



CATHERINE SOUTO COSTA COELHO DA SILVA

**ESTUDO DE LIGAÇÕES PINADAS COM CHAPA DE
TOPO PARA APLICAÇÕES EM ESTRUTURAS
METÁLICAS TRELIÇADAS TUBULARES
MULTIPLANARES**

**CAMPINAS
2014**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

CATHERINE SOUTO COSTA COELHO DA SILVA

**ESTUDO DE LIGAÇÕES PINADAS COM CHAPA DE
TOPO PARA APLICAÇÕES EM ESTRUTURAS
METÁLICAS TRELIÇADAS TUBULARES
MULTIPLANARES**

Orientador(a): Prof. Dr. JOÃO ALBERTO VENEGAS REQUENA

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Estruturas.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA CATHERINE SOUTO COSTA COELHO DA SILVA, E ORIENTADA PELO PROF. DR. JOAO ALBERTO VENEGAS REQUENA.

ASSINATURA DO ORIENTADOR(A)

CAMPINAS
2014

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

C65e Coelho da Silva, Catherine Souto Costa, 1986-
Estudo de ligações pinadas com chapa de topo para aplicações em estruturas metálicas treliçadas tubulares multiplanares / Catherine Souto Costa Coelho da Silva. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: João Alberto Venegas Requena.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Estruturas metálicas. 2. Aço tubular - Estrutura. 3. Ligações metálicas. 4. Método dos elementos finitos - Programas de computador. I. Requena, João Alberto Venegas, 1956-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Study of pinned gusset plate connections for application in multiplanar trusses with circular hollow sections

Palavras-chave em inglês:

Steel structures

Tubular steel - Structures

Metallic bonds

Finite element method - Computer programs

Área de concentração: Estruturas e Geotécnica

Titulação: Mestra em Engenharia Civil

Banca examinadora:

João Alberto Venegas Requena [Orientador]

Leandro Palermo Júnior

Marco Lúcio Bittencourt

Data de defesa: 29-01-2014

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

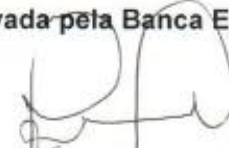
FOLHA DE APROVAÇÃO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

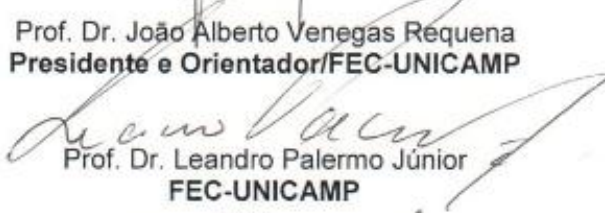
ESTUDO DE LIGAÇÕES PINADAS COM CHAPA DE TOPO PARA
APLICAÇÕES EM ESTRUTURAS METÁLICAS TRELIÇADAS
TUBULARES MULTIPLANARES

Catherine Souto Costa Coelho da Silva

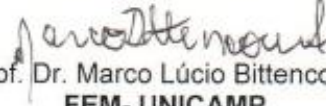
Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof. Dr. João Alberto Venegas Requena
Presidente e Orientador/FEC-UNICAMP



Prof. Dr. Leandro Palermo Júnior
FEC-UNICAMP



Prof. Dr. Marco Lúcio Bittencourt
FEM- UNICAMP

Campinas, 29 de janeiro de 2014.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar um tipo de ligação em treliças metálicas tubulares multiplanares de seção circular com chapa de topo. Nestas ligações as extremidades das diagonais são superpostas e unidas por um único parafuso fazendo com que a ligação seja pinada. A colocação da chapa de topo implica no aparecimento de uma excentricidade na ligação originando esforços adicionais na estrutura. Esse tipo de ligação tem como vantagem o baixo custo de fabricação, a rapidez de montagem das treliças, a facilidade de transporte e a versatilidade no detalhamento das ponteiros das diagonais. Foi realizado um levantamento bibliográfico nas prescrições de cálculo e demais publicações, nacionais e internacionais, para ligações de estruturas tubulares e encontrou-se um estudo para esse tipo de ligação, mas apenas analisando treliças planas. Para verificar o comportamento da ligação, serão analisados modelos numéricos desenvolvidos com o programa de elementos finitos ANSYS 14.0. Os resultados encontrados com esses modelos serão analisados e comparados com os resultados numéricos encontrados na pesquisa de ligação pinada com chapa em treliças tubulares planares para elaboração de um fator de correção entre os dois tipos de ligação.

