIG.1.9, sistemas de cobertura, FIG.1.10, edifícios industriais, FIG.1.11, vem investindo e aplicando também estes perfis em vigas de rolamentos, FIG.1.12, e vigas mistas para pisos, FIG.1.13. A fabricação automatizada possibilita a produção em grande escala e com baixo custo, tornando-se assim viável a utilização de tais perfis em diversas obras, como as mostradas a seguir.



FIGURA 1.9 – Galpão comercial com tesouras e pilares em perfis de almas senoidais
Galpão da Cebel fabricado pela Codeme [Codeme Engenharia]



FIGURA 1.10 – Sistema de Coberturas com tesouras em perfis de almas senoidais
Loja da Leroy Merlin - Niterói / RJ [Codeme Engenharia]



FIGURA 1.11 – Edifício Industrial com vigas em perfis de almas senoidais para processamento de cana de açúcar - João Pinheiro / MG [Codeme Engenharia]



FIGURA 1.12 – Vigas de rolamento em perfis de almas senoidais Galpão da Codeme em Taubaté [Codeme Engenharia]

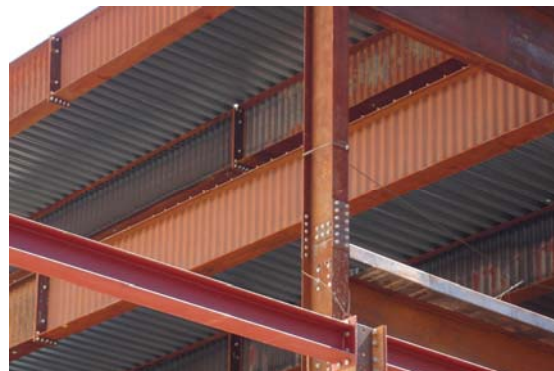


FIGURA 1.13 – Viga mista de piso em perfis de almas senoidais Ampliação do Minas Tênis Clube em Belo Horizonte [Codeme Engenharia]

O processo de fabricação dos perfis de almas senoidais é iniciado com a chapa que será utilizada na alma do perfil. Essa chapa, de espessura fina, passa primeiramente por um desbobinador hidráulico, em seguida por um retificador e depois por uma estação de corte, para ser cortada conforme dimensões especificadas em projeto. Após essa etapa, a chapa é transportada para o corrugador onde é realizada a conformação senoidal (ver FIG.1.14). Já com forma senoidal, a alma é levada para a estação de montagem, juntamente com as chapas planas que formarão as mesas. As mesas são pressionadas contra a alma, através de garras hidráulicas e finalmente é feita a soldagem, por um processo automatizado realizado por robôs (ver FIG.1.15). Na FIG.1.16 são apresentados perfis de almas senoidais em estoque, com diferentes alturas.



FIGURA 1.14 – Corrugador
[Codeme Engenharia, PLAIS (2009)].



FIGURA 1.15 – Processo de soldagem
[Codeme Engenharia, PLAIS (2009)].



FIGURA 1.16 – Perfis de almas senoidais
[Codeme Engenharia, PLAIS (2009)].

2

OBJETIVO, JUSTIFICATIVA E METODOLOGIA

2.1 OBJETIVO

O objetivo desta dissertação consiste em se obter informações, via análise numérica, sobre o comportamento dos perfis de almas senoidais utilizadas como vigas de rolamento, sujeitos a forças localizadas sobre trilhos. Comparam-se os resultados com fórmulas já desenvolvidas por outros pesquisadores e propõem-se procedimentos e novas formulações para a verificação das resistências locais das vigas e de interações dos efeitos locais com os efeitos da força cortante.

2.2 JUSTIFICATIVA

Apresentadas as vantagens dos perfis de almas corrugadas com relação aos outros perfis em situações de grandes vãos, além de uma produção automatizada, o interesse nos perfis de alma senoidal aumenta juntamente com a necessidade de mais estudos que complementem publicações existentes.

Dentre as referências bibliográficas encontradas sobre os perfis de alma senoidal, inclusive as produzidas pelo grupo de pesquisa formado pelo Departamento de Estruturas da UFMG em parceria com a empresa brasileira fabricante desses perfis, a Codeme Engenharia, destacam-se:

a) Resistência a Força Cortante: muitos estudos foram desenvolvidos e modelos ensaiados por Easley (1975) sobre este assunto, e comprovados ou comentados por diversos outros pesquisadores, ELGAALY (1996), SCHWARZ (1990), PASTERNAK (1996) e outros.

b) Resistência aos Efeitos de Forças Localizadas: assunto pouco explorado para os perfis senoidais. A referência principal encontra-se em NOVAK e MACHACEK (2000). Outras publicações encontradas, como PASTERNAK e BRANKA (1999), ELGAALY e SESHADRI (1997), são para perfis de almas trapezoidais que, possuem comportamento diferente das senoidais.

c) Flambagem Lateral com Torção: HACKBARTH JÚNIOR (2006), GONZAGA (2008)

d) Flambagem Lateral com Distorção: CALENZANI *et al* (2007), CALENZANI (2008)

e) Ligações: GONZAGA (2008)

f) Flambagem Local de Mesa: SOUZA (2006), PINTO (2008)

g) Métodos de Cálculo e Análise da Confiabilidade Estrutural: PIMENTA (2007) e PIMENTA (2008)

h) Vigas Mistas: MARTINS (2008) e MARTINS (2009)

i) Em situação de Incêndio: CAMARGO (2010)

Diante dessa relação de temas já tratados por diversos pesquisadores, nesta pesquisa aborda-se o Efeito de Forças Localizadas, fenômeno de muita importância, já mencionado em outros trabalhos do grupo de pesquisa da UFMG, como sugestão para trabalhos posteriores. Dentro das variadas possibilidades de ocorrência desse fenômeno, decidiu-se limitá-lo ao caso de vigas de rolamento solicitadas por forças localizadas resultantes das rodas das pontes rolantes.

As diversas vantagens do perfil senoidal e a insuficiência de informações sobre efeitos localizados justificam o presente trabalho.

2.3 METODOLOGIA

Para estudar o comportamento das vigas de almas senoidais como vigas de rolamento, sujeitas a forças localizadas sobre trilhos, realiza-se análise parametrizada por meio de modelos de elementos finitos.

Para que os modelos representem adequadamente as vigas e trilhos e suas propriedades, eles são discretizados no programa ANSYS 10.0, utilizando-se o elemento de casca Shell 181, com quatro nós e seis graus de liberdade por nó, nas mesas, alma senoidal e trilhos.

Como o aço é um material homogêneo e praticamente isotrópico, suas características são bem definidas. Dessa forma, é possível uma boa aproximação entre seu comportamento estrutural definido teoricamente e o que efetivamente ocorre na prática.

Para a análise não-linear geométrica e física é utilizado um material com diagrama tensão-deformação bi-linear, com módulo de elasticidade, E , de 20000 kN/cm² ou 200000 MPa, coeficiente de Poisson de 0,3, módulo de elasticidade tangente, E_t igual a $E/10000$ e que segue o critério de escoamento de von Mises e regra de encruamento

cinemático. Considera-se uma imperfeição inicial de 1 mm, associada ao maior deslocamento do 1º modo de flambagem. Considera-se também que o efeito das tensões residuais pode ser desprezado, porque a alma, elemento mais afetado pelas forças locais, tem espessura muito pequena, com pouca deposição de material de solda.

Os modelos descrevem os efeitos causados no perfil por uma força localizada sobre o trilho na seção central do perfil e a interação dessa força com a força cortante.

Os valores dos parâmetros estabelecidos dos perfis de alma senoidal são baseados nas dimensões usuais dos perfis senoidais fabricados no Brasil, descritos adiante. Eles também são definidos de acordo com as características de perfis para possíveis vigas de rolamento, por exemplo, altura mínima de 600 mm. Para este estudo, os parâmetros considerados são a altura do perfil, a largura da mesa, a espessura da mesa, a espessura da alma senoidal, o tipo do trilho e a excentricidade entre as linhas longitudinais centrais da alma do trilho e da senóide da alma da viga. O estudo dessa excentricidade é importante pelo fato de muitas vezes na prática existir a possibilidade de um deslocamento da viga de rolamento ou do trilho sobre a viga de rolamento durante o funcionamento da ponte rolante. São analisados três diferentes tipos de trilhos, barra de 50 mm, TR-25 e TR-37, apoiados nas vigas com excentricidades nulas e com excentricidade de 10,75 mm.

Para as vigas com excentricidade nula foram utilizados:

| | |
|---------------------|---|
| Espessura da Alma | → 2,0 e 3,0 mm |
| Altura da alma | → 600, 800, 1000 e 1200 |
| Dimensões das Mesas | → 12,5x150, 12,5x200, 16x150, 16x200, 16x250, 19x200, 19x250, 19x300 |
| Tipos de Trilhos | → barra quadrada 50 mm, TR-25 e TR-37 |

Obtendo-se um total de $2 \times 4 \times 8 \times 3 = 192$ vigas

Para as vigas com excentricidade igual a 10,75 mm foram utilizados:

| | |
|---------------------|--------------------------------------|
| Espessura da Alma | → 2,0 e 3,0 mm |
| Altura da alma | → 600 e 1000 |
| Dimensões das Mesas | → 12,5x200, 16x200, 19x250 |
| Tipos de Trilhos | → barra quadrada 50mm, TR-25 e TR-37 |

Obtendo-se um total de $2 \times 2 \times 3 \times 3 = 36$ vigas

Deste modo, abrangem-se, para análise dos resultados, um total de 228 vigas.

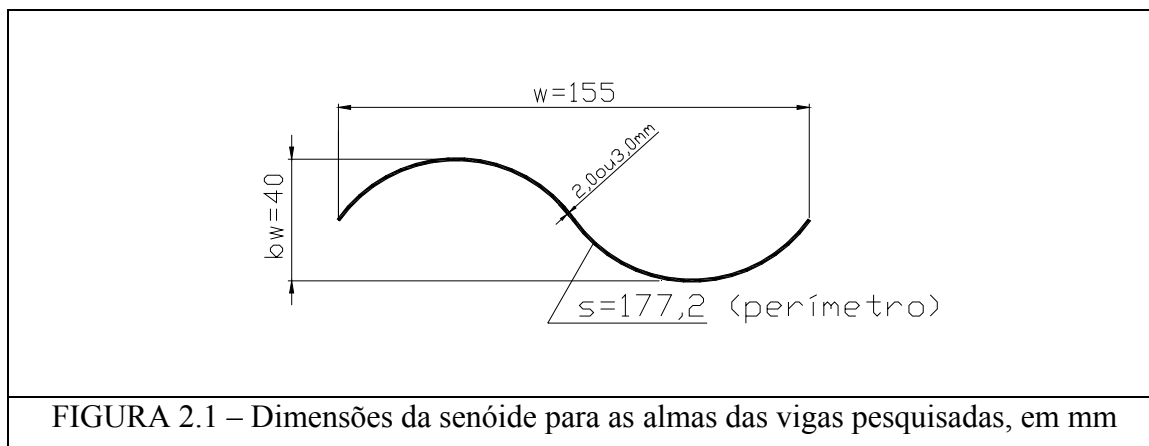
No processo de definição do modelo mais próximo da prática, entende-se que a discretização do trilho junto à viga é fundamental para resultados mais confiáveis e, portanto neste estudo os modelos são necessariamente discretizados com o trilho sobre a viga de alma senoidal.

O contato entre a mesa do perfil e a base do trilho obtém-se através de elementos de contato, definidos no Ansys como TARGET170 para a superfície alvo, sendo esta a região da mesa da viga em contato com o trilho, e como CONTACT174 para a superfície de contato, a base do trilho.

Para maior agilidade e viabilidade na geração dos modelos elabora-se um pré-processador, que serve para a entrada de dados no programa Ansys, possibilitando que se alterem apenas os parâmetros definidos no estudo. Desta forma todas as vigas são discretizadas com suas características específicas.

Define-se o comprimento da viga aproximadamente igual ao dobro da altura do perfil, já que este estudo não considera as solicitações devidas ao momento fletor. O comprimento adotado é suficiente para que a determinação da resistência última a forças localizadas e da interação entre essas forças e a força cortante.

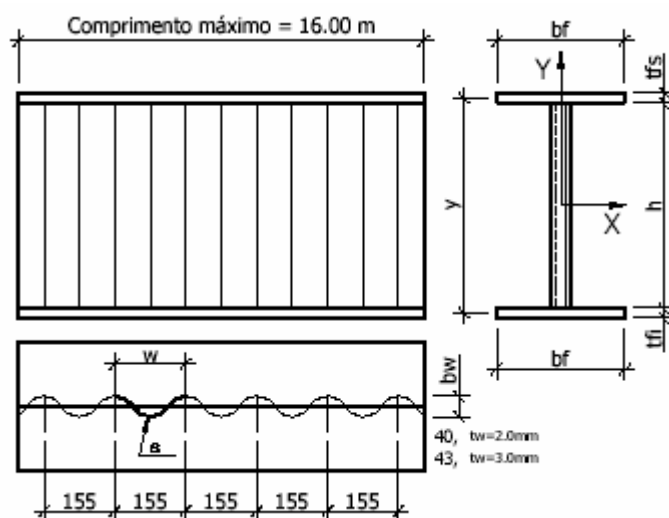
A alma senoidal é modelada com as dimensões mostradas na FIG.2.1.



Apesar de algumas dimensões sofrerem alterações para a alma com espessura de 3,0 mm nos perfis de fabricação brasileira, este trabalho visa apenas uma geometria de senóide para as duas espessuras. O valor de b_w , igual a 40 mm, é definido para o programa Ansys, que estabelece essa cota de eixo a eixo.

Em todos os modelos os valores de f_y , resistência ao escoamento do aço, são de 350 MPa para as mesas e 300 MPa para a alma, fixados conforme propriedades de perfis produzidos no Brasil. Para os trilhos foi considerado um valor elevado para f_y de forma a garantir seu comportamento apenas no regime elástico.

A seguir são mostrados na FIG.2.2, os perfis de almas senoidais fabricados no Brasil, padronizados e limitados com relação à altura, largura, espessuras e corrugações.



Dimensões da alma:

| | |
|---------------------------------|---------------------------------|
| Altura Nominal do Perfil H (mm) | 400, 500, 600, 800, 1000 e 1200 |
| Altura da Alma h (mm) | 395, 495, 595, 795, 990 e 1190 |
| Espessura tw (mm) | 2,0 e 3,0 |

Dimensões das mesas:

| | |
|----------------|---|
| Largura (mm) | $125 \leq bf \leq 350$ |
| Espessura (mm) | $4,75 \leq tfs \leq 19,0$ e $4,75 \leq tfl \leq 19,0$ |

FIGURA 2.2 – Dimensões e geometria dos perfis de almas senoidais fabricados no Brasil [Codeme Engenharia, PLAIS (2009)].

3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Normalmente, as construções possuem algumas vigas que estão sujeitas a forças localizadas. Essas forças podem ser geradas por reações de colunetas, vigas que se apóiam nas mesas de outras vigas, apoio de equipamentos em edificios industriais, vigas com apoios em pilares, reações de rodas de pontes rolantes nas vigas de rolamento etc. Por estarem aplicadas frequentemente em pequenas regiões da mesa da viga, essas forças podem causar tensões de grande intensidade.

A utilização de enrijecedores soldados nas almas, posicionados na direção dessas forças locais, pode ser desnecessária, dispendiosa e pouco eficaz para carregamentos móveis, além de ser nociva para a fadiga. Assim, torna-se importante estudar a resistência das vigas a forças localizadas, sem a utilização de enrijecedores.

3.2 EFEITO DE FORÇAS LOCALIZADAS APLICADAS NAS MESAS DE VIGAS COM ALMAS PLANAS

Os estados limites últimos que podem ocorrer em perfis I de almas planas devido a forças localizadas são:

- enrugamento da alma (web crippling), para tensões de compressão;
- escoamento da alma, para tensões de tração ou compressão;
- flambagem lateral da alma, juntamente com desvio da mesa tracionada, para tensões de compressão;
- flambagem da alma por compressão, para forças aplicadas nos dois sentidos, em mesas opostas;
- flexão local da mesa;

Para os perfis de *almas planas*, a verificação de todos esses estados-limites últimos pode ser encontrada em diversas referências bibliográficas, dentre elas a norma brasileira ABNT-NBR8800:2008 e a norma americana ANSI/AISC 360-05 (2005).

Para todos os estados limites citados, “se a força solicitante de cálculo superar a força resistente de cálculo, deve ser colocado, na seção atuante dessa força, um enrijecedor transversal” (ABNT NBR8800:2008).

Para os perfis de almas corrugadas, mesmo com as almas de espessura bem finas, esses enrijecedores podem ser desnecessários, devido a maior rigidez lateral que a alma proporciona.

3.3 EFEITO DE FORÇAS LOCALIZADAS APLICADAS NAS MESAS DE VIGAS COM ALMAS CORRUGADAS

3.3.1 VIGAS COM ALMA TRAPEZOIDAL

ELGAALY E SESHADRI (1997) investigaram os perfis de almas trapezoidais, analisando modelos de elementos finitos e realizando experimentos.

Na análise experimental, o modelo utilizado, mostrado na FIG.3.1, foi submetido a cinco ensaios variando a posição da força aplicada, conforme FIG.3.2, constituindo assim os casos de carregamento 1 ao 5.

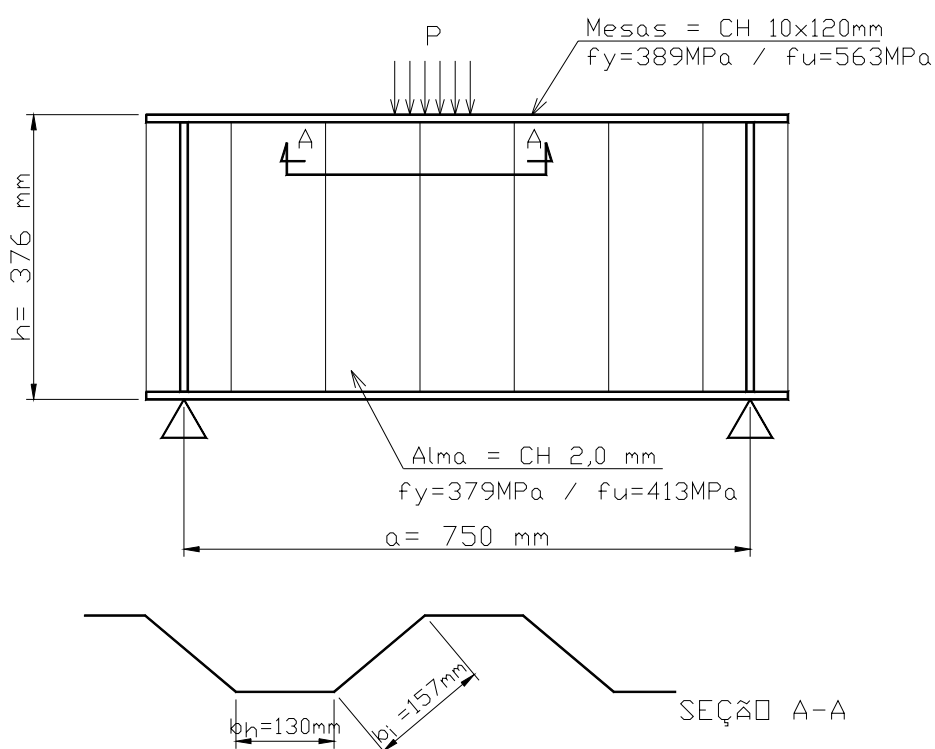


FIGURA 3.1 – Dimensões do modelo

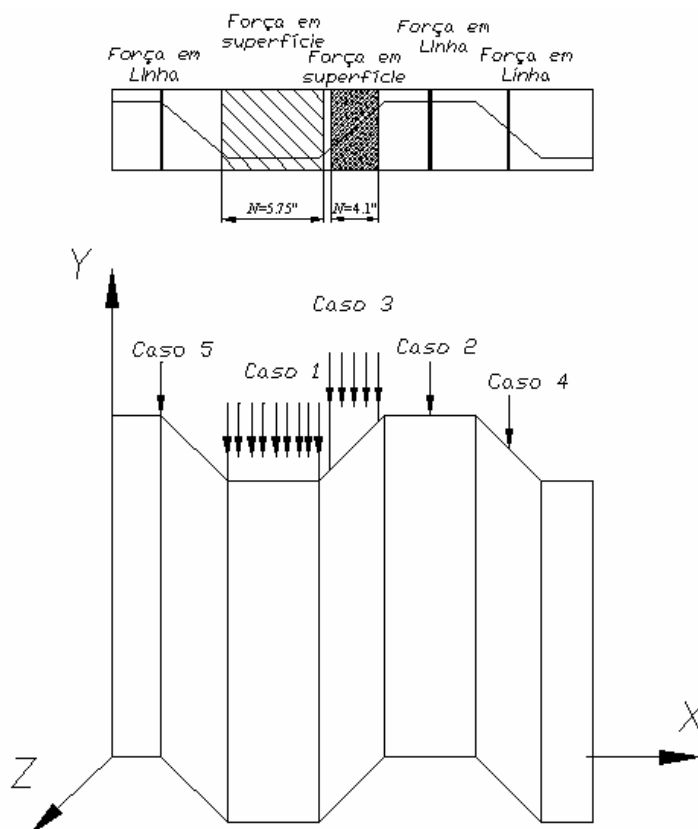


FIGURA 3.2 – Posições das forças aplicadas
[ELGAALY e SESHADRI (1997)]

- Caso 1 → força distribuída aplicada na borda paralela da nervura;
- Caso 2 → força concentrada aplicada na borda paralela da nervura;
- Caso 3 → força distribuída aplicada na borda inclinada da nervura;
- Caso 4 → força concentrada aplicada na borda inclinada da nervura;
- Caso 5 → força concentrada aplicada na junção da borda paralela com a borda inclinada da nervura.

A alma foi enrijecida nas extremidades do perfil para evitar o escoamento e o enrugamento nesses locais.

As forças em superfície (casos 1 e 3) foram aplicadas por meio de uma placa de 25,4 mm de espessura e as forças em linha (casos 2, 4 e 5) por meio de um cilindro de aço com 76,2 mm de diâmetro.

Para todas as posições, as forças foram aplicadas em toda a largura da mesa. A aplicação da força foi realizada com incremento de 1 kip (4,45 kN) até cerca da metade da força última e de 0,5 kip até a falha.

As forças últimas foram atingidas devido à flexão da mesa superior na direção vertical e enrugamento da alma sob a força aplicada, com a observação de que nos casos 1 e 2 essa flexão da mesa veio acompanhada de torção.

A análise numérica foi realizada no programa ABAQUS e foram modelados todos os cinco casos dos ensaios. Foi utilizado o método dos elementos finitos, com o material assumindo um comportamento linearmente elástico, com o valor do módulo de elasticidade E de 200 GPa, até o escoamento. Posteriormente, para a análise plástica, o valor do módulo de elasticidade foi reduzido para $0,01E$, ou seja, 2,0 GPa e, finalmente, ao atingir a força última, o material comporta-se como perfeitamente plástico.

A concordância entre as análises experimental e numérica foi considerada boa, visto que as curvas força x deslocamento geradas nas duas situações ficaram muito próximas (ver FIG.3.3). A relação entre as forças últimas encontradas na análise numérica (P_f) e na análise experimental (P_e) apresentaram valores bem próximos de 1,0 (ver TAB.3.1).

TABELA 3.1 – Comparação entre o resultado experimental e o resultado numérico
[ELGAALY e SESHADRI (1997)]

| Casos (1) | Localização da força (2) | Largura de distribuição, N (in.) (3) | P_e (kips) (4) | P_f (kips) (5) | P_f/P_e (6) |
|--------------|--|---|------------------------|------------------------|------------------|
| Caso 1 | Borda paralela | 5,75 | 29,50 | 24,05 | 0,815 |
| Caso 2 | Borda paralela | 0,00 | 18,50 | 17,74 | 0,959 |
| Caso 3 | Borda inclinada | 4,10 | 23,00 | 20,03 | 0,871 |
| Caso 4 | Borda inclinada | 0,00 | 21,50 | 19,40 | 0,902 |
| Caso 5 | Junção entre a borda paralela e inclinada | 0,00 | 16,50 | 20,89 | 1,266 |

Nota: 1 in. = 25,4 mm. 1 kip = 4,45 kN.

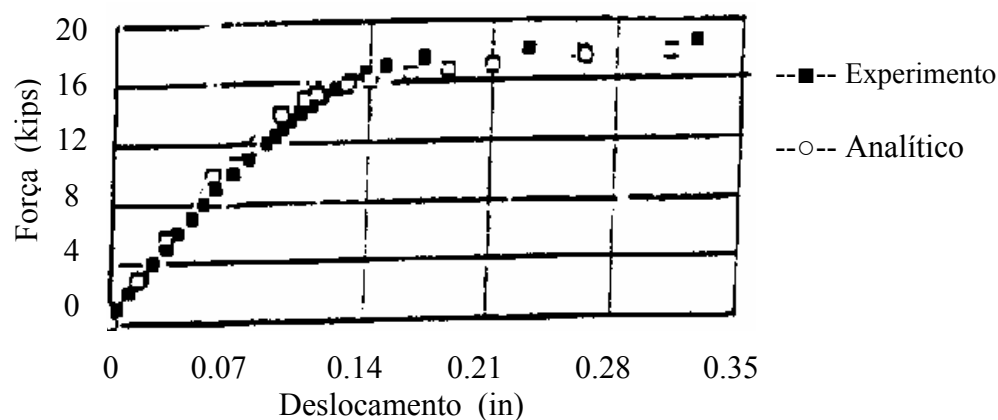


FIGURA 3.3 – Força x Deslocamento vertical da mesa – Carregamento do Caso 2
[ELGAALY e SESHADRI (1997)]

Como informação adicional, os autores utilizaram seis ensaios realizados na Suécia, por ARAVENA e EDLUND (1987). Os parâmetros considerados e examinados estão descritos abaixo, na FIG.3.4 e na TAB.3.2, sendo:

t_w = espessura da alma

t_f = espessura da mesa

b_f = largura das mesas

f_{yw} = resistência ao escoamento da alma

f_{yf} = resistência ao escoamento das mesas

l = comprimento do painel

h = altura do painel

N = comprimento de aplicação da força. Para força aplicada em um ponto é igual a “0” (zero). Para a força distribuída foi considerado $N=50$ mm ou 1,97 in.

Localização da Força = na borda paralela, na borda inclinada e na junção das bordas paralela e inclinada.

Para todas as posições, as forças foram aplicadas em toda a largura da mesa.

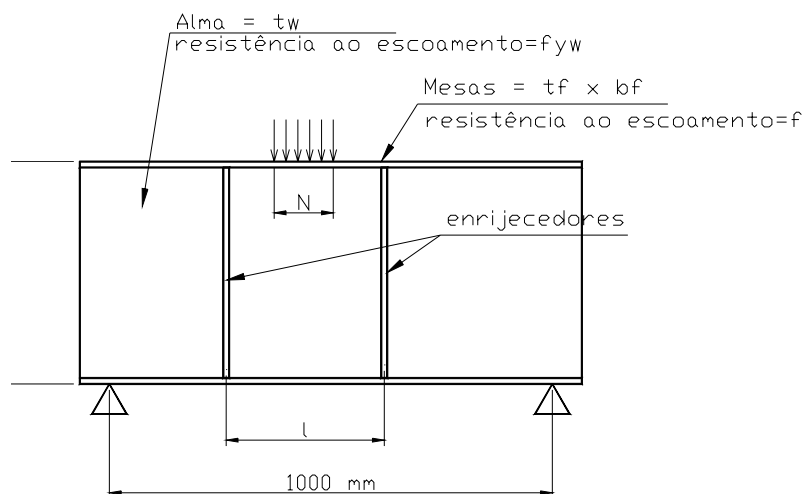


FIGURA 3.4 – Definição dos parâmetros

TABELA 3.2 – Detalhes dos modelos ensaiados na Suécia, citados em ARAVENA e EDLUND (1987)
[ELGAALY e SESHADRI (1997)]

| Viga (1) | t_w (in) (2) | f_{yw} (ksi) (3) | t_f (in) (4) | f_{yf} (ksi) (5) | b_f (in) (6) | l (in) (7) | h (in) (8) | N (in) (9) | Localção (10) |
|-------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| Viga 1 | 0,0984 | 48,62 | 0,4724 | 69,00 | 9,84 | 39,37 | 39,37 | 0,00 | Paralela |
| Viga 2 | 0,0984 | 48,62 | 0,4724 | 69,00 | 9,84 | 39,37 | 39,37 | 0,00 | Inclinada |
| Viga 3 | 0,0984 | 46,00 | 0,4724 | 69,00 | 9,84 | 39,37 | 59,06 | 0,00 | Paralela |
| Viga 4 | 0,0984 | 46,00 | 0,4724 | 69,00 | 9,84 | 39,37 | 59,06 | 1,97 | Paralela |
| Viga 5 | 0,0787 | 40,63 | 0,3937 | 69,00 | 9,84 | 39,37 | 78,74 | 0,00 | Junção |
| Viga 6 | 0,0787 | 40,63 | 0,3937 | 69,00 | 9,84 | 39,37 | 78,74 | 1,97 | Inclinada |

Nota: 1 in = 25.4 mm. 1ksi = 6.89 Mpa

Para estes ensaios foi utilizada a corrugação mostrada na FIG.3.5.

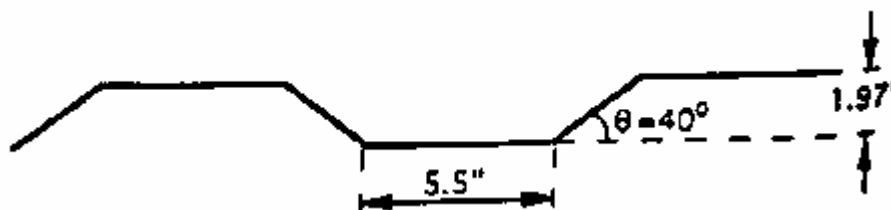


FIGURA 3.5 – Corrugação das vigas testadas na Suécia, citadas em ARAVENA e EDLUND (1987)
[ELGAALY e SESHADRI (1997)]

Para a análise numérica, foi considerado o material com o mesmo comportamento descrito anteriormente.

Na análise experimental, as falhas encontradas nos modelos também foram devidas à flexão local da mesa superior e ao enrugamento da alma sob a força aplicada.

A concordância entre as análises também foi considerada boa, já que a relação entre as forças últimas encontradas das análises numérica (P_f) e experimental (P_e), também apresentou valores bem próximos de 1.0 (ver TAB.3.3).

TABELA 3.3 – Comparação entre os resultados experimental e numérico para os modelos testados na Suécia, citados em ARAVENA e EDLUND (1987)
[ELGAALY e SESHADRI (1997)]

| Vigas (1) | P_e (kip) (2) | P_f (kip) (3) | P_f/P_e (4) |
|--------------|-----------------------|-----------------------|------------------|
| Viga 1 | 33,48 | 41,28 | 1,23 |
| Viga 2 | 38,20 | 41,53 | 1,09 |
| Viga 3 | 34,15 | 36,72 | 1,08 |
| Viga 4 | 37,75 | 41,20 | 1,09 |
| Viga 5 | 24,05 | 24,88 | 1,03 |
| Viga 6 | 27,87 | 27,61 | 0,99 |

Nota: 1 kip = 4,45 kN.

Desta forma, ELGAALY e SESHADRI (1997) concluíram que os modelos de elementos finitos são capazes de representar o comportamento das vigas de almas corrugadas sujeitas a forças concentradas e de definir a força última com grande precisão.

Sendo assim, realizaram estudos paramétricos, usando modelos de elementos finitos, com o objetivo de desenvolver equações para dimensionamentos. Para esses estudos

também se variaram as dimensões das corrugações. Foram considerados três casos de carregamentos e as conclusões, conforme o tipo de falha, foram as seguintes:

Caso de Carregamento I: Forças aplicadas sobre as bordas paralelas (33 vigas modeladas e analisadas). Observada a falha tipo I.

Caso de Carregamento II: Forças aplicadas sobre as bordas inclinadas (29 vigas modeladas e analisadas). Observadas as falhas tipos I, II e III.

Caso de Carregamento III: Forças aplicadas sobre as junções das bordas paralelas e inclinadas (9 vigas modeladas e analisadas). Observada a ausência de falha das mesas, exceto em duas análises.

Falha do Tipo I: Definida como enrugamento da alma (“web crippling”), os autores a descreveram como a falha que consiste no colapso da mesa superior devido ao seu escoamento e torção em torno da alma, conduzindo a uma flexão local da alma, que seria o enrugamento (ver FIG.3.6). Esse tipo de colapso da alma não significa que ela tenha atingido o escoamento como membrana. As tensões da alma são predominantemente de flexão. No caso de carregamento II, a falha tipo I ocorreu sem torção da mesa, mas com flexão biaxial, ou seja, na direção longitudinal da viga e como viga em balanço para os dois lados da alma.

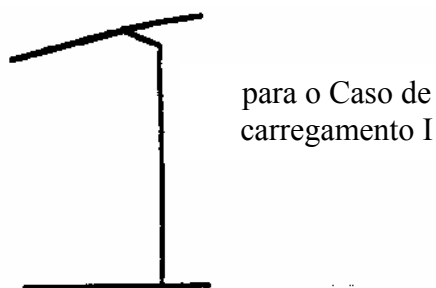


FIGURA 3.6 – Modo de falha tipo I [ELGAALY e SESHADRI (1997)]

Falha do Tipo II: Definida como escoamento da alma, os autores a descreveram como a falha que consiste em um mecanismo plástico da alma que escoar na direção vertical e então enruga. Neste colapso, há uma flexão da mesa nas duas direções da alma, porém

sem o escoamento da mesa. As tensões da alma são predominantemente de membrana. Ver FIG.3.7.

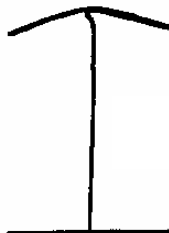


FIGURA 3.7 – Modo de falha tipo II (com escoamento de membrana na alma)
[ELGAALY e SESHADRI (1997)]

Para algumas vigas o comportamento da alma não foi nem predominantemente de flexão, nem de membrana. Esta situação foi denominada falha tipo III.

Da parametrização dos tipos de falhas encontradas, foram desenvolvidas formulações para que as forças últimas pudessem ser determinadas:

→ Para a falha do tipo I, nomeada pelos autores de enrugamento da alma, a força última, $P_u = P_c$, consiste em duas componentes, a resistência da mesa (P_{fl}) e a resistência da alma (P_w), conforme Eq.3.1:

$$P_u = P_c = P_{fl} + P_w = \frac{4M_{pf}}{a - N/4} + (E f_{yw})^{0,5} t_w^2 \quad (3.1)$$

onde:

$$M_{pf} = \frac{b_f f_{yf} t_f^2}{4} = \text{resistência plástica da mesa}$$

$$a = \left(\frac{f_{yf} b_f t_f^2}{2 f_{yw} t_w} \right)^{0,5} + \frac{N}{4} \geq \frac{N}{2} = \text{distância entre as charneiras plásticas}$$

N = comprimento da força

E = módulo de elasticidade do aço

f_{yw} = resistência ao escoamento do aço da alma

f_{yf} = resistência ao escoamento do aço da mesa

b_f = largura da mesa

t_f = espessura da mesa

t_w = espessura da alma

A equação da resistência utilizada da alma (P_w) foi desenvolvida para perfis de almas planas.

→ Para a falha do tipo II, nomeada pelos autores de escoamento da alma, a força última, $P_u = P_y$, é dada pela Eq.3.2:

$$P_u = P_y = (b + b_a) t_w f_{yw} \quad (3.2)$$

onde:

$b = b_i$ = para carregamento na parte inclinada

$b = (b_{ih} + b_h)/2$ = para carregamento sobre a dobra

$$b_a = \alpha t_f \left(\frac{F_{yf}}{F_{yw}} \right)^{0,5}$$

$$\alpha = 14 + 3,5\beta - 37\beta^2 \geq 5,5$$

$$\beta = h_r / b_f$$

Para a definição de h_r , b_h , b_{ih} e b_i , ver FIG.3.8.

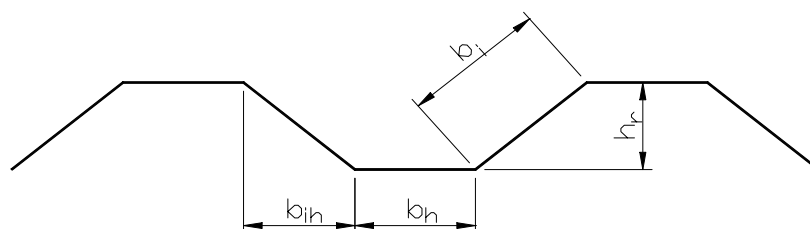


FIGURA 3.8 – Definição de b_{ih} , b_h , b_i e h_r

Para os casos de carregamentos onde podem acontecer os modos de falha dos tipos I e II, é recomendado que se adote o menor dos dois valores de resistências encontrados.

Os autores afirmam que a presença de momento fletor e força cortante no plano da viga afetam a resistência desta sob forças localizadas. Esses efeitos também foram examinados por análise numérica por ELGAALY E SESHADRI (1997). As equações de interação recomendadas são as Eq.3.3 e 3.4:

$$\left(\frac{P}{P_u}\right)^{1,25} + \left(\frac{M}{M_u}\right)^{1,25} = 1 \quad (3.3)$$

$$\left(\frac{P}{P_u}\right)^{1,25} + \left(\frac{V}{V_u}\right)^{1,25} = 1 \quad (3.4)$$

onde:

M = Momento solicitante

M_u = Momento resistente nominal

P = Força localizada solicitante

P_u = Força localizada resistente nominal

V = Força cortante solicitante

V_u = Força cortante resistente nominal

Essas equações, segundo seus autores, são conservadoras, pois representam os menores valores dos resultados obtidos na análise numérica. As mesmas equações também são recomendadas por MACHACEK e TUMA (2006).

3.3.2 VIGAS COM ALMA SENOIDAL

Novak e Machacek investigaram os perfis de alma senoidal, analisando modelos de elementos finitos e realizando ensaios. Estes ensaios foram realizados na Universidade Técnica Tcheca, em Praga, e descritos em NOVAK e MACHACEK (1998, 1999 e 2000) e outros.

Na análise experimental foram realizados 27 ensaios, variando-se a posição da força aplicada, com diferentes excentricidades, diferentes tipos de apoio e com espessuras de almas senoidais de 2,0 mm, 2,5 mm e 3,0 mm. Nos ensaios as forças foram aplicadas por meio de um cilindro de 20 mm de diâmetro sobre uma chapa de 50x30 mm, esta representando a largura e altura de um trilho para pontes rolantes, com um comprimento de 300 mm, suficiente para distribuir a força sobre a viga.

A idéia dos autores era estudar vigas de almas senoidais trabalhando como vigas de rolamentos para pontes de capacidades baixas.

Foram produzidas vigas utilizando perfis desenvolvidos pela empresa Zeman+Co, conhecidos como perfis *WT*, FIG.3.9. As almas desses perfis foram fabricadas com o aço St 37-2G, com resistência ao escoamento de 215 MPa com três séries de espessuras de almas: *WTA* com espessura de alma de 2,0 mm, *WTB* com $t_w=2,5$ mm e *WTC* com $t_w=3,0$ mm. As alturas dos perfis *WT* variam de 500 a 1500 mm.

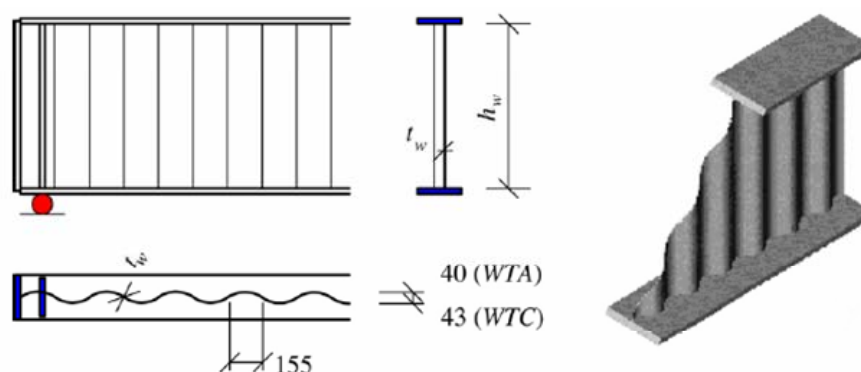


FIGURA 3.9 – Perfis *WT* desenvolvidos pela ZEMAN +Co GmbH
[MACHACEK e TUMA (2006)]

O modelo típico utilizado apresenta contenções laterais nas extremidades, conforme mostrado nas FIG. 3.10 e 3.11. A FIG.3.10 corresponde ao modelo com dois apoios rotulados nas extremidades da viga e a FIG.3.11 corresponde ao modelo com o apoio situado no centro do vão da viga.

A posição da chapa que recebe a força foi variada durante os ensaios de acordo com a excentricidade pretendida.

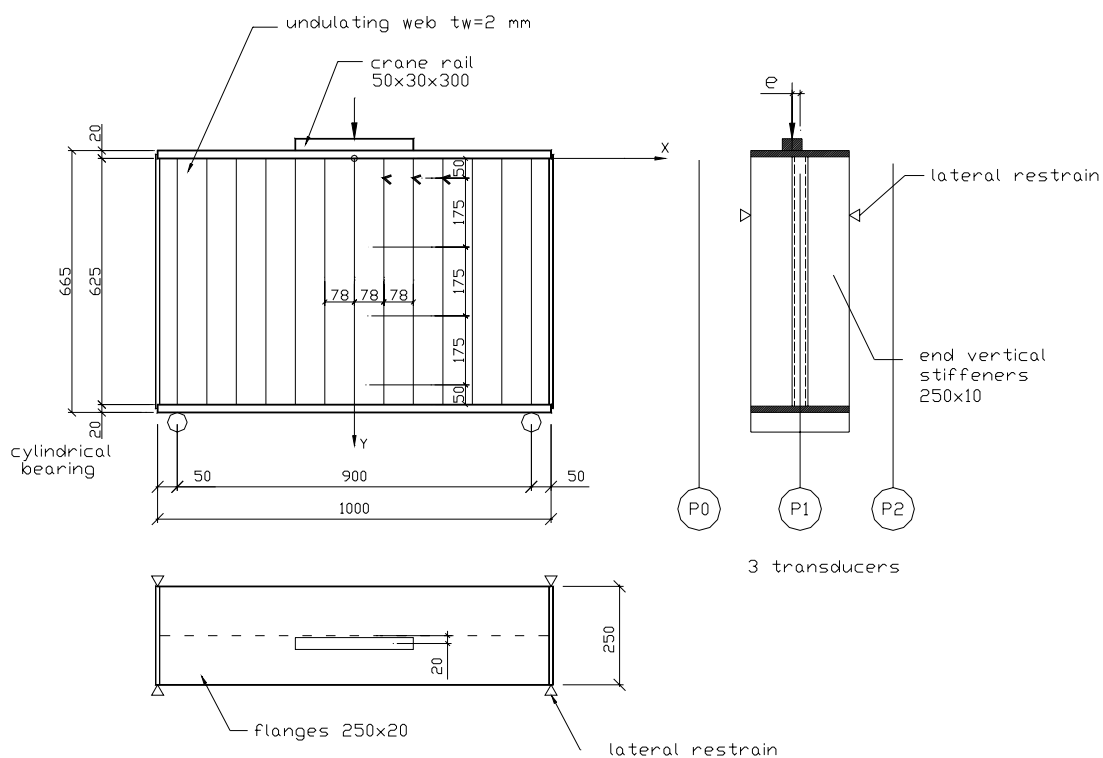


FIGURA 3.10 – Modelo típico com dois apoios rotulados
[NOVAK e MACHACEK (2000)]

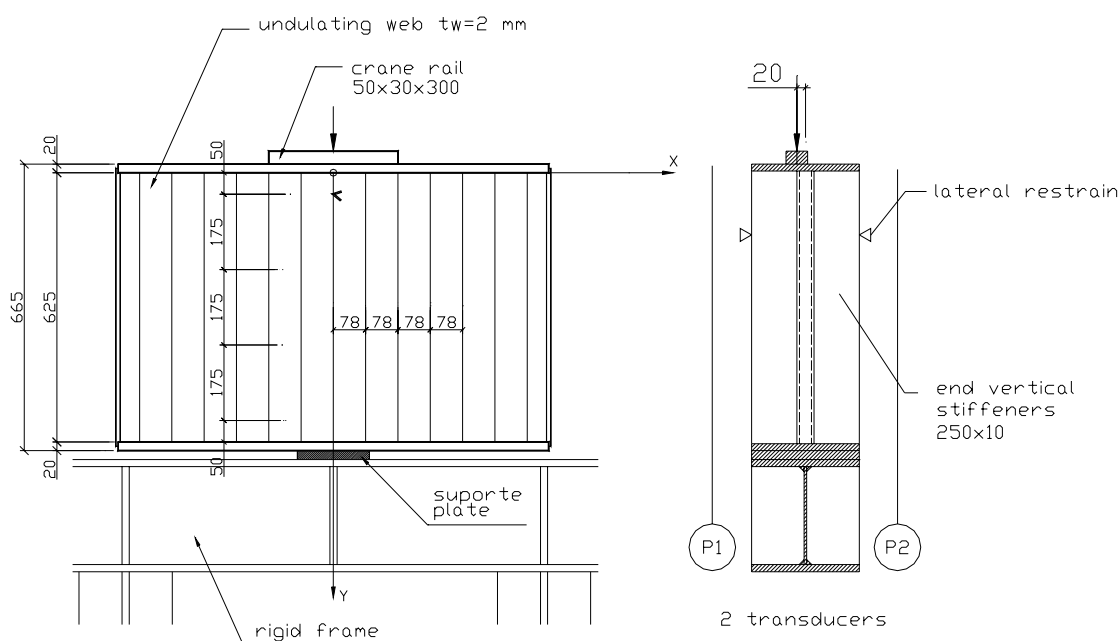


FIGURA 3.11 – Modelo com apoio central
[NOVAK e MACHACEK (2000)]

A principal finalidade dessa pesquisa foi determinar a resistência local da alma e sua sensibilidade a forças localizadas concêntricas e excêntricas.

A excentricidade consiste na distância entre o centro da força e a linha de centro da alma, e representa imperfeições iniciais tanto da viga quanto do trilho. O valor admissível da excentricidade pode ser fornecido por projetistas de pontes rolantes, porém, foram adotadas nesse estudo excentricidades de 20 mm (igual à amplitude da onda da corrugação adotada), 30 mm, 40 mm e 0 mm (sem excentricidade). Além da excentricidade, variação transversal da posição da força, variou-se também a posição da força na direção longitudinal. As diferentes posições das forças, na direção longitudinal, com relação à senóide, são mostradas na FIG. 3.12.



