

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Estudo da área líquida efetiva de chapas e cantoneiras de aço tracionadas e ligadas por parafusos

Jane Suave Veronez

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil

Vitória -ES

Junho de 2005

Estudo da área líquida efetiva de chapas e cantoneiras de aço tracionadas e ligadas por parafusos

Jane Suave Veronez

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Centro Tecnológico – Universidade federal do Espírito Santo como parte dos requisitos para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em 07/06/2005.

Prof. Dr. Walnório Graça Ferreira – Orientador, UFES

Prof. MSc. Pedro Augusto Cezar Oliveira de Sá - Co-Orientador, UFES

Prof. Dr. Luiz Herkenhoff Coelho - UFES

Prof. Dr. Luiz Fernando Loureiro Ribeiro - UFOP

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Vitória, Junho de 2005

Suave Veronez, Jane, 1973

Estudo da área líquida efetiva de chapas e cantoneiras de aço tracionadas e ligadas por parafusos. [Vitória] 2005.

xx,179p.29,7 cm(UFES, M.Sc., Engenharia Civil, 2004).

Dissertação, Universidade Federal do Espírito Santo, PPGEC.

1. Estruturas Metálicas – Projeto e construção. 2. Estruturas – Aço

I. Ferreira, Walnório Graça. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

Dedico este trabalho a minha família, , por sempre acreditar, incentivar, dividir, compreender e, em especial, a Márcio José da Silva por, além disto, estar ao meu lado em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Ao mestre e amigo Prof. MSc. Pedro Augusto Cezar Oliveira de Sá pela paciência, orientação, dedicação e sabedoria aplicada a este trabalho.

À CST – Companhia Siderúrgica Tubarão e ao NEXEM – Núcleo de Excelência em Estruturas Metálicas e Mistas pela concessão da bolsa de estudos e bibliografia oferecida.

Ao Prof. Dr. Walnório Graça Ferreira pela orientação, presteza e acompanhamento do andamento da dissertação.

A amiga, colega de mestrado e trabalho Engenheira Bárbara Sarcinelli Campagnaro por se empenhar, ajudar, acreditar e dividir as atividades deste trabalho.

Aos alunos do Nexem Péricles, Edna, Victor, Elicarlos, Mariana, Débora e Aparecida pelo auxílio, dicas e por terem tornado os dias de trabalho e pesquisa melhores e mais divertidos.

A amiga e “anormal” Engenheira Letícia Oliveira Silveira pelo apoio e interesse demonstrados.

À Cobrapi Engenharia por incentivar o aumento de conhecimento acadêmico de seus funcionários e aplicação destes nos serviços por ela oferecidos.

Ao PPGEC pela oportunidade, aos colegas de curso e professores pelo convívio.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XV
RESUMO	XIX
ABSTRACT	XX
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 PEÇAS DE AÇO TRACIONADAS	2
1.1.1 DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES	2
1.1.2 LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE AÇO	2
1.1.3 TIPOS DE DEFORMAÇÕES E MODOS DE FALHA	3
1.1.4 DIMENSIONAMENTO NOS ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS	8
2 OBJETIVO, METODOLOGIA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 OBJETIVO	11
2.2 METODOLOGIA	11
2.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.3.1 HISTÓRICO DO CÁLCULO DA ÁREA LÍQUIDA EFETIVA	14
2.3.2 ESTUDOS SOBRE A INFLUÊNCIA DO FATOR <i>SHEAR LAG</i> NA SEÇÃO LÍQUIDA	17
2.3.3 OUTRAS VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA	19
2.3.4 COMPARAÇÕES DE RESULTADOS E NORMAS	20
2.3.5 INFLUÊNCIA DO MOMENTO FLETOR E DA FABRICAÇÃO DOS FUROS EM PERFIS T LIGADOS PELA ALMA	21
2.3.6 EFEITOS DA DISTÂNCIA DE FURO A BORDA, ESPAÇAMENTO LONGITUDINAL ENTRE FUROS E RELAÇÃO f_u/f_y	26
3 DISPOSIÇÃO SOBRE O ASSUNTO EM NORMAS	28
3.1 DISPOSIÇÕES SOBRE O ASSUNTO EM NORMAS	29

3.2	COMPARAÇÃO ENTRE AS NORMAS DE PERFIS LAMINADOS E SOLDADOS	39
4	CONSIDERAÇÕES E LIMITAÇÕES DO PROBLEMA	51
4.1	DEFINIÇÕES DE MODELO E VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA	51
4.2	FAIXAS DE VARIAÇÕES E SIMPLIFICAÇÕES	65
5	MODELOS NUMÉRICOS	69
5.1	CRITÉRIOS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO NUMÉRICA	69
5.2	MONTAGEM DO MODELO	70
5.2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS MODELOS	71
5.2.2	CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS	72
5.2.3	ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS	75
5.2.4	CONSTRUÇÃO DO VOLUME E DEFINIÇÃO DA MALHA	78
5.2.5	CARREGAMENTO E CONDIÇÕES DE CONTORNO	83
5.2.6	PROCESSAMENTO DOS MODELOS	86
5.2.7	TESTES DE MALHA	87
6	ANÁLISE PARAMÉTRICA	97
6.1	ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS CHAPAS	97
6.2	ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS CANTONEIRAS	122
7	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS PELA SIMULAÇÃO NUMÉRICA E PELAS NORMAS	141
7.1	ANÁLISE COMPARATIVA DAS CHAPAS	141
7.2	ANÁLISE COMPARATIVA DAS CANTONEIRAS	154
8	CONCLUSÃO	166
8.1	SÍNTESE	166
8.2	CONCLUSÃO	171
8.3	SUGESTÕES PARA PESQUISAS E ESTUDOS FUTUROS	174
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	176
10	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	179

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Tensões normais de tração, em uma peça tracionada com furo.	4
Figura 1.2 - Gráfico do coeficiente teórico de concentração de tensões.....	5
Figura 1.3 – Trajetórias de ruptura na seção líquida.....	7
Figura 1.4 – Colapso por rasgamento.....	9
Figura 1.5 – Modos de Ruptura de Cisalhamento de Bloco.....	10
Figura 2.1 – Representação da deformação em perfis T conectados pela alma.	24
Figura 3.1 - definições geométricas	28
Figura 3.2- Ilustração dos valores de e_c e l_c em seções transversais constituídas por elementos planos.....	31
Figura 3.3 – Conexões em cantoneiras.	33
Figura 4.1 – Diagrama tensão deformação do aço ASTM A36 e A325.....	53
Figura 5.1 – Gráfico $\sigma \times \varepsilon$ do aço ASTM A36 e ASTM A325.....	74
Figura 5.2 – Elemento Volumétrico	76
Figura 5.3 – Elemento de contato	77
Figura 5.4 (a) (b) (c) (d) – Forma volumétrica dos modelos construídos	81
Figura 5.5 - Malha definida para o parafuso e região próxima ao furo.....	82
Figura 5.6 - Malha definida para as regiões do modelo, exceto parafuso e região próxima ao furo	83
Figura 5.7 - Aplicação de restrições no modelo de chapa	85
Figura 5.8 - Aplicação de restrições nas direções transversais para o modelo de cantoneira.	85
Figura 5.9 – Teste das regiões da área de refinamento.....	88
Figura 5.10 – Teste de validação da malha fora da região de refinamento.	90
Figura 5.11 – Variação dos coeficientes α_σ e C_t com o aumento do número de elementos na malha.....	92

Figura 5.12 – Modelo 240-1.....	93
Figura 5.13 - Modelo 240-2.....	93
Figura 5.14 - Modelo 240-3.....	94
Figura 5.15 - Modelo 240-4.....	95
Figura 6.1 - várias etapas de aplicação da carga.....	99
Figura 6.2 – modelo 1, espessura = 0,635 cm.....	100
Figura 6.3 - modelo 6, $A_n / A_g = 0,5909$	102
Figura 6.4 - modelo 8, fila de furação = 1.....	103
Figura 6.5 - modelo 78, filas de furação =2.....	104
Figura 6.6 - modelo 79, filas de furação = 3.....	104
Figura 6.7 - modelo 75, filas de furação = 4.....	105
Figura 6.8 - modelo 76, filas de furação = 5.....	105
Figura 6.9 - modelo 77, filas de furação = 6.....	106
Figura 6.10 – Gráfico de resultados da variável “número de fila de furação em chapas”	106
Figura 6.11 - modelo 13, , número de parafusos por fila de furação = 6.....	108
Figura 6.12 - modelo 18, $s = 5,0\text{cm}$	109
Figura 6.13 – modelo 19, $e_2 / g = 0,4762$	112
Figura 6.14 – modelo 23, $e_2 / g = 0,5138$	112
Figura 6.15 – modelo28, $e_2 / g = 0,6284$	112
Figura 6.16 – modelo35, $e_2 / g = 0,7580$	113
Figura 6.17 – Gráfico de resultados para variável “ e_2 / g ” para duas filas de furação em chapas.....	113
Figura 6.18 – modelo 36, $e_2 / g = 0,5523$	116
Figura 6.19 – modelo 39, , $e_2 / g = 0,5820$	116
Figura 6.20 – modelo 42, $e_2 / g = 0,5476$	117

Figura 6.21 – modelo 45, $e_2/g = 0,4378$.	117
Figura 6.22 – modelo 51, $e_2/g = 0,4908$.	118
Figura 6.23 – modelo 53, $e_2/g = 0,6632$.	118
Figura 6.24 – Gráfico de resultados para a variável e_2/g para três filas de furação em chapas.	119
Figura 6.25 – gráfico dos valores $C_t \times (e_e/g)$ com duas e três filas de furação	120
Figura 6.26 – modelo 60, 3 parafusos / linha de furação	124
Figura 6.27 – modelo 57, 4 parafusos / linha de furação	125
Figura 6.28 – modelo 62, 6 parafusos / linha de furação	125
Figura 6.29 - Gráfico $C_t \times$ número de parafusos	126
Figura 6.30 – modelo 95, 4 furos e $s = 4,445$.	129
Figura 6.31 – modelo 99, 4 furos e $s = 5,715$.	129
Figura 6.32 – modelo 83, 6 furos e $s = 3,81$.	129
Figura 6.33 – modelo 85, 6 furos e $s = 6,99$.	130
Figura 6.34 – gráfico $C_t \times$ espaçamento longitudinal entre furos	130
Figura 6.35 – modelo 127, $e_2 = 1,90$.	132
Figura 6.36 – modelo 128, $e_2 = 2,60$.	133
Figura 6.37 – modelo 133, $e_2 = 3,40$.	133
Figura 6.38 – modelo 130, $e_2 = 4,10$.	133
Figura 6.39 – gráfico $C_t \times e_2$.	134
Figura 6.40 - modelo 131, $e_c = 0,48$	135
Figura 6.41 - modelo 134, $e_c = 1,44$	136
Figura 6.42 - modelo 136, $e_c = 2,40$	136
Figura 6.43 – gráfico $C_t \times e_c$ para cantoneiras	137
Figura 6.44 – gráfico $C_t \times e_2/(e_2 + e_c)$	138

Figura 6.45 - gráfico prático $C_t \times e_2 / (e_2 + e_c)$ para cinco ou mais parafusos.	139
Figura 7.1 – Resultados obtidos para a variável “número de filas de furação” em chapas.	149
Figura 7.2 – Comparação de resultados para a variável “ e_2/g ” em chapas com duas filas de furação.	153
Figura 7.3 – Comparação de resultados para a variável “ e_2/g ” em chapas com três filas de furação.	153
Figura 7.4 - Comparação de resultados para a variável “número de parafusos” em cantoneiras.	156
Figura 7.5 - Comparação de resultados para a variável “espaçamento longitudinal entre furos” para cantoneiras com quatro parafusos.	160
Figura 7.6 - Comparação de resultados para a variável “espaçamento longitudinal entre furos” para cantoneiras com seis parafusos.	160
Figura 7.7 - Comparação de resultados para a variável “ e_2 ” em cantoneiras.	163
Figura 7.8 - Comparação de resultados para a variável “ e_c ” em cantoneiras.	165

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1– Fator de redução.....	34
Tabela 3.2 – Coeficientes de eficiência dos perfis de acordo com a NBR 8800, Revisão NBR 8800 e AISC.	42
Tabela 3.3 – Coeficiente de eficiência para cantoneira conectada por uma aba com excentricidade da fila de furação e_c igual a 0,63 cm.	47
Tabela 3.4 – Coeficiente de eficiência para cantoneira conectada por uma aba com excentricidade da fila de furação e_c igual a 2,07 cm.	47
Tabela 3.5 – Coeficiente de eficiência para cantoneira conectada por uma aba com excentricidade da fila de furação e_c igual a 2,83 cm.	48
Tabela 4.1 – Características geométricas para análise da variável espessura na resistência à ruptura de chapas.....	55
Tabela 4.2 - Características geométricas para análise da variável relação A_n/A_g na resistência à ruptura de chapas.....	56
Tabela 4.3 - Características geométricas para análise da variável filas de furação na resistência à ruptura de chapas.	57
Tabela 4.4 - Características geométricas para análise da variável parafusos por fila de furação na resistência à ruptura de chapas.....	58
Tabela 4.5 - Características geométricas para análise da variável número de parafusos na resistência à ruptura de cantoneiras.....	59
Tabela 4.6 - Características geométricas para análise da variável s na resistência à ruptura de chapas.	59
Tabela 4.7 - Características geométricas para análise da variável s na resistência à ruptura de cantoneiras.	60
Tabela 4.8 - Características geométricas para análise da variável e_2/g na resistência à ruptura de chapas com duas filas de furação.....	62
Tabela 4.9 - Características geométricas para análise da variável e_2/g na resistência à ruptura de chapas com três filas de furação.....	63

Tabela 4.10 – Características geométricas para análise da variável e_2 na resistência à ruptura de cantoneiras.	64
Tabela 4.11 - Características geométricas para análise da variável e_c na resistência à ruptura de cantoneiras.	65
Tabela 5.1 – Teste de malha.....	89
Tabela 5.2 - teste de malha na região de refinamento.....	91
Tabela 6.1 – Resultados para a variável “espessura das chapas”.....	100
Tabela 6.2 – Resultados para variável “relação A_n / A_g de chapas”.....	101
Tabela 6.3 – Resultados para a variável “número de filas de furação em chapas”.....	103
Tabela 6.4 – Resultados para a variável “número de parafusos por fila de furação em chapas”.	108
Tabela 6.5 - Resultados para a variável “espaçamento longitudinal entre furos s ” de chapas.....	109
Tabela 6.6 - Resultados para variável “ e_2 / g ” para duas filas de furação em chapas.	111
Tabela 6.7 – Resultados para a variável e_2 / g para três filas de furação em chapas.	115
Tabela 6.8 - Resultados para a variável “número de parafusos”.....	124
Tabela 6.9 - Resultados para a variável “espaçamento longitudinal entre furos”.....	128
Tabela 6.10 – Resultados para variável e_2	132
Tabela 6.11 – Resultados para a variável “excentricidade “ e_c ”.....	135
Tabela 7.1 – Comparação de resultados para a variável “espessura” de chapas.....	142
Tabela 7.2 – Comparação de resultados para a “relação A_n / A_g ” em chapas.	144
Tabela 7.3 – Comparação de resultados para a variável “número de parafusos por fila de furação” em chapas.....	145
Tabela 7.4 – Comparação de resultados para a variável “espaçamento longitudinal entre furos” de chapas.	146

Tabela 7.5 – Comparação de resultados para a variável “número de filas de furação” em chapas.	147
Tabela 7.6 – Comparação de resultados para a variável “ e_2/g ” em chapas com duas filas de furação.	150
Tabela 7.7 – Comparação de resultados para a variável “ e_2/g ” em chapas com três filas de furação.	151
Tabela 7.8 - Comparação de resultados para a variável “número de parafusos” em cantoneiras.	155
Tabela 7.9 - Comparação de resultados para a variável “espaçamento longitudinal entre furos” em cantoneiras.	158
Tabela 7.10 - Comparação de resultados para a variável “ e_2 ” em cantoneiras.	162
Tabela 7.11 - Comparação de resultados para a variável “ e_c ” em cantoneiras.	164

LISTA DE SÍMBOLOS

a) Letras romanas maiúsculas

$A = A_g =$ área bruta da seção transversal

$A_e = A_{ne} = A_{net} =$ área líquida efetiva da seção transversal

$A_{gt} =$ área tracionada bruta

$A_{gv} =$ área cisalhada bruta

$A_n =$ área líquida

$A_{nm} =$ área líquida mínima da seção transversal

$A_{nv} =$ área cisalhada líquida

$A_{nt} =$ área tracionada líquida

$A_v =$ área cisalhada

$A_t =$ área tracionada

$CG =$ centro de gravidade da peça

$C_t = U =$ coeficiente de eficiência

$E =$ módulo de elasticidade longitudinal

$F_{internas} =$ força equivalente às tensões internas atuando nos pontos nodais

$K_e =$ coeficiente da área líquida efetiva

$L = l_c =$ comprimento da ligação

$L_v =$ comprimento cisalhado

$L_t =$ comprimento tracionado

$N = T =$ força de tração

$N_{u,Rd} =$ resistência última da seção líquida

$P_{experimental}$ = carga de ruptura determinada pelo ensaio de tração

$P_t = Rn$ = resistência nominal à tração

$R_{externa}$ = carga total atuando na estrutura

U_s = limite de resistência à tração do aço especificado na norma britânica BS 5950

X_{CG} = distância da borda da cantoneira ligada por uma aba apenas ao centro de gravidade na direção da largura da aba projetada

Y_{CG} = distância da borda da cantoneira ligada por uma aba apenas ao centro de gravidade na direção da largura da aba conectada

Y_s = limite do escoamento do aço especificado na norma britânica BS 5950-2

b) Letras romanas minúsculas

a_e = área efetiva de cada elemento da seção líquida

a_g = área bruta de cada elemento da seção transversal

a_n = área líquida de cada elemento da seção transversal

a_1 = área bruta do elemento conectado da seção

b = largura da peça

b_f = largura da mesa do perfil I ou H

b_n = largura mínima da peça

$d = \phi = \phi_f$ = diâmetro do parafuso

$d_0 = f_d$ = diâmetro do furo

$e_c = \bar{x}$ = excentricidade da ligação

e_1 = distância longitudinal do centro do furo a borda da peça na direção paralela ao carregamento, ou distância inferior do centro do furo a borda da peça, transversal à direção do carregamento segundo a norma NBR 143/2000

e_2 = distância do centro do furo a borda da peça, transversal à direção do carregamento, ou distância superior do centro do furo a borda da peça, transversal à direção do carregamento segundo a norma NBR 143/2000

f_y = tensão de escoamento do aço

f_u = tensão última do aço

$g = \rho_1$ = distância entre furos transversal a direção do carregamento

r = força transmitida pelo parafuso da seção considerada, dividida pela força de tração no membro da seção

s = espaçamento entre furos adjacentes na direção paralela ao carregamento

t = espessura

n_f = quantidade de furos contidos na linha de ruptura analisada

$\gamma_{M2} = \gamma$ = coeficiente de segurança

c) Letras gregas

α_σ = coeficiente teórico de concentração de tensões

β_2 = coeficiente de redução, dependente do espaçamento entre furos adjacentes

β_3 = coeficiente de redução, dependente do espaçamento entre furos adjacentes

ε = deformação do aço

ν = coeficiente de Poisson

ρ = distância longitudinal entre furos da mesma fila de furação

σ = tensão do aço

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = tensão máxima na seção líquida

$\sigma_{m\acute{e}d}$ = tensão média da seção líquida

σ_{nom} = tensão nominal da seção líquida

RESUMO

VERONEZ, J. S.(2004). Estudo da área líquida efetiva de chapas e cantoneiras de aço tracionadas e ligadas por parafusos. *Vitória, 2004.* 199 p. *Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Espírito Santo.*

Este trabalho apresenta um estudo da ruptura da área líquida de chapas e cantoneiras de aço tracionadas e ligadas por parafusos. Inicialmente são expostos os modos de falha a que estão sujeitas peças com carregamento estático de tração, conectadas por ligações parafusadas. Em seguida, é estabelecido, como foco do estudo o modo de falha de ruptura da seção líquida.

É feito um breve relato sobre as pesquisas realizadas sobre o assunto, indicando a origem dos critérios de cálculo adotados por algumas normas. A seguir, são apresentados e analisados os critérios de cálculo para o modo de falha estudado, adotados pelas atuais normas de aço para perfis laminados e soldados e para perfis formados a frio, destacando as divergências entre estes critérios. No intuito de exemplificar os comentários feitos às normas, é realizada uma análise comparativa com exemplos numéricos de perfis laminados e soldados.

É realizada uma simulação numérica de cantoneiras conectadas por apenas uma aba com uma fila de furação e de chapas conectadas através de várias filas de furação, por meio do sistema computacional ANSYS 5.5. Após a apresentação dos resultados são propostas soluções para calcular a resistência à ruptura dos modelos estudados e realizada uma análise comparativa entre os resultados obtidos na simulação e os obtidos pelos critérios de cálculo das normas abordadas indicando, dentre estes, os que mais se aproximam daqueles alcançados na simulação numérica.

Palavras-chave: Tração, peças de aço tracionadas e parafusadas, simulação numérica, normas.

ABSTRACT

VERONEZ, J.S. (2004). Study of the effective net area of bolted flat plates and single angles of steel tension members capacities. *Vitória, 2004.* 199 p.
Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Espírito Santo.

This work presents a study of the net section rupture of bolted flat plates and single angles of steel tension members capacities. The modes of failure of the tension members subjected to static loads and connected with bolts are exposed at first. After that, the mode of failure of rupture of net section is established as the center of interest.

A brief report above researches about the subject is presented and the sources of design calculations used by some current specifications are indicated. Afterwards, design calculations for service ability criterion, used by current specifications for laminated, welded and cold formed steel members, are presented and the divergences between those criteria are pointed out. A comparative analysis with numeric examples with laminated and welded members is accomplished, in order to exemplify the specification prescriptions.

A numeric simulation of plates with concentric connections and single angles with eccentric connections are realized by the finite element analysis (FEA), in the program Ansys 5.5. After the presentation of the results, procedures to calculate the resistance of the studied models are proposed, and a comparative analysis between the results obtained on the numeric simulation and on the design calculations for service ability criterion is realized, showing the differences between them and indicating the ones that have more approximation with numeric results.

Key-words: Tension, bolted steel members in tension, numeric simulation, specifications.

1 INTRODUÇÃO

Em apenas duzentos anos desde as primeiras grandes construções mundiais em aço, um relativo curto espaço de tempo, houve um grande avanço na tecnologia das estruturas metálicas. Existe hoje uma melhoria contínua das propriedades físicas do aço disponível e significantes avanços têm sido experimentados na compreensão da estabilidade e da resistência das estruturas metálicas. Estes avanços, aliados ao crescimento do mercado consumidor de aço em construções no país, fazem com que seja imprescindível a reavaliação permanente de normas e critérios usados para conceber, calcular, projetar, fabricar e montar estruturas metálicas.

Com base nesta premissa, este trabalho tem como objetivos estudar os critérios de cálculo adotados pelas principais normas utilizadas no Brasil para dimensionamento de peças de aço tracionadas, sujeitas a cargas estáticas, efetuar uma comparação destes critérios entre si, realizar uma análise do comportamento de chapas retangulares e cantoneiras simples de aço submetidas à tração, por meio de simulação numérica utilizando o Método dos Elementos Finitos, por meio do sistema computacional ANSYS 5.5, e por fim comparar os resultados desta análise com aqueles obtidos com os critérios das normas.

1.1 Peças de aço tracionadas

Peças tracionadas são encontradas em muitos sistemas estruturais de aço. Elas ocorrem como componente principal de construções como coberturas e torres de transmissão treliçadas, pontes e contraventamentos de edifícios de múltiplos andares.

As peças de aço tracionadas geralmente consistem de estruturas muito simples, como barra redonda, barra chata, cantoneira, perfis T, H, I e U, ou são construídas a partir da associação e/ou superposição de várias destas formas, como cantoneira dupla, cantoneira dupla diagonal, perfil U duplo, entre outros.

1.1.1 Distribuição das tensões

A força de tração simples ou axial é um esforço que provoca tensões normais uniformes ao longo de toda seção da peça. Logo, à primeira vista, somente o critério de cálculo para um elemento tracionado, baseado na escolha de uma seção transversal que resista à força axial de tração parece ser suficiente. Contudo, deve-se levar em consideração como o membro tracionado é usado, focando a atenção em como ele será conectado aos outros elementos componentes da estrutura. Dependendo do tipo de conexão, nas regiões próximas à transmissão de cargas, a tensão normal não mais se distribui uniformemente ao longo da seção.

1.1.2 Ligações em estruturas de aço

A união de peças estruturais é feita utilizando-se soldas e/ou parafusos como meios de ligação, juntamente com outros componentes auxiliares denominados elementos de ligação. O conjunto dos meios e elementos é que constitui o que se chama 'ligação'. Geralmente, a ligação é o detalhe que governa o cálculo do membro tracionado. Assim, as ligações precisam ser projetadas para serem simples e terem um comportamento adequado durante a vida útil da estrutura. Esquecer-se deste aspecto pode elevar os custos da estrutura e/ou interferir de forma negativa nas uniões de peças estruturais.

As ligações de membros tracionados são comumente parafusadas e/ou soldadas. Elas podem ser também feitas por meio de rebites ou, para cabos e tirantes, por meio de conexões de rosca ou entrelace mecânico. As ligações objeto de estudo deste trabalho são as parafusadas.

1.1.3 Tipos de deformações e modos de falha

As peças estruturais submetidas a cargas axiais de tração e feitas de um mesmo material podem apresentar diferentes comportamentos devido a tensões residuais presentes no material, resultantes do processo de fabricação da barra.

Essas tensões residuais estão em equilíbrio nas seções transversais das peças: em algumas partes existe tração e em outras compressão. Na aplicação da carga de tração, a tensão devida a esta carga combina com a tensão residual, provocando o escoamento em diferentes partes da seção transversal para diferentes valores da carga aplicada. Quando o escoamento alcança toda a seção solicitada, as tensões tornam-se constantes graças à ductilidade do aço e inicia-se o alongamento plástico que tem continuidade até o início da fase de encruamento. Um elemento tracionado sem furos ou outras descontinuidades alcança assim seu limite de utilização de carga de serviço, na resistência ao escoamento do material porque no regime plástico ocorre deformação excessiva e isto representa o modo de falha devido à ductilidade do material. A área da seção transversal da peça é denominada área bruta, A_g (D. Patrick J., H. John E., B. Reidar, 1992).

Elementos ligados por parafusos têm a área da seção transversal reduzida pelos furos, o que afeta sua resistência e seu tamanho inicial. Logo, peças que tem ligação parafusada devem ser escolhidas com seção de dimensões que permitam a execução dos furos e ainda tenham resistência suficiente para suportar as solicitações a elas impostas. A área da seção transversal do membro reduzida pelos furos é denominada área líquida, A_n .

Para membros tracionados com furos, as tensões em regime elástico não são uniformes, verificando-se concentração de tensões próxima à descontinuidade da seção transversal. Contudo, quando o escoamento é alcançado, ocorre uma redistribuição plástica e uma tensão uniforme é atingida, como mostra a Figura 1.1. Porém, o escoamento da seção líquida conduz a um pequeno alongamento da peça, e não constitui um estado limite. Então, a menos que o escoamento da seção transversal bruta ocorra primeiro, o modo de falha será o estado limite de ruptura na seção líquida crítica.

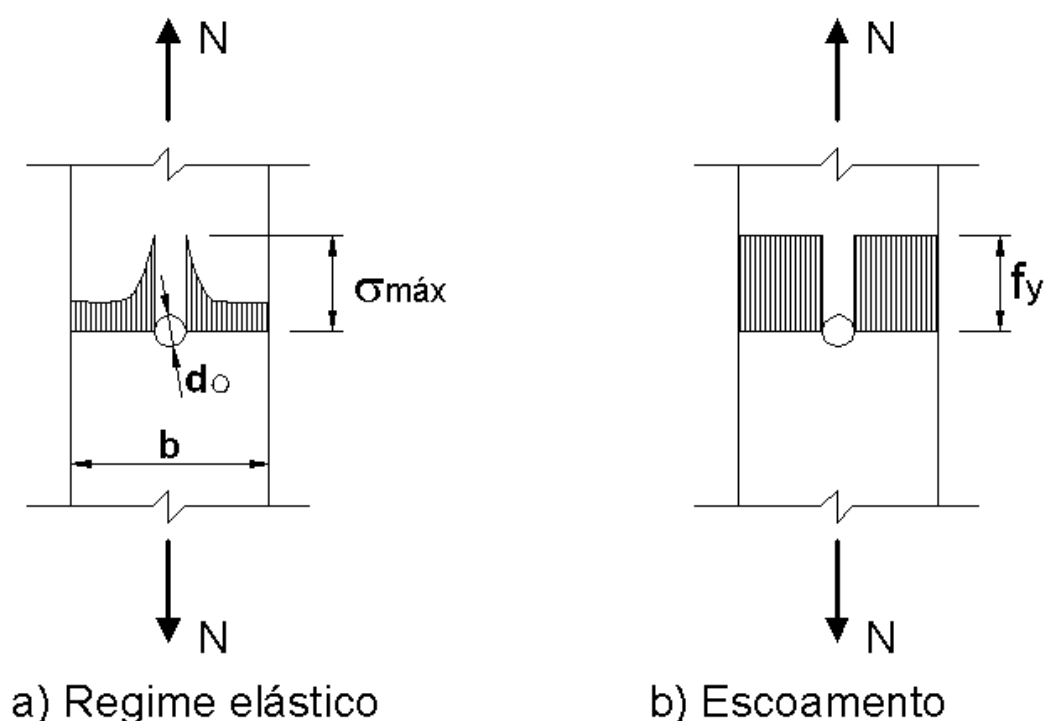


Figura 1.1 – Tensões normais de tração, em uma peça tracionada com furo.

O principal índice de medida das tensões locais, isto é, das tensões não uniformes na seção com furos, é o ‘coeficiente teórico de concentração de tensões’, definido como

$$\alpha_{\sigma} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_{nom}} \quad (1.1)$$

onde $\sigma_{m\acute{a}x}$ é a máxima tensão na seção, atuando em um ponto localizado na borda no furo, e σ_{nom} é a tensão média na seção, ou seja, a razão entre a força de tração aplicada e a área da seção líquida.

O valor do coeficiente teórico de concentração de tensões está determinado para a maioria dos elementos de construção típicos utilizados na prática. Por exemplo, a Figura 1.2 mostra a dependência entre o coeficiente teórico de concentração de tensões e a relação entre o diâmetro do furo e a largura de uma placa com um furo, como a mostrada na Figura 1.1.

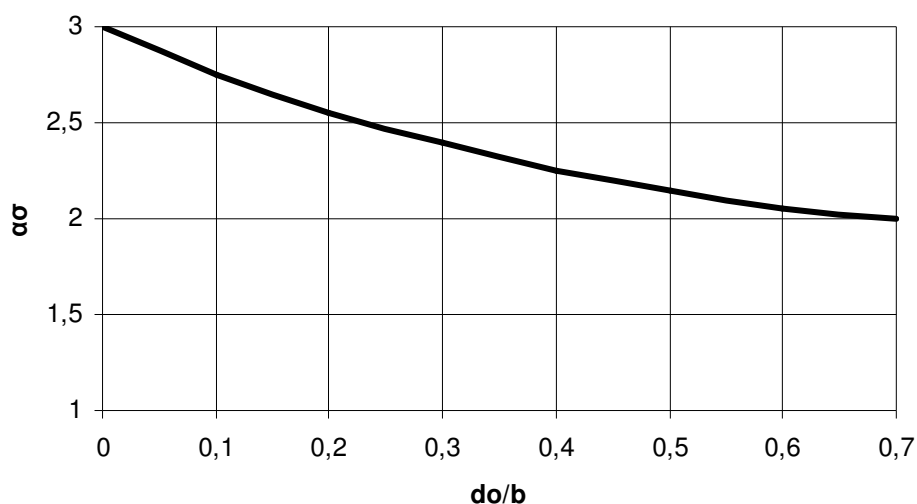


Figura 1.2 - Gráfico do coeficiente teórico de concentração de tensões.

Fonte: V. Féodosiev, 1977.

Uma regressão polinomial com base em pontos da curva indicada no gráfico resulta na expressão:

$$\alpha_{\sigma} = 1,4583\left(\frac{d_0}{b}\right)^2 - 2,4315\left(\frac{d_0}{b}\right) + 2,9896 \quad (1.2)$$

O coeficiente teórico de concentração de tensões não pode dar uma idéia completa do caráter de variação das tensões locais; caracteriza apenas o aumento relativo de uma só componente dos estados de tensão nos pontos da seção: a componente normal à direção da força de tração aplicada. (V. Féodosiev, 1977). De fato, nas seções com furos, os estados de tensão nos pontos é biaxial, devido ao movimento transversal das moléculas do elemento tracionado durante a transmissão dos esforços internos ou intermoleculares.

Em elementos tracionados com mais de um furo e que os furos não estejam alinhados transversalmente à direção do carregamento, ou seja, estejam enviesados, como mostra a Figura 1.3(b), há mais de uma trajetória de rompimento possível na região de ligação do membro. Nestes casos, a seção que rompe primeiro é a que apresenta menor área líquida. A checagem da resistência exata ao longo da seção líquida enviesada é complexa. Contudo, uma relação empírica simples proposta por Cochrane em 1922, tem sido adotada pelas normas, expressada como uma adição, à largura líquida enviesada, b_n , da parcela $s^2/4g$, onde s é o espaçamento entre furos adjacentes, na direção paralela à do carregamento, e g é o espaçamento entre furos, na direção transversal à do carregamento.

A largura líquida enviesada é definida como a largura da seção medida ao longo da suposta trajetória de rompimento reduzida pelos diâmetros dos furos desta trajetória.

A área líquida mínima, A_{nm} , é determinada pela largura líquida mínima multiplicada pela espessura t da chapa:

$$A_{nm} = \left(b_n + \frac{s^2}{4g} \right) t, \quad (1.3)$$

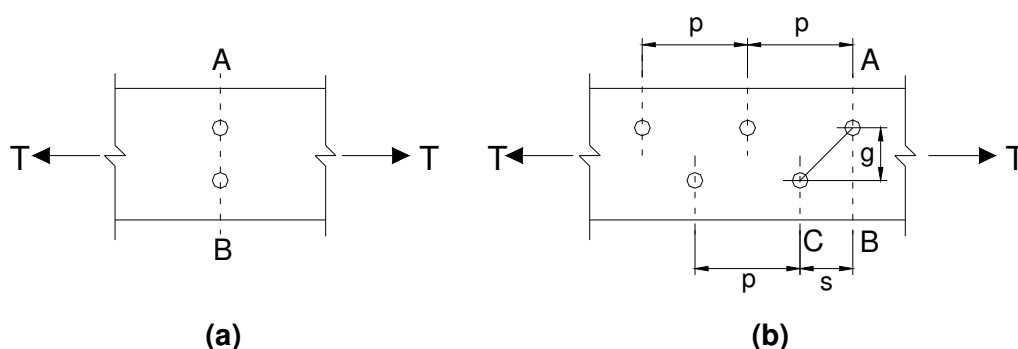


Figura 1.3 – Trajetórias de ruptura na seção líquida.

Fonte: C. Salmon e J. Johnson, 1996.

Anos após a proposta de Cocharane, vários pesquisadores têm proposto outras regras de cálculo, porém nenhuma apresenta melhorias significativas nos resultados e todas são muito complexas. Teorias propostas por Bijlaard, 1955, e outros para obter a área líquida de tração por análises de limites não desviam do método de Cochrane, 1922, por mais que 10% ou 15% (D. Patrick J., H. John E., B. Reidar, 1992).

Muitas vezes, as peças estruturais de aço não são ligadas por todos os elementos da seção transversal, como por exemplo, cantoneiras ligadas por apenas uma das abas, o que gera uma excentricidade no carregamento. Com a excentricidade, o membro torna-se sujeito a um momento fletor em adição à força axial, reduzindo assim o carregamento máximo que o membro pode resistir.

A resistência efetiva de peças com ligações excêntricas parafusadas sofre significativas influências de detalhes da ligação, tais como o número de parafusos, o espaçamento entre furos e a distância dos furos à extremidade do elemento. Critérios de cálculo para este caso variam muito com as normas. (D. Patrick J., H. John E., B. Reidar, 1992).

Nas ligações excêntricas, as solicitações externas não são absorvidas uniformemente pela seção transversal, de modo que a seção não trabalha em

sua totalidade, ou seja, o elemento da seção não ligado não efetua sua resistência total. Por isso, a resistência destes elementos estruturais é calculada com base na área líquida, A_n , reduzida por meio de um coeficiente de eficiência, C_t , denominada área efetiva, A_{ne} .

Para perfis de chapas finas tracionados e ligados por parafusos, a resistência do membro pode ser governada pelo modo de falha de rasgamento. Neste modo de falha, o colapso da peça ocorre através da combinação de cisalhamento e ruptura dos planos paralelos e normais à força axial de tração.

Então, a resistência de peças tracionadas é governada por três tipos de estados limites:

- a. escoamento da seção transversal bruta do membro localizada em região afastada da ligação do mesmo.
- b. Ruptura da área líquida efetiva.
- c. Ruptura por rasgamento.

1.1.4 Dimensionamento nos estados limites últimos

A resistência nominal para escoamento da seção bruta em região afastada da ligação do elemento tracionado é dada por:

$$R_n = A_g f_y, \quad (1.4)$$

onde R_n é a resistência nominal e f_y a tensão de escoamento do material.

A resistência nominal para ruptura da seção líquida na região de ligação do membro tracionado é dada por:

$$R_n = A_{ne} f_u, \quad (1.5)$$

com

$$A_{ne} = A_n C_t, \quad (1.6)$$

onde f_u é a tensão resistente à tração do material.

Os critérios de cálculo da resistência nominal para ruptura por cisalhamento do bloco variam com as normas. Por exemplo, de acordo com a NBR 8800, 1986, quando $L_v > 3 \cdot L_t$ a resistência nominal é dada por:

$$R_n = (A_v + A_t) 0,6 f_u, \quad (1.7)$$

onde A_v , A_t , L_v e L_t são indicados na Figura 1.4.

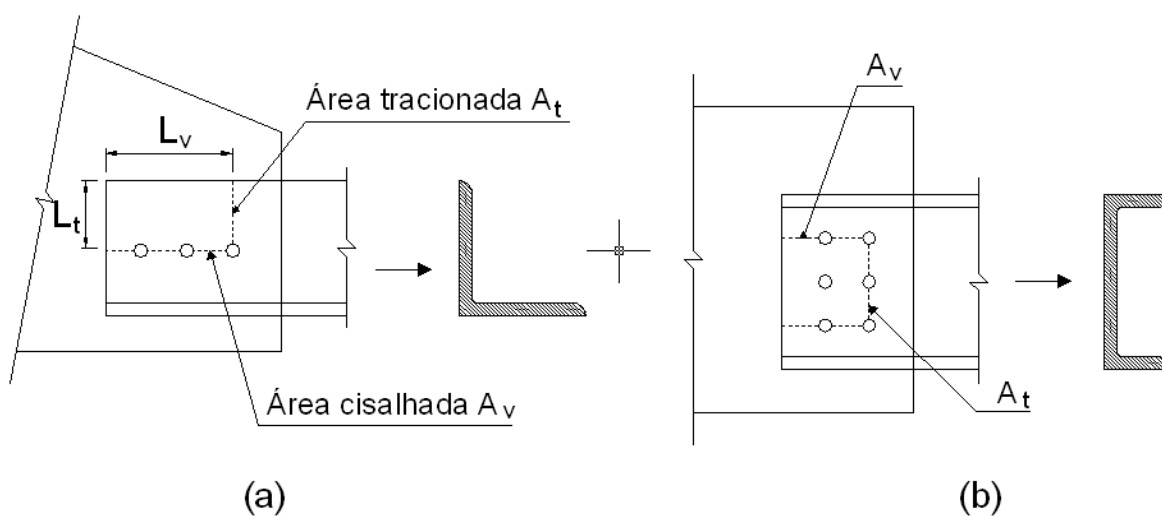


Figura 1.4 – Colapso por rasgamento.

Fonte: W. Pfeil e M. Pfeil, 2000.

Já a norma americana AISC, 1995, trata este modo de falha com a possibilidade de dois tipos de colapso. Para a ruptura das áreas cisalhadas combinada com o escoamento das áreas tracionadas, ou seja, se $0,6 \cdot f_u A_{nv} > f_u A_{nt}$, a resistência nominal é dada por:

$$R_n = 0,6f_u A_{nv} + f_y A_{gt}, \quad (1.8)$$

onde A_{nv} é a área cisalhada líquida, A_{nt} é a área tracionada líquida e A_{gt} é a área tracionada bruta, como mostra a Figura 1.5.

Para a ruptura das áreas tracionadas combinada com o escoamento das áreas cisalhadas, ou seja, se $f_u A_{nt} > 0,6f_u A_{nv}$, a resistência nominal é dada por:

$$R_n = 0,6f_y A_{gv} + f_u A_{nt}, \quad (1.9)$$

onde A_{gv} é a área cisalhada bruta, como mostrado na Figura 1.5.

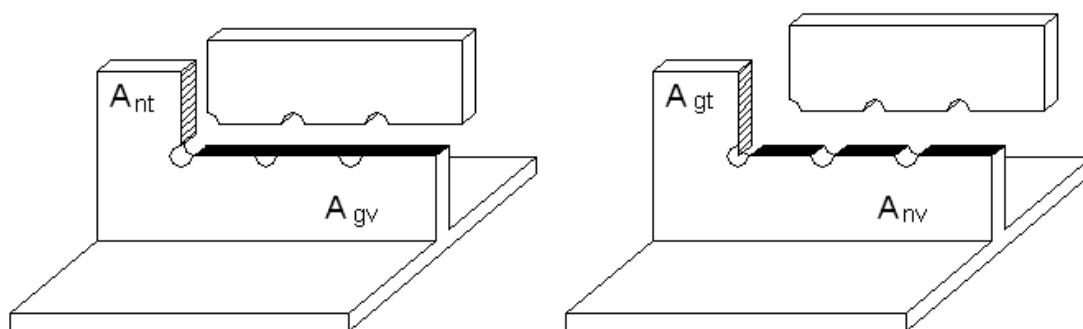


Figura 1.5 – Modos de Ruptura de Cisalhamento de Bloco.

Fonte: Bartels, 2000.

Outras variações são encontradas nas demais normas vigentes.

O presente trabalho, como dito, visa estudar numericamente o comportamento das seções transversais de chapas retangulares e cantoneiras simples tracionadas, ligadas por parafusos. Logo, o estado limite a ser analisado será o de ruptura da área líquida na região da ligação de extremidade.

2 OBJETIVO, METODOLOGIA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo define os objetivos desta pesquisa, apresenta a estrutura do trabalho, no intuito de mostrar como os objetivos serão alcançados e de expor as mais recentes publicações relacionadas ao assunto.

2.1 Objetivo

Esta pesquisa apresenta três objetivos a serem alcançados. O primeiro é a realização de estudos comparativos entre os critérios adotados pelas normas mais comumente utilizadas no Brasil para cálculo de peças estruturais de aço conectadas por parafusos e submetidas ao esforço de tração.

O segundo objetivo é a realização de uma análise dos parâmetros de influência em dois tipos de seções das peças mencionadas acima, chapas e cantoneiras simples. Esta análise será realizada com os resultados obtidos de simulações numéricas para testes de tração destas peças utilizando o sistema computacional Ansys 5.5.

O terceiro objetivo é apresentar um critério de cálculo que se adeque ao resultado da análise dos parâmetros de influência, considerando os critérios adotados pelas normas estudadas neste trabalho.

2.2 Metodologia

Para alcançar os objetivos propostos nesta dissertação foram desenvolvidas diversas etapas, as quais estruturam os capítulos apresentados na mesma, tais

como: levantamento do problema, pesquisa bibliográfica, soluções utilizadas até então, proposição e aferição de um modelo, análise dos resultados e conclusão. Desta forma, este trabalho foi desenvolvido ao longo de oito capítulos e um anexo, que compõem toda sua estrutura.

No capítulo 1, foi apresentada uma introdução a respeito do assunto pesquisado, definindo e limitando o problema. Foram discutidos: a distribuição de tensões em peças tracionadas mencionada na literatura pertinente, as ligações parafusadas em estruturas de aço, os tipos de deformações e modos de falhas que podem ocorrer nas peças estruturais estudadas e por fim foi definido e apresentado o tipo de dimensionamento a ser adotado.

No capítulo 2, são definidos os objetivos desta pesquisa, a estrutura da dissertação e a revisão bibliográfica onde foram expostos os estudos relacionados ao assunto.

No capítulo 3, são estabelecidas as normas a serem abordadas e os critérios de cálculo adotados por elas. É realizada uma análise mostrando e comparando os parâmetros que tais normas consideram influenciar na resistência da área líquida de peças tracionadas e conectadas por parafusos. São apresentadas tabelas com resultados de cálculo desta resistência feito pelos critérios citados acima, a fim de exemplificar com dados numéricos os comentários apresentados.

No capítulo 4, são feitas as considerações e limitações do problema, definidos os possíveis parâmetros de influência para as seções a serem estudadas, apresentando-se as simplificações que foram feitas para estudo do problema e calculando-se a faixa de variações em que há possibilidade de serem estudadas as variáveis de influência já definidas.

No capítulo 5, são descritas a modelagem numérica e a montagem das peças, estabelecendo-se os critérios utilizados e as propriedades dos materiais e apresentando-se as características dos elementos utilizados e os modelos

construídos. São realizadas a definição e a comprovação da eficácia da malha por meio do refinamento contínuo da mesma até a obter-se os mesmos resultados e de comparações com resultados teóricos conhecidos. É exposta a forma de aplicação do carregamento e de incrementos de cargas. Finalmente, são mostrados elementos do processamento adotado pelo sistema computacional, que envolvem uma análise não-linear com o processo de Newton-Raphson.

No capítulo 6, é realizada uma análise paramétrica, apresentando os resultados em tabelas e definindo quais parâmetros influem na resistência das peças estudadas nesta dissertação. São apresentadas e analisadas também a distribuição de tensões durante o escoamento e a ruptura da seção líquida através de figuras obtidas na simulação numérica.

No capítulo 7, é realizada uma análise comparativa entre os resultados obtidos pela simulação computacional e pelas normas abordadas anteriormente, apresentando-se tabelas com diferenças percentuais entre tais resultados e propondo-se o critério de cálculo que melhor se adequa à realidade da simulação apresentada.

No capítulo 8, são relatadas as conclusões do trabalho, baseadas nas comparações entre os modelos analisados e os critérios de cálculo adotados pelas normas abordadas, e apresentadas as sugestões para trabalhos futuros que podem dar continuidade a este estudo.

A bibliografia da dissertação foi dividida em duas partes: Referências Bibliográficas e Bibliografias Consultadas. A primeira parte refere-se a toda bibliografia consultada e referenciada no corpo do trabalho. A segunda refere-se a todo material bibliográfico lido ou consultado no desenvolvimento da pesquisa, mas não citado ao longo do texto.

2.3 Revisão Bibliográfica

2.3.1 Histórico do cálculo da área líquida efetiva

A resistência à tração de elementos parafusados foi objeto de investigação de Bartels (2000) em sua dissertação de mestrado. Segundo Bartels, vários pesquisadores estudaram o assunto, chegando a conclusões diversas, relatadas abaixo.

Munse e Chesson (1963), citado por Bartels (2000, p.16), no intuito de examinar os fatores que influem na eficiência da área líquida, conduziram vários testes experimentais em espécimes com diferentes detalhes de ligação. Além dos seus próprios experimentos, eles examinaram resultados de testes de ligações parafusadas e rebitadas realizados por outros pesquisadores (Chesson, 1959; Chesson e Munse, 1958; Schulz, 1952; Munse, 1959; Wilson et al., 1952). Estes testes incluíam chapas, cantoneiras e perfis U simples, cantoneiras duplas conectadas, no mesmo lado ou em lados opostos, por chapas auxiliares, quatro cantoneiras de costas, perfis U duplos e barras compostas do tipo I e do tipo caixão, formadas por cantoneiras ou perfis U.

A princípio, Munse e Chesson, citado por Bartels (2000, p.16), estudaram a resistência do elemento no escoamento da seção bruta e na ruptura da área líquida. Nestes estudos, o cálculo de capacidade de carga para ruptura da seção líquida não incorporava a eficiência da área líquida nem a desconsideração da parte desta seção inutilizada no processo de fabricação do furo.

Baseados nos resultados dos seus estudos e nos resultados de estudos de outros pesquisadores, Munse e Chesson (1963), citado por Bartels (2000, p.16), foram os primeiros a propor uma equação representando a eficiência da seção líquida. Sua expressão sugere que a área efetiva da seção líquida seja

função da ductilidade do material, do efeito *shear lag*, da área da seção e da razão entre a área líquida e a área bruta.

O efeito *shear lag* é definido como uma distribuição de tensões não uniforme que ocorre em peças com ligações excêntricas, como em uma cantoneira fixada por apenas uma aba. A aba não fixada não terá utilizado sua capacidade total quando a peça alcançar o estado limite de ruptura.

A expressão proposta por Munse e Chesson, citado por Bartels (2000, p.16), é:

$$A_e = A_n \left(1,60 - 0,7 \frac{A_n}{A_g} \right) \cdot \left(1 - \frac{\bar{x}}{L} \right) \quad (2.1)$$

Onde \bar{x} é a distância do centro de gravidade do perfil à fila de furação e L é o comprimento da ligação. O termo $1,60 - 0,7 \frac{\bar{x}}{L}$ é uma medida de eficiência da configuração da ligação parafusada. À medida que a razão A_n/A_g era diminuída, Munse e Chesson, citado por Bartels (2000, p.17), observaram aumentos da eficiência da seção líquida, ou seja, seus estudos indicam que para uma mesma peça quanto menor a área líquida maior a eficiência da seção. Ainda em relação ao citado termo, Munse e Chesson, citado por Bartels (2000, p.17), afirmam ser esta uma equação empírica que considera o efeito do espaçamento transversal entre furos g , o diâmetro do parafuso d e a relação entre eles. Concluem ainda que uma pequena razão g/d aumenta a eficiência da conexão e isto se deve ao aumento das forças biaxiais observado quando os conectores se aproximam uns dos outros.