Palavras-chave: Estruturas Metálicas, Ligações Tubulares, Estrutura Tubular de Aço, Chapa de Topo.

ABSTRACT

This paper objective is to propose a connection type for tubular steel trusses with circular section, multiplanar and with *gusset* plate. In these connections the ends of the diagonals are overlapped and joined by a single pin resulting a pinned connection. The position of the *gusset* plate in the connections implies an eccentricity which results in additional efforts in the structure. The advantage of this connection type is the low manufacturing cost, the fast erection of trusses, the easier transportation and the versatility in the detailing constructive of the diagonals end. Survey in technical books, standards, manuals and scientific articles was made for tubular steel structures connection. In this survey was found a research for a similar type of connection, but in this there were only analysis of planar trusses. Numerical models using the commercial finite element software ANSYS 14.0 will be analyzed to check the connection. The results from these models will be analyzed and compared with numerical results in the bibliographic review about planar truss for preparation of a correction factor between the two types of connection.

Key Words: Steel Structures, Tubular Connections, Tubular Steel Structure, *Gusset* Plate.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2	PROPOSTA DE TRABALHO	7
2	ESTADO DA ARTE	11
2.1	HISTÓRICO DAS LIGAÇÕES TUBULARES	11
2.2	LIGAÇÕES PLANARES	15
2.2.1	Modo de Falha em Ligações Planares Soldadas	19
2.3	LIGAÇÕES MULTIPLANARES	21
2.3.1	Histórico das Ligações Multiplanares	23
2.3.2	Modo de Falha em Ligações Multiplanares Soldadas	25
2.4	CHAPAS GUSSET	30
2.5	LIGAÇÕES PINADAS EM TRELIÇAS PLANAS TUBULARES	36
3	ANÁLISE NUMÉRICA	39
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	39
3.2	MODELOS NUMÉRICOS	40
3.2.1	Os Elementos dos Modelos Numéricos	43
3.2.2	Tipos de Análises	44
3.2.3	Malhas das Chapas e dos Tubos	45
3.2.4	Condições de Contorno e Carregamento	47
3.3	MODOS DE COLAPSO	51
3.3.1	Pico de Carga	51
3.3.2	Critério de Falha por Ruptura	52
3.3.3	Limite de Deformação	53
4	ANÁLISE PARAMÉTRICA	57
4.1	ESTUDO PARAMÉTRICO DA LIGAÇÃO COM CHAPA DE TOPO	57
4.1.1	Variáveis do Modelo	58
4.1.2	Critério de Leitura da Carga Máxima	58
4.1.3	Características do Material do Tubo e da Chapa	58
4.1.4	Resultados	59
4.1.5	Análise dos Resultados	65
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
5.1	CONCLUSÃO	77
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	79
	REFERÊNCIAS	81
	APÊNDICE A	91
	ANEXO A	127
	ANEXO B	131
	ANEXO C	133

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Manuel de Oliveira Coelho da Silva e Ivone Aparecida Souto Costa Coelho da Silva que estão sempre do meu lado acreditando, me incentivando e me ajudando a realizar os meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador professor Requena pelas oportunidades que me proporcionou, dedicação e orientação no desenvolvimento deste trabalho.

À professora Daniela Minchillo pela atenção e suporte no desenvolvimento da análise numérica deste trabalho.

Aos amigos Wilson Kikuchi, Regina Kikuchi, Fernando Taborda, Orlando Lira e Tiago Roveri, da empresa Ponto de Apoio Engenharia e Arquitetura pelo apoio nos primeiros anos de realização deste trabalho.

Aos diretores e colegas da empresa Beta 2 Engenharia, em especial ao engenheiro Maurício Mello pelo apoio nestes últimos dois anos e ao engenheiro Wilson Tadeu pela amizade, paciência e suporte durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos Bianca, Mateus, Andrea, Cintia, Beatriz, Heloise, Edillize, Simone, Débora, Daniel, Felipe, William e Vinícius por estarem me apoiando todos estes anos.