FIGURA 3.12 – Posições variadas do carregamento na direção longitudinal, com $e=20$ mm [NOVAK e MACHACEK (2000)]

Dos 27 ensaios, 4 deles foram considerados com $e=0$, ou seja sem excentricidade, 18 ensaios foram com $e=20\text{mm}$ nas três posições mostradas na FIG.3.12, 2 ensaios com $e=30\text{mm}$ e 3 deles com $e=40\text{mm}$. A seguir, apresentam-se resultados dos ensaios realizados.

a) Ensaios com montagem conforme FIG.3.13

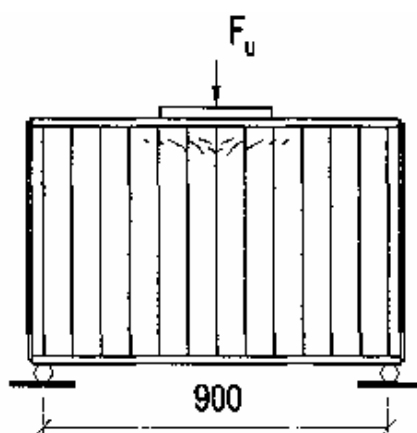


FIGURA 3.13 - Apoios rotulados [NOVAK E MACHACEK (2000)]

- 4 ensaios com $e=0$ → O colapso foi por enrugamento da alma aproximadamente 50 mm abaixo da mesa superior, dentro de 4 meias-ondas. Esse fenômeno pode ser visto na FIG.3.16.
- 14 ensaios com $e=20$ mm → Variou-se a posição das forças, conforme FIG.3.12. O colapso também foi pelo enrugamento da alma a aproximadamente 50 mm abaixo da mesa, dentro de 6-7 meias-ondas.
- 2 ensaios com $e=30$ mm e 3 ensaios com $e=40$ mm → Novamente o colapso foi por enrugamento da alma aproximadamente 50 mm abaixo da mesa, porém em todo o comprimento da viga.

b) Ensaio com montagem conforme FIG. 3.14

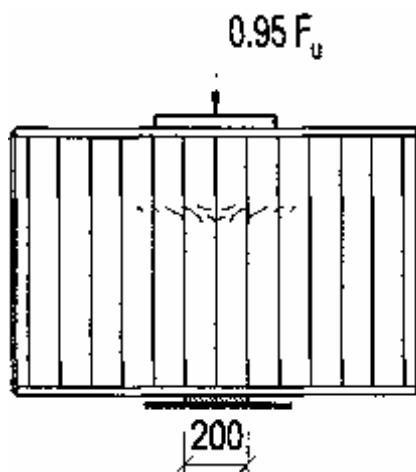


FIGURA 3.14 - Apoio central com 200 mm [NOVAK E MACHACEK (2000)]

- 1 ensaio com $e=20$ mm → Colapso por enrugamento no terço superior da altura da viga. O enrugamento ficou dentro de 9 meias-ondas. A força de colapso foi menor do que nos ensaios com apoios rotulados e enrijecidos, devido à interação entre a flambagem local e a instabilidade global da alma.

c) Ensaios com montagem conforme FIG.3.15

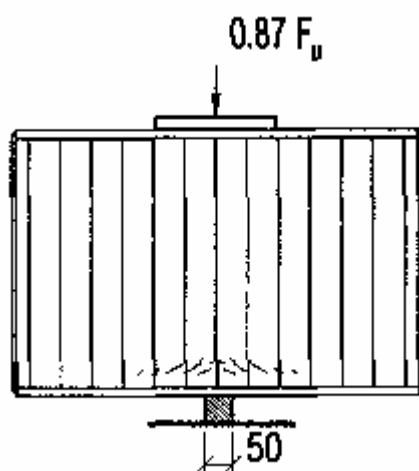


FIGURA 3.15 - Apoio central com 50 mm [NOVAK E MACHACEK (2000)]

- 3 ensaios com $e=20$ mm → O enrugamento da alma apareceu próximo à mesa inferior. A força de colapso foi ainda menor do que a do ensaio anterior.



FIGURA 3.16 – Fase final do ensaio mostrando o enrugamento da alma
[MACHACEK e TUMA (2006)]

Concluiu-se que para os ensaios com apoios centrais, a região onde ocorre o enrugamento da alma assume-se diferentes posições de acordo com a largura desse apoio.

As médias dos resultados das forças de colapso para vigas de almas senoidais com espessura de 2,0 mm e montagem conforme FIG.3.13, são dadas na TAB.3.4:

TABELA 3.4 – Força de colapso média para perfis com alma senoidal de 2,0 mm
[NOVAK e MACHACEK (2000)]

| Eccentricity e [mm] | Average collapse loading $F_{u,avg}$ [kN] | Percentage [%] |
|-----------------------|---|----------------|
| 0 | 230 | 100,0 |
| 20 | 228 | 99,0 |
| 30 | 210 | 91,3 |
| 40 | 208 | 90,4 |

Outra conclusão foi que a força de colapso para vigas com excentricidades menores do que 20 mm é proporcional às espessuras da alma e das mesas. A resistência da viga não foi influenciada pela posição longitudinal da força.

A análise numérica foi desenvolvida utilizando-se o programa ANSYS, levando em conta análise de grandes deformações, com imperfeições iniciais de 1 mm e sem introduzir tensões residuais relativas as soldas e geometria dos perfis. Todos os ensaios foram modelados e analisados e finalmente fez-se um estudo parametrizado.

Na FIG.3.17 apresenta-se um resumo dos resultados numéricos e experimentais para dois apoios rotulados e $e=20\text{mm}$.

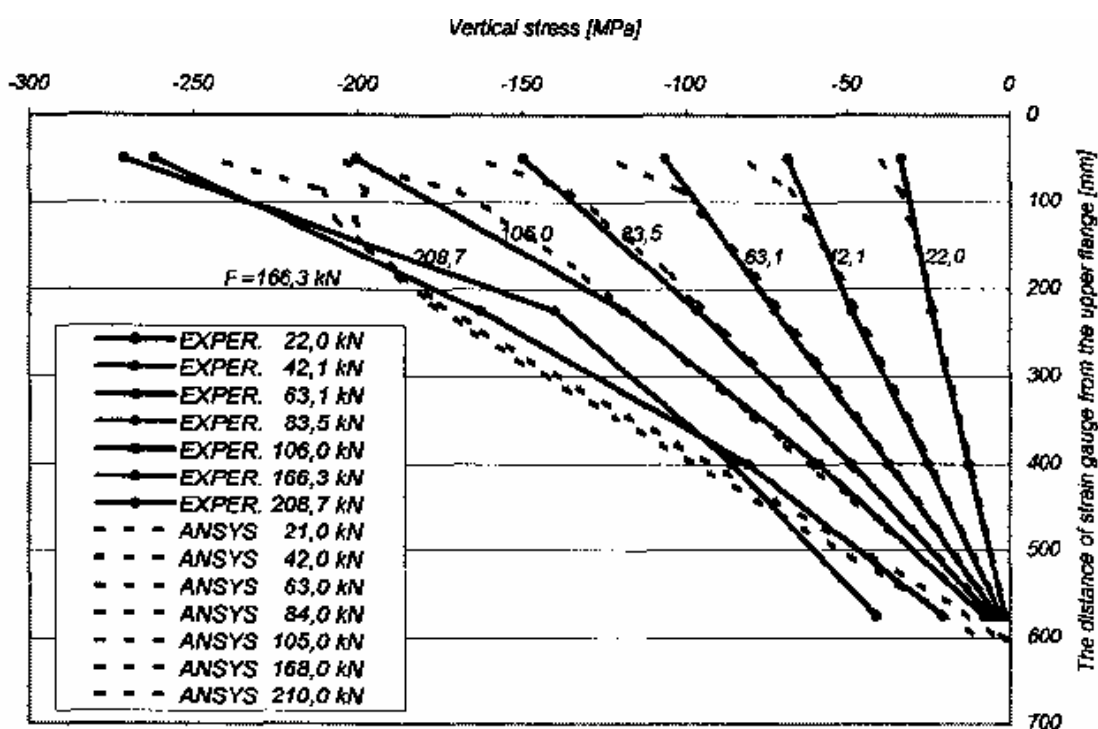


FIGURA 3.17 – Tensões normais experimentais e numéricas no meio do vão em diferentes alturas da alma ($t_w=2\text{mm}$, $e=20\text{mm}$, apoios rotulados) [NOVAK e MACHACEK (2000)]

As conclusões dos autores foram que a resistência local de uma viga com alma senoidal é muito superior à de uma viga de alma plana com a mesma espessura.

NOVAK e MACHACEK (2000) fazem uma comparação dos perfis de almas senoidais *WT*, desenvolvidos pela ZEMAN + Co GmbH, com um perfil de alma plana com capacidade a flexão similar e citam vantagens dos perfis *WT*. Eles têm menor peso (economia de aproximadamente 30%), maior resistência à flambagem por cisalhamento, maior estabilidade lateral torsional e maior resistência quando sujeitos a forças localizadas

Concluíram também que as vigas com almas senoidais são pouco sensíveis a excentricidades, já que para $e \leq 20$ mm a resistência local manteve-se praticamente a mesma. Não foi registrada nenhuma influência nas resistências devido às diferentes posições na direção longitudinal da viga.

Para o cálculo da resistência nominal da viga, com excentricidades inferiores ou iguais a 20 mm e corrugações conforme perfis utilizados *WT*, apresentaram uma primeira proposta, em NOVAK e MACHACEK (1999).

A fórmula proposta era válida somente para vigas com perfis *WTA* ($t_w = 2,0$ mm) e com dois apoios rotulados. “Baseado na avaliação estatística dos resultados experimentais (de acordo com ENV 1993-1-1 (1992)...” [PIMENTA (2007)], e segundo autores, usando a fórmula de BERGFELT (1983), a equação foi descrita conforme abaixo (Eq.3.5):

$$F_{Rk} = 1,33 t_w^2 (E f_{yw})^{0,5} (t_f / t_w)^{0,5} \quad (3.5)$$

onde:

t_w = espessura da alma senoidal

t_f = soma da espessura da mesa com a espessura (altura) do trilho, caso exista.

Em NOVAK e MACHACEK (2000) alterou-se essa equação, abrangendo outras espessuras de alma, conforme Eq.3.6.

$$F_{Rk} = (78,9t_w + 3,2t_f - 14,7) \sqrt[3]{\frac{I_f + I_R}{I_f + I_R^*}} \leq 270 \sqrt[3]{\frac{I_f + I_R}{I_f + I_R^*}}, [kN] \quad (3.6)$$

onde:

t_w = espessura da alma em mm;

t_f = espessura das mesas em mm;

I_f e I_R são os momentos de inércia da mesa e do trilho, respectivamente, em relação ao seu eixo horizontal (mm^4);

I_R^* é o momento de inércia da barra de 50x30mm, usada nos ensaios; $I_R^*=112500 \text{ mm}^4$.

Os autores registram que a Eq.3.6 deve ser usada pra vigas com apoios a uma distância razoável da seção carregada. Também pode ser usada para forças aplicadas diretamente na mesa com comprimento da força igual ou superior a 150 mm (com $I_R=I_R^*=0$). A fórmula está limitada a 270 kN, para excentricidades iguais a 20 mm e 270 kN + 10% para excentricidades nulas. Isso dá a entender que a fórmula não é válida para $I_R > I_R^*$, ou seja, para trilhos com seção maior que a ensaiada, apesar dos autores não deixarem claro essa conclusão.

O coeficiente de segurança recomendado é de 1,15, obtendo:

$$F_{Rd} = \frac{F_{Rk}}{1,15}$$

Os autores NOVAK E MACHACEK (2000) sugerem, para o cálculo da interação do momento fletor com a força vertical na mesa carregada, a seguinte equação, (Eq.3.7):

$$\left(\frac{F_{Sd}}{F_{Rd}} \right) + \left(\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \right) \leq 1.5 \quad (3.7)$$

Esses autores não fazem sugestões para interação com a força cortante.

Já MACHACEK e TUMA (2006) recomendam, para as interações, as fórmulas de ELGAALY e SESHADRI (1997), citadas no item 3.3.1 (Eq.3.3 e Eq.3.4).

$$\left(\frac{F_{Sd}}{F_{Rd}}\right)^{1,25} + \left(\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}}\right)^{1,25} = 1 \quad \text{e} \quad \left(\frac{F_{Sd}}{F_{Rd}}\right)^{1,25} + \left(\frac{V_{Sd}}{V_{Rd}}\right)^{1,25} = 1$$

MACHACEK e TUMA (2006) citam, além da excentricidade, outro problema previsto para vigas de almas senoidais que trabalham como vigas de rolamento: a resistência à fadiga das vigas.

Esses autores citam investigações feitas por SAAL e HORNING (1995), porém as características dos modelos e carregamentos não conduziram ao colapso por fadiga nas vigas, mesmo tendo sido atingidos mais de cinco milhões de ciclos.

MACHACEK e TUMA (2006) também apresentam os testes feitos em perfis *WTA*, em um laboratório em Praga, CTU (Czech Technical University), por NOVAK e MACHACEK (1999).

Foram executados três tipos de testes: um teste com um carregamento cíclico para verificação dos efeitos do cisalhamento, FIG.3.18, outro teste com um carregamento cíclico para verificação dos efeitos da força localizada, FIG.3.19 e um terceiro teste com um carregamento móvel, FIG.3.20.

Os perfis foram fabricados com soldas automáticas, porém somente com uma inspeção visual, sem evidências de defeitos.

No primeiro teste (FIG.3.18), como o objetivo era apenas a verificação ao cisalhamento com forças cíclicas, foi colocado um enrijeecedor na posição da força aplicada. As soldas dos enrijeecedores na viga foram executadas de modo intermitente, representando a pior situação da prática. As fissuras relativas à fadiga tiveram início tanto nas soldas alma-

mesa, quanto nas soldas alma-enrijecedores, propagando-se rapidamente até o colapso. Destacaram que, na prática, devem ser evitadas soldas manuais ou de má qualidade.

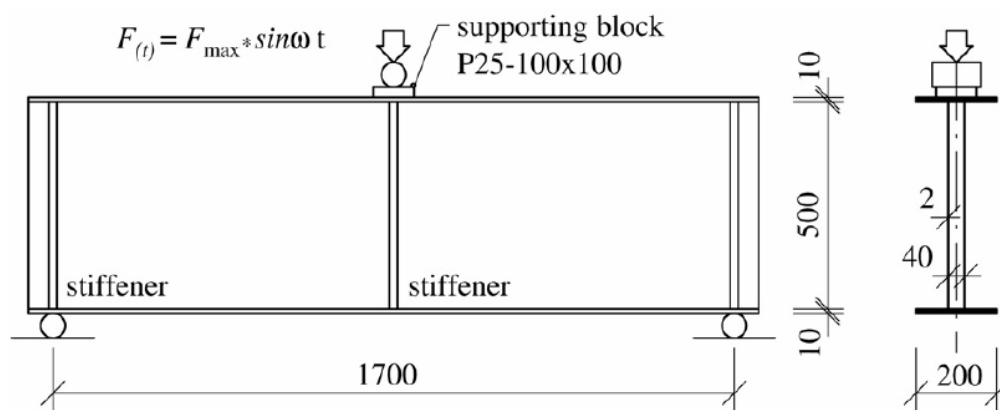


FIGURA 3.18 – Teste com carregamento cíclico para cisalhamento
[MACHACEK e TUMA (2006)]

Para o segundo teste (FIG.3.19), buscavam, além dos efeitos do cisalhamento, os efeitos da força localizada na alma e, portanto, sem os enrijecedores na direção da força. As fissuras decorrentes da fadiga tiveram início nas soldas do perfil e nas proximidades destas, porém não foram tão críticas. Todas se propagaram na direção horizontal e interromperam a propagação ao atingir 50% a mais do seu comprimento original.

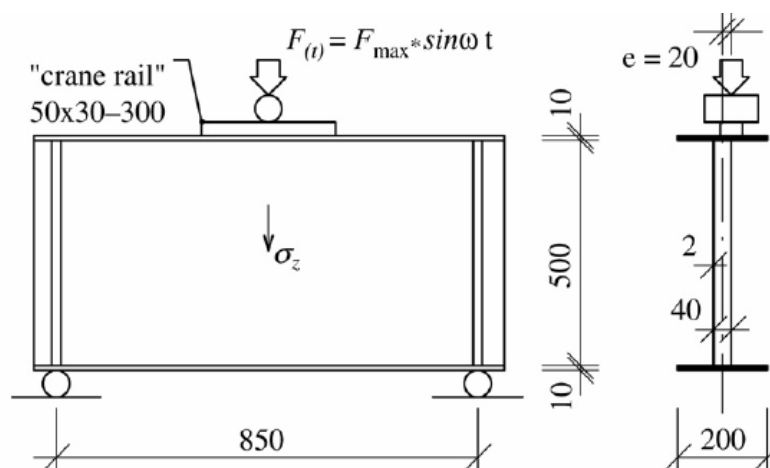


FIGURA 3.19 – Teste com carregamento cíclico para força localizada
[MACHACEK e TUMA (2006)]

Os testes foram finalizados com a fratura ou após atingir 3 milhões de ciclos sem colapso por fadiga.

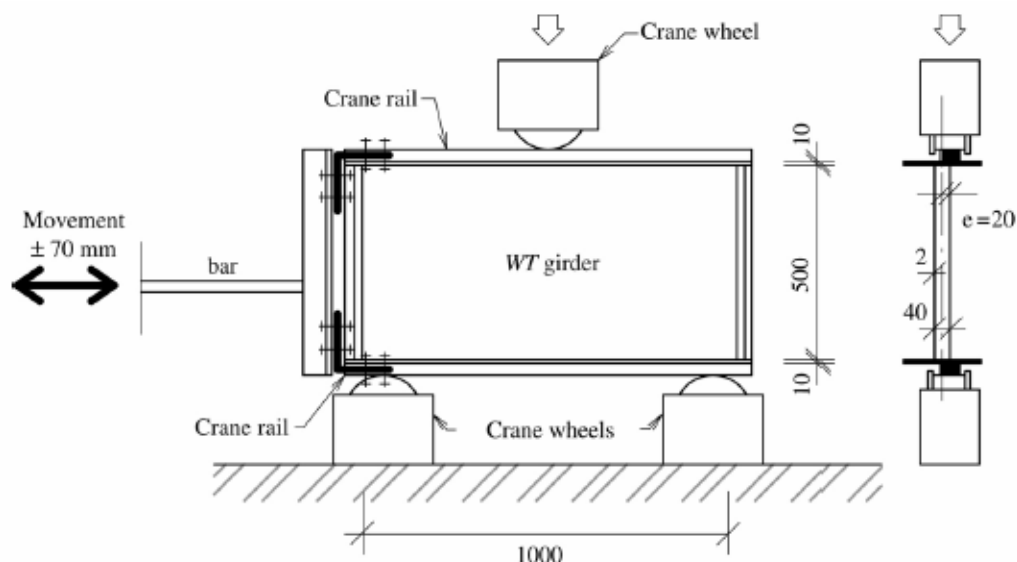


FIGURA 3.20 – Teste com carregamento móvel
[MACHACEK e TUMA (2006)]

Para o teste de carregamento móvel, (FIG.3.20), concluiu-se que o colapso por fadiga ocorre com números mais baixos de ciclos em comparação com os outros testes, porém nada que afete de forma contundente as conclusões dos testes com carregamentos cíclicos.

As conclusões de MACHACEK e TUMA (2006) são válidas apenas para os perfis *WTA*, com altura de 500 mm e espessura de alma de 2,0 mm e mesas de 10 x 200 mm. No entanto recomendam uma cuidadosa avaliação quando se utilizarem outras espessuras de almas e esbeltez.

Concluíram que a solda de composição do perfil, alma-mesas, apenas em um dos lados da alma é suficiente e adequada mesmo em casos de carregamentos cíclicos. Certamente dizem respeito a soldas automáticas e de boa qualidade.

Também com base em análises numéricas, os autores definem novas curvas de resistência à fadiga. As vigas sob cisalhamento devem ser projetadas com a curva de

fadiga 40 (com inclinação $m=9,45$). Para as vigas com forças localizadas recomenda-se a curva 308 (com inclinação $m=7,40$).

Outros ensaios com perfis de alma senoidal sujeitos a forças localizadas foram realizados em Viena por SCHWARZ (1990)¹ e RAMBERGER (1990)² apud PIMENTA (2007). Foram seis ensaios, sendo três deles com a força aplicada no meio do vão, onde foi colocado um enrijecedor, e outros três com duas forças aplicadas a um quarto e a três quartos do vão, porém sem enrijecedores sob as forças. As posições dessas forças foram variadas com relação a pontos das ondas, ou seja, sobre um pico, no ponto de inflexão da onda e em pontos intermediários. No entanto, não houve diferença nos resultados das resistências encontradas. A flambagem localizada da alma formou-se na região do carregamento, conforme mostrado na FIG.3.21. Com relação a esses ensaios não foram desenvolvidas formulações e foram recomendadas a Eq.3.8 e a Eq.3.9 que, segundo PIMENTA (2007) ficam do lado da segurança para as situações ensaiadas. Os autores apenas consideram o fenômeno como escoamento (força de tração) ou esmagamento (força de compressão).

$$P_u = f_{yw} t_w (N + 5,0 t_f) \quad (3.8)$$

se a distância da força à extremidade da viga for superior à altura da viga

$$P_u = f_{yw} t_w (N + 2,5 t_f) \quad (3.9)$$

se a distância da força à extremidade da viga for inferior à altura da viga

Onde:

- N = comprimento de contato da força
- f_{yw} = resistência ao escoamento do aço da alma
- t_w = espessura da alma
- t_f = espessura da mesa

¹ Ramberger, G. “Über Die Berechnung von Geschweissten I-Trägern mit Stegen aus Gewellten Blechen” – Technische Universität Wien, Institut für Stahlbau, 1990, Alemanha.

² Schwarz, L. “Prüfbericht Über Versuch an I-Trägern mit Gewelltem Stegblech” – Technische Universität Wien, Institut für Stahlbau, Alemanha, 1990.



FIGURA 3.21 – Mecanismo de colapso do ensaio em Viena (sem enrijecedores)
[PIMENTA (2007)]

PASTERNAK e BRANKA (1999) ensaiaram um modelo de perfil senoidal com as características mostradas na FIG.3.22. Posteriormente foram realizadas análises numéricas pelo método dos elementos finitos.

Na análise experimental registrou-se um comportamento linear até que a força atingisse um valor em torno de 200 kN e posteriormente ficou evidenciado o comportamento não-linear devido à flambagem ocorrida abaixo da força aplicada, conforme mostrado na FIG. 3.23.

Com o aumento da força, a flambagem se estendeu simetricamente para outras corrugações até se atingir a força última de 210 kN e, a partir de então, ocorreu uma queda no valor da força. Segundo os autores, a falha ocorreu em função da plastificação de uma área sob a força aplicada, seguida por uma flambagem local da alma.

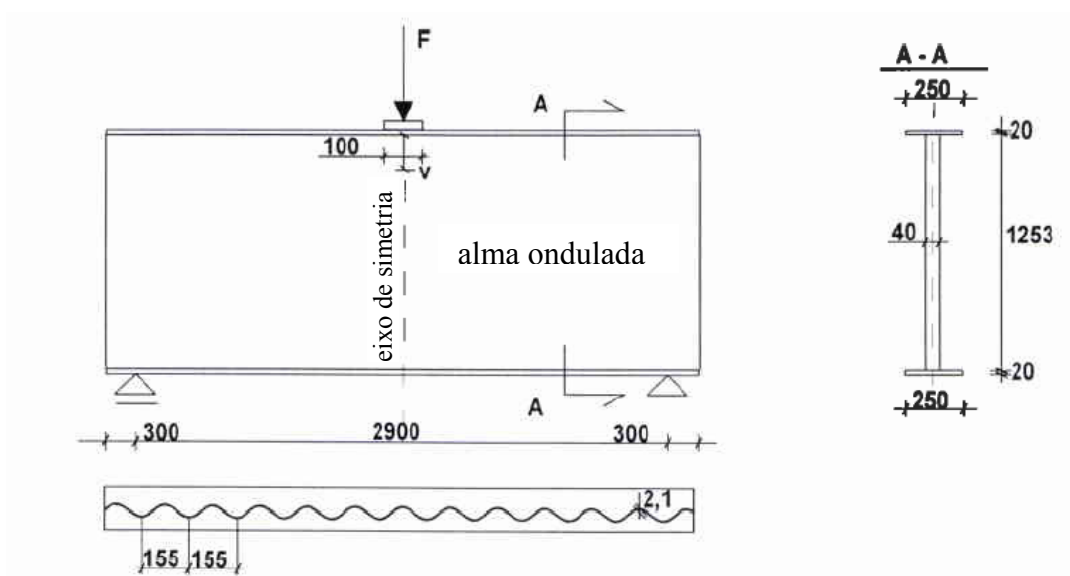


FIGURA 3.22 – Modelo de viga de alma senoidal [PASTERNAK e BRANKA (1999)]

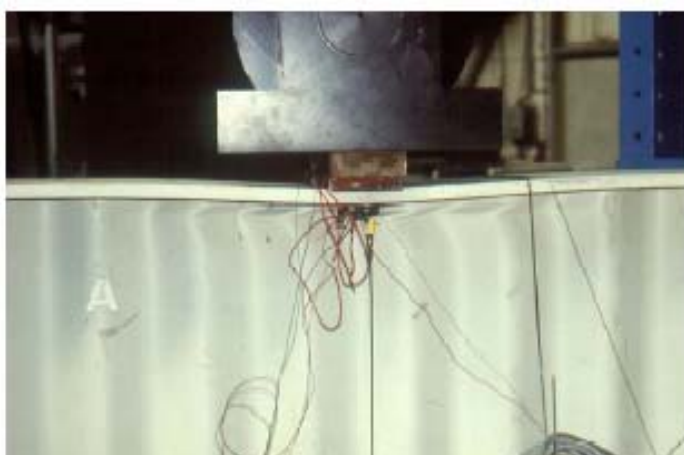


FIGURA 3.23 – Ensaio [PASTERNAK e BRANKA (1999)]

A análise numérica desse ensaio foi realizada com o programa ABAQUS. A alma foi discretizada conforme FIG.3.24, com elementos menores em sua região superior onde ocorre maior influência da força. Para a análise não-linear, foi fornecida ao programa uma imperfeição inicial de 2,0 mm.

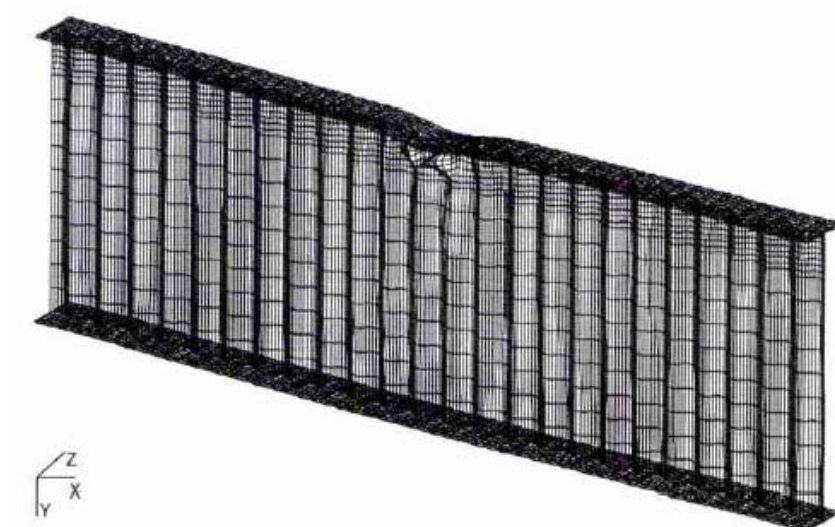


FIGURA 3.24 – Malha da Alma [PASTERNAK e BRANKA (1999)]

Para o primeiro modo de flambagem local, a força máxima encontrada foi de 214 kN.

A comparação entre as análises numérica e experimental é mostrada na FIG.3.25 e a proximidade das curvas demonstra a capacidade de reproduzir no programa os resultados do ensaio. Fazendo uma comparação entre a FIG.3.23 (análise experimental) e FIG.3.26 (análise numérica), percebe-se o mesmo modo de colapso.

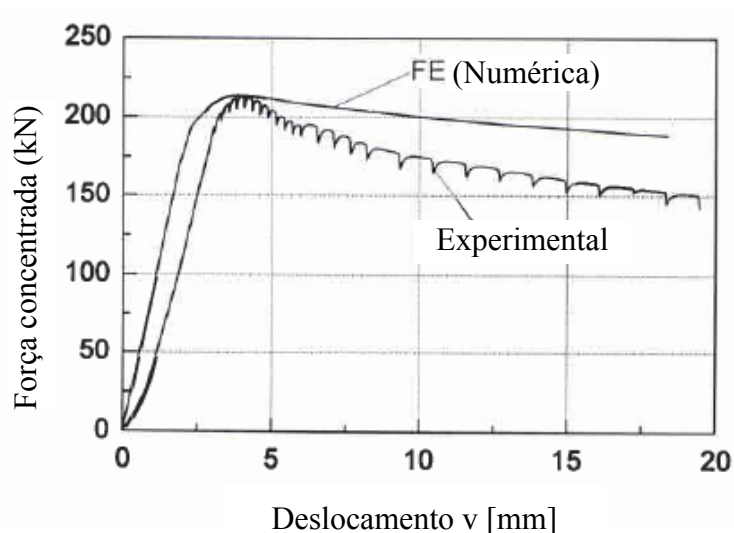


FIGURA 3.25 – Comparação entre análises numérica e experimental
[PASTERNAK e BRANKA (1999)]

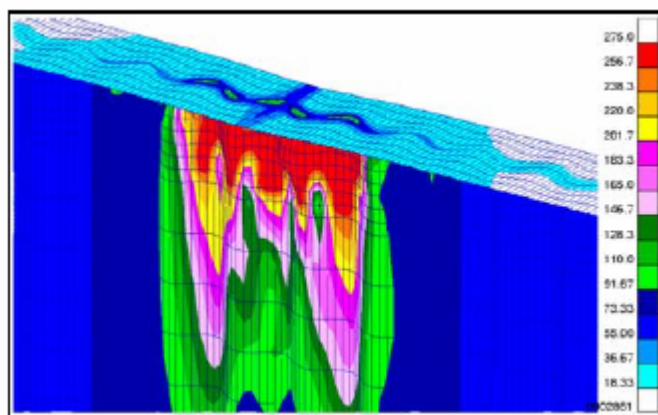


FIGURA 3.26 – Campo de plastificação sob a força aplicada
[PASTERNAK e BRANKA (1999)]

Em seguida foi realizada uma análise paramétrica onde se variaram diversos parâmetros, inclusive o tipo de corrugação, amplitude e comprimento da senóide, ver FIG.3.27.

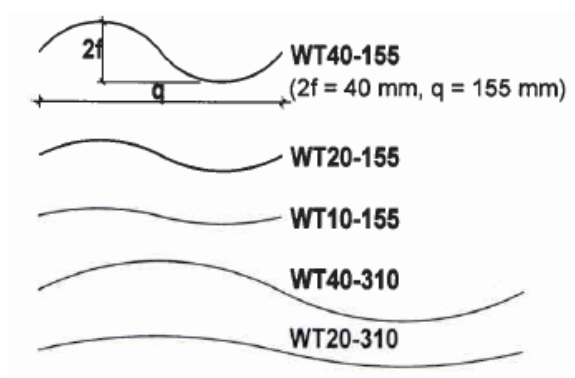


FIGURA 3.27 – Diversos tipos de corrugações para a análise paramétrica
[PASTERNAK e BRANKA (1999)]

Primeiramente, os perfis *WT* 40-155 foram examinados com relação as diferentes posições das forças na senóide com diferentes larguras de aplicação. Os resultados apresentaram pequenas diferenças. Assim, as análises foram feitas com forças aplicadas sem excentricidade, na posição longitudinal dos vales ou picos.

Alguns resultados estão mostrados na FIG.3.28, onde concluiu-se que quanto maior o comprimento e menor a amplitude da senóide, menor o valor da força última atingida.

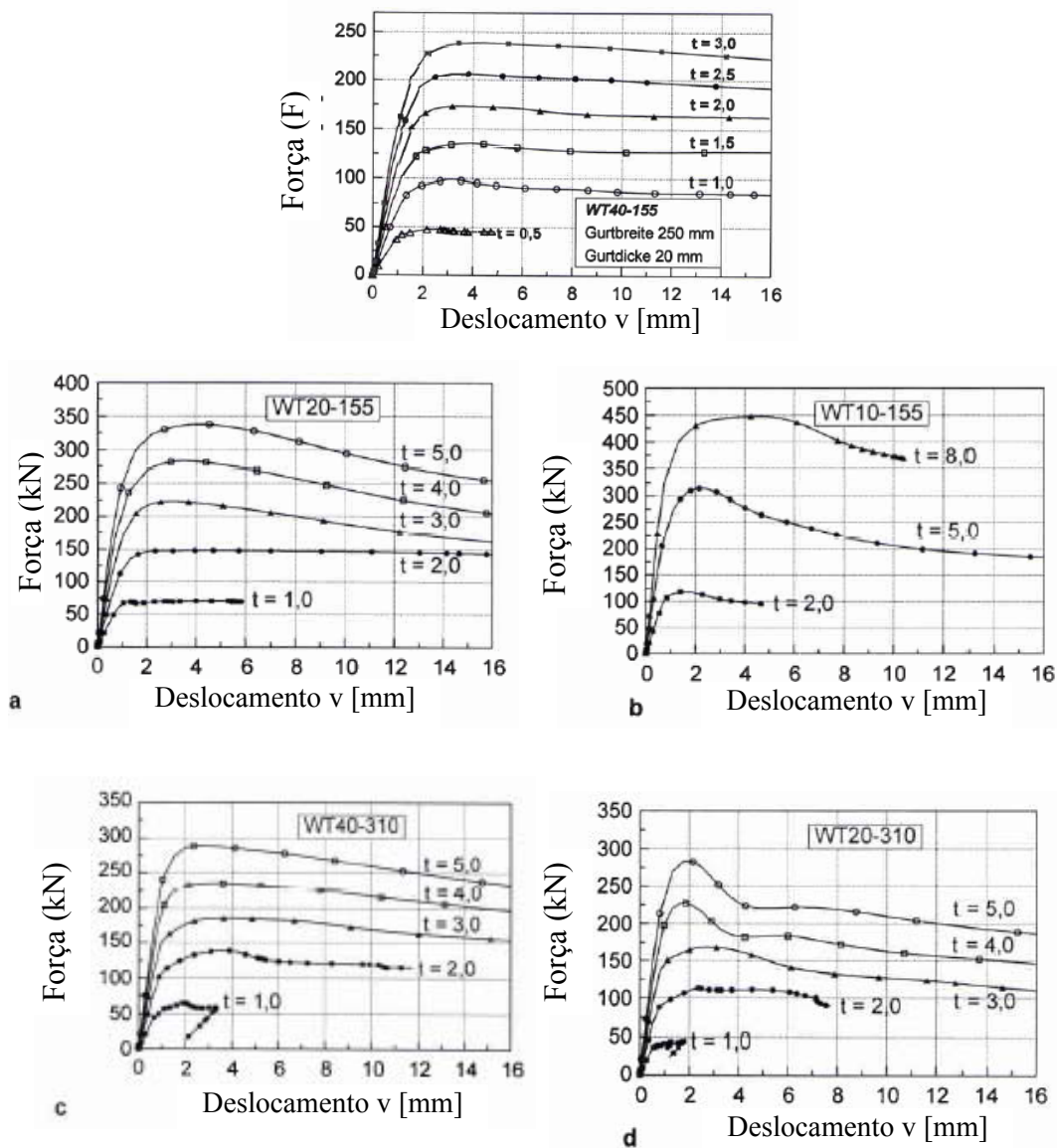


FIGURA 3.28 – Curvas Força x Deslocamento

[PASTERNAK e BRANKA (1999)]

Nota-se na FIG.3.28, nas curvas do perfil *WT20-310* com espessuras de 4,0 e 5,0 mm, um declínio da força após atingir o valor máximo. Isto se deve a um diferente modo de falha ocorrido, a flambagem global da alma, conforme visto na FIG.3.29.



FIGURA 3.29 – Modo de falha por flambagem global da alma
[PASTERNAK e BRANKA (1999)]

Desta forma, Pasternak e Branka propuseram a seguinte equação para o cálculo da resistência sob força localizada, Eq.3.10:

$$F_{ult} = 10 \left(\frac{W_{el}}{I_{wy}/t_w} \right)^{0,4} b_w t_w f_{yw} \quad (3.10)$$

onde:

W_{el} é o módulo de resistência da mesa carregada com relação ao seu eixo de menor inércia;

I_{wy} é o momento de inércia da alma senoidal em relação ao eixo longitudinal do perfil, referente ao comprimento da onda (w), dado por:

$$I_{wy} = 0,158 t_w w^3 \left(\frac{b_w}{w} \right)^{2,12}$$

b_w é o dobro da amplitude da onda

t_w é a espessura da alma

f_{yw} é a resistência ao escoamento da alma

BRANKA (1999) estudou também a interação entre o momento fletor e a força localizada e concluiu que há uma queda da resistência última das vigas em função dessa interação. Sendo assim, foi proposta a seguinte equação de interação, Eq.3.11:

$$0,4 \frac{M}{M_{Rd}} + 0,8 \frac{F}{F_{Rd}} \leq 1,0 \quad (3.11)$$

Porém, essa equação deve ser utilizada somente quando as equações abaixo forem verificadas simultaneamente:

$$0,5 \leq \frac{M}{M_{Rd}} \leq 1,0 \quad \text{e} \quad 0,75 \leq \frac{F}{F_{Rd}} \leq 1,0$$

onde:

M = Momento fletor

F = Força localizada

M_{Rd} = Momento fletor resistente de cálculo

F_{Rd} = Força localizada resistente de cálculo

4

ANÁLISE NUMÉRICA

4.1 PARAMETRIZAÇÃO

Segundo o objetivo, no item 2.1, esta dissertação visa encontrar respostas para o comportamento das vigas com almas senoidais utilizadas como vigas de rolamento, por meio de uma análise numérica parametrizada. Para isso estabelece-se um método, um programa, um modelo e os parâmetros, para então, por meio dos resultados das análises, serem extraídas as devidas conclusões e respostas.

Neste trabalho, a análise numérica é feita pelo Método dos Elementos Finitos no programa ANSYS, versão 10.0, com os modelos parametrizados conforme perfis produzidos no Brasil.

Os parâmetros estabelecidos para este estudo são: (ver FIG.4.1)

- altura do perfil, H
- largura da mesa do perfil, b_f
- espessura da mesa do perfil, t_f
- espessura da alma senoidal, t_w

- tipo de trilho
- excentricidade da força, e



FIGURA 4.1 – Perfis de alma senoidal com trilhos

A nomenclatura dos perfis de alma senoidal usual em projetos estruturais tem a seguinte forma: PSS $H \times b_f \times t_f \times t_w$

Os valores utilizados para os diversos parâmetros citados são apresentados nas TAB. 4.1 e 4.2, para excentricidade nula e de 10,75 mm, respectivamente.

De acordo com a TAB.4.1, o número de vigas analisadas com excentricidade nula no carregamento totaliza $1 \times 2 \times 3 \times 32 = 192$ vigas.

Já para a análise feita com a excentricidade de 10,75 mm no carregamento, TAB.4.2, o total é de $1 \times 2 \times 3 \times 6 = 36$ vigas

Deste modo, abrange-se neste estudo a análise dos resultados de um total de 228 vigas.

TABELA 4.1 – Valores dos parâmetros para vigas com excentricidade nula

| PARAMETRIZAÇÃO | | | | | |
|-----------------------|-----------------|----------------------------|-------|-------------------|------|
| Excentricidade | t_w | Tipo | t_f | b_f | H |
| "e" | | Trilho | | | |
| (mm) | (mm) | | (mm) | (mm) | (mm) |
| 0 | 2,0 e 3,0 | barra 50 TR-25 TR-37 | 12,50 | 150 200 | 600 |
| | | | | | 800 |
| | | | | | 1000 |
| | | | | | 1200 |
| | | | 16,00 | 150 200 250 | 600 |
| | | | | | 800 |
| | | | | | 1000 |
| | | | | | 1200 |
| | | | 19,00 | 200 250 300 | 600 |
| | | | | | 800 |
| | | | | | 1000 |
| | | | | | 1200 |

TABELA 4.2 – Valores dos parâmetros para vigas com excentricidade de 10,75 mm

| PARAMETRIZAÇÃO | | | | | |
|-----------------------|-----------------|----------------------------|-------|-------|------|
| Excentricidade | t_w | Tipo | t_f | b_f | H |
| "e" | | Trilho | | | |
| (mm) | (mm) | | (mm) | (mm) | (mm) |
| 10,75 | 2,0 e 3,0 | barra 50 TR-25 TR-37 | 12,50 | 200 | 600 |
| | | | | | 1000 |
| | | | 16,00 | 200 | 600 |
| | | | | | 1000 |
| | | | 19,00 | 250 | 600 |
| | | | | | 1000 |

4.2 PROGRAMA ANSYS

Para facilitar a definição das diversas geometrias das vigas, os modelos discretizados no programa Ansys são gerados por meio de um arquivo texto, pré-processado pelo próprio programa onde, de forma auto-explicativa, pede-se a entrada dos dados.

Esses dados de entrada são os parâmetros mencionados no item anterior, como as dimensões da viga e o tipo de trilho.

Gerado para atender as geometrias das vigas do estudo em questão, o pré-processador possui as seguintes limitações:

$$400 \text{ mm} < H < 1200 \text{ mm}$$

$$125 \text{ mm} < b_f < 350 \text{ mm}$$

$1240 \text{ mm} < L < 2170 \text{ mm}$, sendo L o comprimento da viga e múltiplo de 155 mm (comprimento de uma senóide)

Para todos os modelos utiliza-se o elemento SHELL 181, que possui 4 nós e 6 graus de liberdade por nó (as translações x , y e z e as rotações xy , yz , xz), tanto para a viga (mesas e alma senoidal), quanto para o trilho. A FIG.4.2 mostra a alma, as mesas e o trilho de uma viga modelada no Ansys.

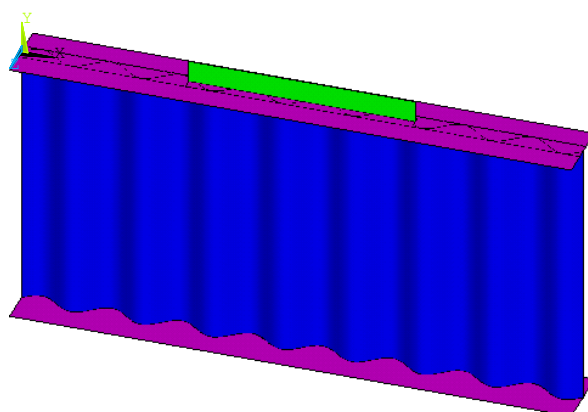


FIGURA 4.2 – Viga discretizada no Ansys

No processo de definição de um modelo bem próximo da realidade, entende-se que a discretização do trilho junto à viga é fundamental para resultados mais confiáveis, já que a abrangência da força na mesa da viga, sendo ela aplicada no topo do trilho, é uma incógnita em questão neste estudo. Portanto, os modelos são necessariamente discretizados com o trilho sobre a viga de alma senoidal. Os trilhos pesquisados neste trabalho também estão definidos de acordo com uma maior utilização nos projetos de vigas de rolamentos para pontes de capacidades baixas e médias. São eles: a barra quadrada de 50 mm e os trilhos TR-25 e TR-37.

Outro fator fundamental na discretização dos modelos é a definição de uma malha apropriada. Alguns testes foram realizados com diferentes malhas e os resultados obtidos apresentaram, como era de se esperar, menores resistências nos resultados do modelo com a malha mais refinada, ou seja, elementos finitos com dimensões menores. Entretanto, o número de nós e elementos aumenta consideravelmente, assim como o tempo de processamento das vigas.

Primeiramente estes testes foram feitos em vigas de almas planas com diferentes malhas e mostraram diferenças consideráveis nos resultados em função do refinamento da malha.

Os exemplos, discretizados no ANSYS, foram com um perfil “I” soldado de aço, de alma plana, PS 300x200x8,0x3,0 com vão de 2,0 m. As respostas desse modelo, por ser de alma plana, já têm previsões na bibliografia, inclusive nas normas ABNT - NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-05 (2005). Nos modelos utilizaram-se, tanto para as mesas quanto para a alma, o elemento SHELL 181, de 4 nós e 6 graus de liberdade. O carregamento aplicado está mostrado na FIG.4.3.

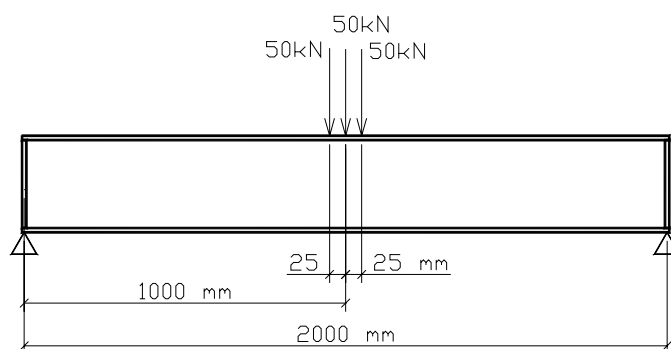


FIGURA 4.3 – Carregamento aplicado nos modelos de viga de alma plana

São considerados dois modelos numéricos com malhas diferentes, principalmente na entrada da força localizada, conforme FIG.4.4.

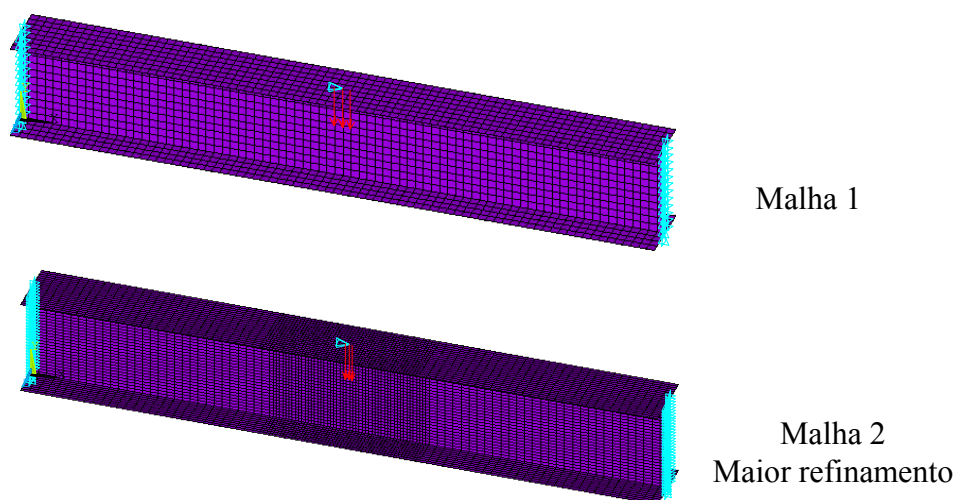


FIGURA 4.4 – Modelos de vigas de almas planas com diferentes refinamentos

Para a análise estática considera-se o material como linear elástico isotrópico com módulo de elasticidade, E , de 200000 MPa e coeficiente de Poisson igual a 0,3. Nessa análise, com o comando apropriado (“prestress effects”), a matriz de rigidez geométrica é gerada.