Mais tarde, Kulak e Wu (1997), citado por Bartels (2000, p.17), investigaram os resultados de Munse e Chesson e concluíram que para as ligações mais utilizadas na prática o valor da parcela da equação (2.1) referente a eficiência da configuração da ligação é unitário, sendo então a área efetiva da seção líquida função apenas da área líquida e do fator *shear lag*, que na equação

(2.1) é medido pelo termo $1 - \frac{\bar{x}}{L}$. Além disso, Kulak e Wu sugeriram que a equação (2.1) só é válida quando aplicada para ligações fabricadas com um aço de ductilidade similar a dos espécimes usados no desenvolvimento da equação. Os tipos de aço utilizados hoje possuem ductilidade menor que os utilizados para fabricar os espécimes examinados por Munse e Chesson, porém esta diferença não é significativa, em relação à validade da equação (2.1).

Uma equação para cálculo da área efetiva de seções líquidas similar a de Munse e Chesson foi proposta por Gaylord et Al. (1992), citado por Bartels (2000, p.18). Eles afirmam que a área efetiva do perfil tracionado tem uma variação em função dos mesmos fatores citados por Munse e Chesson: ductilidade do aço, eficiência da ligação e efeito *shear lag* e ainda pelos métodos de fabricação dos furos. A equação é apresentada como segue:

$$A_{eff} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot A_n \quad (2.2)$$

Onde:

$$K_1 = 0,82 + 0,0032R \leq 1,0 \quad (2.3)$$

é o fator de ductilidade;

R é determinado por meio de testes experimentais e representa a redução percentual da área da seção transversal na ruptura da peça tracionada;

$K_2 = 0,85$ para furos puncionados e $K_2 = 1,0$ para furos brocados, é o fator de fabricação é o fator de fabricação;

K_3 é o Coeficiente de eficiência da ligação e

K_4 é o Fator *shear lag*.

Na equação (2.2), os coeficientes de eficiência da ligação, K_3 , e do fator *shear lag*, K_4 , são similares aos propostos por Munse e Chesson (1963). Na citada equação, o efeito da punção de furos reduz a capacidade da seção líquida em 15% .

Gaylord et Al (1992), citado por Bartels (2000, p.18), afirmaram que a ductilidade tem efeito na eficiência da ligação, sendo que aços mais dúcteis permitem uma melhor distribuição das tensões ao longo da seção transversal, devido a uma variação menor da tensão quando a peça atinge a fase plástica. Na equação citada acima, isto é representado por K_1 , onde um alto valor de R representa um alto fator de ductilidade e conseqüentemente uma maior eficiência da ligação.

Mais tarde, Kulak e Wu (1997), citado por Bartels (2000, p.19), investigaram os resultados de Gaylord et Al e sugeriram que com o uso dos aços fabricados atualmente o fator de ductilidade seja considerado como tendo o valor unitário.

2.3.2 Estudos sobre a influência do fator *shear lag* na seção líquida

Baseadas na especificação AISC LRDF, Kulak e Wu (1997), citado por Bartels (2000, p.19), examinaram o efeito *shear lag*, conduzindo um número de testes de tração em cantoneiras simples e duplas com furos para parafusos puncionados, considerando apenas a ruptura na seção líquida. O modo de falha destes espécimes de cantoneiras simples e duplas foi precedido por um escoamento excessivo da área líquida entre a borda da aba e o limite do furo para parafuso. A ruptura do espécime iniciou-se na borda da aba, propagou-se para o furo e, então, através do restante do espécime.

A eficiência da seção em seus estudos foi definida por:

$$U = P_{\text{experimental}} / (f_u \cdot A_n)$$

Estes estudos indicaram que o comprimento da ligação influi no efeito *shear lag*. Eles observaram que espécimes de cantoneira simples, uma com seis parafusos e outra com quatro parafusos, tendo todos os outros parâmetros da ligação constantes, exibiram pequenas diferenças na carga de ruptura. O espécime de seis parafusos teve uma eficiência da seção líquida de 96,4%, enquanto o espécime de quatro parafusos teve uma eficiência de 100%. Porém, uma cantoneira de tamanho similar furada com apenas dois parafusos teve uma eficiência de 82,5%; uma diferença de aproximadamente 17%. Estas observações estão de acordo com a especificação AISC LRDF. O coeficiente de eficiência cresce com o comprimento da ligação, como mostra a expressão preconizada por esta norma:

$$U = 1 - \frac{\bar{x}}{L} \quad (2.4)$$

Onde:

U = Coeficiente de eficiência;

\bar{x} = Excentricidade da ligação;

L = Comprimento da ligação.

Portanto, um aumento do comprimento da ligação causa um aumento da eficiência da seção líquida. Isto é atribuído ao fato de uma longa ligação distribuir de forma mais equilibrada a tensão aplicada. Portanto, em seus estudos Kulak e Wu, citado por Bartels (2000, p.20), demonstraram que o comprimento da ligação tem uma influência significativa na sua eficiência. Os espécimes estudados para examinar a influência do comprimento da ligação no efeito *shear lag* tinham excentricidade de ligação de 1,99cm.

Tendências similares foram observadas também nos espécimes de cantoneiras duplas. Um espécime de cantoneira dupla com seis parafusos teve uma

eficiência da seção líquida de 86,3%, enquanto um tipo similar de espécime de cantoneira com quatro parafusos teve uma eficiência da seção líquida de 89,7%. As ligações com dois parafusos em cantoneiras duplas similares tiveram uma eficiência de 71,8%, um decréscimo de 18%. Para a formação dessas cantoneiras duplas foram usadas cantoneiras com os mesmos tamanhos, espaçamentos longitudinais e excentricidade daquelas utilizadas nos testes com cantoneiras simples.

A LRFD limita a eficiência da seção líquida de um perfil sujeito ao efeito *shear lag*, isto é, ligado excentricamente, em 90%. Porém, nos estudos de Kulak e Wu, citado por Bartels (2000, p.20), dois espécimes romperam tendo uma eficiência da seção líquida de 100%, considerando uma tolerância de erro de 4%. Isto sugere que o efeito *shear lag*, não teve influência significativa sobre a eficiência da seção líquida destes espécimes.

2.3.3 Outras variáveis de influência

Kulak e Wu (1997), citado por Bartels (2000, p.21), comentaram que a disposição da cantoneira de abas desiguais tem efeito na capacidade última do espécime. Isto foi também documentado por outros pesquisadores. Usando cantoneiras similares, porém trocando de aba conectada, de curta para longa, Kulak e Wu (1997), citado por Bartels (2000, p.21), encontraram um aumento na eficiência da seção líquida. Outros pesquisadores também notaram a influência desta variável: Epstein (1992) e Gibson e Wake (1942), citados por Bartels (2000, p.21), observaram que à medida que a aba projetada da cantoneira decresce, há um aumento da carga de ruptura. Eles denominaram este fenômeno de 'efeito da aba projetada'.

Kulak e Wu fizeram uma comparação entre um espécime de cantoneira simples com a aba longa conectada e uma cantoneira similar com a aba curta conectada e encontraram uma diferença de 10% de aumento da eficiência na

cantoneira conectada pela aba longa. Cantoneiras duplas mostraram um aumento de 7% na eficiência quando conectada pela aba longa no lugar da aba curta. Uma das mudanças de ligações da aba longa para a aba curta modificou a excentricidade de 3,20cm para 2,58cm.

2.3.4 Comparações de resultados e normas

Kulak e Wu, 1997, citado por Bartels (2000, p.21), compararam seus resultados e de outros pesquisadores com os critérios da norma AISC LRFD. Os resultados dos testes de outros pesquisadores (Nelson, 1953; Mueller e Wagner, 1985; McKibbon, 1906 e 1907) que ele usou para examinar incluíram cantoneiras simples e duplas, com furos brocados e puncionados. Os valores da resistência teórica foram calculados baseados na ruptura da seção líquida, utilizando as equações (2.2) e (2.4). A média dos valores da razão entre a carga de ruptura obtida no teste experimental e carga de ruptura teórica foi de 1,05 e o desvio padrão de 0,13, mostrando que as equações (2.2) e (2.4) apresentam resultados não conservadores.

Comparando a capacidade dos espécimes testados com os critérios da norma LRFD, incluindo um aumento de 0,2 cm ao diâmetro nominal do furo devido ao fato do mesmo ser fabricado por punção, também obteve-se um resultado não conservador, sendo que a média da razão entre a carga de ruptura obtida no teste experimental e carga de ruptura teórica foi de 1,19 e o desvio padrão de 0,13.

Mais tarde, comparando resistências dos espécimes com os critérios da norma LRFD novamente, usando um valor de U como permitido pelo comentário do capítulo B desta norma ($U = 0,85$ para ligações com três ou mais parafusos e $U = 0,75$ para ligações com dois parafusos) e, com aumento de 0,2cm no diâmetro do furo, obteve-se uma média dos valores da razão entre a carga de ruptura obtida no teste experimental e carga de ruptura teórica de 1,12 e o

desvio padrão de 0,17. Foi notado que em alguns destes casos, a carga de ruptura teórica ficou 50% acima da carga de ruptura dos testes.

Baseado nos resultados acima, Wu e Kulak (1997) concluíram que o valor de U teórico pode produzir resultados não conservadores. Eles sugeriram que para produzir um critério de cálculo mais conservador a equação apresentada para o efeito *shear lag* deve ser multiplicada pelo fator de fabricação 0,85, considerando que os furos para parafusos são fabricados pelo sistema de broca ou punção.

2.3.5 Influência do momento fletor e da fabricação dos furos em perfis T ligados pela alma

O comprimento da ligação, o método de fabricação dos furos e o momento fletor gerado pela excentricidade das ligações parafusadas em perfis T ligados pela alma foram objeto de estudos de Bartels (2000) . Ele faz referências, em seu trabalho, a outros pesquisadores que estudaram o coeficiente de eficiência de peças tracionadas conectadas assimetricamente (Munse e Chesson, 1963; Kulak e Wu, 1993; Kulak e Wu, 1997 e Gaylord e al, 1992), mostrando que estes estudos consideram para o fator de redução as seguintes variáveis:

- efeito *shear lag*;
- razão A_n/A_g ;
- razão g/d ;
- comprimento da ligação;
- métodos de fabricação dos furos;

- ductilidade do material;
- disposição geométrica das peças.

Bartels (2000) considerou que neste tipo de perfil com ligação assimétrica a excentricidade causa uma redução da resistência devido a dois fatores: o efeito *shear lag* e o momento fletor. O efeito *shear lag* é uma variável já estudada por outros pesquisadores. O momento fletor é uma variável que não foi considerada em estudos passados e Bartels (2000) focou seus estudos nesta variável.

O efeito do método de fabricação dos furos também foi estudado numa tentativa de efetuar análises dos critérios de cálculo apresentados pelas normas para esta variável.

Nos estudos sobre a variação da eficiência devido ao momento fletor, foram utilizados espécimes com diferentes comprimentos de ligação. Então, esta variável também foi examinada, já que estudos passados mostravam que o comprimento da ligação tem uma influência significativa na eficiência da área líquida efetiva.

No intuito de observar o comportamento das peças quanto aos efeitos citados, Bartels fez testes experimentais de tração em vinte e quatro espécimes de mesmas propriedades variando apenas o tamanho das seções, o comprimento da ligação, a excentricidade da ligação, o número de parafusos e o método de fabricação dos furos para parafusos, de acordo com a variável estudada. Todos os espécimes foram conectados pela alma do perfil T. A carga foi aplicada através de acréscimos até o espécime atingir um modo de falha. Três modos de falha foram observados nos testes. O primeiro modo, observado no maior número de espécimes com excentricidade diferente de zero, apresentou uma deformação na borda de contato do furo e uma subsequente ruptura parcial na seção líquida conduzida do furo para a borda da alma da seção T. Foi observado que quando a excentricidade aumenta a deformação na borda do

furo diminui. O segundo modo de falha observado foi uma ruptura por cisalhamento de bloco evidenciado pela ruptura da área líquida tracionada e da área bruta cisalhada. O terceiro modo de falha constituiu na ruptura total da área líquida, iniciando a ruptura na alma da seção líquida do perfil T e propagando simultaneamente para seus flanges.

Bartels analisou os resultados considerando o efeito de cada variável apresentada por ele separadamente. Para o efeito da excentricidade da ligação foram observados que a sua redução causa um aumento linear na eficiência do membro, para ligações com três e quatro parafusos por fila, e um aumento não linear, para ligações com cinco parafusos por fila de furação, chegando próximo da eficiência total da área líquida da seção quando a excentricidade é bem reduzida. Organizando seus resultados em gráficos e fazendo comparações com os critérios de cálculo estabelecidos na LRFD (1995), Bartels notou que quando seus modelos tinham excentricidade acima de 45 mm, para espécimes com furos brocados, e acima de 25 mm a 38 mm, para espécimes com furos puncionados, os coeficientes de eficiência para os tipos de ruptura previstos em membros tracionados calculados segundo a LRFD (1995) tornavam-se não conservadores.

Bartels atribuiu esta diferença primeiramente ao fato do cálculo do coeficiente de eficiência especificado na LRFD não considerar o efeito do momento fletor. O momento que surge devido às resultantes das forças externas e internas não estarem na mesma linha de ação, causa um aumento significativo do efeito da carga axial levando a peça a ter uma ruptura prematura na alma do perfil T do furo para a borda. Isto poderia ser resolvido calculando estas peças como sujeitas a combinação de esforço axial e momento fletor. No entanto, surge, neste caso, um momento de segunda ordem devido ao comprimento da ligação que torna este critério muito conservador para os cálculos. Este fato é representado na Figura 2.1.



Figura 2.1 – Representação da deformação em perfis T conectados pela alma.

Para efeito do comprimento da ligação, Bartels estudou o comprimento total da ligação, não analisando parâmetros como espaçamentos entre furos e/ou número de parafusos. Nos resultados obtidos por Bartels a eficiência da seção teve um aumento de 8% quando o comprimento da ligação aumentou de 228,6 mm para 304,8 mm e de 38% quando aumentou de 152,4 mm para 228,6 mm. Bartels comparou seus resultados com os de Wu e Kulak (1993) que tiveram um aumento na eficiência da seção em seus testes experimentais de 16% quando aumentaram o comprimento da ligação de 76,2 mm para 228,6 mm e não obtiveram diferença na eficiência da seção quando aumentaram o comprimento a ligação de 228,6 mm para 381,0 mm.

Bartels atribuiu esta diferença nos resultados a dois fatores: o primeiro é que uma ligação longa beneficia a eficiência da seção devido à redução de efeito *shear lag* causado por ela, como já foi mostrado em estudos passados (Munse e Chesson, 1963; Kulak e Wu, 1997 e Wu e Kulak, 1993). O segundo fator é que o acréscimo do comprimento da ligação gera um aumento do momento restaurador (momento de segunda ordem) na ligação. Este momento é uma

função da rigidez da ligação do espécime à chapa auxiliar e do comprimento da conexão, pois este último funciona como um braço de alavanca para o momento.

Para examinar o efeito do comprimento da ligação no parâmetro *shear lag*, Wu e Kulak (1993), citado por Bartels (2000, p.40), modelaram cinco de seus modelos testados experimentalmente usando elementos finitos no programa ANSYS. Uma comparação entre a carga última da análise de elementos finitos e o modelo físico correspondente testado experimentalmente foi boa. Foi encontrada uma média entre os valores da razão entre a carga última obtida no programa e a carga experimental de 0,988 e um desvio padrão de 0,099.

Os modelos construídos no ANSYS permitiram realizar uma análise de tensões na seção líquida de ruptura dos espécimes, mostrando que em cantoneiras conectadas com quatro ou mais parafusos, foi atingida a tensão de escoamento na aba projetada quando a aba conectada rompeu, enquanto que com um número menor de parafusos a aba conectada rompeu antes da aba projetada escoar.

Bartels obteve em seus resultados para espécimes com excentricidades próximas de zero um fator *shear lag* que excede o máximo estipulado na LRFD, $U = 0,9$, tanto para os espécimes brocados quanto para os puncionados. Porém, para espécimes cujas excentricidades excediam a 1,9 cm, os critérios de cálculo de LRFD tornam-se “não conservadores”, tanto para os puncionados e brocados, sendo a fórmula estabelecida na LRFD incapaz de considerar esta perda de eficiência. Este resultado também foi visto por Kulak e Wu (1997).

Quanto ao método de fabricação dos furos, Bartels estudou espécimes com furos brocados e puncionados, e analisando os resultados obtidos, observou que a perda de eficiência causada pela punção dos furos é maior que a normalizada pela LRFD, que estabelece um acréscimo de 2 mm ao diâmetro do furo para considerar os danos causados às bordas do furo durante a

fabricação do mesmo pelo método de punção. Tal critério diminui apenas em 2% a eficiência da seção, enquanto Bartels obteve como resultado perda de até 11% na eficiência da seção. Bartels observou também que quando a proximidade do furo à borda aumenta a perda de eficiência da seção é maior.

Analisando todos os parâmetros descritos nos parágrafos anteriores, Bartels usa uma análise de regressão linear múltipla e desenvolve um novo conceito para o fator de eficiência U , considerando o momento fletor causado por grandes excentricidades e o momento de segunda ordem que minimiza o efeito deste momento fletor na seção durante a aplicação da carga axial. Logo, para o desenvolvimento deste conceito, Bartels utilizou apenas os espécimes que tiveram rompimento parcial da seção líquida, já que os demais espécimes tiveram resultados conservadores em relação aos critérios propostos na LRFD. Este conceito propõe as seguintes equações:

Para espécimes puncionados

$$U_p = 0,50 - 0,20 \cdot \bar{x} + 0,05 \cdot L \leq 0,90, \quad (2.5)$$

Para espécimes brocados

$$U_p = 0,50 - 0,20 \cdot \bar{x} + 0,053 \cdot L \leq 0,95, \quad (2.6)$$

Estas equações consideram o sistema de unidade U.S., isto é, polegadas.

2.3.6 Efeitos da distância de furo a borda, espaçamento longitudinal entre furos e relação f_u/f_y

Kim e Yura realizaram um estudo experimental em peças submetidas à tração axial no intuito de analisar os efeitos da distância de furo a borda, do

espaçamento longitudinal entre furos e da razão f_u/f_y do material na resistência de ligações com um e dois furos.

Em uma ligação com uma fila de furação em que, a princípio, não há ruptura da seção líquida nem rasgamento de bloco e o parafuso resiste ao cisalhamento, a resistência da ligação é governada por dois tipos de comportamento: primeiro pelo rasgamento da borda e, à medida que a distância do furo a borda cresce, a resistência da ligação passa a ser governada pelo esmagamento do furo.

Foram testados nove espécimes com alta razão f_u/f_y e dez com baixa razão f_u/f_y , todos com mesma espessura e larguras de 8,9 cm e 15,0 cm para placas fixadas por um e dois parafusos, respectivamente. Foram utilizados parafusos de diâmetro ϕ igual a 1,9 cm e os furos foram executados por punção com diâmetro ϕ de 2,1 cm. A distância da extremidade do furo à borda da placa variou de 0,5d a 2,0d, com incrementos de 0,5d, para placas com um furo e de 0,5d ou 1,5d, para placas com dois furos. O espaçamento entre as extremidades dos dois furos da placa com dois furos variou de 1,0d a 3,0d com incrementos de 1,0d.

Kim e Yura, através de seus resultados, verificaram que a razão de tensão f_u/f_y não influencia significativamente a resistência dos espécimes.

Quando Kim e Yura comparam seus resultados com os preconizados pela AISC-LRFD, norma americana para perfis laminados e soldados, e pelo Eurocódigo 3, verificam que os valores da resistência obtidos pelo Eurocódigo 3 são aproximadamente 25% mais conservadores que os resultados experimentais encontrados e que a LRFD apresenta equações para o cálculo da resistência que fornecem valores próximos aos obtidos pelos experimentos, para distâncias de furo a borda até 1,5d. Para distâncias superiores, os resultados se distanciam dos experimentais.

3 DISPOSIÇÃO SOBRE O ASSUNTO EM NORMAS

Este capítulo trata da forma como as normas abordam a eficiência de peças parafusadas submetidas à tração, e compara os critérios adotados por elas para dimensionamento destas peças.

Para melhor compreensão dos dados que serão expostos neste capítulo, algumas definições geométricas são mostradas na Figura 3.1

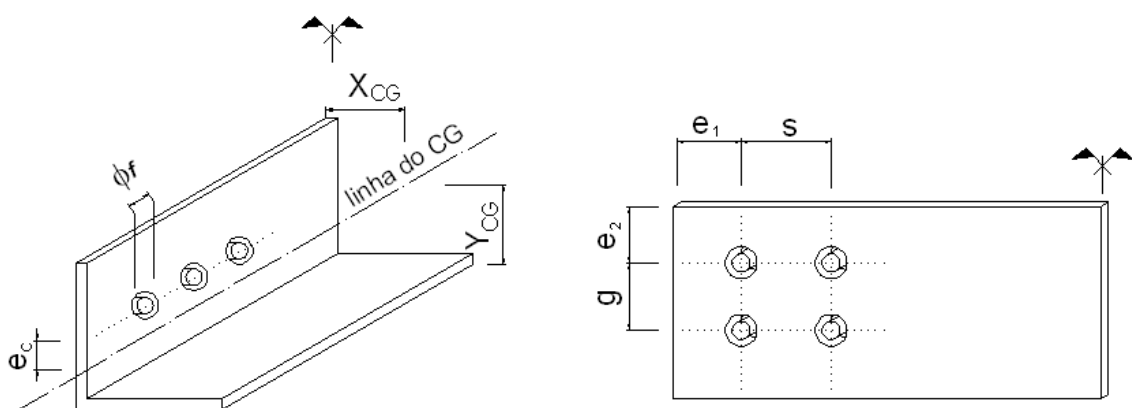


Figura 3.1 - definições geométricas

3.1 Disposições sobre o assunto em normas

As normas foram escolhidas pelos seguintes critérios:

- Citação em publicações que abordam o assunto;
- Utilização em pesquisas e trabalhos acadêmicos;
- Utilização pelos profissionais brasileiros;
- Disponibilidade em acervos.

As normas escolhidas que tratam do dimensionamento de perfis laminados e soldados são citadas abaixo:

- Norma Brasileira, NBR 8800, 1986;
- Projeto de Revisão da norma Brasileira, NBR 8800, versão preliminar de agosto de 2003;
- Norma Européia, Eurocódigo 3, 1993, versão preliminar de 2001;
- Norma Americana, AISC, American Institute of Steel Construction, Inc., 1999;
- Norma Britânica, British Standard, 2001.

Todas as normas abordadas neste trabalho adotam como critério de cálculo o método dos estados limites últimos. As normas brasileiras, americana e européia consideram como modo de falha a ruptura da seção líquida, e a norma britânica considera o escoamento da seção líquida.

A NBR 8800, 1986, trata a eficiência das seções transversais de elementos de aço tracionados ligados por parafusos da seguinte forma:

- Quando uma solicitação de tração for transmitida a uma barra diretamente para cada um dos elementos de sua seção, por soldas e parafusos, a área líquida efetiva, A_{ne} , é igual à área líquida, A_n . Quando a transmissão for feita por apenas alguns elementos da seção, a área líquida efetiva, A_{ne} , deve ser calculada pela equação:

$$A_{ne} = A_n \cdot C_t \quad (3.1)$$

Para C_t poderão ser usados os seguintes valores:

- Perfis I e H cujas mesas tenham uma largura não inferior a $2/3$ da altura do perfil e perfis T cortados destes perfis, com ligações nas mesas, tendo, no caso de ligações parafusadas, um mínimo de três parafusos por fila de furação na direção da solicitação..... $C_t = 0,90$
- Perfis I e H que não atendam aos requisitos anteriores, perfis T cortados desses perfis e todos os demais perfis, incluindo barras compostas, tendo, no caso de ligações parafusadas, um mínimo de três parafusos por fila de furação na direção da solicitação..... $C_t = 0,85$
- Em todas as barras com ligações parafusadas, tendo somente dois parafusos por fila de furação na direção da solicitação..... $C_t = 0,75$
- Para furo alongado na direção da força a quantia $s^2/4 \cdot g$ não pode ser somada à largura líquida, no cálculo de A_n .

Esta norma encontra-se em revisão atualmente e o Projeto de Revisão, agosto 2003, faz considerações diferentes da norma vigente.

Quando a força de tração transmitida somente por parafusos ou somente por soldas longitudinais ou ainda por uma combinação de soldas longitudinais e transversais para apenas alguns (não todos) elementos da seção transversal da barra (devendo, no entanto, ser usado 0,90 como limite superior e 0,75 como limite inferior):

$$C_t = 1 - \frac{e_c}{l_c} \quad (3.2)$$

onde

e_c é a excentricidade da ligação, igual à distância do centro de gravidade da barra, CG , ao plano de cisalhamento da ligação (em perfis com um plano de simetria, a ligação deve ser simétrica em relação a este plano e consideram-se duas barras separadas e simétricas, cada uma relacionada a um plano de cisalhamento da ligação, por exemplo, duas seções T no caso de perfis I ou H ligados pelas mesas);

l_c , nas ligações soldadas, é o comprimento da ligação, igual ao comprimento da solda e nas ligações parafusadas é a distância do primeiro ao último parafuso da fila da furação com maior número de parafusos, na direção da força normal.

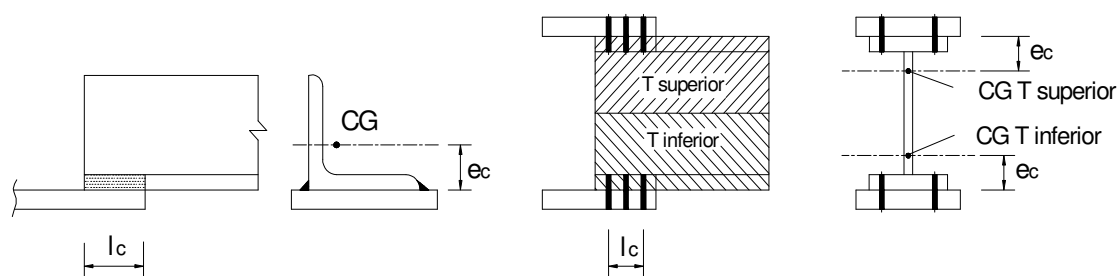


Figura 3.2- Ilustração dos valores de e_c e l_c em seções transversais constituídas por elementos planos

Fonte: Projeto de revisão da norma NBR 8800, agosto 2003.

A Norma Européia, Eurocódigo 3, faz as seguintes considerações para cantoneiras de aço tracionadas, conectadas por parafusos em apenas uma aba, e outros membros de aço parafusados, submetidos à tração, que possuam ligações assimétricas:

- A excentricidade de ligações parafusadas em uniões de extremidade e o efeito de espaçamento entre furos e da distância de furo à borda do membro são levados em conta em projetos de:
 - a. Membros assimétricos;
 - b. Membros simétricos que são unidos assimetricamente, assim como cantoneiras conectadas por uma aba.
- Cantoneiras ligadas por uma fila de parafusos em uma aba, podem ser tratadas como carregamento concêntrico e a resistência última da seção líquida é determinada como segue:

- a. Com um parafuso:

$$N_{u,Rd} = \frac{2,0 \cdot (e_2 - 0,5 \cdot d_o) \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (3.3)$$

- b. Com dois parafusos:

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (3.4)$$

- c. Com três ou mais parafusos:

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (3.5)$$

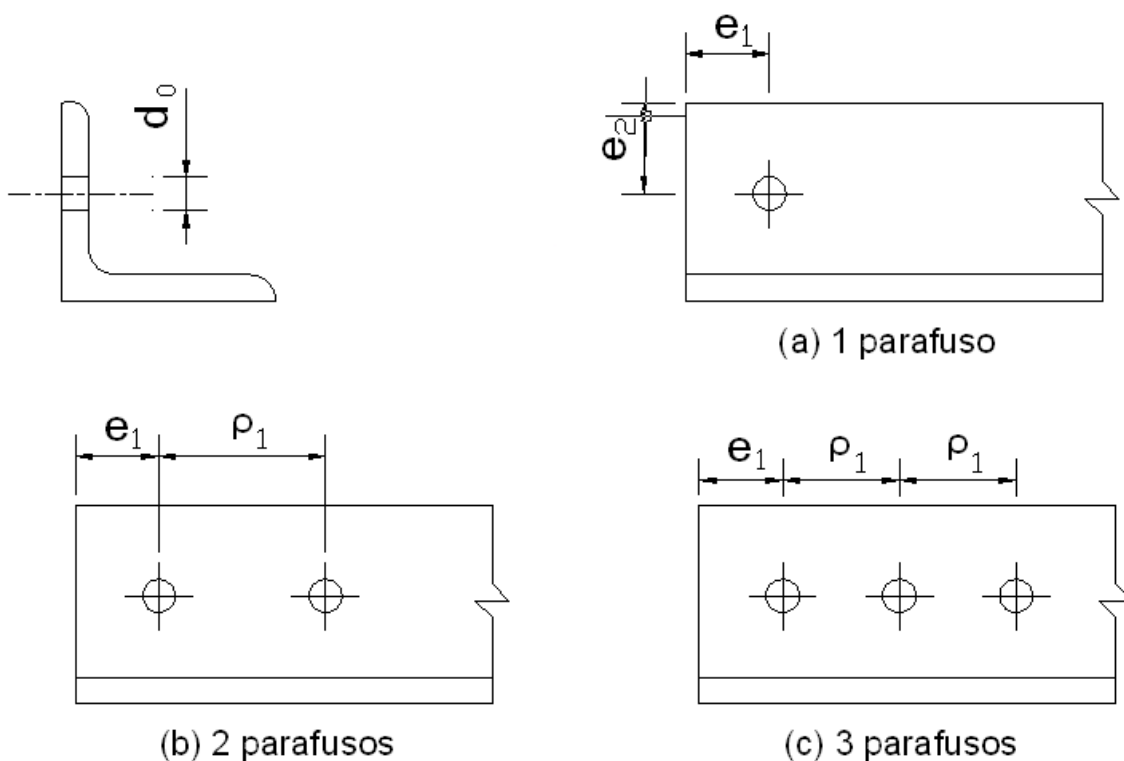


Figura 3.3 – Conexões em cantoneiras.

Fonte: Eurocódigo 3, 1993.

Onde, β_2 e β_3 são fatores de redução dependentes do espaçamento entre furos adjacentes, como indicado na Tabela 3.1. Para valores intermediários do espaçamento, ρ_1 os valores de β_2 e β_3 podem ser determinados por interpolação linear.

Para uma cantoneira de abas desiguais conectada pela sua menor aba, A_n deve ser igual à área líquida de uma cantoneira de abas iguais do tamanho da aba menor, ou seja, neste caso a aba conectada.

Tabela 3.1– Fator de redução

Espaçamento entre furo adjacentes (ρ_1)	$\leq 2,5.\phi$	$\geq 5,0.\phi$
2 parafusos (β_2)	0,4	0,5
3 ou mais parafusos (β_3)	0,5	0,7

Os fatores β_2 e β_3 equivalem a C_t da NBR 8800, d_0 é o diâmetro do furo, γ_{M2} é um fator de segurança que não será abordado neste trabalho, $N_{u,Rd}$, e_2 e A_{net} equivalem a R_n , e e A_{ne} respectivamente na NBR 8800.

A norma americana abordada neste trabalho será a norma AISC, para cálculo de estruturas metálicas pelo método dos estados limites últimos. Nela são feitas as seguintes considerações para cálculo da área líquida efetiva de membros tracionados:

- Quando uma carga de tração é transmitida diretamente para cada elemento da seção transversal por ligações parafusadas ou soldadas, a área efetiva A_e é igual à área líquida A_n .
- Quando a carga de tração é transmitida por parafusos ou rebites para alguns, mas não todos os elementos de seção transversal do membro, a área líquida efetiva pode ser computada como:

$$A_e = A_n.U \quad (3.6)$$

Onde, o coeficiente de redução U é dado por:

$$U = 1 - \left(\frac{\bar{x}}{L} \right) \leq 0,90 \quad (3.7)$$

onde,

\bar{x} é a excentricidade da ligação

L é o comprimento da ligação na direção do carregamento

A norma americana estabelece ainda que, no cálculo da tensão resistente de peças submetidas à tração axial, a área líquida A_n não poderá ultrapassar a $0,85A_g$.

Os símbolos A_e , U , \bar{x} e L equivalem a A_{ne} , C_t , e_c e l_c na NBR 8800, respectivamente.

As normas já apresentadas calculam a área efetiva da seção líquida por meio de um coeficiente de redução da área líquida. A próxima norma a ser apresentada calcula a área efetiva da seção líquida desconsiderando uma parte da área líquida de cada elemento conectado.

A norma britânica abordada neste trabalho é a BS 5950-1, 2000 com o título "Uso Estrutural de Aço em Edifícios". Na parte 1 desta norma é exposto o assunto: Códigos e Práticas para projeto – Seções laminadas e soldadas, onde a capacidade de tração é determinada pela equação:

$$P_t = p_y \cdot A_e \quad (3.8)$$

onde,

P_t = capacidade de tração do membro

$$p_y = 1,0Y_s \leq \frac{U_s}{1,2} \quad (3.9)$$

$$A_e = \sum a_e \leq 1,2 A_n \quad (3.10)$$

sendo

$$a_e = K_e \cdot a_n \leq a_g \quad (3.11)$$

onde

Y_s = limite do escoamento do aço especificado na norma britânica BS 5950-2

U_s = limite de resistência à tração do aço especificado na norma britânica BS 5950

A_e = área efetiva total da seção transversal

A_n = área líquida total da seção transversal

a_e = área efetiva de cada elemento da seção líquida

K_e = coeficiente da área líquida efetiva

a_g = área bruta de cada elemento da seção transversal

a_n = área líquida de cada elemento da seção transversal

A BS 5950-1 cita que das classes de aço estabelecidas na BS 5950-2, as mais comumente utilizadas são a S275, S355 e S460. O coeficiente da área líquida efetiva K_e é igual a 1,2 para o aço da classe S275, que é equivalente ao aço ASTM A36, que é o aço utilizado nesta pesquisa. Portanto, na BS 5950-1, a área efetiva de peças fabricadas com o aço ASTM A36 é maior que a área líquida, ou seja, esta norma utiliza um coeficiente de eficiência, baseado em um sistema de referências de material, e a área calculada utilizando tal coeficiente é chamada de área líquida efetiva.

Nas normas brasileiras, americana e européia, área líquida efetiva significa a área da seção líquida que realmente está suportando a tensão imposta à peça, já considerando a concentração de tensões devido a descontinuidades da peça. Nestas normas, a área líquida efetiva é menor ou igual à área líquida, mas nunca maior. Portanto, a definição de área líquida efetiva da norma britânica é diferente das demais normas apresentadas neste trabalho.

A norma britânica determina ainda:

Se as peças estruturais são ligadas excentricamente, a resistência das mesmas deve ser calculada de acordo com os critérios de peças tracionadas com momento. Porém, cantoneiras, perfis U ou perfis T com ligações de extremidade excêntrica podem ser tratados como axialmente carregados usando-se um redutor de capacidade de tração.

Para um tirante simples, projetado como axialmente carregado, consistindo de uma cantoneira simples ligada por uma aba apenas, um perfil U simples ligado apenas pela alma ou um perfil T ligado apenas pelo flange, a capacidade de tração pode ser obtida como segue:

$$P_t = p_y \cdot (A_e - 0,5 \cdot a_2) \quad (3.12)$$

com

$$a_2 = A_g - a_1 \quad (3.13)$$

onde

A_g é a área da seção transversal bruta da peça

a_1 é a área bruta do elemento conectado da seção, tomada como o produto entre a sua espessura e a largura de toda a aba, para cantoneiras, ou a largura da alma, para perfis U, ou a largura do flange para perfis T.

Para um tirante simples, projetado como axialmente carregado, consistindo de duas cantoneiras ligadas por uma aba apenas, dois perfis U conectados apenas pela alma ou dois perfis T conectados apenas pelo flange, a capacidade de tração será obtida como segue:

- a) Se o tirante é conectado em ambos os lados da peça de conexão e os componentes são travados em pelo menos duas seções ao longo de seu comprimento, a capacidade de tração por componente será obtida de:

$$P_t = p_y \cdot (A_e - 0,25 \cdot a_2) \quad (3.14)$$

- b) Se os componentes são ambos conectados do mesmo lado da chapa auxiliar, ou não são ligados como descrito no caso "a", a capacidade de tração por componente, será tomada como indicado na Equação (3.12).

No caso "a", a interconexão mais externa deve estar a uma distância mínima da extremidade de dez vezes o comprimento da aba menor para componentes de cantoneiras, ou dez vezes a menor dimensão dos componentes para perfis U ou perfis T.

Um tirante simples consistindo de uma cantoneira simples conectada na sua extremidade por ambas as abas ou um perfil U simples conectado por ambos os flanges ou um perfil T conectado apenas pela alma tronco (ou ambos, o flange e a alma tronco), deve ser projetado como axialmente carregado. A capacidade de tração deve ser baseada na área líquida efetiva como dada na Equação (3.11).

Os dispositivos de ementa de tirantes contínuos devem ser projetados como axialmente carregados. A capacidade de tração deve ser baseada no cálculo de área líquida efetiva dada na Equação (3.11).

Os símbolos P_t , Y_s , U_s equivalem a R_n , f_y e f_u , respectivamente, na NBR8800.

3.2 Comparação entre as normas de perfis laminados e soldados

As normas brasileira, americana e européia para perfis laminados e soldados abordadas neste trabalho consideram a resistência de peças com todos os seus elementos parafusados e submetidos ao esforço de tração, como o produto entre a área líquida da seção e a tensão última do material, sendo toda distribuição de tensões uniforme durante o regime plástico do material, e ainda que o alongamento da peça durante o escoamento e a ruptura da seção líquida é relativamente pequeno, sendo então considerado como modo de falha para esta situação a ruptura da seção líquida.

A norma britânica considera que tais peças podem ter uma área líquida efetiva maior que a área da seção líquida, pois o cálculo da área líquida efetiva total é obtido pela soma de todas as áreas líquidas efetivas dos elementos da seção, multiplicando-se a área líquida do elemento por um coeficiente que varia de 1,0 a 1,2 para as classes de aço mais utilizadas nas construções em aço. Porém, a BS 5950-1 considera como modo de falha da seção líquida o escoamento e não a ruptura da seção líquida.

Para peças submetidas à tração com ligações parafusadas assimétricas as normas brasileiras, americana e européia citadas neste trabalho, adotam como critério de cálculo, multiplicar a resistência à ruptura destas peças, encontrada pelos critérios descritos nos parágrafos anteriores, por um coeficiente de eficiência. A norma britânica subtrai, da área efetiva da seção parte da área do

elemento conectado, sendo esta também uma forma de adotar um coeficiente de eficiência para o cálculo da resistência destas peças. A revisão da norma brasileira NBR 8800 estabelece, para este caso, os mesmos critérios de cálculo da norma americana AISC, porém estabelece um valor mínimo para o coeficiente de eficiência.

As normas abordadas neste trabalho consideram que alguns parâmetros influenciam a eficiência das peças ligadas assimetricamente submetidas ao esforço de tração. Estes parâmetros variam entre as normas e mesmo que duas ou mais normas considerem o mesmo parâmetro, estes são considerados de formas distintas, variando o seu grau de influência sobre os critérios de cálculo da eficiência dessas peças.

O comprimento da ligação é um parâmetro considerado pelas normas brasileira, americana e européia abordadas nesta dissertação. A NBR 8800 vigente considera a influência deste parâmetro na eficiência da seção, apenas para peças com dois e três parafusos por fila de furação na direção da força. Para peças com três ou mais parafusos, este parâmetro não interfere na eficiência da seção. Esta norma desconsidera a influência do espaçamento entre furos, s , e da distância do centro do furo à borda, e , no comprimento da ligação, estabelecendo apenas valores mínimos de $2,7d$ para s e de $1,9$ cm a $1,75d$ para e .

A revisão da NBR 8800 e a norma americana AISC consideram que o comprimento da ligação, como um todo, tem influência direta sob o C_t , não levando em consideração distinção entre número de parafusos e os espaçamentos s e e .

A norma européia, Eurocódigo 3, considera a influência do número de parafusos, fazendo distinção apenas entre dois e três parafusos e considera acima de três parafusos o mesmo coeficiente de eficiência. Esta norma

considera ainda, para dois ou três parafusos, a influência do espaçamento entre furos s .

A norma britânica não considera o comprimento da ligação um parâmetro de influência.

A geometria da peça é um parâmetro considerado pelas normas brasileira e britânica. A NBR 8800 vigente considera que tanto o tipo da seção como as suas dimensões influenciam na eficiência da mesma para ligações parafusadas. Esta norma divide os tipos de seção em dois grupos, sendo o primeiro grupo composto pelos perfis I, H e T e o segundo grupo pelos demais perfis. No primeiro grupo de perfis esta norma adota um valor maior de coeficiente de eficiência para perfis que apresentam uma razão geométrica (b_f / h) entre 1 e 2/3.

A norma britânica calcula peças com ligações excêntricas como axialmente carregadas apenas para seções do tipo cantoneiras, perfis U e perfis T simples ou duplos. Para os demais perfis, o cálculo de peças ligadas assimetricamente deve ser feito considerando carregamento de tração e momento fletor.

A NBR 8800 vigente considera como parâmetro de influência o ponto de aplicação da carga, estabelecendo diferentes valores para perfis I, H e T ligados pelas mesas ou pela alma.

A revisão da norma brasileira e a norma americana também consideram como parâmetro o ponto de aplicação da carga e estabelecem a influência deste parâmetro com base na excentricidade da ligação.

As normas européia e britânica citadas nesta dissertação não consideram a influência deste parâmetro.

Outros parâmetros são citados isoladamente pelas normas:

- Tipo de furo: a NBR 8800 não permite somar o valor $s^2/4 \cdot g$ no cálculo da área líquida da seção enviesada quando os furos são alongados na direção do esforço.
- Tipo de ligação: a BS 5950-1 adota critérios de cálculo distintos para tirantes duplos ligados de diferentes formas por meio de chapas auxiliares.

Na Tabela 3.2, apresentada a seguir, pode-se verificar para um mesmo perfil I constituído do mesmo material e tendo o mesmo tipo de ligação, os diferentes coeficientes de eficiência obtidos pelos critérios de cálculo adotados por algumas das normas abordadas neste trabalho.

Dentre os perfis escolhidos, o CVS 200 x 25 possui a relação entre as larguras da mesa e da alma menor que 2/3, o CVS 300 x 47 possui esta relação igual a 2/3 e o CVS 300 x 55 possui esta relação maior que 2/3.

Tabela 3.2 – Coeficientes de eficiência dos perfis de acordo com a NBR 8800, Revisão NBR 8800 e AISC.

PERFIL	LIGAÇÃO 1			LIGAÇÃO 2			LIGAÇÃO 3			LIGAÇÃO 4		
	NBR 8800	REVISÃO NBR 8800	AISC	NBR 8800	REVISÃO NBR 8800	AISC	NBR 8800	REVISÃO NBR 8800	AISC	NBR 8800	REVISÃO NBR 8800	AISC
CVS 200x25	0,7500	0,7500	0,5299	0,8500	0,7649	0,7649	0,7500	0,8346	0,8346	0,8500	0,9000	0,9000
CVS 300x47	0,7500	0,7500	0,2673	0,9000	0,7500	0,6337	0,7500	0,7900	0,7900	0,8500	0,8950	0,8950
CVS 300x55	0,7500	0,7500	0,3667	0,9000	0,7500	0,6834	0,7500	0,7900	0,7900	0,8500	0,8950	0,8950

- ligação 1 – perfis conectados pelas mesas sendo duas filas de furação por mesa com dois parafusos de 1/2” por fila.
- ligação 2 – perfis conectados pelas mesas sendo duas filas de furação por mesa com três parafusos de 1/2” por fila.

- ligação 3 – perfis conectados pela alma tendo duas filas de furação localizados a $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{4}$ de uma das bordas da alma do perfil com dois parafusos de $\frac{1}{2}$ " por fila.
- ligação 4 – perfis conectados pela alma tendo duas filas de furação localizados a $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{4}$ de uma das bordas da alma do perfil parafusos com três parafusos de $\frac{1}{2}$ " por fila.
- o furo considerado possui folga de 1,5 mm; foi considerado um acréscimo de 2,00 mm no diâmetro do furo, por conta da punção; espaçamento longitudinal entre furos, s , foi de $3d$ e, para as ligações 3 e 4, foi considerado o uso de uma chapa de ligação de espessura igual a alma do perfil.

Analisando as informações da Tabela 3.2, verifica-se que para as ligações 1 e 2 (ligações pela mesa), a AISC é a mais conservadora, seguida da Revisão da NBR 8800 e da NBR 8800 vigente. Para as ligações 3 e 4 (ligações feitas na alma do perfil), a NBR 8800 vigente é mais conservadora que as demais. Esta diferença entre os tipos de ligação acontece devido à consideração de diferentes variáveis de influência pelas normas e do grau de influência destas variáveis na resistência à ruptura na seção líquida da peça.

Outros parâmetros, que não os mostrados na Tabela 3.2, foram utilizados nesta comparação entre as normas. Os resultados obtidos mostraram que:

- A AISC não apresenta um valor mínimo para o coeficiente de eficiência, causando a possibilidade de apresentar valores muito baixos e/ou até negativos para este coeficiente, ou seja, resultando em uma resistência negativa da peça, o que é uma inconsistência.
- O critério utilizado pela revisão da NBR 8800 é o mesmo utilizado pela AISC, a menos de um valor mínimo para o coeficiente de eficiência adotado pela norma brasileira, $C_t = 0,75$. Este fato pode ser observado

nas ligações 1 e 2, onde os valores de C_t calculados pela AISC são inferiores ao mínimo adotado pela revisão da NBR 8800.

- Se o espaçamento longitudinal entre os furos diminuir, a diferença entre os resultados apresentados pelas normas brasileiras e a AISC aumenta, porém, para os casos de valor mínimo de C_t ($C_t = 0,75$), não há diferença entre os valores fornecidos pela NBR 8800 vigente e a revisão da NBR 8800.
- A partir de quatro parafusos para os perfis I, H e T, a diferença entre os resultados fornecidos pelas normas decresce à medida que o número de parafusos aumenta chegando a ser nula entre os perfis CVS 300x47 e CVS 300x57, para oito parafusos.
- Para perfis I, H e T com $d \geq \frac{2}{3}b_f$, a diferença é menor quando ligados por três parafusos pela mesa.
- Na ligação 2, para o perfil CVS 200x25, a NBR 8800 vigente torna-se conservadora em relação à revisão da mesma norma e à AISC quando o comprimento da ligação é composto por mais de quatro e seis parafusos, respectivamente, mantendo-se a mesma distância entre furos. Para os demais perfis, a resistência calculada seguindo a Revisão da NBR 8800 e a AISC aumenta à medida que se aumenta o comprimento da ligação, até igualar-se ao valor obtido pela NBR 8800 vigente, o qual não varia com este comprimento.
- Para a ligação 1, a NBR 8800 vigente torna-se conservadora em relação às outras normas abordadas na Tabela 3.2, para comprimentos da ligação elevados.
- Nas ligações onde os perfis são ligados pelas mesas não há a possibilidade de mudança da excentricidade, sendo então este tipo de

ligação dependente apenas do comprimento da ligação, para a AISC e Revisão da NBR 8800, e do número de parafusos, para NBR 8800 vigente.

- Para as ligações onde os perfis são ligados pela alma, há a possibilidade de mudança de excentricidade pela mudança da espessura da chapa de ligação. Porém não é usual ter uma chapa com a espessura muito maior que a espessura da alma do perfil neste tipo de ligação. Logo, a variação da excentricidade é relativamente pequena, não influenciando significativamente o coeficiente de eficiência obtido, o qual, portanto, depende apenas do comprimento da ligação, para a AISC e a Revisão da NBR 8800, e do número de parafusos, para a NBR 8800 vigente.

A Tabela 3.3, a Tabela 3.4 e a Tabela 3.5 apresentam os coeficientes de eficiência calculados segundo normas de perfis laminados abordadas nesta dissertação, para uma cantoneira 65x65x0,8 conectada por uma aba com dois, três, quatro, cinco, seis e sete parafusos de 1/2", espaçamento s entre furos de 2,7d, 3,0d, 5,0d e 5,5d e excentricidade de 0,63 cm, 2,07 cm e 2,83 cm.

Como a norma britânica BS 5950-1 não apresenta explicitamente o cálculo do coeficiente, foi, neste caso, utilizado, nas tabelas, o valor equivalente, determinado pela razão entre a resistência fornecida pela dita norma e a carga teórica de ruptura de área líquida da seção, ou seja,

$$C_t = \frac{P_t}{A_n \cdot f_u} \quad (3.15)$$

onde

P_t é a resistência à tração da peça fornecida pela norma britânica, equivalente a R_n na NBR 8800;

A_n é a área da seção transversal com furos e

f_u é a tensão última para o aço.

Tabela 3.3 – Coeficiente de eficiência para cantoneira conectada por uma aba com excentricidade da fila de furação e_c igual a 0,63 cm.

		NBR 8800					Eurocódigo 3				
N	S	2d	2.7d	3d	5d	5.5d	2d	2.7d	3d	5d	5.5d
2		0,7500	0,7500	0,7500	0,7500	0,7500	0,4000	0,4280	0,4400	0,5000	0,5000
3		0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,5000	0,5160	0,5400	0,7000	0,7000
4		0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,5000	0,5160	0,5400	0,7000	0,7000
5		0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,5000	0,5160	0,5400	0,7000	0,7000
6		0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,5000	0,5160	0,5400	0,7000	0,7000
7		0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,5000	0,5160	0,5400	0,7000	0,7000

		REVISÃO DA NBR 8800					BS 5950-1				
N	S	2d	2.7d	3d	5d	5.5d	2d	2.7d	3d	5d	5.5d
2		0,7520	0,8163	0,8346	0,9000	0,9000	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112
3		0,8760	0,9000	0,9000	0,9000	0,9000	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112
4		0,9000	0,9000	0,9000	0,9000	0,9000	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112
5		0,9000	0,9000	0,9000	0,9000	0,9000	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112
6		0,9000	0,9000	0,9000	0,9000	0,9000	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112
7		0,9000	0,9000	0,9000	0,9000	0,9000	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112

		AISC				
N	S	2d	2.7d	3d	5d	5.5d
2		0,7520	0,8163	0,8346	0,9000	0,9000
3		0,8760	0,9000	0,9000	0,9000	0,9000
4		0,9000	0,9000	0,9000	0,9000	0,9000
5		0,9000	0,9000	0,9000	0,9000	0,9000
6		0,9000	0,9000	0,9000	0,9000	0,9000
7		0,9000	0,9000	0,9000	0,9000	0,9000

Tabela 3.4 – Coeficiente de eficiência para cantoneira conectada por uma aba com excentricidade da fila de furação e_c igual a 2,07 cm.