Agradecimento especial aos meus pais e ao meu irmão que sempre estão ao meu lado em todos os momentos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de estruturas metálicas na Europa (Arquivo Pessoal)	2
Figura 2 – Exemplos de estruturas metálicas no Brasil	2
Figura 3 – Exemplos de estruturas tubulares na Europa (Arquivo Pessoal)	3
Figura 4 – Exemplos de estruturas tubulares no Brasil.....	4
Figura 5 – Ligações tubulares em chapa (Arquivo Pessoal).....	6
Figura 6 – Ligações tubulares com boca de lobo (Arquivo Pessoal)	6
Figura 7 – Ligação entre banzo e diagonais com chapa de topo em uma treliça multiplanar.....	8
Figura 8 – Treliça com 30m de vão utilizando chapa de topo	9
Figura 9 – Modelo da ligação multiplanar com chapa em estudo	9
Figura 10 – Tipos de ligações de perfis tubulares em treliças planares por WARDENIER (2000)	16
Figura 11 – Definição de afastamento (a) e sobreposição (b) por Wardenier (2001)	16
Figura 12 – Esquema ligações planares por MINCHILLO (2011)	18
Figura 13 – Modos de falha em ligações tipo K por WARDENIER (2001)	21
Figura 14 – Tipos básicos de ligações multiplanares por KUROBANE (1995)	22
Figura 15 – Tipos de colapsos em ligações “KK” por LEE e WILMSHURST (1997)	24
Figura 16 - Modos de colapso de ligação KK com esforços axiais simétricos por KUROBANE (1995).....	26

Figura 17 - Configurações e parâmetros geométricos da ligação multiplanar KK por WARDENIER (2001)	26
Figura 18 - Parâmetros de ligação KK com afastamento (gap) por PACKER (1997)	27
Figura 19 - Treliza triangular submetida a carregamento em qualquer direção por PACKER (1997)	29
Figura 20 – Protótipo de ligação com chapa <i>gusset</i> de WHITMORE (1952)	31
Figura 21 – Largura efetiva de WHITMORE (1952)	32
Figura 22 – Método de coluna equivalente de THORNTON (1984)	33
Figura 23 – Geometria do modelo de elementos finitos da ligação planar por MINCHILLO (2011)	41
Figura 24 – Geometria do modelo de elementos finitos da ligação multiplanar	41
Figura 25 – Solda em elementos de casca, adaptado de ASME (2010)	42
Figura 26 – Detalhe da solda do modelo de elementos finitos da ligação planar por MINCHILLO (2011)	43
Figura 27 – Detalhe da solda do modelo de elementos finitos da ligação multiplanar	43
Figura 28 – Elemento SHELL 181. Fonte: ANSYS User’s Manual – Volume III – Elements	44
Figura 29 – Malha da chapa de topo por MINCHILLO (2011)	46
Figura 30 – Malha do perfil tubular por MINCHILLO (2011)	46
Figura 31 – Protótipo da ligação planar pinada com chapa de topo por MINCHILLO (2011)	47

Figura 32 – Malha e condição de contorno de ligação planar por MINCHILLO (2011).....	48
Figura 33 – Malha e condição de contorno de ligação multiplanar	48
Figura 34 – Deformada dos modelos por MINCHILLO (2011)	50
Figura 35 – Detalhe da chapa com distribuição triangular do carregamento no furo adotada nos modelos por MINCHILLO (2011)	51
Figura 36 – Deformação diametral do banzo por FORTI (2010).....	54
Figura 37 – Deslocamento do perfil tubular na ligação planar por MINCHILLO (2011).....	55
Figura 38 – Deslocamento do perfil tubular na ligação multiplanar.....	55
Figura 39 – Deformação diametral na ligação planar por MINCHILLO (2011)	56
Figura 40 – Deformação diametral na ligação multiplanar	56
Figura 41 – Forças P_u e P_v atuantes nas ligações por MINCHILLO (2011).	59
Figura 42 – Carga última x espessura da chapa, para cada h_1 – Perfil tubular 60,3mm x 3,2mm – Ligação Planar por MINCHILLO (2011)	66
Figura 43 – Carga última x espessura da chapa, para cada h_1 – Perfil tubular 60,3mm x 3,2mm – Ligação Multiplanar.....	66
Figura 44 – Carga última x espessura da chapa, para cada h_1 – Perfil Tubular 73,0mm x 3,6mm – Ligação Planar por MINCHILLO (2011).....	67
Figura 45 – Carga última x espessura da chapa, para cada h_1 – Perfil Tubular 73,0mm x 3,6mm – Ligação Multiplanar.....	67
Figura 46 – Carga última x espessura da chapa, para cada h_1 – Perfil Tubular 96,5mm x 4,0mm – Ligação Planar por MINCHILLO (2011)	68