Na análise de flambagem linear determinam-se os autovetores e autovalores. Analisando-se o primeiro modo de flambagem, a Força de Flambagem encontrada é de: (ver FIG.4.5)

Para malha 1 \rightarrow 0,60949 vezes a força aplicada = $0,60949 \times 150 \text{ kN} = 91 \text{ kN}$

Para malha 2 \rightarrow 0,58155 vezes a força aplicada = $0,58155 \times 150 \text{ kN} = 87 \text{ kN}$

```

MALHA 1
***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****
SET   TIME/FREQ   LOAD STEP   SUBSTEP   CUMULATIVE
  1   0.60949     1           1         1

MALHA 2
***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****
SET   TIME/FREQ   LOAD STEP   SUBSTEP   CUMULATIVE
  1   0.58155     1           1         1

```

FIGURA 4.5 - Coeficiente para Força de Flambagem, retirado do ANSYS

Para as análises não-lineares geométrica e física, a imperfeição inicial é representada por um deslocamento horizontal determinado como $H/200$, ou seja, $30/200 = 0,15\text{cm}$. É utilizado um material com diagrama tensão-deformação bi-linear, critério de escoamento de von Mises e regra de encruamento cinemático. A resistência ao escoamento do aço é 250 MPa e módulo tangente $E_t = E/10000$.

Desta forma, a Força Última encontrada pelo ANSYS, ou seja, a força que limita a capacidade da viga de resistir a um novo incremento de carregamento é de: (ver FIG.4.6).

Para malha 1 → 0,59 vezes a força aplicada = $0,59 \times 150 \text{ kN} = 88 \text{ kN}$

Para malha 2 → 0,50 vezes a força aplicada = $0,50 \times 150 \text{ kN} = 75 \text{ kN}$

MALHA 1

```
***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****
```

| SET | TIME/FREQ | LOAD STEP | SUBSTEP | CUMULATIVE |
|-----|----------------|-----------|---------|------------|
| 1 | 0.50000E-01 | 1 | 1 | 2 |
| 2 | 0.10000 | 1 | 2 | 4 |
| 3 | 0.15000 | 1 | 3 | 6 |
| 4 | 0.20000 | 1 | 4 | 8 |
| 5 | 0.25000 | 1 | 5 | 10 |
| 6 | 0.30000 | 1 | 6 | 12 |
| 7 | 0.35000 | 1 | 7 | 14 |
| 8 | 0.40000 | 1 | 8 | 16 |
| 9 | 0.45000 | 1 | 9 | 18 |
| 10 | 0.50000 | 1 | 10 | 21 |
| 11 | 0.55000 | 1 | 11 | 24 |
| 12 | 0.57000 | 1 | 12 | 32 |
| 13 | 0.59000 | 1 | 13 | 35 |
| 14 | 1.0000 | 1 | 999999 | 45 |

MALHA 2

```
***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****
```

| SET | TIME/FREQ | LOAD STEP | SUBSTEP | CUMULATIVE |
|-----|----------------|-----------|---------|------------|
| 1 | 0.50000E-01 | 1 | 1 | 2 |
| 2 | 0.10000 | 1 | 2 | 4 |
| 3 | 0.15000 | 1 | 3 | 6 |
| 4 | 0.20000 | 1 | 4 | 8 |
| 5 | 0.25000 | 1 | 5 | 11 |
| 6 | 0.30000 | 1 | 6 | 15 |
| 7 | 0.35000 | 1 | 7 | 18 |
| 8 | 0.40000 | 1 | 8 | 22 |
| 9 | 0.45000 | 1 | 9 | 26 |
| 10 | 0.50000 | 1 | 10 | 30 |
| 11 | 1.0000 | 1 | 999999 | 42 |

FIGURA 4.6 – Coeficiente para a Força Última, retirado do Ansys

Além da diferença de 17% encontrada na análise numérica entre os resultados das malhas 1 e 2, o valor da força última, determinado com base no item 5.7.4 (Enrugamento da alma) da ABNT NBR 8800:2008, sem o coeficiente de segurança, praticamente se iguala ao resultado encontrado com a malha 2, com maior refinamento:

$$F_R = 0,66.t_w^2 \left[1 + 3 \left(\frac{l_n}{d} \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{E.f_y.t_f}{t_w}}$$

$$F_R = 0,66.0,3^2 \left[1 + 3 \left(\frac{5}{30} \right) \left(\frac{0,3}{0,8} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{20000.25.0,8}{0,3}}$$

$$F_R = 76,5kN$$

Salienta-se que a força última correspondente ao item mencionado da ABNT-NBR 8800:2008 corresponde à menor resistência à força localizada.

Isto mostra a importância do refinamento da malha a ser utilizada na análise. Porém, existe um grau de refinamento na malha do perfil acima do qual o resultado praticamente não se altera, dispensando a necessidade de um maior refinamento, que comprometeria o trabalho de pesquisa com o desnecessário acréscimo de tempo no processamento das vigas.

Visando encontrar essa malha, também no programa Ansys, testes são realizados com perfis de almas senoidais definindo a malha utilizada neste estudo. As considerações feitas nestes testes, como tipo do aço, posicionamento da força localizada, refinamento da malha 1 (malha adotada) e outras, estão descritas nos itens seguintes. A malha 2, usada para comparação com a malha 1, por não ter sido adotada neste estudo, não será descrita em detalhes, porém possui elementos com dimensões duas vezes menores que a malha 1, ou seja, uma malha mais refinada, porém desnecessária, como será mostrado em seguida.

São analisados dois testes, ou seja, dois diferentes perfis com diferentes trilhos, utilizando-se duas malhas diferentes para cada teste. Os resultados são mostrados a seguir.

Teste 1:

Perfil PSS 400 x 125 x 12,5 x 2,0 com $L=1240$ mm e trilho barra 50 mm

Valor da Força Última:

→ Malha 1 (malha adotada) = 241 kN

→ Malha 2 (mais refinada) = 232 kN

Teste 2:

Perfil PSS 600 x 150 x 12,5 x 2,0 com $L=1240$ mm e trilho TR-25

Valor da Força Última:

→ Malha 1 (malha adotada) = 422 kN

→ Malha 2 (mais refinada) = 423 kN

No teste 1, a diferença de 4% entre as duas malhas é aceitável diante da necessidade de viabilizar o tempo de processamento das 228 vigas analisadas, possível com a aceitação da malha 1, menos refinada.

4.3 DISCRETIZAÇÃO DA ALMA SENOIDAL

Na definição da malha, primeiramente foram gerados os nós que formam a senóide com suas dimensões atendendo à FIG.4.7 e conseqüentemente à Eq.4.1:

$$Z = -A \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi X}{w}\right) = Z = -20 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi X}{155}\right) \quad (4.1)$$

Sendo A a amplitude da onda da corrugação senoidal igual a 20 mm e w o comprimento desta onda, 155 mm, conforme FIG.4.7.

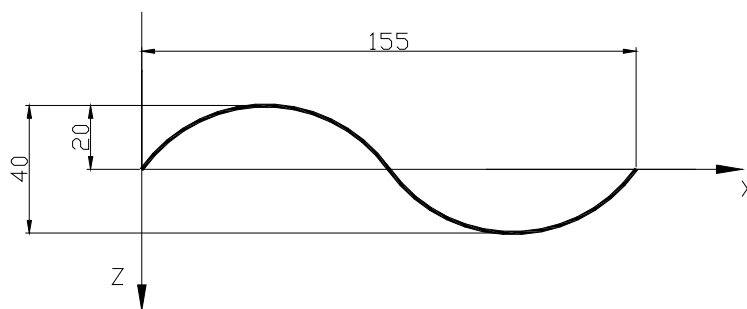


FIGURA 4.7 – Senóide com suas dimensões, em mm

Ressalta-se que para as almas senoidais fabricadas no Brasil, a amplitude de 20 mm é válida para a espessura de alma de 2,0 mm. Para as almas com espessura de 3,0 mm, a amplitude seria 21,5 mm. Entretanto, neste trabalho, todas as vigas, independente da espessura da alma, são modeladas com amplitude de 20 mm.

Os nós são definidos com os espaçamentos mostrados no eixo x das FIG.4.8 a 4.10, e servem de base para a geração do restante dos nós e elementos da alma, tanto no comprimento quanto na altura da viga.

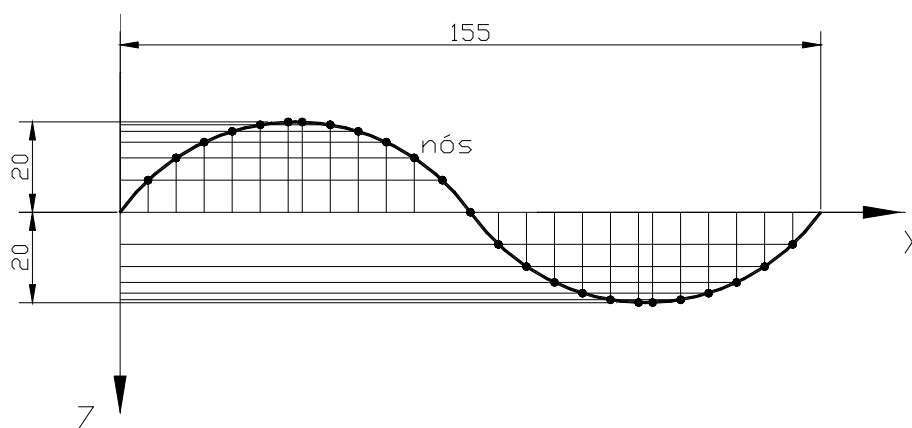


FIGURA 4.8 – Senóide com nós definidos

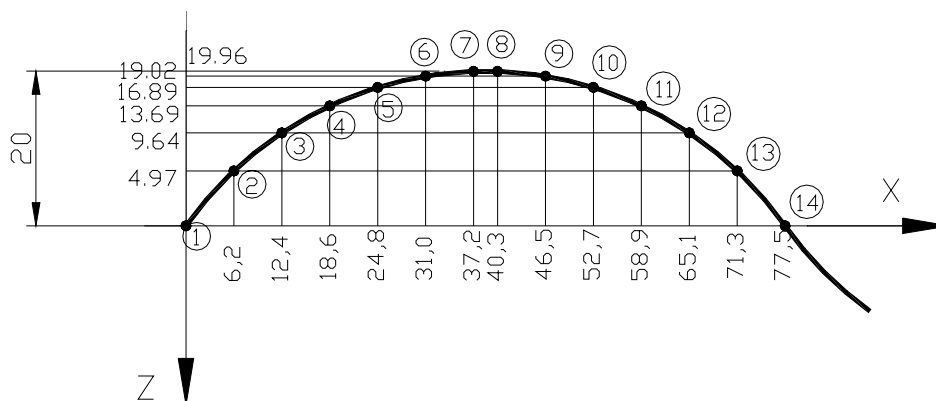


FIGURA 4.9 – Numeração dos nós de meia senoide com suas coordenadas, em mm.

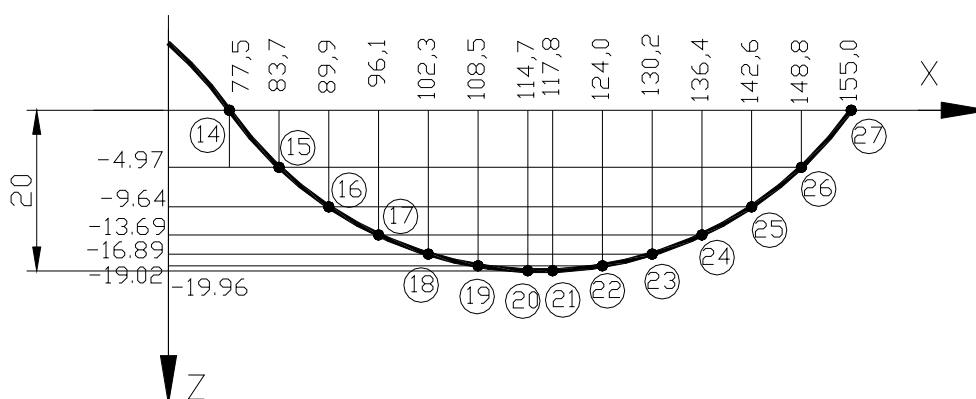


FIGURA 4.10 – Numeração dos nós de meia senoide com suas coordenadas, em mm

Na definição da malha da alma, estabelece-se que, independentemente da altura da viga, ou seja, para todas as vigas, até uma altura de 400 mm, os elementos tenham dimensão vertical de 8 mm, como mostrado na FIG.4.11. Para o restante da altura da viga, os elementos possuem 14 mm de dimensão vertical, também mostrado na FIG.4.11.

Essa diferença na malha da alma tem a intenção de modelar elementos menores na região superior da alma, por ser a mais afetada pela força localizada.

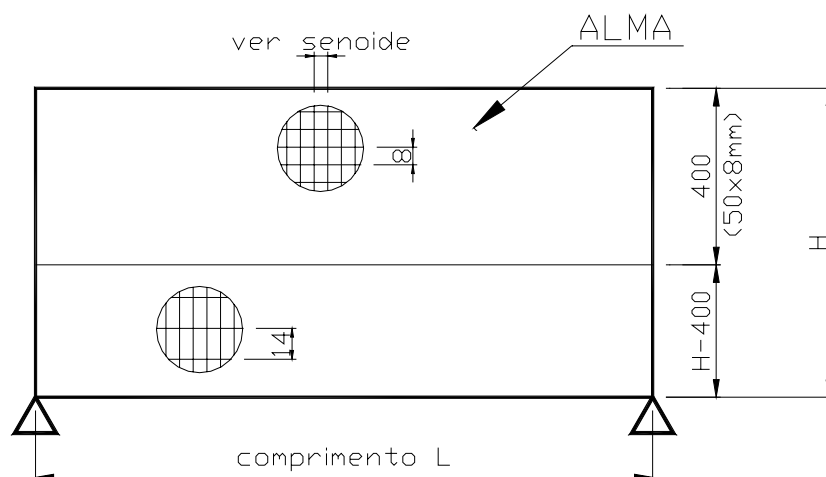


FIGURA 4.11 - Malha da Alma, dimensões em mm

Portanto, é necessário que a entrada de dados do Ansys, para os valores das alturas das vigas, tenha seu número alterado por um cálculo, já que a altura restante, $H-400$, deverá ser múltipla de 14 mm. Os valores ficam conforme a seguir:

Para $H=600\text{mm}$ → no Ansys $H=610\text{mm}$ ($400\text{mm}+15\times 14\text{mm}$)

Para $H=800\text{mm}$ → no Ansys $H=806\text{mm}$ ($400\text{mm}+29\times 14\text{mm}$)

Para $H=1000\text{mm}$ → no Ansys $H=1002\text{mm}$ ($400\text{mm}+43\times 14\text{mm}$)

Para $H=1200\text{mm}$ → no Ansys $H=1198\text{mm}$ ($400\text{mm}+57\times 14\text{mm}$)

A partir disto, com a entrada de dados do comprimento da viga, valor que deverá ser múltiplo do comprimento de uma senoide, 155 mm, possibilita-se gerar toda a alma.

No pré-processador o comprimento adotado para a parametrização das vigas limita-se entre 1240 mm e 2170 mm, ou seja, entre 8 e 14 senóides, respectivamente. Entretanto, tendo como interesse estudar o fenômeno provocado por uma força localizada e sua interação com a força cortante gerada, com um pequeno comprimento para a viga garante-se o não aparecimento de interação importante com o momento fletor, que deve ser objeto de outra pesquisa. Para os estudos, considera-se adequado o comprimento de aproximadamente duas vezes a altura da viga. Assim, adotam-se os comprimentos conforme a seguir: (ver FIG.4.12)

Vigas com $H=610$ mm $\rightarrow L=1240$ mm (8 senóides)
 Vigas com $H=806$ mm $\rightarrow L=1550$ mm (10 senóides)
 Vigas com $H=1002$ mm $\rightarrow L=2015$ mm (13 senóides)
 Vigas com $H=1198$ mm $\rightarrow L=2170$ mm (14 senóides)

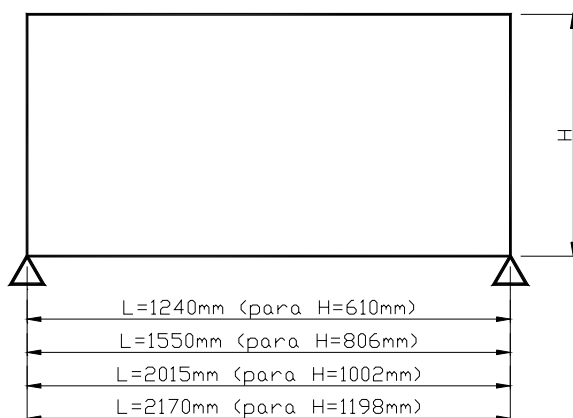


FIGURA 4.12 – Valores dos comprimentos das vigas de acordo com a altura

A FIG.4.13 mostra toda a alma modelada no programa Ansys.

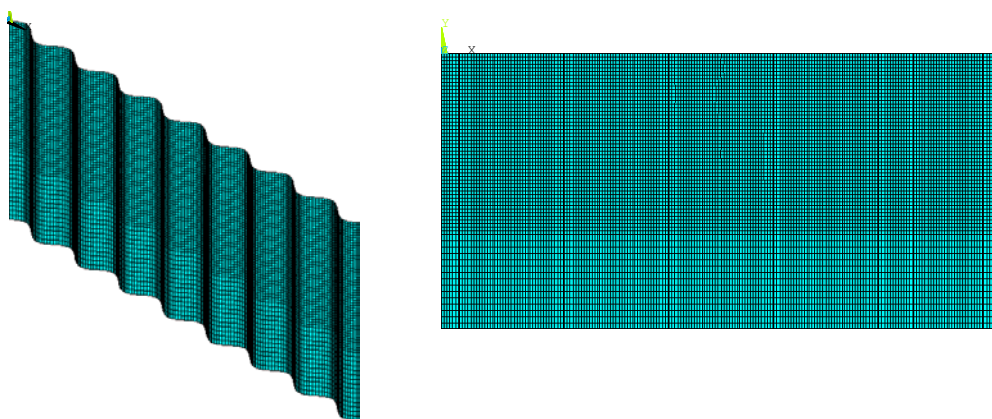


FIGURA 4.13 – Discretização da alma senoidal no programa Ansys

4.4 DISCRETIZAÇÃO DAS MESAS

Após a geração da alma inicia-se a geração dos nós e elementos da mesa superior que, posteriormente, será copiada para formar a mesa inferior.

Com o mesmo intuito de fazer um refinamento que resulte em resultados mais corretos, os elementos da mesa da viga terão menores dimensões nas proximidades da entrada de forças, aqui definida na região da senóide (ver FIG.4.14).

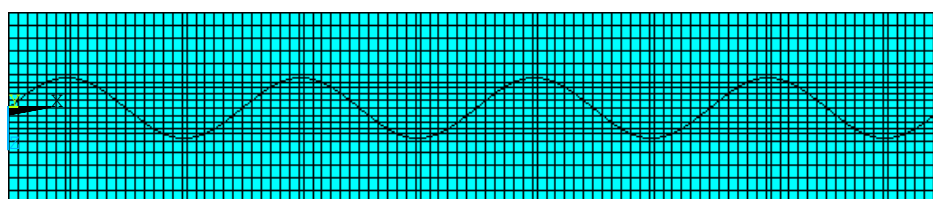


FIGURA 4.14 – Elementos da mesa com malha mais refinada na região da senóide

Na projeção da senóide os elementos compartilham os nós já existentes na formação da alma. São 43 mm de largura com elementos nessa situação, conforme FIG.4.15.

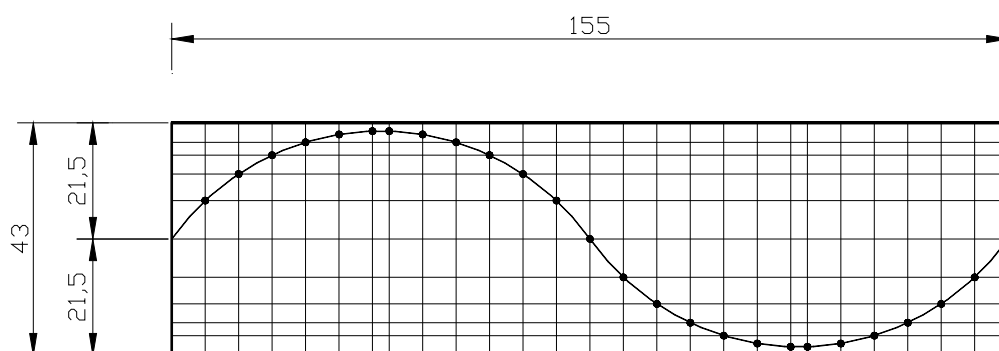


FIGURA 4.15 – Discretização dos primeiros elementos da mesa, dimensões em mm

Em seguida geram-se, até uma largura de 125 mm (valor mínimo para larguras de vigas de alma senoidal fabricadas no Brasil), elementos com 8,2 mm de dimensão transversal e, então, até completar a largura total da viga modelada, são gerados elementos com dimensão transversal de 14 mm, conforme FIG.4.16 e 4.17.

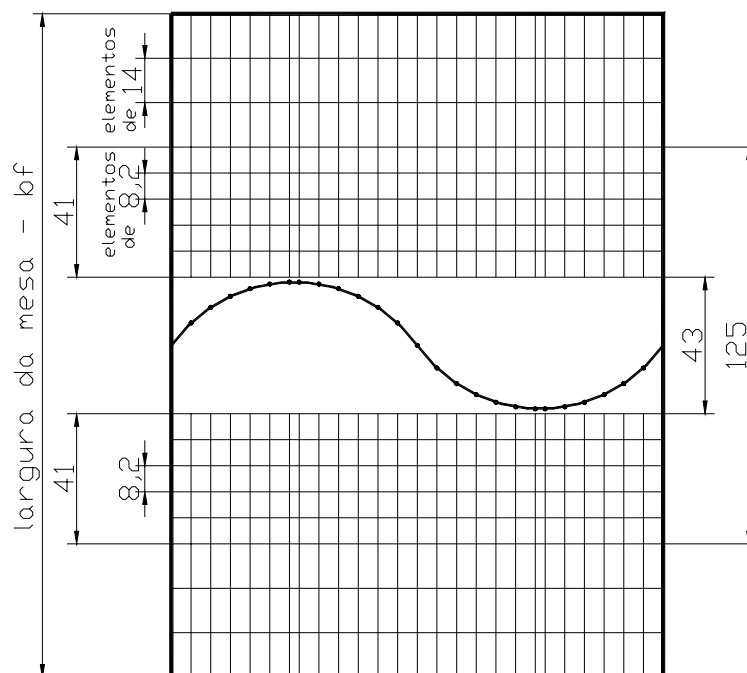


FIGURA 4.16 – Discretização dos elementos da mesa em uma senoide, dimensões em mm

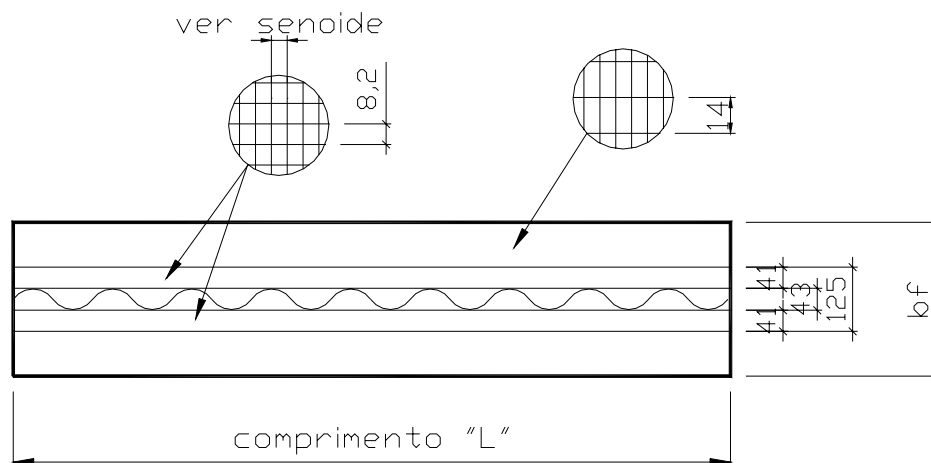


FIGURA 4.17 – Discretização dos elementos da mesa no comprimento total da viga, dimensões em mm

Da mesma forma que acontece com a modelagem da alma, para a entrada de dados, os valores das larguras das mesas sofrem uma alteração em seus valores, pois a largura restante, ($b_f - 125$), deve ser múltipla de 14 mm. Adotam-se então valores conforme a seguir:

Para $b_f = 150$ mm \rightarrow no Ansys $b_f = 153$ mm (125 mm + 2x14 mm)

Para $b_f = 200$ mm \rightarrow no Ansys $b_f = 209$ mm (125 mm + 6x14 mm)

Para $b_f = 250$ mm \rightarrow no Ansys $b_f = 237$ mm (125 mm + 8x14 mm)

Para $b_f = 300$ mm \rightarrow no Ansys $b_f = 293$ mm (125 mm + 12x14 mm)

Depois de gerada a mesa superior, esta é simplesmente copiada para gerar a mesa inferior, FIG.4.18. Desta forma, mesmo sem necessidade para este estudo, a mesa inferior tem o mesmo refinamento utilizado na mesa superior, para facilitar a criação do pré-processador.

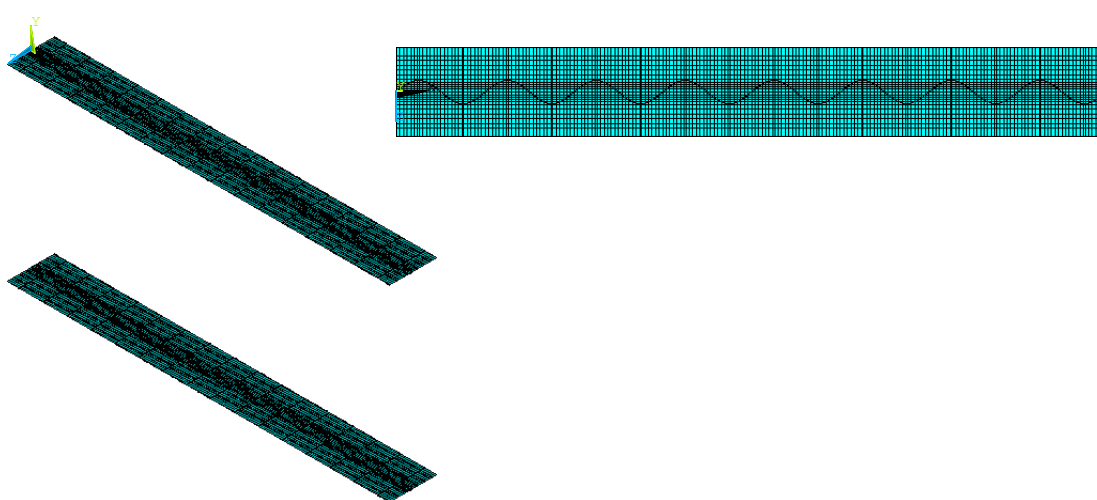


FIGURA 4.18 – Discretização das mesas da viga no programa Ansys

Para se ter uma idéia do número de elementos gerados pelo pré-processador, considerando os valores máximos dos parâmetros listados no item 4.1, a viga, ou seja, alma e mesas, contem um total de 62972 elementos.

4.5 DISCRETIZAÇÃO DO TRILHO

Na busca de um modelo próximo do real, modela-se também o trilho sobre a mesa superior da viga que, como já dito, é imprescindível para resultados mais corretos. Procurando simplificar a entrada de dados no Ansys, desenvolve-se um modelo de trilho que mantenha apenas as propriedades mais importantes.

Adotando um perfil T invertido e considerando que a altura do trilho é fundamental no espriamento da força localizada, utiliza-se essa altura e as demais dimensões são definidas de forma que o momento de inércia real seja preservado:

$$\begin{aligned} \text{Trilho barra quadrada 50 mm} &\rightarrow h_{tr}=50 \text{ mm} \\ &\rightarrow I_{x,tr}= 520.800 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Trilho TR-25} &\rightarrow h_{tr}=98,4 \text{ mm} \\ &\rightarrow I_{x,tr}= 4.130.000 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Trilho TR-37} &\rightarrow h_{tr}=122,2 \text{ mm} \\ &\rightarrow I_{x,tr}= 9.510.000 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Por motivos de agilidade e padronização na execução dos pré-processadores, nas vigas com excentricidade nula, as larguras das bases dos trilhos foram consideradas iguais à largura da projeção da senóide, 43 mm, e sua espessura fixada em 19 mm. Já para as vigas com excentricidade de 10,75 mm, a situação é diferente, adota-se uma base para o trilho com a metade da largura de 43 mm, 21,5 mm, sendo uma forma da força entrar com uma excentricidade de metade de 21,5 mm, ou seja, 10,75 mm. Ver FIG.4.19 e 4.20.

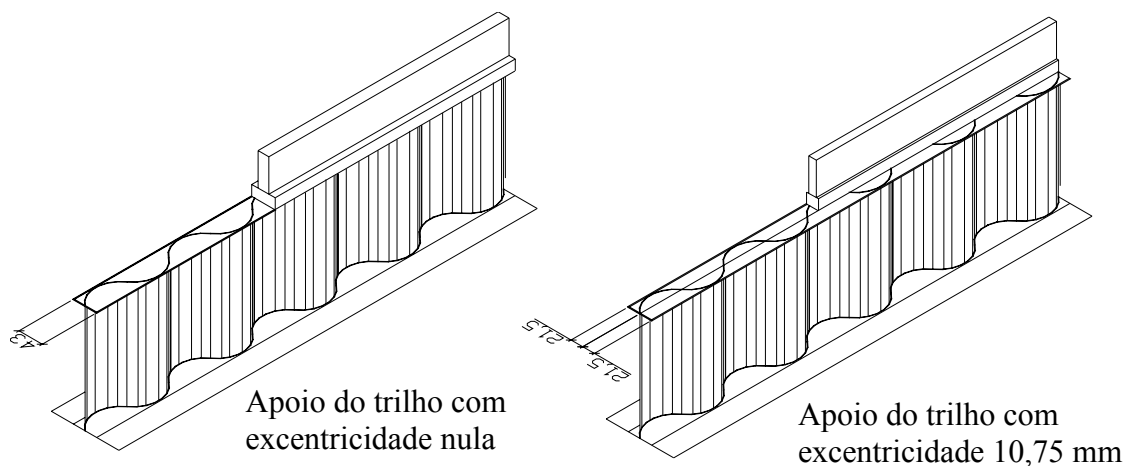


FIGURA 4.19 – Trilhos em forma de T sobre as vigas.

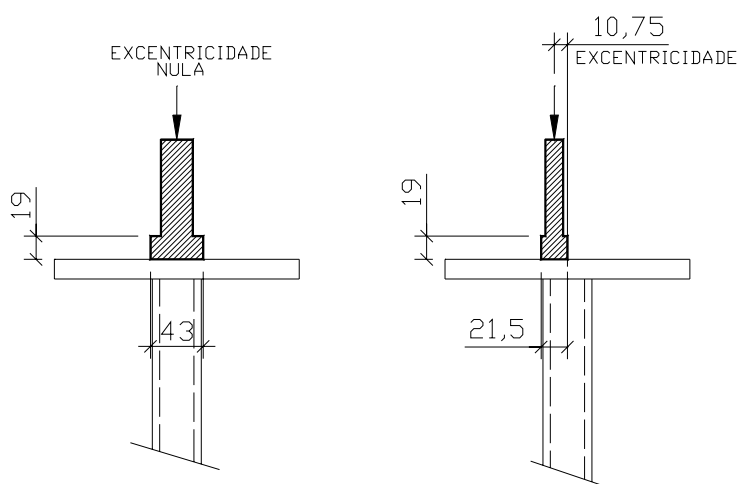


FIGURA 4.20 – Excentricidade aplicada pelo posicionamento do trilho, em mm

Nas FIG.4.21 e 4.22 são definidas as dimensões adotadas para a entrada dos trilhos no programa Ansys, em forma de T.

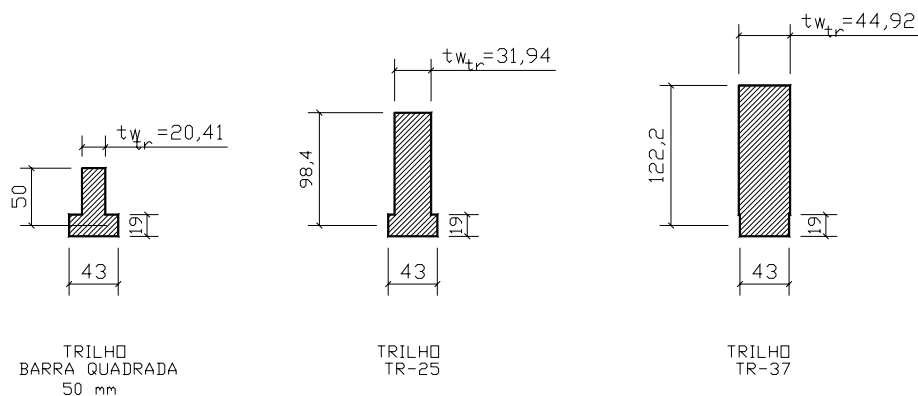


FIGURA 4.21 – Dimensões dos trilhos para entrada no Ansys, em mm
Excentricidade nula

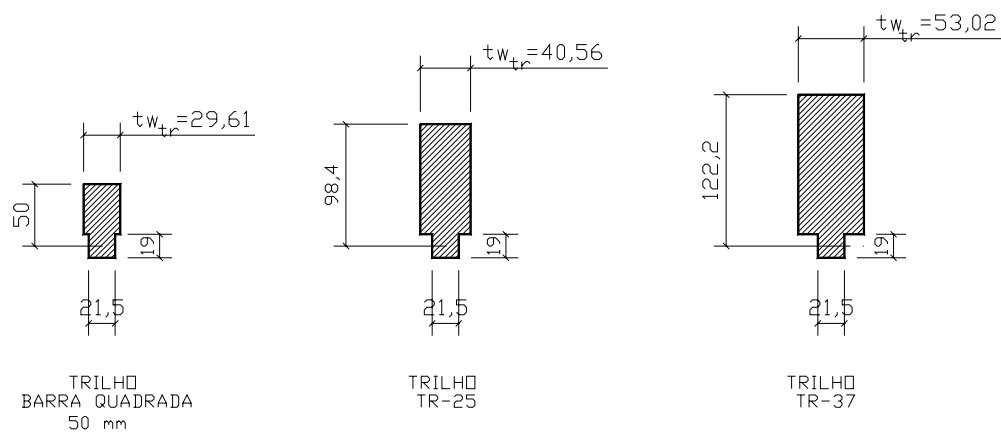


FIGURA 4.22 – Dimensões dos trilhos para entrada no Ansys, em mm
Excentricidade 10,75 mm.

Para a discretização do trilho, como não há necessidade de um refinamento especial, geram-se elementos com dimensões maiores. Para a base do T adotam-se elementos de 10 x 7,17 mm e para a alma 10 x 10 mm (ver FIG.4.23).

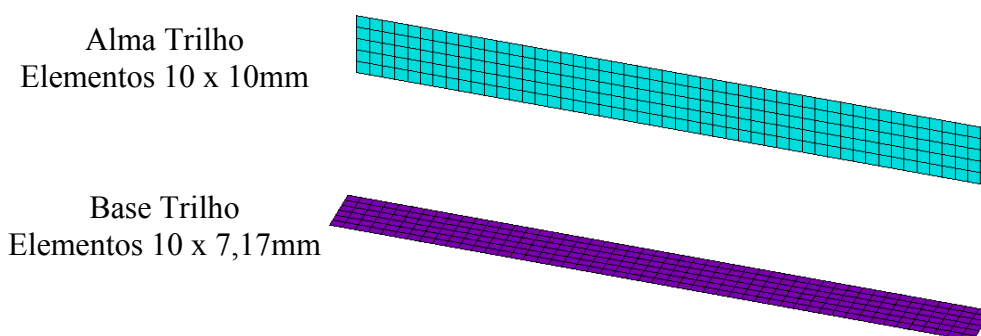


FIGURA 4.23 – Discretização dos elementos do trilho

Inicialmente, o trilho (base e alma) é gerado pelo pré-processador independentemente dos nós e elementos da viga, porém posteriormente são utilizados elementos de contato entre a base do trilho e a mesa superior da viga.

Em princípio os trilhos deveriam ter o comprimento total da viga. Entretanto, como o contato com a mesa superior não se daria em toda a extensão e para reduzir o tempo de processamento, estimou-se um comprimento de cada trilho de forma que a região de contato não fosse reduzida, ou seja, um comprimento suficiente para transmitir toda a força de contato entre o trilho e a mesa superior da viga. Após o processamento obteve-se a confirmação dessa premissa. Os comprimentos dos trilhos são mostrados na FIG.4.24, ressaltando-se ser este comprimento aproximadamente 10 vezes a altura do trilho.

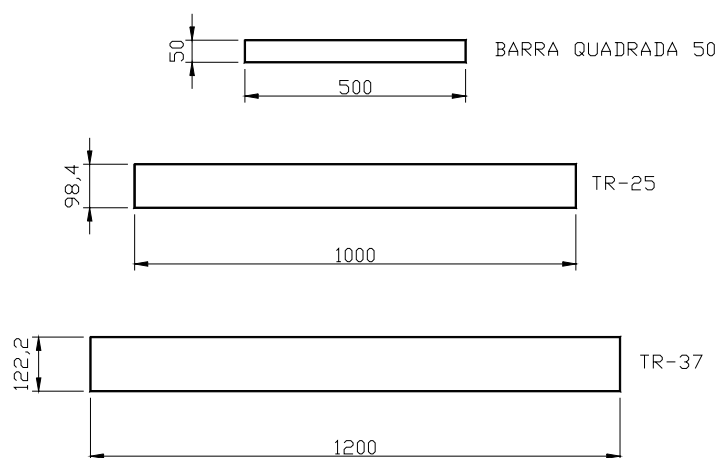


FIGURA 4.24 – Comprimentos dos trilhos para entrada no programa Ansys

Para que os trilhos trabalhem sempre no regime elástico, considerou-se um elevado valor para a resistência ao escoamento de seu aço, f_y .

Gerados todos os elementos da viga e do trilho, a FIG.4.25 mostra os perfis com suas diferentes alturas e os trilhos com as dimensões descritas acima.

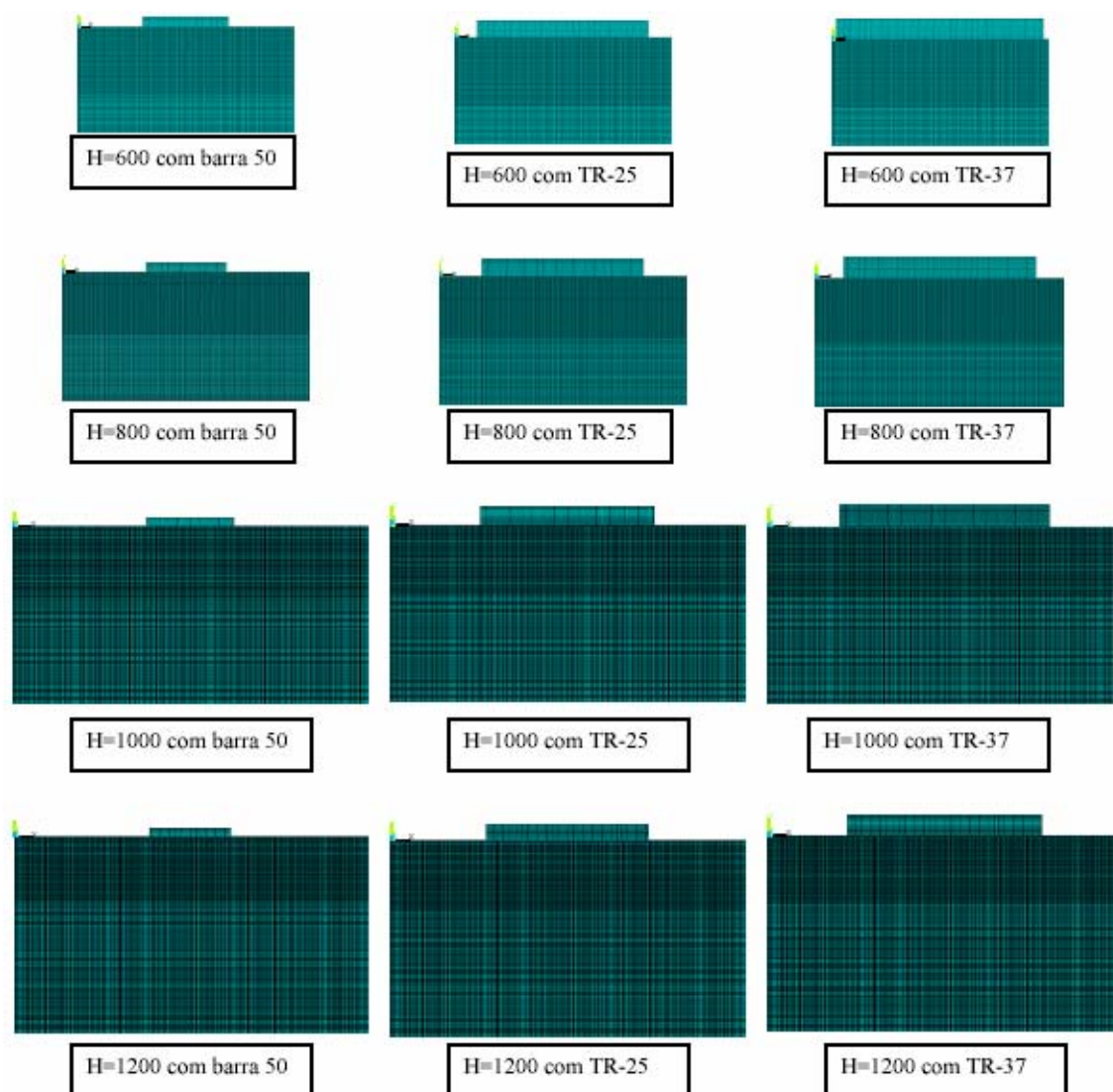


FIGURA 4.25 – Vigas modeladas com diferentes alturas e tipos de trilhos

4.6 ELEMENTOS DE CONTATO

No Ansys, o contato entre a mesa do perfil e a base do trilho é inserido por meio de comandos que geram elementos de contato de superfícies especificadas. No caso do pré-processador, esses comandos são editados no arquivo texto. Para a região da mesa da viga em contato com o trilho, chamada “superfície alvo”, utiliza-se o elemento TARGET170 e para a base do trilho, chamada “superfície de contato”, utiliza-se o elemento CONTACT174.

A seguir mostra-se um exemplo para descrever a participação dos elementos de contato. Na FIG.4.26 são representadas duas chapas, uma maior, chapa 2, e uma menor, chapa 1, localizada exatamente acima da chapa 2. Duas forças são aplicadas na chapa superior, comprimindo-a em direção a chapa inferior. Na ausência de elementos de contato entre as duas chapas, a chapa superior atravessa a chapa inferior, conforme mostrado na FIG.4.27-a, ou seja, o Ansys não reconhece a chapa que não recebe as forças que, portanto, não se deforma. Isso também acontece caso haja elementos de contato mas com a força aplicada de tração, FIG.4.27-b. Estabelecido que existam elementos de contato entre as duas chapas, com a força de compressão, o modelo apresenta um comportamento em que o Ansys garante que as duas chapas trabalhem juntas, com a mesma deformada, FIG.4.27-c.

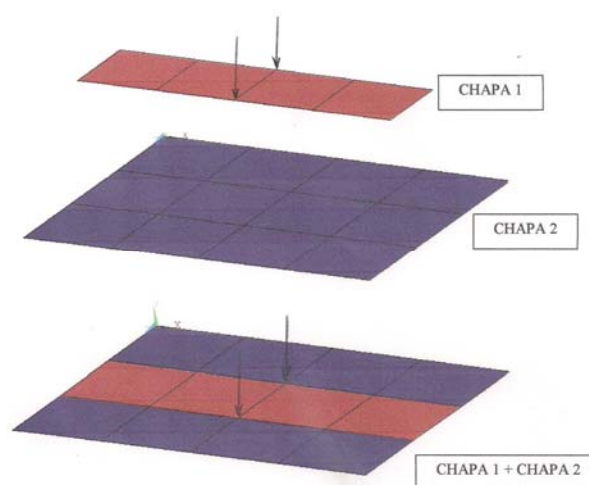


FIGURA 4.26 – Exemplo para aplicação do elemento de contato com duas chapas

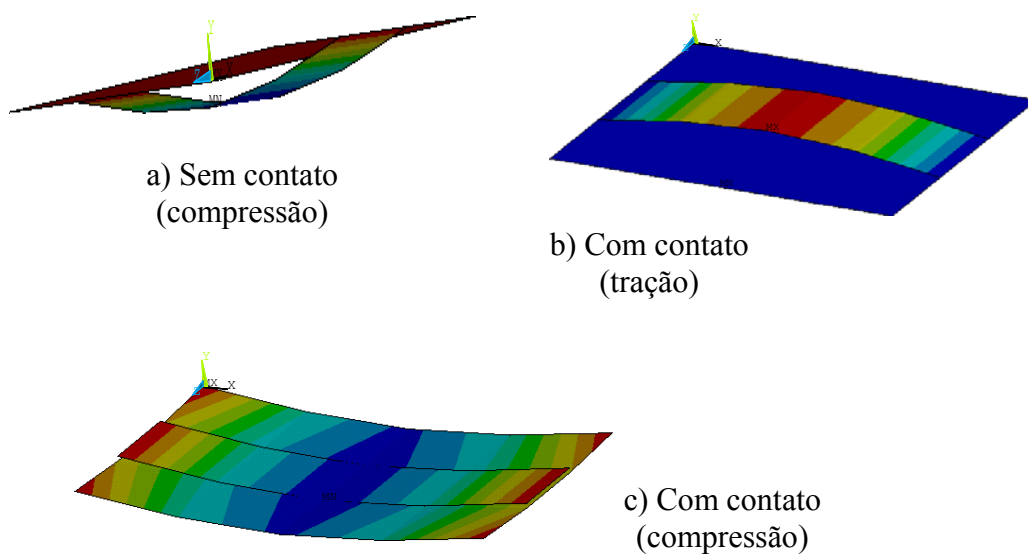


FIGURA 4.27 – Duas chapas com e sem elementos de contato

4.7 CONDIÇÕES DE CONTORNO

4.7.1 DESLOCAMENTOS

Conforme mostrado na FIG.4.28, considera-se como condições de contorno para ambas as extremidades das vigas, o impedimento das translações verticais (direção y) e das translações transversais (direção z) dos nós da alma. Desta forma, o giro em torno do eixo x é evitado, dispensando a discretização de enrijecedores extremos para garantir esse impedimento de torção. Para que não haja deslocamento de corpo rígido na direção longitudinal da viga, considera-se uma restrição no nó central da mesa superior da viga, impedindo a translação na direção x . O sistema de eixos cartesianos também é mostrado na FIG.4.28, para a identificação dos eixos x , y e z .