		NBR 8800					Eurocódigo 3				
N	S	2d	2.7d	3d	5d	5.5d	2d	2.7d	3d	5d	5.5d
2		0,7500	0,7500	0,7500	0,7500	0,7500	0,4000	0,4280	0,4400	0,5000	0,5000
3		0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,5000	0,5160	0,5400	0,7000	0,7000
4		0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,5000	0,5160	0,5400	0,7000	0,7000
5		0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,5000	0,5160	0,5400	0,7000	0,7000
6		0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,5000	0,5160	0,5400	0,7000	0,7000
7		0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,5000	0,5160	0,5400	0,7000	0,7000

		REVISÃO DA NBR 8800					BS 5950-1				
N	S	2d	2.7d	3d	5d	5.5d	2d	2.7d	3d	5d	5.5d
2		0,7500	0,7500	0,7500	0,7500	0,7500	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112
3		0,7500	0,7500	0,7500	0,8370	0,8518	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112
4		0,7500	0,7988	0,8189	0,8913	0,9000	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112
5		0,7963	0,8491	0,8642	0,9000	0,9000	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112
6		0,8370	0,8793	0,8913	0,9000	0,9000	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112
7		0,8642	0,8994	0,9000	0,9000	0,9000	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112

		AISC				
N	S	2d	2.7d	3d	5d	5.5d
2		0,1850	0,3963	0,4567	0,6740	0,7037
3		0,5925	0,6982	0,7283	0,8370	0,8518
4		0,7283	0,7988	0,8189	0,8913	0,9000
5		0,7963	0,8491	0,8642	0,9000	0,9000
6		0,8370	0,8793	0,8913	0,9000	0,9000
7		0,8642	0,8994	0,9000	0,9000	0,9000

Tabela 3.5 – Coeficiente de eficiência para cantoneira conectada por uma aba com excentricidade da fila de furação e_c igual a 2,83 cm.

N	NBR 8800					Eurocódigo 3				
	2d	2.7d	3d	5d	5.5d	2d	2.7d	3d	5d	5.5d
2	0,7500	0,7500	0,7500	0,7500	0,7500	0,4000	0,4280	0,4400	0,5000	0,5000
3	0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,5000	0,5160	0,5400	0,7000	0,7000
4	0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,5000	0,5160	0,5400	0,7000	0,7000
5	0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,5000	0,5160	0,5400	0,7000	0,7000
6	0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,5000	0,5160	0,5400	0,7000	0,7000
7	0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,8500	0,5000	0,5160	0,5400	0,7000	0,7000

N	REVISÃO DA NBR 8800					BS 5950-1				
	2d	2.7d	3d	5d	5.5d	2d	2.7d	3d	5d	5.5d
2	0,7500	0,7500	0,7500	0,7500	0,7500	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112
3	0,7500	0,7500	0,7500	0,7772	0,7974	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112
4	0,7500	0,7500	0,7524	0,8514	0,8649	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112
5	0,7500	0,7937	0,8143	0,8886	0,8987	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112
6	0,7772	0,8349	0,8514	0,9000	0,9000	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112
7	0,8143	0,8624	0,8762	0,9000	0,9000	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112	0,7112

N	AISC				
	2d	2.7d	3d	5d	5.5d
2	-0,1142	0,1747	0,2572	0,5543	0,5948
3	0,4429	0,5873	0,6286	0,7772	0,7974
4	0,6286	0,7249	0,7524	0,8514	0,8649
5	0,7215	0,7937	0,8143	0,8886	0,8987
6	0,7772	0,8349	0,8514	0,9000	0,9000
7	0,8143	0,8624	0,8762	0,9000	0,9000

Analisando-se a Tabela 3.3, a Tabela 3.4 e a Tabela 3.5, verifica-se que, para cantoneiras, no aspecto geral, as normas apresentam a seguinte ordem crescente de resistência à ruptura: Eurocódigo 3, BS 5950-1, AISC, Revisão da NBR 8800 e NBR 8800 vigente.

Na Tabela 3.3, a norma NBR8800 vigente mostra-se mais conservadora que a AISC e a Revisão da NBR8800. Em uma análise mais específica pode-se notar que:

- As normas AISC e Revisão da NBR 8800 são as únicas que apresentam variações na resistência da peça com a mudança de excentricidade, sendo que os valores obtidos por uma nem sempre correspondem aos

obtidos pela outra, devido ao fato, já citado, de a norma brasileira adotar um valor mínimo para o C_r .

- Como a AISC não apresenta um valor mínimo para o coeficiente de eficiência, observa-se, nos casos analisados, valores muito baixos e até negativos para este coeficiente.
- As diferenças entre os resultados fornecidos pela AISC e pela Revisão da NBR 8800 crescem com o aumento da excentricidade.
- Os resultados obtidos com a NBR 8800 vigente sofrem variação de 11,76% com a mudança de dois para três parafusos por fila de furação, permanecendo constantes para os demais casos da Tabela 3.3.
- Para o Eurocodigo 3 a diferença entre os valores obtidos para o coeficiente de eficiência cresce com o aumento do espaçamento longitudinal entre furos, s , até $5d$, desaparecendo após este valor.
- Os resultados obtidos com o Eurocódigo 3 não apresentam variações para mais de três parafusos por fila.
- Os resultados obtidos com a BS 5950-1 não apresentam nenhum tipo de variação, nem com o número de parafusos nem com o espaçamento longitudinal entre eles.
- Nos resultados obtidos pela norma AISC, nota-se uma diferença maior entre os mesmos quando a resistência à ruptura da área líquida atinge valores inferiores à resistência ao escoamento da área bruta. Nas Tabela 3.4 e Tabela 3.5, este fato está indicado pela linha dupla.
- Para as normas AISC e Revisão da NBR 8800, o comprimento da ligação, para o qual a resistência à ruptura torna-se um valor constante, varia com a excentricidade da ligação. Quanto maior a excentricidade da

ligação, maior é o valor do comprimento da ligação para o qual a resistência à ruptura na área líquida torna-se um valor constante.

4 CONSIDERAÇÕES E LIMITAÇÕES DO PROBLEMA

No capítulo anterior, pôde-se verificar que as normas abordadas nesta dissertação divergem sobre os parâmetros a serem considerados e na intensidade de influência deles na resistência da área líquida de peças tracionadas conectadas por parafusos.

No intuito de estudar as divergências entre as normas, foram analisados, por meio de modelos numéricos, todos os parâmetros que poderiam influir na resistência à ruptura dos modelos estudados, porém alguns parâmetros foram simplificados e/ou limitados em uma faixa de variações para otimização dos resultados da dissertação.

Para as definições, considerações, limitações, resultados e análises que são apresentadas neste estudo, foram utilizadas as unidades de força em kgf e medidas em cm.

4.1 Definições de modelo e variáveis de influência

O material utilizado para construção dos modelos foi selecionado de acordo com a sua utilização nas construções em aço. Logo, como o material das chapas e cantoneiras foi escolhido o aço ASTM A36, especificado pela American Society for Testing and Materials (ASTM), que é o aço mais utilizado na fabricação de perfis laminados e soldados, sendo produzidos em espessuras maiores do que 4,57 mm. As propriedades deste aço são:

- módulo de elasticidade longitudinal, E , igual a 2.050.000 kgf/cm²
- coeficiente de Poisson, ν , igual a 0,3
- tensão de escoamento, f_y , igual a 2500 kgf/cm²
- tensão última, f_u , igual a 4000 kgf/cm²

O material com o qual são fabricados os parafusos modelados nesta pesquisa é o aço ASTM A325, também especificado pela American Society for Testing and Materials (ASTM). As propriedades deste aço são:

- módulo de elasticidade longitudinal, E , igual a 2.050.000 kgf/cm²
- coeficiente de Poisson, ν igual a 0,3
- tensão de escoamento, f_y , igual a 5596,5 kgf/cm²
- tensão última, f_u , igual a 6600 kgf/cm²

A Figura 4.1 apresenta os diagramas de tensão-deformação dos aços utilizados na construção dos modelos estudados neste trabalho, onde são definidos o ponto de escoamento e de ruptura de tais aços.

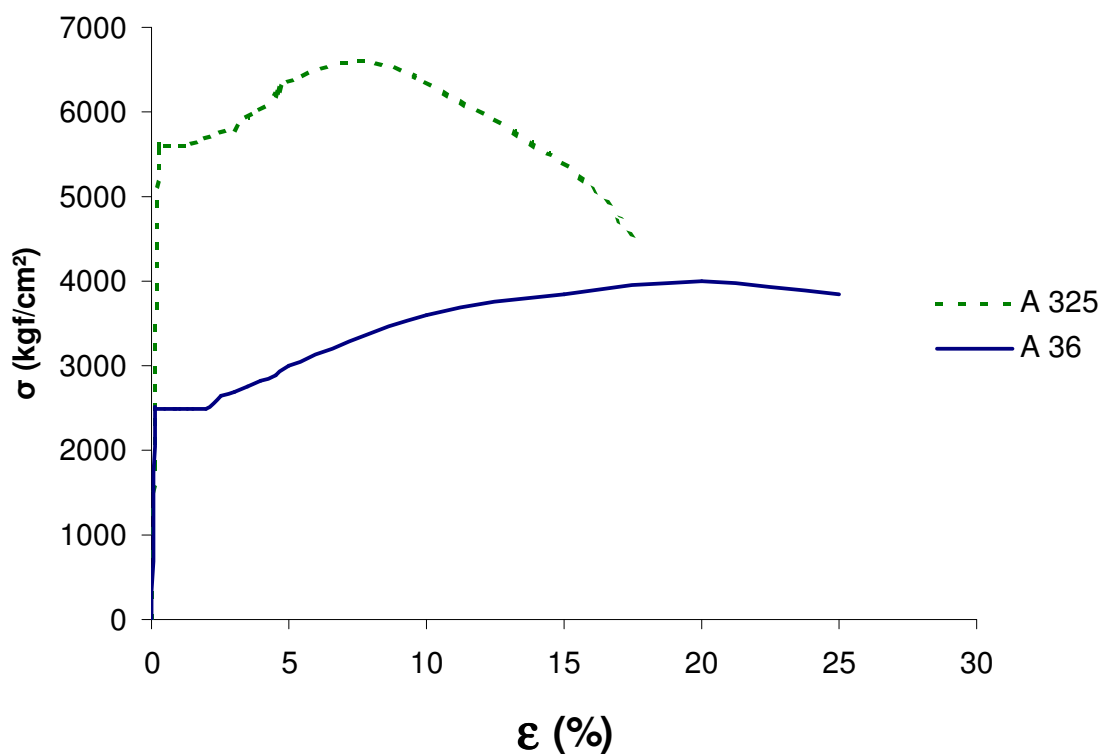


Figura 4.1 – Diagrama tensão deformação do aço ASTM A36 e A325.

Foram estudadas as seguintes variáveis no intuito de identificar quais delas influem, e quanto, na resistência da peça tracionada conectada por parafusos:

- Geometria da seção transversal;
- Espessura do elemento conectado;
- Relação A_n/A_g ;
- Número de filas de furação;
- Comprimento da ligação, considerando o número de parafusos por fila de furação e o espaçamento longitudinal entre furos;
- Espaçamento transversal entre furos;

- Distância de furo à borda;
- Excentricidade;

A primeira variável de influência analisada foi a **geometria dos modelos** construídos. Foram escolhidos dois tipos de peças para a construção dos modelos: chapas e cantoneiras.

Nas chapas, foram analisados os possíveis parâmetros que influenciam a ruptura nas áreas líquidas de peças sujeitas à tração, conectadas por parafusos de $\frac{1}{2}$ "(12,7 mm) em uma ligação concêntrica, com várias filas de furação. Esta análise constou da verificação do valor do coeficiente de eficiência que, segundo as normas expostas no capítulo anterior, é igual a um, e da distribuição das tensões no momento da ruptura da área líquida. Foram construídos um total de sessenta modelos de chapas.

Nas cantoneiras, foram analisados os possíveis parâmetros que influenciam a ruptura nas áreas líquidas de peças estruturais à tração em que apenas um elemento da seção transversal é conectado por parafusos de $\frac{1}{2}$ "(12,7 mm) em uma ligação excêntrica, com apenas uma fila de furação. Nesta análise foram verificados o coeficiente de eficiência e a distribuição de tensões no modo de falha na seção líquida apresentado por estes modelos. Foram construídos vinte e três modelos de cantoneira para a análise proposta.

Outra variável analisada foi a **espessura** de chapas. Foram construídos quatro modelos de chapa onde exceto a espessura, todos os parâmetros permaneceram os mesmos para que pudesse ser analisado se a espessura é um fator de influência na resistência à ruptura da área líquida de tais peças. As características geométricas destes modelos estão expostas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características geométricas para análise da variável espessura na resistência à ruptura de chapas

VARIÁVEL ESPESSURA DE CHAPAS				
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3	MODELO 4
Largura	8,3500	8,3500	8,3500	8,3500
Comprimento	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000
Espessura	0,6350	0,7140	0,7940	0,8730
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Filas de furação	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000
Parafusos/fila	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	1,9000	1,9000	1,9000	1,9000
s	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
g	4,5500	4,5500	4,5500	4,5500
A_n/A_g	0,6120	0,6120	0,6120	0,6120
e_2/g	0,4176	0,4176	0,4176	0,4176

A variável **relação** A_n/A_g foi analisada também para chapas. Na análise da influência desta variável, foram construídos três modelos de chapa com larguras variadas. Em consequência, o espaçamento transversal g e a distância e_2 também variaram, porém a relação entre eles permaneceu constante. As demais variáveis também permaneceram inalteradas. As características dos modelos estão na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características geométricas para análise da variável relação

 A_n/A_g na resistência à ruptura de chapas

VARIÁVEL RELAÇÃO A_n/A_g DE CHAPAS			
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 5	MODELO 6	MODELO 7
Largura	7,6900	7,9200	8,3500
Comprimento	19,0000	19,0000	19,0000
Espessura	0,7140	0,7140	0,7140
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200
Filas de furação	2,0000	2,0000	2,0000
Parafusos/fila	2,0000	2,0000	2,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	1,9000	1,9600	2,0650
s	4,0000	4,0000	4,0000
g	3,8900	4,0000	4,2200
A_n/A_g	0,5787	0,5909	0,6120
e_2/g	0,4884	0,4900	0,4893

Para análise da influência do **número de filas de furação** na direção da força foram construídos modelos de chapas com uma, duas, três, quatro, cinco e seis filas de furação. Nos modelos construídos, as variáveis permaneceram as mesmas, exceto o número de filas e a largura da peça que aumentou de acordo com o número de filas de furação. Os modelos referentes a esta análise estão na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Características geométricas para análise da variável filas de furação na resistência à ruptura de chapas.

VARIÁVEL FILAS DE FURAÇÃO EM CHAPAS						
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 8	MODELO 78	MODELO 79	MODELO 75	MODELO 76	MODELO 77
Largura	3,8000	7,6000	11,4000	15,2000	19,0000	22,8000
Comprimento	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000
Espessura	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Filas de furação	1,0000	2,0000	3,0000	4,0000	5,0000	6,0000
Parafusos/fila	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	1,9000	1,9000	1,9000	1,9000	1,9000	1,9000
s	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
g	---	3,8000	3,8000	3,8000	3,8000	3,8000
A_n/A_g	0,5737	0,5737	0,5737	0,5737	0,5737	0,5737
e_2/g	---	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000

O **comprimento da ligação** foi uma variável analisada de três formas:

A primeira considera apenas o **número de parafusos por fila de furação**, onde foram construídos cinco modelos de chapas com duas filas contendo cada uma dois, três, quatro, cinco e seis parafusos igualmente espaçados, e seis modelos de cantoneiras com apenas uma fila de furação contendo três, quatro, cinco, seis e sete parafusos. Todas as demais variáveis permanecem inalteradas com exceção, naturalmente, do comprimento da ligação. As Tabela 4.4 e Tabela 4.5 mostram as características geométricas destes modelos.

A segunda forma analisada considera apenas o **espaçamento longitudinal entre furos**, s , que foi considerado com: 2,75d; 3,00d; 3,15d; 3,40d e 3,95d para chapa com quatro parafusos, com: 3,95d, para chapa com seis parafusos, com: 3,50d; 4,00d; 4,50d; 5,00d; 5,50d para cantoneiras com quatro parafusos e com: 2,70d; 3,00d, 4,00d, 5,00d e 5,50d para cantoneiras com seis parafusos, sendo d o diâmetro de parafuso. Para a segunda forma, foram construídos seis modelos de chapas e dez modelos de cantoneiras que têm

suas características geométricas expostas nas Tabela 4.6 e Tabela 4.7, respectivamente.

A terceira forma analisada considera a combinação das duas variáveis anteriores. Para tal análise, foram utilizados os modelos expostos na Tabela 4.7.

Tabela 4.4 - Características geométricas para análise da variável parafusos por fila de furação na resistência à ruptura de chapas.

VARIÁVEL PARAFUSOS/FILA EM CHAPAS					
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 10	MODELO 11	MODELO 2	MODELO 12	MODELO 13
Largura	8,3500	8,3500	8,3500	8,3500	8,3500
Comprimento	19,0000	23,0000	27,0000	31,0000	35,0000
Espessura	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Filas de furação	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000
Parafusos/fila	2,0000	3,0000	4,0000	5,0000	6,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	1,9000	1,9000	1,9000	1,9000	1,9000
s	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
g	4,5500	4,5500	4,5500	4,5500	4,5500
A_n/A_g	0,6120	0,6120	0,6120	0,6120	0,6120
e_2/g	0,4176	0,4176	0,4176	0,4176	0,4176

Tabela 4.7 - Características geométricas para análise da variável s na resistência à ruptura de cantoneiras.

VARIÁVEL s DE CANTONEIRAS					
GEOMETRIA DA CANTONEIRA	MODELO 95	MODELO 94	MODELO 99	MODELO 57	MODELO 67
Largura da aba	6,5000	6,5000	6,5000	6,5000	6,5000
Comprimento	28,3350	30,2400	32,1450	34,0500	35,9700
Espessura	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Parafusos/fila	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	4,1000	4,1000	4,1000	4,1000	4,1000
s	4,4450	5,0800	5,7150	6,3500	6,9900
e_c	0,4816	0,4816	0,4816	0,4816	0,4816
l_c	13,3350	15,2400	17,1450	19,0500	20,9700
A_n/A_g	0,8672	0,8672	0,8672	0,8672	0,8672

VARIÁVEL s DE CANTONEIRAS					
GEOMETRIA DA CANTONEIRA	MODELO 82	MODELO 83	MODELO 84	MODELO 62	MODELO 85
Largura da aba	6,5000	6,5000	6,5000	6,5000	6,5000
Comprimento	32,1500	34,0500	40,4000	46,7500	49,9500
Espessura	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Parafusos/fila	6,0000	6,0000	6,0000	6,0000	6,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	4,1000	4,1000	4,1000	4,1000	4,1000
s	3,4300	3,8100	5,0800	6,3500	6,9900
e_c	0,4816	0,4816	0,4816	0,4816	0,4816
l_c	17,1500	19,0500	25,4000	31,7500	34,9500
A_n/A_g	0,8672	0,8672	0,8672	0,8672	0,8672

Como o **espaçamento transversal entre furos**, g , e a **distância entre o furo e a borda**, e_2 , são interdependentes em chapas de mesma largura, a variável analisada foi a **relação** e_2/g .

Esta relação foi analisada para chapas com duas e três filas de furação e foram construídos um total de trinta e nove modelos para esta análise. As características geométricas destes modelos são mostradas nas Tabela 4.8 e Tabela 4.9.

Para cantoneira com apenas uma fila de furos, foi, naturalmente, analisada apenas a variável distância entre o furo e a borda, e_2 . A Tabela 4.10 mostra as características dos modelos utilizados nesta análise.

Tabela 4.8 - Características geométricas para análise da variável e_2/g na resistência à ruptura de chapas com duas filas de furação

VARIÁVEL RELAÇÃO e_2/g DE CHAPAS COM DUAS FILAS DE FURAÇÃO									
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 19	MODELO 20	MODELO 21	MODELO 22	MODELO 23	MODELO 24	MODELO 25	MODELO 2	MODELO 26
Largura	7,7900	7,7900	7,7900	8,0700	8,0700	8,0700	8,0700	8,3500	8,3500
Comprimento	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000
Espessura	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Filas de furação	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000
Parafusos/fila	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	1,9000	2,0450	2,1800	1,9000	2,0450	2,1850	2,3200	1,9000	2,0450
s	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
g	3,9900	3,7000	3,4300	4,2700	3,9800	3,7000	3,4300	4,5500	4,2600
A_n/A_g	0,5841	0,5841	0,5841	0,5985	0,5985	0,5985	0,5985	0,6120	0,6120
e_2/g	0,4762	0,5527	0,6356	0,4450	0,5138	0,5905	0,6764	0,4176	0,4800

VARIÁVEL RELAÇÃO e_2/g DE CHAPAS COM DUAS FILAS DE FURAÇÃO									
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 27	MODELO 28	MODELO 29	MODELO 30	MODELO 31	MODELO 32	MODELO 33	MODELO 34	MODELO 35
Largura	8,3500	8,3500	8,3500	8,6300	8,6300	8,6300	8,6300	8,6300	8,6300
Comprimento	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000
Espessura	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Filas de furação	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000
Parafusos/fila	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	2,1850	2,3250	2,4600	1,9000	2,0450	2,1850	2,3250	2,4650	2,6000
s	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
g	3,9800	3,7000	3,4300	4,8300	4,5500	4,2600	3,9800	3,7000	3,4300
A_n/A_g	0,6120	0,6120	0,6120	0,6246	0,6246	0,6246	0,6246	0,6246	0,6246
e_2/g	0,5490	0,6284	0,7172	0,3934	0,4495	0,5129	0,5842	0,6662	0,7580

Tabela 4.9 - Características geométricas para análise da variável e_2/g na resistência à ruptura de chapas com três filas de furação

VARIÁVEL RELAÇÃO e_2/g DE CHAPAS COM TRÊS LINHAS DE FURAÇÃO											
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 36	MODELO 37	MODELO 38	MODELO 9	MODELO 39	MODELO 40	MODELO 41	MODELO 42	MODELO 43	MODELO 44	
Largura	10,6800	11,1200	11,1200	11,5800	11,5800	11,5800	12,0400	12,0400	12,0400	12,0400	
Comprimento	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	
Espessura	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	
Filas de furação	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	
Parafusos/fila	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	
e_2	1,9000	1,9000	2,1200	1,9000	2,1300	2,3500	1,9000	2,1300	2,3600	2,5800	
s	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	
g	4,5500	3,6600	3,4400	3,8900	3,6600	3,4400	4,1200	3,8900	3,6600	3,4400	
A_n/A_g	0,5449	0,5629	0,5629	0,5803	0,5803	0,5803	0,5963	0,5963	0,5963	0,5963	
e_2/g	0,4176	0,5191	0,6163	0,4884	0,5820	0,6831	0,4612	0,5476	0,6448	0,7500	

VARIÁVEL RELAÇÃO e_2/g DE CHAPAS COM TRÊS LINHAS DE FURAÇÃO											
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 45	MODELO 46	MODELO 47	MODELO 48	MODELO 49	MODELO 50	MODELO 51	MODELO 52	MODELO 53	MODELO 54	MODELO 55
Largura	12,4800	12,4800	12,4800	12,4800	12,4800	12,9400	12,9400	12,9400	12,9400	12,9400	12,9400
Comprimento	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000
Espessura	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Filas de furação	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
Parafusos/fila	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	1,9000	2,1200	2,3500	2,5800	2,8000	1,9000	2,1300	2,3500	2,5800	2,8100	3,0300
s	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
g	4,3400	4,1200	3,8900	3,6600	3,4400	4,5700	4,3400	4,1200	3,8900	3,6600	3,4400
A_n/A_g	0,6106	0,6106	0,6106	0,6106	0,6106	0,6244	0,6244	0,6244	0,6244	0,6244	0,6244
e_2/g	0,4378	0,5146	0,6041	0,7049	0,8140	0,4158	0,4908	0,5704	0,6632	0,7678	0,8808

Tabela 4.10 – Características geométricas para análise da variável e_2 na resistência à ruptura de cantoneiras.

VARIÁVEL e_2 DE CANTONEIRAS				
GEOMETRIA DA CANTONEIRA	MODELO 127	MODELO 128	MODELO 133	MODELO 130
Largura da aba	4,0579	4,9923	6,0597	6,9936
Comprimento	40,4000	40,4000	40,4000	40,4000
Espessura	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Parafusos/fila	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	1,9000	2,6000	3,4000	4,1000
s	6,3500	6,3500	6,3500	6,3500
e_c	0,9600	0,9600	0,9600	0,9600
l_c	25,4000	25,4000	25,4000	25,4000
A_n/A_g	0,7873	0,8292	0,8606	0,8799

A **excentricidade** foi uma variável analisada apenas nas cantoneiras e foram construídos cinco modelos para esta análise com e_c igual a 0,48; 0,96; 1,44; 1,92; e 2,40 cm. As demais possíveis variáveis permaneceram inalteradas. As características geométricas desses modelos são mostradas na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Características geométricas para análise da variável e_c na resistência à ruptura de cantoneiras.

VARIÁVEL e_c DE CANTONEIRAS					
GEOMETRIA DA CANTONEIRA	MODELO 131	MODELO 133	MODELO 134	MODELO 135	MODELO 136
Largura da aba	5,4193	6,0597	6,7001	7,3404	7,9806
Comprimento	40,4000	40,4000	40,4000	40,4000	40,4000
Espessura	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Parafusos/fila	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	3,4000	3,4000	3,4000	3,4000	3,4000
s	6,3500	6,3500	6,3500	6,3500	6,3500
e_c	0,4800	0,9600	1,4400	1,9200	2,4000
l_c	25,4000	25,4000	25,4000	25,4000	25,4000
A_n/A_g	0,8433	0,8606	0,8744	0,8858	0,8952

4.2 Faixas de variações e simplificações

No intuito de otimizar os estudos, foram adotadas algumas simplificações na construção dos modelos numéricos desta dissertação e, para alcançar o objetivo de analisar o modo de falha apenas na área líquida das peças tracionadas, os modelos ficaram limitados por alguns fatores.

As simplificações adotadas são relacionadas à geometria das peças e dos parafusos, ao atrito, aos coeficientes de segurança, aos espaçamentos transversal e longitudinal entre furos, às distâncias transversal e longitudinal do furo à borda, à simetria e à excentricidade.

Os modelos são constituídos de uma única peça parafusada em suas extremidades e submetida ao esforço de tração. Para otimização da pesquisa, os modelos foram construídos de forma a considerar a simetria longitudinal. As peças foram consideradas como constituídas de material homogêneo.

Foram modeladas cantoneiras de abas iguais com apenas uma fila de furação, construídas com quinas, sem as curvaturas que são feitas em peças laminadas ou conformadas a frio. Os parafusos considerados nesta pesquisa, foram parafusos simples sem protensão, submetidos apenas ao corte e, como este estudo analisa tração, foi considerada a possibilidade de deslocamento da peça apenas no eixo longitudinal da mesma. Não houve deslocamento entre o parafuso e a peça nas direções da largura e espessura da mesma. Portanto, foi considerado apenas o contato entre as peças, sendo o atrito entre as mesmas, desconsiderado. Em cada modelo foi construído apenas a parte do parafuso que entrará em contato com a peça, sem a ranhuras da rosca.

Os furos foram construídos em conformidade com a NBR 8800 vigente que estabelece os mesmos alargamentos devido à folga e punção que a AISC-LRFD, de 0,15 cm e 0,2 cm, respectivamente. Apesar de Bartels, 2000, ter indicado em seus estudos que este valor devido à punção não corresponde aos verdadeiros danos à resistência da peça, atualmente é o valor adotado pelas normas. Assim, o diâmetro total dos furos é dado pela soma do diâmetro do parafuso, da folga e do alargamento da borda devido à punção:

$$\phi = d + 'folga' + 'punção' \quad (4.1)$$

Para parafusos com diâmetro de 1,27cm:

$$\phi = 1,27 + 0,15 + 0,2 = 1,62cm \quad (4.2)$$

Para a variável excentricidade de cantoneira foram construídos seis modelos de espessura 0,8 cm com a distância entre o centro de gravidade e a fila de furação, e_c , variando entre 0,48 cm e 2,68 cm, e quatro modelos de espessura 1,5 cm, com a distância entre o centro de gravidade e a fila de furação, e_c , variando entre 0,54 cm e 2,64 cm.

Nesta pesquisa, os coeficientes de segurança não são objetos de estudo, portanto serão desconsiderados nos cálculos da resistência das peças por qualquer das normas abordadas e nos resultados obtidos pelos testes.

Para alcançar o objetivo desta dissertação de estudar o modo de falha de ruptura na seção líquida da peça foi estabelecido um limite de largura máxima no qual as chapas terão resistência à ruptura na área líquida menor que a do escoamento na área bruta segundo os critérios de cálculo da NBR 8800 vigente e desconsiderando os coeficientes de segurança

Para cálculo de resistência da chapa ao escoamento na área bruta temos que:

$$Rn_g = A_g \cdot f_y \quad (4.3)$$

Para cálculo da resistência da chapa à ruptura na área líquida temos que:

$$Rn_n = A_n \cdot f_u \quad (4.4)$$

Para o aço ASTM A36, que foi o aço utilizado na construção dos modelos os valores de f_y e f_u são respectivamente 2500 kgf/cm² e 4000 kgf/cm².

Como as chapas construídas têm que atingir o valor de f_u inicialmente na área líquida temos que:

$$Rn_n \leq Rn_g \quad (4.5)$$

$$A_n \cdot f_u \leq A_g \cdot f_y \quad (4.6)$$

$$\frac{A_n}{A_g} \leq \frac{2500}{4000} \quad (4.7)$$

$$\frac{A_n}{A_g} \leq 0,625 \quad (4.8)$$

A largura mínima das chapas é obtida pela soma das distâncias mínimas previstas na NBR 8800 vigente, ou seja, a soma da distância transversal mínima entre a fila de furação e a borda da chapa, e_2 , e do espaçamento transversal entre furos mínimo, g , que, para o parafuso utilizado na pesquisa, são de 1,9 cm e 3,43 cm, respectivamente.

Nas cantoneiras não foram consideradas tais limitações devido ao fato de que, quando são desconsiderados o coeficiente de segurança e o coeficiente C_t para cálculo da resistência à ruptura da área líquida, tal resistência não é menor que a resistência ao escoamento da área bruta em nenhum caso, se os valores mínimos de norma para e_2 e g são obedecidos.

O espaçamento transversal entre furos, g , e a distância dos furos extremos às bordas das chapas, e_2 , foram parametrizados em função do diâmetro do parafuso, como indicado na NBR 8800 vigente, e das larguras máxima e mínima obtidas, conforme indicado nos parágrafos anteriores.

Com a largura máxima calculada, foram adotados valores para g entre $2,7d$ e $3,8d$, com intervalos de $0,18d$ para chapas com duas filas de furação, e entre $2,7d$ e $3,6d$, com o mesmo intervalo para chapas com três filas de furação. O valor de e_2 varia com o valor de g , respeitado o valor mínimo estabelecido pela NBR 8800/86. Para parafusos de diâmetro igual a 1,27 cm, e_2 é igual a 1,90 cm.

O intervalo de $0,18d$ foi estabelecido com o objetivo de se obter seis valores distintos da razão e_2/g para a largura máxima da chapa. A partir destas definições, foram adotadas as larguras das demais chapas, eliminando, consecutivamente, um dos valores de g e um dos valores de e_2 . Esta metodologia permitiu estudar o parâmetro e_2/g para várias situações distintas. Os valores de g e de e_2 utilizados já foram mostrados na Tabela 4.8 e na Tabela 4.9.

No gabarito de furação das cantoneiras, a dimensão e_2 varia entre 40% e 45% da largura da aba, o mesmo ocorrendo com as dimensões adotadas nos modelos simulados.

5 MODELOS NUMÉRICOS

São apresentadas neste capítulo, as etapas do desenvolvimento da simulação numérica, descrevendo-se a preparação dos modelos numéricos utilizados. São feitas algumas observações quanto à simulação e indicadas as hipóteses e simplificações adotadas.

Os modelos foram construídos com base no Método de Elementos Finitos, por meio do software comercial ANSYS, versão 5.5. O principal objetivo de modelar as ligações utilizando-se este método é estudar a complexa interação entre elementos e meios de ligação. Com este método, o comportamento de ligações, que inclui o desempenho do parafuso, forças, regiões de contato e efeitos da não linearidade do material, pode ser modelado.

Na construção de todos os modelos foram feitas as mesmas considerações no que diz respeito às características da simulação e simplificações adotadas. As diferenças estão apenas nas suas características geométricas.

5.1 Critérios utilizados na simulação numérica

Algumas características de modelagem que influenciam na resposta da ligação são: colocação do carregamento real, o tipo de material considerado, o contato e atrito entre as peças, entre outros. Através de estudos paramétricos, as

pesquisas na área de comportamento de ligações têm buscado um conhecimento mais preciso da contribuição de cada um destes elementos no comportamento final da ligação.

No intuito de observar o comportamento estrutural das ligações em estudo e de obter-se resultados com um bom nível de precisão, optou-se pela utilização de modelos tridimensionais que podem fornecer informações sobre tal comportamento mais próximas do real.

Os modelos construídos constam de chapas e cantoneiras conectadas por parafusos simples e submetidas ao esforço de tração pura no eixo longitudinal, sem deslocamento relativo entre a peça e o parafuso.

A não-linearidade física da estrutura foi considerada na construção do modelo. A não-linearidade do material foi representada pelo gráfico tensão x deformação do material.

5.2 Montagem do modelo

As etapas de construção dos modelos foram:

- Definição do tipo de análise
- Definição das características dos materiais envolvidos
- Definição dos tipos de elementos finitos a serem utilizados
- Construção da geometria do modelo e atribuição dos elementos e materiais ao mesmo
- Preparação da malha de elementos finitos na geometria do modelo;

- Aplicação do carregamento externo e condições de contorno
- Definições de análise e processamento
- Processamento dos modelos

Apesar de distintas, todas as fases acima citadas se inter-relacionam. Por exemplo, uma boa construção da geometria pode facilitar a preparação da malha de elementos finitos.

5.2.1 Considerações gerais sobre os modelos

Foram construídos modelos com dois tipos de seção transversal: chapa e cantoneira, porém as simplificações consideradas foram as mesmas para as duas seções. Os parafusos considerados são os comuns fabricados de aço ASTM 325 e diâmetro 1,27 cm.

Foram adotadas simplificações geométricas para os parafusos e para as cantoneiras. Os parafusos foram construídos com uma forma cilíndrica lisa que representou seu fuste. Para peças submetidas à tração pura e conectadas por parafusos comuns não há nenhum tipo de esforço na cabeça do parafuso. Assim, a cabeça do parafuso e as ranhuras do corpo do parafuso não foram construídas por não influenciarem no resultado final e também para obter-se maior otimização da construção e processamento dos modelos.

As cantoneiras foram construídas com quinas, sem se considerar as curvas devidas a dobra ou laminação. Não foram consideradas as tensões residuais devidas à fabricação do aço, dobra, laminação, armazenagem ou cortes.

Para simplificação do processamento, os modelos foram construídos com os parafusos localizados na borda dos respectivos furos, onde existe o contato com a peça, não havendo então nenhum tipo de deslocamento no processo.

A distância transversal do furo de extremidade à borda da peça, e_2 , teve variações, porém seguiu a recomendação da NBR 8800 vigente que estabelece um valor mínimo para o diâmetro do parafuso utilizado nos modelos de 1,90 cm.

A distância longitudinal do furo de extremidade à borda da peça, e_1 , foi constante com o valor de 3,0cm que está acima do valor mínimo recomendado pela NBR 8800 vigente. Esta escolha deve-se ao tipo de ruptura estudada neste trabalho que é a ruptura transversal da seção líquida da peça. Caso fossem adotados valores mínimos para e_1 , a possibilidade das peças romperem por rasgamento de borda ou cisalhamento de bloco seria maior.

O espaçamento longitudinal entre furos, s , foi uma variável estudada tanto em chapas como em cantoneiras, sendo adotados valores de s entre $2,7d$ e $5,5d$.

O espaçamento transversal entre furos, g , foi uma variável estudada nos modelos de chapa. Este parâmetro variou de $2,7d$ a $3,6d$, obedecendo ao valor mínimo estabelecido pela NBR 8800 vigente.

A excentricidade, e_c , foi uma variável estudada em cantoneiras. A variação foi entre 0,48 cm a 2,40 cm, respeitando o valor mínimo de $e_2 = 1,90$ cm, e o espaçamento mínimo para se conseguir trabalhar com o parafuso na cantoneira.

5.2.2 Características dos materiais

Foram utilizados, na análise numérica, dois tipos de materiais, de forma a representar os componentes da ligação. O aço ASTM A36 para chapas e cantoneiras e o aço ASTM A325 para parafusos. Tais materiais são considerados isotrópicos, homogêneos, com propriedades idênticas na tração e na compressão e com fase elástica e plástica de deformação. Para representação do comportamento do material foi utilizado um gráfico tensão x

deformação onde são apresentadas as fases de deformação acima citadas. O gráfico foi modelado na opção MISO do ANSYS 5.5 que usa o critério de escoamento de Von Mises associado com uma hipótese de escoamento isotrópico. Esta opção de modelagem de gráfico é usada para carregamentos não cíclicos e para representação da curva tensão x deformação com até cem pontos. A curva para esta opção inicia-se na origem do gráfico, tem valores de tensão e deformação positivos e o primeiro segmento da curva corresponde à fase elástica do material. Os pontos do gráfico foram retirados de figuras obtidas em literaturas sobre o assunto.

A opção MISO é uma opção em que o gráfico é modelado em segmentos de retas. O patamar de escoamento do aço ASTM A36 foi representado com uma inclinação mínima, para que, no ensaio, o modelo passasse por esta fase e considerasse o encruamento sem interrupção provocada por inclinação nula da tangente ao gráfico.

O aço ASTM A36 atinge seu limite de ruptura com tensão igual a 4000 kgf/cm² e o ASTM A325 em 6000 kgf/cm² como demonstrado nos gráficos da Figura 5.1(a) e (b) respectivamente.

Nos modelos não foi considerada variação de temperatura por esta não ser uma variável em estudo. Para ilustrar o comportamento do material, a Figura 5.1 demonstra os gráficos $\sigma \times \varepsilon$ adotados para construção dos modelos.

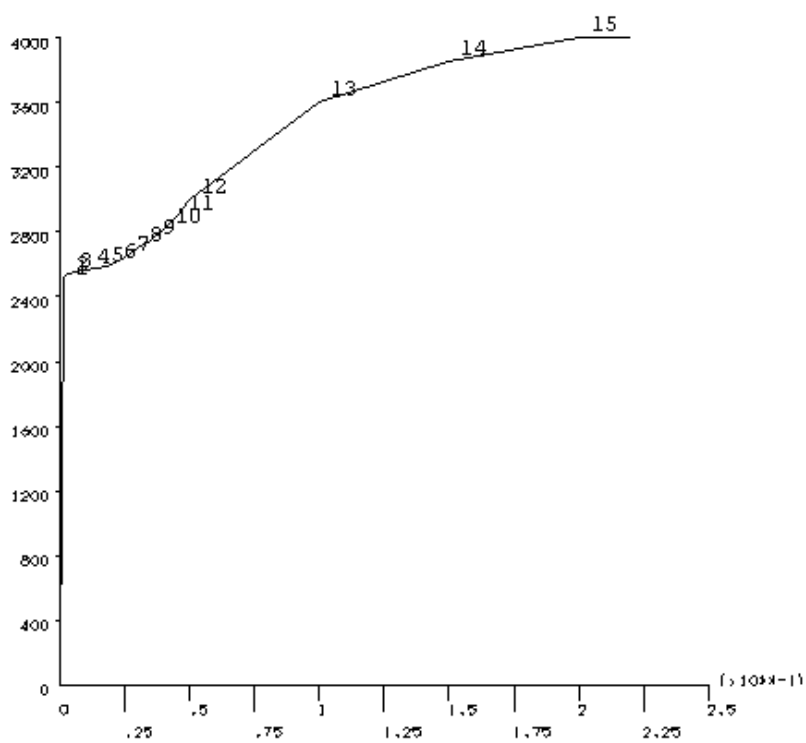


Figura 5.1(a) -Gráfico $\sigma \times \varepsilon$ do aço ASTM A36 (kgf/cm² x cm).

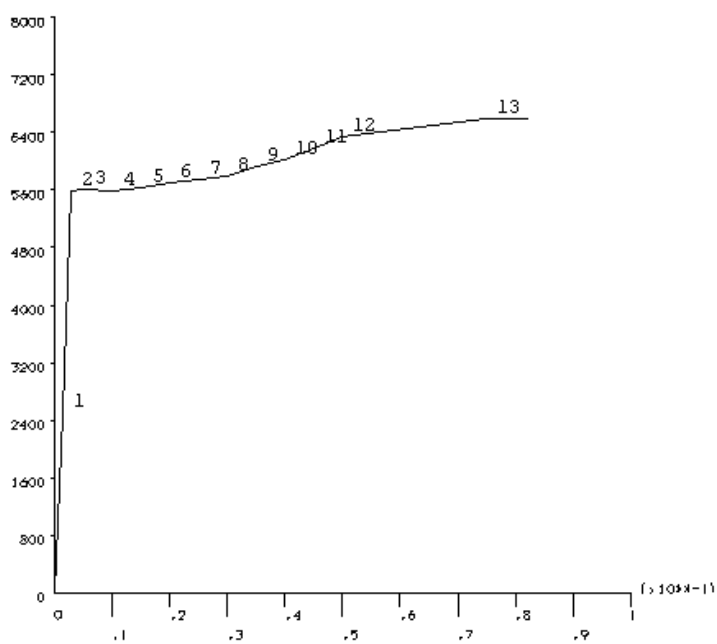


Figura 5.1 (b) -Gráfico $\sigma \times \varepsilon$ do aço ASTM A325 (kgf/cm² x cm).

Figura 5.1 – Gráfico $\sigma \times \varepsilon$ do aço ASTM A36 e ASTM A325

Fonte: ANSYS 5.5

5.2.3 Elementos finitos utilizados

A escolha dos tipos de elementos finitos utilizados na preparação dos modelos depende, principalmente, das características da geometria e das considerações a serem feitas na representação da ligação.

Uma boa escolha melhora a confiabilidade dos resultados e otimização do modelo. Desta maneira, foram escolhidos três tipos de elementos. Um tipo, volumétrico, para a representação das peças tracionadas e dos parafusos e os outros dois para representar o contato entre a peça e os parafusos.

O elemento volumétrico escolhido foi o SOLID45. Este elemento é usado para modelagem tri-dimensional de estruturas sólidas, possui oito nós, com graus de liberdade de translação em três direções x, y e z ortogonais entre si. Possui também características de plasticidade, admitindo a utilização do diagrama multi-linear para representação do material utilizado, o que condiz com os objetivos desta análise.

Apesar de existirem elementos finitos mais refinados, com a existência de nós intermediários e maior número de graus de liberdade, optou-se pelo SOLID45 uma vez que, com as simplificações adotadas, é possível se obter bons resultados. Os modelos estudados não apresentam curvaturas, não exigindo nós intermediários e a tração é um esforço que solicita apenas graus de liberdade de translação. A Figura 5.2 ilustra a geometria, locação dos nós e sistema de coordenadas do elemento SOLID45.

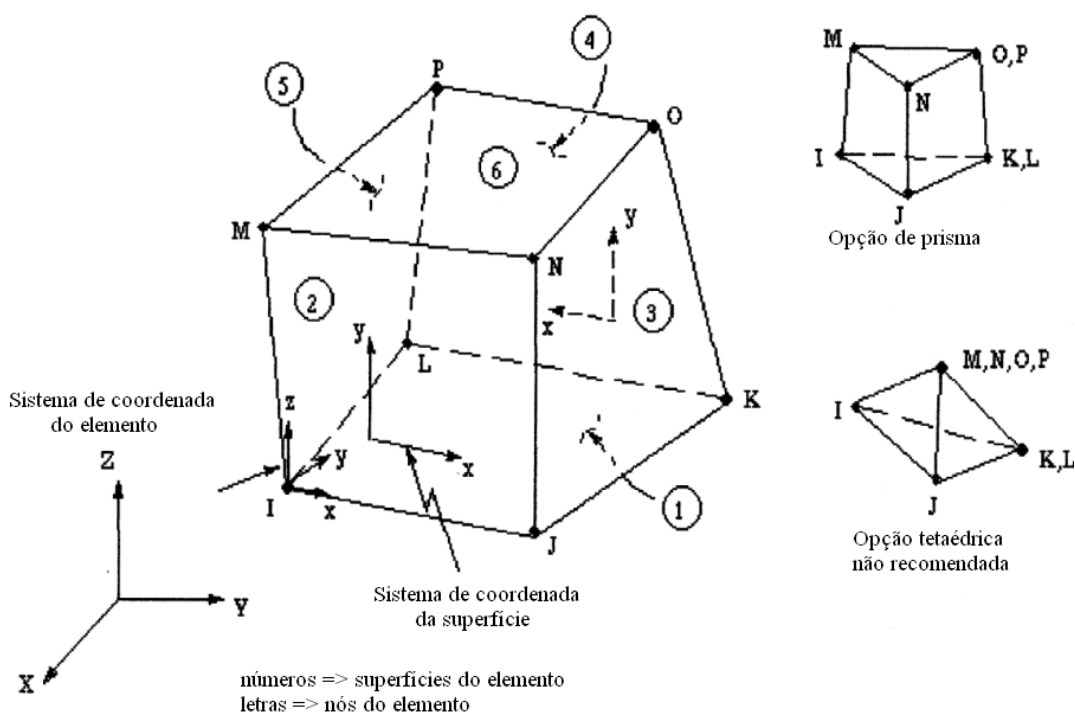


Figura 5.2 – Elemento Volumétrico

Fonte: ANSYS 5.5

Os elementos finitos de contato estabelecem novos termos na matriz de rigidez fornecendo informações ao processo da análise numérica quanto aos pontos ou regiões distintas que deverão gerar pressões quando comprimidas umas contra as outras. Assim, o elemento de contato possui a característica de apresentar rigidez na compressão e nenhuma rigidez na tração.

Neste trabalho, foram usados os modelos que formam o par de contato CONTA173 e TARGET170. CONTA173 é usado para representar contato e deslizamento entre uma superfície alvo (TARGET170) e uma superfície deformável, definida por este elemento. O elemento CONTA173 possui três graus de liberdade em cada nó: translação nos eixos x, y e z. Este elemento pode ser conectado a superfícies de sólidos tri-dimensionais sem nós intermediários, assumindo as mesmas características geométricas deste sólido. O contato ocorre quando o elemento de superfície "penetra" em um dos

elementos da superfície alvo especificada. A Figura 5.3 ilustra os elementos de contato.

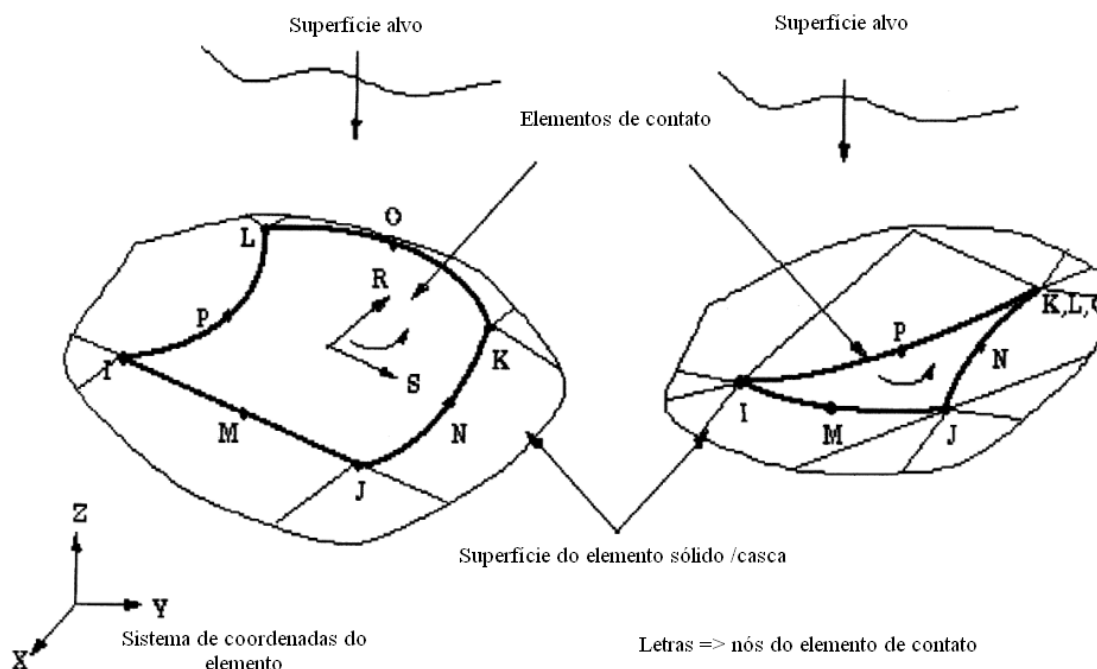


Figura 5.3 – Elemento de contato

Fonte: ANSYS 5.5

O elemento CONTA173 é um elemento de contato de superfície para superfície, indicado para elementos volumétricos como o SOLID45. Este elemento é definido por quatro nós ordenados na mesma ordem do elemento sólido ao qual está conectado. O CONTA173 e o TARGET170 possuem as mesmas constantes reais e suas normais têm sentidos contrários.

O par de contato definido nos modelos foi o de duas superfícies flexíveis, para permitir que tanto a superfície de contato da peça como a superfície de contato do parafuso possam ser deformadas durante o processamento dos modelos.

O elemento CONTA173 pode ter mais de uma superfície alvo para contato, porém para os tipos de modelos construídos neste trabalho é necessária apenas uma superfície alvo em cada elemento de contato.

As constantes reais são valores que regulam e definem as seguintes características do contato propriamente dito:

- Forma da superfície alvo quando esta não é definida pela forma geométrica;
- Rigidez de contato e facilidade de convergência devido ao contato;
- Tolerância de penetração entre as superfícies de contato;
- Contato inicial entre os elementos;
- O sentido do movimento de contato, do CONTA 173 para TARGE170 ou o contrário;
- Atrito entre superfícies de contato.

As constantes reais formam um grupo de valores que trabalham em conjunto, sendo necessário que sejam testados algumas vezes para cada tipo de modelo, pois em um mesmo tipo de ensaio os modelos podem apresentar respostas diferentes para um mesmo grupo de constantes. Por exemplo, o valor da constante real FTOLN, que é um fator baseado na espessura do elemento, o qual é usado, para calcular a penetração permitida entre os nós das superfícies em contato de cantoneiras foi diferente que o definido para chapas, pois os modelos de cantoneira apresentavam penetração muito rígida, finalizando o ensaio antes de atingir a tensão última do material quando processados com o mesmo valor de tolerância à penetração das chapas.