Figura 47 – Carga última x espessura da chapa, para cada h_1 – Perfil Tubular 96,5mm x 4,0mm – Ligação Multiplanar.....	68
Figura 48 – Carga última x espessura da chapa, para cada h_1 – Perfil Tubular 101,6mm x 4,0mm – Ligação Planar por MINCHILLO (2011).....	69
Figura 49 – Carga última x espessura da chapa, para cada h_1 – Perfil Tubular 101,6mm x 4,0mm – Ligação Multiplanar.....	69
Figura 50 – Carga última x (d_0 / β_1) , para cada h_1 – Perfil tubular 60,3mm x 3,2mm – Ligação Planar por MINCHILLO (2011).....	70
Figura 51 – Carga última x (d_0 / β_1) , para cada h_1 – Perfil tubular 60,3mm x 3,2mm – Ligação Multiplanar	71
Figura 52 – Carga última x (d_0 / β_1) , para cada h_1 – Perfil Tubular 73,0mm x 3,6mm – Ligação Planar por MINCHILLO (2011).....	71
Figura 53 – Carga última x (d_0 / β_1) , para cada h_1 – Perfil Tubular 73,0mm x 3,6mm – Ligação Multiplanar	72
Figura 54 – Carga última x (d_0 / β_1) , para cada h_1 – Perfil Tubular 96,5mm x 4,0mm – Ligação Planar por MINCHILLO (2011).....	72
Figura 55 – Carga última x (d_0 / β_1) , para cada h_1 – Perfil Tubular 96,5mm x 4,0mm – Ligação Multiplanar	73
Figura 56 – Carga última x (d_0 / β_1) , para cada h_1 – Perfil Tubular 101,6mm x 4,0mm – Ligação Planar por MINCHILLO (2011).....	73
Figura 57 – Carga última x (d_0 / β_1) , para cada h_1 – Perfil Tubular 101,6mm x 4,0mm – Ligação Multiplanar	74
Figura 58 – Fator k_g para chapa com $a_0/b_0=1,0$ mm	127

Figura 59 – Fator k_g para chapa com $a_0/b_0=1,25$ mm	127
Figura 60 – Fator k_g para chapa com $a_0/b_0=1,5$ mm	128
Figura 61 – Fator k_g para chapa com $a_0/b_0=2,0$ mm	128
Figura 62 – FEM curvas carga-deformação para as ligações de perfis tubulares HSS com chapa de ligação transversal - adaptado de LU & WARDENIER (2003) <i>apud</i> KOSTESKI et al (2003).	129
Figura 63 – Força (N) x Deslocamento (mm) - Tubo 60,3x3,2.....	133
Figura 64 – Tensão (MPa) x Deformação (mm/mm) - Tubo 60,3x3,2.....	134
Figura 65 – Força (N) x Deslocamento (mm) - Tubo 73,0x3,6.....	134
Figura 66 – Tensão (MPa) x Deformação (mm/mm) - Tubo 73,0x3,6.....	135
Figura 67 – Força (N) x Deslocamento (mm) - Tubo 76,5x3,6.....	135
Figura 68 – Tensão (MPa) x Deformação (mm/mm) - Tubo 76,5x3,6.....	136
Figura 69 – Força (N) x Deslocamento (mm) - Tubo 96,5x4,0.....	136
Figura 70 – Tensão (MPa) x Deformação (mm/mm) - Tubo 96,5x4,0.....	137
Figura 71 – Força (N) x Deslocamento (mm) - Tubo 101,6x4,0.....	137
Figura 72 – Tensão (MPa) x Deformação (mm/mm) - Tubo 101,6x4,0.....	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resistência de ligações planas com chapa para perfis circulares por KUROBANE <i>et al.</i> (2004).	17
Tabela 2– Fatores de correção da resistência de ligação das conexões multiplanares de seção circular por PACKER (1997) e EUROCODE (2005)	23
Tabela 3 – Estudo de aplicação do carregamento no furo por MINCHILLO (2011).	49
Tabela 4 – Dados da análise paramétrica – Perfil Tubular 60,3mm x 3,2mm.....	60
Tabela 5 – Dados da análise paramétrica – Perfil Tubular 73,0mm x 3,6mm.....	60
Tabela 6 – Dados da análise paramétrica – Perfil Tubular 96,5mm x 4,0mm.....	61
Tabela 7 – Dados da análise paramétrica – Perfil Tubular 101,6mm x 4,0mm.....	61
Tabela 8 – Comparação entre ligação planar (K) e multiplanar (KK) com respectivo fator de correção – Perfil Tubular 60,3mm x 3,2mm	62
Tabela 9 – Comparação entre ligação planar (K) e multiplanar (KK) com respectivo fator de correção – Perfil Tubular 73,0mm x 3,6mm	63
Tabela 10 – Comparação entre ligação planar (K) e multiplanar (KK) com respectivo fator de correção – Perfil Tubular 96,5mm x 4,0mm	64
Tabela 11 – Comparação entre ligação planar (K) e multiplanar (KK) com respectivo fator de correção – Perfil Tubular 101,6mm x 4,0mm	65
Tabela 12 – Resistência das ligações soldadas com esforços axiais entre perfis circulares por WARDENIER (2001).....	131
Tabela 13 – Resistência das ligações soldadas com esforços axiais entre perfis quadrados por WARDENIER (2001).....	132