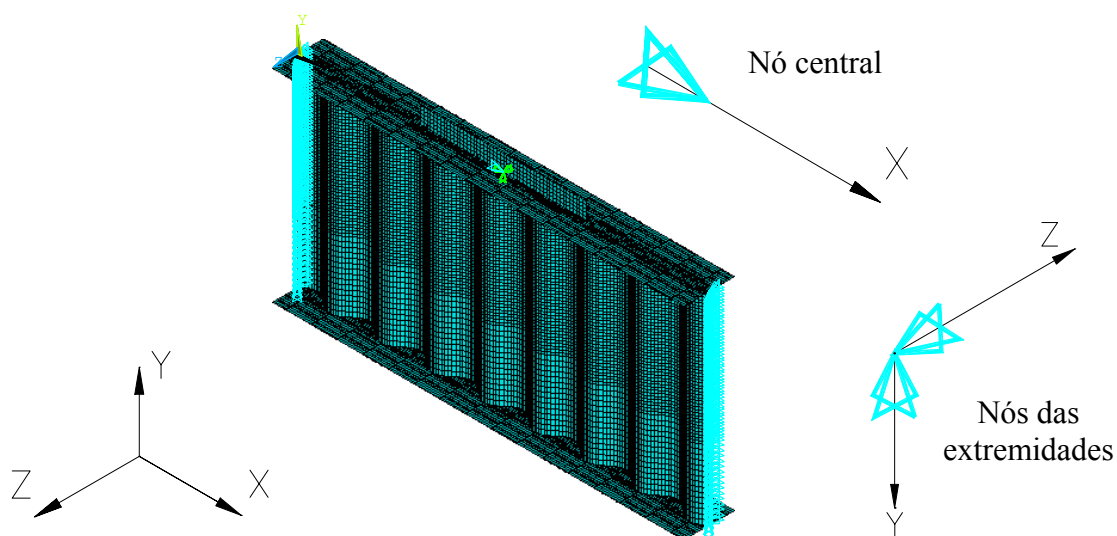


FIGURA 4.28 – Condições de apoio das vigas

4.7.2 CARREGAMENTO

Sendo objetivo deste estudo buscar resultados que levem à determinação da resistência a forças localizadas das vigas de almas senoidais, claramente o carregamento aplicado às vigas deve ser uma força localizada. Essa força é aplicada no centro do vão da viga, porém em 3 nós adjacentes conforme mostrado nas FIG.4.29 e 4.30. Observa-se que a distância entre os nós é muito pequena, podendo a força ser considerada como uma força localizada.

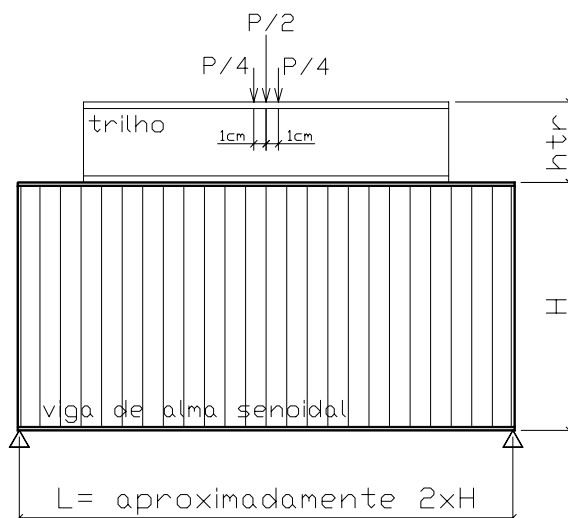


FIGURA 4.29 – Carregamento aplicado nas vigas modeladas

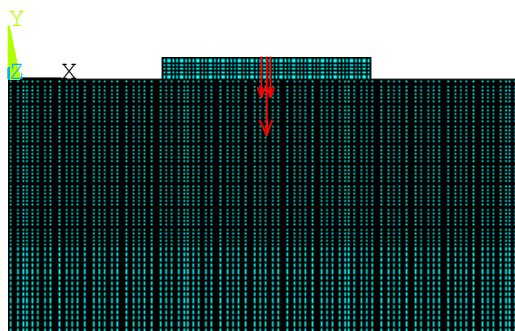


FIGURA 4.30 – Carregamento aplicado discretizado no Ansys

Inicialmente, para uma análise estática linear, adota-se o valor dessa força igual a 1000 kN. Esse valor serve como referência para novas forças na análise não-linear, descritas a seguir na análise numérica, item 4.8.

4.8 ANÁLISE NUMÉRICA

4.8.1 ANÁLISE LINEAR

Após a completa definição da geometria e condições de contorno do modelo, primeiramente é feita uma análise estática linear da viga. Considera-se o aço utilizado na produção das vigas como um material elástico linear isotrópico, com o valor do módulo de elasticidade, E , igual a 200000 MPa e coeficiente de Poisson igual a 0,3. Nesta fase da análise é ativado o comando “prestress effects”, que proporciona a geração da matriz de rigidez geométrica.

4.8.2 ANÁLISE DE FLAMBAGEM LINEARIZADA

Feita a análise estática linear, executa-se a análise de flambagem elástica, obtendo-se o primeiro modo de flambagem da alma, com os respectivos *autovetor* e *autovalor*. A

força de flambagem é obtida multiplicando-se o *autovalor* obtido na análise pela força de referência 1000 kN.

As FIG.4.31 e 4.32 mostram dois exemplos de 1º modo de flambagem da alma e seus autovalores (em dois modelos diferentes).

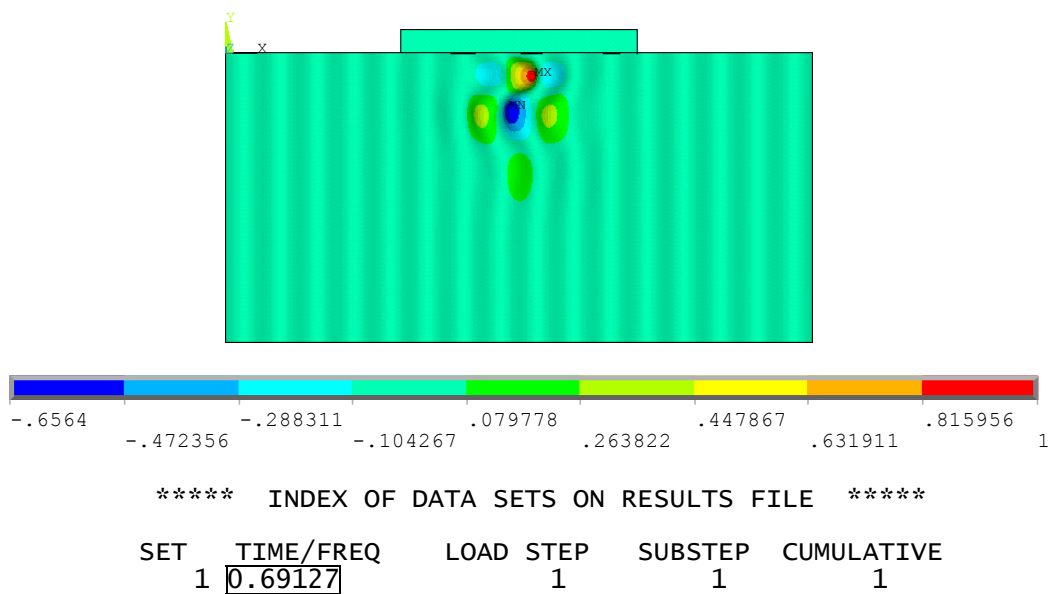


FIGURA 4.31 – *Autovetor e Autovalor* – flambagem local da alma

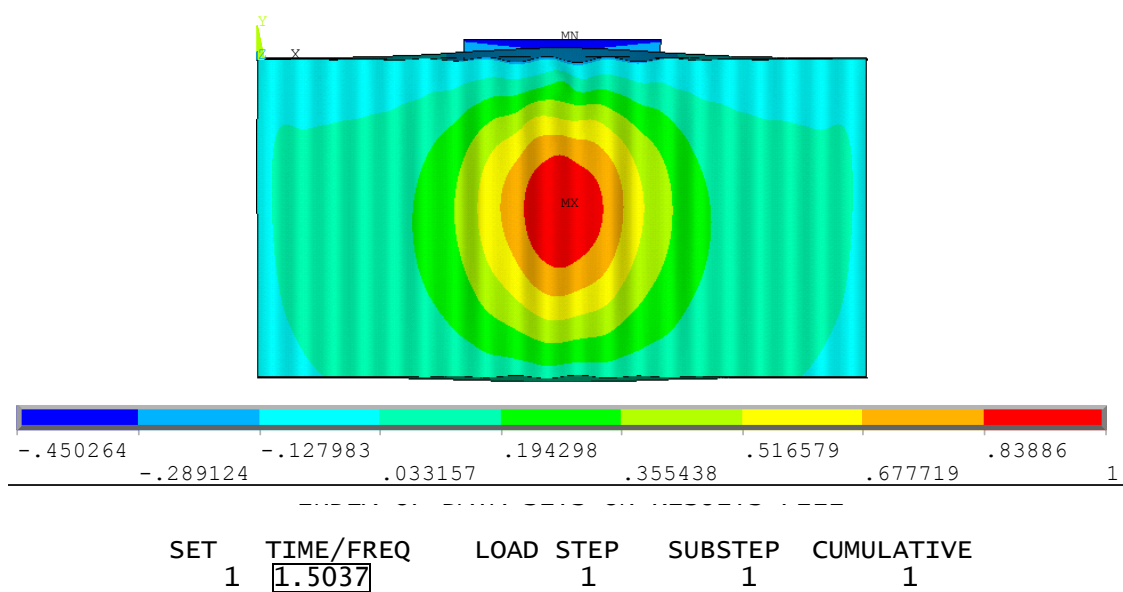


FIGURA 4.32 – *Autovetor e Autovalor* – flambagem global da alma

O Ansys fixa como unitário o valor do maior deslocamento do *autovetor*, como é visto nas figuras anteriores e fornece o autovalor em termos de fração da força de referência aplicada.

Nos exemplos acima a força de flambagem elástica é determinada multiplicando a força de referência de 1000 kN pelo *autovalor* fornecido. Então:

$$\text{Exemplo 1 (flambagem local)} \rightarrow F_{fl} = 1000 \times 0,69127 = 691,27 \text{ kN}$$

$$\text{Exemplo 2 (flambagem global)} \rightarrow F_{fl} = 1000 \times 1,50370 = 1503,70 \text{ kN}$$

Essa força é um primeiro limitador da resistência última da viga.

4.8.3 ANÁLISE NÃO-LINEAR

A análise não-linear abrange as não linearidades física e geométrica, isto é, o material utilizado já não obedece a Lei de Hooke indefinidamente e a geometria deformada da estrutura é utilizada. Portanto, algumas informações, como o comportamento do aço utilizado no estudo das vigas e uma deformação inicial, ou seja, uma imperfeição inicial, são fornecidas ao programa Ansys.

Neste estudo considera-se para o aço das vigas de almas senoidais um material com diagrama tensão-deformação bi-linear (FIG.4.33), que segue a regra de encruamento cinemático (permitindo a translação da superfície de escoamento) e o critério de escoamento de von Mises. Utiliza-se para valores de f_y , resistência ao escoamento do aço, 300 MPa para a alma senoidal e 350 MPa para as mesas. Esses valores são usuais para perfis fabricados no Brasil. O módulo tangente E_t é tomado igual a $E/10000$.

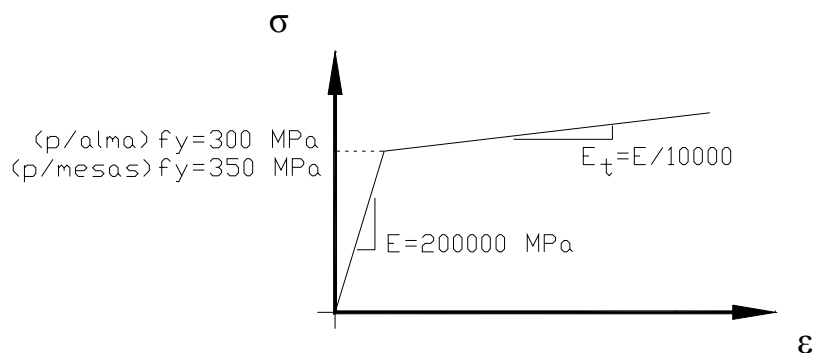


FIGURA 4.33 – Diagrama Tensão x Deformação

A imperfeição inicial é aplicada utilizando a deformada correspondente ao auto-vetor do 1º modo de flambagem, atribuindo-se o valor de 1 mm ao maior deslocamento do auto-vetor. Essa alteração é feita por meio de um comando onde se informa um multiplicador dos deslocamentos normalizados do auto-vetor, gerando assim a geometria deformada inicial para a análise não-linear.

Na análise não-linear a força localizada aplicada na viga é obtida em função da força crítica de flambagem elástica encontrada. Sabendo-se que essa força crítica é um primeiro limitador e ainda superior à força última esperada, adota-se como carregamento para a análise não-linear uma parcela da força de flambagem elástica. Esta parcela varia de acordo com a geometria da viga e será apresentada mais adiante nas tabelas de entrada de dados.

Força de Flambagem elástica

$$F_{fl} = 1000 \times \text{autovalor}$$

Força aplicada para a análise não-linear

$$P_{\text{não-linear}} = \text{parcela} \times F_{fl}$$

Aplicando-se incrementos de forças, o Ansys redistribui os esforços internos de acordo com a deformada atualizada da viga buscando seu equilíbrio. Após determinado número de incrementos chega-se ao limite da capacidade da viga de resistir a um novo incremento de força. A força obtida no último passo convergido, no qual ainda foi possível obter equilíbrio entre esforços externos e internos, é a força última que o modelo suporta.

Na TAB.4.3 mostram-se resultados de uma análise incremental, na qual a força última encontrada foi igual a 0,89 da força aplicada e deu-se no passo 19.

TABELA 4.3 – Passos de incrementos de forças no Ansys

```

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

```

| SET | TIME/FREQ | LOAD | STEP | SUBSTEP | CUMULATIVE |
|-----------|----------------|------|--------|---------|------------|
| 1 | 0.50000E-01 | 1 | | 1 | 2 |
| 2 | 0.10000 | 1 | | 2 | 3 |
| 3 | 0.15000 | 1 | | 3 | 4 |
| 4 | 0.20000 | 1 | | 4 | 6 |
| 5 | 0.25000 | 1 | | 5 | 8 |
| 6 | 0.30000 | 1 | | 6 | 10 |
| 7 | 0.35000 | 1 | | 7 | 12 |
| 8 | 0.40000 | 1 | | 8 | 14 |
| 9 | 0.45000 | 1 | | 9 | 16 |
| 10 | 0.50000 | 1 | | 10 | 18 |
| 11 | 0.55000 | 1 | | 11 | 21 |
| 12 | 0.60000 | 1 | | 12 | 24 |
| 13 | 0.65000 | 1 | | 13 | 27 |
| 14 | 0.70000 | 1 | | 14 | 30 |
| 15 | 0.75000 | 1 | | 15 | 34 |
| 16 | 0.80000 | 1 | | 16 | 38 |
| 17 | 0.85000 | 1 | | 17 | 42 |
| 18 | 0.87000 | 1 | | 18 | 54 |
| <u>19</u> | <u>0.89000</u> | 1 | | 19 | 58 |
| 20 | 1.0000 | 1 | 999999 | | 76 |

5

RESULTADOS

5.1 VIGAS CARREGADAS COM EXCENTRICIDADE NULA

Feitas as análises, todos os modelos são verificados cuidadosamente de forma que sejam conhecidos os valores das tensões atuantes nas mesas, nos trilhos e principalmente nas almas, bem como as forças últimas atingidas.

As tensões de von Mises nas mesas são logicamente máximas na mesa superior onde a força localizada foi aplicada e não excede 350 MPa, assim como na alma essa tensão não excede 300 MPa, que são as resistências ao escoamento do aço desses elementos.

Para os trilhos atenta-se para que as tensões não ultrapassem o valor da resistência ao escoamento fornecido ao Ansys, um valor elevado para que não ocorra um estado limite no trilho.

As TAB.5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 mostram as forças aplicadas e os resultados do último passo convergido do Ansys, em termos de forças últimas e tensões na mesa e no trilho. Em todas as vigas, as tensões na alma atingiram a resistência ao escoamento de 300 MPa.

TABELA 5.1 – Resultados retirados do Ansys ($t_w=2,0$ e trilho barra quadrada 50 mm)

| DADOS DA VIGA | | | | | | | ANÁLISE DE FLAMBAGEM | | | ANÁLISE PLÁSTICA | | | | | |
|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------|-------------------------|------------|------------------|------------------|-------------------------|-------------|---------------|--|--|
| e (mm) | t_w (mm) | tipo trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (mm) | L (mm) | Força Aplic. (kN) | auto-valor | F_{fl} (kN) | parc. | Força Aplic. (kN) | fra- ção | F_v (kN) | Tensão von Mises "mesa" (kN/cm ²) | Tensão von Mises "trilho" (kN/cm ²) |
| 0 | 2,0 | barra 50 | 12,50 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 0,68802 | 688 | 0,40 | 275 | 0,89 | 245 | 32,94 | 67,49 |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 0,69127 | 691 | 0,40 | 277 | 0,89 | 246 | 32,82 | 69,10 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 0,69360 | 694 | 0,40 | 277 | 0,89 | 247 | 32,82 | 69,34 |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 0,65303 | 653 | 0,50 | 327 | 0,77 | 251 | 33,12 | 68,26 |
| | | | | 600 (610) | 1240 | 1000 | 0,69224 | 692 | 0,40 | 277 | 0,89 | 246 | 32,98 | 67,15 | |
| | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 0,69423 | 694 | 0,40 | 278 | 0,89 | 247 | 32,90 | 67,67 | |
| | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 0,69656 | 697 | 0,40 | 279 | 0,89 | 248 | 32,83 | 68,45 | |
| | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 0,68936 | 689 | 0,50 | 345 | 0,74 | 255 | 33,31 | 68,12 | |
| | | | | 600 (610) | 1240 | 1000 | 0,70702 | 707 | 0,40 | 283 | 0,89 | 252 | 34,70 | 67,90 | |
| | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 0,70900 | 709 | 0,40 | 284 | 0,87 | 247 | 34,34 | 64,11 | |
| | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 0,71087 | 711 | 0,40 | 284 | 0,87 | 247 | 34,37 | 64,78 | |
| | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 0,71532 | 715 | 0,50 | 358 | 0,69 | 247 | 34,39 | 64,65 | |
| | | | 600 (610) | 1240 | 1000 | 0,71417 | 714 | 0,40 | 286 | 0,89 | 254 | 34,69 | 66,57 | | |
| | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 0,71577 | 716 | 0,40 | 286 | 0,89 | 255 | 34,71 | 67,38 | | |
| | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 0,71778 | 718 | 0,40 | 287 | 0,89 | 256 | 34,67 | 68,11 | | |
| | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 0,72245 | 722 | 0,50 | 361 | 0,69 | 249 | 34,47 | 63,88 | | |
| | | | 600 (610) | 1240 | 1000 | 0,71702 | 717 | 0,40 | 287 | 0,91 | 261 | 34,86 | 71,93 | | |
| | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 0,71845 | 718 | 0,40 | 287 | 0,89 | 256 | 34,71 | 66,76 | | |
| | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 0,72054 | 721 | 0,40 | 288 | 0,89 | 257 | 34,66 | 67,41 | | |
| | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 0,72533 | 725 | 0,45 | 326 | 0,77 | 251 | 34,30 | 64,23 | | |
| | | | 600 (610) | 1240 | 1000 | 0,73793 | 738 | 0,40 | 295 | 0,93 | 275 | 34,93 | 75,93 | | |
| | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 0,73857 | 739 | 0,40 | 295 | 0,89 | 263 | 34,92 | 65,93 | | |
| | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 0,74055 | 741 | 0,40 | 296 | 0,87 | 258 | 34,75 | 62,96 | | |
| | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 0,74506 | 745 | 0,45 | 335 | 0,77 | 258 | 34,77 | 63,39 | | |
| | | | 600 (610) | 1240 | 1000 | 0,74245 | 742 | 0,40 | 297 | 0,93 | 276 | 34,93 | 74,30 | | |
| | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 0,74297 | 743 | 0,40 | 297 | 0,89 | 264 | 34,92 | 65,46 | | |
| | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 0,74507 | 745 | 0,40 | 298 | 0,89 | 265 | 34,88 | 66,38 | | |
| | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 0,74973 | 750 | 0,45 | 337 | 0,77 | 260 | 34,76 | 63,13 | | |
| | | | 600 (610) | 1240 | 1000 | 0,74964 | 750 | 0,40 | 300 | 0,94 | 282 | 34,93 | 75,68 | | |
| | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 0,75002 | 750 | 0,40 | 300 | 0,91 | 273 | 34,92 | 69,26 | | |
| | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 0,75234 | 752 | 0,40 | 301 | 0,89 | 268 | 34,87 | 63,67 | | |
| | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 0,75730 | 757 | 0,45 | 341 | 0,79 | 269 | 34,92 | 66,35 | | |

TABELA 5.2 – Resultados retirados do Ansys ($t_w=2,0$ mm e trilho TR-25)

| DADOS DA VIGA | | | | | | | ANÁLISE DE FLAMBAGEM | | | ANÁLISE PLÁSTICA | | | | | | |
|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|-------------------------|------------|------------------|------------------|-------------------------|-------------|---------------|--|--|-------|
| e (mm) | t_w (mm) | tipo trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (mm) | L (mm) | Força Aplic. (kN) | auto-valor | F_{fl} (kN) | parc. | Força Aplic. (kN) | fra- ção | F_u (kN) | Tensão von Mises "mesa" (kN/cm ²) | Tensão von Mises "trilho" (kN/cm ²) | |
| 0 | 2,0 | TR-25 | 12,50 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 1,31190 | 1312 | 0,35 | 459 | 0,92 | 422 | 32,05 | 46,42 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 1,26490 | 1265 | 0,40 | 506 | 0,87 | 440 | 31,15 | 48,58 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,07020 | 1070 | 0,50 | 535 | 0,86 | 460 | 31,19 | 51,83 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 0,84487 | 845 | 0,60 | 507 | 0,91 | 461 | 31,15 | 51,86 | |
| | | | | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 1,30820 | 1308 | 0,35 | 458 | 0,92 | 421 | 31,60 | 46,11 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 1,26100 | 1261 | 0,40 | 504 | 0,91 | 459 | 28,73 | 52,28 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,15220 | 1152 | 0,50 | 576 | 0,81 | 467 | 29,40 | 53,12 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 0,89533 | 895 | 0,60 | 537 | 0,86 | 462 | 30,61 | 51,65 | |
| | | | | 16,00 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 1,31250 | 1313 | 0,35 | 459 | 0,92 | 423 | 29,97 | 46,16 |
| | | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 1,26440 | 1264 | 0,40 | 506 | 0,87 | 440 | 29,69 | 48,28 |
| | | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,16550 | 1166 | 0,50 | 583 | 0,77 | 449 | 31,36 | 49,34 |
| | | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 0,92287 | 923 | 0,60 | 554 | 0,82 | 454 | 30,10 | 50,21 |
| | | | 200 (209) | | 600 (610) | 1240 | 1000 | 1,31080 | 1311 | 0,35 | 459 | 0,92 | 422 | 29,63 | 45,92 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 1,26270 | 1263 | 0,40 | 505 | 0,87 | 439 | 29,27 | 48,04 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,23550 | 1236 | 0,40 | 494 | 0,87 | 430 | 29,55 | 46,93 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 0,98373 | 984 | 0,60 | 590 | 0,77 | 454 | 29,65 | 49,97 | |
| | | | 250 (237) | | 600 (610) | 1240 | 1000 | 1,31060 | 1311 | 0,35 | 459 | 0,92 | 422 | 29,58 | 45,85 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 1,26240 | 1262 | 0,40 | 505 | 0,87 | 439 | 29,20 | 47,97 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,23530 | 1235 | 0,50 | 618 | 0,71 | 439 | 28,41 | 48,61 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 1,00390 | 1004 | 0,60 | 602 | 0,76 | 458 | 29,52 | 50,32 | |
| | | | 19,00 | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 1,31550 | 1316 | 0,35 | 460 | 0,92 | 424 | 27,94 | 45,84 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 1,26640 | 1266 | 0,40 | 507 | 0,87 | 441 | 27,69 | 47,97 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,23920 | 1239 | 0,50 | 620 | 0,71 | 440 | 27,44 | 48,36 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 1,05520 | 1055 | 0,60 | 633 | 0,72 | 456 | 28,12 | 49,77 | |
| 250 (237) | 600 (610) | 1240 | | 1000 | 1,31610 | 1316 | 0,35 | 461 | 0,92 | 424 | 27,98 | 45,78 | | | | |
| | 800 (806) | 1550 | | 1000 | 1,26680 | 1267 | 0,40 | 507 | 0,87 | 441 | 27,76 | 47,89 | | | | |
| | 1000 (1002) | 2015 | | 1000 | 1,23970 | 1240 | 0,50 | 620 | 0,71 | 440 | 27,44 | 48,29 | | | | |
| | 1200 (1198) | 2170 | | 1000 | 1,07770 | 1078 | 0,60 | 647 | 0,71 | 459 | 28,17 | 50,06 | | | | |
| 300 (293) | 600 (610) | 1240 | | 1000 | 1,31750 | 1318 | 0,35 | 461 | 0,92 | 424 | 28,13 | 45,72 | | | | |
| | 800 (806) | 1550 | | 1000 | 1,26800 | 1268 | 0,40 | 507 | 0,87 | 441 | 27,91 | 47,80 | | | | |
| | 1000 (1002) | 2015 | | 1000 | 1,24110 | 1241 | 0,50 | 621 | 0,71 | 441 | 27,59 | 48,16 | | | | |
| | 1200 (1198) | 2170 | | 1000 | 1,11180 | 1112 | 0,60 | 667 | 0,67 | 447 | 28,75 | 48,05 | | | | |

TABELA 5.3 – Resultados retirados do Ansys ($t_w=2,0$ mm e trilho TR-37)

| DADOS DA VIGA | | | | | | | ANÁLISE DE FLAMBAGEM | | | ANÁLISE PLÁSTICA | | | | | | |
|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|-------------------------|------------|------------------|------------------|-------------------------|-------------|---------------|--|--|-------|
| e (mm) | t_w (mm) | tipo trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (mm) | L (mm) | Força Aplic. (kN) | auto-valor | F_{fl} (kN) | parc. | Força Aplic. (kN) | fra- ção | F_u (kN) | Tensão von Mises "mesa" (kN/cm ²) | Tensão von Mises "trilho" (kN/cm ²) | |
| 0 | 2,0 | TR-37 | 12,50 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 1,57000 | 1570 | 0,35 | 550 | 0,82 | 451 | 33,58 | 42,56 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 1,45380 | 1454 | 0,40 | 582 | 0,92 | 535 | 30,03 | 52,44 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,10250 | 1103 | 0,60 | 662 | 0,81 | 536 | 31,08 | 51,84 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 0,88447 | 884 | 0,65 | 575 | 0,96 | 552 | 29,98 | 54,42 | |
| | | | | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 1,56270 | 1563 | 0,35 | 547 | 0,82 | 448 | 33,09 | 42,18 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 1,48970 | 1490 | 0,40 | 596 | 0,87 | 518 | 30,66 | 49,28 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,20260 | 1203 | 0,60 | 722 | 0,76 | 548 | 29,83 | 53,21 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 0,94454 | 945 | 0,65 | 614 | 0,87 | 534 | 30,28 | 51,13 | |
| | | | | 16,00 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 1,56510 | 1565 | 0,35 | 548 | 0,82 | 449 | 30,28 | 42,18 |
| | | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 1,49240 | 1492 | 0,40 | 597 | 0,87 | 519 | 28,81 | 49,42 |
| | | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,19140 | 1191 | 0,60 | 715 | 0,76 | 543 | 30,21 | 52,51 |
| | | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 0,95741 | 957 | 0,65 | 622 | 0,87 | 541 | 28,49 | 52,49 |
| | | | 200 (209) | | 600 (610) | 1240 | 1000 | 1,56040 | 1560 | 0,35 | 546 | 0,82 | 448 | 29,94 | 41,89 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 1,48810 | 1488 | 0,40 | 595 | 0,87 | 518 | 28,13 | 49,14 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,29460 | 1295 | 0,60 | 777 | 0,67 | 520 | 30,42 | 49,06 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 1,02460 | 1025 | 0,65 | 666 | 0,81 | 539 | 28,54 | 51,49 | |
| | | | 250 (237) | | 600 (610) | 1240 | 1000 | 1,55920 | 1559 | 0,35 | 546 | 0,82 | 447 | 29,85 | 41,81 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 1,48680 | 1487 | 0,40 | 595 | 0,87 | 517 | 27,99 | 49,05 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,32310 | 1323 | 0,60 | 794 | 0,67 | 532 | 29,51 | 50,50 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 1,04520 | 1045 | 0,65 | 679 | 0,77 | 523 | 29,27 | 49,23 | |
| | | | 19,00 | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 1,56120 | 1561 | 0,35 | 546 | 0,86 | 470 | 26,96 | 44,58 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 1,48590 | 1486 | 0,40 | 594 | 0,87 | 517 | 26,37 | 48,89 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,36530 | 1365 | 0,60 | 819 | 0,66 | 541 | 27,44 | 51,49 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 1,08770 | 1088 | 0,65 | 707 | 0,76 | 537 | 26,86 | 50,93 | |
| 250 (237) | 600 (610) | 1240 | | 1000 | 1,56070 | 1561 | 0,35 | 546 | 0,82 | 448 | 27,56 | 41,67 | | | | |
| | 800 (806) | 1550 | | 1000 | 1,48550 | 1486 | 0,40 | 594 | 0,87 | 517 | 26,35 | 48,81 | | | | |
| | 1000 (1002) | 2015 | | 1000 | 1,39500 | 1395 | 0,60 | 837 | 0,62 | 519 | 28,25 | 48,54 | | | | |
| | 1200 (1198) | 2170 | | 1000 | 1,10980 | 1110 | 0,65 | 721 | 0,76 | 548 | 25,95 | 52,54 | | | | |
| 300 (293) | 600 (610) | 1240 | | 1000 | 1,56050 | 1561 | 0,35 | 546 | 0,82 | 448 | 27,62 | 41,59 | | | | |
| | 800 (806) | 1550 | | 1000 | 1,48530 | 1485 | 0,40 | 594 | 0,86 | 511 | 26,94 | 47,82 | | | | |
| | 1000 (1002) | 2015 | | 1000 | 1,43530 | 1435 | 0,60 | 861 | 0,61 | 525 | 28,17 | 49,12 | | | | |
| | 1200 (1198) | 2170 | | 1000 | 1,14180 | 1142 | 0,65 | 742 | 0,72 | 534 | 26,85 | 50,35 | | | | |

TABELA 5.4 – Resultados retirados do Ansys ($t_w=3,0$ e trilho barra quadrada 50 mm)

| DADOS DA VIGA | | | | | | | ANÁLISE DE FLAMBAGEM | | | ANÁLISE PLÁSTICA | | | | | | |
|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|-------------------------|------------|------------------|------------------|-------------------------|-------------|---------------|--|--|--------|
| e (mm) | t_w (mm) | tipo trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (mm) | L (mm) | Força Aplic. (kN) | auto-valor | F_{fl} (kN) | parc. | Força Aplic. (kN) | fra- ção | F_u (kN) | Tensão von Mises "mesa" (kN/cm ²) | Tensão von Mises "trilho" (kN/cm ²) | |
| 0 | 3,0 | barra 50 | 12,50 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 1,58950 | 1590 | 0,35 | 556 | 0,64 | 356 | 34,91 | 92,30 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 1,50370 | 1504 | 0,40 | 601 | 0,65 | 391 | 34,93 | 106,41 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,13570 | 1136 | 0,40 | 454 | 0,92 | 418 | 35,00 | 124,49 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 0,90770 | 908 | 0,50 | 454 | 0,90 | 408 | 34,96 | 116,19 | |
| | | | | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 1,59700 | 1597 | 0,35 | 559 | 0,64 | 358 | 34,64 | 91,54 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 1,58160 | 1582 | 0,40 | 633 | 0,59 | 373 | 34,82 | 97,25 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,20360 | 1204 | 0,40 | 481 | 0,85 | 409 | 34,96 | 114,97 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 0,95612 | 956 | 0,50 | 478 | 0,89 | 425 | 34,97 | 127,91 | |
| | | | | 16,00 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 1,62760 | 1628 | 0,35 | 570 | 0,64 | 365 | 34,94 | 91,85 |
| | | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 1,61940 | 1619 | 0,40 | 648 | 0,57 | 369 | 34,95 | 94,50 |
| | | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,27700 | 1277 | 0,40 | 511 | 0,84 | 429 | 35,00 | 127,33 |
| | | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 1,02250 | 1023 | 0,50 | 511 | 0,84 | 429 | 35,00 | 121,78 |
| | | | 200 (209) | | 600 (610) | 1240 | 1000 | 1,64270 | 1643 | 0,35 | 575 | 0,64 | 368 | 34,89 | 90,71 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 1,63460 | 1635 | 0,40 | 654 | 0,57 | 373 | 34,90 | 93,04 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,37190 | 1372 | 0,40 | 549 | 0,79 | 434 | 34,99 | 121,60 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 1,09260 | 1093 | 0,50 | 546 | 0,81 | 443 | 34,99 | 127,28 | |
| | | | 250 (237) | | 600 (610) | 1240 | 1000 | 1,64860 | 1649 | 0,35 | 577 | 0,64 | 369 | 34,88 | 89,96 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 1,64040 | 1640 | 0,40 | 656 | 0,57 | 374 | 34,89 | 92,51 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,40590 | 1406 | 0,40 | 562 | 0,77 | 433 | 34,99 | 120,43 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 1,11940 | 1119 | 0,50 | 560 | 0,79 | 442 | 34,99 | 124,94 | |
| | | | 19,00 | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 1,69290 | 1693 | 0,35 | 593 | 0,66 | 391 | 34,97 | 98,02 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 1,68000 | 1680 | 0,40 | 672 | 0,57 | 383 | 34,93 | 90,37 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,52580 | 1526 | 0,40 | 610 | 0,74 | 452 | 35,00 | 125,28 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 1,21510 | 1215 | 0,50 | 608 | 0,74 | 450 | 34,99 | 118,42 | |
| 250 (237) | 600 (610) | 1240 | | 1000 | 1,70210 | 1702 | 0,35 | 596 | 0,65 | 387 | 34,96 | 95,20 | | | | |
| | 800 (806) | 1550 | | 1000 | 1,68910 | 1689 | 0,40 | 676 | 0,57 | 385 | 34,89 | 89,90 | | | | |
| | 1000 (1002) | 2015 | | 1000 | 1,56900 | 1569 | 0,40 | 628 | 0,72 | 452 | 34,99 | 117,43 | | | | |
| | 1200 (1198) | 2170 | | 1000 | 1,24890 | 1249 | 0,50 | 624 | 0,72 | 450 | 34,98 | 117,24 | | | | |
| 300 (293) | 600 (610) | 1240 | | 1000 | 1,71630 | 1716 | 0,35 | 601 | 0,67 | 402 | 34,97 | 102,37 | | | | |
| | 800 (806) | 1550 | | 1000 | 1,70450 | 1705 | 0,40 | 682 | 0,59 | 402 | 34,96 | 97,72 | | | | |
| | 1000 (1002) | 2015 | | 1000 | 1,63910 | 1639 | 0,40 | 656 | 0,71 | 466 | 34,99 | 123,73 | | | | |
| | 1200 (1198) | 2170 | | 1000 | 1,30470 | 1305 | 0,50 | 652 | 0,72 | 470 | 34,99 | 123,60 | | | | |

TABELA 5.5 – Resultados retirados do Ansys ($t_w=3,0$ mm e trilho TR-25)

| DADOS DA VIGA | | | | | | | ANÁLISE DE FLAMBAGEM | | | ANÁLISE PLÁSTICA | | | | | | |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------|------------|------------------|------------------|-------------------------|-------------|---------------|--|--|-------|
| e (mm) | t_w (mm) | tipo trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (mm) | L (mm) | Força Aplic. (kN) | auto-valor | F_{fl} (kN) | parc. | Força Aplic. (kN) | fra- ção | F_u (kN) | Tensão von Mises "mesa" (kN/cm ²) | Tensão von Mises "trilho" (kN/cm ²) | |
| 0 | 3,0 | TR-25 | 12,50 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 2,66130 | 2661 | 0,35 | 931 | 0,67 | 624 | 32,56 | 68,47 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 1,94620 | 1946 | 0,40 | 778 | 0,90 | 701 | 33,18 | 82,94 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,43210 | 1432 | 0,60 | 859 | 0,82 | 705 | 34,20 | 80,43 | |
| | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 1,15070 | 1151 | 0,70 | 805 | 0,87 | 701 | 33,34 | 79,70 | | |
| | | | | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 2,82330 | 2823 | 0,35 | 988 | 0,64 | 632 | 30,31 | 69,66 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 2,11220 | 2112 | 0,40 | 845 | 0,84 | 710 | 30,33 | 83,43 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,57200 | 1572 | 0,60 | 943 | 0,79 | 745 | 31,15 | 88,14 | |
| | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 1,22900 | 1229 | 0,65 | 799 | 0,92 | 735 | 31,15 | 85,57 | | |
| | | | | 16,00 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 2,81460 | 2815 | 0,35 | 985 | 0,64 | 630 | 31,77 | 69,49 |
| | | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 2,08880 | 2089 | 0,40 | 836 | 0,84 | 702 | 32,25 | 80,84 |
| | | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,55890 | 1559 | 0,60 | 935 | 0,77 | 720 | 33,48 | 81,54 |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 1,24890 | 1249 | 0,65 | 812 | 0,92 | 747 | 33,15 | 87,11 | |
| | | | 200 (209) | | 600 (610) | 1240 | 1000 | 2,82550 | 2826 | 0,35 | 989 | 0,64 | 633 | 30,26 | 69,15 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 2,25420 | 2254 | 0,40 | 902 | 0,79 | 712 | 30,18 | 80,30 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,70380 | 1704 | 0,60 | 1022 | 0,73 | 746 | 31,11 | 86,37 | |
| | | | 1200 (1198) | | 2170 | 1000 | 1,33880 | 1339 | 0,65 | 870 | 0,87 | 757 | 30,47 | 88,39 | | |
| | | | 250 (237) | | 600 (610) | 1240 | 1000 | 2,82500 | 2825 | 0,35 | 989 | 0,64 | 633 | 30,05 | 69,05 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 2,29770 | 2298 | 0,40 | 919 | 0,79 | 726 | 29,24 | 83,99 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,74280 | 1743 | 0,60 | 1046 | 0,69 | 722 | 30,68 | 80,41 | |
| | | | 1200 (1198) | | 2170 | 1000 | 1,36660 | 1367 | 0,65 | 888 | 0,88 | 782 | 29,46 | 95,16 | | |
| | | | 19,00 | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 2,83330 | 2833 | 0,35 | 992 | 0,64 | 635 | 31,71 | 69,13 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 2,36930 | 2369 | 0,40 | 948 | 0,76 | 720 | 30,60 | 83,95 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,81820 | 1818 | 0,60 | 1091 | 0,65 | 709 | 32,48 | 79,48 | |
| | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 1,43510 | 1435 | 0,65 | 933 | 0,83 | 774 | 31,13 | 91,44 | | |
| 250 (237) | 600 (610) | 1240 | | 1000 | 2,83420 | 2834 | 0,35 | 992 | 0,64 | 635 | 31,66 | 69,05 | | | | |
| | 800 (806) | 1550 | | 1000 | 2,41570 | 2416 | 0,40 | 966 | 0,74 | 715 | 31,05 | 79,72 | | | | |
| | 1000 (1002) | 2015 | | 1000 | 1,86250 | 1863 | 0,60 | 1118 | 0,66 | 738 | 30,81 | 85,88 | | | | |
| 1200 (1198) | 2170 | 1000 | | 1,46770 | 1468 | 0,65 | 954 | 0,77 | 735 | 31,84 | 81,61 | | | | | |
| 300 (293) | 600 (610) | 1240 | | 1000 | 2,83730 | 2837 | 0,35 | 993 | 0,64 | 636 | 31,61 | 69,05 | | | | |
| | 800 (806) | 1550 | | 1000 | 2,47820 | 2478 | 0,40 | 991 | 0,70 | 694 | 32,09 | 77,14 | | | | |
| | 1000 (1002) | 2015 | | 1000 | 1,92680 | 1927 | 0,60 | 1156 | 0,62 | 717 | 30,65 | 80,54 | | | | |
| 1200 (1198) | 2170 | 1000 | | 1,51770 | 1518 | 0,65 | 987 | 0,78 | 769 | 30,85 | 88,92 | | | | | |

TABELA 5.6 – Resultados retirados do Ansys ($t_w=3,0$ mm e trilho TR-37)

| DADOS DA VIGA | | | | | | | ANÁLISE DE FLAMBAGEM | | | ANÁLISE PLÁSTICA | | | | | | |
|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|-------------------------|------------|------------------|------------------|-------------------------|-------------|---------------|--|--|-------|
| e (mm) | t_w (mm) | tipo trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (mm) | L (mm) | Força Aplic. (kN) | auto-valor | F_{fl} (kN) | parc. | Força Aplic. (kN) | fra- ção | F_u (kN) | Tensão von Mises "mesa" (kN/cm ²) | Tensão von Mises "trilho" (kN/cm ²) | |
| 0 | 3,0 | TR-37 | 12,50 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 2,61120 | 2611 | 0,35 | 914 | 0,72 | 658 | 33,51 | 60,28 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 1,97060 | 1971 | 0,40 | 788 | 0,97 | 765 | 33,09 | 73,13 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,46390 | 1464 | 0,60 | 878 | 0,87 | 764 | 34,27 | 72,98 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 1,19610 | 1196 | 0,65 | 777 | 0,96 | 746 | 33,45 | 70,84 | |
| | | | | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 2,87200 | 2872 | 0,35 | 1005 | 0,65 | 653 | 32,98 | 60,36 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 2,16150 | 2162 | 0,40 | 865 | 0,91 | 787 | 30,96 | 75,97 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,63830 | 1638 | 0,60 | 983 | 0,81 | 796 | 31,82 | 76,44 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 1,29410 | 1294 | 0,65 | 841 | 0,92 | 774 | 31,48 | 73,11 | |
| | | | | 16,00 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 2,72680 | 2727 | 0,35 | 954 | 0,71 | 678 | 31,78 | 64,61 |
| | | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 2,09950 | 2100 | 0,40 | 840 | 0,96 | 806 | 31,72 | 80,10 |
| | | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,58930 | 1589 | 0,60 | 954 | 0,82 | 782 | 33,12 | 74,15 |
| | | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 1,29170 | 1292 | 0,65 | 840 | 0,92 | 772 | 32,41 | 72,73 |
| | | | 200 (209) | | 600 (610) | 1240 | 1000 | 2,95700 | 2957 | 0,35 | 1035 | 0,64 | 662 | 31,96 | 61,59 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 2,27710 | 2277 | 0,40 | 911 | 0,87 | 792 | 30,04 | 75,53 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,75890 | 1759 | 0,60 | 1055 | 0,77 | 813 | 30,78 | 77,31 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 1,39600 | 1396 | 0,65 | 907 | 0,92 | 835 | 30,21 | 80,90 | |
| | | | 250 (237) | | 600 (610) | 1240 | 1000 | 3,01240 | 3012 | 0,35 | 1054 | 0,62 | 654 | 31,99 | 60,07 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 2,32080 | 2321 | 0,40 | 928 | 0,87 | 808 | 29,10 | 77,97 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,80170 | 1802 | 0,60 | 1081 | 0,77 | 832 | 29,80 | 80,11 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 1,42550 | 1426 | 0,65 | 927 | 0,92 | 852 | 29,69 | 83,36 | |
| | | | 19,00 | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 3,02070 | 3021 | 0,35 | 1057 | 0,64 | 677 | 31,98 | 63,99 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1000 | 2,36610 | 2366 | 0,40 | 946 | 0,86 | 814 | 30,28 | 78,46 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,85960 | 1860 | 0,60 | 1116 | 0,76 | 848 | 30,59 | 81,92 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1000 | 1,48290 | 1483 | 0,65 | 964 | 0,92 | 887 | 29,60 | 88,81 | |
| 250 (237) | 600 (610) | 1240 | | 1000 | 3,07290 | 3073 | 0,35 | 1076 | 0,62 | 667 | 32,14 | 62,05 | | | | |
| | 800 (806) | 1550 | | 1000 | 2,41010 | 2410 | 0,40 | 964 | 0,82 | 791 | 30,86 | 74,41 | | | | |
| | 1000 (1002) | 2015 | | 1000 | 1,90570 | 1906 | 0,60 | 1143 | 0,72 | 823 | 30,56 | 77,88 | | | | |
| | 1200 (1198) | 2170 | | 1000 | 1,51600 | 1516 | 0,65 | 985 | 0,87 | 857 | 30,31 | 82,62 | | | | |
| 300 (293) | 600 (610) | 1240 | | 1000 | 3,13380 | 3134 | 0,35 | 1097 | 0,59 | 647 | 32,61 | 58,68 | | | | |
| | 800 (806) | 1550 | | 1000 | 2,46520 | 2465 | 0,40 | 986 | 0,82 | 809 | 30,10 | 77,06 | | | | |
| | 1000 (1002) | 2015 | | 1000 | 1,96830 | 1968 | 0,60 | 1181 | 0,71 | 838 | 30,15 | 79,75 | | | | |
| | 1200 (1198) | 2170 | | 1000 | 1,56430 | 1564 | 0,65 | 1017 | 0,86 | 874 | 29,77 | 84,87 | | | | |

5.1.1 INTERAÇÃO COM A FORÇA CORTANTE

Após examinar os resultados das TAB. 5.1 a 5.6, uma primeira conclusão pode ser estabelecida.