5.2.4 Construção do volume e definição da malha

Os modelos processados nesta pesquisa foram construídos em duas etapas:

- 1- construção dos volumes e atribuição de propriedades;

2- colocação automática da malha, criação automática do par de contato e aplicação do carregamento e condições de contorno.

As formas geométricas foram construídas através de volumes prontos e oferecidos pelo programa utilizado para processamento, blocos e anéis cilíndricos, que manipulados através de operações básicas geraram a forma desejada para os modelos. Os volumes foram divididos em várias partes que depois foram coladas para introduzir a malha que se diferenciava nas regiões próximas ao furo. Depois de concluída a geometria foram aplicados ao volume as atribuições de materiais e elementos a serem utilizados no modelo. A Figura 5.4 (a), (b), (c) e (d), mostram as formas volumétricas construídas para chapa com uma, duas e três filas de furação e para cantoneira.

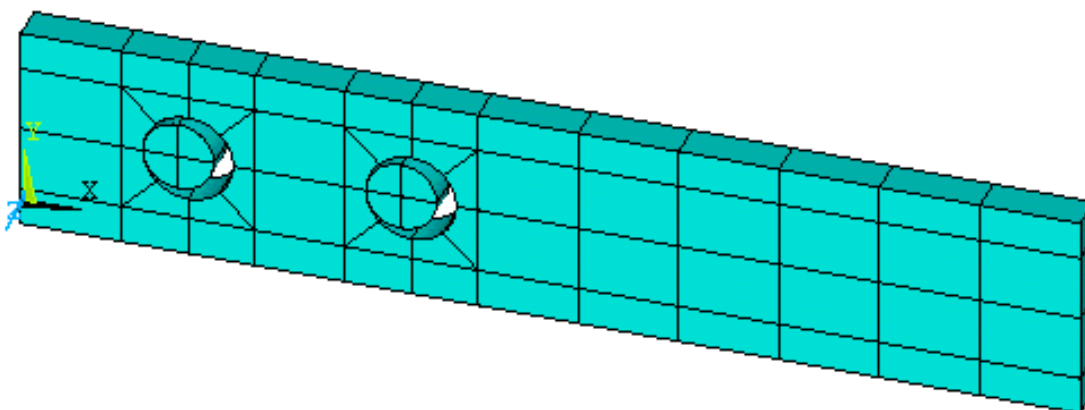


Figura 5.4 (a) – forma volumétrica de chapa com uma fila de furação

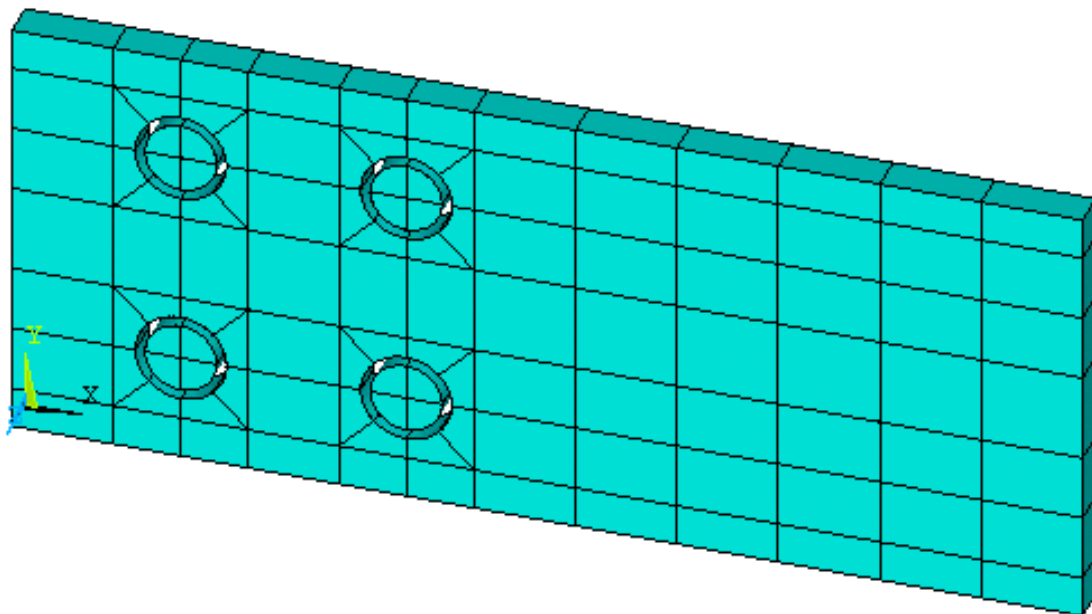


Figura 5.4 (b) – forma volumétrica de chapa com duas filas de furação

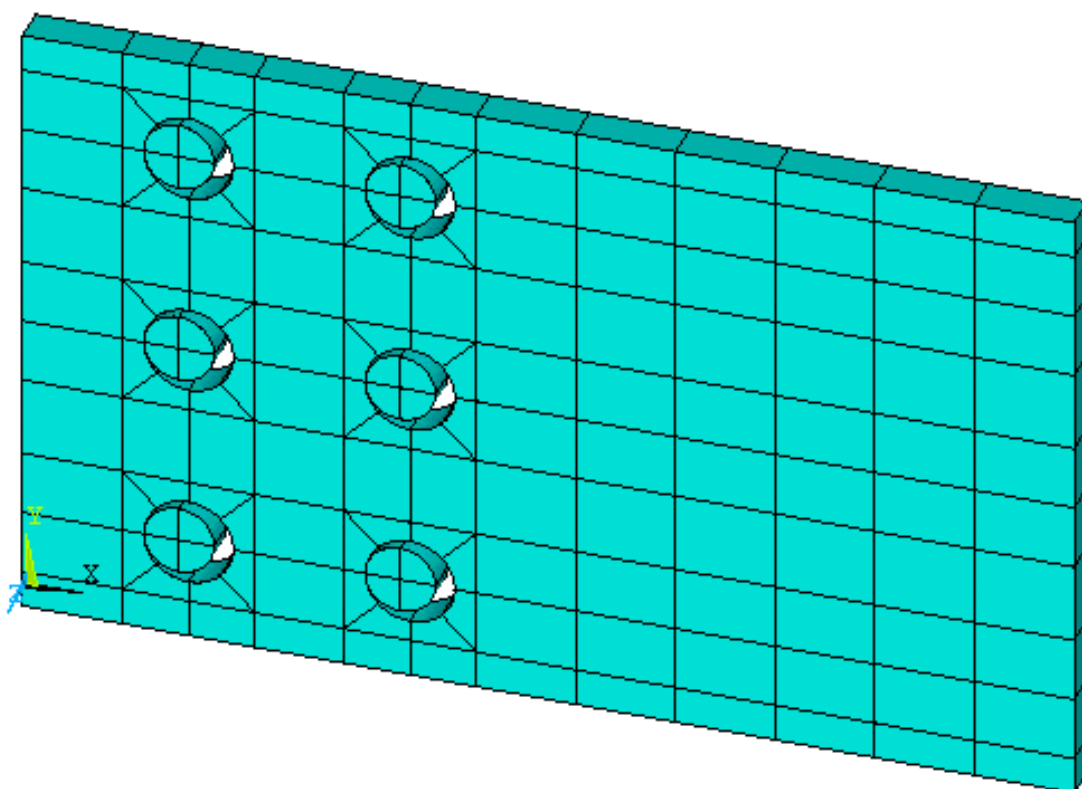


Figura 5.4 (c) forma volumétrica de chapa com três filas de furação

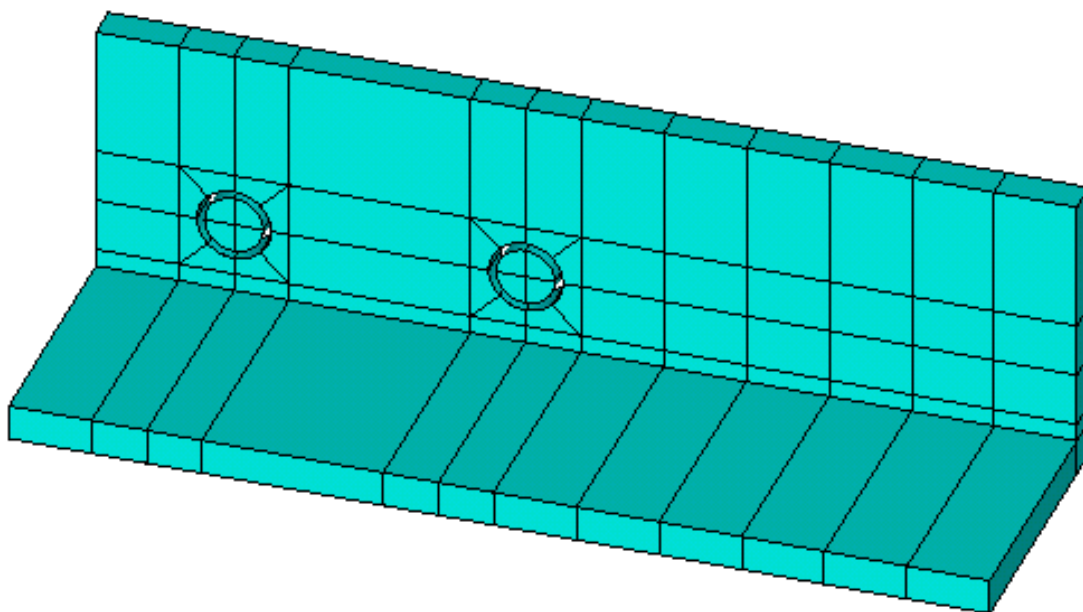


Figura 5.4 (d) – forma volumétrica de cantoneira

Figura 5.4 (a) (b) (c) (d) – Forma volumétrica dos modelos construídos

Fonte: ANSYS 5.5

A segunda etapa constou da colocação da malha no modelo através do processo automático ANSYS. Em uma primeira tentativa foi colocada no modelo a malha tetraédrica livre. Esta malha apresentou elementos com ângulos entre as faces menores que o permitido pelo programa e, quando tais elementos foram alterados e o modelo processado, a malha não respondeu com uma distribuição de tensões razoável em relação à teoria sobre o assunto. Em vista destas respostas, optou-se, então, pela malha hexaédrica mapeada. Tal malha, no entanto, não é aceita pelo processo automático de colocação da malha nas regiões próximas aos furos. Então, dividiu-se todo o volume destacando-se estas regiões. Como a ruptura da seção líquida se inicia por elas, foi feito, nestas regiões, um refinamento da malha e todos os volumes restantes tiveram sua malha definida a partir deste refinamento. Os resultados foram:

- Para cada quarta parte do parafuso, foram atribuídos quatro elementos ao longo dos eixos normais à espessura e dois elementos ao longo do eixo paralelo à espessura, conforme Figura 5.5;
- Para cada oitava parte da região de refinamento próxima ao furo, foram atribuídos três elementos ao longo dos eixos transversais à espessura e dois elementos ao longo do eixo paralelo à espessura, conforme Figura 5.5.

Estes números são frutos de um processo de teste de malha. Ao longo do eixo paralelo à espessura foram definidos dois elementos porque foi necessária a colocação de nós no plano central da espessura para aplicação das condições de contorno.

Para definição da malha nas regiões do volume que não estão próximas ao furo foram feitos testes e concluiu-se que a malha ótima para tais regiões é a que tem tamanhos regulares e com medidas próximas às das definidas na região próxima ao furo, ou seja, uma malha mais uniforme possível para todo o modelo. A Figura 5.5 mostra a malha definida para o parafuso e região próxima ao furo, e a Figura 5.6 mostra a malha definida para as demais regiões.

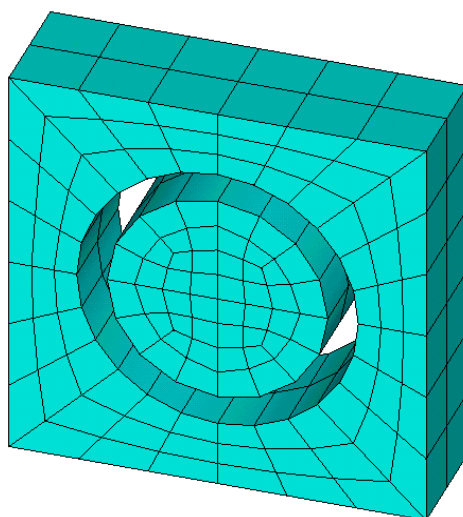


Figura 5.5 - Malha definida para o parafuso e região próxima ao furo

Fonte: ANSYS 5.5

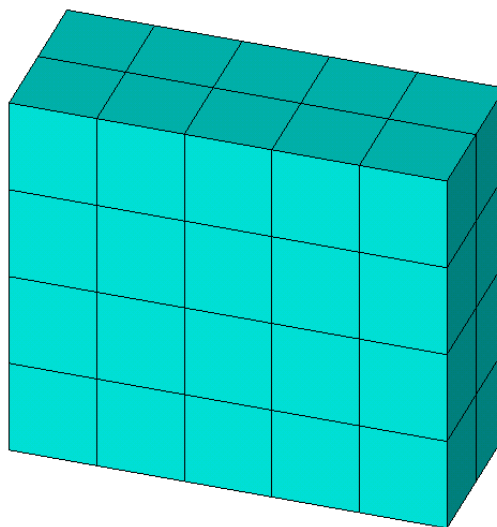


Figura 5.6 - Malha definida para as regiões do modelo, exceto parafuso e região próxima ao furo

Fonte: ANSYS 5.5

5.2.5 Carregamento e condições de contorno

As peças tracionadas simuladas são consideradas simétricas. Em consequência, cada modelo representa uma das partes da peça simulada.

As cargas aplicadas foram calculadas com base na carga de ruptura da seção líquida de menor área sem considerar coeficiente de segurança e coeficiente de eficiência. Tais cargas foram distribuídas uniformemente nos nós localizados no plano de simetria das peças, na sua direção longitudinal.

Todos os vínculos dos modelos foram inseridos nos seus planos médios, no intuito de restringir a translação sem impedir a deformação da peça. A restrição à translação na direção longitudinal dos modelos foi considerada nos nós do plano médio dos parafusos, normal a esta mesma direção.

Para chapas, a restrição à translação na direção de sua largura foi considerada nos nós do seu plano médio, normais a esta direção, o mesmo ocorrendo em relação à restrição à translação na direção da sua espessura.

Para as cantoneiras, as restrições às translações nas direções transversais foram consideradas nos nós dos planos médios das chapas componentes, normais às direções das suas espessuras.

A Figura 5.7 mostra a aplicação de restrições no modelo de chapa, e a Figura 5.8 no modelo de cantoneira.

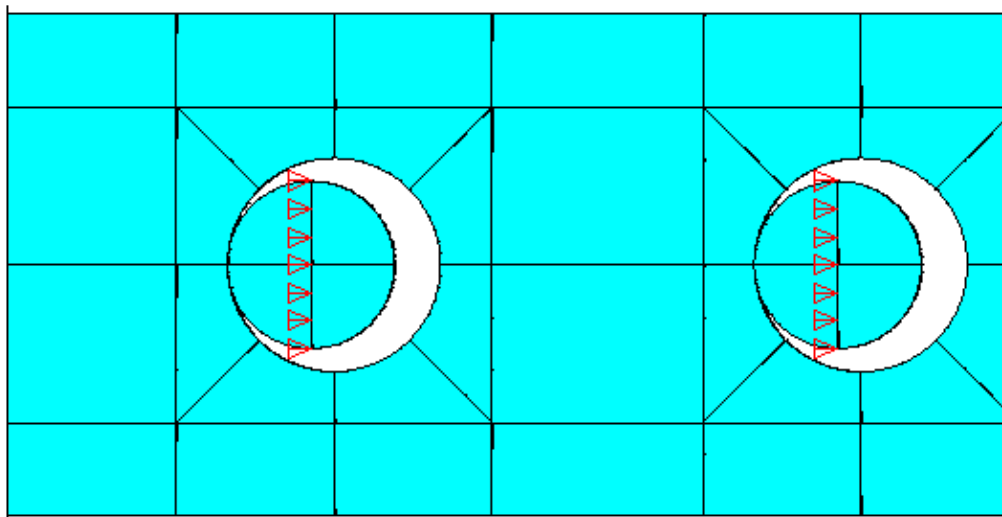


Figura 5.7 (a) - aplicação de restrições, na direção longitudinal

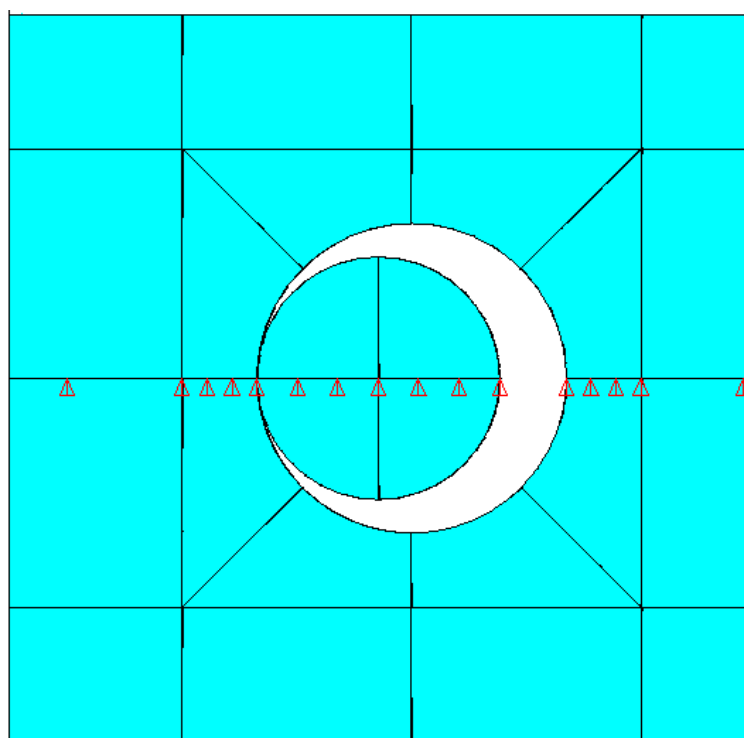


Figura 5.7 (b) - aplicação de restrições, na direção da largura, para um modelo de chapa

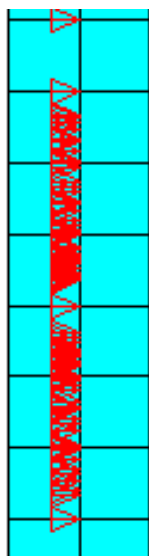


Figura 5.7 (c) - aplicação de restrições, na direção da espessura, para um modelo de chapa

Figura 5.7 - Aplicação de restrições no modelo de chapa

Fonte: ANSYS 5.5

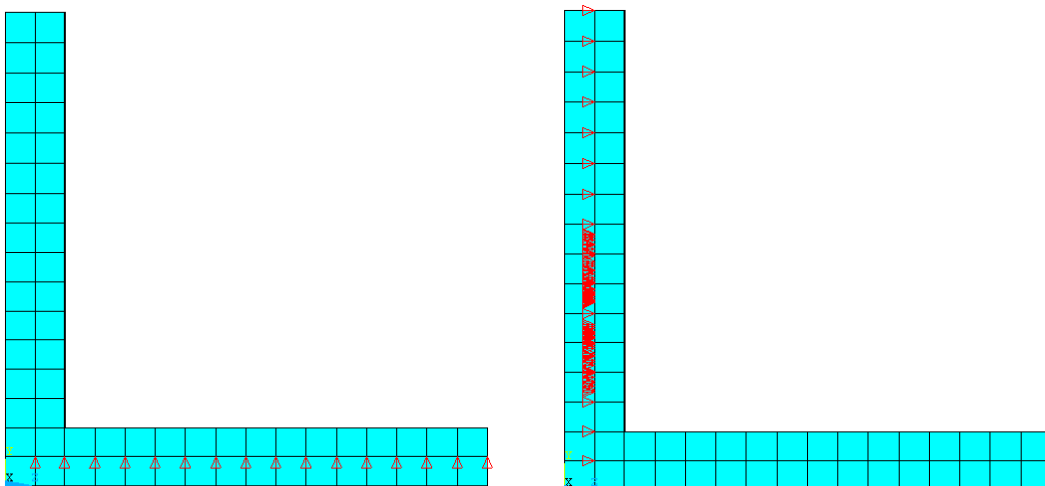


Figura 5.8 - Aplicação de restrições nas direções transversais para o modelo de cantoneira.

Fonte: ANSYS 5.5

O esforço de tração não provoca deformações rotacionais, logo as restrições para rotações não foram impostas aos modelos desta pesquisa.

5.2.6 Processamento dos modelos

Os modelos foram processados considerando as não linearidades físicas e geométricas dos mesmos. Para isso, a carga foi dividida em uma série de incrementos. Assim, ao completar a solução de cada um desses incrementos, o programa ajusta a matriz de rigidez para refletir a mudança não linear na rigidez do modelo antes de processar o próximo incremento. Porém, a aproximação por este método acumula erros a cada incremento imposto, causando um resultado final fora do equilíbrio. Para resolver este problema, o programa utiliza as interações de equilíbrio de Newton-Raphson, que direcionam a solução para a convergência de equilíbrio, ao fim de cada incremento de carga. Para os modelos deste trabalho, estabeleceu-se um número máximo de interações de equilíbrio de 25, ou seja, se o critério de convergência não for satisfeito com este número de interações a análise é finalizada.

Em cada incremento de carga ocorrem erros, levando a resultados fora da condição de equilíbrio, ou seja, diferença entre as cargas externas e as calculadas com base na resposta da estrutura. A tolerância limite para diferença entre os erros adotada pelo Método Newton- Raphson é dada pela equação expressa abaixo:

$$[(R_{externa}) - (F_{internas})] \leq 0,005 \times \text{carga aplicada} \quad (5.1)$$

Sendo $R_{externa}$ a carga total atuando na estrutura e adicionada em incrementos passo a passo, $F_{internas}$ a força equivalente às tensões internas atuando nos pontos nodais, e 0,005 a tolerância de erro usada neste trabalho.

5.2.7 Testes de malha

Foram realizados dois tipos de testes para definição da malha ótima para construção e processamento dos modelos. O primeiro teste analisou o tamanho ideal das áreas de refinamento da malha, em função da descontinuidade física do furo e o percentual aceitável de erro. O segundo teste avaliou a quantidade de elementos na malha dentro e fora da região de refinamento.

Para o primeiro teste, foram construídas três chapas com apenas um furo, que se diferenciam pelas dimensões da área de refinamento da malha próxima ao furo. Estas dimensões foram: 2,20cmx2,20cm, 2,40cmx2,40cm e 2,80cmx2,80cm, como mostram as Figura 5.9 (a),(b) e (c).

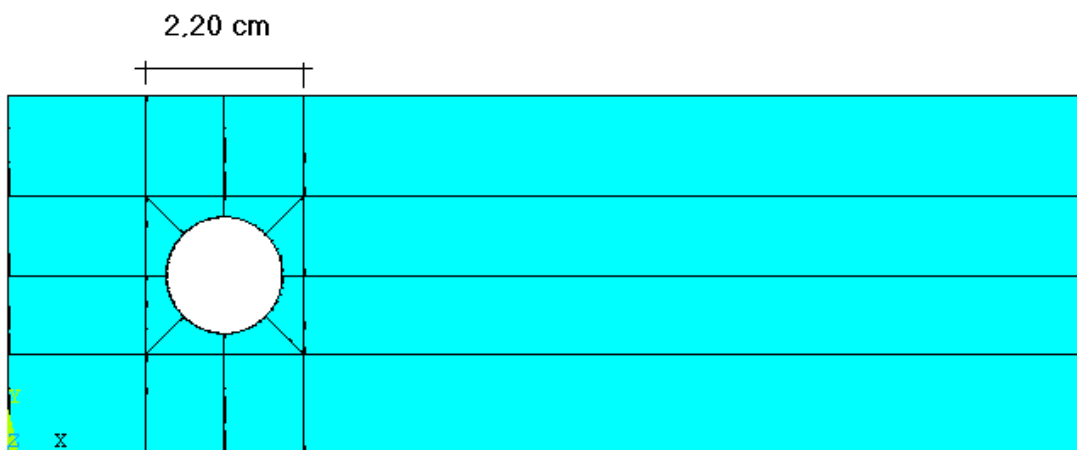


Figura 5.9 (a) - Teste das dimensões da área de refinamento: igual a 2,20cmx2,20 cm

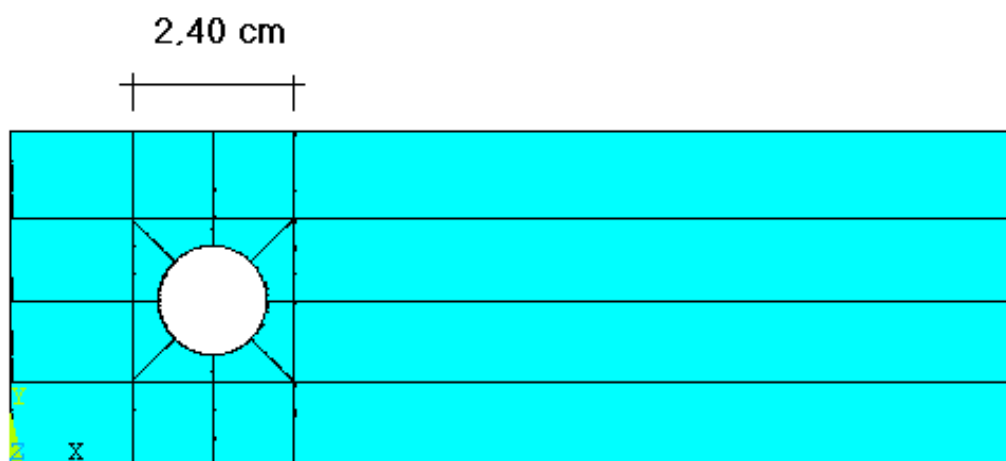


Figura 5.9 (b) - Teste das dimensões da área de refinamento, igual a 2,40cmx2,40 cm

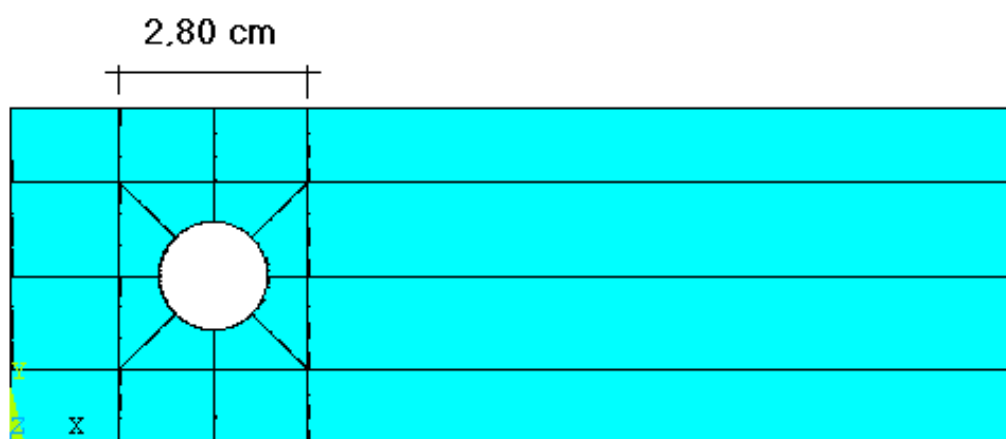


Figura 5.9 (c) - Teste das dimensões da área de refinamento, igual a 2,80cmx2,80cm

Figura 5.9 – Teste das regiões da área de refinamento.

Fonte: ANSYS 5.5

Os três modelos exibidos nas figuras acima foram processados com 10, 20, 50, 100, 200 e 500 passos na aplicação da carga e tiveram suas resistências avaliadas segundo a teoria de Von Mises (Critério da Máxima Energia de Distorção), que é a teoria mais indicada para análise de estruturas de aço.

As dimensões das chapas ensaiadas são: comprimento de 12cm, largura de 5cm, espessura de 0,714cm e o diâmetro do furo de 1,62cm.

A carga aplicada correspondente ao valor nominal do esforço de ruptura da seção líquida, no caso igual a 9.653,28 Kgf, considerando que o limite de resistência à tração do aço é 4.000 kgf/cm².

A Tabela 5.1 mostra os resultados obtidos nos três modelos descritos, para os diferentes passos na aplicação da carga, com base nos percentuais da carga correspondentes ao escoamento e à ruptura da seção líquida.

Tabela 5.1 – Teste de malha.

TESTE DA DIMENSÃO DA REGIÃO DE REFINAMENTO			
PERCENTUAL DE CARGA APLICADA ATÉ O ESCOAMENTO DA SEÇÃO LÍQUIDA			
Nº DE INCREMENTOS DE CARGA	MODELO 2,20cm	MODELO 2,40cm	MODELO 2,80cm
10	0,4900	0,2850	0,2900
50	0,4700	0,2850	0,2900
100	0,2820	0,2850	0,2900
200	0,2830	0,2850	0,2900
500	0,2830	0,2850	0,2900
PERCENTUAL DE CARGA APLICADA ATÉ A RUPTURA DA SEÇÃO LÍQUIDA			
Nº DE INCREMENTOS DE CARGA	MODELO 2,20cm	MODELO 2,40cm	MODELO 2,80cm
10	0,8000	0,8000	0,8000
50	0,8400	0,8400	0,8400
100	0,8500	0,8500	0,8500
200	0,8550	0,8550	0,8550
500	0,8560	0,8580	0,8580

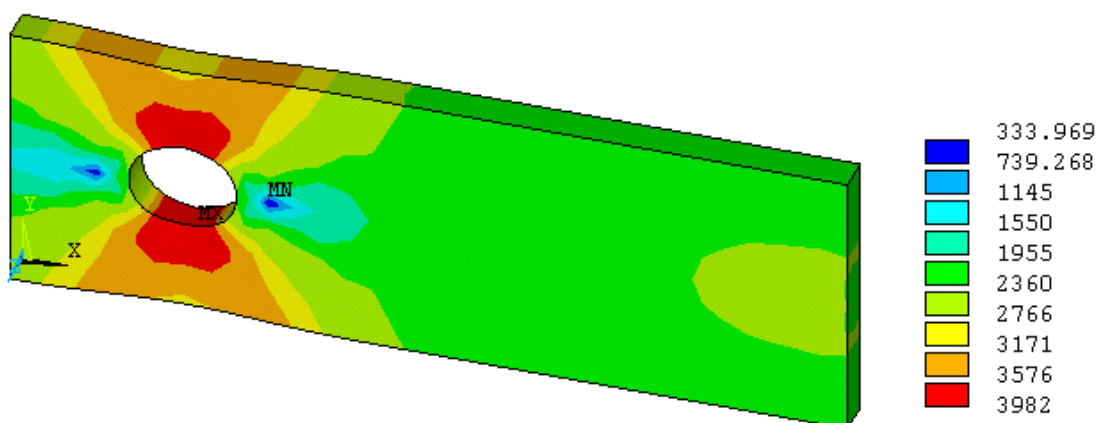


Figura 5.10 – Teste de validação da malha fora da região de refinamento.

De acordo com esta tabela, os resultados praticamente convergem a partir de 200 incrementos de carga, para os três modelos. O erro apresentado, quando comparados com os resultados obtidos com 500 incrementos, é nulo, se a base de comparação é o escoamento da seção líquida, ou, no máximo, de 0,35%, se a base de comparação é a ruptura da seção líquida.

Dentre os modelos, o que possui largura de 2,40cm na área de refinamento próxima ao furo apresenta, quando comparado ao que possui largura 2,80cm, erro nulo, se a base de comparação é a ruptura da seção líquida, ou de 1,72%, se a base de comparação é o escoamento da seção líquida.

Assim, a malha escolhida tem largura de 2,40cm na área de refinamento próxima ao furo e a análise foi processada com 200 passos na aplicação da carga.

A escolha do número de elementos na região de refinamento foi baseada em alguns testes de eficiência. Inicialmente, verificou-se que maior eficiência apresentavam os modelos em que o número de elementos na direção da largura era o mesmo que na direção do comprimento da chapa.

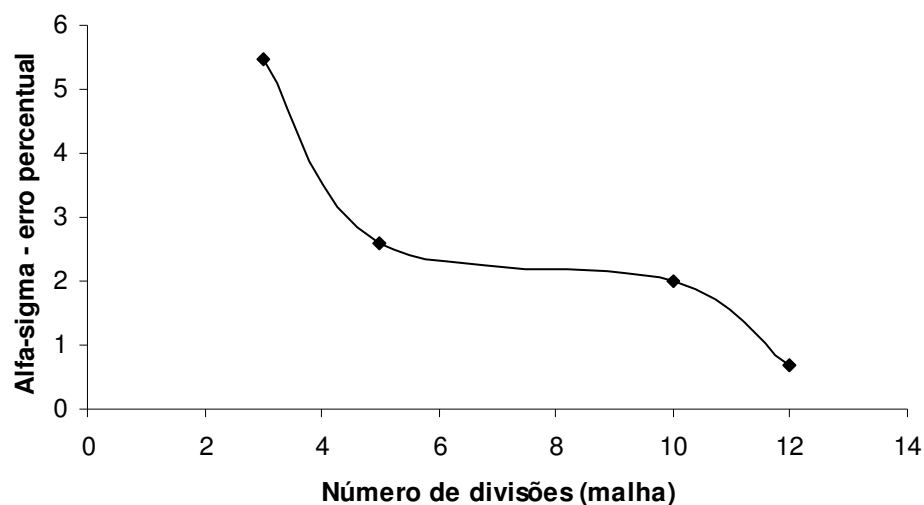
Em seguida, este número foi acrescido, de 3 a 12, e foram avaliadas as evoluções dos correspondentes coeficientes de eficiência C_f e coeficientes

teóricos de concentração de tensões α_σ . De acordo com a equação (1.2), $\alpha_\sigma = 2,355$, para a chapa ensaiada. Os valores de C_t e dos erros percentuais de α_σ , em relação ao suposto valor teórico, obtidos para cada modelo, estão indicados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - teste de malha na região de refinamento.

TESTE DE MALHA NA REGIÃO DE REFINAMENTO				
DESCRIÇÃO DOS DADOS	MODELO 240-1	MODELO 240-2	MODELO 240-3	MODELO 240-4
Nº de elementos na direção da largura do modelo	3,0000	5,0000	10,0000	12,0000
Nº de elementos na direção do comprimento do modelo	3,0000	5,0000	10,0000	12,0000
RESULTADO				
Ct	0,85855	0,83962	0,8291	0,8276
ERRO PERCENTUAL DE α_σ				
ERRO α_σ	5,478	2,59	1,9960	0,6790

A Figura 5.11 indica as variações dos coeficientes obtidos com o número de elementos na região de refinamento nas direções da largura e do comprimento do modelo.



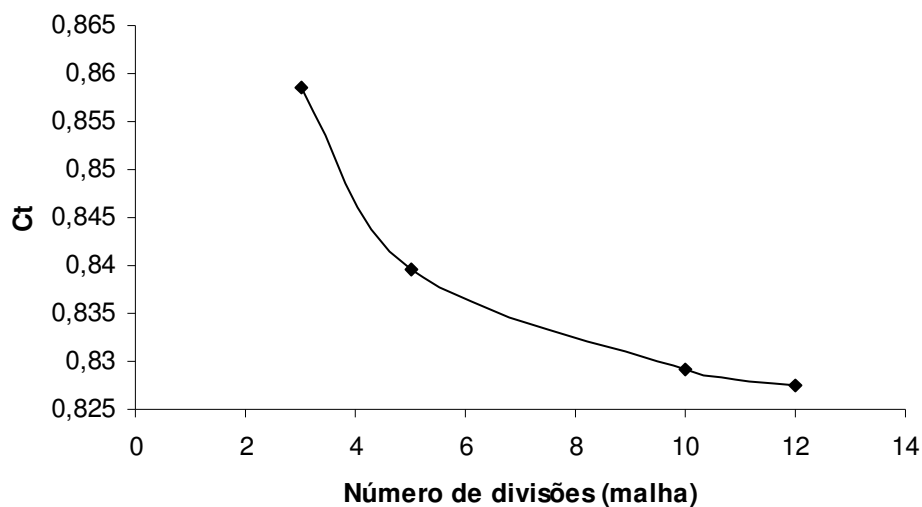


Figura 5.11 – Variação dos coeficientes α_σ e C_t com o aumento do número de elementos na malha.

Percebe-se que a curva que representa a variação do coeficiente de eficiência C_t com o número de elementos é assintótica e que a diferença percentual entre os valores atribuídos à malha de 3x3 (modelo 2401-1) e à malha de 12x12 (modelo 240-4) é de 3,74%. Além disso, o erro que a malha mais pobre dentre as consideradas no estudo, a de 3x3, oferece é de 5,478% e o da mais refinada, a de 12x12, é de 0,679%.

A Figura 5.12, a Figura 5.13, a Figura 5.14 e Figura 5.15 ilustram a diferença entre as malhas testadas.

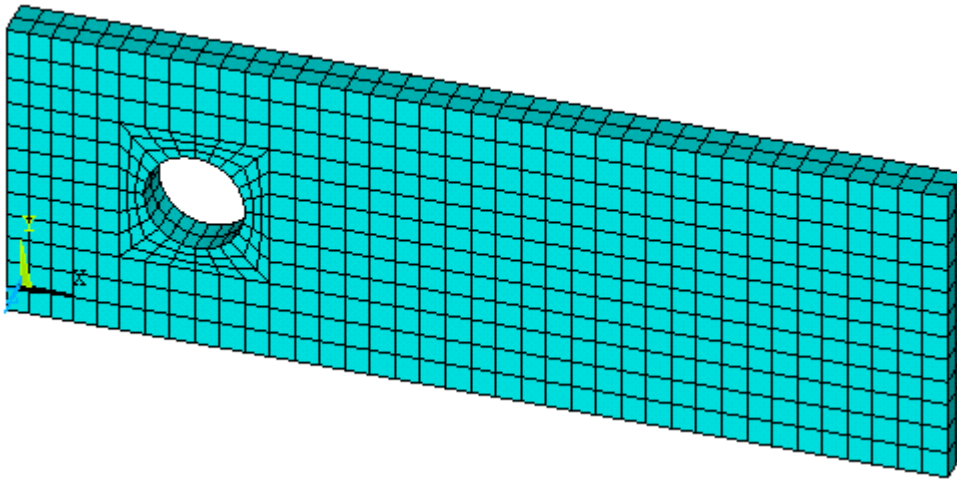


Figura 5.12 – Modelo 240-1.

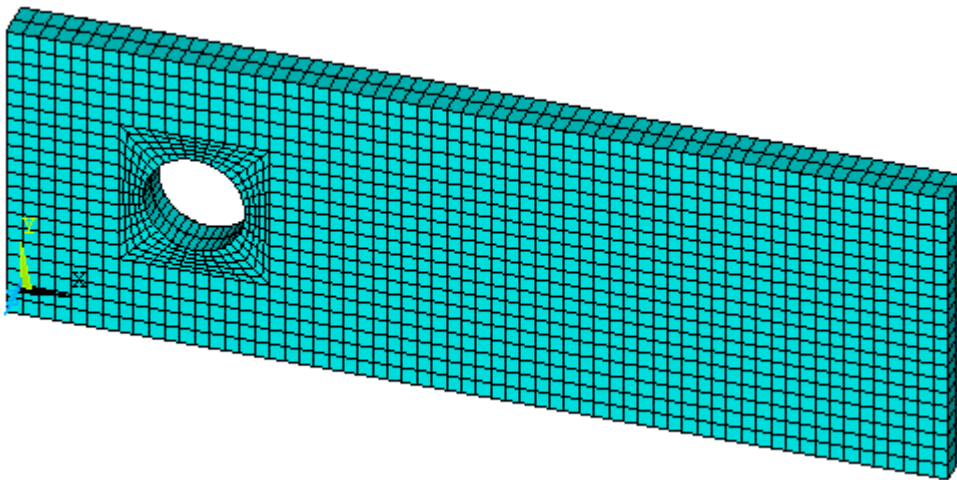


Figura 5.13 - Modelo 240-2.

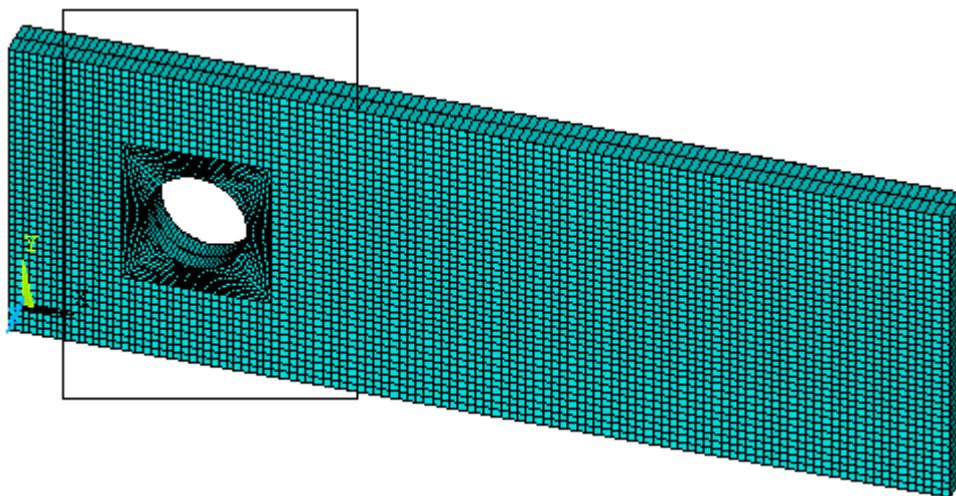


Figura 5.14 (a)– Figura completa

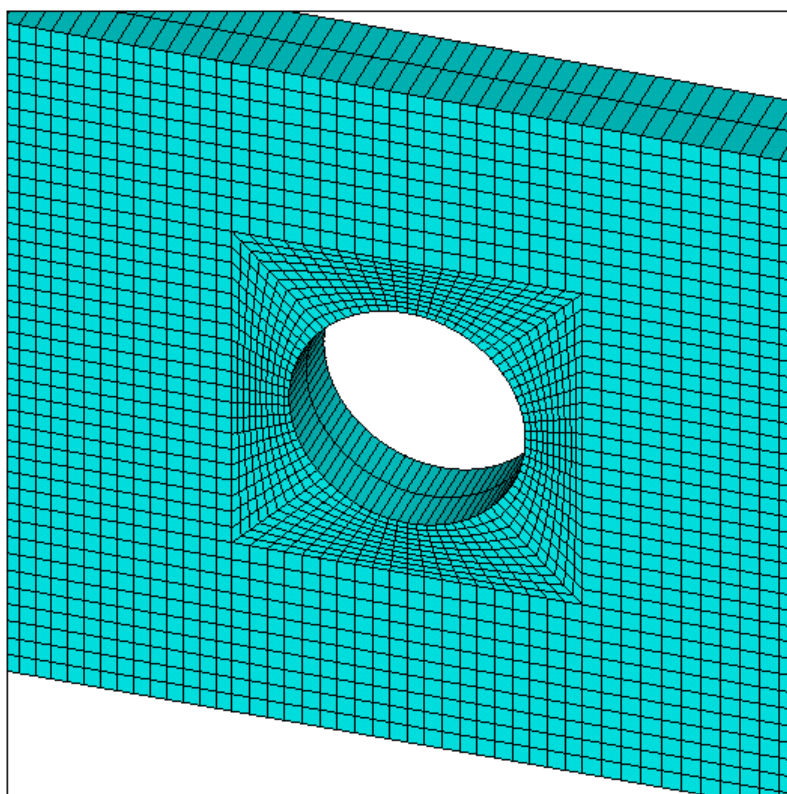


Figura 5.14 (b) – área de refinamento

Figura 5.14 - Modelo 240-3.

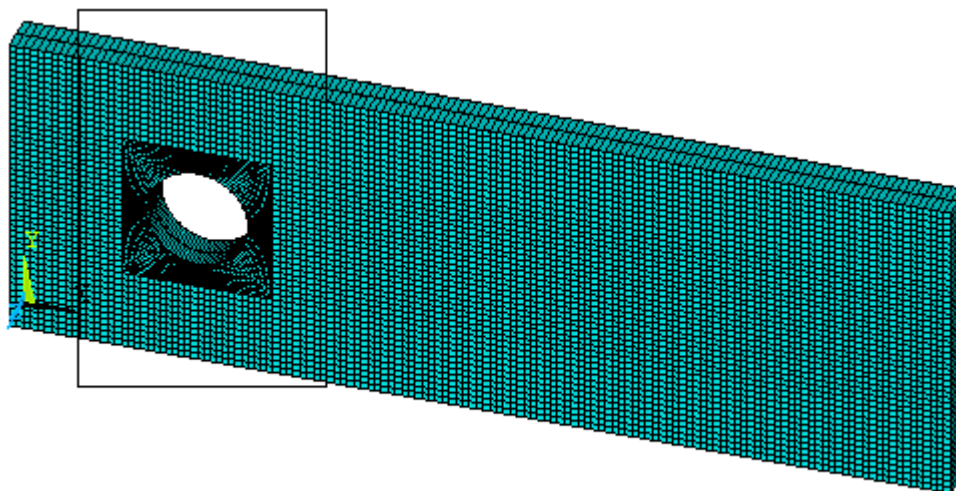


Figura 5.15 (a) – Figura completa

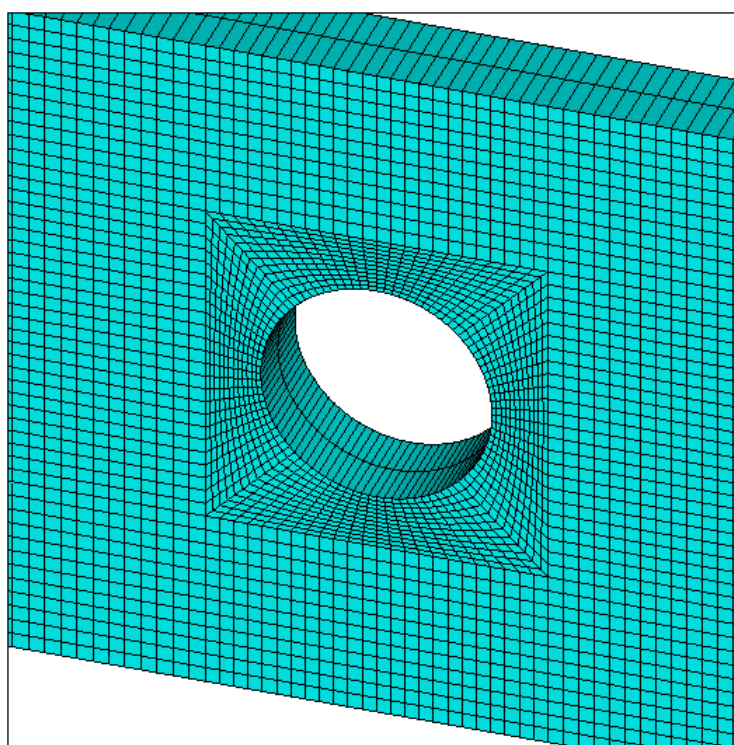


Figura 5.15 (b) – área de refinamento

Figura 5.15 - Modelo 240-4

Para simular o modelo 240-3 e 240-4 foi necessário um tempo de construção e processamento cerca de dez vezes maior que para construção e processamento do modelo 240-1, o que tornou a utilização destes modelos

inviável para atingir os objetivos deste trabalho. Com o objetivo de tornar a pesquisa mais dinâmica e abranger um número maior de simulações em menos tempo, optou-se por adotar a malha do modelo 240-1, e considerar o erro correspondente no resultado da pesquisa.

Os testes para validação da malha fora da região de refinamento da mesma foram realizados aumentando-se o número de elementos nesta região em um modelo com duas filas de furação, com dois parafusos por fila. Verificou-se que, a malha com dimensões uniformes dos elementos apresentou o melhor resultado, ou seja, os elementos da região fora do refinamento devem apresentar dimensões de largura e comprimento próximas. Como as regiões dentro e fora do refinamento constituem um só volume, os elementos que fazem interface entre estas regiões devem possuir as mesmas dimensões que os elementos da região fora do refinamento.

6 ANÁLISE PARAMÉTRICA

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos da simulação dos modelos numéricos. Estes resultados são analisados a fim de se verificar quais variáveis influem na eficiência da peça estudada e qual o grau de influência de cada uma delas. Os resultados são expostos em tabelas, figuras e gráficos de forma a tornarem claras as conclusões alcançadas na análise. As figuras expostas representam as distribuições da tensão de Von Mises ao longo da peça.

6.1 Análise paramétrica das chapas

As chapas analisadas nesta pesquisa apresentaram resultados previstos no que diz respeito à distribuição de tensões, ou seja, durante o regime elástico verificou-se uma concentração de tensões na região da seção transversal próxima aos furos, e durante o regime plástico, a distribuição de tensões na seção transversal foi aproximadamente uniforme, atingindo a ruptura na maior parte da seção transversal quase no mesmo instante.

Nos modelos foram aplicadas as cargas supostamente necessárias à ruptura da área líquida sem consideração de coeficiente de segurança e/ou coeficiente de eficiência, como exposto no capítulo anterior. Os resultados obtidos não correspondem ao aproveitamento total da seção, ou seja, os modelos

simulados alcançam a tensão última antes da aplicação total da carga, o que significa que o coeficiente de eficiência é menor que um, para os modelos testados. Este comportamento deve-se ao fato de que, no regime plástico, as tensões na seção de ruptura, nas regiões próximas às bordas da chapa, são inferiores à tensão no restante da seção.

Nos exemplos mostrados na Figura 6.1, são destacadas três etapas da aplicação da carga. Percebe-se que, à medida que a carga aumenta, as tensões se distribuem de modo mais uniforme, até a ruptura, onde esta distribuição é praticamente uniforme, a menos das citadas regiões próximas às bordas.