Tabela 14 – Resumo das características do aço dos tubos V&M..... 133

LISTA DE SÍMBOLOS

a) Letras romanas maiúsculas

A_0 - área da seção transversal do perfil do banzo

A_1 - área da seção transversal da chapa

A_e - área líquida efetiva da seção transversal da chapa

A_g - área bruta da seção da chapa

A_n - área líquida da barra

E - módulo de elasticidade

E_t - módulo tangente

F - resultante horizontal das forças atuantes nas diagonais F_1 e F_2

F_{eff} - força efetiva

N_i - resultante vertical das forças atuantes nas diagonais F_1 e F_2

P_u - carga crítica da chapa

R_N - resistência nominal final para uma placa solicitada à tração

b) Letras romanas minúsculas

b_0 - largura da seção transversal do banzo

b_1 - largura da seção transversal da chapa

d_i - diâmetro do tubo

d_0 - diâmetro do tubo do banzo

f_u - tensão de ruptura do aço da chapa

f_y - tensão de escoamento da chapa ou do tubo

f_{y0} - tensão escoamento do aço do perfil do banzo

g – gap longitudinal entre duas diagonais

g_t - gap transversal entre duas diagonais

h_0 – altura da seção transversal do banzo

h_1 - largura da chapa

h_2 - altura da chapa

k_g – constante que depende das condições de contorno e da relação entre o comprimento e a largura da chapa

t_0 – espessura da parede do banzo em perfil tubular

t_1 - espessura da chapa

c) Letras gregas

β_1 - esbeltez da chapa

γ – fator de redução de plasticidade pra levar em consideração o comportamento inelástico da chapa

ε - deformação

ε_u - deformação de ruptura do material

ε_{VM} - deformação equivalente de von Mises

η - parâmetro geométrico

μ - fator de correção da resistência da ligação das conexões multiplanares

ν = coeficiente de Poisson

σ - tensão

σ_u - tensão crítica de flambagem da chapa

σ_{VM} - tensão de von Mises

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A utilização de estruturas metálicas na construção civil cresceu significativamente no Brasil nos últimos anos devido ao crescimento da economia brasileira. O governo por conta disso vem investindo em infraestrutura e diversas empresas nacionais e multinacionais estão instalando suas fábricas no Brasil. A estrutura metálica é considerada leve se comparada com as estruturas de concreto armado, em especial quando há a necessidade de vencer grandes vãos e isso faz com que a mesma tenha uma enorme vantagem. Outra vantagem da utilização da estrutura metálica está na execução que é muito rápida sendo isso algo importante principalmente no caso da construção de uma fábrica, por exemplo, pois quanto mais rápida for a execução da obra, mais rápido a fábrica poderá começar a funcionar e assim mais cedo ocorrerá o retorno do empreendimento. Por esses motivos várias obras de infraestrutura, fábricas, galpões de armazenamento, shoppings, supermercados e até mesmo edifícios vem utilizando esse material como forma estrutural.

Associados ao crescimento da economia brasileira estão dois grandes eventos esportivos que ocorrerão no Brasil nos próximos anos, a Copa do Mundo de Futebol que ocorrerá em 2014 e os Jogos Olímpicos em 2016, e para que o país esteja apto a receber esses dois eventos será necessário o investimento em diversas áreas de infraestrutura e em boa parte deles as estruturas metálicas estão aparecendo com força total.

Comparando-se a quantidade de obras em estruturas de aço existentes no Brasil com as estruturas em outras partes do mundo, como Europa e Estados Unidos, percebe-se que esse campo ainda possui um grande potencial de crescimento no país.