Analizando vigas com parâmetros idênticos, porém com alturas diferentes, em alguns casos observa-se um crescimento da força última com a altura. Como o escoamento da alma ou o enrugamento da alma (flambagem local da alma) ou a flambagem global da alma não apresentam essa tendência, isto é, crescimento da força com aumento da altura, conclui-se que a justificativa para o aumento da força última com a altura é a interação entre os efeitos da força local aplicada e da força cortante gerada. Essa interação é apresentada na forma da Eq.5.1.

$$\left(\frac{P_S}{P_R}\right)^\alpha + \left(\frac{V_S}{V_R}\right)^\beta = C \quad (5.1)$$

onde, P_S = força localizada solicitante
 P_R = força localizada resistente
 V_S = força cortante solicitante
 V_R = força cortante resistente
 α , β e C = valores a serem definidos.

Sendo assim, é necessário que se conheçam as resistências à força cortante das vigas, V_R , para que se consiga determinar P_R . Segundo PLAIS (2009), documento técnico da Codeme Engenharia e SIOKOLA (1999), documento técnico da Zeman & Co, adota-se para tal resistência o procedimento desenvolvido por PASTERNAK (1996), baseado no trabalho de EASLEY (1975), que leva em conta ensaios e análises numéricas realizados na Universidade de Viena. Esse procedimento é resumido a seguir.

A força cortante resistente para a alma senoidal é dada pela Eq.5.2:

$$V_{Rk} = \kappa_t \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} t_w H \quad (5.2)$$

Onde: t_w = espessura da alma senoidal
 f_{yw} = resistência ao escoamento do aço da alma senoidal
 H = altura da viga, conforme FIG.4.1
 κ_t = coeficiente de redução, função do índice de esbeltez reduzido, $\bar{\lambda}_p$.

Segundo o documento técnico da Zeman, SIOKOLA (1999):

Para $\bar{\lambda}_p < 1,0 \rightarrow \kappa_t = 1,0$

Para $\bar{\lambda}_p > 1,0 \rightarrow \kappa_t = \frac{1}{\bar{\lambda}_p^{1,5}}$

sendo $\bar{\lambda}_p$ = índice de esbeltez reduzido = $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\sqrt{3}\tau_{pi,g}}}$ (5.3)

onde $\tau_{pi,g}$ = tensão de flambagem crítica = $\tau_{pi,g} = \frac{32,4}{t_w H^2} \sqrt{D_x D_y^3}$ (5.4)

Os valores das rigidezes D_x e D_y são calculados considerando que a alma comporta-se como placa ortotrópica, conforme Eq.5.5:

$$D_x = \frac{Et_w^3 w}{12 s} \quad \text{e} \quad D_y = \frac{EI_{wy}}{w} \quad (5.5)$$

Onde: E = módulo de elasticidade do aço = 200.000 MPa
 w = comprimento de onda de uma senóide, ver FIG.5.1
 s = comprimento desenvolvido de uma senóide, ver FIG.5.1
 I_{wy} = momento de inércia de uma senóide em relação ao eixo longitudinal (eixo x na FIG.5.1)

$$I_{wy} = 0,158 t_w w^3 \left(\frac{b_w}{w} \right)^{2,12} \quad (\text{no caso da FIG.5.1 a notação correta seria } I_{wx})$$

b_w = dobro da amplitude da senóide, ver FIG.5.1

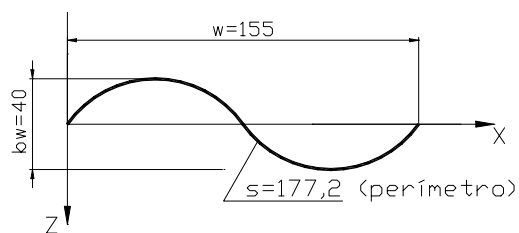


FIGURA 5.1 – Dimensões de uma senóide, em mm

Novamente observa-se que todas as vigas são modeladas com amplitude de 20 mm, independentemente da espessura de 2,0 ou 3,0 mm e, portanto, tem-se apenas um valor para o comprimento desenvolvido, s .

Assim,

$$I_{wy} = 0,158 \times 2,0 \times 155^3 \times \left(\frac{40}{155}\right)^{2,12} \Rightarrow I_{wy} = 66611 \text{mm}^4 \quad \rightarrow \quad \text{para } t_w=2,0 \text{ mm}$$

$$I_{wy} = 0,158 \times 3,0 \times 155^3 \times \left(\frac{40}{155}\right)^{2,12} \Rightarrow I_{wy} = 99916 \text{mm}^4 \quad \rightarrow \quad \text{para } t_w=3,0 \text{ mm}$$

$$D_x = \frac{200000 \times 2^3}{12} \times \frac{155}{177,2} \Rightarrow D_x = 116630 \text{N.mm} \quad \rightarrow \quad \text{para } t_w=2,0 \text{ mm}$$

$$D_x = \frac{200000 \times 3^3}{12} \times \frac{155}{177,2} \Rightarrow D_x = 393623 \text{N.mm} \quad \rightarrow \quad \text{para } t_w=3,0 \text{ mm}$$

$$D_y = \frac{200000 \times 66611}{155} \Rightarrow D_y = 85949677 \text{N.mm} \quad \rightarrow \quad \text{para } t_w=2,0 \text{ mm}$$

$$D_y = \frac{200000 \times 99916}{155} \Rightarrow D_y = 128923870 \text{N.mm} \quad \rightarrow \quad \text{para } t_w=3,0 \text{ mm}$$

Com esses valores, encontra-se a tensão de flambagem crítica, por meio da Eq.5.4:

Para $t_w=2,0$ mm:

$$\tau_{pi,g} = \frac{32,4}{2 \times 610^2} \times \sqrt[4]{116630 \times 85949677^3} \Rightarrow \tau_{pi,g} = 718,19 N / mm^2 \rightarrow \text{para } H=610 \text{ mm}$$

$$\tau_{pi,g} = \frac{32,4}{2 \times 806^2} \times \sqrt[4]{116630 \times 85949677^3} \Rightarrow \tau_{pi,g} = 411,37 N / mm^2 \rightarrow \text{para } H=806 \text{ mm}$$

$$\tau_{pi,g} = \frac{32,4}{2 \times 1002^2} \times \sqrt[4]{116630 \times 85949677^3} \Rightarrow \tau_{pi,g} = 266,17 N / mm^2 \rightarrow \text{para } H=1002 \text{ mm}$$

$$\tau_{pi,g} = \frac{32,4}{2 \times 1198^2} \times \sqrt[4]{116630 \times 85949677^3} \Rightarrow \tau_{pi,g} = 186,20 N / mm^2 \rightarrow \text{para } H=1198 \text{ mm}$$

Para $t_w=3,0$ mm:

$$\tau_{pi,g} = \frac{32,4}{3 \times 610^2} \times \sqrt[4]{393623 \times 128923870^3} \Rightarrow \tau_{pi,g} = 879,60 N / mm^2 \rightarrow \text{para } H=610 \text{ mm}$$

$$\tau_{pi,g} = \frac{32,4}{3 \times 806^2} \times \sqrt[4]{393623 \times 128923870^3} \Rightarrow \tau_{pi,g} = 503,82 N / mm^2 \rightarrow \text{para } H=806 \text{ mm}$$

$$\tau_{pi,g} = \frac{32,4}{3 \times 1002^2} \times \sqrt[4]{393623 \times 128923870^3} \Rightarrow \tau_{pi,g} = 325,99 N / mm^2 \rightarrow \text{p/ } H=1002 \text{ mm}$$

$$\tau_{pi,g} = \frac{32,4}{3 \times 1198^2} \times \sqrt[4]{393623 \times 128923870^3} \Rightarrow \tau_{pi,g} = 228,05 N / mm^2 \rightarrow \text{p/ } H=1198 \text{ mm}$$

Com os valores calculados de $\tau_{pi,g}$, calcula-se o índice de esbeltez reduzido com a Eq.5.3.

Para $tw=2,0$ mm:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{300}{\sqrt{3} \times 718,19}} = 0,49 \quad \rightarrow \quad \text{para } H=610 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{300}{\sqrt{3} \times 411,37}} = 0,65 \quad \rightarrow \quad \text{para } H=806 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{300}{\sqrt{3} \times 266,17}} = 0,81 \quad \rightarrow \quad \text{para } H=1002 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{300}{\sqrt{3} \times 186,20}} = 0,96 \quad \rightarrow \quad \text{para } H=1198 \text{ mm}$$

Para $tw=3,0$ mm:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{300}{\sqrt{3} \times 879,60}} = 0,44 \quad \rightarrow \quad \text{para } H=610 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{300}{\sqrt{3} \times 503,82}} = 0,59 \quad \rightarrow \quad \text{para } H=806 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{300}{\sqrt{3} \times 325,99}} = 0,73 \quad \rightarrow \quad \text{para } H=1002 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{300}{\sqrt{3} \times 228,05}} = 0,87 \quad \rightarrow \quad \text{para } H=1198 \text{ mm}$$

Finalmente, chega-se então ao cálculo da resistência à força cortante das vigas, Eq.5.2:

Para $t_w=2,0$ mm:

$$V_{Rk} = 1,0 \times \frac{30}{\sqrt{3}} \times 61 \times 0,2 = 211kN \quad \rightarrow \quad \text{para } H=610 \text{ mm}$$

$$V_{Rk} = 1,0 \times \frac{30}{\sqrt{3}} \times 80,6 \times 0,2 = 279kN \quad \rightarrow \quad \text{para } H=806 \text{ mm}$$

$$V_{Rk} = 1,0 \times \frac{30}{\sqrt{3}} \times 100,2 \times 0,2 = 347kN \quad \rightarrow \quad \text{para } H=1002 \text{ mm}$$

$$V_{Rk} = 1,0 \times \frac{30}{\sqrt{3}} \times 119,8 \times 0,2 = 415kN \quad \rightarrow \quad \text{para } H=1198 \text{ mm}$$

Para $t_w=3,0$ mm:

$$V_{Rk} = 1,0 \times \frac{30}{\sqrt{3}} \times 61 \times 0,3 = 317kN \quad \rightarrow \quad \text{para } H=610 \text{ mm}$$

$$V_{Rk} = 1,0 \times \frac{30}{\sqrt{3}} \times 80,6 \times 0,3 = 419kN \quad \rightarrow \quad \text{para } H=806 \text{ mm}$$

$$V_{Rk} = 1,0 \times \frac{30}{\sqrt{3}} \times 100,2 \times 0,3 = 520kN \quad \rightarrow \quad \text{para } H=1002 \text{ mm}$$

$$V_{Rk} = 1,0 \times \frac{30}{\sqrt{3}} \times 119,8 \times 0,3 = 622kN \quad \rightarrow \quad \text{para } H=1198 \text{ mm}$$

Mesmo sendo pequena a influência da mesa na resistência ao cisalhamento, este efeito adicional é considerado no cálculo da resistência à força cortante, como a seguir: (ver FIG.5.2 para definição das variáveis).

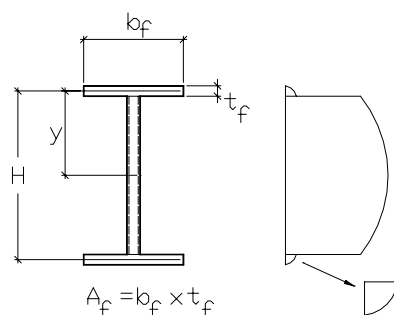


FIGURA 5.2 – Diagrama de tensão de cisalhamento no perfil

$$F_f \cong \frac{\tau_f t_f}{2} b_f$$

Sendo: $\tau_f = \frac{V_R (A_f y)}{b_f I}$

$$F_f \cong \frac{V_R (A_f y) t_f}{b_f I} \frac{b_f}{2}$$

Substituindo, $A_f = b_f \times t_f$

$$I = 2(b_f \times t_f) y^2 \quad (\text{desprezando a alma})$$

Então,

$$F_f = \frac{V_R t_f}{4y} \quad \rightarrow \quad \text{para uma mesa}$$

$$F_f = \frac{V_R t_f}{2y} = F_f = \frac{V_R \times t_f}{H} \quad \rightarrow \quad \text{para duas mesas}$$

Assim, a força cortante resistente total consiste em:

$$V_R = V_{alma} + V_{mesa}$$

$$V_R = V_{alma} + \frac{V_R \times t_f}{H}$$

$$V_R - \frac{V_R \times t_f}{H} = V_{alma}$$

$$V_R = \frac{V_{alma}}{\left(1 - \frac{t_f}{H}\right)} \quad \text{onde } V_{alma} = V_{Rk}, \text{ dado pela Eq.5.2}$$

A TAB.5.7 apresenta as resistências à força cortante para as vigas analisadas.

TABELA 5.7 – Resultados das resistências à força cortante

| DADOS DA VIGA | | | | $t_w=2,0$ mm | | $t_w=3,0$ mm | |
|---------------|---------------|-------------|-------------|------------------|---------------|------------------|---------------|
| t_f (mm) | b_f (mm) | H (mm) | L (mm) | V_{Rk} (kN) | V_R (kN) | V_{Rk} (kN) | V_R (kN) |
| 12,50 | 153 | 610 | 1240 | 211 | 216 | 317 | 324 |
| | | 806 | 1550 | 279 | 284 | 419 | 425 |
| | | 1002 | 2015 | 347 | 351 | 521 | 527 |
| | | 1198 | 2170 | 415 | 419 | 622 | 629 |
| | 209 | 610 | 1240 | 211 | 216 | 317 | 324 |
| | | 806 | 1550 | 279 | 284 | 419 | 425 |
| | | 1002 | 2015 | 347 | 351 | 521 | 527 |
| | | 1198 | 2170 | 415 | 419 | 622 | 629 |
| 16,00 | 153 | 610 | 1240 | 211 | 217 | 317 | 326 |
| | | 806 | 1550 | 279 | 285 | 419 | 427 |
| | | 1002 | 2015 | 347 | 353 | 521 | 529 |
| | | 1198 | 2170 | 415 | 421 | 622 | 631 |
| | 209 | 610 | 1240 | 211 | 217 | 317 | 326 |
| | | 806 | 1550 | 279 | 285 | 419 | 427 |
| | | 1002 | 2015 | 347 | 353 | 521 | 529 |
| | | 1198 | 2170 | 415 | 421 | 622 | 631 |
| | 237 | 610 | 1240 | 211 | 217 | 317 | 326 |
| | | 806 | 1550 | 279 | 285 | 419 | 427 |
| | | 1002 | 2015 | 347 | 353 | 521 | 529 |
| | | 1198 | 2170 | 415 | 421 | 622 | 631 |
| 19,00 | 209 | 610 | 1240 | 211 | 218 | 317 | 327 |
| | | 806 | 1550 | 279 | 286 | 419 | 429 |
| | | 1002 | 2015 | 347 | 354 | 521 | 531 |
| | | 1198 | 2170 | 415 | 422 | 622 | 633 |
| | 237 | 610 | 1240 | 211 | 218 | 317 | 327 |
| | | 806 | 1550 | 279 | 286 | 419 | 429 |
| | | 1002 | 2015 | 347 | 354 | 521 | 531 |
| | | 1198 | 2170 | 415 | 422 | 622 | 633 |
| | 293 | 610 | 1240 | 211 | 218 | 317 | 327 |
| | | 806 | 1550 | 279 | 286 | 419 | 429 |
| | | 1002 | 2015 | 347 | 354 | 521 | 531 |
| | | 1198 | 2170 | 415 | 422 | 622 | 633 |

Definida a força cortante resistente, define-se também a força cortante solicitante.

Para as vigas com o carregamento considerado neste estudo, ou seja, uma força concentrada no meio da viga, sabe-se que a força cortante imediatamente abaixo da força aplicada é nula, considerando que a força se distribui em certo comprimento. Porém, observa-se que a partir desse ponto há uma distribuição praticamente uniforme da tensão normal vertical na alma ao longo de certo comprimento, conforme mostra a FIG.5.3.

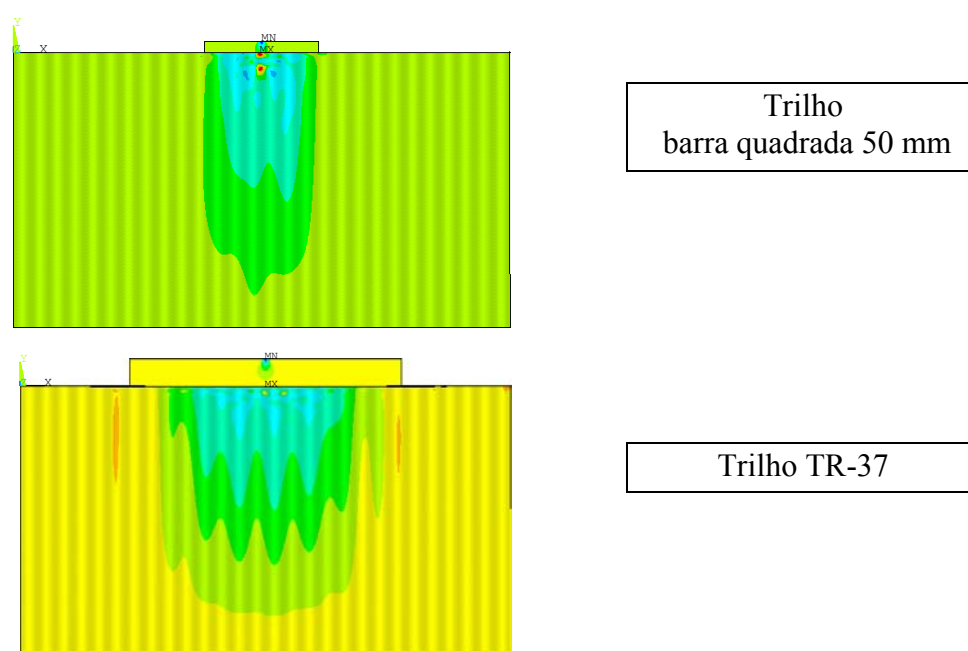


FIGURA 5.3 – Diagramas de tensões normais verticais na alma dos perfis

Portanto, para essas vigas, como se observa na FIG.5.4, a força cortante tem uma redução igual ao valor da força concentrada P_S em um comprimento L' e, portanto, reduz-se aproximadamente à metade de P_S entre a seção onde atua VI e a seção por onde passa a resultante da força concentrada. Assim, entre os valores $VI=P_S/2$ e zero, tomou-se como o valor da força cortante solicitante, V_S , que interage com a força localizada solicitante, P_S , igual a $VI - P_S/4$, do lado da segurança (uma vez que o valor médio seria zero).

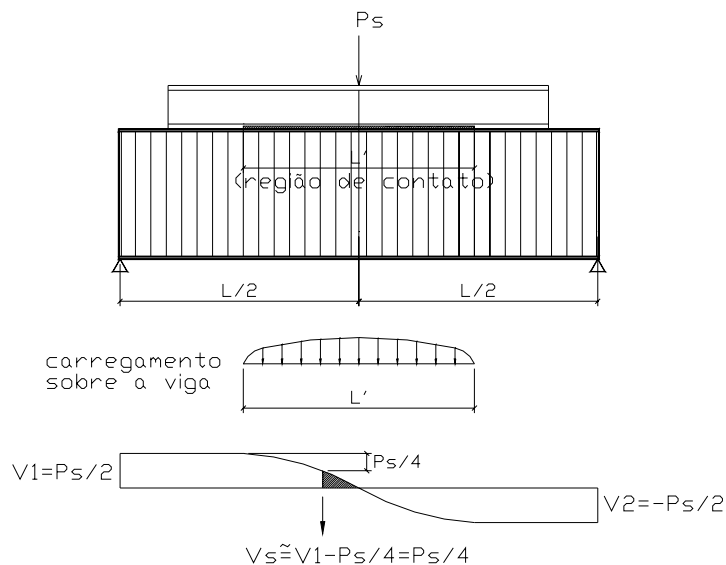


FIGURA 5.4 – Força cortante solicitante, V_s , considerada na interação no estudo

Para um caso geral, esta força cortante solicitante é apresentada no diagrama de força cortante mostrado na FIG.5.5 e seu valor é igual a $V_{max} - P/4$.

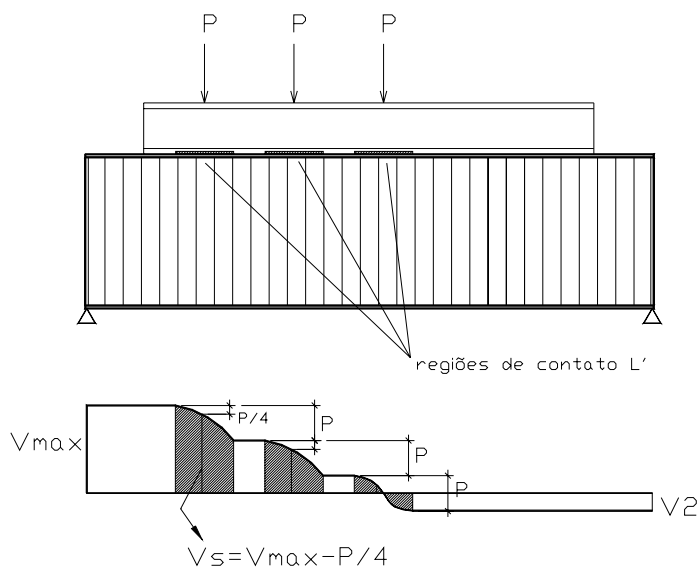


FIGURA 5.5 – Força cortante solicitante, V_s , considerada na interação para casos gerais

5.1.2 RESISTÊNCIA À FORÇA LOCALIZADA

Conhecido o valor de P_S , força última retirada do Ansys, e da relação V_S/V_R , diversas análises e considerações são necessárias para se chegar aos valores de α , β e C e conseqüentemente da força localizada resistente, P_R , da Eq.5.6.

$$\left(\frac{P_S}{P_R}\right)^\alpha + \left(\frac{V_S}{V_R}\right)^\beta = C \quad (5.6)$$

Para isso isola-se essa força como na Eq.5.7:

$$P_R = \sqrt[\alpha]{\frac{P_S^\alpha}{C - \left(V_S/V_R\right)^\beta}} \quad (5.7)$$

Anteriormente às análises à procura da força P_R , estabelece-se uma redução de 5% dos valores das forças últimas retiradas do Ansys, P_S , com base no valor de 4%, mostrado no item 4.2. Isto é, admite-se que para uma malha mais refinada que a adotada neste trabalho, os valores obtidos das forças últimas poderiam ser da ordem de 5% inferiores aos obtidos com a malha utilizada.

As TAB.5.8, 5.9 e 5.10 mostram os resultados do Ansys já reduzidos, conforme abordado acima, e as relações entre forças cortantes solicitantes e resistentes, resultados estes necessários para aplicação da Eq.5.7.

TABELA 5.8 – Resultados necessários para determinar os valores de P_R
para trilho barra quadrada 50 mm

| DADOS DA VIGA | | | | $t_w = 2,0 \text{ mm}$ | | | $t_w = 3,0 \text{ mm}$ | | | |
|---------------|------------|------------|------------------|------------------------|-----------|------------------------------------|------------------------|-----------|------------------------------------|-----|
| Tipo Trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (Ansys) (mm) | V_{max}/V_R | V_S/V_R | Força última Ansys*0,95 P_S (kN) | V_{max}/V_R | V_S/V_R | Força última Ansys*0,95 P_S (kN) | |
| barra 50 | 12,50 | 153 | 610 | 0,539 | 0,270 | 233 | 0,523 | 0,261 | 338 | |
| | | | 806 | 0,412 | 0,206 | 234 | 0,437 | 0,218 | 371 | |
| | | | 1002 | 0,334 | 0,167 | 235 | 0,377 | 0,188 | 397 | |
| | | | 1198 | 0,285 | 0,142 | 239 | 0,308 | 0,154 | 388 | |
| | | 209 | 610 | 0,543 | 0,271 | 234 | 0,525 | 0,263 | 340 | |
| | | | 806 | 0,414 | 0,207 | 235 | 0,417 | 0,208 | 355 | |
| | | | 1002 | 0,335 | 0,168 | 236 | 0,369 | 0,184 | 389 | |
| | | | 1198 | 0,289 | 0,144 | 242 | 0,321 | 0,161 | 404 | |
| | 16,00 | 153 | 610 | 0,551 | 0,275 | 239 | 0,532 | 0,266 | 346 | |
| | | | 806 | 0,411 | 0,206 | 234 | 0,410 | 0,205 | 351 | |
| | | | 1002 | 0,333 | 0,167 | 235 | 0,385 | 0,193 | 408 | |
| | | | 1198 | 0,279 | 0,139 | 234 | 0,323 | 0,162 | 408 | |
| | | 209 | 610 | 0,557 | 0,278 | 242 | 0,537 | 0,268 | 350 | |
| | | | 806 | 0,425 | 0,212 | 242 | 0,414 | 0,207 | 354 | |
| | | | 1002 | 0,344 | 0,172 | 243 | 0,389 | 0,195 | 412 | |
| | | | 1198 | 0,281 | 0,141 | 237 | 0,333 | 0,167 | 420 | |
| | | 237 | 610 | 0,571 | 0,286 | 248 | 0,539 | 0,269 | 351 | |
| | | | 806 | 0,426 | 0,213 | 243 | 0,416 | 0,208 | 355 | |
| | | | 1002 | 0,345 | 0,173 | 244 | 0,389 | 0,194 | 411 | |
| | | | 1198 | 0,284 | 0,142 | 239 | 0,333 | 0,166 | 420 | |
| | | 19,00 | 209 | 610 | 0,598 | 0,299 | 261 | 0,568 | 0,284 | 372 |
| | | | | 806 | 0,437 | 0,218 | 250 | 0,424 | 0,212 | 364 |
| | | | | 1002 | 0,346 | 0,173 | 245 | 0,404 | 0,202 | 429 |
| | | | | 1198 | 0,291 | 0,145 | 245 | 0,338 | 0,169 | 427 |
| | 237 | | 610 | 0,602 | 0,301 | 262 | 0,562 | 0,281 | 368 | |
| | | | 806 | 0,439 | 0,220 | 251 | 0,426 | 0,213 | 366 | |
| | | | 1002 | 0,356 | 0,178 | 252 | 0,404 | 0,202 | 429 | |
| | | | 1198 | 0,293 | 0,146 | 247 | 0,338 | 0,169 | 427 | |
| | 293 | | 610 | 0,614 | 0,307 | 268 | 0,584 | 0,292 | 382 | |
| | | | 806 | 0,454 | 0,227 | 259 | 0,445 | 0,223 | 382 | |
| | | | 1002 | 0,360 | 0,180 | 254 | 0,417 | 0,208 | 442 | |
| | | | 1198 | 0,303 | 0,152 | 256 | 0,353 | 0,176 | 446 | |

TABELA 5.9 – Resultados necessários para determinar os valores de P_R
para trilho TR-25

| DADOS DA VIGA | | | | $t_w = 2,0 \text{ mm}$ | | | $t_w = 3,0 \text{ mm}$ | | |
|---------------|------------|------------|------------------|------------------------|-----------|------------------------------------|------------------------|-----------|------------------------------------|
| Tipo Trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (Ansys) (mm) | V_{max}/V_R | V_S/V_R | Força última Ansys*0,95 P_S (kN) | V_{max}/V_R | V_S/V_R | Força última Ansys*0,95 P_S (kN) |
| TR-25 | 12,50 | 153 | 610 | 0,930 | 0,465 | 401 | 0,916 | 0,458 | 593 |
| | | | 806 | 0,737 | 0,369 | 418 | 0,782 | 0,391 | 666 |
| | | | 1002 | 0,622 | 0,311 | 437 | 0,635 | 0,317 | 669 |
| | | | 1198 | 0,522 | 0,261 | 438 | 0,529 | 0,265 | 666 |
| | | 209 | 610 | 0,927 | 0,464 | 400 | 0,928 | 0,464 | 601 |
| | | | 806 | 0,769 | 0,384 | 436 | 0,792 | 0,396 | 674 |
| | | | 1002 | 0,631 | 0,315 | 443 | 0,671 | 0,336 | 708 |
| | | | 1198 | 0,523 | 0,262 | 439 | 0,555 | 0,277 | 698 |
| | 16,00 | 153 | 610 | 0,925 | 0,463 | 401 | 0,920 | 0,460 | 599 |
| | | | 806 | 0,734 | 0,367 | 418 | 0,780 | 0,390 | 667 |
| | | | 1002 | 0,604 | 0,302 | 426 | 0,647 | 0,323 | 684 |
| | | | 1198 | 0,513 | 0,256 | 431 | 0,562 | 0,281 | 709 |
| | | 209 | 610 | 0,924 | 0,462 | 401 | 0,924 | 0,462 | 601 |
| | | | 806 | 0,733 | 0,366 | 417 | 0,792 | 0,396 | 677 |
| | | | 1002 | 0,579 | 0,289 | 408 | 0,670 | 0,335 | 709 |
| | | | 1198 | 0,513 | 0,257 | 432 | 0,570 | 0,285 | 719 |
| | | 237 | 610 | 0,924 | 0,462 | 401 | 0,923 | 0,462 | 601 |
| | | | 806 | 0,733 | 0,366 | 417 | 0,807 | 0,404 | 690 |
| | | | 1002 | 0,591 | 0,295 | 417 | 0,648 | 0,324 | 685 |
| | | | 1198 | 0,517 | 0,258 | 435 | 0,589 | 0,294 | 743 |
| | 19,00 | 209 | 610 | 0,923 | 0,461 | 402 | 0,921 | 0,461 | 603 |
| | | | 806 | 0,732 | 0,366 | 419 | 0,798 | 0,399 | 684 |
| | | | 1002 | 0,591 | 0,295 | 418 | 0,635 | 0,317 | 674 |
| | | | 1198 | 0,513 | 0,257 | 433 | 0,581 | 0,291 | 736 |
| | | 237 | 610 | 0,923 | 0,461 | 403 | 0,922 | 0,461 | 603 |
| | | | 806 | 0,732 | 0,366 | 419 | 0,792 | 0,396 | 679 |
| | | | 1002 | 0,591 | 0,295 | 418 | 0,660 | 0,330 | 701 |
| | | | 1198 | 0,517 | 0,259 | 436 | 0,552 | 0,276 | 698 |
| | | 293 | 610 | 0,924 | 0,462 | 403 | 0,923 | 0,461 | 604 |
| | | | 806 | 0,733 | 0,366 | 419 | 0,768 | 0,384 | 659 |
| | | | 1002 | 0,592 | 0,296 | 419 | 0,642 | 0,321 | 681 |
| | | | 1198 | 0,503 | 0,252 | 425 | 0,578 | 0,289 | 731 |

TABELA 5.10 – Resultados necessários para determinar os valores de P_R
para trilho TR-37

| DADOS DA VIGA | | | | $t_w=2,0$ mm | | | $t_w=3,0$ mm | | |
|---------------|------------|------------|------------------|---------------|-----------|------------------------------------|---------------|-----------|------------------------------------|
| Tipo Trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (Ansys) (mm) | V_{max}/V_R | V_S/V_R | Força última Ansys*0,95 P_S (kN) | V_{max}/V_R | V_S/V_R | Força última Ansys*0,95 P_S (kN) |
| TR-37 | 12,50 | 153 | 610 | 0,992 | 0,496 | 428 | 0,966 | 0,483 | 625 |
| | | | 806 | 0,896 | 0,448 | 508 | 0,854 | 0,427 | 726 |
| | | | 1002 | 0,724 | 0,362 | 509 | 0,688 | 0,344 | 726 |
| | | | 1198 | 0,625 | 0,313 | 524 | 0,564 | 0,282 | 709 |
| | | 209 | 610 | 0,987 | 0,494 | 426 | 0,959 | 0,480 | 621 |
| | | | 806 | 0,868 | 0,434 | 492 | 0,879 | 0,439 | 747 |
| | | | 1002 | 0,741 | 0,371 | 521 | 0,717 | 0,359 | 756 |
| | | | 1198 | 0,605 | 0,302 | 507 | 0,584 | 0,292 | 735 |
| | 16,00 | 153 | 610 | 0,983 | 0,492 | 427 | 0,989 | 0,494 | 644 |
| | | | 806 | 0,866 | 0,433 | 493 | 0,896 | 0,448 | 766 |
| | | | 1002 | 0,732 | 0,366 | 516 | 0,702 | 0,351 | 743 |
| | | | 1198 | 0,611 | 0,306 | 514 | 0,582 | 0,291 | 734 |
| | | 209 | 610 | 0,980 | 0,490 | 425 | 0,967 | 0,483 | 629 |
| | | | 806 | 0,864 | 0,432 | 492 | 0,881 | 0,440 | 753 |
| | | | 1002 | 0,701 | 0,350 | 494 | 0,730 | 0,365 | 772 |
| | | | 1198 | 0,609 | 0,305 | 512 | 0,628 | 0,314 | 793 |
| | | 237 | 610 | 0,980 | 0,490 | 425 | 0,954 | 0,477 | 621 |
| | | | 806 | 0,863 | 0,431 | 492 | 0,898 | 0,449 | 767 |
| | | | 1002 | 0,716 | 0,358 | 505 | 0,747 | 0,374 | 791 |
| | | | 1198 | 0,591 | 0,295 | 497 | 0,642 | 0,321 | 810 |
| | 19,00 | 209 | 610 | 1,023 | 0,512 | 446 | 0,982 | 0,491 | 643 |
| | | | 806 | 0,859 | 0,429 | 491 | 0,901 | 0,451 | 773 |
| | | | 1002 | 0,726 | 0,363 | 514 | 0,759 | 0,379 | 806 |
| | | | 1198 | 0,605 | 0,303 | 510 | 0,666 | 0,333 | 842 |
| | | 237 | 610 | 0,976 | 0,488 | 426 | 0,968 | 0,484 | 633 |
| | | | 806 | 0,859 | 0,429 | 491 | 0,875 | 0,438 | 751 |
| | | | 1002 | 0,697 | 0,348 | 493 | 0,737 | 0,368 | 782 |
| | | | 1198 | 0,618 | 0,309 | 521 | 0,644 | 0,322 | 814 |
| 293 | | 610 | 0,975 | 0,488 | 425 | 0,940 | 0,470 | 615 | |
| | | 806 | 0,849 | 0,424 | 485 | 0,895 | 0,448 | 768 | |
| | | 1002 | 0,705 | 0,353 | 499 | 0,750 | 0,375 | 797 | |
| | | 1198 | 0,602 | 0,301 | 508 | 0,657 | 0,328 | 831 | |

Diante dos resultados do Ansys, observa-se que as vigas onde a relação entre a força cortante solicitante máxima e a resistente, V_{max}/V_R , apresenta valores maiores que 0,94 falham essencialmente por cisalhamento da alma. Assim, os casos onde essa relação é superior a 0,94 não foram levados em conta para estabelecer a fórmula de interação.

Portanto, as 16 vigas com $H=600$ mm, trilho TR-37, são desconsideradas na análise dos resultados.

5.1.2.1 RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO LOCAL DA ALMA

Na expectativa de que as vigas com falha ocorrida por escoamento da alma apresentem valores coerentes de resistência à força localizada isolada, P_R , de forma que, para vigas com todos os parâmetros idênticos, porém com alturas diferentes, estes valores de P_R sejam praticamente os mesmos, os expoentes adotados para a equação de interação, apresentada na Eq.5.1, são:

$$\alpha=1,25 \quad / \quad \beta=1,25 \quad / \quad C=1$$

Então, para o escoamento da alma define-se a equação de interação conforme Eq.5.8.

$$\left(\frac{P_S}{P_R}\right)^{1,25} + \left(\frac{V_S}{V_R}\right)^{1,25} = 1 \quad (5.8)$$

Para estabelecer estes expoentes e encontrar o valor de P_R para as vigas onde a falha se deu por escoamento da alma, foram feitas diversas tentativas com subsequente análise de resultados, por meio do programa Excel, de forma que, conforme dito anteriormente, os valores dessas resistências se igualem para um grupo de vigas com mesmos parâmetros, porém com alturas diferentes. O expoente de 1,25, apresentado na Eq.5.8, foi o que resultou em melhor concordância com as análises numéricas. Ressalta-se que este valor também é mencionado em outras referências bibliográficas.

Mais adiante são mostradas tabelas finais, TAB.5.11 a 5.13, onde estão descritos todas as vigas com seus modos de falhas definidos.

Nas vigas com o modo de falha por escoamento da alma, o melhor ajuste encontrado entre as resistências P_R obtidas com a Eq.5.8, para as vigas de um mesmo grupo, resultou em um afastamento de aproximadamente $\pm 8,5\%$ entre os valores extremos e o valor médio, para que fosse resguardada a coerência nas conclusões.

A FIG.5.6 mostra a deformada de uma viga com modo de falha escoamento da alma.

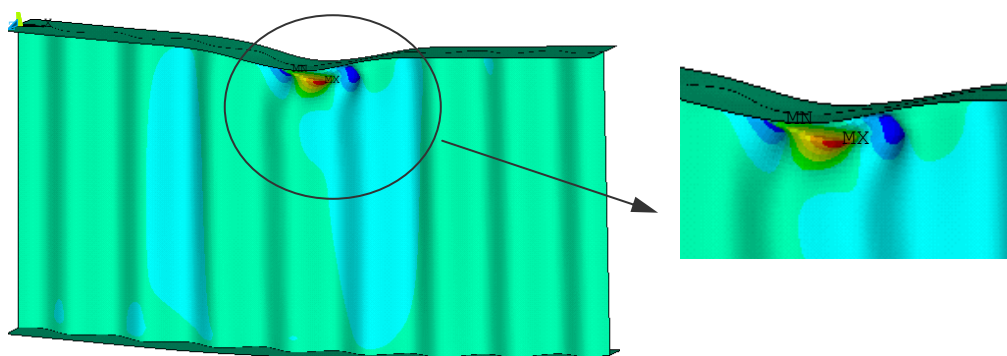


FIGURA 5.6 – Modo de falha escoamento da alma

5.1.2.2 RESISTÊNCIA AO ENRUGAMENTO DA ALMA

Outro estado limite último obtido é o enrugamento da alma. Esse modo de falha acontece com uma resistência à força localizada inferior ou aproximadamente igual à do escoamento. Com essa premissa, após avaliação dos resultados, conclui-se que a interação desse fenômeno com a força cortante apresenta-se bem mais discreta. Para isso, a equação de interação para o caso de enrugamento fica definida conforme a Eq.5.9

$$\left(\frac{P_S}{P_R}\right) + \left(\frac{V_S}{V_R}\right)^3 = 1 \quad (5.9)$$

Outra constatação com relação ao enrugamento é que a força resistente apresenta considerável variação para vigas com diferentes trilhos e pequenas variações decorrentes da influência da área da mesa e das alturas das vigas.

A FIG.5.7 mostra a deformada de uma viga com modo de falha enrugamento da alma.

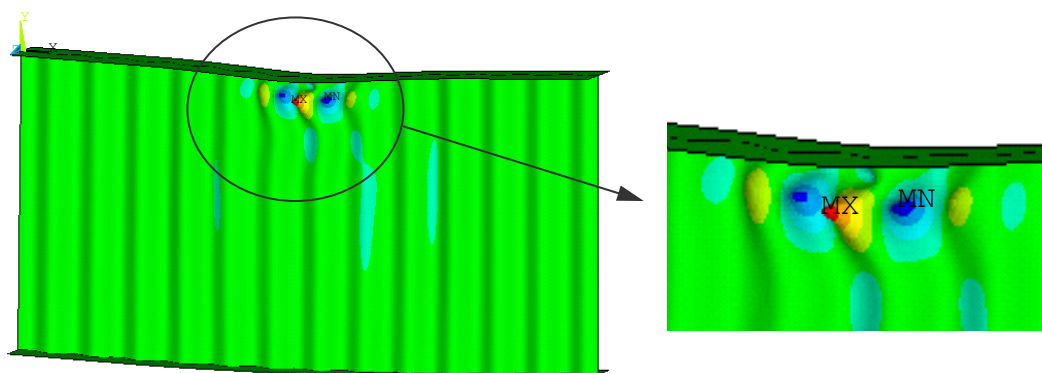


FIGURA 5.7 – Modo de falha enrugamento da alma

Para o enrugamento, também nas TAB.5.11 a 5.13, apresentadas mais adiante, pode-se ver uma dispersão máxima de $\pm 5,5\%$ das resistências extremas com relação a média das resistências P_R , obtidas com a Eq.5.9, para vigas do mesmo grupo, com variação na altura.

5.1.2.3 RESISTÊNCIA A FLAMBAGEM

Outro modo de falha também encontrado, flambagem global da alma, desenvolve-se em vigas com alturas e trilhos maiores. A flambagem global da alma acontece em vigas mais altas solicitadas por forças aplicadas sobre o trilho TR-37, pelo fato deste trilho possuir uma altura maior e então a força aplicada localizada chegar à viga com uma abrangência maior, reduzindo a ocorrência de problemas localizados.

A deformada para este modo de falha é mostrada na FIG.5.8.

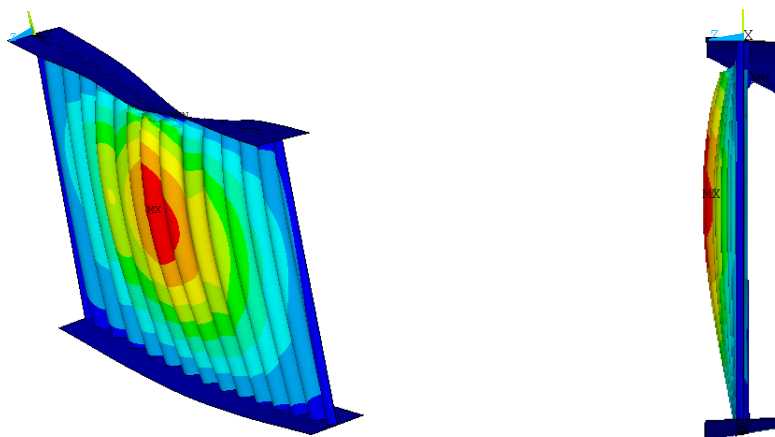


FIGURA 5.8 – Modo de falha flambagem global da alma

Para a flambagem global da alma as resistências P_R obtidas devem ser inferiores às resistências ao enrugamento e conseqüentemente ao escoamento.

Admite-se que não haja interação com a força cortante nesse caso.

5.1.3 RESULTADOS FINAIS

As TAB.5.11, 5.12 e 5.13 apresentam todos os modos de falhas, definidos após diversas análises dos resultados, e os valores calculados de P_R para cada viga por meio dos resultados do Ansys e das equações de interação.