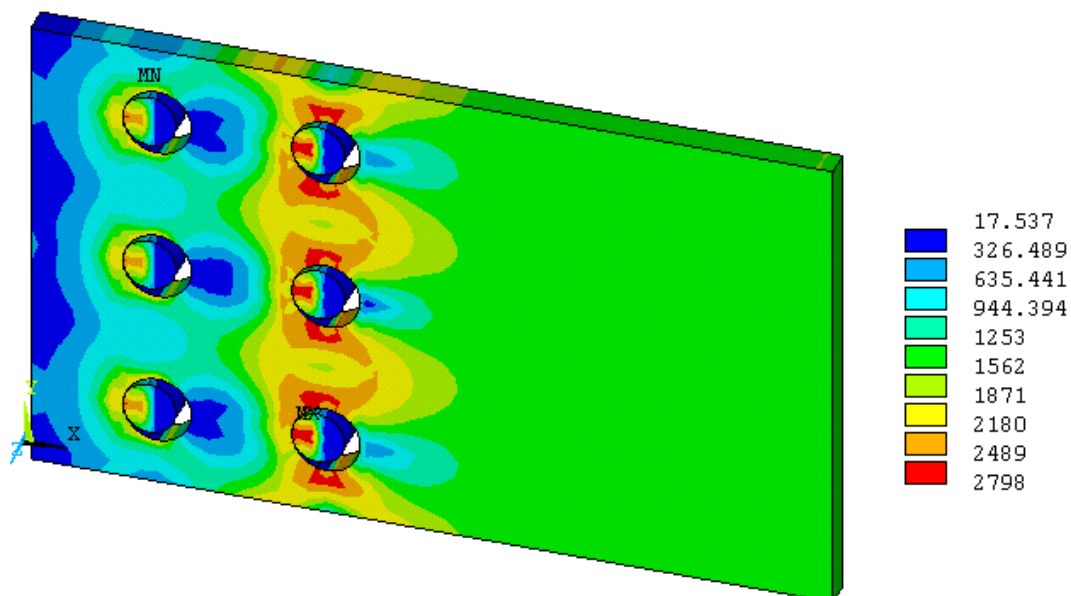


Figura 6.1 (a) – Percentual de carga aplicada: 62% (antes do escoamento)

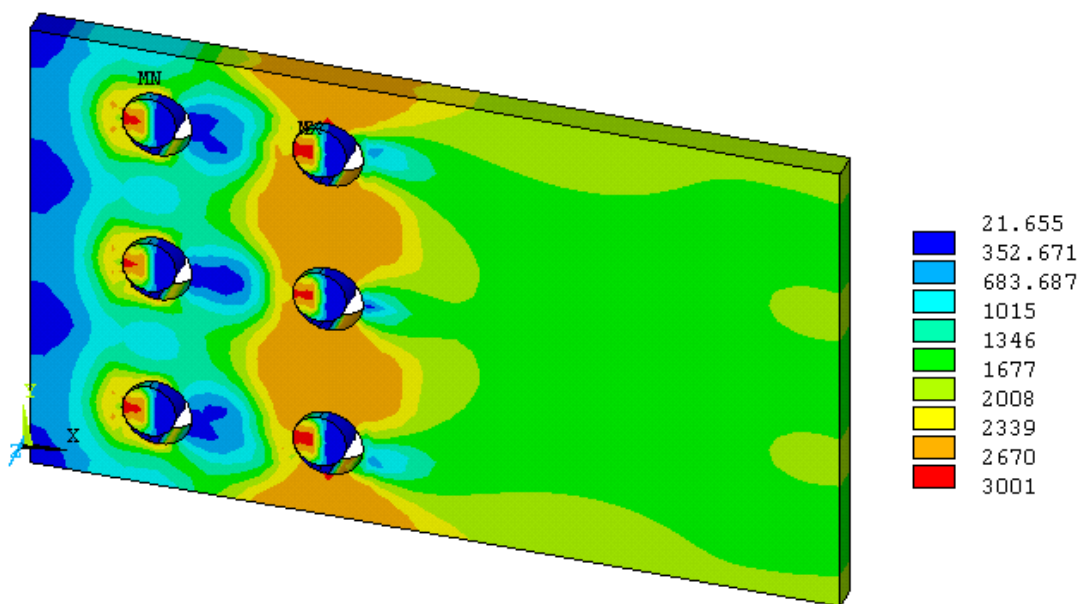


Figura 6.1 (b) – Percentual de carga aplicada: 72% (escoamento)

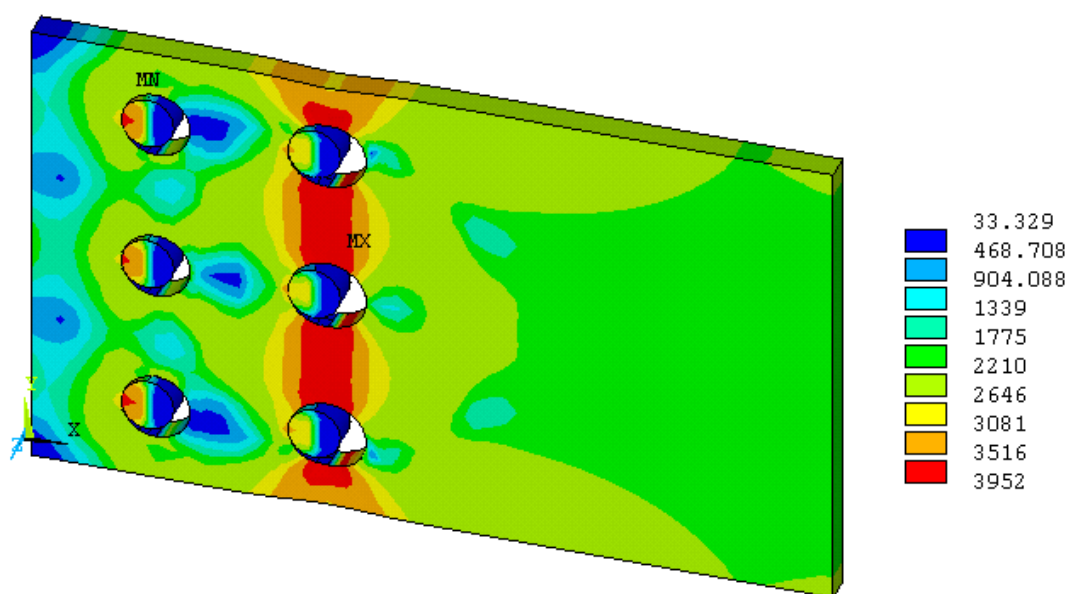


Figura 6.1 (c) – Percentual de carga aplicada: 91,5% (ruptura)

Figura 6.1 - várias etapas de aplicação da carga

Os resultados apresentados são o percentual de carga aplicada ao modelo até que algum elemento do mesmo atinja a tensão última do material. Os resultados serão apresentados na mesma ordem em que foram expostas as possíveis variáveis de influência de chapas.

A seguir, são expostos, na Tabela 6.1 e na Figura 6.2, os resultados para a variável “espessura de chapas”:

Tabela 6.1 – Resultados para a variável “espessura das chapas”.

VARIÁVEL ESPESSURA DE CHAPAS				
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3	MODELO 4
Largura	8,3500	8,3500	8,3500	8,3500
Comprimento	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000
Espessura	0,6350	0,7140	0,7940	0,8730
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Linhas de furação	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000
Parafusos/fila	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	1,9000	1,9000	1,9000	1,9000
s	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
g	4,5500	4,5500	4,5500	4,5500
A_n/A_g	0,6120	0,6120	0,6120	0,6120
e_2/g	0,4176	0,4176	0,4176	0,4176
CARGA APLICADA				
carga aplicada na simulação	12.979,40	14.594,16	16.229,36	17.844,12
RESULTADO				
C_t	0,908	0,909	0,911	0,911

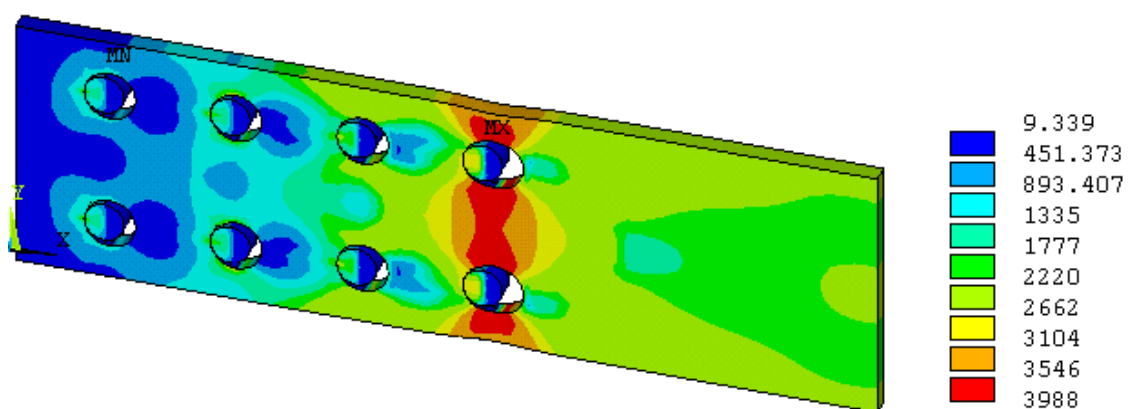


Figura 6.2 – modelo 1, espessura = 0,635 cm.

Analisando a Tabela 6.1, pode-se verificar que a espessura da chapa não é uma variável de influência para resistência da área líquida, pois todos os modelos desta tabela apresentam praticamente o mesmo coeficiente de eficiência. A Figura 6.2 demonstra a distribuição de tensões do modelo 1 quando atinge a ruptura da seção líquida. Como se pode observar, a tensão máxima de ruptura ($f_u=4.000,00\text{kgf/cm}^2$) foi atingida aproximadamente no mesmo instante em quase toda a seção, exceto nos elementos das regiões próximas às bordas.

A Tabela 6.2 e a Figura 6.3 apresentam resultados para a variável “relação A_n / A_g de chapas”.

Tabela 6.2 – Resultados para variável “relação A_n / A_g de chapas”.

VARIÁVEL RELAÇÃO A_n/A_g DE CHAPAS			
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 5	MODELO 6	MODELO 7
Largura	7,6900	7,9200	8,3500
Comprimento	19,0000	19,0000	19,0000
Espessura	0,7140	0,7140	0,7140
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200
Filas de furação	2,0000	2,0000	2,0000
Parafusos/fila	2,0000	2,0000	2,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	1,9000	1,9600	2,0650
s	4,0000	4,0000	4,0000
g	3,8900	4,0000	4,2200
A_n/A_g	0,5787	0,5909	0,6120
e_2/g	0,4884	0,4900	0,4893
CARGA APLICADA			
carga aplicada na simulação	12.709,20	13.366,08	14.594,16
RESULTADO			
C_t	0,904	0,904	0,902

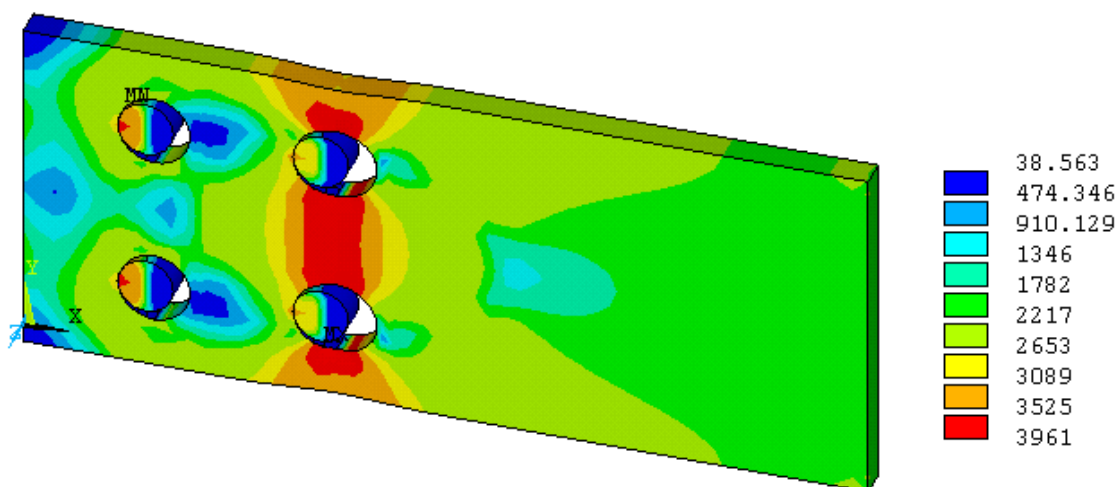


Figura 6.3 - modelo 6, $A_n / A_g = 0,5909$.

Analisando a Tabela 6.2, verifica-se que a relação A_n / A_g não é uma variável de influência para resistência da área líquida da chapa, pois todos os modelos desta tabela apresentam praticamente o mesmo coeficiente de eficiência. As pequenas diferenças podem ser atribuídas aos diferentes valores de g e de e_2 . A Figura 6.4 demonstra a distribuição de tensões do modelo 6, quando é atingida a ruptura da seção líquida. Esta distribuição tem as mesmas características que a distribuição do modelo 1 já comentada.

A Tabela 6.3 e as Figura 6.4, Figura 6.5, Figura 6.6, Figura 6.7, Figura 6.8, Figura 6.9 e Figura 6.10 são apresentadas a influência da variável “número de fila de furação em chapas”:

Tabela 6.3 – Resultados para a variável “número de filas de furação em chapas”.

VARIÁVEL FILAS DE FURAÇÃO EM CHAPAS						
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 8	MODELO 78	MODELO 79	MODELO 75	MODELO 76	MODELO 77
Largura	3,8000	7,6000	11,4000	15,2000	19,0000	22,8000
Comprimento	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000
Espessura	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Filas de furação	1,0000	2,0000	3,0000	4,0000	5,0000	6,0000
Parafusos/fila	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	1,9000	1,9000	1,9000	1,9000	1,9000	1,9000
s	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
g	---	3,8000	3,8000	3,8000	3,8000	3,8000
A_n/A_g	0,5737	0,5737	0,5737	0,5737	0,5737	0,5737
e_2/g	---	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
CARGA APLICADA						
carga aplicada na simulação	6.226,08	12.452,16	18.678,24	24.904,32	31.130,40	37.356,48
RESULTADO						
C_t	0,869	0,886	0,917	0,936	0,929	0,933

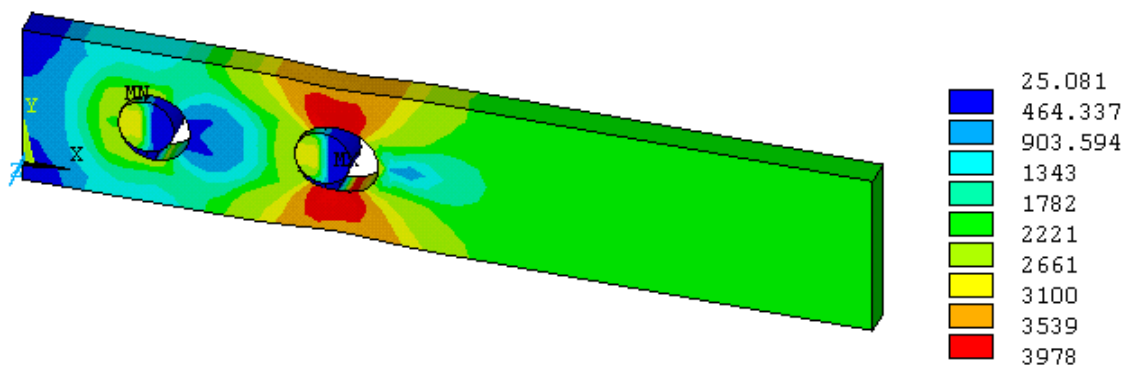


Figura 6.4 - modelo 8, fila de furação = 1.

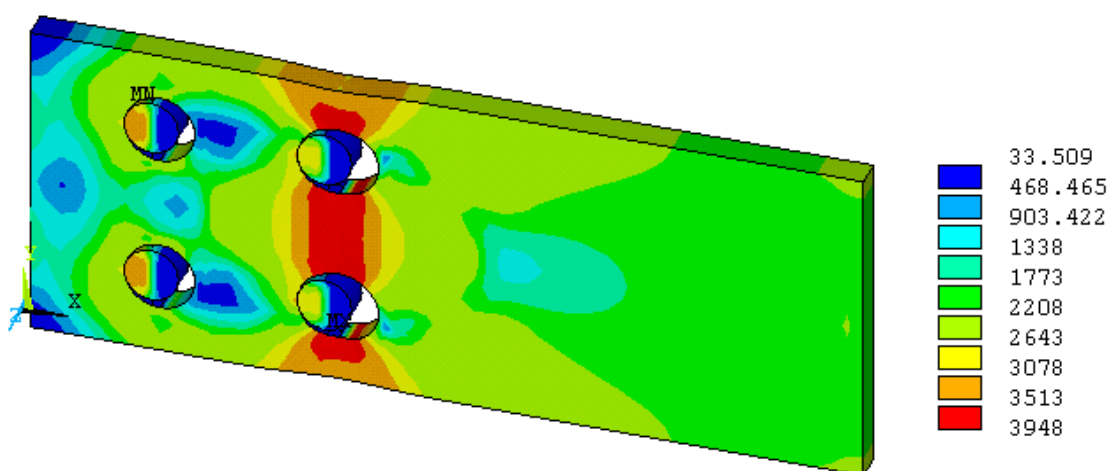


Figura 6.5 - modelo 78, filas de furação = 2.

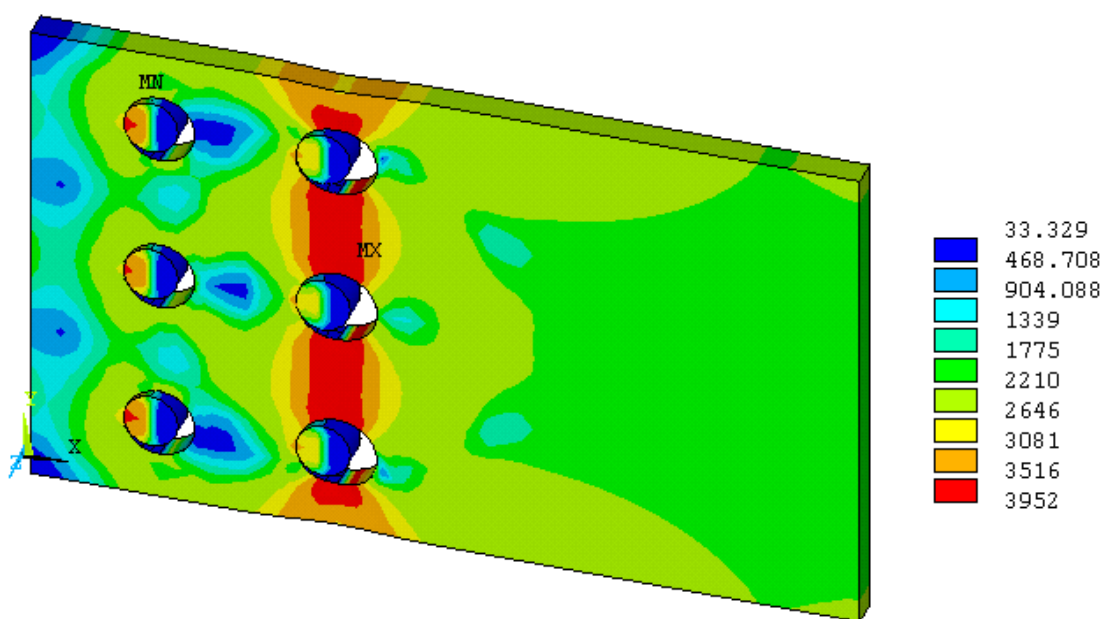


Figura 6.6 - modelo 79, filas de furação = 3.

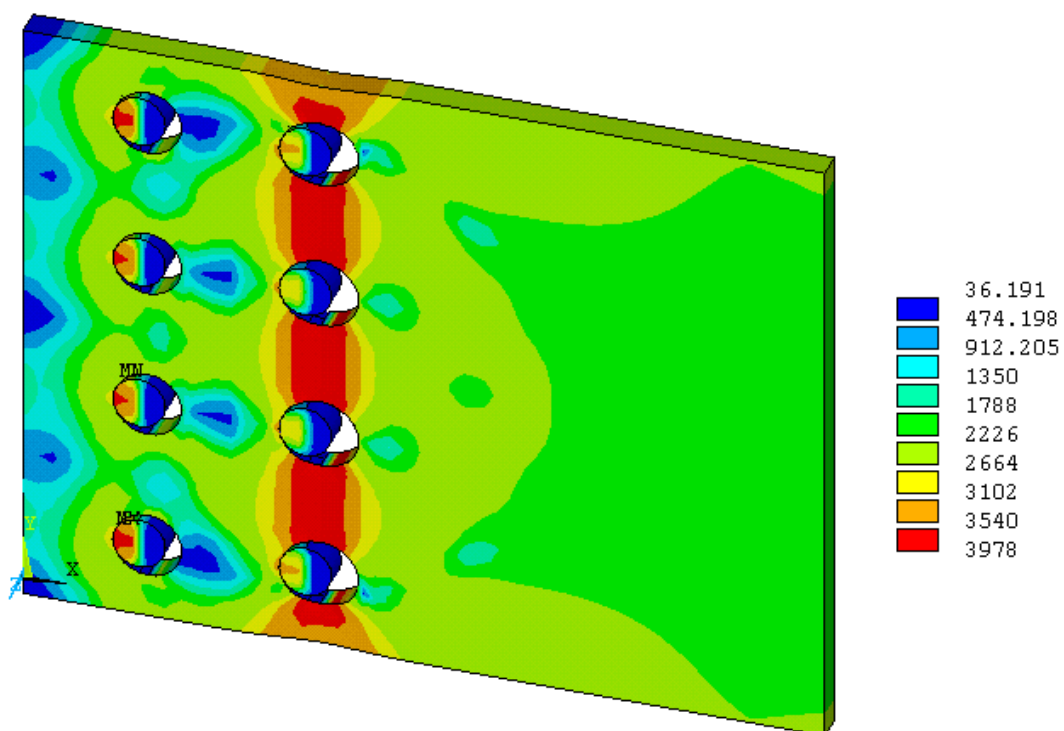


Figura 6.7 - modelo 75, filas de furação = 4.

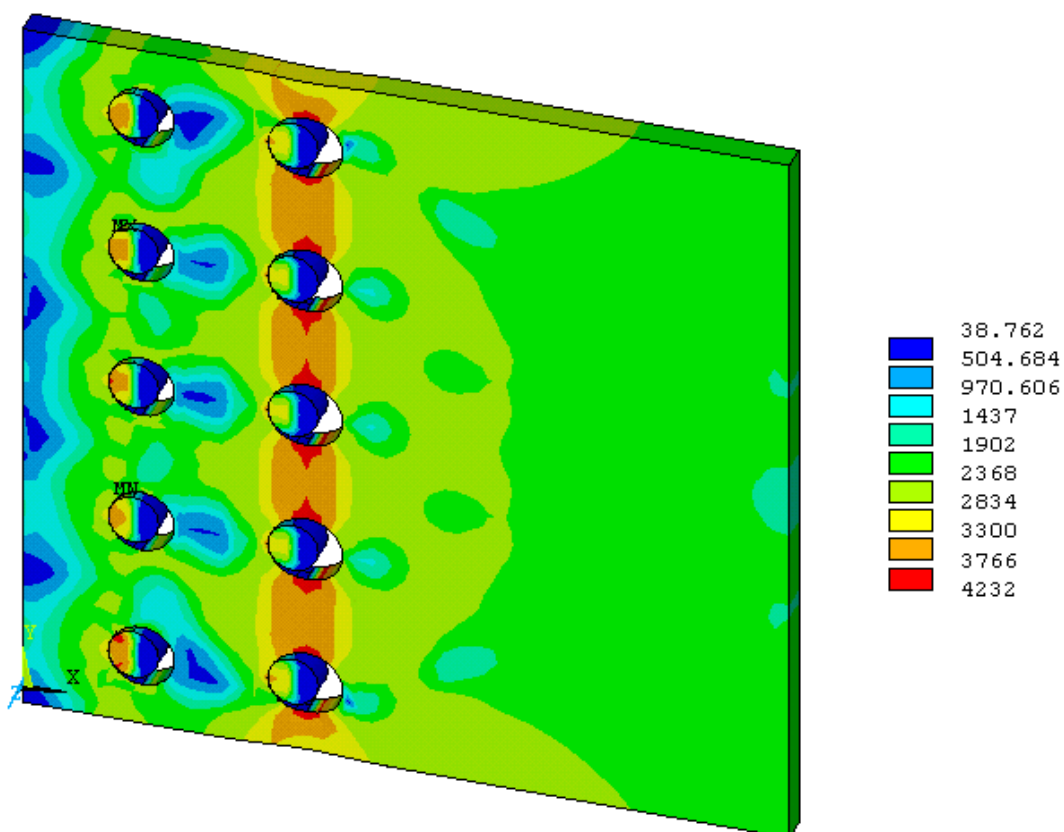


Figura 6.8 - modelo 76, filas de furação = 5.

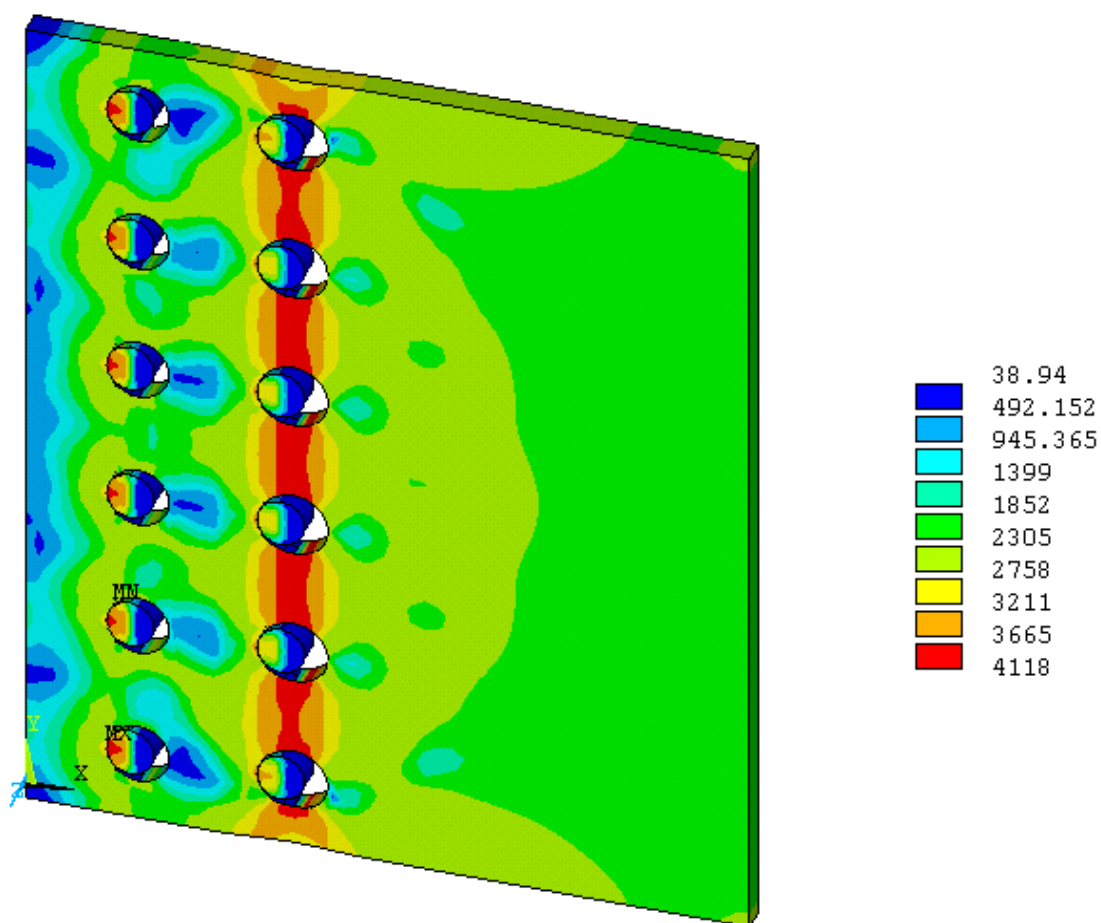


Figura 6.9 - modelo 77, filas de furação = 6.

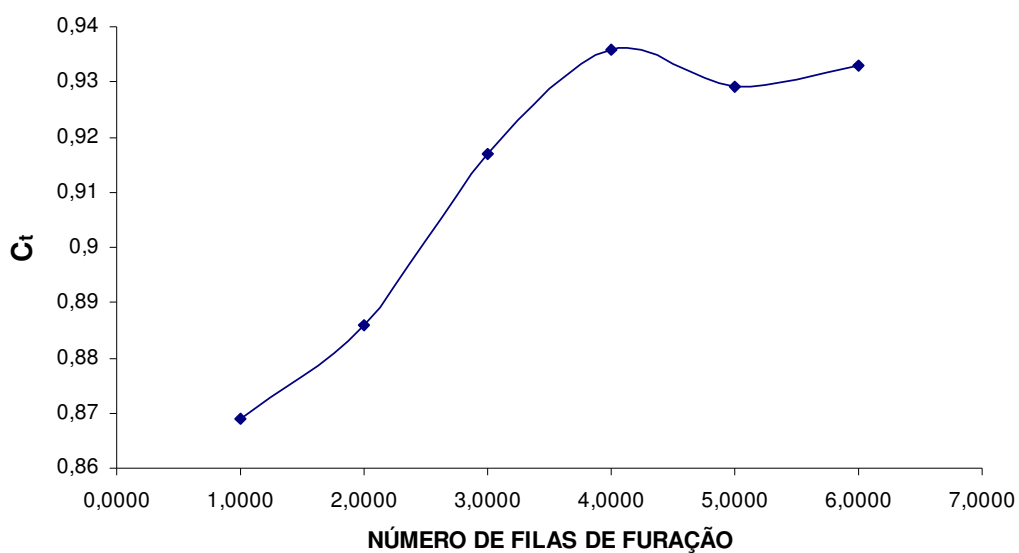


Figura 6.10 – Gráfico de resultados da variável “número de fila de furação em chapas”

Analisando a Tabela 6.3, verifica-se que o número de filas de furação influencia a resistência da seção líquida de chapas. O coeficiente de eficiência cresce com o aumento do número de filas de furação até quatro filas e torna-se constante a partir deste número, convergindo para aproximadamente 93% de aproveitamento.

A variação do grau de influência do número de filas de furação na resistência das chapas é justificada pela distribuição das tensões na área líquida, ou seja, aumentando o número de parafusos na seção líquida, as tensões, nesta seção, se distribuem mais uniformemente. À medida que cresce o número de parafusos, o coeficiente de eficiência tende a um valor constante atingido a partir de quatro filas de furação. É importante notar que este valor ainda permanece inferior a 1,0, por conta do fato, já citado, de que as tensões nas bordas são inferiores.

Com uma fila de furação, o coeficiente de eficiência vale cerca de 93% do coeficiente para quatro filas ou mais; com duas filas, este coeficiente vale cerca de 95% e com três filas, vale cerca de 98,5%. Portanto, a utilização, de um modo geral, do coeficiente obtido para uma ou duas filas de furação conduz a um resultado a favor da segurança e não muito distante do real, não influenciando significativamente na avaliação da resistência da chapa.

A Tabela 6.4 e a Figura 6.11 apresentam os resultados para a variável “número de parafusos por fila de furação”.

Tabela 6.4 – Resultados para a variável “número de parafusos por fila de furação em chapas”.

VARIÁVEL PARAFUSOS/FILA EM CHAPAS					
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 10	MODELO 11	MODELO 2	MODELO 12	MODELO 13
Largura	8,3500	8,3500	8,3500	8,3500	8,3500
Comprimento	19,0000	23,0000	27,0000	31,0000	35,0000
Espessura	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Filas de furação	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000
Parafusos/fila	2,0000	3,0000	4,0000	5,0000	6,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	1,9000	1,9000	1,9000	1,9000	1,9000
s	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
g	4,5500	4,5500	4,5500	4,5500	4,5500
A_n/A_g	0,6120	0,6120	0,6120	0,6120	0,6120
e_2/g	0,4176	0,4176	0,4176	0,4176	0,4176
CARGA APLICADA					
carga aplicada na simulação	14.594,16	14.594,16	14.594,16	14.594,16	14.594,16
RESULTADO					
C_t	0,905	0,905	0,905	0,905	0,905

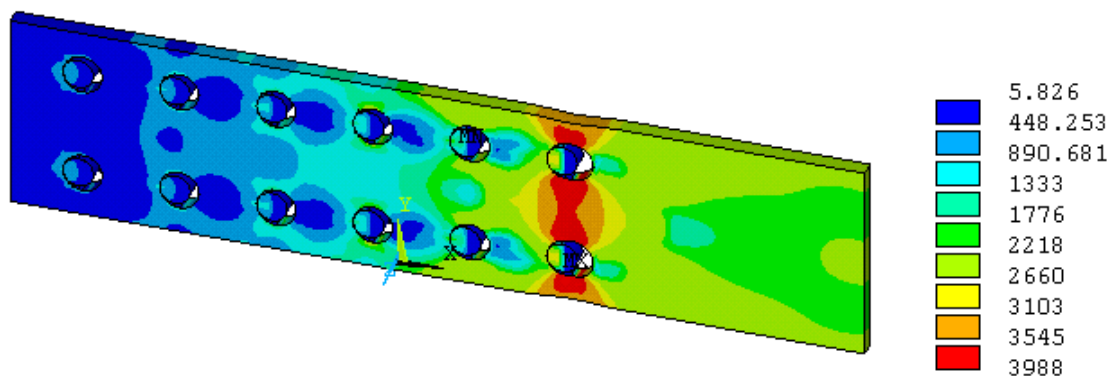


Figura 6.11 - modelo 13, , número de parafusos por fila de furação = 6.

Os resultados expostos na Tabela 6.4 demonstram que o número de parafusos por fila de furação não é uma variável de influência para resistência à ruptura da área líquida da chapa, pois todos os modelos desta tabela apresentam o mesmo coeficiente de eficiência. A Figura 6.11 demonstra a distribuição de tensões do modelo 13 quando este atinge a ruptura da seção líquida. Esta

distribuição tem as mesmas características que a distribuição do modelo 1, por exemplo, mostrado na Figura 6.2.

A Tabela 6.5 e Figura 6.8 apresentam os resultados para a variável “espaçamento longitudinal entre furos s ” de chapas:

Tabela 6.5 - Resultados para a variável “espaçamento longitudinal entre furos s ” de chapas.

VARIÁVEL s DE CHAPAS						
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 14	MODELO 15	MODELO 2	MODELO 16	MODELO 17	MODELO 18
Largura	8,3500	8,3500	8,3500	8,3500	8,3500	8,3500
Comprimento	25,5000	26,4000	27,0000	27,9000	30,0000	40,0000
Espessura	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Filas de furação	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000
Parafusos/fila	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	6,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	1,9000	1,9000	1,9000	1,9000	1,9000	1,9000
s	3,5000	3,8000	4,0000	4,3000	5,0000	5,0000
g	4,5500	4,5500	4,5500	4,5500	4,5500	4,5500
A_n/A_g	0,4176	0,4176	0,4176	0,4176	0,4176	0,4176
e_2/g	0,6120	0,6120	0,6120	0,6120	0,6120	0,6120
CARGA APLICADA						
carga aplicada na simulação	14.594,16	14.594,16	14.594,16	14.594,16	14.594,16	14.594,16
RESULTADO						
C_t	0,905	0,905	0,905	0,905	0,905	0,905

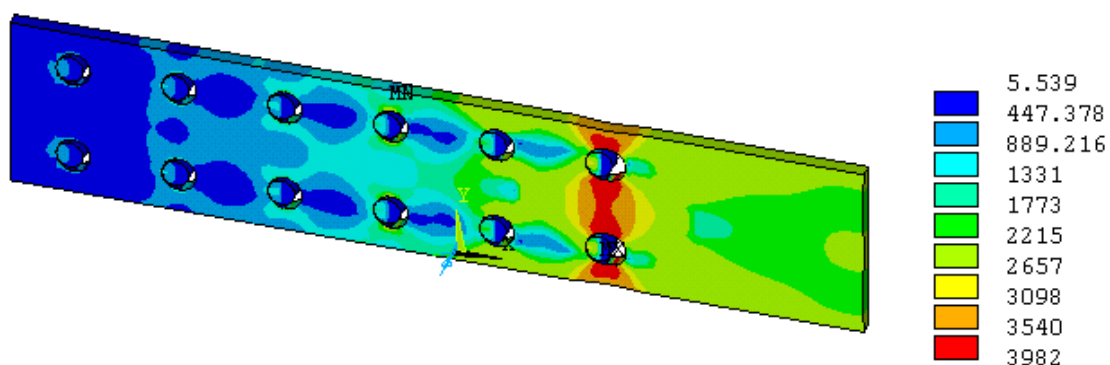


Figura 6.12 - modelo 18, $s=5,0\text{cm}$.

Na análise dos resultados da Tabela 6.5 verifica-se que a espaçamento longitudinal entre furos não é uma variável de influência para a resistência à

ruptura da área líquida de chapas, pois todos os modelos desta tabela apresentam o mesmo coeficiente de eficiência. A Figura 6.12 demonstra a distribuição de tensões do modelo 18 quando este atinge a ruptura da seção líquida. Esta distribuição também tem as mesmas características que a distribuição do modelo 1.

A Tabela 6.6 e as Figura 6.13, Figura 6.14, Figura 6.15, Figura 6.16 e Figura 6.17 apresentam os resultados para variável " e_2 / g " para duas filas de furação em chapas. Os modelos da Tabela 6.6 foram escolhidos conforme descrito no item 4.2.

Tabela 6.6 - Resultados para variável " e_2/g " para duas filas de furação em chapas.

VARIÁVEL RELAÇÃO e_2/g DE CHAPAS COM DUAS FILAS DE FURAÇÃO									
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 19	MODELO 20	MODELO 21	MODELO 22	MODELO 23	MODELO 24	MODELO 25	MODELO 2	MODELO 26
Largura	7,7900	7,7900	7,7900	8,0700	8,0700	8,0700	8,0700	8,3500	8,3500
Comprimento	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000
Espessura	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Filas de furação	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000
Parafusos/fila	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	1,9000	2,0450	2,1800	1,9000	2,0450	2,1850	2,3200	1,9000	2,0450
s	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
g	3,9900	3,7000	3,4300	4,2700	3,9800	3,7000	3,4300	4,5500	4,2600
A_n/A_g	0,5841	0,5841	0,5841	0,5985	0,5985	0,5985	0,5985	0,6120	0,6120
e_2/g	0,4762	0,5527	0,6356	0,4450	0,5138	0,5905	0,6764	0,4176	0,4800
CARGA APLICADA									
carga aplicada na simulação	12.994,80	12.994,80	12.994,80	13.794,48	13.794,48	13.794,48	13.794,48	14.594,16	14.594,16
RESULTADO									
C_t	0,905	0,895	0,880	0,905	0,900	0,885	0,870	0,905	0,900

VARIÁVEL RELAÇÃO e_2/g DE CHAPAS COM DUAS FILAS DE FURAÇÃO									
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 27	MODELO 28	MODELO 29	MODELO 30	MODELO 31	MODELO 32	MODELO 33	MODELO 34	MODELO 35
Largura	8,3500	8,3500	8,3500	8,6300	8,6300	8,6300	8,6300	8,6300	8,6300
Comprimento	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000	27,0000
Espessura	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Filas de furação	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000
Parafusos/fila	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	2,1850	2,3250	2,4600	1,9000	2,0450	2,1850	2,3250	2,4650	2,6000
s	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
g	3,9800	3,7000	3,4300	4,8300	4,5500	4,2600	3,9800	3,7000	3,4300
A_n/A_g	0,6120	0,6120	0,6120	0,6246	0,6246	0,6246	0,6246	0,6246	0,6246
e_2/g	0,5490	0,6284	0,7172	0,3934	0,4495	0,5129	0,5842	0,6662	0,7580
CARGA APLICADA									
carga aplicada na simulação	14.594,16	14.594,16	14.594,16	15.393,84	15.393,84	15.393,84	15.393,84	15.393,84	15.393,84
RESULTADO									
C_t	0,890	0,880	0,865	0,905	0,900	0,895	0,885	0,870	0,855

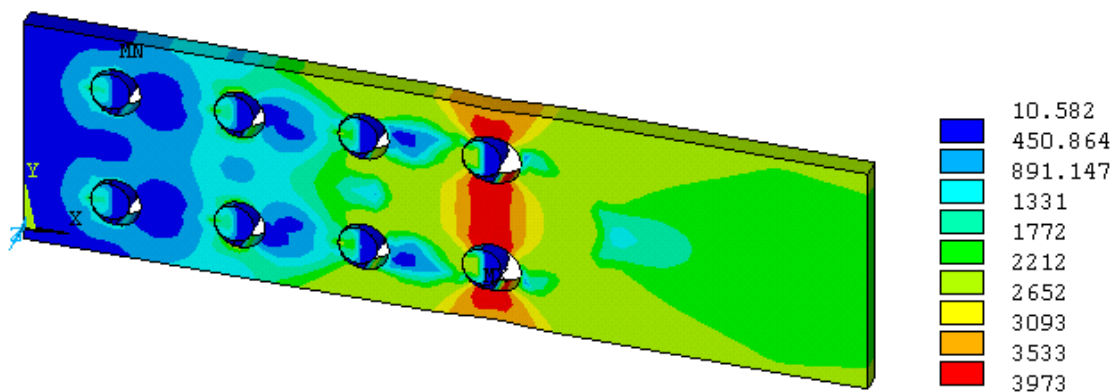


Figura 6.13 – modelo 19, $e_2/g = 0,4762$.

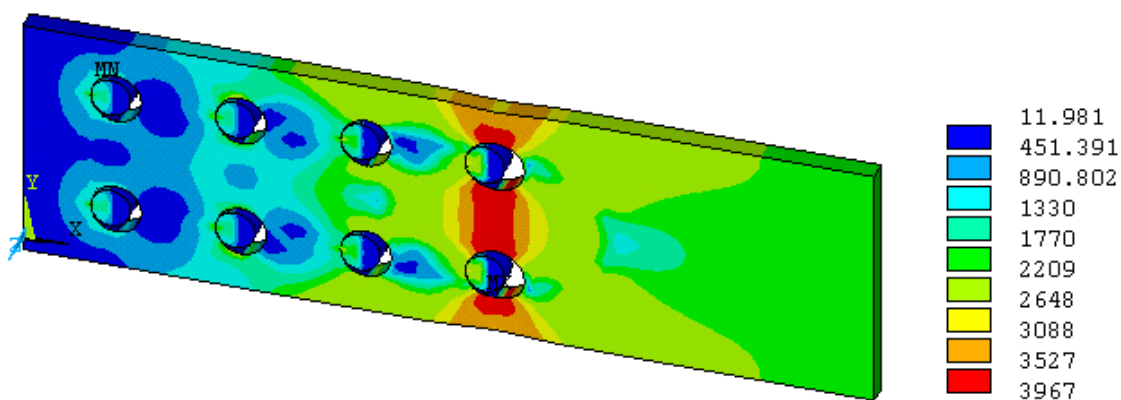


Figura 6.14 – modelo 23, $e_2/g = 0,5138$.

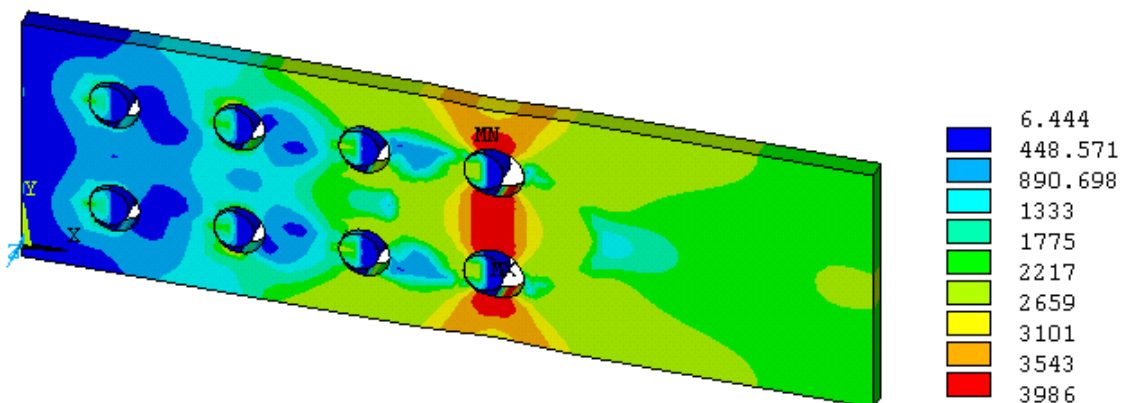


Figura 6.15 – modelo28, $e_2/g = 0,6284$.

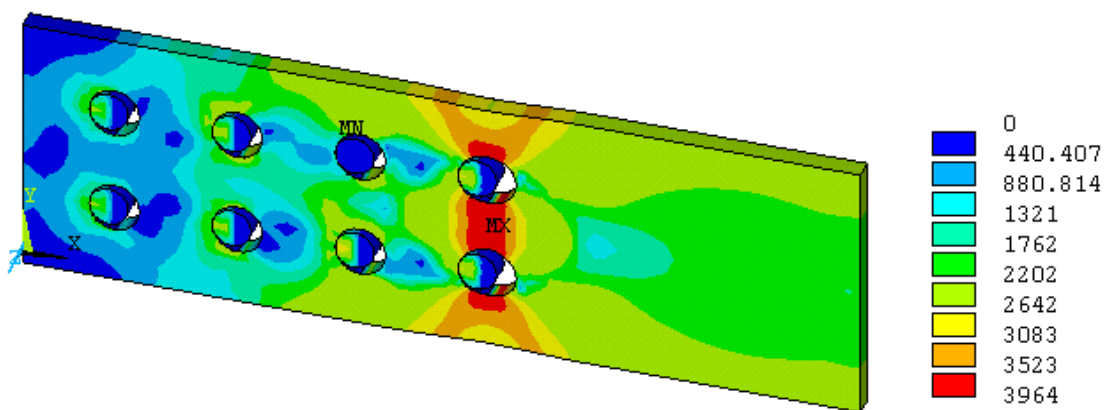


Figura 6.16 – modelo35, $e_2/g = 0,7580$.

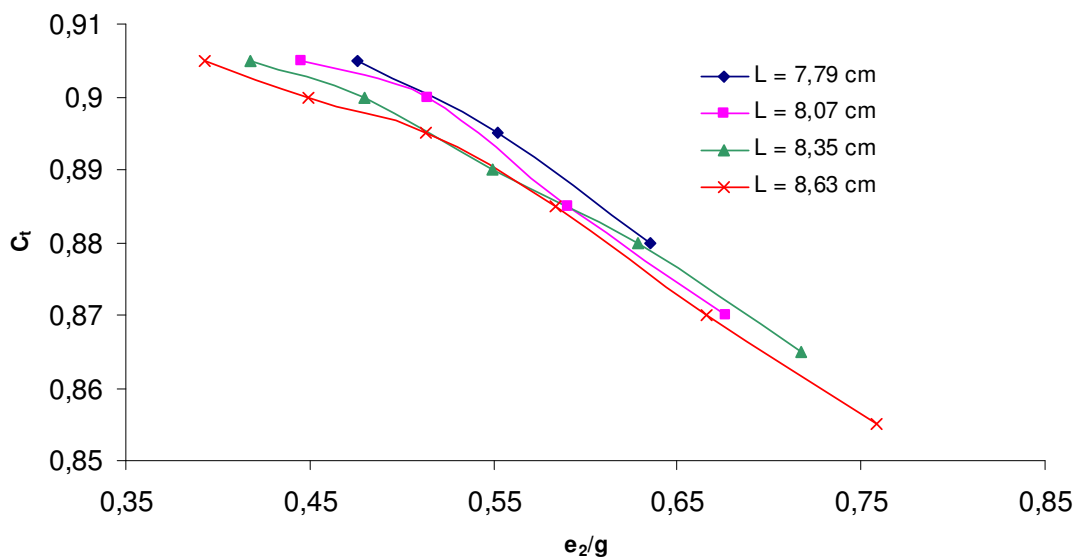


Figura 6.17 – Gráfico de resultados para variável “ e_2/g ” para duas filas de furação em chapas.

Analisando os resultados da Tabela 6.6 e da Figura 6.17, verifica-se que a relação e_2/g influencia significativamente a resistência à ruptura da área líquida de chapas. O coeficiente de eficiência decresce com o aumento da relação e_2/g , ou seja, quanto menor for o espaçamento entre furos menor será a resistência da área líquida. Este fato também pode ser verificado na análise da Figura 6.13, Figura 6.14, Figura 6.15 e Figura 6.16, as quais demonstram que na seção líquida a ruptura entre furos realiza-se antes da

ruptura do furo à borda, conforme expectativa definida na escolha do modelo, isto é, valores de e_2 maiores que o mínimo recomendado pelas normas técnicas. A Figura 6.17 é um gráfico $C_t x (e_e/g)$ que representa a variação do coeficiente de eficiência em função da relação e_2/g , para chapas com duas filas de furação e diferentes larguras.

Verifica-se na tabela de resultados que, para chapas com mesmo espaçamento transversal entre furos g e distâncias de furo a borda e_2 diferentes, há uma variação do coeficiente de eficiência, sendo que este diminui com o aumento de e_2 . Isso demonstra que o valor mínimo indicado pelas normas técnicas para e_2 é suficiente, pois os modelos com o e_2 mínimo, 1,9cm, apresentam o melhor aproveitamento da seção crítica. Este fato é demonstrado nas Figura 6.13, Figura 6.14, Figura 6.15 e Figura 6.16, que mostram a distribuição de tensões de Von Mises no momento da ruptura da seção líquida em modelos com e_2 igual a 1,90cm, 2,045cm, 2,325cm e 2,60cm e g igual a 3,99cm, 3,98cm, 3,70cm e 3,43cm respectivamente. Em tais figuras, verifica-se que a percentagem de material do furo à borda, na seção crítica, que não atinge a tensão última aumenta com o aumento de e_2 . Portanto, um valor máximo para esta distância deve ser especificado, para que não haja grande redução na resistência da área líquida. Esta especificação dependerá de um estudo mais aprofundado do tema. A NBR 8800 estabelece que este valor seja 12 vezes a espessura, tomando como limite máximo 150mm. No caso dos modelos estudados, isto é, para espessura igual a 0,714cm, este valor limite seria 8,568cm. Nos modelos, o maior valor utilizado foi 2,6cm, muito abaixo, portanto, do limite da NBR8800. No entanto, não houve ruptura total entre furo e borda porque a ruptura entre furos ocorreu preliminarmente.

A Tabela 6.7 e a Figura 6.18, Figura 6.19, Figura 6.20, Figura 6.21, Figura 6.22, Figura 6.23 e Figura 6.24, apresentam os resultados para a variável e_2/g para três filas de furação em chapas.

Tabela 6.7 – Resultados para a variável e_2/g para três filas de furação em chapas.