TABELA 5.11 – Identificação final dos modos de Falhas
para trilho barra quadrada 50 mm

| DADOS DA VIGA | | | | $t_w=2,0$ mm | | | $t_w=3,0$ mm | | |
|---------------|------------|------------|------------------|--------------|----------------------|---------------|--------------|----------------------|---------------|
| Tipo Trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (Ansys) (mm) | P_S (kN) | Interação P_R (kN) | Modo de Falha | P_S (kN) | Interação P_R (kN) | Modo de Falha |
| barra 50 | 12,50 | 153 | 610 | 233 | 237 | ENRUGAMENTO | 338 | 399 | ESCOAMENTO |
| | | | 806 | 234 | 236 | ENRUGAMENTO | 371 | 423 | ESCOAMENTO |
| | | | 1002 | 235 | 236 | ENRUGAMENTO | 397 | 441 | ESCOAMENTO |
| | | | 1198 | 239 | 240 | ENRUGAMENTO | 388 | 421 | ESCOAMENTO |
| | | 209 | 610 | 234 | 239 | ENRUGAMENTO | 340 | 401 | ESCOAMENTO |
| | | | 806 | 235 | 237 | ENRUGAMENTO | 355 | 400 | ESCOAMENTO |
| | | | 1002 | 236 | 237 | ENRUGAMENTO | 389 | 431 | ESCOAMENTO |
| | | | 1198 | 242 | 243 | ENRUGAMENTO | 404 | 440 | ESCOAMENTO |
| | 16,00 | 153 | 610 | 239 | 244 | ENRUGAMENTO | 346 | 410 | ESCOAMENTO |
| | | | 806 | 234 | 236 | ENRUGAMENTO | 351 | 395 | ESCOAMENTO |
| | | | 1002 | 235 | 236 | ENRUGAMENTO | 408 | 455 | ESCOAMENTO |
| | | | 1198 | 234 | 235 | ENRUGAMENTO | 408 | 445 | ESCOAMENTO |
| | | 209 | 610 | 242 | 247 | ENRUGAMENTO | 350 | 415 | ESCOAMENTO |
| | | | 806 | 242 | 244 | ENRUGAMENTO | 354 | 399 | ESCOAMENTO |
| | | | 1002 | 243 | 244 | ENRUGAMENTO | 412 | 460 | ESCOAMENTO |
| | | | 1198 | 237 | 237 | ENRUGAMENTO | 420 | 460 | ESCOAMENTO |
| | 237 | 610 | 248 | 254 | ENRUGAMENTO | 351 | 417 | ESCOAMENTO | |
| | | 806 | 243 | 245 | ENRUGAMENTO | 355 | 401 | ESCOAMENTO | |
| | | 1002 | 244 | 245 | ENRUGAMENTO | 411 | 459 | ESCOAMENTO | |
| | | 1198 | 239 | 239 | ENRUGAMENTO | 420 | 460 | ESCOAMENTO | |
| | 19,00 | 209 | 610 | 261 | 268 | ENRUGAMENTO | 372 | 447 | ESCOAMENTO |
| | | | 806 | 250 | 252 | ENRUGAMENTO | 364 | 412 | ESCOAMENTO |
| | | | 1002 | 245 | 246 | ENRUGAMENTO | 429 | 482 | ESCOAMENTO |
| | | | 1198 | 245 | 246 | ENRUGAMENTO | 427 | 468 | ESCOAMENTO |
| | | 237 | 610 | 262 | 270 | ENRUGAMENTO | 368 | 442 | ESCOAMENTO |
| | | | 806 | 251 | 254 | ENRUGAMENTO | 366 | 415 | ESCOAMENTO |
| | | | 1002 | 252 | 253 | ENRUGAMENTO | 429 | 482 | ESCOAMENTO |
| | | | 1198 | 247 | 248 | ENRUGAMENTO | 427 | 468 | ESCOAMENTO |
| | | 293 | 610 | 268 | 276 | ENRUGAMENTO | 382 | 464 | ESCOAMENTO |
| | | | 806 | 259 | 262 | ENRUGAMENTO | 382 | 436 | ESCOAMENTO |
| | | | 1002 | 254 | 256 | ENRUGAMENTO | 442 | 499 | ESCOAMENTO |
| | | | 1198 | 256 | 257 | ENRUGAMENTO | 446 | 492 | ESCOAMENTO |

dispersão máx. com relação à média do grupo = $\pm 8,5\%$
(para escoamento)

dispersão máx. com relação a média do grupo = $\pm 5,5\%$
(para enrugamento)

TABELA 5.12 – Identificação final dos modos de Falhas - para trilho TR-25

| DADOS DA VIGA | | | | $t_w=2,0$ mm | | | $t_w=3,0$ mm | | |
|---------------|------------|------------|------------------|--------------|----------------------|---------------|--------------|----------------------|---------------|
| Tipo Trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (Ansys) (mm) | P_S (kN) | Interação P_R (kN) | Modo de Falha | P_S (kN) | Interação P_R (kN) | Modo de Falha |
| TR-25 | 12,50 | 153 | 610 | 401 | 446 | ENRUGAMENTO | 593 | 865 | ESCOAMENTO |
| | | | 806 | 418 | 440 | ENRUGAMENTO | 666 | 895 | ESCOAMENTO |
| | | | 1002 | 437 | 451 | ENRUGAMENTO | 669 | 691 | ENRUGAMENTO |
| | | | 1198 | 438 | 446 | ENRUGAMENTO | 666 | 678 | ENRUGAMENTO |
| | | 209 | 610 | 400 | 445 | ENRUGAMENTO | 601 | 884 | ESCOAMENTO |
| | | | 806 | 436 | 462 | ENRUGAMENTO | 674 | 912 | ESCOAMENTO |
| | | | 1002 | 443 | 458 | ENRUGAMENTO | 708 | 736 | ENRUGAMENTO |
| | | | 1198 | 439 | 447 | ENRUGAMENTO | 698 | 713 | ENRUGAMENTO |
| | 16,00 | 153 | 610 | 401 | 446 | ENRUGAMENTO | 599 | 877 | ESCOAMENTO |
| | | | 806 | 418 | 440 | ENRUGAMENTO | 667 | 895 | ESCOAMENTO |
| | | | 1002 | 426 | 438 | ENRUGAMENTO | 684 | 708 | ENRUGAMENTO |
| | | | 1198 | 431 | 439 | ENRUGAMENTO | 709 | 726 | ENRUGAMENTO |
| | | 209 | 610 | 401 | 445 | ENRUGAMENTO | 601 | 882 | ESCOAMENTO |
| | | | 806 | 417 | 439 | ENRUGAMENTO | 677 | 915 | ESCOAMENTO |
| | | | 1002 | 408 | 419 | ENRUGAMENTO | 709 | 737 | ENRUGAMENTO |
| | | | 1198 | 432 | 439 | ENRUGAMENTO | 719 | 736 | ENRUGAMENTO |
| | | 237 | 610 | 401 | 445 | ENRUGAMENTO | 601 | 882 | ESCOAMENTO |
| | | | 806 | 417 | 439 | ENRUGAMENTO | 690 | 941 | ESCOAMENTO |
| | | | 1002 | 417 | 428 | ENRUGAMENTO | 685 | 710 | ENRUGAMENTO |
| | | | 1198 | 435 | 443 | ENRUGAMENTO | 743 | 762 | ENRUGAMENTO |
| | 19,00 | 209 | 610 | 402 | 446 | ENRUGAMENTO | 603 | 883 | ESCOAMENTO |
| | | | 806 | 419 | 440 | ENRUGAMENTO | 684 | 928 | ESCOAMENTO |
| | | | 1002 | 418 | 429 | ENRUGAMENTO | 674 | 696 | ENRUGAMENTO |
| | | | 1198 | 433 | 441 | ENRUGAMENTO | 736 | 754 | ENRUGAMENTO |
| | | 237 | 610 | 403 | 446 | ENRUGAMENTO | 603 | 884 | ESCOAMENTO |
| | | | 806 | 419 | 440 | ENRUGAMENTO | 679 | 918 | ESCOAMENTO |
| | | | 1002 | 418 | 429 | ENRUGAMENTO | 701 | 727 | ENRUGAMENTO |
| | | | 1198 | 436 | 444 | ENRUGAMENTO | 698 | 713 | ENRUGAMENTO |
| | | 293 | 610 | 403 | 447 | ENRUGAMENTO | 604 | 885 | ESCOAMENTO |
| | | | 806 | 419 | 441 | ENRUGAMENTO | 659 | 879 | ESCOAMENTO |
| | | | 1002 | 419 | 430 | ENRUGAMENTO | 681 | 704 | ENRUGAMENTO |
| | | | 1198 | 425 | 431 | ENRUGAMENTO | 731 | 749 | ENRUGAMENTO |

TABELA 5.13 – Identificação final dos modos de Falhas - para trilho TR-37

| DADOS DA VIGA | | | | $t_w=2,0$ mm | | | $t_w=3,0$ mm | | |
|---------------|------------|------------|------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------|
| Tipo Trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (Ansys) (mm) | P_S (kN) | Interação P_R (kN) | Modo de Falha | P_S (kN) | Interação P_R (kN) | Modo de Falha |
| TR-37 | 12,50 | 153 | 610 | 428 | | FORÇA CORTANTE | 625 | | FORÇA CORTANTE |
| | | | 806 | 508 | 558 | ENRUGAMENTO | 726 | 1019 | ESCOAMENTO |
| | | | 1002 | 509 | 534 | ENRUGAMENTO | 726 | 726 | FLAMBAGEM |
| | | | 1198 | 524 | 524 | FLAMBAGEM | 709 | 709 | FLAMBAGEM |
| | | 209 | 610 | 426 | | FORÇA CORTANTE | 621 | | FORÇA CORTANTE |
| | | | 806 | 492 | 536 | ENRUGAMENTO | 747 | 1065 | ESCOAMENTO |
| | | | 1002 | 521 | 549 | ENRUGAMENTO | 756 | 756 | FLAMBAGEM |
| | | | 1198 | 507 | 507 | FLAMBAGEM | 735 | 735 | FLAMBAGEM |
| | 16,00 | 153 | 610 | 427 | | FORÇA CORTANTE | 644 | | FORÇA CORTANTE |
| | | | 806 | 493 | 537 | ENRUGAMENTO | 766 | 1104 | ESCOAMENTO |
| | | | 1002 | 516 | 543 | ENRUGAMENTO | 743 | 743 | FLAMBAGEM |
| | | | 1198 | 514 | 514 | FLAMBAGEM | 734 | 734 | FLAMBAGEM |
| | | 209 | 610 | 425 | | FORÇA CORTANTE | 629 | | FORÇA CORTANTE |
| | | | 806 | 492 | 535 | ENRUGAMENTO | 753 | 1074 | ESCOAMENTO |
| | | | 1002 | 494 | 517 | ENRUGAMENTO | 772 | 811 | ENRUGAMENTO |
| | | | 1198 | 512 | 512 | FLAMBAGEM | 793 | 793 | FLAMBAGEM |
| | 237 | 610 | 425 | | FORÇA CORTANTE | 621 | | FORÇA CORTANTE | |
| | | 806 | 492 | 534 | ENRUGAMENTO | 767 | 1107 | ESCOAMENTO | |
| | | 1002 | 505 | 530 | ENRUGAMENTO | 791 | 834 | ENRUGAMENTO | |
| | | 1198 | 497 | 497 | FLAMBAGEM | 810 | 810 | FLAMBAGEM | |
| | 19,00 | 209 | 610 | 446 | | FORÇA CORTANTE | 643 | | FORÇA CORTANTE |
| | | | 806 | 491 | 533 | ENRUGAMENTO | 773 | 1118 | ESCOAMENTO |
| | | | 1002 | 514 | 539 | ENRUGAMENTO | 806 | 852 | ENRUGAMENTO |
| | | | 1198 | 510 | 510 | FLAMBAGEM | 842 | 842 | FLAMBAGEM |
| | | 237 | 610 | 426 | | FORÇA CORTANTE | 633 | | FORÇA CORTANTE |
| | | | 806 | 491 | 533 | ENRUGAMENTO | 751 | 1068 | ESCOAMENTO |
| | | | 1002 | 493 | 515 | ENRUGAMENTO | 782 | 823 | ENRUGAMENTO |
| | | | 1198 | 521 | 521 | FLAMBAGEM | 814 | 814 | FLAMBAGEM |
| 293 | 610 | 425 | | FORÇA CORTANTE | 615 | | FORÇA CORTANTE | | |
| | 806 | 485 | 526 | ENRUGAMENTO | 768 | 1106 | ESCOAMENTO | | |
| | 1002 | 499 | 522 | ENRUGAMENTO | 797 | 841 | ENRUGAMENTO | | |
| | 1198 | 508 | 508 | FLAMBAGEM | 831 | 831 | FLAMBAGEM | | |

Observa-se nas TAB.5.12 e 5.13 que, para grupos de vigas que só diferem na altura e que apresentam tanto escoamento como enrugamento da alma, o modo de falha escoamento da alma acontece em vigas com menores alturas e o enrugamento nas maiores alturas, o que é correto fisicamente, devido a maior rigidez para alturas menores.

Como citado anteriormente, as resistências ao escoamento dos trilhos foram consideradas com valores elevados, de forma que eles ficassem no regime elástico. Nas TAB.5.1 a 5.6, apresentadas no item 5.1, nota-se que as tensões de von Mises são mais elevadas que as usuais nas vigas com espessuras de alma de 3,0 mm e trilho barra quadrada de 50 mm. Sendo assim, essas barras quadradas deveriam ter resistência ao escoamento muito alta ou, se não tiverem, reduzem as resistências locais determinadas neste trabalho, devido à plastificação e conseqüente perda de rigidez do trilho.

5.1.4 FORÇAS LIMITES NO REGIME ELÁSTICO

Até aqui o presente estudo visa o dimensionamento de uma viga, sujeita a forças localizadas, considerando os estados limites últimos já mencionados previamente. Porém a sollicitação de uma viga de rolamento em um determinado ponto é totalmente variável dependendo da posição da ponte rolante. Sob repetidos ciclos de carregamento e descarregamento podem ocorrer mudanças nas propriedades dos materiais conduzindo a viga à fadiga. “Essas mudanças causam uma falha prematura e inesperada sob níveis de tensões abaixo dos estabelecidos em projeto.” (TEIXEIRA, 2004, p.2).

A fadiga poderia levar a viga à ruptura decorrente do crescimento instável de fissuras, principalmente em ligações soldadas, por serem pontos críticos de concentração de tensões. Na viga de alma senoidal, a redução da necessidade de enrijecedores e a execução da solda de composição do perfil com alta qualidade e desempenho cooperam para a redução da fadiga. Entretanto, altos níveis de concentração de tensões sob forças localizadas variáveis podem determinar o redimensionamento da estrutura.

É importante que, por meio de estudos mais detalhados, se pesquise a resistência à fadiga de vigas de rolamento de almas senoidais. Para efeito de fadiga é importante que as tensões de cálculo não atinjam a resistência ao escoamento de cálculo do material. As forças localizadas F_{es} correspondentes ao início do escoamento da alma, retiradas das análises numéricas, são apresentadas nas TAB.5.14 a 5.19, para uma comparação com as forças localizadas últimas F_u .

Conclui-se que as forças F_{es} são iguais a aproximadamente 40% das forças últimas F_u .

TABELA 5.14 – Forças de início de escoamento
($t_w=2,0$ mm e trilho barra quadrada de 50 mm)

| e (mm) | t_w (mm) | tipo trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (mm) | L (mm) | Força de Flambagem F_{fl} (kN) | Força Última F_u (kN) | Força no início do escoamento F_{es} (kN) | F_u/F_{es} | |
|-------------|---------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|---|----------------------------------|--|--------------|------|
| 0 | 2,0 | barra 50 | 12,50 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 688 | 245 | 83 | 0,34 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 691 | 246 | 83 | 0,34 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 694 | 247 | 83 | 0,34 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 653 | 251 | 114 | 0,45 | |
| | | | | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 692 | 246 | 83 | 0,34 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 694 | 247 | 83 | 0,34 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 697 | 248 | 84 | 0,34 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 689 | 255 | 121 | 0,47 | |
| | | | | 16,00 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 707 | 252 | 99 | 0,39 |
| | | | | | | 800 (806) | 1550 | 709 | 247 | 99 | 0,40 |
| | | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 711 | 247 | 100 | 0,40 |
| | | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 715 | 247 | 107 | 0,43 |
| | | | | | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 714 | 254 | 100 | 0,39 |
| | | | | | | 800 (806) | 1550 | 716 | 255 | 100 | 0,39 |
| | | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 718 | 256 | 100 | 0,39 |
| | | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 722 | 249 | 108 | 0,43 |
| | | | 250 (237) | | 600 (610) | 1240 | 717 | 261 | 100 | 0,38 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 718 | 256 | 101 | 0,39 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 721 | 257 | 101 | 0,39 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 725 | 251 | 114 | 0,45 | |
| | | | 19,00 | | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 738 | 275 | 103 | 0,38 |
| | | | | | | 800 (806) | 1550 | 739 | 263 | 103 | 0,39 |
| | | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 741 | 258 | 118 | 0,46 |
| | | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 745 | 258 | 117 | 0,45 |
| | | | | 250 (237) | 600 (610) | 1240 | 742 | 276 | 104 | 0,38 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 743 | 264 | 104 | 0,39 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 745 | 265 | 119 | 0,45 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 750 | 260 | 118 | 0,45 | |
| | | | | 300 (293) | 600 (610) | 1240 | 750 | 282 | 105 | 0,37 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 750 | 273 | 105 | 0,38 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 752 | 268 | 120 | 0,45 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 757 | 269 | 119 | 0,44 | |

TABELA 5.15 – Forças de início de escoamento
($t_w=2,0$ mm e trilho TR-25)

| e (mm) | t_w (mm) | tipo trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (mm) | L (mm) | Força de Flambagem F_{fl} (kN) | Força Última F_u (kN) | Força no início do escoamento F_{es} (kN) | F_u/F_{es} |
|--------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|-------------|---|----------------------------------|--|--------------|
| 0 | 2,0 | TR-25 | 12,50 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 1312 | 422 | 161 | 0,38 |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1265 | 440 | 152 | 0,34 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1070 | 460 | 187 | 0,41 |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 845 | 461 | 203 | 0,44 |
| | | | | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1308 | 421 | 160 | 0,38 |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1261 | 459 | 151 | 0,33 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1152 | 467 | 173 | 0,37 |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 895 | 462 | 188 | 0,41 |
| | | | 16,00 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 1313 | 423 | 184 | 0,43 |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1264 | 440 | 177 | 0,40 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1166 | 449 | 204 | 0,45 |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 923 | 454 | 221 | 0,49 |
| | | | | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1311 | 422 | 184 | 0,43 |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1263 | 439 | 177 | 0,40 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1236 | 430 | 198 | 0,46 |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 984 | 454 | 207 | 0,45 |
| | | | 250 (237) | 600 (610) | 1240 | 1311 | 422 | 183 | 0,43 | |
| | | | | 800 (806) | 1550 | 1262 | 439 | 177 | 0,40 | |
| | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1235 | 439 | 185 | 0,42 | |
| | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1004 | 458 | 211 | 0,46 | |
| | | | 19,00 | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1316 | 424 | 184 | 0,43 |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1266 | 441 | 203 | 0,46 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1239 | 440 | 217 | 0,49 |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1055 | 456 | 222 | 0,49 |
| | | | | 250 (237) | 600 (610) | 1240 | 1316 | 424 | 184 | 0,43 |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1267 | 441 | 203 | 0,46 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1240 | 440 | 217 | 0,49 |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1078 | 459 | 226 | 0,49 |
| 300 (293) | 600 (610) | 1240 | 1318 | 424 | 184 | 0,43 | | | | |
| | 800 (806) | 1550 | 1268 | 441 | 203 | 0,46 | | | | |
| | 1000 (1002) | 2015 | 1241 | 441 | 217 | 0,49 | | | | |
| | 1200 (1198) | 2170 | 1112 | 447 | 233 | 0,52 | | | | |

TABELA 5.16 – Forças de início de escoamento
($t_w=2,0$ mm e trilho TR-37)

| t_w (mm) | tipo trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (mm) | L (mm) | Força de Flambagem F_{fl} (kN) | Força Última F_u (kN) | Força no início do escoamento F_{es} (kN) | F_u/F_{es} |
|---------------|----------------|---------------|----------------|----------------|-------------|---|----------------------------------|--|--------------|
| 2,0 | TR-37 | 12,50 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 1570 | 451 | 192 | 0,43 |
| | | | | 800 (806) | 1550 | 1454 | 535 | 204 | 0,38 |
| | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1103 | 536 | 232 | 0,43 |
| | | | | 1200 (1198) | 2170 | 884 | 552 | 230 | 0,42 |
| | | | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1563 | 448 | 191 | 0,43 |
| | | | | 800 (806) | 1550 | 1490 | 518 | 209 | 0,40 |
| | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1203 | 548 | 216 | 0,39 |
| | | | | 1200 (1198) | 2170 | 945 | 534 | 215 | 0,40 |
| | | 16,00 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 1565 | 449 | 219 | 0,49 |
| | | | | 800 (806) | 1550 | 1492 | 519 | 239 | 0,46 |
| | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1191 | 543 | 250 | 0,46 |
| | | | | 1200 (1198) | 2170 | 957 | 541 | 249 | 0,46 |
| | | | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1560 | 448 | 218 | 0,49 |
| | | | | 800 (806) | 1550 | 1488 | 518 | 238 | 0,46 |
| | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1295 | 520 | 233 | 0,45 |
| | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1025 | 539 | 266 | 0,49 |
| | | 250 (237) | 600 (610) | 1240 | 1559 | 447 | 218 | 0,49 | |
| | | | 800 (806) | 1550 | 1487 | 517 | 238 | 0,46 | |
| | | | 1000 (1002) | 2015 | 1323 | 532 | 238 | 0,45 | |
| | | | 1200 (1198) | 2170 | 1045 | 523 | 238 | 0,45 | |
| | | 19,00 | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1561 | 470 | 219 | 0,47 |
| | | | | 800 (806) | 1550 | 1486 | 517 | 238 | 0,46 |
| | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1365 | 541 | 287 | 0,53 |
| | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1088 | 537 | 283 | 0,53 |
| | | | 250 (237) | 600 (610) | 1240 | 1561 | 448 | 219 | 0,49 |
| | | | | 800 (806) | 1550 | 1486 | 517 | 238 | 0,46 |
| | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1395 | 519 | 251 | 0,48 |
| | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1110 | 548 | 289 | 0,53 |
| 300 (293) | 600 (610) | 1240 | 1561 | 448 | 218 | 0,49 | | | |
| | 800 (806) | 1550 | 1485 | 511 | 238 | 0,47 | | | |
| | 1000 (1002) | 2015 | 1435 | 525 | 258 | 0,49 | | | |
| | 1200 (1198) | 2170 | 1142 | 534 | 260 | 0,49 | | | |

TABELA 5.17 – Forças de início de escoamento
($t_w=3,0$ mm e trilho barra quadrada de 50 mm)

| e (mm) | t_w (mm) | tipo trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (mm) | L (mm) | Força de Flambagem F_{fl} (kN) | Força Última F_u (kN) | Força no início do escoamento F_{es} (kN) | F_u/F_{es} |
|--------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|-------------|---|----------------------------------|--|--------------|
| 0 | 3,0 | barra 50 | 12,50 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 1590 | 356 | 111 | 0,31 |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1504 | 391 | 120 | 0,31 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1136 | 418 | 136 | 0,33 |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 908 | 408 | 136 | 0,33 |
| | | | | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1597 | 358 | 112 | 0,31 |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1582 | 373 | 127 | 0,34 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1204 | 409 | 120 | 0,29 |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 956 | 425 | 143 | 0,34 |
| | | | 16,00 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 1628 | 365 | 142 | 0,39 |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1619 | 369 | 130 | 0,35 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1277 | 429 | 153 | 0,36 |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1023 | 429 | 153 | 0,36 |
| | | | | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1643 | 368 | 144 | 0,39 |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1635 | 373 | 131 | 0,35 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1372 | 434 | 165 | 0,38 |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1093 | 443 | 164 | 0,37 |
| | | | 250 (237) | 600 (610) | 1240 | 1649 | 369 | 144 | 0,39 | |
| | | | | 800 (806) | 1550 | 1640 | 374 | 131 | 0,35 | |
| | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1406 | 433 | 169 | 0,39 | |
| | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1119 | 442 | 168 | 0,38 | |
| | | | 19,00 | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1693 | 391 | 148 | 0,38 |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1680 | 383 | 168 | 0,44 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1526 | 452 | 183 | 0,41 |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1215 | 450 | 182 | 0,41 |
| | | | | 250 (237) | 600 (610) | 1240 | 1702 | 387 | 149 | 0,38 |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1689 | 385 | 169 | 0,44 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1569 | 452 | 188 | 0,42 |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1249 | 450 | 187 | 0,42 |
| 300 (293) | 600 (610) | 1240 | | 1716 | 402 | 150 | 0,37 | | | |
| | 800 (806) | 1550 | | 1705 | 402 | 170 | 0,42 | | | |
| | 1000 (1002) | 2015 | | 1639 | 466 | 164 | 0,35 | | | |
| | 1200 (1198) | 2170 | | 1305 | 470 | 196 | 0,42 | | | |

TABELA 5.18 – Forças de início de escoamento

 $(t_w=3,0$ mm e trilho TR-25)

| e (mm) | t_w (mm) | tipo trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (mm) | L (mm) | Força de Flambagem F_{fl} (kN) | Força Última F_u (kN) | Força no início do escoamento F_{es} (kN) | F_u/F_{es} |
|--------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|-------------|---|----------------------------------|--|--------------|
| 0 | 3,0 | TR-25 | 12,50 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 2661 | 624 | 186 | 0,30 |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1946 | 701 | 195 | 0,28 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1432 | 705 | 215 | 0,30 |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1151 | 701 | 201 | 0,29 |
| | | | | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 2823 | 632 | 198 | 0,31 |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 2112 | 710 | 211 | 0,30 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1572 | 745 | 189 | 0,25 |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1229 | 735 | 200 | 0,27 |
| | | | 16,00 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 2815 | 630 | 246 | 0,39 |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 2089 | 702 | 251 | 0,36 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1559 | 720 | 234 | 0,32 |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1249 | 747 | 244 | 0,33 |
| | | | | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 2826 | 633 | 247 | 0,39 |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 2254 | 712 | 225 | 0,32 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1704 | 746 | 256 | 0,34 |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1339 | 757 | 261 | 0,34 |
| | | | 250 (237) | 600 (610) | 1240 | 2825 | 633 | 247 | 0,39 | |
| | | | | 800 (806) | 1550 | 2298 | 726 | 230 | 0,32 | |
| | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1743 | 722 | 261 | 0,36 | |
| | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1367 | 782 | 266 | 0,34 | |
| | | | 19,00 | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 2833 | 635 | 248 | 0,39 |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 2369 | 720 | 284 | 0,39 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1818 | 709 | 273 | 0,38 |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1435 | 774 | 280 | 0,36 |
| | | | | 250 (237) | 600 (610) | 1240 | 2834 | 635 | 248 | 0,39 |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 2416 | 715 | 242 | 0,34 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1863 | 738 | 279 | 0,38 |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1468 | 735 | 286 | 0,39 |
| 300 (293) | 600 (610) | 1240 | | 2837 | 636 | 248 | 0,39 | | | |
| | 800 (806) | 1550 | | 2478 | 694 | 248 | 0,36 | | | |
| | 1000 (1002) | 2015 | | 1927 | 717 | 289 | 0,40 | | | |
| | 1200 (1198) | 2170 | | 1518 | 769 | 296 | 0,38 | | | |

TABELA 5.19 – Forças de início de escoamento

 $(t_w=3,0$ mm e trilho TR-37)

| e (mm) | t_w (mm) | tipo trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (mm) | L (mm) | Força de Flambagem F_{fl} (kN) | Força Última F_u (kN) | Força no início do escoamento F_{es} (kN) | F_u/F_{es} | |
|--------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|---|----------------------------------|--|--------------|------|
| 0 | 3,0 | TR-37 | 12,50 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 2611 | 658 | 228 | 0,35 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 1971 | 765 | 236 | 0,31 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1464 | 764 | 264 | 0,34 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1196 | 746 | 272 | 0,36 | |
| | | | | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 2872 | 653 | 251 | 0,38 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 2162 | 787 | 259 | 0,33 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1638 | 796 | 246 | 0,31 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1294 | 774 | 252 | 0,33 | |
| | | | | 16,00 | 150 (153) | 600 (610) | 1240 | 2727 | 678 | 286 | 0,42 |
| | | | | | | 800 (806) | 1550 | 2100 | 806 | 294 | 0,36 |
| | | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1589 | 782 | 286 | 0,37 |
| | | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1292 | 772 | 294 | 0,38 |
| | | | 200 (209) | | 600 (610) | 1240 | 2957 | 662 | 259 | 0,39 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 2277 | 792 | 273 | 0,34 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1759 | 813 | 264 | 0,32 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1396 | 835 | 272 | 0,33 | |
| | | | 250 (237) | | 600 (610) | 1240 | 3012 | 654 | 264 | 0,40 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 2321 | 808 | 279 | 0,34 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1802 | 832 | 270 | 0,32 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1426 | 852 | 278 | 0,33 | |
| | | | 19,00 | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 3021 | 677 | 317 | 0,47 | |
| | | | | | 800 (806) | 1550 | 2366 | 814 | 331 | 0,41 | |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1860 | 848 | 335 | 0,39 | |
| | | | | | 1200 (1198) | 2170 | 1483 | 887 | 337 | 0,38 | |
| 250 (237) | 600 (610) | 1240 | | 3073 | 667 | 323 | 0,48 | | | | |
| | 800 (806) | 1550 | | 2410 | 791 | 289 | 0,37 | | | | |
| | 1000 (1002) | 2015 | | 1906 | 823 | 286 | 0,35 | | | | |
| | 1200 (1198) | 2170 | | 1516 | 857 | 345 | 0,40 | | | | |
| 300 (293) | 600 (610) | 1240 | | 3134 | 647 | 274 | 0,42 | | | | |
| | 800 (806) | 1550 | | 2465 | 809 | 296 | 0,37 | | | | |
| | 1000 (1002) | 2015 | | 1968 | 838 | 295 | 0,35 | | | | |
| | 1200 (1198) | 2170 | | 1564 | 874 | 305 | 0,35 | | | | |

5.2 VIGAS CARREGADAS COM EXCENTRICIDADE DE 10,75 mm

A excentricidade é uma questão importante, pois sendo o estudo sobre vigas de almas senoidais trabalhando como vigas de rolamento, ou seja, com um trilho sobre sua mesa superior, é comum situações de desalinhamento do trilho ou até da própria viga no decorrer do funcionamento da ponte rolante. Esse fenômeno pode até comprometer a correta operação da ponte.

Aplicados os procedimentos citados no capítulo 4, porém com o carregamento excêntrico, e adotando os parâmetros citados no item 4.1, foram obtidos os resultados das análises numéricas mostrados nas TAB.5.20 e 5.21.

Também na mesma tabela, esses resultados são comparados com os resultados das vigas com excentricidade nula.

Observa-se que valores próximos, para excentricidade nula e de 10,75 mm, só ocorrem nas vigas com trilho de barra quadrada de 50 mm. Para os outros trilhos, TR-25 e TR-37, a diferença foi bastante considerável.

Isso leva-se a concluir que para o trilho de barra quadrada de 50 mm, ou seja, trilho de altura pequena, a excentricidade de 10,75 mm não fez diferença na forças últimas das vigas. Porém, para os trilhos com alturas maiores, TR-25 e TR-37, essa excentricidade fez muita diferença e sugere-se que estes trilhos sejam discretizados com seções e excentricidades mais reais em trabalhos futuros.

Segundo NOVAK E MACHACEK (2000), vigas com força localizada aplicada com excentricidade até um valor de 20 mm não têm suas resistências locais da alma senoidal influenciadas pela excentricidade. A fórmula proposta para a força última localizada das vigas é considerada válida para excentricidades nulas e até de 20 mm.

É importante lembrar que os ensaios feitos por esses pesquisadores foram com o trilho de seção retangular com altura de 30 mm, ou seja, uma altura pequena e próxima daquela do trilho barra quadrada de 50 mm.

Para os trilhos utilizados no presente trabalho não foi confirmado que a excentricidade de até 20 mm não afeta a resistência local das vigas de rolamento.

TABELA 5.20 - Resultados para vigas sujeitas a carregamento com excentricidade $e=10,75$ mm ($t_w=2,0$ mm)

| EXCENTRICIDADE $e=10,75$ mm | | | | | | | | | | | | | | $e=0$ | |
|-----------------------------|---------------|--------------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|-------------|----------------------|------------|------------------|------------------|----------------------|--------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| DADOS DA VIGA | | | | | | | ANÁLISE DE FLAMBAGEM | | | ANÁLISE PLÁSTICA | | | | | |
| e (mm) | t_w (mm) | t_{p0} trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (mm) | L (mm) | Força Aplic. (kN) | auto-valor | F_{fl} (kN) | parc. | Força Aplic. (kN) | fração | F_u ($e=10,75$) (kN) | F_u ($e=0$) (kN) | $F_{u(e=10,75)} / F_{u(e=0)}$ |
| 10,75 | 2,0 | barra 50 | 12,50 | 200 (209) | 600 (610) 1000 (1002) | 1240 | 1000 | 0,75415 | 754 | 0,35 | 264 | 0,89 | 235 | 246 | 1,05 |
| | | | | 2015 | 1000 | 0,75316 | 753 | 0,35 | 264 | 0,89 | 235 | 248 | 1,06 | | |
| | | | 16,00 | 200 (209) | 600 (610) 1000 (1002) | 1240 | 1000 | 0,77279 | 773 | 0,35 | 270 | 0,94 | 254 | 254 | 1,00 |
| | | | | 2015 | 1000 | 0,77044 | 770 | 0,35 | 270 | 0,90 | 243 | 256 | 1,05 | | |
| | | | 19,00 | 250 (237) | 600 (610) 1000 (1002) | 1240 | 1000 | 0,79912 | 799 | 0,35 | 280 | 0,95 | 266 | 276 | 1,04 |
| | | | | 2015 | 1000 | 0,79573 | 796 | 0,35 | 279 | 0,94 | 262 | 265 | 1,01 | | |
| | | TR-25 | 12,50 | 200 (209) | 600 (610) 1000 (1002) | 1240 | 1000 | 1,35530 | 1355 | 0,35 | 474 | 0,69 | 327 | 421 | 1,29 |
| | | | | 2015 | 1000 | 1,13350 | 1134 | 0,35 | 397 | 0,79 | 313 | 467 | 1,49 | | |
| | | | 16,00 | 200 (209) | 600 (610) 1000 (1002) | 1240 | 1000 | 1,35740 | 1357 | 0,35 | 475 | 0,72 | 342 | 422 | 1,23 |
| | | | | 2015 | 1000 | 1,23990 | 1240 | 0,35 | 434 | 0,81 | 352 | 430 | 1,22 | | |
| | | | 19,00 | 250 (237) | 600 (610) 1000 (1002) | 1240 | 1000 | 1,36200 | 1362 | 0,35 | 477 | 0,74 | 353 | 424 | 1,20 |
| | | | | 2015 | 1000 | 1,28530 | 1285 | 0,35 | 450 | 0,86 | 387 | 440 | 1,14 | | |
| | | TR-37 | 12,50 | 200 (209) | 600 (610) 1000 (1002) | 1240 | 1000 | 1,62040 | 1620 | 0,35 | 567 | 0,62 | 352 | 448 | 1,28 |
| | | | | 2015 | 1000 | 1,18350 | 1184 | 0,35 | 414 | 0,64 | 265 | 548 | 2,07 | | |
| | | | 16,00 | 200 (209) | 600 (610) 1000 (1002) | 1240 | 1000 | 1,61690 | 1617 | 0,35 | 566 | 0,62 | 351 | 448 | 1,28 |
| | | | | 2015 | 1000 | 1,27790 | 1278 | 0,35 | 447 | 0,64 | 286 | 520 | 1,82 | | |
| 19,00 | 250 (237) | | 600 (610) 1000 (1002) | 1240 | 1000 | 1,61530 | 1615 | 0,35 | 565 | 0,64 | 362 | 448 | 1,24 | | |
| | 2015 | | 1000 | 1,38020 | 1380 | 0,35 | 483 | 0,66 | 319 | 519 | 1,63 | | | | |

TABELA 5.21 - Resultados para vigas sujeitas a carregamento com excentricidade
 $e=10,75$ mm ($t_w=3,0$ mm)

| EXCENTRICIDADE $e=10,75$ mm | | | | | | | | | | | | | | $e=0$ | |
|-----------------------------|---------------|----------------|---------------|---------------|----------------|-------------|-------------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------------|-------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| DADOS DA VIGA | | | | | | | ANÁLISE DE FLAMBAGEM | | | ANÁLISE PLÁSTICA | | | | | |
| e (mm) | t_w (mm) | tipo trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (mm) | L (mm) | Força Aplic. (kN) | auto- valor | F_{fl} (kN) | parc. | Força Aplic. (kN) | fra- ção | F_u ($e=10,75$) (kN) | F_u ($e=0$) (kN) | $F_{u(e=10,75)}$ / $F_{u(e=0)}$ |
| 10,75 | 3,0 | barra 50 | 12,50 | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 1,70030 | 1700 | 0,35 | 595 | 0,59 | 351 | 358 | 1,02 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,23280 | 1233 | 0,35 | 431 | 0,87 | 375 | 409 | 1,09 |
| | | | 16,00 | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 1,74240 | 1742 | 0,35 | 610 | 0,62 | 378 | 368 | 0,97 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,40530 | 1405 | 0,35 | 492 | 0,86 | 423 | 434 | 1,02 |
| | | | 19,00 | 250 (237) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 1,79750 | 1798 | 0,35 | 629 | 0,64 | 403 | 387 | 0,96 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,60380 | 1604 | 0,35 | 561 | 0,82 | 457 | 452 | 0,99 |
| | | TR-25 | 12,50 | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 2,83710 | 2837 | 0,35 | 993 | 0,41 | 402 | 632 | 1,57 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,54220 | 1542 | 0,35 | 540 | 0,69 | 370 | 745 | 2,02 |
| | | | 16,00 | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 2,92700 | 2927 | 0,35 | 1024 | 0,48 | 487 | 633 | 1,30 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,67700 | 1677 | 0,35 | 587 | 0,71 | 414 | 746 | 1,80 |
| | | | 19,00 | 250 (237) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 2,94170 | 2942 | 0,35 | 1030 | 0,49 | 505 | 635 | 1,26 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,83890 | 1839 | 0,35 | 644 | 0,73 | 467 | 738 | 1,58 |
| | | TR-37 | 12,50 | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 2,79400 | 2794 | 0,35 | 978 | 0,51 | 494 | 653 | 1,32 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,60750 | 1608 | 0,35 | 563 | 0,48 | 270 | 796 | 2,95 |
| | | | 16,00 | 200 (209) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 2,90480 | 2905 | 0,35 | 1017 | 0,51 | 513 | 662 | 1,29 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,73190 | 1732 | 0,35 | 606 | 0,52 | 315 | 813 | 2,58 |
| | | | 19,00 | 250 (237) | 600 (610) | 1240 | 1000 | 3,02560 | 3026 | 0,35 | 1059 | 0,51 | 535 | 667 | 1,25 |
| | | | | | 1000 (1002) | 2015 | 1000 | 1,88090 | 1881 | 0,35 | 658 | 0,52 | 342 | 823 | 2,40 |

6

PROPOSIÇÕES DE MÉTODOS DE CÁLCULO E COMPARAÇÕES COM RESULTADOS DE OUTROS PESQUISADORES

6.1 GENERALIDADES

Concluídas as análises dos resultados obtidos via análise numérica das vigas modeladas no Ansys, neste capítulo são apresentadas novas propostas para verificação dos estados limites últimos causados por forças localizadas aplicadas em trilhos sobre vigas de rolamento com almas senoidais.

Para as vigas de almas planas, o item 5.7 da norma brasileira ABNT NBR8800:2008, cita alguns estados limites últimos causados por forças localizadas aplicadas diretamente sobre a viga. São eles: flexão local da mesa, escoamento local da alma, enrugamento da alma, flambagem lateral da alma, flambagem da alma por compressão e cisalhamento da alma.

Como neste estudo procuram-se resultados para a resistência a força localizada e sua interação com a força cortante, os comprimentos dos modelos são da ordem de duas vezes a altura da viga, evitando efeitos importantes do momento fletor.

Os estados limites obtidos nas análises associados à força localizada de compressão foram:

- Escoamento ou esmagamento local da alma
- Enrugamento da alma (“web crippling”)
- Flambagem global da alma

A seguir esses estados limites são apresentados com definições, deformadas e fórmulas para determinação das resistências últimas.

Os métodos de cálculo propostos neste capítulo são válidos para as vigas solicitadas com força localizada sobre trilhos com excentricidade nula.

As formulações também são limitadas a vigas com forças localizadas distantes das extremidades pelo menos metade do comprimento de distribuição sobre a viga, L' .

6.2 PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO

6.2.1 ESCOAMENTO LOCAL DA ALMA

O escoamento da alma ou esmagamento da alma por compressão, consiste em escoamento na direção vertical, seguido de enrugamento. Pode haver flexão da mesa nas duas direções, porém sem o escoamento dessa. O escoamento da mesa pode ocorrer após o esmagamento da alma. As tensões na alma são predominantemente de membrana. Ver deformada desse modo de falha na FIG.6.1.

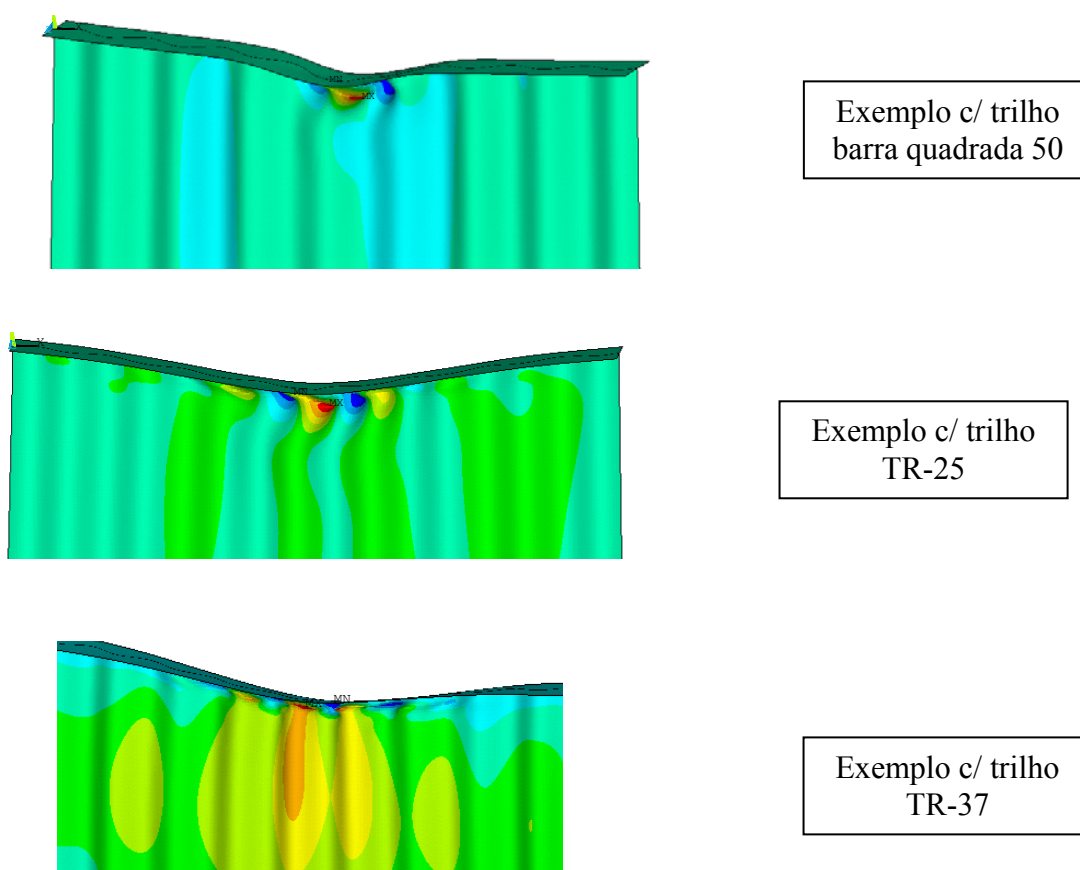


FIGURA 6.1 – Deformações associadas ao escoamento da alma.

A força localizada resistente da alma, proposta para o estado limite escoamento da alma é dada pela Eq. 6.1:

$$P_R = f_{yw} \times t_w \times \frac{s}{w} \times L'_{es} \quad (6.1)$$

Onde: f_{yw} = resistência ao escoamento do aço da alma senoidal = 300 MPa

t_w = espessura da alma senoidal

s = comprimento desenvolvido de uma senóide = 177,2 mm (ver FIG.5.1)

w = comprimento de onda de uma senóide = 155 mm (ver FIG.5.1)

L'_{es} = comprimento de distribuição da força sobre a viga para o caso de escoamento local da alma, dado pela Eq.6.2:

$$L'_{es} = 4,5t_f + 7h_{tr} \left(\frac{h_{tr}}{h_{ref}} \right)^{0,10} \quad (6.2)$$

Sendo: h_{ref} = altura do trilho de referência definido como a barra quadrada 50 = 5 cm

h_{tr} = altura do trilho utilizado

t_f = espessura da mesa

A seguir os gráficos da FIG.6.2 e as TAB.6.1, 6.2 e 6.3, mostram a comparação dos resultados da análise numérica realizada via Ansys com os resultados da fórmula proposta para o escoamento da alma.

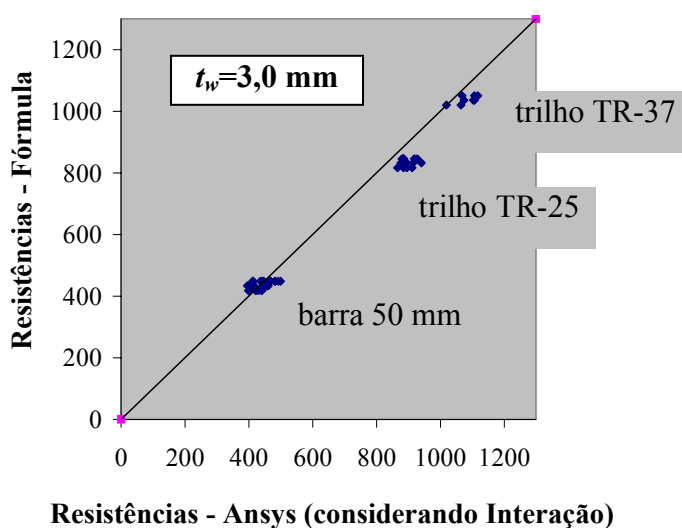


FIGURA 6.2 – Resultados numéricos x Resultados fórmula
Escoamento da alma

Para o escoamento da alma registra-se uma variação entre 0,91 e 1,02 nas comparações entre os resultados $P_{RF} / médiaP_R$.