VARIÁVEL RELAÇÃO e_2/g DE CHAPAS COM TRÊS LINHAS DE FURAÇÃO											
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 36	MODELO 37	MODELO 38	MODELO 9	MODELO 39	MODELO 40	MODELO 41	MODELO 42	MODELO 43	MODELO 44	
Largura	10,6800	11,1200	11,1200	11,5800	11,5800	11,5800	12,0400	12,0400	12,0400	12,0400	
Comprimento	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	
Espessura	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	
Filas de furação	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	
Parafusos/fila	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	
e_2	1,9000	1,9000	2,1200	1,9000	2,1300	2,3500	1,9000	2,1300	2,3600	2,5800	
s	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	
g	3,4400	3,6600	3,4400	3,8900	3,6600	3,4400	4,1200	3,8900	3,6600	3,4400	
A_n/A_g	0,5449	0,5629	0,5629	0,5803	0,5803	0,5803	0,5963	0,5963	0,5963	0,5963	
e_2/g	0,5523	0,5191	0,6163	0,4884	0,5820	0,6831	0,4612	0,5476	0,6448	0,7500	
CARGA APLICADA											
carga aplicada na simulação	16.621,92	17.878,56	17.878,56	19.192,32	19.192,32	19.192,32	20.506,08	20.506,08	20.506,08	20.506,08	
RESULTADO											
C_t	0,900	0,910	0,890	0,915	0,905	0,885	0,920	0,905	0,890	0,875	

VARIÁVEL RELAÇÃO e_2/g DE CHAPAS COM TRÊS LINHAS DE FURAÇÃO											
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 45	MODELO 46	MODELO 47	MODELO 48	MODELO 49	MODELO 50	MODELO 51	MODELO 52	MODELO 53	MODELO 54	MODELO 55
Largura	12,4800	12,4800	12,4800	12,4800	12,4800	12,9400	12,9400	12,9400	12,9400	12,9400	12,9400
Comprimento	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000
Espessura	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Filas de furação	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
Parafusos/fila	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	1,9000	2,1200	2,3500	2,5800	2,8000	1,9000	2,1300	2,3500	2,5800	2,8100	3,0300
s	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
g	4,3400	4,1200	3,8900	3,6600	3,4400	4,5700	4,3400	4,1200	3,8900	3,6600	3,4400
A_n/A_g	0,6106	0,6106	0,6106	0,6106	0,6106	0,6244	0,6244	0,6244	0,6244	0,6244	0,6244
e_2/g	0,4378	0,5146	0,6041	0,7049	0,8140	0,4158	0,4908	0,5704	0,6632	0,7678	0,8808
CARGA APLICADA											
carga aplicada na simulação	21.762,72	21.762,72	21.762,72	21.762,72	21.762,72	23.076,48	23.076,48	23.076,48	23.076,48	23.076,48	23.076,48
RESULTADO											
C_t	0,920	0,905	0,895	0,880	0,865	0,920	0,910	0,900	0,885	0,870	0,860

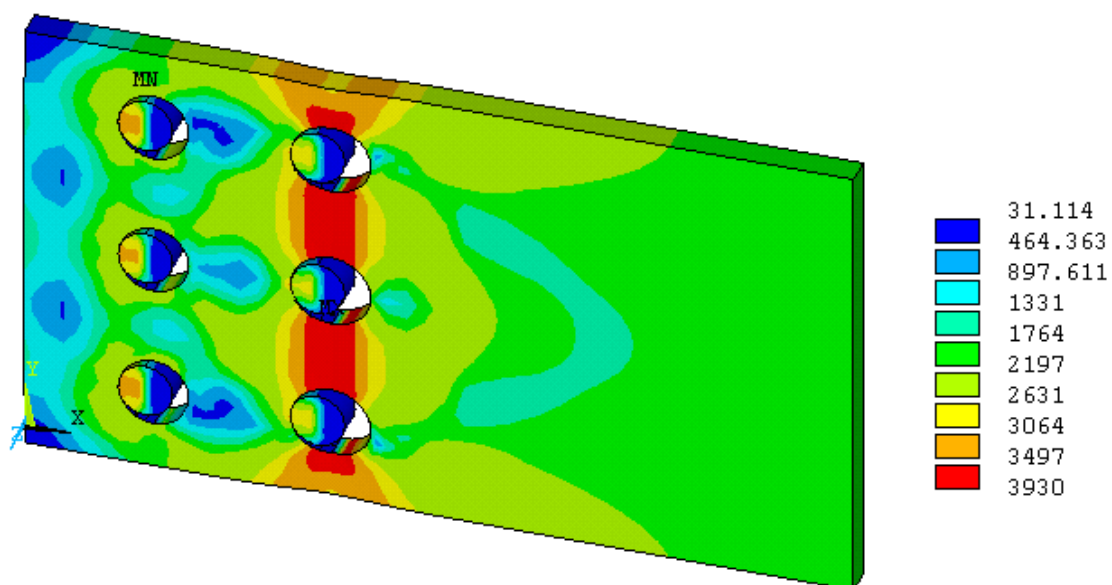


Figura 6.18 – modelo 36, $e_2/g=0,5523$.

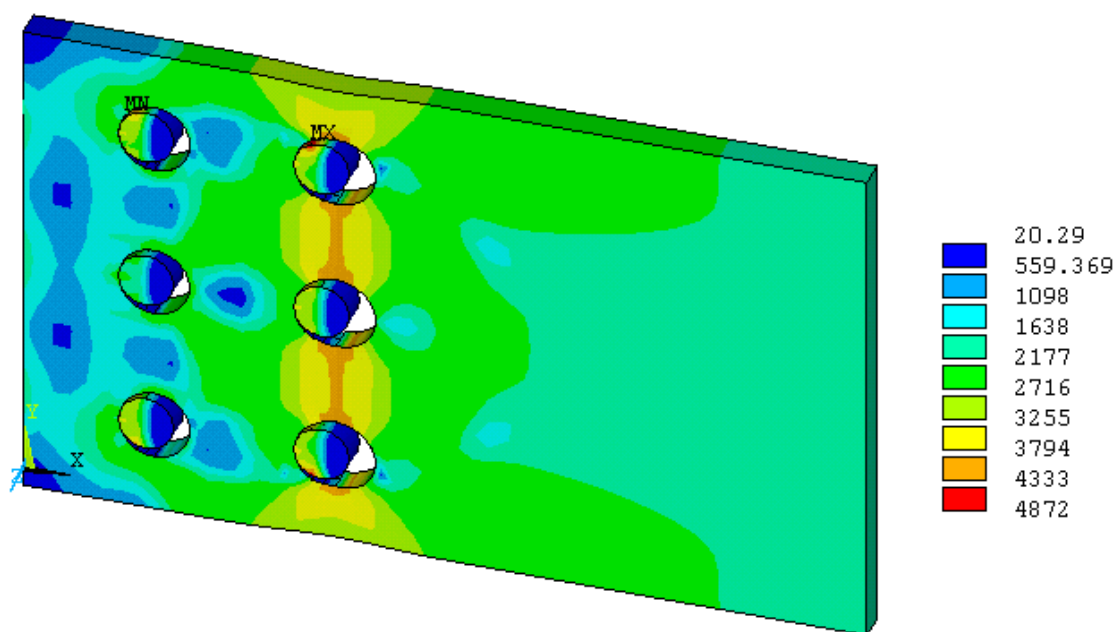


Figura 6.19 – modelo 39, , $e_2/g=0,5820$.

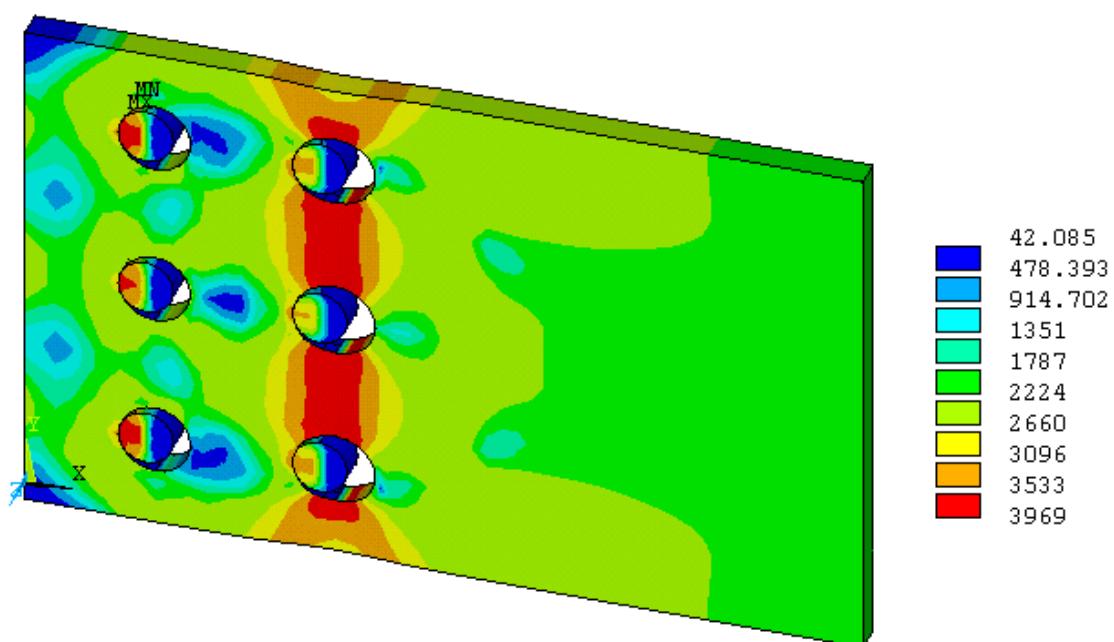


Figura 6.20 – modelo 42, $e_2/g=0,5476$.

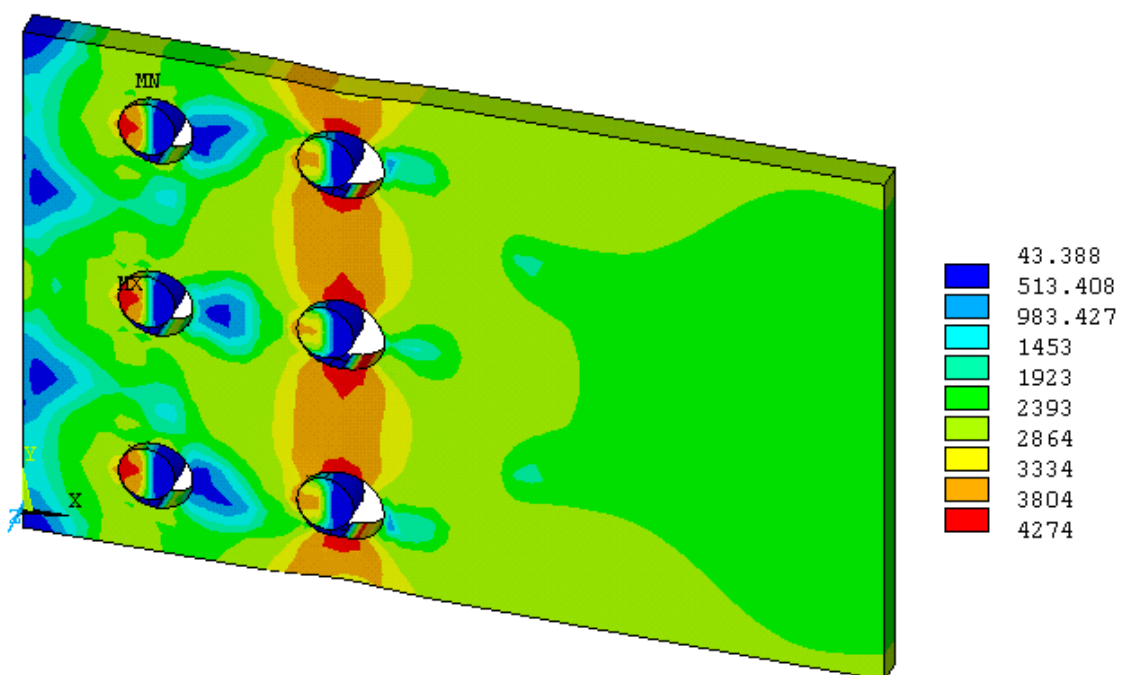


Figura 6.21 – modelo 45, $e_2/g = 0,4378$.

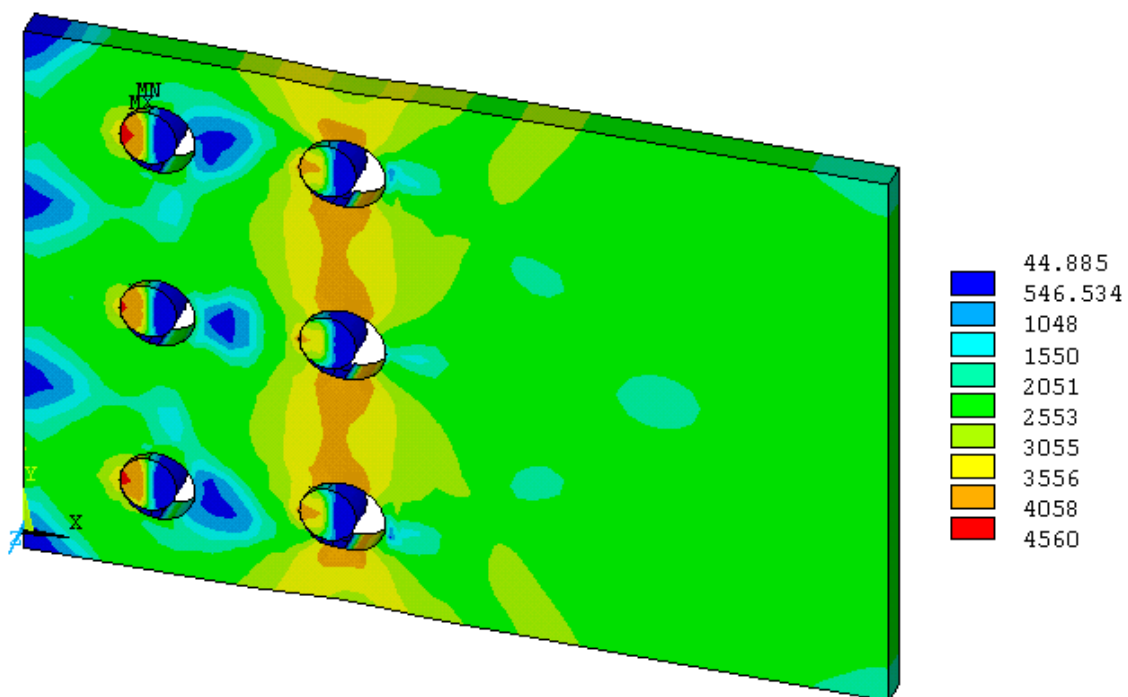


Figura 6.22 – modelo 51, $e_2/g=0,4908$.

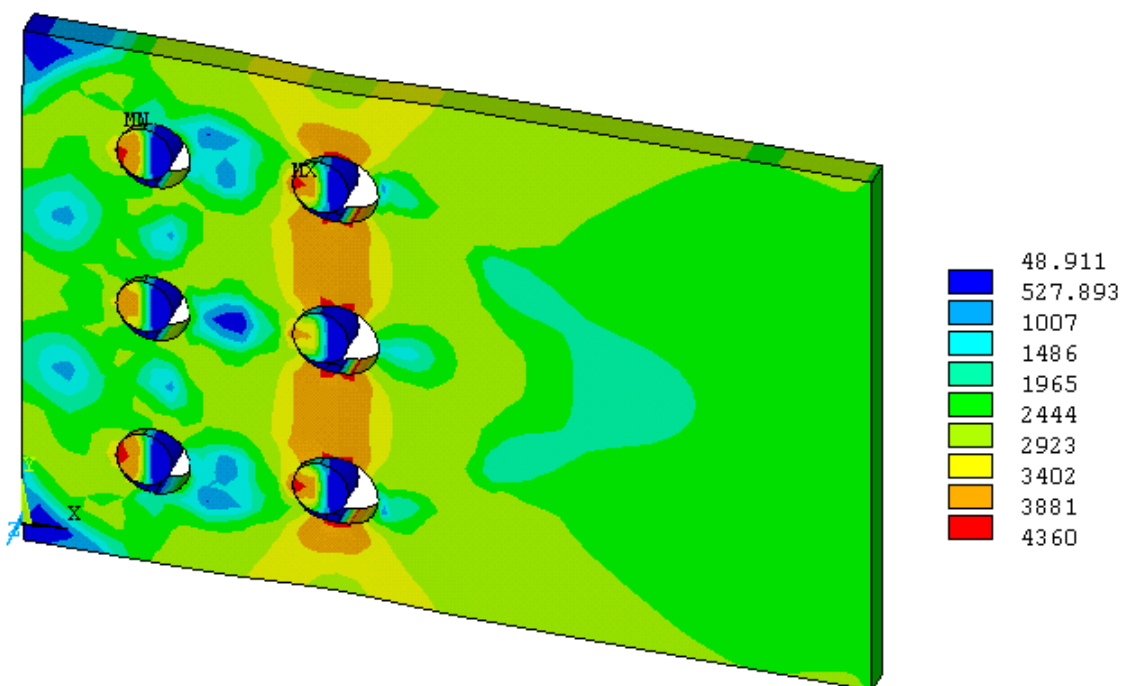


Figura 6.23 – modelo 53, $e_2/g = 0,6632$.

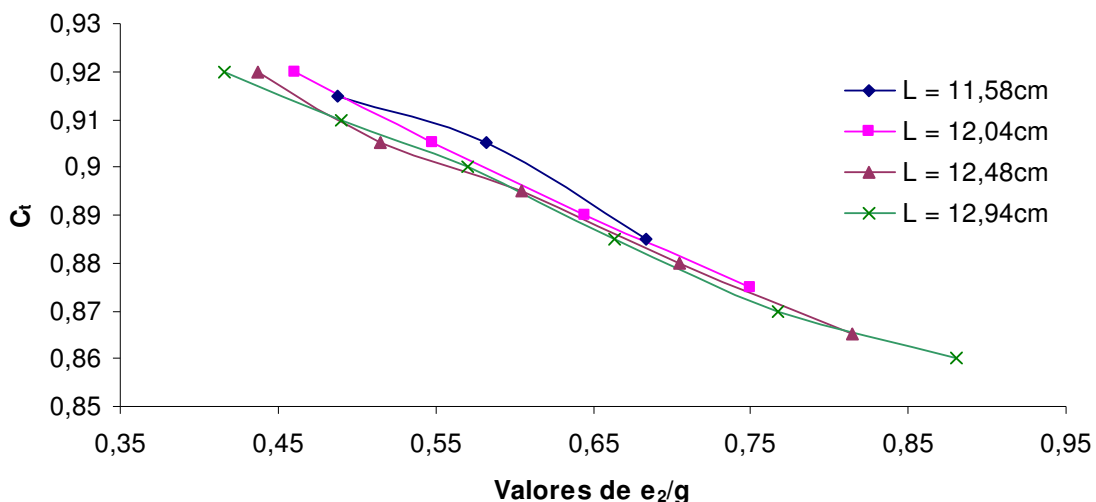


Figura 6.24 – Gráfico de resultados para a variável e_2 / g para três filas de furação em chapas.

Analisando os gráficos nas Figura 6.17 e Figura 6.24, verifica-se que os resultados de C_t para as chapas com duas e três filas de furação são semelhantes, porém as chapas com três filas de furação apresentam maior eficiência devido à melhor distribuição das tensões, como exposto na análise da influência da variável “número de filas de furação”. As Figura 6.18, Figura 6.19, Figura 6.20, Figura 6.21, Figura 6.22 e Figura 6.23 demonstram a distribuição de tensões quando o modelo atinge a tensão última na seção líquida ($f_u = 4.000,00 \text{kgf/cm}^2$), com e_2 igual a 1,90cm, 2,13cm, 2,13cm, 1,90cm, 2,13cm, 2,58cm e g igual a 4,55cm, 3,66cm, 3,89cm, 4,34cm, 4,34cm e 3,89cm, respectivamente. Tais figuras confirmam a conclusão apresentada para chapas com duas filas de furação, ou seja, o coeficiente de eficiência apresenta um pequeno aumento com o crescimento de g , e uma significativa redução com o crescimento de e_2 , pelos motivos explicados na exposição dos resultados de chapas com duas filas de furação. Na Figura 6.23, que representa um modelo com alto valor de e_2 e baixo valor de g , em relação aos valores limites destas variáveis, pode-se verificar o menor coeficiente de

eficiência obtido no estudo de chapas, ou seja, houve, neste caso, o menor aproveitamento do material.

O gráfico $C_t x(e_e/g)$ exposto na Figura 6.24 apresenta a variação do coeficiente de eficiência com relação a e_2/g para chapas com três filas de furação e diferentes larguras, onde pode-se verificar que o coeficiente sofre uma variação decrescente com o aumento da largura. Tal variação é de 0,5% ou menos entre uma largura e outra imediatamente superior. A Figura 6.25 exposta abaixo apresenta o gráfico $C_t x(e_e/g)$ para chapas com duas e três filas de furação:

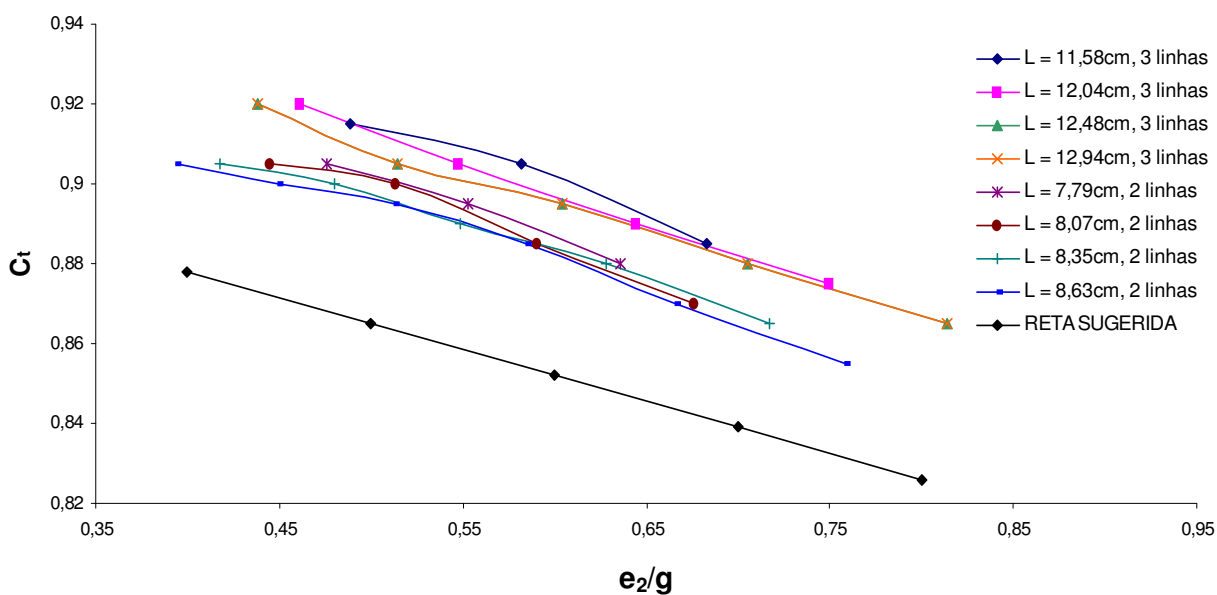


Figura 6.25 – gráfico dos valores $C_t x(e_e/g)$ com duas e três filas de furação

Neste gráfico observa-se que a variação do coeficiente com a relação e_2/g pode ser representada aproximadamente por retas com inclinações semelhantes.

Conhecendo os resultados apresentados para as variáveis “número de filas de furação” e “relação e_2/g ”, e os resultados dos testes da malha, onde se verifica

uma diferença entre os resultados obtidos com a malha dos modelos simulados e com a malha ótima de 3,74%, sugere-se que a resistência nominal à ruptura de A_n , em chapas tracionadas e ligadas por parafusos com duas ou mais linhas de furação, seja o produto da área líquida pela tensão última do material e pelo coeficiente de eficiência determinado pela equação (6.1), obtida por regressão linear da curva mais baixa do gráfico da Figura 6.25, já considerando a diferença de 3,74%.

$$C_t = 0,93 - 0,13 \frac{e_2}{g} \quad (6.1)$$

Esta equação expressa a reta representada no gráfico.

Para a chapa com uma fila de furação e $e_2 = 1,9\text{cm}$ (modelo 8), o coeficiente de eficiência obtido, já considerando a diferença de 3,74%, foi de aproximadamente 0,83.

Vistos tais resultados, sugere-se o uso de chapas de ligação tracionadas e parafusadas com no mínimo dois parafusos por fila de furação e que, para chapas ligadas por apenas uma fila de furação, o valor do coeficiente de eficiência C_t seja 0,83 e, para chapas com duas ou mais filas de furação, C_t seja determinado pela equação (6.1).

Os resultados desta pesquisa não confirmam os resultados de Munse e Chesson (1963), segundo os quais uma pequena razão g/d aumenta a eficiência da conexão. Os modelos de chapa com mesmo d e mesmo e_2 apresentam melhor aproveitamento da seção líquida com o crescimento de g e não com a sua redução.

6.2 Análise paramétrica das cantoneiras

A distribuição de tensões nos modelos de cantoneira apresentou os resultados esperados, isto é, durante o regime elástico, houve concentração de tensões na região da seção líquida próxima aos furos e, durante a fase plástica, a distribuição foi irregular devido ao efeito *shear lag*.

Na escolha dos modelos, verificou-se que todas as cantoneiras ligadas por uma fila de furação em uma única aba apresentavam a resistência à ruptura da área líquida maior que a resistência ao escoamento da área bruta, segundo os critérios de cálculo adotados pela NBR 8800 vigente. Esta diferença aumenta quando o coeficiente de eficiência não é considerado nos cálculos. Tais modelos foram construídos desconsiderando o escoamento da área bruta já que o intuito do estudo é justamente a análise do coeficiente de eficiência, que quantifica a diminuição da resistência da peça na ruptura, e da distribuição de tensões na seção líquida de ruptura, ou seja, o melhor aproveitamento do material na seção de ruptura.

Os modelos foram simulados com as cargas supostamente necessárias à ruptura da seção líquida sem consideração de coeficiente de segurança e/ou coeficiente de eficiência e foram obtidos dois tipos de resultados: a maior parte dos modelos processados escoou na seção bruta e, em seguida, alcançou a tensão última de serviço na seção líquida, conforme critérios de cálculo adotados pela NBR 8800 vigente, porém, parte das cantoneiras apresentou rasgamento. Foram considerados nos estudos os resultados dos modelos que apresentaram escoamento da seção bruta e logo após ruptura da seção líquida e desconsiderados os modelos que apresentaram rasgamento como modo de falha. Os resultados serão apresentados na mesma ordem em que foram expostas as possíveis variáveis de influência.

Na análise das chapas, verificou-se que o coeficiente de eficiência não variava com a sua espessura, nem com a relação A_n/A_g e nem com o comprimento da ligação (número de parafusos por fila e espaçamento longitudinal entre furos).

Na análise das cantoneiras, o coeficiente apresentou pequena variação com a espessura das abas porque é impossível a alteração desta variável associada à manutenção das excentricidades nas direções das linhas médias das abas. Logo, sempre que se altera a espessura de uma cantoneira ligada excentricamente por apenas uma das abas, pelo menos uma das excentricidades é também alterada, provocando alteração do valor do coeficiente.

A relação A_n/A_g permanece inalterada em cantoneiras com abas de mesma largura com uma única fila de furação, não sendo, portanto, variável a ser considerada no estudo. Se for alterada a largura da aba, pelo menos uma das outras possíveis variáveis, tais como excentricidade e distância entre furo e borda, também se altera, influenciando no resultado.

A análise da influência do comprimento da ligação apresentou resultados distintos daqueles obtidos para as chapas, devido à excentricidade da carga aplicada. A seguir, são apresentados nas Tabela 6.8, Figura 6.26, Figura 6.27, Figura 6.28 e Figura 6.29 os resultados para a variável “número de parafusos”.

Tabela 6.8 - Resultados para a variável “número de parafusos”.

VARIÁVEL Nº PARAFUSOS EM CANTONEIRAS					
GEOMETRIA DA CANTONEIRA	MODELO60	MODELO 57	MODELO 61	MODELO 62	MODELO 63
Largura da aba	6,5000	6,5000	6,5000	6,5000	6,5000
Comprimento	27,7000	34,0500	40,4000	46,7500	53,1000
Espessura	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Parafusos/linha	3,0000	4,0000	5,0000	6,0000	7,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	4,1000	4,1000	4,1000	4,1000	4,1000
s	6,3500	6,3500	6,3500	6,3500	6,3500
e_c	0,4816	0,4816	0,4816	0,4816	0,4816
I_c	7,6200	11,4300	15,2400	19,0500	22,8600
A_n/A_g	0,8672	0,8672	0,8672	0,8672	0,8672
CARGA APLICADA					
carga aplicada na simulação	33.856,00	33.856,00	33.856,00	33.856,00	33.856,00
RESULTADO					
C_t	0,5034	0,7629	0,8220	0,8226	0,8227

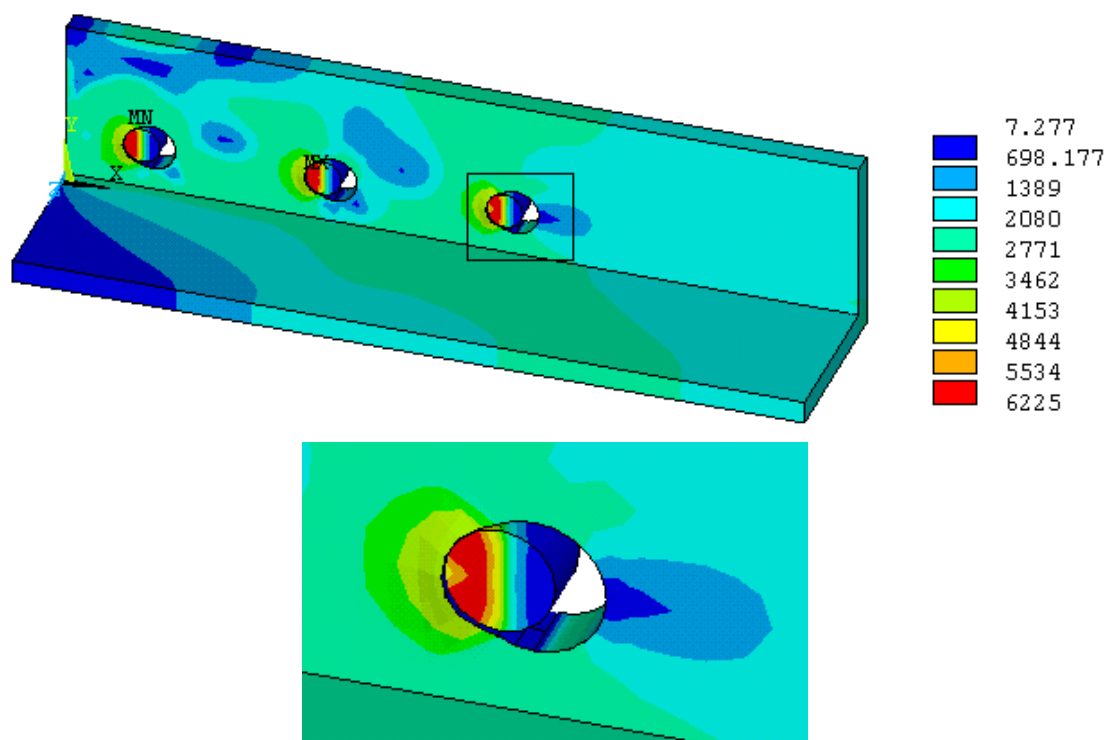


Figura 6.26 – modelo 60, 3 parafusos / linha de furação

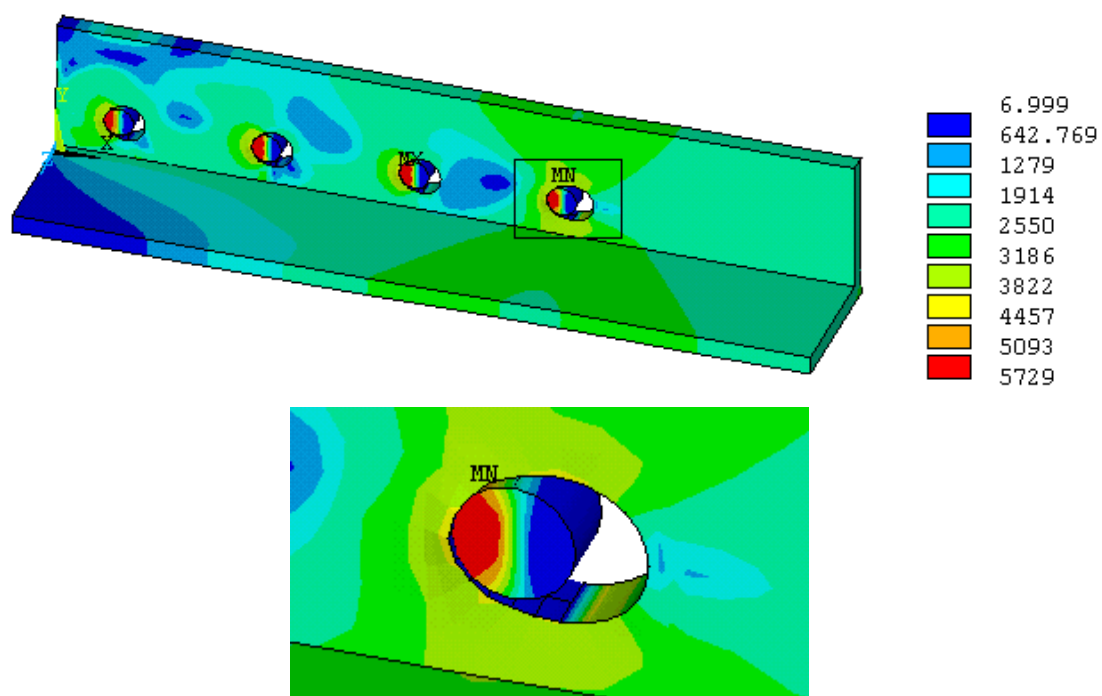


Figura 6.27 – modelo 57, 4 parafusos / linha de furação

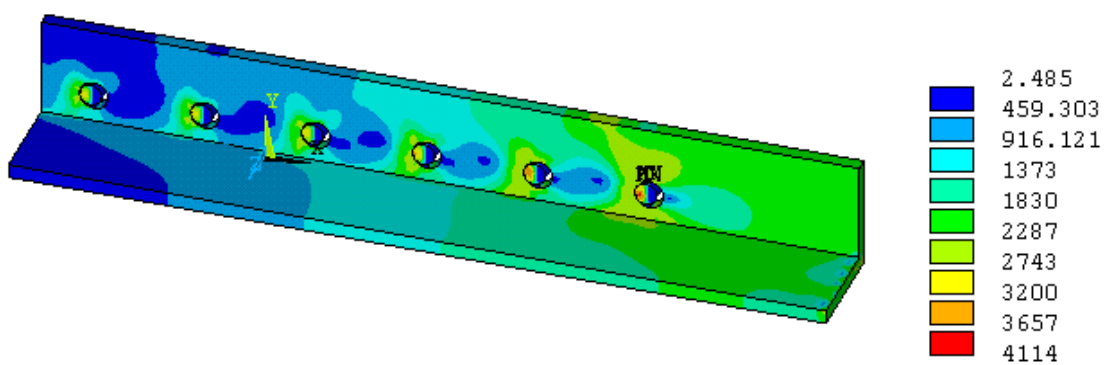


Figura 6.28 – modelo 62, 6 parafusos / linha de furação

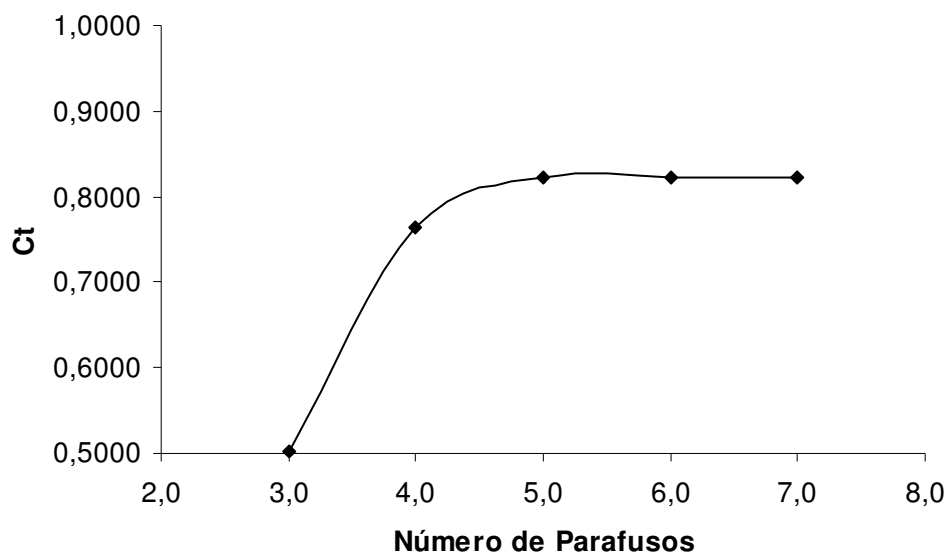


Figura 6.29 - Gráfico C_t x número de parafusos

Analisando a Tabela 6.8 e a Figura 6.29, verifica-se que o número de parafusos por fila de furação em cantoneiras influi na resistência à ruptura da seção líquida, pois os modelos apresentam variações significativas nos resultados. O coeficiente de eficiência cresce linearmente com o aumento de parafusos na fila de furação até cinco parafusos e assume o mesmo valor a partir deste número. Este comportamento é justificado pela diminuição do efeito *shear lag* com o aumento do número de parafusos.

As Figura 6.26, Figura 6.27 e Figura 6.28, mostram a distribuição de tensões no momento da ruptura dos modelos 60, 57 e 62. Foi simulado um modelo com dois parafusos que rompeu por rasgamento, comprovando resultado teórico. Este modelo foi desconsiderado na análise e, para o estudo da influência das demais variáveis, somente foram consideradas cantoneiras com três ou mais parafusos.

O modelo 60 alcançou a tensão última de serviço na seção líquida, porém com uma distribuição próxima da ruptura por rasgamento e o modelo 57, mostrado na Figura 6.27, teve uma distribuição de tensões que indica mais claramente uma ruptura na seção líquida, assim como os modelos 61, 62 e 63 que

apresentaram a mesma distribuição de tensões no momento da ruptura. Na análise das figuras e resultados, nota-se que além do aumento da eficiência da peça, o tipo de ruptura muda com o aumento do número de parafusos na fila de furação, ou seja, o rasgamento é um tipo de ruptura de peças ligadas com poucos parafusos. Nota-se ainda que o efeito *shear lag* torna-se pequeno para ligações com maior número de parafusos. Portanto, o principal motivo de ruptura de peças com ligações com grande número de parafusos na fila de furação é a concentração de tensões próxima à descontinuidade, como visto em chapas.

As Tabela 6.9, Figura 6.30, Figura 6.31, Figura 6.32, Figura 6.33 e Figura 6.34 demonstram os resultados para a variável “espaçamento longitudinal entre furos s ”.

Tabela 6.9 - Resultados para a variável “espaçamento longitudinal entre furos”.

VARIÁVEL s DE CANTONEIRAS					
GEOMETRIA DA CANTONEIRA	MODELO 95	MODELO 94	MODELO 99	MODELO 57	MODELO 67
Largura da aba	6,5000	6,5000	6,5000	6,5000	6,5000
Comprimento	28,3350	30,2400	32,1450	34,0500	35,9700
Espessura	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Parafusos/fila	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	4,1000	4,1000	4,1000	4,1000	4,1000
s	4,4450	5,0800	5,7150	6,3500	6,9900
e_c	0,4816	0,4816	0,4816	0,4816	0,4816
I_c	13,3350	15,2400	17,1450	19,0500	20,9700
A_n/A_g	0,8672	0,8672	0,8672	0,8672	0,8672
CARGA APLICADA					
carga aplicada na simulação	33.856,00	33.856,00	33.856,00	33.856,00	33.856,00
RESULTADO					
C_t	0,7438	0,7537	0,7598	0,7629	0,7638

VARIÁVEL s DE CANTONEIRAS					
GEOMETRIA DA CANTONEIRA	MODELO 82	MODELO 83	MODELO 84	MODELO 62	MODELO 85
Largura da aba	6,5000	6,5000	6,5000	6,5000	6,5000
Comprimento	32,1500	34,0500	40,4000	46,7500	49,9500
Espessura	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Parafusos/fila	6,0000	6,0000	6,0000	6,0000	6,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	4,1000	4,1000	4,1000	4,1000	4,1000
s	3,4300	3,8100	5,0800	6,3500	6,9900
e_c	0,4816	0,4816	0,4816	0,4816	0,4816
I_c	17,1500	19,0500	25,4000	31,7500	34,9500
A_n/A_g	0,8672	0,8672	0,8672	0,8672	0,8672
CARGA APLICADA					
carga aplicada na simulação	33.856,00	33.856,00	33.856,00	33.856,00	33.856,00
RESULTADO					
C_t	0,8218	0,8227	0,8235	0,8226	0,8220

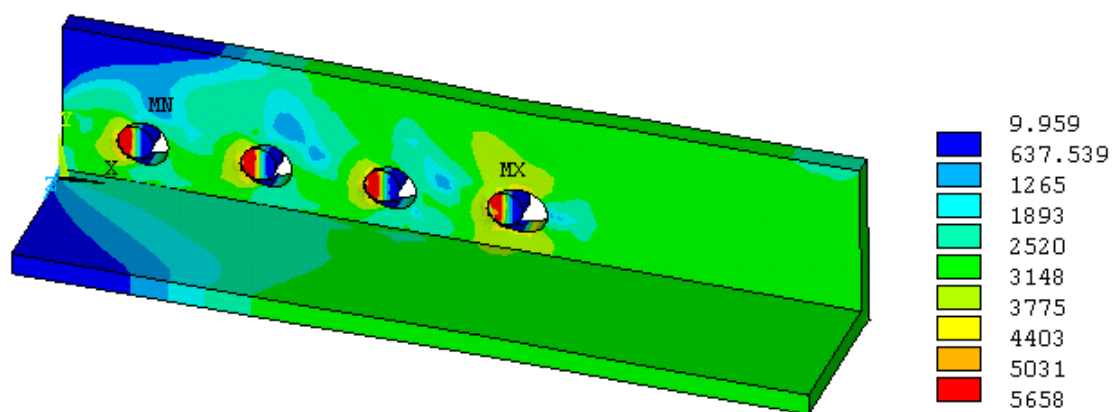


Figura 6.30 – modelo 95, 4 furos e $s = 4,445$

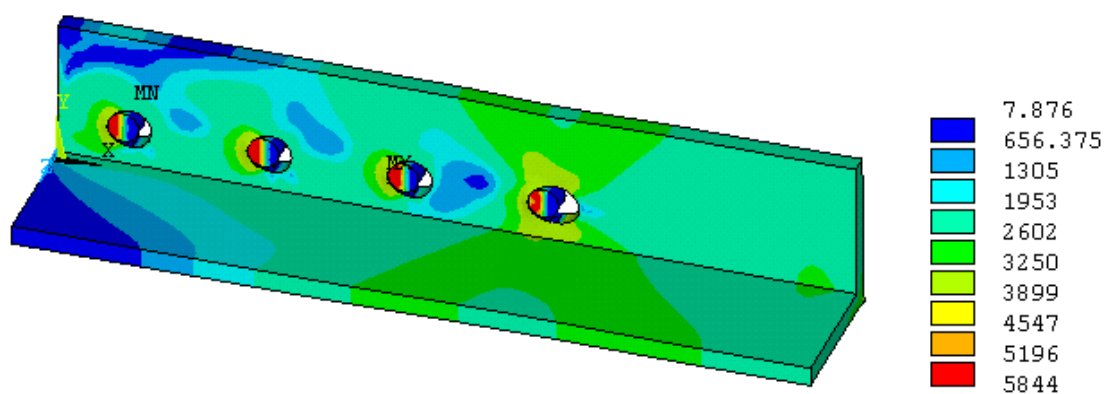


Figura 6.31 – modelo 99, 4 furos e $s = 5,715$

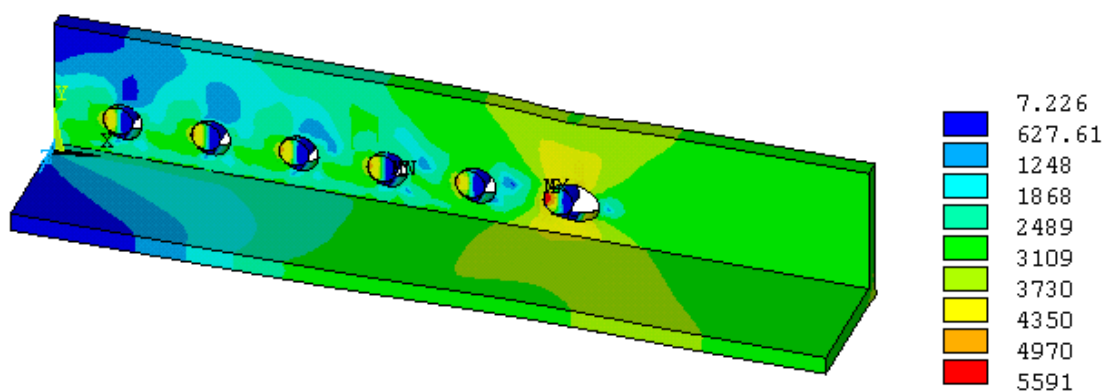


Figura 6.32 – modelo 83, 6 furos e $s = 3,81$

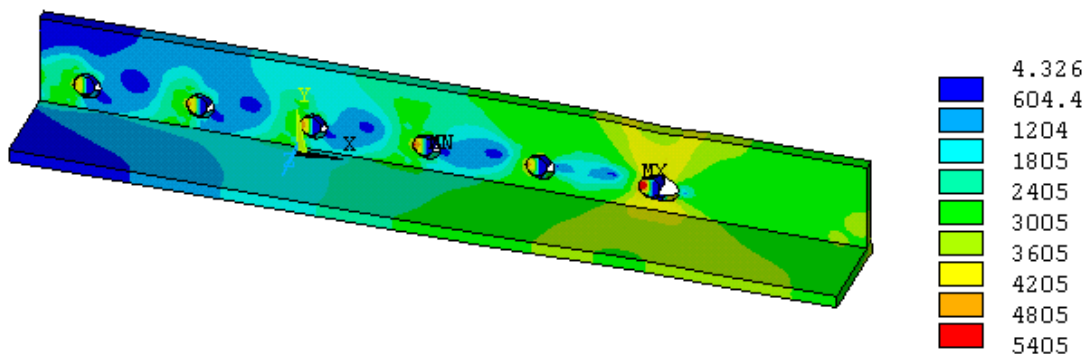


Figura 6.33 – modelo 85, 6 furos e $s = 6,99$

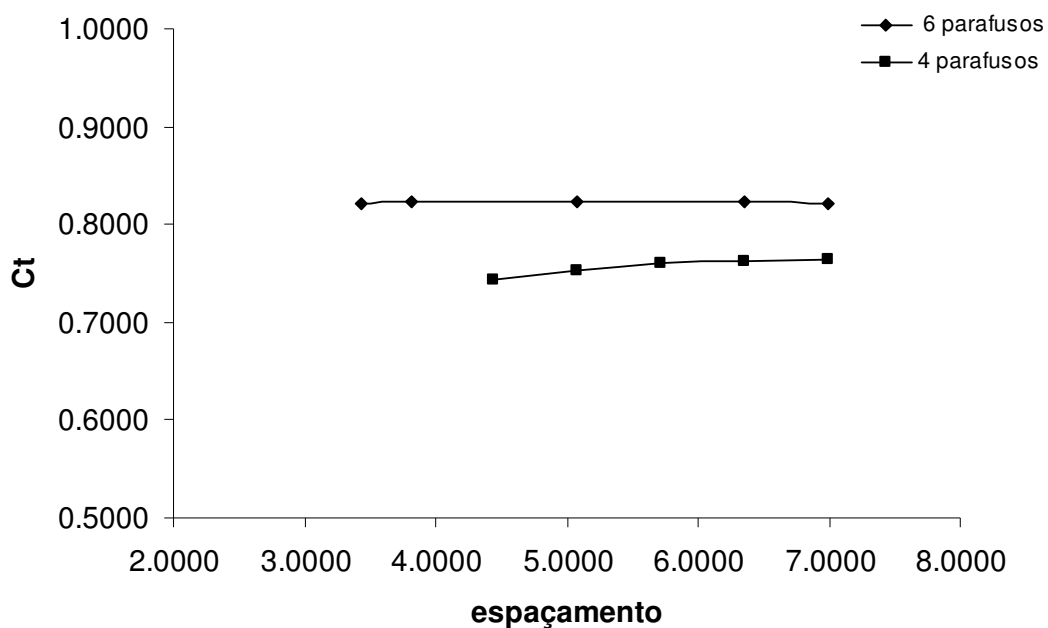


Figura 6.34 – gráfico C_t x espaçamento longitudinal entre furos

Analisando a Tabela 6.9 e a Figura 6.34, verifica-se que o espaçamento longitudinal entre furos, s , não influi na ruptura de cantoneiras parafusadas por uma fila de furação apenas, pois os resultados não apresentam diferenças significativas. Foram simulados modelos com s igual a $2,0d$ e $2,7d$ que apresentaram rasgamento, conforme os resultados teóricos obtidos segundo os

critérios de cálculo da norma brasileira NBR 8800. Estes resultados demonstram que cantoneiras ligadas por apenas uma fila de parafusos, com espaçamentos menores, têm maior probabilidade de apresentar rasgamento e a eficiência do perfil é baixa em relação a perfis que tem como modo de falha a ruptura da seção líquida. Porém, para melhores definições sobre o assunto, é necessário um número maior de simulações que não foram aqui realizadas, por este assunto não ser objeto de estudo deste trabalho.

Analisando a Figura 6.30, verifica-se que o modelo 95 apresentou tensão última de serviço na seção líquida, porém com uma distribuição de tensões próxima da ruptura por rasgamento. Os demais modelos descritos na Tabela 6.9 apresentaram, claramente, modo de falha de ruptura da seção líquida, como mostram, por exemplo, as Figura 6.31, Figura 6.32 e Figura 6.33.