TABELA 6.1 – Resultados numéricos x Resultados fórmula
Trilho barra quadrada 50 mm - Escoamento da alma

| ESCOAMENTO DA ALMA | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|----------------|---------------|---------------|------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|------|------|
| DADOS DA VIGA | | | | | $t_w = 2,0$ | | | $t_w = 3,0$ | | | | |
| e (mm) | Tipo Trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (Ansys) (mm) | Ansys Interação P_R (kN) | Fórmula P_{RF} (kN) | $P_{RF} /$ $médiaP_R$ | Ansys Interação P_R (kN) | Fórmula P_{RF} (kN) | $P_{RF} /$ $médiaP_R$ | | |
| 0 | barra 50 | 12,50 | 153 | 610 | ENRUG | 279 | NÃO OCORRE ESCOAMENTO | 399 | 418 | 0,99 | | |
| | | | | 806 | ENRUG | | | 423 | | | | |
| | | | | 1002 | ENRUG | | | 441 | | | | |
| | | | | 1198 | ENRUG | | | 421 | | | | |
| | | | 209 | 610 | ENRUG | 279 | | 401 | 418 | | 1,00 | |
| | | | | 806 | ENRUG | | | 400 | | | | |
| | | | | 1002 | ENRUG | | | 431 | | | | |
| | | | | 1198 | ENRUG | | | 440 | | | | |
| | | 16,00 | 153 | 610 | ENRUG | 289 | | 410 | 434 | 1,02 | | |
| | | | | 806 | ENRUG | | | 395 | | | | |
| | | | | 1002 | ENRUG | | | 455 | | | | |
| | | | | 1198 | ENRUG | | | 445 | | | | |
| | | | 209 | 610 | ENRUG | 289 | | 415 | | | 434 | 1,00 |
| | | | | 806 | ENRUG | | | 399 | | | | |
| | | | | 1002 | ENRUG | | | 460 | | | | |
| | | | | 1198 | ENRUG | | | 460 | | | | |
| | | 19,00 | 237 | 610 | ENRUG | 289 | | 417 | 434 | 1,00 | | |
| | | | | 806 | ENRUG | | | 401 | | | | |
| | | | | 1002 | ENRUG | | | 459 | | | | |
| | | | | 1198 | ENRUG | | | 460 | | | | |
| | | | 209 | 610 | ENRUG | 299 | | 447 | | | 448 | 0,99 |
| | | | | 806 | ENRUG | | | 412 | | | | |
| | | | | 1002 | ENRUG | | | 482 | | | | |
| | | | | 1198 | ENRUG | | | 468 | | | | |
| 237 | 610 | ENRUG | 299 | 442 | 448 | 0,99 | | | | | | |
| | 806 | ENRUG | | 415 | | | | | | | | |
| | 1002 | ENRUG | | 482 | | | | | | | | |
| | 1198 | ENRUG | | 468 | | | | | | | | |
| 293 | 610 | ENRUG | 299 | 464 | 448 | | 0,95 | | | | | |
| | 806 | ENRUG | | 436 | | | | | | | | |
| | 1002 | ENRUG | | 499 | | | | | | | | |
| | 1198 | ENRUG | | 492 | | | | | | | | |

TABELA 6.2 – Resultados numéricos x Resultados fórmula
Trilho TR-25 - escoamento da alma

| ESCOAMENTO DA ALMA | | | | | | | | | | | |
|--------------------|----------------|---------------|---------------|------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------|
| DADOS DA VIGA | | | | | $t_w=2,0$ | | | $t_w=3,0$ | | | |
| e (mm) | Tipo Trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (Ansys) (mm) | Ansys Interação P_R (kN) | Fórmula P_{RF} (kN) | $P_{RF} /$ <i>média</i> P_R | Ansys Interação P_R (kN) | Fórmula P_{RF} (kN) | $P_{RF} /$ <i>média</i> P_R | |
| 0 | TR-25 | 12,50 | 153 | 610 | ENRUG | 544 | NÃO OCORRE ESCOAMENTO | 865 | 816 | 0,93 | |
| | | | | 806 | ENRUG | | | 895 | | | |
| | | | | 1002 | ENRUG | | | ENRUG | | | |
| | | | | 1198 | ENRUG | | | ENRUG | | | |
| | | | 209 | 610 | ENRUG | 544 | | 884 | 816 | | 0,91 |
| | | | | 806 | ENRUG | | | 912 | | | |
| | | | | 1002 | ENRUG | | | ENRUG | | | |
| | | | | 1198 | ENRUG | | | ENRUG | | | |
| | | 16,00 | 153 | 610 | ENRUG | 555 | | 877 | 832 | 0,94 | |
| | | | | 806 | ENRUG | | | 895 | | | |
| | | | | 1002 | ENRUG | | | ENRUG | | | |
| | | | | 1198 | ENRUG | | | ENRUG | | | |
| | | | 209 | 610 | ENRUG | 555 | | 882 | 832 | | 0,93 |
| | | | | 806 | ENRUG | | | 915 | | | |
| | | | | 1002 | ENRUG | | | ENRUG | | | |
| | | | | 1198 | ENRUG | | | ENRUG | | | |
| | | 19,00 | 237 | 610 | ENRUG | 555 | | 882 | 832 | 0,91 | |
| | | | | 806 | ENRUG | | | 941 | | | |
| | | | | 1002 | ENRUG | | | ENRUG | | | |
| | | | | 1198 | ENRUG | | | ENRUG | | | |
| | | | 209 | 610 | ENRUG | 564 | | 883 | 846 | | 0,93 |
| | | | | 806 | ENRUG | | | 928 | | | |
| | | | | 1002 | ENRUG | | | ENRUG | | | |
| | | | | 1198 | ENRUG | | | ENRUG | | | |
| 237 | 610 | ENRUG | 564 | 884 | 846 | 0,94 | | | | | |
| | 806 | ENRUG | | 918 | | | | | | | |
| | 1002 | ENRUG | | ENRUG | | | | | | | |
| | 1198 | ENRUG | | ENRUG | | | | | | | |
| 293 | 610 | ENRUG | 564 | 885 | 846 | 0,96 | | | | | |
| | 806 | ENRUG | | 879 | | | | | | | |
| | 1002 | ENRUG | | ENRUG | | | | | | | |
| | 1198 | ENRUG | | ENRUG | | | | | | | |

TABELA 6.3 – Resultados numéricos x Resultados fórmula
Trilho TR-37 - escoamento da alma

| ESCOAMENTO DA ALMA | | | | | | | | | | | |
|--------------------|----------------|---------------|---------------|------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------|
| DADOS DA VIGA | | | | | $t_w = 2,0$ | | | $t_w = 3,0$ | | | |
| e (mm) | Tipo Trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (Ansys) (mm) | Ansys Interação P_R (kN) | Fórmula P_{RF} (kN) | $P_{RF} /$ <i>média</i> P_R | Ansys Interação P_R (kN) | Fórmula P_{RF} (kN) | $P_{RF} /$ <i>média</i> P_R | |
| 0 | TR-37 | 12,50 | 153 | 610 | CISALH | 680 | NÃO OCORRE ESCOAMENTO | CISALH | 1020 | 1,00 | |
| | | | | 806 | ENRUG | | | 1019 | | | |
| | | | | 1002 | ENRUG | | | FLAMB | | | |
| | | | | 1198 | FLAMB | | | FLAMB | | | |
| | | | 209 | 610 | CISALH | 680 | | CISALH | 1020 | | 0,96 |
| | | | | 806 | ENRUG | | | 1065 | | | |
| | | | | 1002 | ENRUG | | | FLAMB | | | |
| | | | | 1198 | FLAMB | | | FLAMB | | | |
| | | 16,00 | 153 | 610 | CISALH | 691 | | CISALH | 1036 | 0,94 | |
| | | | | 806 | ENRUG | | | 1104 | | | |
| | | | | 1002 | ENRUG | | | FLAMB | | | |
| | | | | 1198 | FLAMB | | | FLAMB | | | |
| | | | 209 | 610 | CISALH | 691 | | CISALH | 1036 | | 0,96 |
| | | | | 806 | ENRUG | | | 1074 | | | |
| | | | | 1002 | ENRUG | | | ENRUG | | | |
| | | | | 1198 | FLAMB | | | FLAMB | | | |
| | | 237 | 610 | CISALH | 691 | CISALH | | 1036 | 0,94 | | |
| | | | 806 | ENRUG | | 1107 | | | | | |
| | | | 1002 | ENRUG | | ENRUG | | | | | |
| | | | 1198 | FLAMB | | FLAMB | | | | | |
| | | 19,00 | 209 | 610 | CISALH | 700 | | CISALH | | 1050 | 0,94 |
| | | | | 806 | ENRUG | | | 1118 | | | |
| | | | | 1002 | ENRUG | | | ENRUG | | | |
| | | | | 1198 | FLAMB | | | FLAMB | | | |
| 237 | 610 | | CISALH | 700 | CISALH | 1050 | 0,98 | | | | |
| | 806 | | ENRUG | | 1068 | | | | | | |
| | 1002 | | ENRUG | | ENRUG | | | | | | |
| | 1198 | | FLAMB | | FLAMB | | | | | | |
| 293 | 610 | CISALH | 700 | CISALH | 1050 | 0,95 | | | | | |
| | 806 | ENRUG | | 1106 | | | | | | | |
| | 1002 | ENRUG | | ENRUG | | | | | | | |
| | 1198 | FLAMB | | FLAMB | | | | | | | |

6.2.2 ENRUGAMENTO DA ALMA

O enrugamento da alma (“web crippling”) consiste em deformações localizadas de flexão local da alma junto à mesa onde é aplicada a força localizada. As tensões verticais na alma são de membrana e de placa (predominantemente).

Ver deformada desse modo de falha na FIG.6.3. Observa-se que a deformação da mesa é relativamente por flexão, menor do que a que ocorre no caso de escoamento da alma (FIG.6.1).

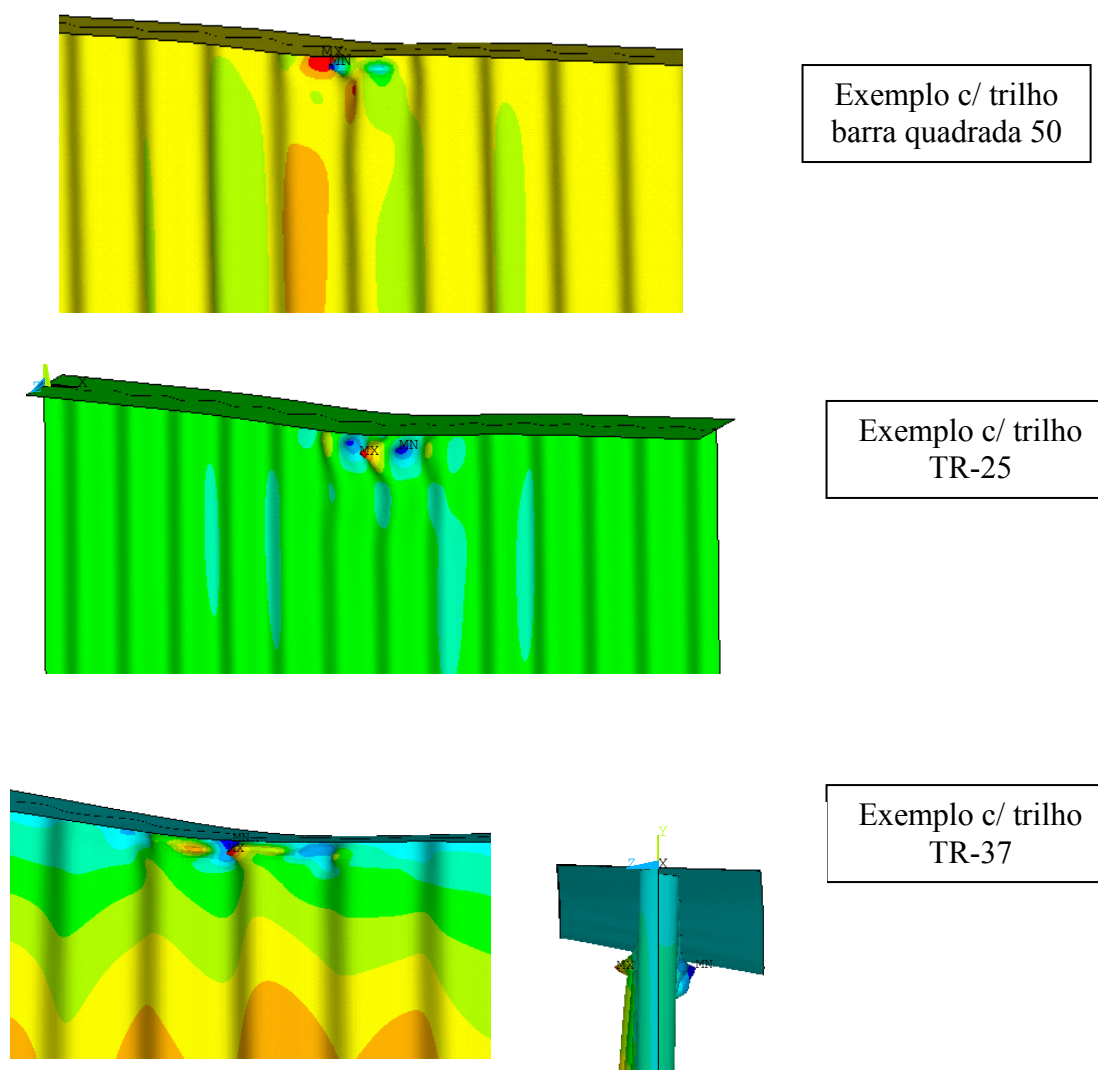


FIGURA 6.3 – Deformações associadas ao enrugamento da alma

Assim como no escoamento, também de acordo com as análises e conclusões apresentadas no item 5.1.2.2, para este estado limite último é proposta uma fórmula que garanta resultados bem próximos dos resultados das resistências a força localizada isolada obtida considerando a interação com a força cortante.

A força localizada resistente da alma proposta para o estado limite enrugamento da alma, baseada na ABNT NBR 8800:2008, é dada pela Eq.6.3:

$$P_R = t_w^2 \left(\frac{t_{f,ref}}{t_f} \right)^{0,5} \left[1 + 4,9 \left(\frac{L'_{en}}{L_{ref}} \right)^{0,92} \left(\frac{t_{w,ref}}{t_w} \right)^{0,45} \right] \sqrt{\frac{E f_{yw} t_f}{t_w}} \quad (6.3)$$

onde: t_w = espessura da alma senoidal

t_f = espessura da mesa carregada

$t_{f,ref}$ = espessura de mesa de 12,5 mm = 1,25 cm

$t_{w,ref}$ = espessura da alma de 2,0 mm = 0,2 cm

L_{ref} = 100 cm

f_{yw} = resistência ao escoamento do aço da alma senoidal = 300 MPa

E = módulo de elasticidade do aço = 200.000 MPa

L'_{en} = comprimento de distribuição da força sobre a viga para o caso de enrugamento da alma, dado na Eq.6.4.

$$L'_{en} = 4t_f + 7h_{tr} \left(\frac{h_{tr}}{h_{ref}} \right)^{0,30} \quad (6.4)$$

Sendo: h_{ref} = altura do trilho de referência definido como a barra quadrada 50 = 5 cm

h_{tr} = altura do trilho utilizado

A seguir, também por meio do gráfico da FIG.6.4 e das TAB.6.4, 6.5 e 6.6, mostram-se a comparação dos resultados da análise numérica realizada via Ansys com os resultados da fórmula proposta para o enrugamento da alma.

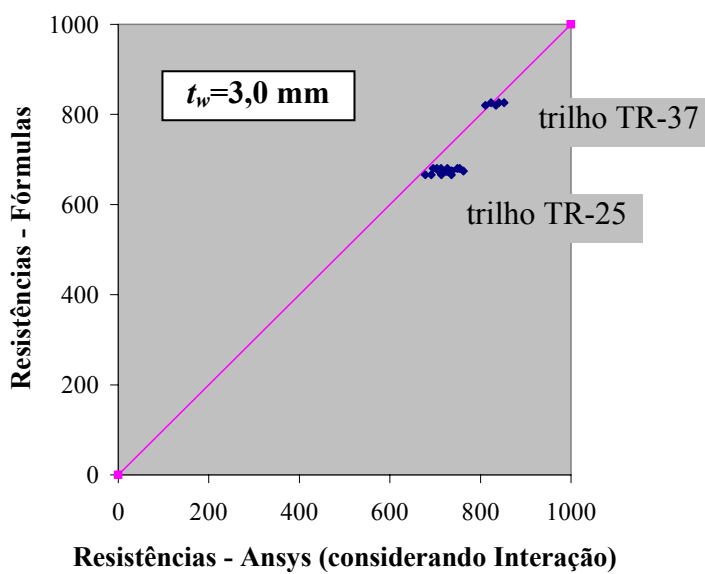
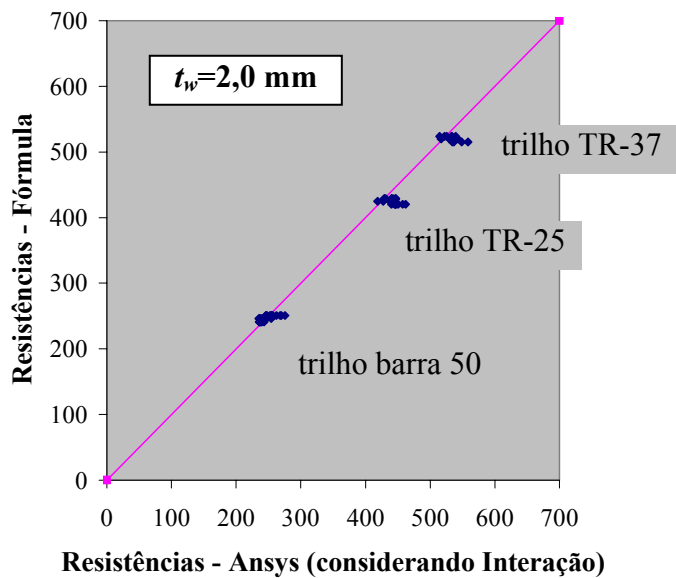


FIGURA 6.4 – Resultados numéricos x Resultados fórmula
Enrugamento da alma

Para o enrugamento da alma registra-se uma variação entre 0,92 e 1,03 nas comparações entre os resultados $P_{RF} / médiaP_R$.

TABELA 6.4 – Resultados numéricos x Resultados fórmula
Trilho barra quadrada 50 mm - Enrugamento da alma

| ENRUGAMENTO DA ALMA | | | | | | | | | | |
|---------------------|----------------|---------------|---------------|------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| DADOS DA VIGA | | | | | $t_w = 2,0$ | | | $t_w = 3,0$ | | |
| e (mm) | Tipo Trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (Ansys) (mm) | Ansys Interação P_R (kN) | Fórmula P_{RF} (kN) | $P_{RF} /$ $médiaP_R$ | Ansys Interação P_R (kN) | Fórmula P_{RF} (kN) | $P_{RF} /$ $médiaP_R$ |
| 0 | barra 50 | 12,50 | 153 | 610 | 237 | 241 | 1,02 | ESCOAM | 392 | NÃO OCORRE ENRUGAMENTO |
| | | | | 806 | 236 | | | ESCOAM | | |
| | | | | 1002 | 236 | | | ESCOAM | | |
| | | | | 1198 | 240 | | | ESCOAM | | |
| | | | 209 | 610 | 239 | 241 | 1,01 | ESCOAM | | |
| | | | | 806 | 237 | | | ESCOAM | | |
| | | | | 1002 | 237 | | | ESCOAM | | |
| | | | | 1198 | 243 | | | ESCOAM | | |
| | | 16,00 | 153 | 610 | 244 | 246 | 1,03 | ESCOAM | 400 | |
| | | | | 806 | 236 | | | ESCOAM | | |
| | | | | 1002 | 236 | | | ESCOAM | | |
| | | | | 1198 | 235 | | | ESCOAM | | |
| | | | 209 | 610 | 247 | 246 | 1,01 | ESCOAM | 400 | |
| | | | | 806 | 244 | | | ESCOAM | | |
| | | | | 1002 | 244 | | | ESCOAM | | |
| | | | | 1198 | 237 | | | ESCOAM | | |
| | | 19,00 | 237 | 610 | 254 | 246 | 1,00 | ESCOAM | 400 | |
| | | | | 806 | 245 | | | ESCOAM | | |
| | | | | 1002 | 245 | | | ESCOAM | | |
| | | | | 1198 | 239 | | | ESCOAM | | |
| | | | 209 | 610 | 268 | 251 | 0,99 | ESCOAM | 407 | |
| | | | | 806 | 252 | | | ESCOAM | | |
| | | | | 1002 | 246 | | | ESCOAM | | |
| | | | | 1198 | 246 | | | ESCOAM | | |
| | | 237 | 610 | 270 | 251 | 0,98 | ESCOAM | 407 | | |
| | | | 806 | 254 | | | ESCOAM | | | |
| | | | 1002 | 253 | | | ESCOAM | | | |
| | | | 1198 | 248 | | | ESCOAM | | | |
| 293 | 610 | 276 | 251 | 0,95 | ESCOAM | 407 | | | | |
| | 806 | 262 | | | ESCOAM | | | | | |
| | 1002 | 256 | | | ESCOAM | | | | | |
| | 1198 | 257 | | | ESCOAM | | | | | |

TABELA 6.5 – Resultados numéricos x Resultados fórmula
Trilho TR-25 - Enrugamento da alma

| ENRUGAMENTO DA ALMA | | | | | | | | | | |
|---------------------|----------------|---------------|---------------|------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| DADOS DA VIGA | | | | | $t_w = 2,0$ | | | $t_w = 3,0$ | | |
| e (mm) | Tipo Trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (Ansys) (mm) | Ansys Interação P_R (kN) | Fórmula P_{RF} (kN) | $P_{RF} /$ média P_R | Ansys Interação P_R (kN) | Fórmula P_{RF} (kN) | $P_{RF} /$ média P_R |
| 0 | TR-25 | 12,50 | 153 | 610 | 446 | 420 | 0,94 | ESCOAM | 666 | 0,97 |
| | | | | 806 | 440 | | | ESCOAM | | |
| | | | | 1002 | 451 | | | 691 | | |
| | | | | 1198 | 446 | | | 678 | | |
| | | | 209 | 610 | 445 | 420 | 0,93 | ESCOAM | 666 | 0,92 |
| | | | | 806 | 462 | | | ESCOAM | | |
| | | | | 1002 | 458 | | | 736 | | |
| | | | | 1198 | 447 | | | 713 | | |
| | | 16,00 | 153 | 610 | 446 | 425 | 0,96 | ESCOAM | 674 | 0,94 |
| | | | | 806 | 440 | | | ESCOAM | | |
| | | | | 1002 | 438 | | | 708 | | |
| | | | | 1198 | 439 | | | 726 | | |
| | | | 209 | 610 | 445 | 425 | 0,98 | ESCOAM | 674 | 0,92 |
| | | | | 806 | 439 | | | ESCOAM | | |
| | | | | 1002 | 419 | | | 737 | | |
| | | | | 1198 | 439 | | | 736 | | |
| | | 237 | 610 | 445 | 425 | 0,97 | ESCOAM | 674 | 0,92 | |
| | | | 806 | 439 | | | ESCOAM | | | |
| | | | 1002 | 428 | | | 710 | | | |
| | | | 1198 | 443 | | | 762 | | | |
| | | 19,00 | 209 | 610 | 446 | 429 | 0,98 | ESCOAM | 680 | 0,94 |
| | | | | 806 | 440 | | | ESCOAM | | |
| | | | | 1002 | 429 | | | 696 | | |
| | | | | 1198 | 441 | | | 754 | | |
| 237 | 610 | | 446 | 429 | 0,97 | ESCOAM | 680 | 0,95 | | |
| | 806 | | 440 | | | ESCOAM | | | | |
| | 1002 | | 429 | | | 727 | | | | |
| | 1198 | | 444 | | | 713 | | | | |
| 293 | 610 | 447 | 429 | 0,98 | ESCOAM | 680 | 0,94 | | | |
| | 806 | 441 | | | ESCOAM | | | | | |
| | 1002 | 430 | | | 704 | | | | | |
| | 1198 | 431 | | | 749 | | | | | |

TABELA 6.6 – Resultados numéricos x Resultados fórmula
Trilho TR-37 - Enrugamento da alma

| ENRUGAMENTO DA ALMA | | | | | | | | | | | |
|---------------------|----------------|---------------|---------------|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|--|
| DADOS DA VIGA | | | | | $t_w = 2,0$ | | | $t_w = 3,0$ | | | |
| e (mm) | Tipo Trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (Ansys) (mm) | Ansys Interação P_R (kN) | Fórmula P_{RF} (kN) | $P_{RF} /$ média P_R | Ansys Interação P_R (kN) | Fórmula P_{RF} (kN) | $P_{RF} /$ média P_R | |
| 0 | TR-37 | 12,50 | 153 | 610 | CISALH | 515 | 0,94 | CISALH | 813 | NÃO OCORRE ENRUGAMENTO | |
| | | | | 806 | 558 | | | ESCOAM | | | |
| | | | | 1002 | 534 | | | FLAMB | | | |
| | | | | 1198 | FLAMB | | | | | | |
| | | | 209 | 610 | CISALH | 515 | 0,95 | CISALH | 813 | | |
| | | | | 806 | 536 | | | ESCOAM | | | |
| | | | | 1002 | 549 | | | FLAMB | | | |
| | | | | 1198 | FLAMB | | | | | | |
| | | 16,00 | 153 | 610 | CISALH | 520 | 0,96 | CISALH | 820 | | |
| | | | | 806 | 537 | | | ESCOAM | | | |
| | | | | 1002 | 543 | | | FLAMB | | | |
| | | | | 1198 | FLAMB | | | | | | |
| | | | 209 | 610 | CISALH | 520 | 0,99 | CISALH | 820 | | |
| | | | | 806 | 535 | | | ESCOAM | | | |
| | | | | 1002 | 517 | | | 811 | | | |
| | | | | 1198 | FLAMB | | | | | | |
| | | 237 | 610 | CISALH | 520 | 0,98 | CISALH | 820 | | | |
| | | | 806 | 534 | | | ESCOAM | | | | |
| | | | 1002 | 530 | | | 834 | | | | |
| | | | 1198 | FLAMB | | | | | | | |
| | | 19,00 | 209 | 610 | CISALH | 524 | 0,98 | CISALH | 826 | | |
| | | | | 806 | 533 | | | ESCOAM | | | |
| | | | | 1002 | 539 | | | 852 | | | |
| | | | | 1198 | FLAMB | | | | | | |
| 237 | 610 | | CISALH | 524 | 1,00 | CISALH | 826 | | | | |
| | 806 | | 533 | | | ESCOAM | | | | | |
| | 1002 | | 515 | | | 823 | | | | | |
| | 1198 | | FLAMB | | | | | | | | |
| 293 | 610 | CISALH | 524 | 1,00 | CISALH | 826 | | | | | |
| | 806 | 526 | | | ESCOAM | | | | | | |
| | 1002 | 522 | | | 841 | | | | | | |
| | 1198 | FLAMB | | | | | | | | | |

6.2.3 FLAMBAGEM GLOBAL DA ALMA

A flambagem global da alma, não contemplada pela ABNT NBR8800:2008 para perfis de alma plana, ocorre em certas situações nas vigas com alma senoidal, com deformada do tipo mostrado na FIG.6.5.

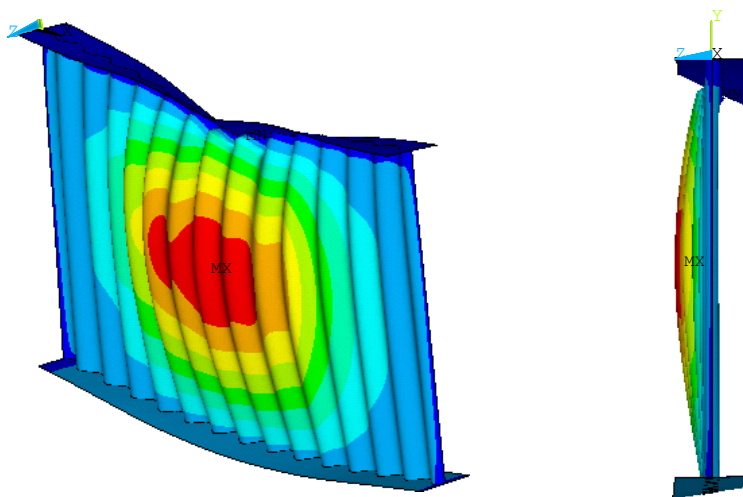


FIGURA 6.5 – Deformação associada à flambagem global da alma

A força localizada resistente, proposta para o estado limite flambagem global da alma é dada pela Eq. 6.5, baseada na fórmula para a força axial de compressão resistente, item 5.3.2, da ABNT NBR8800:2008.

$$P_R = (\chi Q A_g f_{yw}) \quad (6.5)$$

Onde: χ = fator de redução associado à resistência à compressão, visto mais adiante
 Q = fator de redução associado à flambagem local. Adotado igual a 1,0 para vigas de almas senoidais
 f_{yw} = resistência ao escoamento do aço da alma senoidal = 300 MPa
 A_g = área da seção longitudinal da alma senoidal, descrita na Eq.6.6.

$$A_g = t_w L'_f \frac{S}{w} \quad (6.6)$$

Sendo: L'_{fl} = comprimento de distribuição da força sobre a viga, para o caso de flambagem global da alma, adotada igual L'_{en} (ver Eq.6.4).

s = comprimento desenvolvido de uma senóide = 177,2 mm (ver FIG.5.1)

w = comprimento de onda de uma senóide = 155 mm (ver FIG.5.1)

t_w = espessura da alma senoidal

O fator de redução, χ , para o trilho TR-37, é dado pela Eq.6.7 (baseado na ABNT NBR 8800:2008).

$$\chi = 0,635^{\lambda_o^2} \rightarrow \text{para trilho TR-37} \quad (6.7)$$

Onde λ_o é o índice de esbeltez reduzido determinado com base na ABNT NBR8800:2008, item 5.3.3.2, dado por:

$$\lambda_o = \sqrt{\frac{Q A_g f_{yw}}{N_e}}$$

sendo N_e a força axial de flambagem elástica (Anexo E da ABNT NBR8800:2008)

$$N_e = \frac{\pi^2 EI_{wy}}{(KL)^2} x \frac{L'_{fl}}{w}$$

onde: E = módulo de elasticidade do aço = 200.000 MPa

I_{wy} = momento de inércia de uma senóide em relação ao eixo longitudinal (ver

FIG.5.1) = $I_{wy} = 0,158 t_w w^3 \left(\frac{b_w}{w} \right)^{2,12}$ (para a figura, a notação correta seria I_{wx})

KL = comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo x da FIG.5.1

Adota-se $K=1,0$ e L = altura da viga de eixo a eixo de mesas, igual a H .

O gráfico da FIG.6.6 e a TAB.6.7 mostram a comparação dos resultados da análise numérica realizada via Ansys com os resultados da fórmula proposta para a flambagem global da alma.

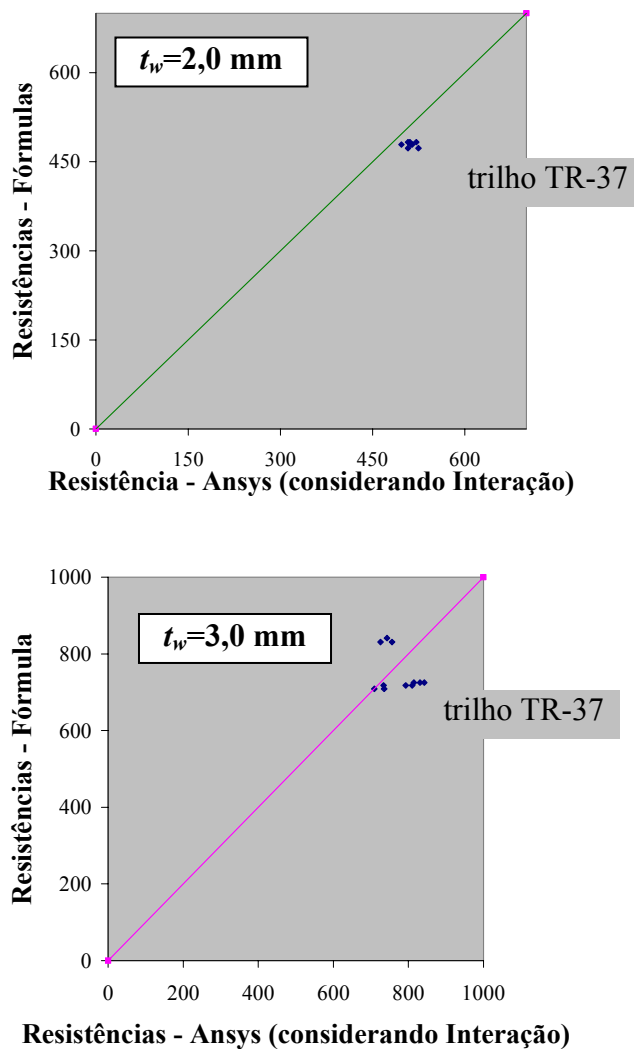


FIGURA 6.6 – Resultados numéricos x Resultados fórmula
Flambagem global da alma

Para a flambagem global da alma registra-se uma variação entre 0,86 e 1,14 nas comparações entre os resultados P_{RF}/P_R .

TABELA 6.7 – Resultados numéricos x Resultados fórmula
Trilho TR-37 – Flambagem global da alma

| e (mm) | Tipo Trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (Ansys) (mm) | Anslys Interação P_R (kN) | Fórmula P_{RF} (kN) | P_{RF}/P_R | Anslys Interação P_R (kN) | Fórmula P_{RF} (kN) | P_{RF}/P_R |
|-------------|----------------|---------------|---------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------|
| 0 | TR-37 | 12,50 | 153 | 610 | CISALH | 699 | | CISALH | 1048 | |
| | | | | 806 | ENRUG | 631 | | ESCOAM | 947 | |
| | | | | 1002 | ENRUG | 554 | | 726 | 831 | 1,14 |
| | | | | 1198 | 524 | 473 | 0,90 | 709 | 709 | 1,00 |
| | | | 209 | 610 | CISALH | 699 | | CISALH | 1048 | |
| | | | | 806 | ENRUG | 631 | | ESCOAM | 947 | |
| | | | | 1002 | ENRUG | 554 | | 756 | 831 | 1,10 |
| | | | | 1198 | 507 | 473 | 0,93 | 735 | 709 | 0,96 |
| | | 16,00 | 153 | 610 | CISALH | 707 | | CISALH | 1061 | |
| | | | | 806 | ENRUG | 639 | | ESCOAM | 958 | |
| | | | | 1002 | ENRUG | 561 | | 743 | 841 | 1,13 |
| | | | | 1198 | 514 | 479 | 0,93 | 734 | 718 | 0,98 |
| | | | 209 | 610 | CISALH | 707 | | CISALH | 1061 | |
| | | | | 806 | ENRUG | 639 | | ESCOAM | 958 | |
| | | | | 1002 | ENRUG | 561 | | ENRUG | 841 | |
| | | | | 1198 | 512 | 479 | 0,93 | 793 | 718 | 0,91 |
| | | 237 | 610 | CISALH | 707 | | CISALH | 1061 | | |
| | | | 806 | ENRUG | 639 | | ESCOAM | 958 | | |
| | | | 1002 | ENRUG | 561 | | ENRUG | 841 | | |
| | | | 1198 | 497 | 479 | 0,96 | 810 | 718 | 0,89 | |
| | | 19,00 | 209 | 610 | CISALH | 715 | | CISALH | 1072 | |
| | | | | 806 | ENRUG | 645 | | ESCOAM | 968 | |
| | | | | 1002 | ENRUG | 566 | | ENRUG | 850 | |
| | | | | 1198 | 510 | 483 | 0,95 | 842 | 725 | 0,86 |
| | | | 237 | 610 | CISALH | 715 | | CISALH | 1072 | |
| | | | | 806 | ENRUG | 645 | | ESCOAM | 968 | |
| | | | | 1002 | ENRUG | 566 | | ENRUG | 850 | |
| | | | | 1198 | 521 | 483 | 0,93 | 814 | 725 | 0,89 |
| 293 | 610 | | CISALH | 715 | | CISALH | 1072 | | | |
| | 806 | | ENRUG | 645 | | ESCOAM | 968 | | | |
| | 1002 | | ENRUG | 566 | | ENRUG | 850 | | | |
| | 1198 | | 508 | 483 | 0,95 | 831 | 725 | 0,87 | | |

6.3 RESULTADOS FINAIS

Propostas as formulações para os estados limites últimos encontrados nesta pesquisa, apresentam-se, por meio das TAB.6.8 a 6.13, as resistências finais de cada viga associadas aos três estados limites. Para cada viga são aplicadas as equações de interação com a força cortante para cada estado limite e o maior somatório obtido corresponde ao modo de falha definido para a viga.

Como as resistências baseadas nas fórmulas apresentam uma margem de erro de -10% a +5% com relação às obtidas via análise numérica, os somatórios são também afetados. Assim, os poucos pontos em que o maior somatório não corresponde ao modo de falha definido como crítico são devidos a essa margem de erro.

TABELA 6.8 – Resistências, Equações de Interação e Modos de Falha
($t_w=2,0$ mm - trilho barra quadrada 50 mm)

| DADOS DA VIGA | | | | | RESULTADOS FINAIS | | | | | | |
|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|------------------------|--|---------------------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| e (mm) | t_w (mm) | Tipo Trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | Força P_S (kN) | P_{RF} Escoam. da alma (kN) | P_{RF} Enrug. da alma (kN) | P_{RF} Flamb. global da alma (kN) | Equação Inter. (Escoam.) | Equação. Inter. (Enrug.) | Modo de falha encontrado |
| 0 | 2,0 | barra 50 | 12,50 | 153 | 233 | 279 | 241 | - | 0,99 | 0,99 | ENRUG |
| | | | | | 234 | 279 | 241 | - | 0,94 | 0,98 | ENRUG |
| | | | | | 235 | 279 | 241 | - | 0,91 | 0,98 | ENRUG |
| | | | | | 239 | 279 | 241 | - | 0,91 | 0,99 | ENRUG |
| | | | | 209 | 234 | 279 | 241 | - | 1,00 | 0,99 | ENRUG |
| | | | | | 235 | 279 | 241 | - | 0,95 | 0,98 | ENRUG |
| | | | | | 236 | 279 | 241 | - | 0,92 | 0,98 | ENRUG |
| | | | | | 242 | 279 | 241 | - | 0,93 | 1,01 | ENRUG |
| | | | 16,00 | 153 | 239 | 289 | 246 | - | 0,99 | 0,99 | ENRUG |
| | | | | | 234 | 289 | 246 | - | 0,91 | 0,96 | ENRUG |
| | | | | | 235 | 289 | 246 | - | 0,88 | 0,96 | ENRUG |
| | | | | | 234 | 289 | 246 | - | 0,85 | 0,96 | ENRUG |
| | | | | 209 | 242 | 289 | 246 | - | 1,00 | 1,00 | ENRUG |
| | | | | | 242 | 289 | 246 | - | 0,94 | 0,99 | ENRUG |
| | | | | | 243 | 289 | 246 | - | 0,91 | 0,99 | ENRUG |
| | | | | | 237 | 289 | 246 | - | 0,86 | 0,97 | ENRUG |
| | | | 237 | 248 | 289 | 246 | - | 1,03 | 1,03 | ENRUG | |
| | | | | 243 | 289 | 246 | - | 0,95 | 1,00 | ENRUG | |
| | | | | 244 | 289 | 246 | - | 0,92 | 1,00 | ENRUG | |
| | | | | 239 | 289 | 246 | - | 0,87 | 0,97 | ENRUG | |
| | | | | 209 | 261 | 299 | 251 | - | 1,06 | 1,07 | ENRUG |
| | | | | | 250 | 299 | 251 | - | 0,95 | 1,01 | ENRUG |
| | | | | | 245 | 299 | 251 | - | 0,89 | 0,98 | ENRUG |
| | | | | | 245 | 299 | 251 | - | 0,87 | 0,98 | ENRUG |
| | | | 237 | 262 | 299 | 251 | - | 1,07 | 1,07 | ENRUG | |
| | | | | 251 | 299 | 251 | - | 0,96 | 1,01 | ENRUG | |
| | | | | 252 | 299 | 251 | - | 0,92 | 1,01 | ENRUG | |
| | | | | 247 | 299 | 251 | - | 0,88 | 0,99 | ENRUG | |
| | | | | 268 | 299 | 251 | - | 1,10 | 1,10 | ENRUG | |
| | | | 293 | 259 | 299 | 251 | - | 0,99 | 1,05 | ENRUG | |
| | | | | 254 | 299 | 251 | - | 0,94 | 1,02 | ENRUG | |
| | | | | 256 | 299 | 251 | - | 0,92 | 1,02 | ENRUG | |

TABELA 6.9 – Resistências, Equações de Interação e Modos de Falha
($t_w=2,0$ mm - TR-25)

| DADOS DA VIGA | | | | | RESULTADOS FINAIS | | | | | | |
|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|------------------------|--|---------------------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| e (mm) | t_w (mm) | Tipo Trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | Força P_S (kN) | P_{RF} Escoam. da alma (kN) | P_{RF} Enrug. da alma (kN) | P_{RF} Flamb. global da alma (kN) | Equação Inter. (Escoam.) | Equação. Inter. (Enrug.) | Modo de falha encontrado |
| 0 | 2,0 | TR-25 | 12,50 | 153 | 401 | 544 | 420 | - | 1,07 | 1,06 | ENRUG |
| | | | | | 418 | 544 | 420 | - | 1,01 | 1,05 | ENRUG |
| | | | | | 437 | 544 | 420 | - | 0,99 | 1,07 | ENRUG |
| | | | | | 438 | 544 | 420 | - | 0,95 | 1,06 | ENRUG |
| | | | | 209 | 400 | 544 | 420 | - | 1,06 | 1,05 | ENRUG |
| | | | | | 436 | 544 | 420 | - | 1,06 | 1,10 | ENRUG |
| | | | | | 443 | 544 | 420 | - | 1,01 | 1,09 | ENRUG |
| | | | | | 439 | 544 | 420 | - | 0,95 | 1,06 | ENRUG |
| | | | 16,00 | 153 | 401 | 555 | 425 | - | 1,05 | 1,04 | ENRUG |
| | | | | | 418 | 555 | 425 | - | 0,99 | 1,03 | ENRUG |
| | | | | | 426 | 555 | 425 | - | 0,94 | 1,03 | ENRUG |
| | | | | | 431 | 555 | 425 | - | 0,91 | 1,03 | ENRUG |
| | | | | 209 | 401 | 555 | 425 | - | 1,05 | 1,04 | ENRUG |
| | | | | | 417 | 555 | 425 | - | 0,99 | 1,03 | ENRUG |
| | | | | | 408 | 555 | 425 | - | 0,89 | 0,99 | ENRUG |
| | | | | | 432 | 555 | 425 | - | 0,91 | 1,03 | ENRUG |
| | | | 237 | 401 | 555 | 425 | - | 1,05 | 1,04 | ENRUG | |
| | | | | 417 | 555 | 425 | - | 0,99 | 1,03 | ENRUG | |
| | | | | 417 | 555 | 425 | - | 0,92 | 1,01 | ENRUG | |
| | | | | 435 | 555 | 425 | - | 0,92 | 1,04 | ENRUG | |
| | | | 19,00 | 209 | 402 | 564 | 429 | - | 1,04 | 1,04 | ENRUG |
| | | | | | 419 | 564 | 429 | - | 0,97 | 1,03 | ENRUG |
| | | | | | 418 | 564 | 429 | - | 0,90 | 1,00 | ENRUG |
| | | | | | 433 | 564 | 429 | - | 0,90 | 1,03 | ENRUG |
| | | | | 237 | 403 | 564 | 429 | - | 1,04 | 1,04 | ENRUG |
| | | | | | 419 | 564 | 429 | - | 0,97 | 1,03 | ENRUG |
| | | | | | 418 | 564 | 429 | - | 0,91 | 1,00 | ENRUG |
| | | | | | 436 | 564 | 429 | - | 0,91 | 1,03 | ENRUG |
| | | | | 293 | 403 | 564 | 429 | - | 1,04 | 1,04 | ENRUG |
| | | | | | 419 | 564 | 429 | - | 0,97 | 1,03 | ENRUG |
| | | | | | 419 | 564 | 429 | - | 0,91 | 1,00 | ENRUG |
| | | | | | 425 | 564 | 429 | - | 0,88 | 1,01 | ENRUG |

TABELA 6.10 – Resistências, Equações de Interação e Modos de Falha

 $(t_w=2,0 \text{ mm} - \text{TR-37})$

| DADOS DA VIGA | | | | | RESULTADOS FINAIS | | | | | | | | | | |
|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|------------------------|--|---------------------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------|--|--|
| e (mm) | t_w (mm) | Tipo Trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | Força P_S (kN) | P_{RF} Escoam. da alma (kN) | P_{RF} Enrug. da alma (kN) | P_{RF} Flamb. global da alma (kN) | Equação Inter. (Escoam.) | Equação. Inter. (Enrug.) | Equação. Inter. (Flamb) | Modo de falha encontrado | | | |
| 0 | 2,0 | TR-37 | 12,50 | 153 | 428 | 680 | 515 | 699 | | | | | | | |
| | | | | | 508 | 680 | 515 | 631 | 1,06 | 1,08 | 0,81 | ENRUG | | | |
| | | | | | 509 | 680 | 515 | 554 | 0,98 | 1,04 | 0,92 | ENRUG | | | |
| | | | | | 524 | 680 | 515 | 473 | 0,96 | 1,05 | 1,11 | FLAMB | | | |
| | | | | 209 | 426 | 680 | 515 | 699 | | | | | | | |
| | | | | | 492 | 680 | 515 | 631 | 1,02 | 1,04 | 0,78 | ENRUG | | | |
| | | | | | 521 | 680 | 515 | 554 | 1,01 | 1,06 | 0,94 | ENRUG | | | |
| | | | | | 507 | 680 | 515 | 473 | 0,92 | 1,01 | 1,07 | FLAMB | | | |
| | | | | 16,00 | 153 | 427 | 691 | 520 | 707 | | | | | | |
| | | | | | | 493 | 691 | 520 | 639 | 1,01 | 1,03 | 0,77 | ENRUG | | |
| | | | | | | 516 | 691 | 520 | 561 | 0,98 | 1,04 | 0,92 | ENRUG | | |
| | | | | | | 514 | 691 | 520 | 479 | 0,92 | 1,02 | 1,07 | FLAMB | | |
| | | | 209 | | 425 | 691 | 520 | 707 | | | | | | | |
| | | | | | 492 | 691 | 520 | 639 | 1,00 | 1,03 | 0,77 | ENRUG | | | |
| | | | | | 494 | 691 | 520 | 561 | 0,93 | 0,99 | 0,88 | ENRUG | | | |
| | | | | | 512 | 691 | 520 | 479 | 0,91 | 1,01 | 1,07 | FLAMB | | | |
| | | | 237 | 425 | 691 | 520 | 707 | | | | | | | | |
| | | | | 492 | 691 | 520 | 639 | 1,00 | 1,03 | 0,77 | ENRUG | | | | |
| | | | | 505 | 691 | 520 | 561 | 0,95 | 1,02 | 0,90 | ENRUG | | | | |
| | | | | 497 | 691 | 520 | 479 | 0,88 | 0,98 | 1,04 | FLAMB | | | | |
| | | | 19,00 | 209 | 446 | 700 | 524 | 715 | | | | | | | |
| | | | | | 491 | 700 | 524 | 645 | 0,99 | 1,02 | 0,76 | ENRUG | | | |
| | | | | | 514 | 700 | 524 | 566 | 0,96 | 1,03 | 0,91 | ENRUG | | | |
| | | | | | 510 | 700 | 524 | 483 | 0,90 | 1,00 | 1,06 | FLAMB | | | |
| | | | | 237 | 426 | 700 | 524 | 715 | | | | | | | |
| | | | | | 491 | 700 | 524 | 645 | 0,99 | 1,02 | 0,76 | ENRUG | | | |
| | | | | | 493 | 700 | 524 | 566 | 0,91 | 0,98 | 0,87 | ENRUG | | | |
| | | | | | 521 | 700 | 524 | 483 | 0,92 | 1,02 | 1,08 | FLAMB | | | |
| 293 | 425 | 700 | | 524 | 715 | | | | | | | | | | |
| | 485 | 700 | | 524 | 645 | 0,98 | 1,00 | 0,75 | ENRUG | | | | | | |
| | 499 | 700 | | 524 | 566 | 0,93 | 1,00 | 0,88 | ENRUG | | | | | | |
| | 508 | 700 | | 524 | 483 | 0,89 | 1,00 | 1,05 | FLAMB | | | | | | |