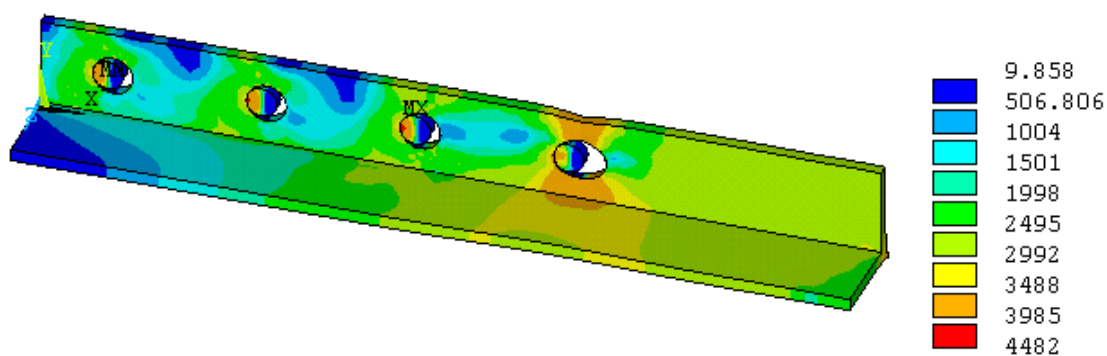
Os modelos 95, 94, 99, 57 e 67, com quatro parafusos, apresentaram uma pequena variação nos resultados para o coeficiente de eficiência, entre 74,38% e 76,38%. Os modelos 82, 83, 84, 62 e 85, com seis parafusos, apresentam o mesmo resultado para o coeficiente de eficiência, em torno de 82,20%. Para os modelos analisados, portanto, não houve alteração nos resultados com a variação de s . A diferença apresentada entre os coeficientes de eficiência de cada grupo de modelos está relacionada com a variação do número de parafusos por fila de furação entre os grupos.

Desta forma, a influência do comprimento da ligação, nos casos de cantoneiras ligadas excêntrica por uma única fila de furação, está praticamente relacionada somente ao número de parafusos.

As Tabela 6.10, Figura 6.35, Figura 6.36, Figura 6.37 e Figura 6.38 demonstram os resultados para a variável “distância entre furo e borda e_2 ”.

Tabela 6.10 – Resultados para variável e_2

VARIÁVEL e_2 DE CANTONEIRAS				
GEOMETRIA DA CANTONEIRA	MODELO 127	MODELO 128	MODELO 133	MODELO 130
Largura da aba	4,0579	4,9923	6,0597	6,9936
Comprimento	40,4000	40,4000	40,4000	40,4000
Espessura	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Parafusos/fila	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	1,9000	2,6000	3,4000	4,1000
s	6,3500	6,3500	6,3500	6,3500
e_c	0,9600	0,9600	0,9600	0,9600
l_c	25,4000	25,4000	25,4000	25,4000
A_n/A_g	0,7873	0,8292	0,8606	0,8799
CARGA APLICADA				
carga aplicada na simulação	11.991,60	15.729,20	19.998,80	23.734,40
RESULTADO				
C_t	0,8054	0,8132	0,8162	0,7820

Figura 6.35 – modelo 127, $e_2=1,90$.

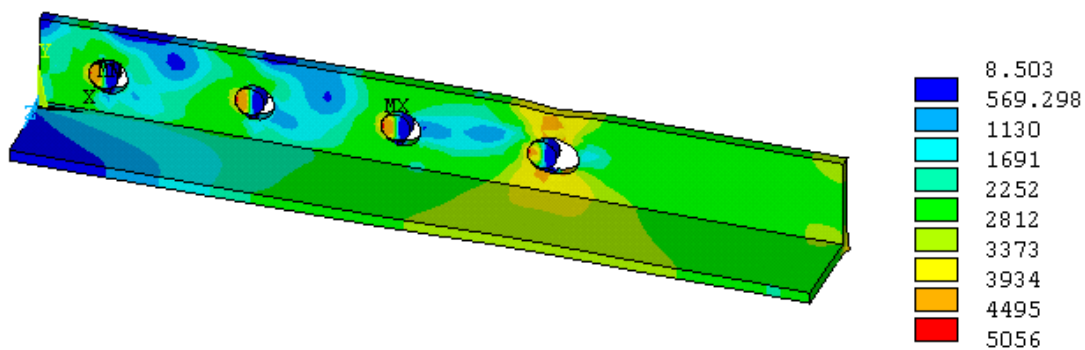


Figura 6.36 – modelo 128, $e_2=2,60$

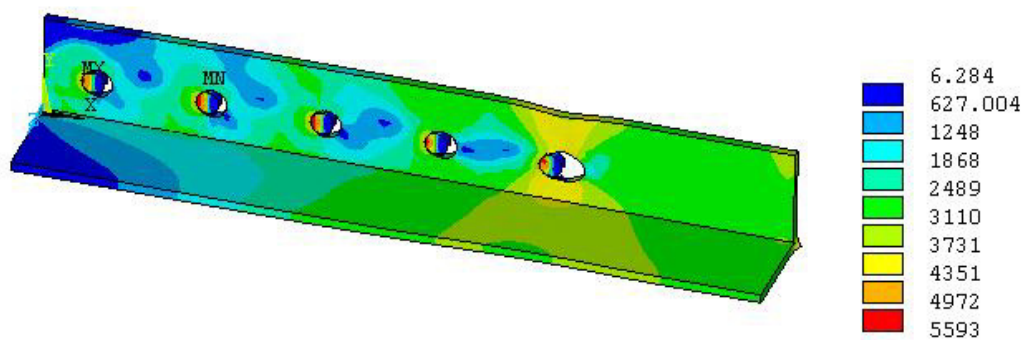


Figura 6.37 – modelo 133, $e_2=3,40$

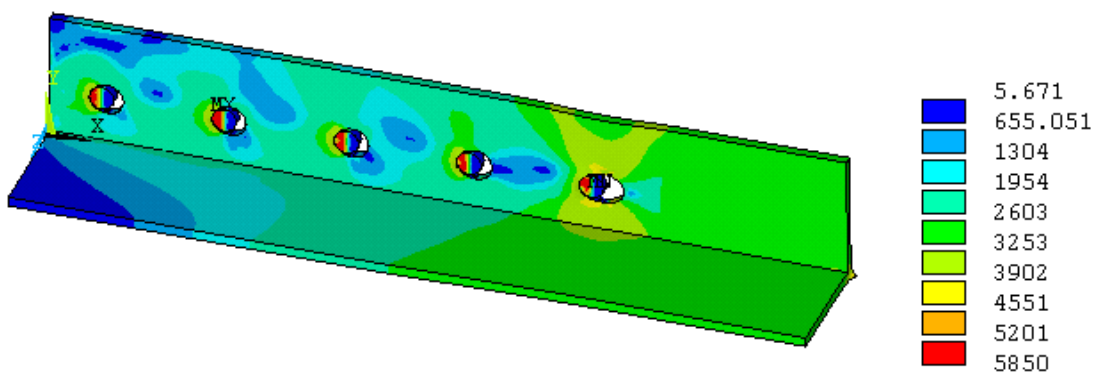


Figura 6.38 – modelo 130, $e_2=4,10$

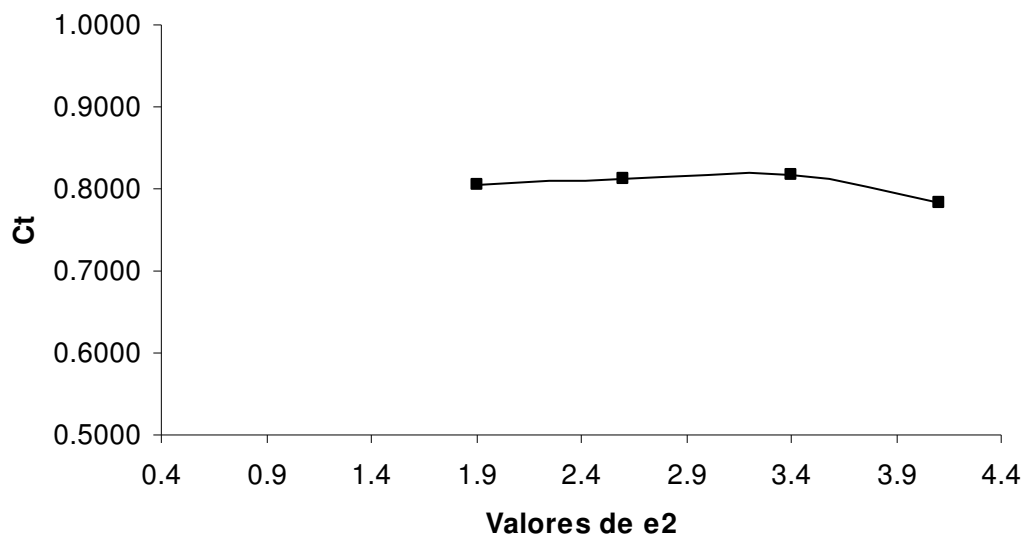


Figura 6.39 – gráfico $C_t \times e_2$

Analisando os resultados apresentados na Tabela 6.10 e na Figura 6.39, conclui-se que o coeficiente de eficiência cresce ligeiramente com a distância de furo a borda até certo valor, decrescendo, em seguida. Analisando as Figura 6.35, Figura 6.36, Figura 6.37 e Figura 6.38, verifica-se que nos modelos 127, 128 e 133, a ruptura ocorre com aproveitamento total de e_2 , enquanto no modelo 130, a ruptura ocorre com concentração de tensões maior próxima ao furo e sem aproveitamento total de e_2 . Este comportamento indica que a distribuição de tensões na fase plástica, para o tipo de modelo estudado, é mais uniforme em peças com pequenos e_2 .

Como observado na análise do comportamento das chapas, a NBR8800 estabelece o limite máximo de 12 vezes a espessura para a distância e_2 . Nos modelos estudados, este limite seria de 6cm, posto que a espessura utilizada foi de 0,5cm. No entanto, para distâncias entre furo e borda de 3,4cm, os resultados apresentados já indicam redução no valor do coeficiente de

eficiência, por excesso de e_2 . A distância de 3,4cm corresponde a cerca de 7 vezes a espessura, valor este bem inferior ao preconizado pela norma.

As Tabela 6.11, Figura 6.40, Figura 6.41, Figura 6.42 e Figura 6.43 demonstram os resultados para variável “excentricidade e_c ”.

Tabela 6.11 – Resultados para a variável “excentricidade e_c ”

VARIÁVEL e_c DE CANTONEIRAS					
GEOMETRIA DA CANTONEIRA	MODELO 131	MODELO 133	MODELO 134	MODELO 135	MODELO 136
Largura da aba	5,4193	6,0597	6,7001	7,3404	7,9806
Comprimento	40,4000	40,4000	40,4000	40,4000	40,4000
Espessura	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Parafusos/fila	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000
e_1	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2	3,4000	3,4000	3,4000	3,4000	3,4000
s	6,3500	6,3500	6,3500	6,3500	6,3500
e_c	0,4800	0,9600	1,4400	1,9200	2,4000
l_c	25,4000	25,4000	25,4000	25,4000	25,4000
A_n/A_g	0,8433	0,8606	0,8744	0,8858	0,8952
CARGA APLICADA					
carga aplicada na simulação	17.437,20	19.998,80	22.560,40	25.121,60	27.682,40
RESULTADO					
C_t	0,8187	0,8162	0,8104	0,7473	0,6844

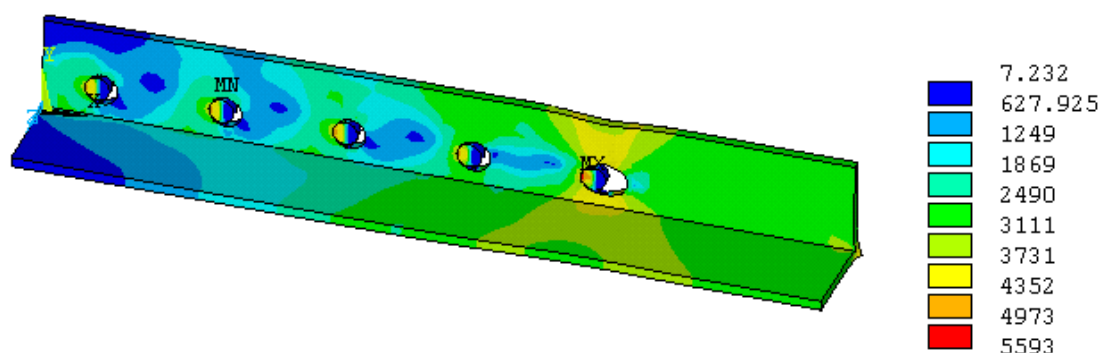


Figura 6.40 - modelo 131, $e_c = 0,48$

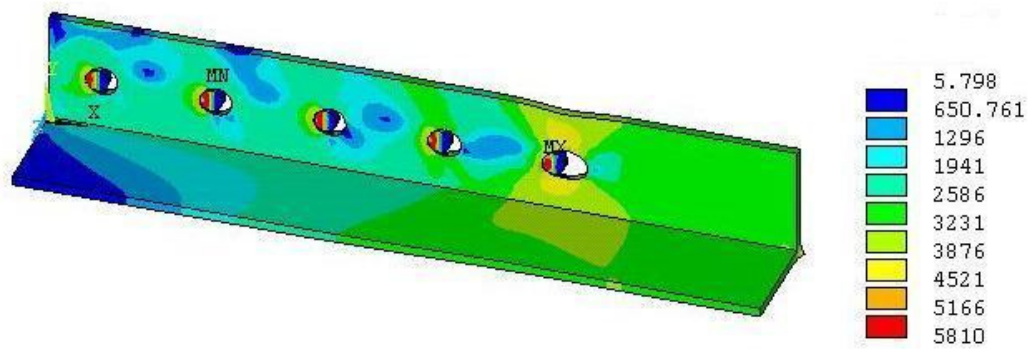


Figura 6.41 - modelo 134, $e_c = 1,44$

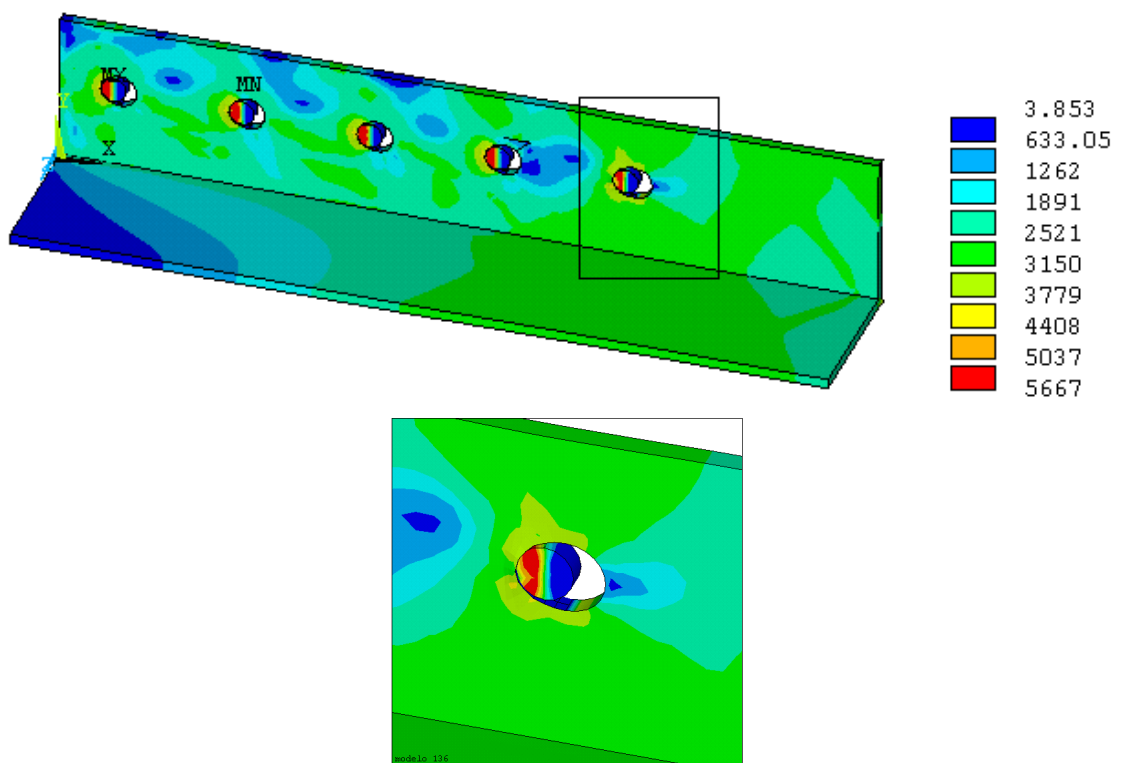


Figura 6.42 - modelo136, $e_c = 2,40$

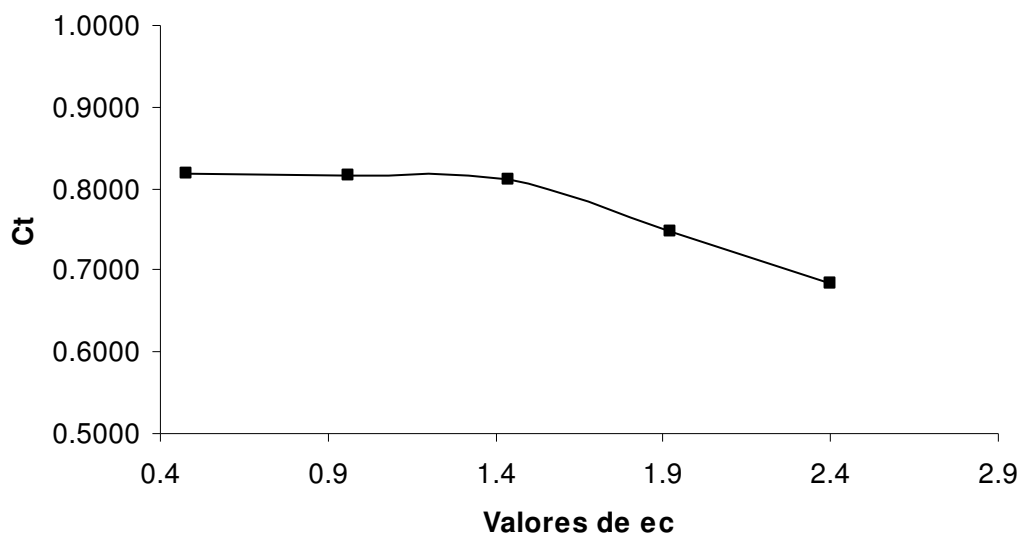


Figura 6.43 – gráfico $C_t \times e_c$ para cantoneiras

Analisando a Tabela 6.11 e a Figura 6.43, verifica-se que a excentricidade é uma variável de influência na eficiência de cantoneiras, pois os resultados apresentam variações consideráveis. Os resultados mostram que o coeficiente de eficiência diminui com o aumento da excentricidade, mais acentuadamente para excentricidades maiores.

As Figura 6.40, Figura 6.41, e Figura 6.42 demonstram os resultados dos modelos 131, 134 e 136 no momento da ruptura da seção líquida. Analisando tais figuras, nota-se que o aumento da excentricidade causa um distúrbio na distribuição de tensões da peça, ou seja, causa um aumento gradual do efeito *shear lag*, tornando o perfil mais susceptível à ruptura.

Vistos os resultados apresentados nas análises das variáveis de cantoneiras, verifica-se que o **número de parafusos por fila de furação**, a **distância de furo a borda** e a **excentricidade** são os principais fatores de influência deste tipo de ligação, onde a carga é concentrada em apenas um elemento da peça.

A distância de furo á borda e a excentricidade estão relacionados entre si, pois, em cantoneiras de mesma largura de aba e mesma espessura, a variação de um desses elementos implica na variação do outro. Além disso, valores excessivos de e_2 podem conduzir a valores muito pequenos do coeficiente de eficiência. Um limite para esta distância deve ser mais bem investigado. A partir dos resultados obtidos com base na variação desses dois elementos, desconsiderando-se o correspondente ao modelo 130, que não apresenta aproveitamento total de e_2 , pode-se propor um gráfico que mostra, por exemplo, a variação de C_t com uma variável que represente uma variação relativa destes elementos. Este gráfico é mostrado na Figura 6.44 e representa a variação do coeficiente de eficiência com a relação $e_2/(e_2 + e_c)$.

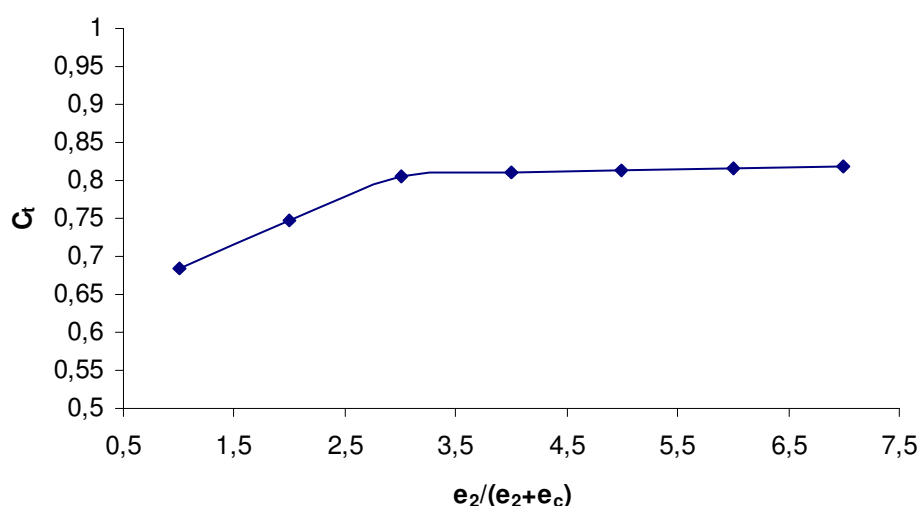


Figura 6.44 – gráfico $C_t \times e_2/(e_2 + e_c)$

Observa-se que o coeficiente de eficiência cresce com a variável $e_2/(e_2 + e_c)$ até $e_2/(e_2 + e_c) = 0,67$. Depois deste valor, o coeficiente fica praticamente constante em aproximadamente 81%. Vale observar que todos os modelos utilizados nesta análise possuem cinco parafusos, número este correspondente à maior eficiência em termos de número de parafusos.

A Tabela 6.8 e a Figura 6.29 mostram que para três e quatro parafusos, o coeficiente de eficiência corresponde respectivamente, a 60% e 90% do coeficiente obtido para cinco parafusos. Assim, pode-se sugerir, para a determinação do coeficiente C_t de cantoneiras ligadas por uma fila de furação de parafusos, com e_2 abaixo do valor máximo correspondente ao aproveitamento total da seção, o uso do gráfico da Figura 6.45, que já considera o erro de 3,74% previsto na escolha da malha de elementos finitos.

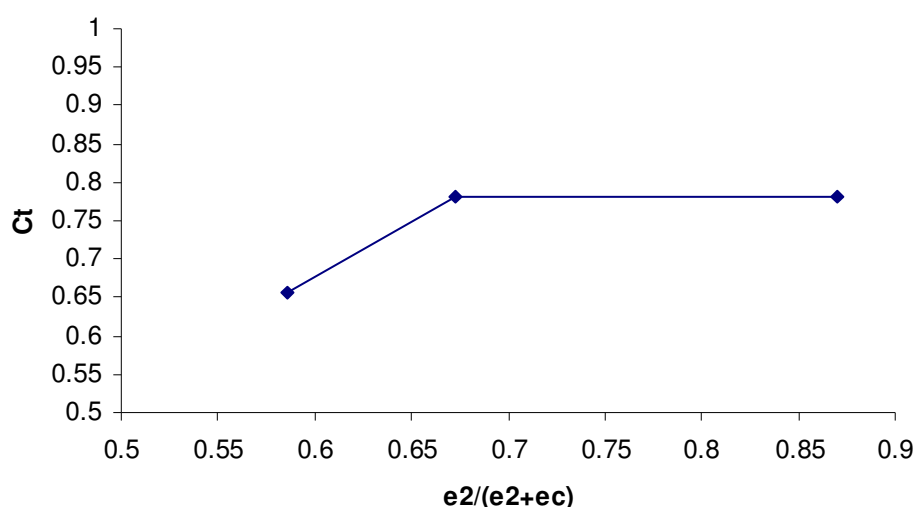


Figura 6.45 - gráfico prático $C_t \times e_2/(e_2 + e_c)$ para cinco ou mais parafusos.

Este gráfico, obtido por regressão linear, indica que, para ligações com cinco ou mais parafusos,

$$C_t = 1,45 \left(\frac{e_2}{e_2 + e_c} \right) - 0,19, \text{ para } \frac{e_2}{e_2 + e_c} < 0,67 \quad (6.2)$$

$$\text{e } C_t = 0,78, \text{ para } \frac{e_2}{e_2 + e_c} \geq 0,67 \quad (6.3)$$

Para ligações com três e quatro parafusos, multiplicar o C_t por 0,6 e 0,9, respectivamente.

Como dito no Capítulo 2, Munse e Chesson sugeriram que o coeficiente de eficiência C_t cresce com a redução da relação A_n / A_g . Isto é passível de ser observado, como consequência da alteração do valor da distância e_2 , pois à medida que e_2 diminui, se tem um melhor aproveitamento da seção com uma área líquida inferior.

Os estudos de Munse e Chesson e Kulak e Wu indicam que o fator *shear lag* é influenciado pela excentricidade e pelo comprimento da ligação como um todo. Os resultados deste trabalho indicam que o fator *shear lag* é influenciado pela excentricidade, pela distância de furo a borda e pelo comprimento da ligação, mais especificamente pelo número de parafusos.

Os estudos de Kulak e Wu (1997) indicam uma ruptura dos espécimes ensaiados (cantoneiras conectadas por uma aba apenas) similar à ruptura dos modelos simulados nesta pesquisa, isto é, ruptura em e_2 , seguida da ruptura do restante da seção líquida. Os resultados destes pesquisadores indicaram também que o comprimento da ligação influi na eficiência das peças ensaiadas. No entanto, estes estudos concluíram que o parâmetro C_t se torna praticamente constante e igual 1, a partir de quatro parafusos na fila de furação, enquanto nesta pesquisa a conclusão é mais conservadora: o parâmetro C_t somente se torna constante a partir de cinco parafusos e seu valor varia com a excentricidade e a distância entre furo e borda. Com quatro parafusos, o coeficiente C_t valeria 90% do valor correspondente a cinco parafusos.

7 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS PELA SIMULAÇÃO NUMÉRICA E PELAS NORMAS

Neste capítulo, é feita uma análise comparativa entre os resultados da simulação numérica e resultados encontrados de acordo com os critérios de cálculo adotados pelas normas abordadas nesta pesquisa, apresentando tabelas com diferenças percentuais entre tais resultados e destacando o critério de cálculo cujos resultados mais se aproximam daqueles obtidos na simulação apresentada.

7.1 Análise comparativa das chapas

As normas abordadas neste trabalho consideram que as chapas são peças com distribuição de tensão uniforme na fase plástica e, portanto, apresentam aproveitamento total da seção líquida. A norma BS 5950-1 difere das demais por seu critério de cálculo considerar como modo de falha o escoamento e não a ruptura da seção líquida de peças tracionadas e ligadas por parafusos e ainda por considerar um coeficiente de 1,2 a ser multiplicado à resistência, para

o tipo de aço estudado neste trabalho, o ASTM A-36 que equivale ao S 275 dessa norma.

As tabelas usadas na análise comparativa, que são apresentadas a seguir, mostram a carga aplicada a cada modelo, as cargas resistentes calculadas segundo os critérios das normas abordadas neste trabalho, a carga de ruptura obtida na simulação, as diferenças percentuais entre estas cargas e a resistência da chapa, calculada segundo critério proposto no capítulo 6.

A carga aplicada é calculada como o produto da área da seção líquida pela tensão última do aço e a carga de ruptura é o produto da carga aplicada pelo C_t obtido na simulação.

A Tabela 7.1 apresenta a comparação dos resultados obtidos para as chapas utilizadas na análise da influência da variável “espessura”.

Tabela 7.1 – Comparação de resultados para a variável “espessura” de chapas.

VARIÁVEL ESPESSURA DE CHAPAS				
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3	MODELO 4
Largura (cm)	8,3500	8,3500	8,3500	8,3500
Espessura (cm)	0,6350	0,7140	0,7940	0,8730
Diâmetro do furo (cm)	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Linhas de furação	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000
e_2/g	0,4176	0,4176	0,4176	0,4176
CARGAS APLICADA E CALCULADAS				
carga aplicada (kgf)	12.979,40	14.594,16	16.229,36	17.844,12
NBR 8800/AISC/Eurocódigo 3 (kgf)	12.979,40	14.594,16	16.229,36	17.844,12
BS 5950-1 (kgf)	9.734,55	10.945,62	12.172,02	13.383,09
C_t	0,908	0,909	0,911	0,911
Carga de ruptura da simulação (kgf)	11.785,30	13.266,09	14.784,95	16.255,99
DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE RESULTADO E NORNAS				
% entre simulação e NRB 8800/AISC/Eurocódigo 3	10,13%	10,01%	9,77%	9,77%
% entre simulação e BS 5950-1	-17,40%	-17,49%	-17,67%	-17,67%
RESISTÊNCIA À RUPTURA PROPOSTA	11.366,25	12.780,31	14.212,28	15.626,35

Analisando a Tabela 7.1, verifica-se que as normas NBR 8800 vigente, Revisão da NBR 8800 de agosto de 2003, AISC e Eurocódigo 3 apresentam uma resistência para as chapas de diferentes espessuras em torno de 10% maior que a obtida na simulação numérica e que a BS 5950-1 apresenta resistência para estas mesmas chapas em torno de 17,6% menor que a obtida na simulação. A resistência à ruptura proposta é obtida segundo a equação (6.1). Tal resistência tem uma diferença percentual da carga de ruptura que varia entre 3,56% e 3,87%.

As Tabela 7.2, Tabela 7.3 e Tabela 7.4 mostram as comparações dos resultados obtidos para as chapas utilizadas na análise da influência da “relação A_n/A_g ”, do “número de parafusos por fila de furação” e do “espaçamento longitudinal entre furos”. No item 6.1, verificou-se que estas variáveis não influem na resistência à ruptura das chapas, assim como a espessura. Logo as conclusões a respeito da comparação entre os resultados, considerando estas variáveis, são similares à da variável “espessura”.

Tabela 7.2 – Comparação de resultados para a “relação A_n / A_g ” em chapas.

VARIÁVEL RELAÇÃO A_n/A_g DE CHAPAS			
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 5	MODELO 6	MODELO 7
Largura (cm)	7,6900	7,9200	8,3500
Espessura (cm)	0,7140	0,7140	0,7140
Diâmetro do furo (cm)	1,6200	1,6200	1,6200
Linhas de furação	2,0000	2,0000	2,0000
Parafusos/fila	2,0000	2,0000	2,0000
A_n/A_g	0,5787	0,5909	0,6120
e_2/g	0,4884	0,4900	0,4893
CARGAS APLICADA E CALCULADAS			
carga aplicada (kgf)	12.709,20	13.366,08	14.594,16
NBR 8800/AISC/Eurocódigo 3 (kgf)	12.709,20	13.366,08	14.594,16
BS 5950-1 (kgf)	9.531,90	10.024,56	10.945,62
C_t	0,904	0,904	0,902
Carga de ruptura da simulação (kgf)	11.489,12	12.082,94	13.163,93
DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE RESULTADO E NORNAS			
% entre simulação e NRB 8800/AISC/Eurocódigo 3	10,62%	10,62%	10,86%
% entre simulação e BS 5950-1	-17,04%	-17,04%	-16,85%
RESISTÊNCIA À RUPTURA PROPOSTA	11.012,57	11.579,04	12.644,18

Analisando a Tabela 7.2, verifica-se que a norma BS 5950-1 sugere, como no caso anterior, resistência inferior à obtida na simulação, enquanto as demais sugerem resistências superiores. A resistência à ruptura proposta, obtida, como dito, pela equação (6.1), tem uma diferença percentual da carga de ruptura que varia entre 3,95% e 4,15%.

Tabela 7.3 – Comparação de resultados para a variável “número de parafusos por fila de furação” em chapas.

VARIÁVEL PARAFUSOS/FILA EM CHAPAS					
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 10	MODELO 11	MODELO 2	MODELO 12	MODELO 13
Largura (cm)	8,3500	8,3500	8,3500	8,3500	8,3500
Espessura (cm)	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140
Diâmetro do furo (cm)	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Linhas de furação	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000
Parafusos/fila	2,0000	3,0000	4,0000	5,0000	6,0000
e2/g	0,4176	0,4176	0,4176	0,4176	0,4176
CARGAS APLICADA E CALCULADAS					
carga aplicada (kgf)	14594,16	14594,16	14594,16	14594,16	14594,16
NBR 8800/AISC/Eurocódigo 3 (kgf)	14.594,16	14.594,16	14.594,16	14.594,16	14.594,16
BS 5950-1 (kgf)	10945,62	10945,62	10945,62	10945,62	10945,62
C_t	0,905	0,905	0,905	0,905	0,905
Carga de ruptura da simulação (kgf)	13207,71	13207,71	13207,71	13207,71	13207,71
DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE RESULTADO E NORNAS					
% entre simulação e NRB 8800/AISC/Eurocódigo 3	10,50%	10,50%	10,50%	10,50%	10,50%
% entre simulação e BS 5950-1	-17,13%	-17,13%	-17,13%	-17,13%	-17,13%
RESISTÊNCIA A RUPTURA PROPOSTA	12.780,28	12.780,28	12.780,28	12.780,28	12.780,28

Tabela 7.4 – Comparação de resultados para a variável “espaçamento longitudinal entre furos” de chapas.

VARIÁVEIS DE CHAPAS						
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 14	MODELO 15	MODELO 2	MODELO 16	MODELO 17	MODELO 18
Largura (cm)	8,3500	8,3500	8,3500	8,3500	8,3500	8,3500
Espessura (cm)	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140
Diâmetro do furo (cm)	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Filas de furação	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000
Filas de furação	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	6,0000
s	3,5000	3,8000	4,0000	4,3000	5,0000	5,0000
e2/g	0,4176	0,4176	0,4176	0,4176	0,4176	0,4176
CARGAS APLICADA E CALCULADAS						
carga aplicada (kgf)	14.594,16	14.594,16	14.594,16	14.594,16	14.594,16	14.594,16
NBR 8800/AISC/Eurocódigo 3 (kgf)	14.594,16	14.594,16	14.594,16	14.594,16	14.594,16	14.594,16
BS 5950-1 (kgf)	10.945,62	10.945,62	10.945,62	10.945,62	10.945,62	10.945,62
C_t	0,905	0,905	0,905	0,905	0,905	0,905
Carga de ruptura da simulação (kgf)	13.207,71	13.207,71	13.207,71	13.207,71	13.207,71	13.207,71
DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE RESULTADO E NORNAS						
% entre simulação e NRB 8800/AISC/Eurocódigo 3	10,50%	10,50%	10,50%	10,50%	10,50%	10,50%
% entre simulação e BS 5950-1	-17,13%	-17,13%	-17,13%	-17,13%	-17,13%	-17,13%
RESISTÊNCIA À RUPTURA PROPOSTA	12.780,31	12.780,31	12.780,31	12.780,31	12.780,31	12.780,31

Nos dois últimos casos, a norma britânica apresenta uma resistência cerca de 17% inferior à obtida na simulação e as demais normas apresentam uma resistência 10,5% superior. A diferença percentual entre a resistência à ruptura proposta e a carga de ruptura da simulação é de 3,24%.

A Tabela 7.5 mostra a comparação dos resultados obtidos para as chapas utilizadas na análise da influência do “número de filas de furação”.

Tabela 7.5 – Comparação de resultados para a variável “número de filas de furação” em chapas.

VARIÁVEL FILAS DE FURAÇÃO EM CHAPAS						
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 8	MODELO 78	MODELO 79	MODELO 75	MODELO 76	MODELO 77
Largura	3,8000	7,6000	11,4000	15,2000	19,0000	22,8000
Espessura	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140
Diâmetro do furo	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Linhas de furação	1,0000	2,0000	3,0000	4,0000	5,0000	6,0000
Parafusos/fila	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000
e ₂ /g	0,0000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
CARGAS APLICADA E CALCULADAS						
carga aplicada (kgf)	6.226,08	12.452,16	18.678,24	24.904,32	31.130,40	37.356,48
NBR 8800/AISC/Eurocódigo 3 (Kgf)	6.226,08	12.452,16	18.678,24	24.904,32	31.130,40	37.356,48
BS 5950-1 (Kgf)	4.669,56	9.339,12	14.008,68	18.678,24	23.347,80	28.017,36
Ct	0,869	0,866	0,917	0,936	0,929	0,933
Carga de ruptura da simulação (Kgf)	5.410,46	10.783,57	17.127,95	23.310,44	28.920,14	34.853,60
DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE RESULTADO E NORNAS						
% entre simulação e NRB 8800/AISC/Eurocódigo 3	15,07%	15,47%	9,05%	6,84%	7,64%	7,18%
% entre simulação e BS 5950-1	-13,69%	-13,39%	-18,21%	-19,87%	-19,27%	-19,61%
RESISTÊNCIA À RUPTURA PROPOSTA	5.167,65	10.771,12	16.156,68	21.542,24	26.927,80	32.313,36
% ENTRE SIMULAÇÃO E RESISTÊNCIA PROPOSTA	-4,49%	-0,12%	-5,67%	-7,59%	-6,89%	-7,29%

Analisando a Tabela 7.5, verifica-se que as normas NBR 8800, AISC e Eurocódigo 3 apresentam resistências para as chapas com diferentes números de filas de furação maiores que as obtidas na simulação numérica e que as diferenças percentuais entre estas resistências variam entre 7,18% (modelo77) e 15,07% (modelo 8). Nota-se ainda que há uma redução na diferença percentual entre tais resistências com o aumento do número de filas de furação. Tal redução é justificada pelo aumento da eficiência da chapa à proporção que a carga é mais bem distribuída na área líquida como explicado no item 6.1. A norma BS 5950-1 apresenta resistências menores que as obtidas na simulação numérica com diferenças percentuais que variam de 13,39% (modelo 78) a 19,87% (modelo 75); estas diferenças são maiores para chapas com maiores eficiências.

Em termos numéricos, o aumento da eficiência da chapa significa que o C_t aproxima-se de 1, ou seja, que a resistência da chapa aproxima-se da resistência total da área líquida, como considerado pelo critério de cálculo das normas NBR 8800, AISC e Eurocódigo 3. Assim, a diferença percentual entre as normas analisadas e os resultados obtidos diminui com o crescimento do número de filas de furação. À medida que há um acréscimo na eficiência da chapa, sua resistência aproxima-se daquela considerada no critério de eficiência total na ruptura. Quanto ao critério da norma britânica, verifica-se exatamente o contrário. Nota-se ainda que a faixa de variação da diferença percentual entre os resultados obtidos pelas normas NBR 8800, AISC e Eurocódigo 3 e os resultados obtidos na simulação é maior que a faixa de variação da diferença percentual entre os resultados da norma BS 5950-1 e estes resultados.

As resistências sugeridas foram calculadas segundo os critérios de cálculo propostos no capítulo anterior, ou seja, com $C_t = 0,83$ para chapa com uma fila de furação e $C_t = 0,93 - 0,13(e_2 / g)$ para chapas com duas ou mais filas de furação. Estas resistências são menores que as obtidas na simulação e crescem aproximadamente na mesma ordem em que cresce o número de filas de furação nas chapas. A diferença percentual entre estas resistências é de 4,49%, para uma fila de furação, e varia de 0,12% a 7,59%, para duas ou mais filas de furação.

A Figura 7.1 mostra os gráficos “Resistência x Número de filas de furação” obtidos pelo critério de cada norma, pela simulação e pela equação (6.1) – resistência proposta.

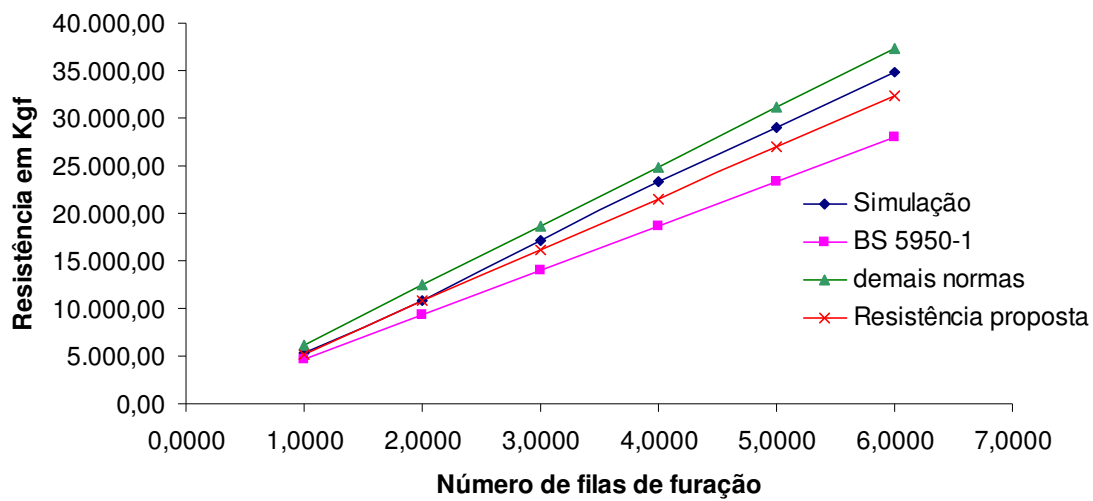


Figura 7.1 – Resultados obtidos para a variável “número de filas de furação” em chapas.

As Tabela 7.6 e Tabela 7.7 mostram a comparação dos resultados obtidos para as chapas utilizadas na análise da influência da variável “ e_2/g ”.

Tabela 7.6 – Comparação de resultados para a variável “ e_2/g ” em chapas com duas filas de furação.

VARIÁVEL RELAÇÃO e_2/g DE CHAPAS COM DUAS FILAS DE FURAÇÃO									
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 19	MODELO 20	MODELO 21	MODELO 22	MODELO 23	MODELO 24	MODELO 25	MODELO 2	MODELO 26
Largura (cm)	7,7900	7,7900	7,7900	8,0700	8,0700	8,0700	8,0700	8,3500	8,3500
Espessura (cm)	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140
Diâmetro do furo (cm)	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Filas de furação	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000
e_2/g	0,4762	0,5527	0,6356	0,4450	0,5138	0,5905	0,6764	0,4176	0,4800
carga aplicada (kgf)	12.994,80	12.994,80	12.994,80	13.794,48	13.794,48	13.794,48	13.794,48	14.594,16	14.594,16
NBR 8800/AISC/Eurocódigo 3 (kgf)	12.994,80	12.994,80	12.994,80	13.794,48	13.794,48	13.794,48	13.794,48	14.594,16	14.594,16
BS 5950-1 (kgf)	9.746,10	9.746,10	9.746,10	10.345,86	10.345,86	10.345,86	10.345,86	10.945,62	10.945,62
C_t	0,9050	0,8950	0,8800	0,9050	0,9000	0,8850	0,8700	0,9050	0,9000
Carga de ruptura da simulação (kgf)	11.760,29	11.630,35	11.435,42	12.484,00	12.415,03	12.208,11	12.001,20	13.207,71	13.134,74
% entre simulação e NRB 8800/AISC/Eurocódigo 3	-10,50%	-11,73%	-13,64%	-10,50%	-11,11%	-12,99%	-14,94%	-10,50%	-11,11%
% entre simulação e BS 5950-1	17,13%	16,20%	14,77%	17,13%	16,67%	15,25%	13,79%	17,13%	16,67%
Resistência à ruptura proposta	11.280,72	11.151,47	11.011,48	12.030,92	11.907,44	11.769,86	11.615,92	12.780,31	12.661,80
% entre simulação e resistência proposta	-4,08%	-4,12%	-3,71%	-3,63%	-4,09%	-3,59%	-3,21%	-3,24%	-3,60%

VARIÁVEL RELAÇÃO e_2/g DE CHAPAS COM DUAS FILAS DE FURAÇÃO									
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 27	MODELO 28	MODELO 29	MODELO 30	MODELO 31	MODELO 32	MODELO 33	MODELO 34	MODELO 35
Largura (cm)	8,3500	8,3500	8,3500	8,6300	8,6300	8,6300	8,6300	8,6300	8,6300
Espessura (cm)	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140
Diâmetro do furo (cm)	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Filas de furação	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000
e_2/g	0,5490	0,6284	0,7172	0,3934	0,4495	0,5129	0,5842	0,6662	0,7580
carga aplicada (kgf)	14594,16	14594,16	14594,16	15393,84	15393,84	15393,84	15393,84	15393,84	15393,84
NBR 8800/AISC/Eurocódigo 3 (kgf)	14.594,16	14.594,16	14.594,16	15.393,84	15.393,84	15.393,84	15.393,84	15.393,84	15.393,84
BS 5950-1 (kgf)	10945,62	10945,62	10945,62	11545,38	11545,38	11545,38	11545,38	11545,38	11545,38
C_t	0,8900	0,8800	0,8650	0,9050	0,9000	0,8950	0,8850	0,8700	0,8550
Carga de ruptura da simulação (kgf)	12988,80	12842,86	12623,95	13931,43	13854,46	13777,49	13623,55	13392,64	13161,73
% entre simulação e NRB 8800/AISC/Eurocódigo 3	-12,36%	-13,64%	-15,61%	-10,50%	-11,11%	-11,73%	-12,99%	-14,94%	-16,96%
% entre simulação e BS 5950-1	15,73%	14,77%	13,29%	17,13%	16,67%	16,20%	15,25%	13,79%	12,28%
Resistência à ruptura proposta	12.530,99	12.380,38	12.211,87	13.529,05	13.416,83	13.289,83	13.147,23	12.983,04	12.799,33
% entre simulação e resistência proposta	-3,52%	-3,60%	-3,26%	-2,89%	-3,16%	-3,54%	-3,50%	-3,06%	-2,75%

Tabela 7.7 – Comparação de resultados para a variável “ e_2/g ” em chapas com três filas de furação.

VARIÁVEL RELAÇÃO e_2/g DE CHAPAS COM TRÊS FILAS DE FURAÇÃO											
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 36	MODELO 37	MODELO 38	MODELO 9	MODELO 39	MODELO 40	MODELO 41	MODELO 42	MODELO 43	MODELO 44	
Largura (cm)	10,6800	11,1200	11,1200	11,5800	11,5800	11,5800	12,0400	12,0400	12,0400	12,0400	
Espessura (cm)	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	
Diâmetro do furo (cm)	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	
Filas de furação	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	
e_2/g	0,5523	0,5191	0,6163	0,4884	0,5820	0,6831	0,4612	0,5476	0,6448	0,7500	
carga aplicada (kgf)	16.621,92	17.878,56	17.878,56	19.192,32	19.192,32	19.192,32	20.506,08	20.506,08	20.506,08	20.506,08	
NBR 8800/AISC/Eurocódigo 3 (kgf)	16.621,92	17.878,56	17.878,56	19.192,32	19.192,32	19.192,32	20.506,08	20.506,08	20.506,08	20.506,08	
BS 5950-1 (kgf)	12.466,44	13.408,92	13.408,92	14.394,24	14.394,24	14.394,24	15.379,56	15.379,56	15.379,56	15.379,56	
C_t	0,9000	0,9100	0,8900	0,9150	0,9050	0,8850	0,9200	0,9050	0,8900	0,8750	
Carga de ruptura da simulação (kgf)	14.959,73	16.269,49	15.911,92	17.560,97	17.369,05	16.985,20	18.865,59	18.558,00	18.250,41	17.942,82	
% entre simulação e NRB 8800/AISC/Eurocódigo 3	-11,11%	-9,89%	-12,36%	-9,29%	-10,50%	-12,99%	-8,70%	-10,50%	-12,36%	-14,29%	
% entre simulação e BS 5950-1	16,67%	17,58%	15,73%	18,03%	17,13%	15,25%	18,48%	17,13%	15,73%	14,29%	
Resistência à ruptura proposta	14.264,89	15.420,50	15.194,70	16.630,22	16.396,85	16.144,42	17.841,29	17.610,98	17.351,73	17.071,31	
% entre simulação e resistência proposta	-4,64%	-5,22%	-4,51%	-5,30%	-5,60%	-4,95%	-5,43%	-5,10%	-4,92%	-4,86%	
VARIÁVEL RELAÇÃO e_2/g DE CHAPAS COM TRÊS FILAS DE FURAÇÃO											
GEOMETRIA DA CHAPA	MODELO 45	MODELO 46	MODELO 47	MODELO 48	MODELO 49	MODELO 50	MODELO 51	MODELO 52	MODELO 53	MODELO 54	MODELO 55
Largura (cm)	12,4800	12,4800	12,4800	12,4800	12,4800	12,9400	12,9400	12,9400	12,9400	12,9400	12,9400
Espessura (cm)	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140	0,7140
Diâmetro do furo (cm)	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
Filas de furação	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
e_2/g	0,4378	0,5146	0,6041	0,7049	0,8140	0,4158	0,4908	0,5704	0,6632	0,7678	0,8808
carga aplicada (kgf)	21.762,72	21.762,72	21.762,72	21.762,72	21.762,72	23.076,48	23.076,48	23.076,48	23.076,48	23.076,48	23.076,48
NBR 8800/AISC/Eurocódigo 3 (kgf)	21.762,72	21.762,72	21.762,72	21.762,72	21.762,72	23.076,48	23.076,48	23.076,48	23.076,48	23.076,48	23.076,48
BS 5950-1 (kgf)	16.322,04	16.322,04	16.322,04	16.322,04	16.322,04	17.307,36	17.307,36	17.307,36	17.307,36	17.307,36	17.307,36
C_t	0,9200	0,9050	0,8950	0,8800	0,8650	0,9200	0,9100	0,9000	0,8850	0,8700	0,8600
Carga de ruptura da simulação (kgf)	20.021,70	19.695,26	19.477,63	19.151,19	18.824,75	21.230,36	20.999,60	20.768,83	20.422,68	20.076,54	19.845,77
% entre simulação e NRB 8800/AISC/Eurocódigo 3	-8,70%	-10,50%	-11,73%	-13,64%	-15,61%	-8,70%	-9,89%	-11,11%	-12,99%	-14,94%	-16,28%
% entre simulação e BS 5950-1	18,48%	17,13%	16,20%	14,77%	13,29%	18,48%	17,58%	16,67%	15,25%	13,79%	12,79%
Resistência à ruptura proposta	19.000,76	18.783,55	18.530,20	18.245,01	17.936,53	20.213,89	19.988,80	19.749,99	19.471,45	19.157,89	18.818,74
% entre simulação e resistência proposta	-5,10%	-4,63%	-4,86%	-4,73%	-4,72%	-4,79%	-4,81%	-4,91%	-4,66%	-4,58%	-5,18%

Analisando a Tabela 7.6 e Tabela 7.7, verifica-se, como nos casos anteriores, que as resistências obtidas segundo o critério de cálculo das normas NBR 8800, AISC e Eurocódigo 3 são maiores que as obtidas na simulação numérica e que as resistências obtidas segundo o critério de cálculo da norma BS 5950-1 são menores. As diferenças percentuais entre os resultados preconizados pelas normas NBR 8800, AISC e Eurocódigo 3 e os resultados obtidos na simulação variam de 10,50% (modelos 19, 22, 2 e 30) a 16,96% (modelo 35), para chapas com duas filas de furação, e de 8,70% (modelos 41, 45 e 50) a 16,28% (modelo 55), para chapas com três filas de furação. As diferenças percentuais entre os resultados obtidos com o critério da norma BS 5950-1 e os resultados obtidos na simulação variam de 12,28% (modelo 35) a 17,13% (modelos 19, 22, 2 e 30), para chapas com duas filas de furação, e de 12,79% (modelo 55) a 18,48% (modelos 41, 45 e 50), para chapas com três filas de furação.

Verifica-se ainda, nos resultados da análise comparativa em questão, que, para chapas de mesma largura, a faixa de variação das diferenças percentuais entre os resultados obtidos pelas normas NBR 8800, AISC e Eurocódigo 3 e os resultados obtidos na simulação é diferente da faixa de variação das diferenças entre os resultados obtidos pela norma BS 5950-1 e pela simulação. O mesmo foi verificado na análise dos resultados obtidos para a variável “número de filas de furação”.

As resistências sugeridas foram calculadas segundo os critérios de cálculo propostos no capítulo anterior, ou seja, $C_t = 0,93 - 0,13(e_2 / g)$, para chapas com duas e três filas de furação. Estas resistências são menores que as obtidas na simulação em até 4,12%, para chapas com duas filas de furação, e 5,6%, para chapas com três filas de furação.

A Figura 7.2 e a Figura 7.3 mostram, em forma de gráficos, os resultados contidos nas tabelas para as chapas de maiores larguras, com duas e três filas de furação, respectivamente.

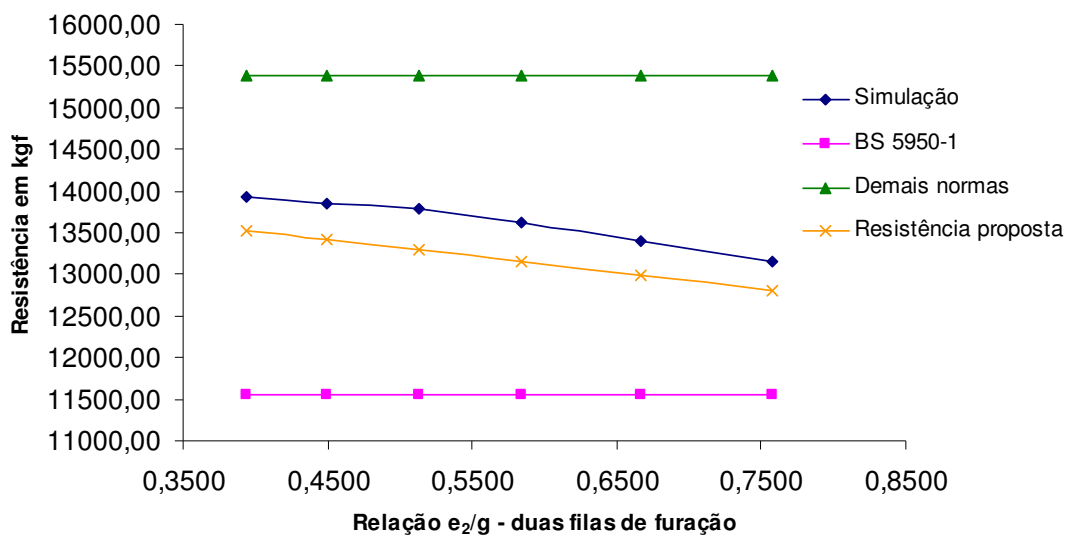


Figura 7.2 – Comparação de resultados para a variável “ e_2/g ” em chapas com duas filas de furação.

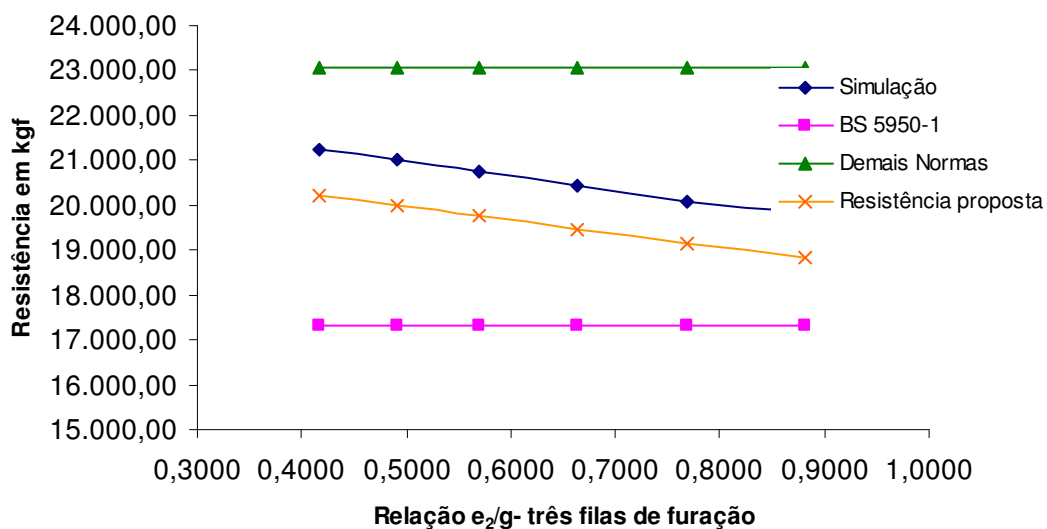


Figura 7.3 – Comparação de resultados para a variável “ e_2/g ” em chapas com três filas de furação.

7.2 Análise comparativa das cantoneiras

A maior parte das normas abordadas neste trabalho considera que as cantoneiras ligadas excentricamente são peças que não apresentam uma distribuição de tensões uniforme e, por isso, não apresentam aproveitamento total da seção transversal líquida. Estas normas consideram, como modo de falha destas peças, a ruptura da área líquida. A norma BS 5950-1, como já dito, difere-se das demais por seu critério de cálculo considerar como modo de falha o escoamento da seção líquida de peças tracionadas e ligadas por parafusos e ainda por considerar um coeficiente de 1,2 a ser multiplicado à resistência, para o tipo de aço estudado neste trabalho, o ASTM A-36 que equivale ao S 275 desta norma.

Como no caso das chapas, as tabelas usadas na análise comparativa, que são apresentadas a seguir, mostram a carga aplicada a cada modelo, as cargas resistentes calculadas segundo os critérios das normas abordadas neste trabalho, a carga de ruptura obtida na simulação, as diferenças percentuais entre estas cargas e a resistência da cantoneira, calculada segundo critério proposto no capítulo 6.

As Tabela 7.8 e Figura 7.4 apresentam a comparação dos resultados obtidos para as cantoneiras utilizadas na análise da influência da variável “número de parafusos”.

Tabela 7.8 - Comparação de resultados para a variável “número de parafusos” em cantoneiras.

VARIÁVEL Nº PARAFUSOS EM CANTONEIRAS					
GEOMETRIA DA CANTONEIRA	MODELO60	MODELO 57	MODELO 61	MODELO 62	MODELO 63
Largura da aba (cm)	6,5000	6,5000	6,5000	6,5000	6,5000
Espessura (cm)	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000
Diâmetro do furo (cm)	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
e_2	4,1000	4,1000	4,1000	4,1000	4,1000
e_c	0,4816	0,4816	0,4816	0,4816	0,4816
Parafusos/fila	3,0000	4,0000	5,0000	6,0000	7,0000
l_c	12,7000	19,0500	25,4000	31,7500	38,1000
CARGAS CALCULADAS E APLICADA					
NBR 8800 vigente (kgf)	28.777,60	28.777,60	28.777,60	28.777,60	28.777,60
NBR 8800 revisão ago/03 (kgf)	30.470,40	30.470,40	30.470,40	30.470,40	30.470,40
AISC (kgf)	30.470,40	30.470,40	30.470,40	30.470,40	30.470,40
Eurocódigo 3 (kgf)	23.699,20	23.699,20	23.699,20	23.699,20	23.699,20
BS 5950-1 (kgf)	19.692,00	19.692,00	19.692,00	19.692,00	19.692,00
Carga aplicada (kgf)	33.856,00	33.856,00	33.856,00	33.856,00	33.856,00
C_t	0,5034	0,7629	0,8220	0,8226	0,8227
Carga de ruptura (kgf)	17.043,11	25.828,74	27.829,63	27.849,95	27.853,33
DIFERENÇA PERCENTUAL ENTRE RESULTADO E NORMA					
% entre simulação e NBR 8800 vigente	68,85%	11,42%	3,41%	3,33%	3,32%
%entre simulação e NBR 8800 revisão ago/03	78,78%	17,97%	9,49%	9,41%	9,40%
% entre simulação e AISC	78,78%	17,97%	9,49%	9,41%	9,40%
% entre simulação e Eurocódigo 3	39,05%	-8,24%	-14,84%	-14,90%	-14,91%
%entre simulação e BS 5950-1	15,54%	-23,76%	-29,24%	-29,29%	-29,30%
Resistência à ruptura proposta	20.711,81	23.766,91	26.407,68	26.407,68	26.407,68
% entre simulação e resistência proposta	21,53%	-7,98%	-5,11%	-5,18%	-5,19%

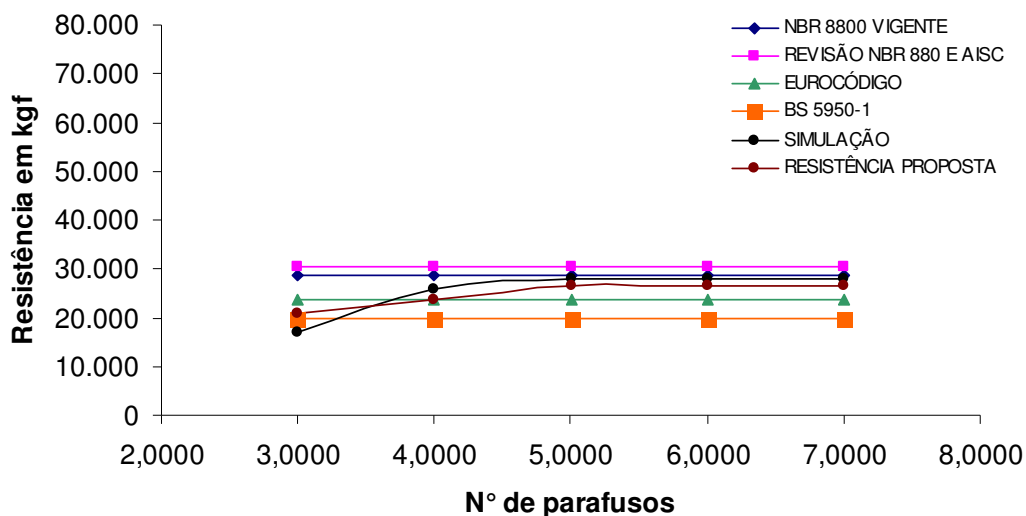


Figura 7.4 - Comparação de resultados para a variável “número de parafusos” em cantoneiras.

Analisando a Tabela 7.8, verifica-se que o modelo com três parafusos, em que o modo de falha, apesar de ser a ruptura da área líquida, mostra uma distribuição de tensões próxima do rasgamento, apresenta resultados com grandes diferenças percentuais não conservadoras. Isto confirma o fato, já comentado no capítulo anterior, de que as peças que rompem por rasgamento apresentam um coeficiente de aproveitamento do material muito inferior aos das peças que rompem na seção líquida. O fenômeno do rasgamento precisa ser mais bem estudado, de modo a se melhorar a compreensão do comportamento de peças tracionadas parafusadas.

Os resultados expostos nesta tabela indicam que o Eurocódigo 3 e são conservadoras em relação aos resultados da simulação e as demais normas apresentam resultados não-conservadores, sendo o Eurocódigo 3 menos conservador do que a BS 5950-1. Esta tabela mostra ainda que a NBR 8800 vigente é a norma que mais se aproxima dos resultados obtidos na simulação, porém com resultados não conservadores.

A diferença percentual entre a resistência calculada com o auxílio das equações (6.2) e (6.3) e a obtida na simulação situa-se em torno de 8% para o modelo com quatro parafusos e em torno de 5% para os modelos com cinco ou mais parafusos.

A Tabela 7.9, a Figura 7.5 e a Figura 7.6 apresentam a comparação dos resultados obtidos para as cantoneiras utilizadas na análise da influência da variável “espaçamento longitudinal entre furos”.

Tabela 7.9 - Comparação de resultados para a variável “espaçamento longitudinal entre furos” em cantoneiras.

VARIÁVEL s DE CANTONEIRAS					
GEOMETRIA DA CANTONEIRA	MODELO 95	MODELO 94	MODELO 99	MODELO 57	MODELO 67
Largura da aba (cm)	6,5000	6,5000	6,5000	6,5000	6,5000
Espessura (cm)	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000
Diâmetro do furo (cm)	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
e_2	4,1000	4,1000	4,1000	4,1000	4,1000
e_c	0,4816	0,4816	0,4816	0,4816	0,4816
Parafusos/fila	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
s	4,4500	5,0800	5,7150	6,3500	6,9900
l_c	13,3500	15,2400	17,1450	19,0500	20,9700
CARGAS CALCULADAS E APLICADA					
NBR 8800 vigente (kgf)	28.777,60	28.777,60	28.777,60	28.777,60	28.777,60
NBR 8800 revisão ago/03 (kgf)	30.470,40	30.470,40	30.470,40	30.470,40	30.470,40
AISC (kgf)	30.470,40	30.470,40	30.470,40	30.470,40	30.470,40
Eurocódigo 3 (kgf)	19.636,48	20.990,72	22.344,96	23.699,20	23.699,20
BS 5950-1 (kgf)	19.692,00	19.692,00	19.692,00	19.692,00	19.692,00
Carga aplicada (kgf)	33.856,00	33.856,00	33.856,00	33.856,00	33.856,00
C_t	0,7438	0,7537	0,7598	0,7629	0,7638
Carga de ruptura (kgf)	25.182,09	25.517,27	25.723,79	25.828,74	25.859,21
DIFERENÇA PERCENTUAL ENTRE RESULTADO E NORMA					
% entre simulação e NBR 8800 vigente	14,28%	12,78%	11,87%	11,42%	11,29%
%entre simulação e NBR 8800 revisão ago/03	21,00%	19,41%	18,45%	17,97%	17,83%
% entre simulação e AISC	21,00%	19,41%	18,45%	17,97%	17,83%
% entre simulação e Eurocódigo 3	-22,02%	-17,74%	-13,14%	-8,24%	-8,35%
%entre simulação e BS 5950-1	-21,80%	-22,83%	-23,45%	-23,76%	-23,85%
Resistência à ruptura proposta	23.766,91	23.766,91	23.766,91	23.766,91	23.766,91
% entre simulação e resistência proposta	-5,62%	-6,86%	-7,61%	-7,98%	-8,09%

VARIÁVEIS DE CANTONEIRAS					
DADOS DA CANTONEIRA	MODELO 82	MODELO 83	MODELO 84	MODELO 62	MODELO 85
Largura da aba (cm)	6,5000	6,5000	6,5000	6,5000	6,5000
Espessura (cm)	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000
Diâmetro do furo (cm)	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
e_2	4,1000	4,1000	4,1000	4,1000	4,1000
e_c	0,4816	0,4816	0,4816	0,4816	0,4816
Parafusos/fila	6,0000	6,0000	6,0000	6,0000	6,0000
s	3,4300	3,8100	5,0800	6,3500	6,9900
l_c	17,1500	19,0500	25,4000	31,7500	34,9500
CARGAS CALCULADAS E APLICADA					
NBR 8800 vigente (kgf)	28.777,60	28.777,60	28.777,60	28.777,60	28.777,60
NBR 8800 revisão ago/03 (kgf)	30.470,40	30.470,40	30.470,40	30.470,40	30.470,40
AISC (kgf)	30.470,40	30.470,40	30.470,40	30.470,40	30.470,40
Eurocódigo 3 (kgf)	17.469,70	18.282,24	23.699,20	23.699,20	23.699,20
BS 5950-1 (kgf)	19.692,00	19.692,00	19.692,00	19.692,00	19.692,00
Carga aplicada (kgf)	33.856,00	33.856,00	33.856,00	33.856,00	33.856,00
C_t	0,8218	0,8227	0,8235	0,8226	0,8220
Carga de ruptura (kgf)	27.822,86	27.853,33	27.879,06	27.849,95	27.829,63
DIFERENÇA PERCENTUAL ENTRE RESULTADO E NORMA					
% entre simulação e NBR 8800 vigente	3,43%	3,32%	3,22%	3,33%	3,41%
%entre simulação e NBR 8800 revisão ago/03	9,52%	9,40%	9,29%	9,41%	9,49%
% entre simulação e AISC	9,52%	9,40%	9,29%	9,41%	9,49%
% entre simulação e Eurocódigo 3	-37,21%	-34,36%	-14,99%	-14,90%	-14,84%
%entre simulação e BS 5950-1	-29,22%	-29,30%	-29,37%	-29,29%	-29,24%
Resistência à ruptura proposta	26.407,68	26.407,68	26.407,68	26.407,68	26.407,68
% entre simulação e resistência proposta	-5,09%	-5,19%	-5,28%	-5,18%	-5,11%

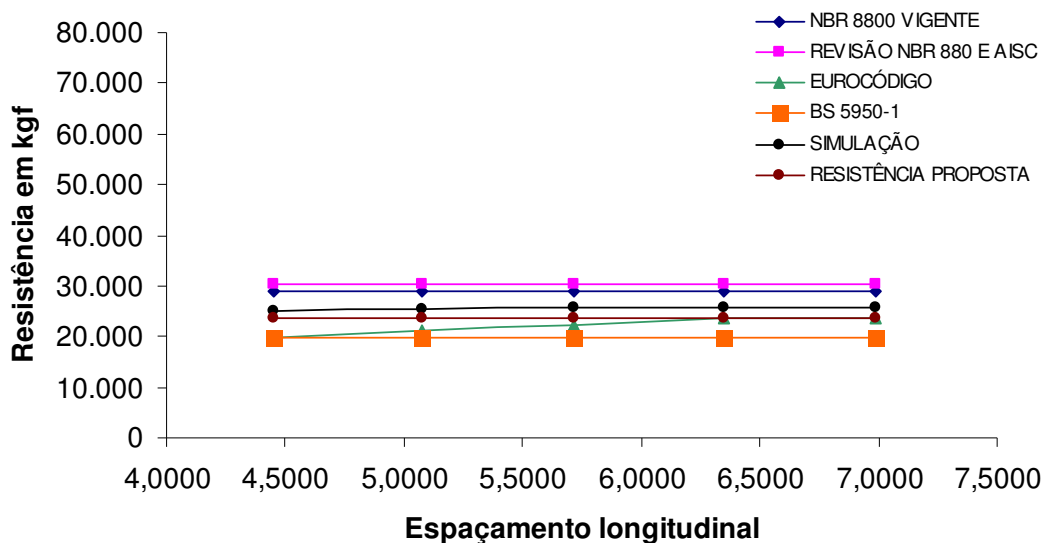


Figura 7.5 - Comparação de resultados para a variável “espaçamento longitudinal entre furos” para cantoneiras com quatro parafusos.

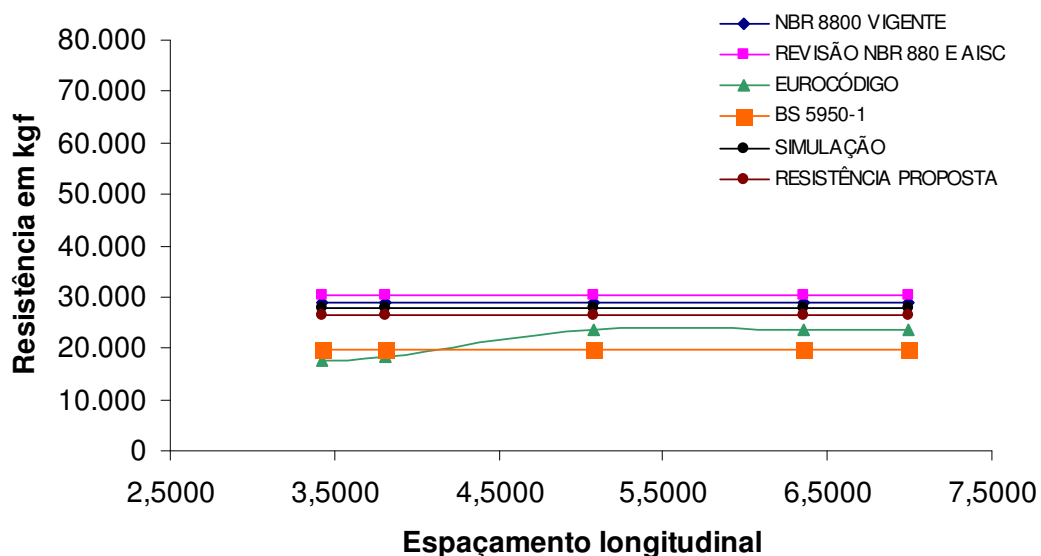


Figura 7.6 - Comparação de resultados para a variável “espaçamento longitudinal entre furos” para cantoneiras com seis parafusos.

A Tabela 7.9 confirma os comentários feitos para variável “número de parafusos”, ou seja, as normas NRB 8800 vigente, revisão da NBR 8800 e AISC apresentam resultados não conservadores e as normas Eurocódigo 3 e BS 5950-1 apresentam resultados conservadores. O Eurocódigo 3 é a norma

com resistências mais próximas das obtidas na simulação para cantoneiras com quatro parafusos. Em cantoneiras com seis parafusos, a norma NBR 8800 vigente é a que apresenta resistências mais próximas das obtidas na simulação, porém com resultados não conservadores.

As resistências calculadas com o auxílio das equações (6.2) e (6.3) diferem das obtidas na simulação em percentuais que variam de 5,62% (modelo 95) a 8,09% (modelo 67), para os modelos com quatro parafusos, e que situam-se algo acima de 5%, para os modelos com seis parafusos.

As Tabela 7.10 e Figura 7.7 apresentam a comparação dos resultados obtidos para as cantoneiras utilizadas na análise da influência da variável “ e_2 ”.

Tabela 7.10 - Comparação de resultados para a variável “ e_2 ” em cantoneiras.

VARIÁVEL e_2 DE CANTONEIRAS				
GEOMETRIA DA CANTONEIRA	MODELO 127	MODELO 128	MODELO 133	MODELO 130
Largura da aba (cm)	4,0579	4,9923	6,0597	6,9936
Espessura (cm)	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
Diâmetro do furo (cm)	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
e_2 (cm)	1,9000	2,6000	3,4000	4,1000
e_c	0,9600	0,9600	0,9600	0,9600
CARGAS CALCULADAS E APLICADA				
NBR 8800 vigente (kgf)	10.192,86	13.369,82	16.998,98	20.174,24
NBR 8800 revisão ago/03 (kgf)	10.792,44	14.156,28	17.998,92	21.360,96
AISC (kgf)	10.792,44	14.156,28	17.998,92	21.360,96
Eurocódigo 3 (kgf)	8.394,12	11.010,44	13.999,16	16.614,08
BS 5950-1 (kgf)	3.717,39	7.104,59	11.524,29	14.359,30
Carga aplicada (kgf)	11.991,60	15.729,20	19.998,80	23.734,40
Ct	0,8054	0,8132	0,8162	0,7820
Carga de ruptura (kgf)	9.658,03	12.790,99	16.323,02	18.560,30
DIFERENÇA PERCENTUAL ENTRE RESULTADO E NORMA				
% entre simulação e NBR 8800 vigente	5,54%	4,53%	4,14%	8,70%
%entre simulação e NBR 8800 revisão ago/03	11,75%	10,67%	10,27%	15,09%
% entre simulação e AISC	11,75%	10,67%	10,27%	15,09%
% entre simulação e Eurocódigo 3	-13,09%	-13,92%	-14,24%	-10,49%
%entre simulação e BS 5950-1	-61,51%	-44,46%	-29,40%	-22,63%
Resistência à ruptura proposta	9.272,94	12.268,78	15.599,06	18.512,83
% entre simulação e resistência proposta	-3,99%	-4,08%	-4,44%	-0,26%

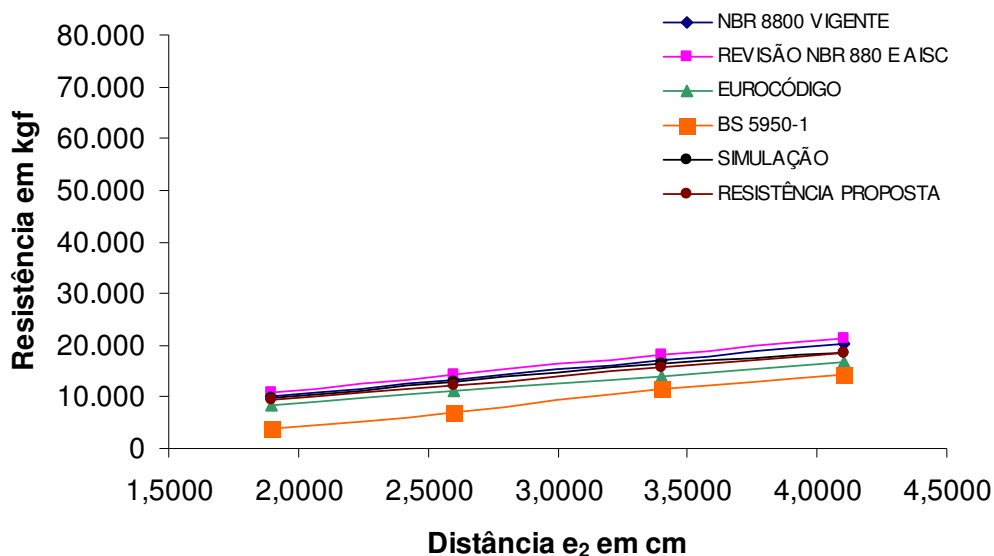


Figura 7.7 - Comparação de resultados para a variável “ e_2 ” em cantoneiras.

Analisando a Tabela 7.10 e a Figura 7.7, verifica-se, mais uma vez, que a NRB 8800 vigente é a norma que apresenta resistências mais próximas dos resultados obtidos na simulação, porém são resultados não conservadores. O Eurocódigo 3 e a BS 5950-1 são as normas que apresentam resistências mais conservadoras em relação aos resultados da pesquisa, porém, nesta análise, a norma BS 5950-1 apresentou resultados excessivamente conservadores.

As equações (6.2) e (6.3) fornecem coeficientes de eficiência que conduzem a resistências que variam de 0,26% (modelo 130) a 4,44% (modelo 133) em relação aos resultados obtidos na simulação.

As Tabela 7.11 e Figura 7.8 apresentam a comparação dos resultados obtidos para as cantoneiras utilizadas na análise da influência da variável “excentricidade”.

Tabela 7.11 - Comparação de resultados para a variável “ e_c ” em cantoneiras.

VARIÁVEL e_c DE CANTONEIRAS					
GEOMETRIA DA CANTONEIRA	MODELO 131	MODELO 133	MODELO 134	MODELO 135	MODELO 136
Largura da aba (cm)	5,4193	6,0597	6,7001	7,3404	7,9806
Espessura (cm)	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
Diâmetro do furo (cm)	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200	1,6200
e_2	3,4000	3,4000	3,4000	3,4000	3,4000
e_c (cm)	0,4816	0,9600	1,4400	1,9200	2,4000
CARGAS CALCULADAS E APLICADA					
NBR 8800 vigente (kgf)	14.821,62	16.998,98	19.176,34	21.353,36	23.530,04
NBR 8800 revisão ago/03 (kgf)	15.693,48	17.998,92	20.304,36	22.609,44	24.914,16
AISC (kgf)	15.693,48	17.998,92	20.304,36	22.609,44	24.914,16
Eurocódigo 3 (kgf)	12.206,04	13.999,16	15.792,28	17.585,12	19.377,68
BS 5950-1 (kgf)	10.003,34	11.524,29	13.295,36	15.616,45	17.937,18
Carga aplicada (kgf)	17.437,20	19.998,80	22.560,40	25.121,60	27.682,40
C_t	0,8187	0,8162	0,8104	0,7473	0,6844
Carga de ruptura (kgf)	14.275,84	16.323,02	18.282,95	18.773,37	18.945,83
DIFERENÇA PERCENTUAL ENTRE RESULTADO E NORMA					
% entre simulação e NBR 8800 vigente	3,82%	4,14%	4,89%	13,74%	24,20%
%entre simulação e NBR 8800 revisão ago/03	9,93%	10,27%	11,06%	20,43%	31,50%
% entre simulação e AISC	9,93%	10,27%	11,06%	20,43%	31,50%
% entre simulação e Eurocódigo 3	-14,50%	-14,24%	-13,62%	-6,33%	2,28%
%entre simulação e BS 5950-1	-29,93%	-29,40%	-27,28%	-16,82%	-5,32%
Resistência à ruptura proposta	14.690,39	14.674,57	14.580,88	18.506,87	18.270,38
% entre simulação e resistência proposta	2,90%	-10,10%	-20,25%	-1,42%	-3,57%

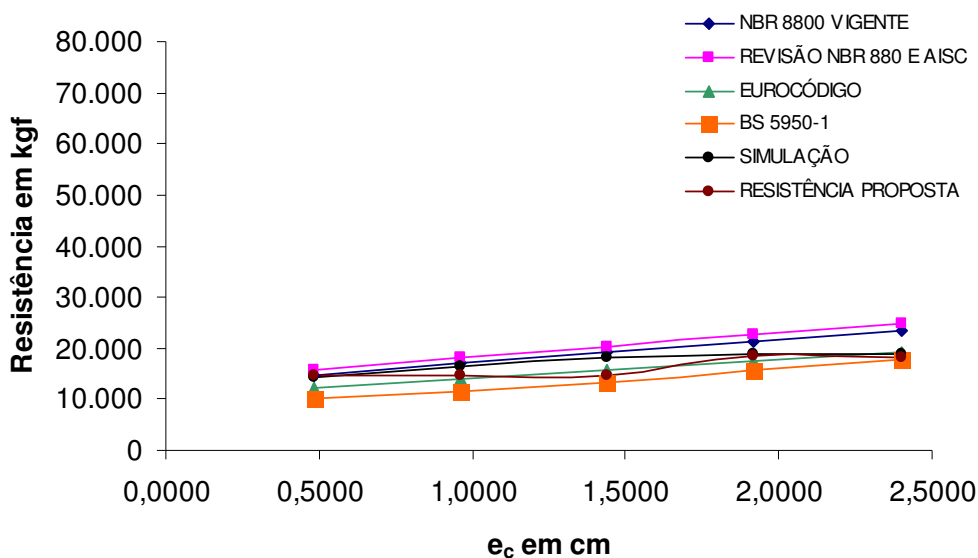


Figura 7.8 - Comparação de resultados para a variável “ e_c ” em cantoneiras.

Analisando a Tabela 7.11, verifica-se que a NBR 8800 vigente fornece resultados próximos dos obtidos na simulação para os modelos com pequenas excentricidades (modelos 131, 133 e 134). À medida que esta variável cresce, as resistências fornecidas por esta norma se afastam dos valores obtidos na simulação, tornando-a cada vez mais não conservadora. A revisão da NBR e a AISC também apresentam resultados conservadores, cujas diferenças percentuais em relação aos resultados obtidos na simulação crescem rapidamente com a excentricidade. A BS 5950-1 e o Eurocódigo 3 fornecem resultados conservadores. O Eurocódigo 3 fornece os resultados mais próximos dos obtidos pela simulação para os modelos com grandes excentricidades (modelos 135 e 136).

Resistências calculadas com o auxílio das equações (6.2) e (6.3) apresentam diferenças, em relação aos resultados obtidos na simulação, que podem variar de valores muito pequenos a algo em torno de 20% ou mais. No entanto, estas diferenças são, em geral, conservadoras.

8 CONCLUSÃO

Neste capítulo, se mostra, em síntese, os objetivos pretendidos com a realização deste trabalho e as principais contribuições inerentes ao assunto estudado nesta pesquisa. Em seguida, apresenta-se as conclusões obtidas através das análises e estudos realizados para atingir os objetivos propostos e finalmente são sugeridos pesquisas e trabalhos futuros que podem dar continuidade a este estudo.

8.1 Síntese

Os critérios usados para conceber e dimensionar estruturas metálicas tornou-se hoje objeto de reavaliação devido ao constante avanço das tecnologias de fabricação do aço e de compreensão da estabilidade e da resistência destas estruturas. O estudo realizado nesta dissertação é motivado pelo intuito de avaliar os critérios de cálculo adotados pelas principais normas utilizadas no Brasil para dimensionamento de peças de aço tracionadas e conectadas por parafusos.

Com base nestas premissas, este estudo tem como objetivos:

- Apresentação e comparação dos critérios de dimensionamento de peças tracionadas e ligadas por parafusos, utilizados atualmente pelas principais normas brasileiras e internacionais;
- Realização de uma análise dos parâmetros de influência em dois dos tipos de seções de aço mais utilizados para resistir ao esforço de tração em obras de estruturas metálicas através de simulação numérica de peças com estas seções;
- Apresentação de um critério de cálculo que represente o resultado da simulação numérica;
- Realização de um estudo comparativo entre os resultados obtidos na simulação e os obtidos pelos critérios de cálculo adotado pelas normas.

As normas abordadas neste estudo são a NBR 8800 vigente, NBR 8800 revisão de agosto de 2003, AISC, Eurocódigo 3 e BS 5950-1. As seções escolhidas para realização da análise numérica foram as de chapas retangulares solicitadas concêntricamente e as de cantoneiras de abas iguais ligadas por uma fila de furação em uma das abas.

As normas adotam dois diferentes conceitos para o modo de falha da área líquida de chapas. O primeiro considera como modo de falha a ruptura da área líquida com aproveitamento total da seção líquida, este conceito é adotado pelas normas brasileiras, americana e européia. O segundo considera o escoamento da seção líquida como o modo de falha, este conceito é adotado pela norma britânica apenas. Porém, a norma britânica considera um fator de eficiência do material que não é considerado pelas demais normas. O critério de cálculo de resistência de chapas tracionadas e ligadas por parafusos, adotado pela norma britânica, mostrou-se conservador em relação as demais normas abordadas neste trabalho.

O critério de cálculo adotado pelas normas para a determinação da resistência de cantoneiras ligadas por uma fila de furação considera que peças deste tipo não apresentam aproveitamento total da área líquida, devido ao efeito *shear lag*, que considera a distribuição não uniforme de tensões na seção. Porém, há uma grande variação entre as normas na consideração dos parâmetros de influência, do grau de influência destes parâmetros e dos métodos de cálculo adotados para quantificar a eficiência da referida peça. As normas brasileiras, americana e européia consideram como modo de falha, também para este tipo de peça, a ruptura da área líquida, enquanto a norma britânica considera como modo de falha o escoamento da área líquida.

No critério de cálculo da resistência de cantoneiras tracionadas e ligadas por uma fila de furação em apenas uma das abas as normas abordadas neste trabalho apresentam, em geral, a seguinte ordem crescente de conservadorismo: européia, britânica, americana, revisão da brasileira e brasileira vigente.

Vistas as divergências entre as normas, foram propostos e estudados os seguintes parâmetros na simulação numérica, considerando as características das seções e ligações escolhidas:

- Espessura do elemento;
- Relação A_n/A_g ;
- Número de filas de furação;
- Comprimento da ligação, considerando o número de parafusos por fila de furação e o espaçamento longitudinal entre furos s ;
- Distância do furo a borda e_2 ;
- Espaçamento transversal entre furos g e

- Excentricidade;

Para realizar a análise dos parâmetros citados, foram construídos, com o auxílio do método de elementos finitos, modelos de peças que apresentavam variações estratégicas a fim de obter-se resultados para realização de uma análise comparativa entre os modelos simulados e entre estes e os resultados teóricos das normas analisadas. A análise computacional foi realizada no software Ansys, versão 5.5. Todos os modelos construídos possuem as mesmas considerações no que diz respeito às características de simulação e simplificações adotadas, diferenciando-se apenas pelas características geométricas.

Para a análise do parâmetro “espessura”, foram simulados quatro modelos de chapas que não apresentaram variações nos resultados. Para o parâmetro “relação A_n/A_g ” foram simulados três modelos de chapa que também não apresentaram variações nos resultados.

O parâmetro “número de filas de furação” foi analisado em chapas e foram simulados seis modelos que apresentaram uma variação significativa nos valores do C_t , convergindo, porém, a uma assintota, a partir de quatro filas de furação. Para o parâmetro “número de parafusos por fila de furação” em chapas foram simulados cinco modelos que não apresentaram variação nos resultados. Para análise deste parâmetro em cantoneiras, foram simulados cinco modelos que apresentaram variações significativas, mas com resultados que convergiram a uma assíntota, a partir de cinco parafusos.

Para o parâmetro “espaçamento longitudinal entre parafusos” foram simulados seis modelos de chapas e dez modelos de cantoneiras, que não apresentaram variações significativas. Os parâmetros “espaçamento transversal entre furos” e “distância de furo a borda” foram estudados, para chapas com duas e três filas de furação, a partir da “relação e_2/g ”, devido à interdependência entre estes parâmetros. Foram simulados trinta e nove modelos para quantificar a

influência desta relação sobre as chapas, concluindo-se que, assim como o número de filas de furação, esta relação influencia a resistência deste tipo de seção. Feita a análise dos resultados obtidos a partir da variação desses parâmetros, foi proposta a equação (6.1), $C_t = 0,93 - 0,13 \frac{e_2}{g}$, para chapas com duas ou mais filas de furação, e a consideração de $C_t = 0,83$, para chapas com uma fila de furação.

O parâmetro “distância do furo a borda” foi analisado nas seções de cantoneiras com a simulação de quatro modelos e o parâmetro “excentricidade” com a simulação de cinco modelos. Estes parâmetros, assim como o número de parafusos por fila de furação, influenciam a eficiência de cantoneiras quanto à ruptura da área líquida, Feita a análise destes fatores, foi proposto o seguinte critério de cálculo para resistência destas peças:

$$C_t = 1,45 \left(\frac{e_2}{e_2 + e_c} \right) - 0,19, \text{ para } \frac{e_2}{e_2 + e_c} < 0,67$$

$$\text{e } C_t = 0,78, \text{ para } \frac{e_2}{e_2 + e_c} \geq 0,67.$$

Para ligações com três e quatro parafusos, sugere-se multiplicar o C_t por 0,6 e 0,9, respectivamente.

No total, foram simulados sessenta modelos de chapas e vinte e três de cantoneiras a fim de se obter os resultados requeridos para realização de uma análise apurada sobre o assunto.

Após simulação e análise dos modelos foi desenvolvida uma análise comparativa entre estes resultados e as resistências destes mesmos modelos calculadas segundo as normas abordadas, onde se verificou a diferença percentual entre estas normas e os resultados da simulação.

8.2 Conclusão

Realizadas as análises comparativas entre as normas, a simulação numérica e a análise comparativa entre os resultados da simulação e os resultados teóricos das normas, conclui-se que:

- Há atualmente uma grande divergência entre as normas para quantificação da eficiência de peças tracionadas, principalmente das que possuem ligação assimétrica.
- Não existem muitos estudos que abordam o assunto deste trabalho e os que foram realizados baseiam-se em testes experimentais. A análise numérica aliada aos testes experimentais é uma forma de estudo capaz de identificar os fatores de influência e grau de influência destes fatores, através de um estudo paramétrico com maior precisão, devido à possibilidade de mais facilmente obter-se uma quantidade considerável de resultados para a análise da distribuição de tensões nas peças.
- Além de serem poucos os estudos sobre o assunto, algumas normas apresentam falhas no seu procedimento de cálculo como, por exemplo, a AISC que não estabelece um valor mínimo para o coeficiente de eficiência, permitindo que este valor chegue a valores próximos de zero ou até negativos.
- O estudo realizado por Bartels (2000) mostra que fatores importantes para o cálculo de perfis T ligados apenas pela alma não tinham sido considerados em nenhum estudo até então, como o momento fletor, devido à excentricidade da ligação, associado ao momento restaurador de 2ª ordem. Esta associação é responsável pela resistência deste tipo de perfil ser maior que a resistência teórica à ruptura calculada como se o perfil fosse sujeito à tração e ao momento fletor simultaneamente, e

menor que a resistência teórica do mesmo à ruptura calculada como sendo sujeito somente à tração. Bartels propõe uma equação linear para considerar todos os fatores de influência deste tipo de seção, estudado por ele.

- Através da simulação numérica, pôde-se verificar que os fatores de influência para a resistência à ruptura da área líquida em chapas foram o número de filas de furação e a relação e_2/g , contradizendo os critérios de cálculo adotados pelas normas, que consideram perfis tracionados e conectados por parafusos em todos os elementos que o compõem como tendo aproveitamento total da sua área líquida.
- Através da simulação numérica, pôde-se verificar que os fatores de influência para resistência à ruptura da área líquida em cantoneiras foram o número de parafusos, a distância transversal de furo a borda e a excentricidade. Este resultado confirma alguns parâmetros de influência adotados em algumas normas. Por exemplo:
 - O número de parafusos é um parâmetro adotado pela NBR 8800 vigente e pelo Eurocódigo 3 explicitamente e indiretamente pela Revisão da NBR 8800 e pela AISC que consideram o comprimento da ligação como um todo como parâmetro de influência, sendo que o número de parafusos é um dos parâmetros que compõe a variável comprimento da ligação.
 - A excentricidade é um parâmetro considerado pela Revisão da NBR 8800 e pela AISC, diretamente.
- A distância transversal de furo à borda é um parâmetro para o qual as normas estabelecem apenas os limites máximo e mínimo. Porém, foi verificado que este é um parâmetro de influência na resistência tanto de chapas como de cantoneiras. Grandes valores desta distância fazem reduzir a eficiência da seção e nenhuma norma aborda este aspecto.

Os modelos de cantoneira que apresentaram maior aproveitamento da seção líquida foram os que romperam em toda a distância e_2 . Portanto, a influência desta distância na resistência de peças tracionadas deve ser reavaliada pelas normas.

- A excentricidade e a distância transversal de furo a borda estão diretamente relacionados, e a relação entre estes parâmetros é uma variável de influência na resistência de cantoneiras com ligações assimétricas.
- O espaçamento longitudinal entre furos não se revelou um parâmetro de influência na resistência de chapas ou de cantoneiras, desde que sejam respeitados os valores mínimos já preconizados pelas normas. Assim, o comprimento da ligação influencia a sua resistência apenas através do número de parafusos, resultado este que diverge dos critérios de algumas normas que consideram esse parâmetro na determinação do comprimento da ligação, como dito no item que relaciona o parâmetro número de parafusos em cantoneiras com as normas.
- Os demais parâmetros considerados pelas normas, tais como variações nas dimensões relativas da seção, tipo de furo e variações no tipo de ligação, não foram analisados na simulação, por não estarem contemplados no objeto na pesquisa.
- Nas simulações de modelos do tipo cantoneiras, houve rasgamento da aba, não previsto pelos critérios preconizados pelas normas, o que revela a necessidade de estudos mais aprofundados do tema.
- Para os resultados da simulação dos modelos de chapa, verificou-se que as normas abordadas neste trabalho dividem-se em dois tipos de resultados: um composto pelas normas brasileiras, americana e europeia e um composto pela norma britânica apenas. O primeiro tipo

apresenta resultados para a resistência maior que a verificada nos modelos simulados e o segundo apresenta resultados conservadores em relação aos modelos simulados. Através desta análise, é possível verificar que o modo de falha da seção líquida de chapas de aço tracionadas e ligadas por parafusos não é o seu escoamento, como preconiza a norma britânica, e também que a seção líquida não alcança a tensão última com eficiência total, como preconizam as demais normas. Logo, se propõe, neste trabalho, um critério de cálculo, para a resistência deste tipo de seção, que considera a distribuição não uniforme de tensões que na realidade existe.

- Para os resultados da simulação dos modelos de cantoneiras verificou-se que as normas abordadas se dividem em três grupos: o primeiro composto pelas normas brasileiras e americana, que considera a ruptura da seção líquida como modo de falha; o segundo, composto pela norma britânica, que considera como modo de falha o escoamento da seção líquida e o terceiro, composto pela norma européia, que considera a ruptura na área líquida como modo de falha, porém com uma resistência à ruptura menor que o a resistência ao escoamento da dessa seção, para espaçamentos transversais entre furos de até 4,5d. O critério de cálculo adotado pela norma européia é a que melhor se aproxima dos resultados dos modelos, principalmente das cantoneiras com os maiores valores de excentricidade e dos modelos onde a ruptura se dá do furo à borda da peça.

8.3 Sugestões para pesquisas e estudos futuros

Como sugestões para futuros trabalhos, que venham a dar prosseguimento ao estudo desta dissertação e a definir de forma mais precisa os critérios de cálculos adotados por normas para cálculo de elementos de aço submetidos à tração, podem-se citar:

- O estudo dos modos falha de rasgamento e ruptura da seção líquida, verificando-se e estabelecendo limites entre eles, pois foi visto neste trabalho que, a diferença na resistência da peça é significativa entre estes dois modos de falha.
- O estudo dos limites mínimos e máximos de e_2 , considerando que o aproveitamento total desta distância na ruptura da peça está diretamente relacionado a um maior coeficiente de eficiência.
- O estudo das demais peças e ligações parafusadas normalmente utilizadas para elementos estruturais tracionados, tais como cantoneiras conectadas por mais de uma fila de furação, cantoneiras de abas desiguais, perfis U e a associação destes perfis.
- O estudo de elementos estruturais tracionados e conectados por solda, ou por uma associação de solda e parafusos.
- O estudo experimental dos modelos simulados, para comprovação desta pesquisa.
- O estudo da influência de ligações protendidas e ligações por “atrito”.
- O estudo de ligações que envolvam mais de uma chapa e atritam entre si.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, INC. - AISC(1995). ***Metric load and resistance factor design specification for structural steel buildings***. Item B2: Net area, B3: Effective net area for tension members e D: Tension members.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – COMITÊ BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO CIVIL – CB-2 (1986). ***Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios- NBR 8800***. Item 5.2: Barras tracionadas.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2003). ***Projeto de revisão da NBR 8800 – Projeto e execução de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios***. Item 5.2: Barras prismáticas submetidas à força normal de tração.

BARTELS, P.A. (2000). Net section rupture in tension members with connection eccentricity. ***Thesis submitted to the College of Engineering and Mineral Recourses at West Virginia University***.

BRITISH STANDARD INSTUTION (2001). ***BS 5950-1 - Structural use of steelwork in building***. Parte1: Section 3.4: Section properties e Section 4.6: Tension members.

CHESSON, E. JR., AND MUNSE, W. H., Transactions, ***ASCE***, Vol. 123, 1958, pp. 1087-1128.

CHESSON, E. JR., Behavior of Large Riveted and Bolted Structural Connections, ***Thesis presented to the University of Illinois, at Urban, IL***, in 1959, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.

DOWLING, P.J.; HARDING, J.E.; BJORHOVDE,R. (1992). Constructional steel design an international guide. **Elsevier Applied Science London and New York**. Item 2.1: Tension members.

EPSTEIN, HOWARD I., Block Shear of Structural Tees in Tension-Alternate Paths, **AISC Journal of Engineering**, Vol. 33, 4th quarter, 1996, pp. 147-152.

EPSTEIN, HOWARD I., An Experimental Study of Block Shear Failure of Angles in Tension, **AISC Engineering Journal**, Vol. 29, 1992, pp. 75-84.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (1993). **Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-1: General rules – Supplementary rules for cold-formed thin gauge members and sheeting**.

Féodosiev, V. (1977). Resistência dos materiais. **Edições Lopes da Silva - Porto**, Capítulo I: Tração e compressão, Capítulo XIII: Resistência no caso de tensões que variam ciclicamente.

GAYLORD, E. H. JR., GAYLORD, C. N., AND STALLMEYER, J. E. Design of Steel Structures, 3rd edition, New York, NY: **McGraw-Hill Inc.**, 1992.

KIM, H.J.; YURA, J.A. (1998). The effect of ultimate-to-yield ratio on the bearing strength of bolted connections. **Journal of Constructional Steel Research**, 49, pg 255-269.

KULAK, GEOFFREY L., AND WU, ERIC YUE, Shear Lag in Bolted Tension Members, **ASCE Journal of Structural Engineering**, Vol. 123, No. 9, September, 1997, pp.1144-1152.

MUNSE, W. H., AND CHESSON, E., J.R., Riveted and Bolted Joints: Net Section Design, **ASCE Journal of Structural Engineering**, Vol. 89, No. ST1, February, 1963, pp. 107-126.

PFEIL, M.; PFEIL, W. (2000). Estruturas de aço – Dimensionamento prático. **LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.** Capítulo 2.

WU, Y., AND KULAK, G. L., Shear Lag in Bolted Single and Double Angle Tension Members, **Struct. Engrg. Rep. No. 187**, Dept of Civil Engrg., Univ. of Alberta, Edmonton, Canada, 1993.

10 BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE (1996). **Specification for the design of cold-formed steel structural members – Cold-formed steel design manual**. Parte V: C2: Tension members e E3.2: Tension in each connected part.

BELLEI, I.H. (2003). Edifícios industriais em aço – projeto e cálculo. **Pini**. Capítulo 4: Ligações parafusadas.

COMISSÃO DE ESTUDOS DE PROJETOS E EXECUÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS (2001). **Projeto de norma de revisão da NB 143 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – Procedimento**. Item 7.6: Barras submetidas à tração.

FEODOSIEV, V.I. (1976). Resistência de materiais. **Ediciones Sapiens**. Capítulo VII: Fundamentos de la teoria de los estados tensional e deformacional, Capítulo VIII: Teoria de los estados tensionales limites.

FERREIRA, W.G. (2004). Dimensionamento de elementos de perfis de aço laminados e soldados - com exemplos numéricos. **Grafer editora**. Capítulo 3: elementos tracionados.

PINHEIRO, A.C.F.B. (2001). Estruturas metálicas – Cálculos, detalhes, exercícios e projetos. **Editora Edgard Blücher Ltda**. Capítulo 5: barras tracionadas.

QUEIROZ, G. (1988). Elementos da estruturas de aço. **Imprensa Universitária – Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG**. Item 7.1: Barras tracionadas.

SANTOS, A.F. DOS (1977). Estruturas metálicas - Projetos e detalhes para fabricação. **Editora McGraw-Hill**. Capítulo 3: Dispositivos de união.