TABELA 6.11 – Resistências, Equações de Interação e Modos de Falha
($t_w=3,0$ mm - barra quadrada 50 mm)

| DADOS DA VIGA | | | | | RESULTADOS FINAIS | | | | | | |
|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|------------------------|--|---------------------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| e (mm) | t_w (mm) | Tipo Trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | Força P_S (kN) | P_{RF} Escoam. da alma (kN) | P_{RF} Enrug. da alma (kN) | P_{RF} Flamb. global da alma (kN) | Equação Inter. (Escoam.) | Equação. Inter. (Enrug.) | Modo de falha encontrado |
| 0 | 3,0 | barra 50 | 12,50 | 153 | 338 | 418 | 392 | - | 0,95 | 0,88 | ESCOAM |
| | | | | | 371 | 418 | 392 | - | 1,01 | 0,96 | ESCOAM |
| | | | | | 397 | 418 | 392 | - | 1,06 | 1,02 | ESCOAM |
| | | | | | 388 | 418 | 392 | - | 1,01 | 0,99 | ESCOAM |
| | | | | 209 | 340 | 418 | 392 | - | 0,96 | 0,88 | ESCOAM |
| | | | | | 355 | 418 | 392 | - | 0,95 | 0,91 | ESCOAM |
| | | | | | 389 | 418 | 392 | - | 1,03 | 1,00 | ESCOAM |
| | | | | | 404 | 418 | 392 | - | 1,06 | 1,03 | ESCOAM |
| | | | 16,00 | 153 | 346 | 434 | 400 | - | 0,94 | 0,88 | ESCOAM |
| | | | | | 351 | 434 | 400 | - | 0,90 | 0,88 | ESCOAM |
| | | | | | 408 | 434 | 400 | - | 1,05 | 1,03 | ESCOAM |
| | | | | | 408 | 434 | 400 | - | 1,03 | 1,02 | ESCOAM |
| | | | | 209 | 350 | 434 | 400 | - | 0,96 | 0,89 | ESCOAM |
| | | | | | 354 | 434 | 400 | - | 0,91 | 0,89 | ESCOAM |
| | | | | | 412 | 434 | 400 | - | 1,07 | 1,04 | ESCOAM |
| | | | | | 420 | 434 | 400 | - | 1,07 | 1,05 | ESCOAM |
| | | | 237 | 351 | 434 | 400 | - | 0,96 | 0,90 | ESCOAM | |
| | | | | 355 | 434 | 400 | - | 0,92 | 0,90 | ESCOAM | |
| | | | | 411 | 434 | 400 | - | 1,06 | 1,03 | ESCOAM | |
| | | | | 420 | 434 | 400 | - | 1,07 | 1,05 | ESCOAM | |
| | | | 19,00 | 209 | 372 | 448 | 407 | - | 1,00 | 0,94 | ESCOAM |
| | | | | | 364 | 448 | 407 | - | 0,91 | 0,90 | ESCOAM |
| | | | | | 429 | 448 | 407 | - | 1,08 | 1,06 | ESCOAM |
| | | | | | 427 | 448 | 407 | - | 1,05 | 1,05 | ESCOAM |
| | | | | 237 | 368 | 448 | 407 | - | 0,99 | 0,93 | ESCOAM |
| | | | | | 366 | 448 | 407 | - | 0,92 | 0,91 | ESCOAM |
| | | | | | 429 | 448 | 407 | - | 1,08 | 1,06 | ESCOAM |
| | | | | | 427 | 448 | 407 | - | 1,05 | 1,05 | ESCOAM |
| | | | | 293 | 382 | 448 | 407 | - | 1,03 | 0,96 | ESCOAM |
| | | | | | 382 | 448 | 407 | - | 0,97 | 0,95 | ESCOAM |
| | | | | | 442 | 448 | 407 | - | 1,12 | 1,09 | ESCOAM |
| | | | | | 446 | 448 | 407 | - | 1,11 | 1,10 | ESCOAM |

TABELA 6.12 – Resistências, Equações de Interação e Modos de Falha
($t_w=3,0$ mm - TR-25)

| DADOS DA VIGA | | | | | RESULTADOS FINAIS | | | | | | |
|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|------------------------|--|---------------------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| e (mm) | t_w (mm) | Tipo Trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | Força P_S (kN) | P_{RF} Escoam. da alma (kN) | P_{RF} Enrug. da alma (kN) | P_{RF} Flamb. global da alma (kN) | Equação Inter. (Escoam.) | Equação. Inter. (Enrug.) | Modo de falha encontrado |
| 0 | 3,0 | TR-25 | 12,50 | 153 | 593 | 816 | 666 | - | 1,05 | 0,99 | ESCOAM |
| | | | | | 666 | 816 | 666 | - | 1,08 | 1,06 | ESCOAM |
| | | | | | 669 | 816 | 666 | - | 1,02 | 1,04 | ENRUG |
| | | | | | 666 | 816 | 666 | - | 0,96 | 1,02 | ENRUG |
| | | | | 209 | 601 | 816 | 666 | - | 1,06 | 1,00 | ESCOAM |
| | | | | | 674 | 816 | 666 | - | 1,10 | 1,07 | ESCOAM |
| | | | | | 708 | 816 | 666 | - | 1,09 | 1,10 | ENRUG |
| | | | | | 698 | 816 | 666 | - | 1,02 | 1,07 | ENRUG |
| | | | 16,00 | 153 | 599 | 832 | 674 | - | 1,04 | 0,99 | ESCOAM |
| | | | | | 667 | 832 | 674 | - | 1,07 | 1,05 | ESCOAM |
| | | | | | 684 | 832 | 674 | - | 1,03 | 1,05 | ENRUG |
| | | | | | 709 | 832 | 674 | - | 1,02 | 1,08 | ENRUG |
| | | | | 209 | 601 | 832 | 674 | - | 1,05 | 0,99 | ESCOAM |
| | | | | | 677 | 832 | 674 | - | 1,09 | 1,07 | ESCOAM |
| | | | | | 709 | 832 | 674 | - | 1,07 | 1,09 | ENRUG |
| | | | | | 719 | 832 | 674 | - | 1,04 | 1,09 | ENRUG |
| | | | 237 | 601 | 832 | 674 | - | 1,05 | 0,99 | ESCOAM | |
| | | | | 690 | 832 | 674 | - | 1,11 | 1,09 | ESCOAM | |
| | | | | 685 | 832 | 674 | - | 1,03 | 1,05 | ENRUG | |
| | | | | 743 | 832 | 674 | - | 1,08 | 1,13 | ENRUG | |
| | | | 19,00 | 209 | 603 | 846 | 680 | - | 1,03 | 0,98 | ESCOAM |
| | | | | | 684 | 846 | 680 | - | 1,08 | 1,07 | ESCOAM |
| | | | | | 674 | 846 | 680 | - | 0,99 | 1,02 | ENRUG |
| | | | | | 736 | 846 | 680 | - | 1,05 | 1,11 | ENRUG |
| | | | | 237 | 603 | 846 | 680 | - | 1,03 | 0,98 | ESCOAM |
| | | | | | 679 | 846 | 680 | - | 1,07 | 1,06 | ESCOAM |
| | | | | | 701 | 846 | 680 | - | 1,04 | 1,07 | ENRUG |
| | | | | | 698 | 846 | 680 | - | 0,99 | 1,05 | ENRUG |
| | | | | 293 | 604 | 846 | 680 | - | 1,04 | 0,99 | ESCOAM |
| | | | | | 659 | 846 | 680 | - | 1,03 | 1,03 | ESCOAM |
| | | | | | 681 | 846 | 680 | - | 1,00 | 1,03 | ENRUG |
| | | | | | 731 | 846 | 680 | - | 1,04 | 1,10 | ENRUG |

TABELA 6.13 – Resistências, Equações de Interação e Modos de Falha

 $(t_w=3,0 \text{ mm} - \text{TR-37})$

| DADOS DA VIGA | | | | | RESULTADOS FINAIS | | | | | | | | | | |
|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|------------------------|--|---------------------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------|--|--|
| e (mm) | t_w (mm) | Tipo Trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | Força P_S (kN) | P_{RF} Escoam. da alma (kN) | P_{RF} Enrug. da alma (kN) | P_{RF} Flamb. global da alma (kN) | Equação Inter. (Escoam.) | Equação. Inter. (Enrug.) | Equação. Inter. (Flamb) | Modo de falha encontrado | | | |
| 0 | 3,0 | TR-37 | 12,50 | 153 | 625 | 1020 | 813 | 1048 | | | | | | | |
| | | | | | 726 | 1020 | 813 | 947 | 1,00 | 0,97 | 0,77 | ESCOAM | | | |
| | | | | | 726 | 1020 | 813 | 831 | 0,92 | 0,93 | 0,87 | FLAMB | | | |
| | | | | | 709 | 1020 | 813 | 709 | 0,84 | 0,89 | 1,00 | FLAMB | | | |
| | | | | 209 | 621 | 1020 | 813 | 1048 | | | | | | | |
| | | | | | 747 | 1020 | 813 | 947 | 1,04 | 1,00 | 0,79 | ESCOAM | | | |
| | | | | | 756 | 1020 | 813 | 831 | 0,97 | 0,98 | 0,91 | FLAMB | | | |
| | | | | | 735 | 1020 | 813 | 709 | 0,88 | 0,93 | 1,04 | FLAMB | | | |
| | | | | 16,00 | 153 | 644 | 1036 | 820 | 1061 | | | | | | |
| | | | | | | 766 | 1036 | 820 | 958 | 1,05 | 1,02 | 0,80 | ESCOAM | | |
| | | | | | | 743 | 1036 | 820 | 841 | 0,93 | 0,95 | 0,88 | FLAMB | | |
| | | | | | | 734 | 1036 | 820 | 718 | 0,86 | 0,92 | 1,02 | FLAMB | | |
| | | | 209 | | 629 | 1036 | 820 | 1061 | | | | | | | |
| | | | | | 753 | 1036 | 820 | 958 | 1,03 | 1,00 | 0,79 | ESCOAM | | | |
| | | | | | 772 | 1036 | 820 | 841 | 0,98 | 0,99 | 0,92 | ENRUG | | | |
| | | | | | 793 | 1036 | 820 | 718 | 0,95 | 1,00 | 1,10 | FLAMB | | | |
| | | | 237 | 621 | 1036 | 820 | 1061 | | | | | | | | |
| | | | | 767 | 1036 | 820 | 958 | 1,05 | 1,03 | 0,80 | ESCOAM | | | | |
| | | | | 791 | 1036 | 820 | 841 | 1,01 | 1,02 | 0,94 | ENRUG | | | | |
| | | | | 810 | 1036 | 820 | 718 | 0,98 | 1,02 | 1,13 | FLAMB | | | | |
| | | | 19,00 | 209 | 643 | 1050 | 826 | 1072 | | | | | | | |
| | | | | | 773 | 1050 | 826 | 968 | 1,05 | 1,03 | 0,80 | ESCOAM | | | |
| | | | | | 806 | 1050 | 826 | 850 | 1,02 | 1,03 | 0,95 | ENRUG | | | |
| | | | | | 842 | 1050 | 826 | 725 | 1,01 | 1,06 | 1,16 | FLAMB | | | |
| | | | | 237 | 633 | 1050 | 826 | 1072 | | | | | | | |
| | | | | | 751 | 1050 | 826 | 968 | 1,01 | 0,99 | 0,78 | ESCOAM | | | |
| | | | | | 782 | 1050 | 826 | 850 | 0,98 | 1,00 | 0,92 | ENRUG | | | |
| | | | | | 814 | 1050 | 826 | 725 | 0,97 | 1,02 | 1,12 | FLAMB | | | |
| 293 | 615 | 1050 | | 826 | 1072 | | | | | | | | | | |
| | 768 | 1050 | | 826 | 968 | 1,04 | 1,02 | 0,79 | ESCOAM | | | | | | |
| | 797 | 1050 | | 826 | 850 | 1,00 | 1,02 | 0,94 | ENRUG | | | | | | |
| | 831 | 1050 | | 826 | 725 | 0,99 | 1,04 | 1,15 | FLAMB | | | | | | |

6.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Com os resultados encontrados na análise numérica, por meio do programa Ansys, e os encontrados aplicando-se as fórmulas propostas, fez-se uma análise estatística de forma a se verificar a correlação entre eles.

Considerando os valores da relação $P_{RF}/\text{média}P_R$ (para escoamento e enrugamento da alma) e os valores de P_{RF}/P_R (para flambagem global da alma), apresentados nas tabelas 6.1 e 6.7, os resultados dessa análise estatística são apresentados a seguir.

A média encontrada foi:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_{\text{formula},i}}{P_{\text{Ansys},i}} \Rightarrow \quad \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_{RF,i}}{P_{R,i}} \Rightarrow \quad \boxed{\bar{X} = 0,97}$$

sendo, n = número de vigas analisadas

P_{RF} = resultados encontrados pelas fórmulas propostas

P_R = resultados encontrados pelo programa Ansys, observando-se que para escoamento e enrugamento estes valores são uma média dos resultados encontrados no grupo de vigas analisado.

O desvio padrão dos erros δ_i , com $\delta_i = \frac{1}{\bar{X}} \frac{P_{RF,i}}{P_{R,i}}$, é dado por:

$$s_{\delta} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n \delta_i^2 - n\bar{\delta}^2 \right)} = \boxed{s_{\delta} = 0,05}$$

O coeficiente de correlação entre os valores dos resultados das fórmulas e os valores dos resultados do Ansys é dado por:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n P_{\text{Ansys},i} P_{\text{formula},i} - n\bar{P}_{\text{Ansys}} \bar{P}_{\text{formula}}}{n \cdot S_{P_{\text{Ansys}}} S_{P_{\text{formula}}}} = \boxed{\rho = 0,99}$$

sendo, $S_{P_{\text{Ansys}}}$ = desvio padrão dos resultados do Ansys

$S_{P_{\text{formula}}}$ = desvio padrão dos resultados das fórmulas

6.5 COMPARAÇÕES COM FÓRMULAS PROPOSTAS POR OUTROS PESQUISADORES

6.5.1 NOVAK e MACHACEK (1999) e NOVAK e MACHACEK (2000)

Comparam-se as resistências encontradas nesta pesquisa com as resistências nominais sugeridas por NOVAK e MACHACEK (1999) e NOVAK e MACHACEK (2000), citadas no item 3.3.2:

$$F_{Rk} = 1,33t_w^2(Ef_{yw})^{0,5}(t_f/t_w)^{0,5}$$

$$F_{Rk} = (78,9t_w + 3,2t_f - 14,7) \times \sqrt[3]{\frac{I_f + I_R}{I_f + I_R^*}} \leq 270 \times \sqrt[3]{\frac{I_f + I_R}{I_f + I_R^*}}, [kN]$$

Onde:

t_w = espessura da alma senoidal

t_f = soma da espessura da mesa com a espessura (altura) do trilho.

I_f e I_R são os momentos de inércia da mesa e do trilho, respectivamente, em relação ao seu eixo horizontal (mm^4).

$$I_f = \frac{b_f \times t_f^3}{12}$$

I_R^* é o momento de inércia da barra usada nos ensaios, $50 \times 30 \text{ mm}$; $I_R^* = 112500 \text{ mm}^4$.

Somente para a segunda equação, como o aço considerado pelos pesquisadores possui uma resistência ao escoamento de 215 MPa, faz-se a correção para o valor da resistência do aço em questão, 300 MPa, ou seja:

$$F_{Rk} = F_{Rk(\text{equação})} \times \sqrt{\frac{300}{215}}$$

Os autores NOVAK e MACHACEK (2000) não sugerem interação com a força cortante.

NOVAK e MACHACEK (2000) também limitam a fórmula em 270 kN, para excentricidades iguais a 20 mm e 270 kN + 10% para excentricidades nulas, ou seja, 297 kN. Esses limites serão mantidos mesmo com a alteração da resistência ao escoamento do aço.

Nas TAB.6.14 e 6.15 mostram-se esses valores e comparam-se os mesmos com as resistências do presente estudo.

TABELA 6.14 – Comparações com NOVAK e MACHACEK (1999 e 2000)
($t_w=2,0$ mm – trilho barra quadrada 50 mm)

| DADOS DA VIGA | | | | NOVAK e MACHACEK (2000) | | | NOVAK e MACHACEK (1999) | Presente Estudo | | | | |
|---------------|----------------|---------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------|-------------------------|--|---------------------------------------|-----|-----|-----|
| t_w (mm) | Tipo trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | I_f (mm ⁴) | I_R (mm ⁴) | F_{Rk} (kN) | F_{Rk} (kN) | P_{RF} Escoam. da alma (kN) | P_{RF} Enrug. da alma (kN) | | | |
| 2,0 | barra 50 | 12,50 | 153 | 24902 | 520800 | 297 | 230 | 279 | 241 | | | |
| | | | | 24902 | 520800 | 297 | 230 | 279 | 241 | | | |
| | | | | 24902 | 520800 | 297 | 230 | 279 | 241 | | | |
| | | | | 24902 | 520800 | 297 | 230 | 279 | 241 | | | |
| | | | 209 | 34017 | 520800 | 297 | 230 | 279 | 241 | | | |
| | | | | 34017 | 520800 | 297 | 230 | 279 | 241 | | | |
| | | | | 34017 | 520800 | 297 | 230 | 279 | 241 | | | |
| | | | | 34017 | 520800 | 297 | 230 | 279 | 241 | | | |
| 2,0 | barra 50 | 16,00 | 153 | 52224 | 520800 | 297 | 237 | 289 | 246 | | | |
| | | | | 52224 | 520800 | 297 | 237 | 289 | 246 | | | |
| | | | | 52224 | 520800 | 297 | 237 | 289 | 246 | | | |
| | | | | 52224 | 520800 | 297 | 237 | 289 | 246 | | | |
| | | | 209 | 71339 | 520800 | 297 | 237 | 289 | 246 | | | |
| | | | | 71339 | 520800 | 297 | 237 | 289 | 246 | | | |
| | | | | 71339 | 520800 | 297 | 237 | 289 | 246 | | | |
| | | | | 71339 | 520800 | 297 | 237 | 289 | 246 | | | |
| | | | 237 | 80896 | 520800 | 297 | 237 | 289 | 246 | | | |
| | | | | 80896 | 520800 | 297 | 237 | 289 | 246 | | | |
| | | | | 80896 | 520800 | 297 | 237 | 289 | 246 | | | |
| | | | | 80896 | 520800 | 297 | 237 | 289 | 246 | | | |
| | | | 2,0 | barra 50 | 19,00 | 209 | 119461 | 520800 | 297 | 242 | 299 | 251 |
| | | | | | | | 119461 | 520800 | 297 | 242 | 299 | 251 |
| | | | | | | | 119461 | 520800 | 297 | 242 | 299 | 251 |
| | | | | | | | 119461 | 520800 | 297 | 242 | 299 | 251 |
| 237 | 135465 | 520800 | | | | 297 | 242 | 299 | 251 | | | |
| | 135465 | 520800 | | | | 297 | 242 | 299 | 251 | | | |
| | 135465 | 520800 | | | | 297 | 242 | 299 | 251 | | | |
| | 135465 | 520800 | | | | 297 | 242 | 299 | 251 | | | |
| 293 | 167474 | 520800 | | | | 297 | 242 | 299 | 251 | | | |
| | 167474 | 520800 | | | | 297 | 242 | 299 | 251 | | | |
| | 167474 | 520800 | | | | 297 | 242 | 299 | 251 | | | |
| | 167474 | 520800 | | | | 297 | 242 | 299 | 251 | | | |

TABELA 6.15 – Comparações com NOVAK e MACHACEK (1999 e 2000)
($t_w=2,0$ mm – trilho TR-25)

| DADOS DA VIGA | | | | NOVAK e MACHACEK (2000) | | | NOVAK e MACHACEK (1999) | Presente Estudo | | | | |
|---------------|----------------|---------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------|-------------------------|--|---------------------------------------|-----|-----|-----|
| t_w (mm) | Tipo trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | I_f (mm ⁴) | I_R (mm ⁴) | F_{Rk} (kN) | F_{Rk} (kN) | P_{RF} Escoam. da alma (kN) | P_{RF} Enrug. da alma (kN) | | | |
| 2,0 | TR-25 | 12,50 | 153 | 24902 | 4130000 | 297 | 307 | 544 | 420 | | | |
| | | | | 24902 | 4130000 | 297 | 307 | 544 | 420 | | | |
| | | | | 24902 | 4130000 | 297 | 307 | 544 | 420 | | | |
| | | | | 24902 | 4130000 | 297 | 307 | 544 | 420 | | | |
| | | | 209 | 34017 | 4130000 | 297 | 307 | 544 | 420 | | | |
| | | | | 34017 | 4130000 | 297 | 307 | 544 | 420 | | | |
| | | | | 34017 | 4130000 | 297 | 307 | 544 | 420 | | | |
| | | | | 34017 | 4130000 | 297 | 307 | 544 | 420 | | | |
| 2,0 | TR-25 | 16,00 | 153 | 52224 | 4130000 | 297 | 312 | 555 | 425 | | | |
| | | | | 52224 | 4130000 | 297 | 312 | 555 | 425 | | | |
| | | | | 52224 | 4130000 | 297 | 312 | 555 | 425 | | | |
| | | | | 52224 | 4130000 | 297 | 312 | 555 | 425 | | | |
| | | | 209 | 71339 | 4130000 | 297 | 312 | 555 | 425 | | | |
| | | | | 71339 | 4130000 | 297 | 312 | 555 | 425 | | | |
| | | | | 71339 | 4130000 | 297 | 312 | 555 | 425 | | | |
| | | | | 71339 | 4130000 | 297 | 312 | 555 | 425 | | | |
| | | | 237 | 80896 | 4130000 | 297 | 312 | 555 | 425 | | | |
| | | | | 80896 | 4130000 | 297 | 312 | 555 | 425 | | | |
| | | | | 80896 | 4130000 | 297 | 312 | 555 | 425 | | | |
| | | | | 80896 | 4130000 | 297 | 312 | 555 | 425 | | | |
| | | | 2,0 | TR-25 | 19,00 | 209 | 119461 | 4130000 | 297 | 316 | 564 | 429 |
| | | | | | | | 119461 | 4130000 | 297 | 316 | 564 | 429 |
| | | | | | | | 119461 | 4130000 | 297 | 316 | 564 | 429 |
| | | | | | | | 119461 | 4130000 | 297 | 316 | 564 | 429 |
| 237 | 135465 | 4130000 | | | | 297 | 316 | 564 | 429 | | | |
| | 135465 | 4130000 | | | | 297 | 316 | 564 | 429 | | | |
| | 135465 | 4130000 | | | | 297 | 316 | 564 | 429 | | | |
| | 135465 | 4130000 | | | | 297 | 316 | 564 | 429 | | | |
| 293 | 167474 | 4130000 | | | | 297 | 316 | 564 | 429 | | | |
| | 167474 | 4130000 | | | | 297 | 316 | 564 | 429 | | | |
| | 167474 | 4130000 | | | | 297 | 316 | 564 | 429 | | | |
| | 167474 | 4130000 | | | | 297 | 316 | 564 | 429 | | | |

Observação: Para as vigas com o trilho TR-25, os valores de F_{Rk} encontrados pela fórmula de NOVAK e MACHACEK (2000) seriam muito superiores ao limite utilizado de 297 kN.

Analisando-se os resultados das tabelas anteriores conclui-se que a fórmula de NOVAK e MACHACEK (2000) só seria aplicável a vigas com trilhos pequenos de barra quadrada, já que os valores encontrados para vigas com trilhos TR-25 estão bem acima do valor limite mencionado pelos autores. Observa-se que seus ensaios foram realizados com a força aplicada sobre uma chapa com altura de 30 mm.

Além da comparação feita entre as fórmulas recomendadas neste estudo e as fórmulas desenvolvidas por NOVAK e MACHACEK (2000), utiliza-se o modelo do Ansys, desenvolvido neste trabalho, para analisar os resultados de um determinado ensaio de NOVAK e MACHACEK (2000). Adota-se o ensaio feito com o modelo da FIG. 3.10, (aqui rerepresentada – FIG.6.7) de uma viga com dois apoios rotulados. Para esta análise escolhe-se o ensaio realizado com uma força aplicada de excentricidade nula.

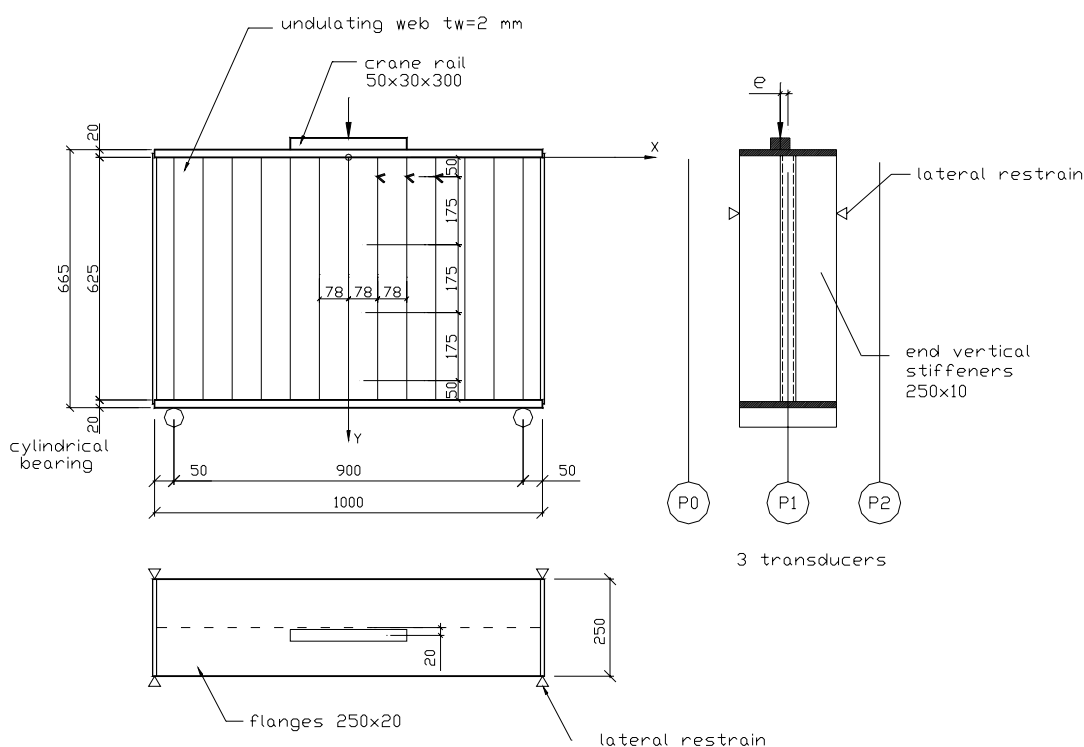


FIGURA 6.7 – Modelo típico com dois apoios rotulados
[NOVAK e MACHACEK (2000)]

Utiliza-se a mesma modelagem desenvolvida neste estudo, apresentada no item 4. Alma, mesas, elementos de contato, condições de contorno e carregamentos seguem os itens 4.3, 4.4, 4.6 e 4.7, respectivamente. Alma e mesas com resistências ao escoamento, conforme NOVAK e MACHACEK (2000), iguais a 215 MPa. Para o trilho segue-se o mesmo conceito estabelecido no item 4.5, onde se adota um perfil T invertido preservando altura e momento de inércia da seção 50 x 30 mm. Na FIG. 6.8 apresenta-se este trilho com as dimensões adotadas para aplicação do modelo.

Trilho barra quadrada seção 50 x 30 mm $\rightarrow h_{tr} = 30 \text{ mm}$
 $\rightarrow I_{x,tr} = 112.500 \text{ mm}^4$

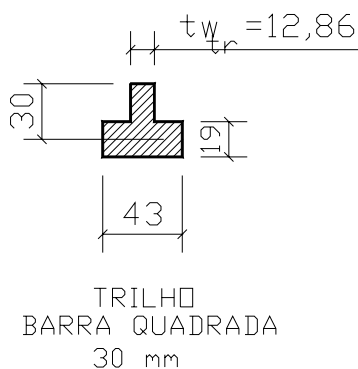


FIGURA 6.8 – Dimensões e propriedades do trilho seção 50x30 mm para Ansys,
 em mm

Os dados e resultados apresentados na TAB. 6.16, a seguir, são os considerados e gerados pelo modelo do Ansys para essa nova viga. Como resultado da análise foi obtida uma força última igual a 217 kN.

TABELA 6.16 – Resultados retirados do Ansys para a viga do ensaio de NOVAK e MACHACEK (2000)

| DADOS DA VIGA | | | | | | | ANÁLISE DE FLAMBAGEM | | | ANÁLISE PLÁSTICA | | | |
|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|--------------|---------------|-------------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------------|-------------|---------------|
| e (mm) | t_w (mm) | tipo trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (mm) | L (mm) | Força Aplic. (kN) | auto- valor | F_{fl} (kN) | parc. | Força Aplic. (kN) | fra- ção | F_u (kN) |
| 0 | 2,0 | barra 30 | 20,0 | 250 (237) | 665 (610) | 1000 (930) | 1000 | 0,60261 | 603 | 0,50 | 301 | 0,72 | 217 |

Visando uma comparação com o resultado do ensaio encontrado por NOVAK e MACHACEK (2000), citado na TAB.3.4, novamente aqui rerepresentada – TAB.6.17), obtém-se valor bem próximo do encontrado no Ansys.

Essa comparação serve como mais uma aferição do modelo de Elementos Finitos usado na análise numérica apresentada neste estudo.

TABELA 6.17 – Força de colapso média dos ensaios em perfis com alma senoidal de 2,0 mm [NOVAK e MACHACEK (2000)]

| Eccentricity e [mm] | Average collapse loading $F_{u,avg}$ [kN] | Percentage [%] |
|-----------------------|---|----------------|
| 0 | 230 | 100,0 |
| 20 | 228 | 99,0 |
| 30 | 210 | 91,3 |
| 40 | 208 | 90,4 |

6.5.2 PASTERNAK E BRANKA (1999)

PASTERNAK e BRANKA (1999), citados em 3.3.2, propuseram a seguinte equação para o cálculo da resistência sob força localizada:

$$F_{ult} = 10 \left(\frac{W_{el}}{I_{wy}/t_w} \right)^{0,4} b_w t_w f_{yw}$$

Onde:

W_{el} é o módulo de resistência da mesa carregada com relação ao seu eixo de menor inércia;

$$W_{el} = \frac{b_f \times t_f^2}{6}$$

I_{wy} é o momento de inércia da alma senoidal em relação ao eixo longitudinal do perfil, referente ao comprimento da onda (w), dado por:

$$I_{wy} = 0,158 t_w w^3 \left(\frac{b_w}{w} \right)^{2,12}$$

b_w é o dobro da amplitude da onda

t_w é a espessura da alma

f_{yw} é a resistência ao escoamento da alma

Na TAB.6.18 mostram-se esses valores e comparam-se os mesmos com as resistências do presente estudo.

TABELA 6.18 – Comparações com PASTERNAK e BRANKA (1999)

| DADOS DA VIGA | | | | | Cálculos PASTERNAK e BRANKA (1999) | | Presente Estudo tw=2,0 mm trilho barra quadrada 50 mm | |
|---------------|----------------|---------------|---------------|-------------|--|-------------------|--|---------------------------------|
| t_w (mm) | Tipo trilho | t_f (mm) | b_f (mm) | H (mm) | I_{wy} (mm ⁴) | F_{ult} (kN) | P_{RF} Escoam. da alma | P_{RF} Enrugam. da alma |
| 2,0 | barra 50 | 12,50 | 153 | 610 | 66611 | 103 | 279 | 241 |
| | | | | 806 | 66611 | 103 | 279 | 241 |
| | | | | 1002 | 66611 | 103 | 279 | 241 |
| | | | | 1198 | 66611 | 103 | 279 | 241 |
| | | | 209 | 610 | 66611 | 116 | 279 | 241 |
| | | | | 806 | 66611 | 116 | 279 | 241 |
| | | | | 1002 | 66611 | 116 | 279 | 241 |
| | | | | 1198 | 66611 | 116 | 279 | 241 |
| 2,0 | barra 50 | 16,00 | 153 | 610 | 66611 | 125 | 289 | 246 |
| | | | | 806 | 66611 | 125 | 289 | 246 |
| | | | | 1002 | 66611 | 125 | 289 | 246 |
| | | | | 1198 | 66611 | 125 | 289 | 246 |
| | | | 209 | 610 | 66611 | 142 | 289 | 246 |
| | | | | 806 | 66611 | 142 | 289 | 246 |
| | | | | 1002 | 66611 | 142 | 289 | 246 |
| | | | | 1198 | 66611 | 142 | 289 | 246 |
| | | | 237 | 610 | 66611 | 149 | 289 | 246 |
| | | | | 806 | 66611 | 149 | 289 | 246 |
| | | | | 1002 | 66611 | 149 | 289 | 246 |
| | | | | 1198 | 66611 | 149 | 289 | 246 |
| 2,0 | barra 50 | 19,00 | 209 | 610 | 66611 | 163 | 299 | 251 |
| | | | | 806 | 66611 | 163 | 299 | 251 |
| | | | | 1002 | 66611 | 163 | 299 | 251 |
| | | | | 1198 | 66611 | 163 | 299 | 251 |
| | | | 237 | 610 | 66611 | 171 | 299 | 251 |
| | | | | 806 | 66611 | 171 | 299 | 251 |
| | | | | 1002 | 66611 | 171 | 299 | 251 |
| | | | | 1198 | 66611 | 171 | 299 | 251 |
| | | | 293 | 610 | 66611 | 186 | 299 | 251 |
| | | | | 806 | 66611 | 186 | 299 | 251 |
| | | | | 1002 | 66611 | 186 | 299 | 251 |
| | | | | 1198 | 66611 | 186 | 299 | 251 |

Analisando-se os resultados da tabela acima conclui-se que a grande diferença entre os valores das resistências obtidas pela fórmula de PASTERNAK e BRANKA (1999) e as resistências obtidas pelas formulações recomendadas neste estudo, é devida à não existência do trilho nos estudos de PASTERNAK e BRANKA. A presença do trilho permite uma distribuição da força sobre a viga, evitando a aplicação direta desta em uma pequena área do elemento da viga.

7

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES

7.1.1 Interações com a Força Cortante

De posse dos resultados do Ansys, primeiramente conclui-se que a razão para o aumento da força última com a altura (mantida a espessura da alma), em geral, é a interação entre os efeitos da força local aplicada e da força cortante gerada.

Desenvolveram-se equações de interações que determinam diferentes influências da força cortante, dependendo dos estados limites últimos. Conclui-se que no caso de escoamento da alma a interação com a força cortante é mais forte. Para o enrugamento da alma essa interação é muito menor e para flambagem global da alma não há interação com a força cortante.

7.1.2 Trilhos

O tipo de trilho influencia em diversos aspectos. Como a força localizada é aplicada sobre o trilho em um pequeno comprimento, o comprimento de distribuição L' dessa força sobre a viga é bem maior do que sobre o trilho. Assim, quanto maior a altura do trilho, maior esse comprimento de distribuição, ou seja, maior a região onde ocorre pressão de contato entre o trilho e a viga.

Conclui-se também que esse comprimento de distribuição não é proporcional à altura do trilho. Isso explica o termo de correção, $\left(\frac{h_{tr}}{h_{ref}}\right)^\alpha$, nas fórmulas para o cálculo do comprimento L' .

Para vigas com as mesmas características, quanto menor a altura do trilho, ou seja, quanto menor o comprimento de distribuição da força aplicada sobre a viga, menor o valor da força F_{fl} de flambagem elástica, em geral. Isso também acontece com as forças últimas F_u , que, para vigas com mesmos parâmetros, têm valores crescentes com o aumento da altura do trilho.

Quanto menor a altura do trilho, menor é o comprimento de distribuição da força sobre a viga e, portanto, desenvolve-se uma solicitação mais concentrada na viga. Assim, para trilhos baixos há maior possibilidade de ocorrerem falhas locais, como o escoamento e o enrugamento da alma. Já a flambagem global da alma tem maior probabilidade de ocorrer em vigas com trilhos de alturas maiores, devido ao maior comprimento de distribuição da força sobre a viga.

Como já mencionado, para este estudo a resistência ao escoamento do aço do trilho foi adotada com um valor elevado para que o trilho trabalhasse sempre no regime elástico. Isso realmente ocorreu, porém alguns trilhos alcançaram tensões de von Mises elevadas se comparadas com as resistências usuais dos aços dos trilhos no mercado. Essas tensões elevadas nos trilhos ocorreram em vigas com almas de 3,0 mm, onde as forças

últimas são maiores, atingindo valores consideráveis nos trilhos de barra quadrada com 50 mm, por serem mais flexíveis.

Sendo assim, nas vigas com alma de 3,0 mm e trilhos barra quadrada 50 mm, o presente estudo só é válido para resistência ao escoamento do aço do trilho maior que a tensão de von Mises alcançada nos resultados. Como esse nível de resistência ao escoamento não é usual, conclui-se que a resistência a forças localizadas, no caso da alma de 3 mm, é limitada pelo trilho barra quadrada 50 mm.

7.1.3 Alturas das vigas

A altura da viga, H , tem influência no estado limite flambagem global da alma. É fisicamente lógico que a flambagem global ocorra em vigas com grandes alturas.

Para o escoamento da alma, as equações de interação propostas apresentaram valores de resistência à força localizada isolada (P_R), para vigas com todos os parâmetros idênticos, porém com alturas diferentes, bastante próximos entre si, ou seja, praticamente sem influência da altura. Algumas diferenças ocorreram, atribuídas a imprecisões das análises numéricas.

Concluiu-se também, com relação à variação de altura das vigas, para grupos de vigas com mesmos parâmetros variando somente a altura, onde ocorrem estados limites diferentes, que as vigas com menores alturas sofrem escoamento local da alma e as com maiores alturas sofrem enrugamento ou flambagem global antes do escoamento. Esse fato é fisicamente evidente devido à menor rigidez lateral da alma das vigas mais altas.

7.1.4 Mesas das vigas

Na grande maioria dos casos as mesas não atingem sua resistência ao escoamento, considerada igual a 350 MPa. Para as vigas com espessura de alma de 3,0 mm com os trilhos barra quadrada de 50 mm, as tensões nas mesas aproximam-se desse limite

chegando mesmo a atingi-lo. Ocorre que, após a alma atingir seu estado limite último, ela deixa de dar sustentação para a mesa, que se deforma e atinge seu escoamento. Verificando-se um passo anterior ao considerado último, encontra-se a alma já no escoamento e a mesa abaixo do escoamento.

Na fórmula para o enrugamento da alma dada na ABNT NBR8800:2008 considera-se a espessura da mesa influenciando a resistência de forma acentuada. Esse aumento considerável da resistência com o aumento da espessura da mesa não é observado nos resultados obtidos para as vigas de alma senoidal, devido à presença dos trilhos em todos os casos analisados. Para corrigir essa diferença, estabelece-se um fator de redução na formulação proposta.

7.1.5 Outras Conclusões

O maior resultado de somatório das equações de interação, obtidas com as resistências P_{RF} dadas para os três estados limites, corresponde ao modo de falha crítico da viga.

As previsões dos valores de P_R , por meio das formulações propostas, apresentam boa conformidade com os valores obtidos por meio das equações de interação também propostas e dos resultados das análises numéricas, para todos os casos de falha - escoamento da alma, enrugamento da alma e flambagem global da alma.

ELGAALY e SESHADRI (1997) apresentam duas equações de interação da força localizada com a força cortante, uma com expoentes de 1,8, citadas em ELGAALY (1983), para vigas de almas planas, e outra com expoentes de 1,25, recomendada por ser mais conservadora. Neste estudo são adotados os expoentes de 1,25, para o escoamento.

Todos os procedimentos recomendados são para casos de vigas com forças localizadas afastadas do apoio pelo menos da metade do comprimento de distribuição, L' , da força sobre a viga.

Finalmente conclui-se que almas senoidais de 3 mm têm uma capacidade local apreciável e que o desenvolvimento dessa capacidade depende do uso de um trilho com resistência superior ao das barras quadradas usuais de 50 mm. Por outro lado, conclui-se também que, na maioria dos casos, o uso de trilhos superiores ao TR-25 não traz vantagem adicional porque o ganho de resistência não seria de grande relevância.

No presente estudo, recomenda-se, para a determinação da resistência de cálculo a forças localizadas, um coeficiente de segurança preliminar de 1,20, cujo o valor definitivo deverá ser estabelecido após análise experimental e de confiabilidade.

$$P_{Rd} = \frac{P_R}{1,20}$$

7.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No capítulo sobre as vigas com força excêntrica foi citada a necessidade de uma discretização melhor dos trilhos devido às grandes diferenças de valores entre as forças últimas com força excêntrica e com excentricidade nula.

Nesse estudo o comprimento de distribuição da força localizada sobre a viga, proposto nas fórmulas, é válido somente para vigas com forças localizadas a uma distância do apoio de no mínimo a metade desse comprimento. Para se propor uma fórmula para o cálculo do comprimento L' para os casos de forças localizadas próximas aos apoios são necessários novos estudos.

A verificação à fadiga para vigas de rolamentos é um procedimento de extrema importância já que o funcionamento da ponte rolante resulta em alterações de tensões nos elementos da viga. Provavelmente, para efeitos de fadiga, a força localizada deve ser limitada pelo início do escoamento da alma que, conforme já comentado, é da ordem de 40% da correspondente ao estado limite último.

Fica também a recomendação de se estudar essas forças localizadas interagindo com o momento fletor, considerando comprimentos maiores de vigas.

É muito importante que esse estudo seja validado experimentalmente, sendo que, para fadiga, a análise experimental é indispensável.

8

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 8800:2008. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Projeto de Estrutura de Aço de Estrutura Mista de Aço e Concreto de Edifícios*. Rio de Janeiro.

ANSI AISC 360-05: 2005. American National Standard ANSI/AISC 360-05, 2005 Specification for Structural Steel Building. AISC, Chicago, Illinois, Estados Unidos da América.

ARAVENA e EDLUND (1987). Aravena, L. e Edlund, B. “Buckling of trapezoidally corrugated webs”. Rep. *ECCS Colloquium on Stability of Plates and Shells*, Ghent Univ., Belgium, 107-116.

BERGFELT (1983). Bergfelt, A “Girder web stiffening for patch loading. CTH Division of Steel and Timber Structures, Publ. S 83:1, Göteborg, 1983.

BRANKA (1999), Branka, P. “Tragverhalten von Trager mit Schlanken, Ebenen und Profilierten Stege” – Dissertação de Doutorado – Universidade de Brandemburgo, Cottbus, Alemanha.

CALENZANI *et al* (2007). Calenzani, A.F.G., Fakury, R.H., Paula, F.A., Rodrigues, F.C., Queiroz, G., Pimenta, R.J. “Determinação da Rigidez Rotacional de Vigas Mistas de Alma Senoidal no Estado Limite de Flambagem Lateral com Distorção” – CMNE/CILAMCE, 2007, Porto, Portugal.

CALENZANI (2008). Calenzani, A.F.G. “Proposição de Procedimento para a Determinação da Rigidez Rotacional de Vigas Mistas Contínuas e Semicontínuas com Perfis de Alma Senoidal” – Tese de Doutorado, 2008. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CAMARGO (2010). Camargo, A.L. “Determinação da Capacidade Resistente à Força Cortante de Perfis de Alma Senoidal em Situação de Incêndio” – Dissertação de Mestrado, 2010. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

EASLEY, J.T. (1975) – “Buckling Formulas for Corrugated Metal Shear Diaphragms” – Journal of the Structural Division, ASCE, July 1975, pp. 1403-1417.

ELGAALY *et al.*(1996). Elgaaly, M., Seshadri, A. & Hamilton, R.W. “Shear Strength of Beams with Corrugated Webs” – Journal of Structural Engineering, pp.390-397, 1996, Estados Unidos da América.

ELGAALY (1983). Elgaaly, M. “Web Design Under Compressive Edge Loads” – Engineering Journal, AISC, Fourth Quarter, 1983, Estados Unidos da América.

ELGAALY e SESHADRI (1997). Elgaaly, M. & Seshadri, A. “Girders with Corrugated Webs Under Partial Compressive Edge Loading” – Journal of Structural Engineering, pp.783-790, 1997, Estados Unidos da América.

GLP – Corrugated Plate Industry – site www.cpi-glp.com/

HACKBARTH JÚNIOR (2006) – Hackbarth Júnior, H. “Estudo de Flambagem Lateral com Torção de Vigas de Aço de Alma Senoidal” – Dissertação de Mestrado 2006. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

GONZAGA (2008). Gonzaga, L.G.M. “Análise Numérico-Experimental de Flambagem Lateral com Torção e de Ligações em Vigas com Perfis de Alma Corrugada Senoidal” – Tese de Doutorado, 2008. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MACHACEK e TUMA (2006). Machacek, J. e Tuma, M. “Fatigue Life of Girders with Undulating Webs” – Journal of Constructional Steel Research 62 (2006), 168-177, Elsevier.

MARTINS (2008). Galvão, A. “Estudo do Comportamento de Vigas Mistas Biapoiadas e Semicontínuas com Perfis de Alma Senoidal” – Projeto de Tese de Doutorado, 2008. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MARTINS (2009). Galvão, A. “Estudo do Comportamento de Vigas Mistas com Perfil de Alma Senoidal” – Tese de Doutorado, 2009. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

NOVAK e MACHACEK (1998). Novak, R. e Machacek, J. “Girders with Undulating Webs” – CTU Report (em tcheco), Department of Steel Structures, CTU (Czech Technical University in Prague), 1998, Praga, República Tcheca.

NOVAK e MACHACEK (1999). Novak, R. e Machacek, J. “Local Buckling of Undulating Webs” – Department of Steel Structures, CTU (Czech Technical University in Prague), 1999, Praga, República Tcheca.

NOVAK e MACHACEK (2000). Novak, R. e Machacek, J. “Design Resistance of Undulating Webs under Patch Loading” – Proceedings of the 3rd Internacional Conference “Coupled Instabilities in Metal Structures CIMS’2000, 371-378, 2000, Lisboa, Portugal.

PASTERNAK (1996). Pasternak, H. “Expert Statement on the Transverse Force Load Carrying Capacity of Corrugated Web Beams - Gutachterliche Stellungnahme zur Querkrafttragfähigkeit von Wellstergträgern” – Braunschweig/Cottbus, 1996.

PASTERNAK e BRANKA (1999), Pasternak, H e Branka, P. “Tragverhalten von Wellstegträgern unter lokaler Lasteinleitung” – Erscheint in Bauingenieur 5/99, Alemanha, 1999.

PIMENTA (2007). Pimenta, R.J. “Perfis de Alma Senoidal: Proposição de Métodos de Cálculo e Análise da Confiabilidade Estrutural” - Projeto de Tese de Doutorado, 2007. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

PIMENTA (2008). Pimenta, R.J. “Perfis de Alma Senoidal: Proposição de Métodos de Cálculo e Análise da Confiabilidade Estrutural.” – Tese de Doutorado, 2008. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

PINTO (2008). Pinto, E.L. “Análise Numérico-Experimental da Flambagem Local de Mesas de Perfis com Alma Senoidal” - Projeto de Tese de Doutorado, 2008. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

PLAIS (2009). Plais, W. “Perfis de Alma Senoidal” – Documento Técnico Codeme Engenharia S.A.

SAAL e HORNUNG (1995). Saal, H e Hornung, U. “Untersuchungen zur Einleitung dynamischer Lasten” Bericht Nr.943040, Univ. Karlsruhe, 1995

SCHWARZ (1990). Schwarz, L. “Prufbericht Uber Versuch an I-Trägern mit Gewelltem Stegblech” – Technische Universität Wien, Institut für Stahlbau, Alemanha, 1990.

SIOKOLA (1999). Siokola, W. “Corrugated Web Beam: Technical Documentation” – 4th Edition – Zeman & Co.

SOUZA (2006). Souza, D.G. “Estudo de Flambagem Local de Mesa de Perfis I com Alma Senoidal via Análise Não-Linear pelo MEF” – Dissertação de Mestrado, 2006. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

TEIXEIRA (2004). Teixeira, R.S. “Metodologia de Análise de Fadiga em Componentes Estruturais de Aço baseada na Mecânica da Fratura” – Dissertação de Mestrado, 2004. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.