Nas Figuras 1 e 2 podem-se ver alguns exemplos de estruturas metálicas na Europa e no Brasil respectivamente.



a) Gare do Oriente – Lisboa



b) Aeroporto de Dublin

Figura 1 – Exemplos de estruturas metálicas na Europa (Arquivo Pessoal)



a) Indústria Valeo Guarulhos

Fonte: www.metalica.com.br/aco-solucao-de-expansao-para-projeto-industrial (Acessado em 14/11/2012)



b) Viaduto Santa Ifigênia

Fonte: pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Viaduto_Santa_Ifig%C3%AAnia.jpg (Acessado em 14/11/2012)

Figura 2 – Exemplos de estruturas metálicas no Brasil

As estruturas em aço mais empregadas no Brasil são constituídas por perfis abertos laminados e soldados tais como os perfis “W”, “WT”, “U”, “CVS”, “CS”, “VS” e cantoneiras. A grande utilização desses tipos de perfis ocorre pelo fato deles serem mais baratos se comprados com os perfis tubulares, além do fato de que as ligações desses perfis abertos são mais simples e mais baratas se comparadas com as ligações feitas com perfis tubulares.

Na Europa e nos Estados Unidos é mais comum à utilização de perfis tubulares e mesmo com algumas desvantagens no Brasil, existem algumas obras no país que já vem utilizando esse tipo de estrutura e parece que o número da mesma está aumentando a cada dia devido ao forte investimento das empresas produtoras de perfis tubulares tanto na área de pesquisa de novas ligações como no apoio aos escritórios de arquitetura e cálculo estrutural e até mesmo na diminuição do preço de alguns perfis tubulares para que esse produto comece a ter uma maior aceitação no mercado brasileiro.

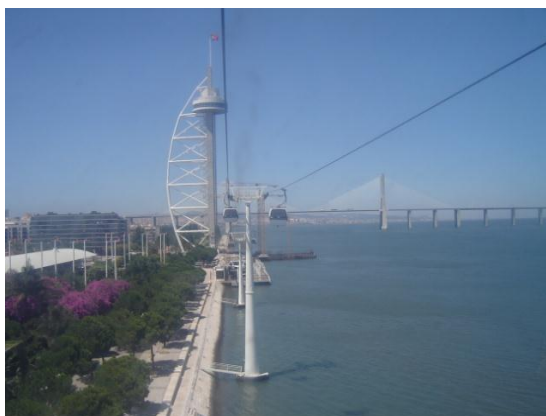
Nas Figuras 3 e 4 observam-se alguns exemplos de estruturas metálicas tubulares na Europa e no Brasil respectivamente.



a) Aeroporto de Barajas – Madri



b) Estádio do Benfica – Lisboa



c) Torre Vasco da Gama – Lisboa



c) L'Hemisfèric – València

Figura 3 – Exemplos de estruturas tubulares na Europa (Arquivo Pessoal)



a) Indústria Valeo Campinas

Fonte: Revista Finestra 18, 1999, p.89



b) Passarela em Curitiba

Fonte: Revista Finestra 34, 2003, p.53



c) Reforma do Estádio Governador Magalhães Pinto, em Belo Horizonte por SEPÚLVEDA (2013)

Figura 4 – Exemplos de estruturas tubulares no Brasil

Segundo SANTOS (2003), algumas vantagens do uso de perfis tubulares de seção circular sem dão com o fato de se tratar de um perfil de forma simples e de possuir excelentes propriedades mecânicas, o que torna possível a elaboração das mais variadas obras com soluções leves. Outro fator que faz com que o perfil circular seja plasticamente mais interessante é que a resistência e a rigidez das estruturas

podem ser otimizadas, modificando a espessura da parede do tubo, sem precisar alterar as dimensões externas da seção ou a geometria da estrutura.

Além dessas vantagens descritas por SANTOS (2003), os perfis tubulares possuem as seguintes vantagens: menor área para proteção contra incêndio e contra oxidação; possibilidade de utilização e aproveitamento de seu interior (por exemplo, condicionando concreto em seu interior para constituir pilares reforçados de estrutura mista); excelente resistência a impactos e empuxos de fora para dentro e vice-versa; bom desempenho aerodinâmico; e aspecto visual mais agradável do que com os perfis metálicos abertos.

Para unir os perfis tubulares de uma estrutura geralmente são utilizadas soldas entre os perfis ou ainda podem-se soldar chapas nos perfis para que os mesmos sejam ligados por parafusos ou pinos.

Os cortes em boca de lobo são também utilizados e formam esteticamente uma harmonia com o conjunto, além de serem eficientes para as ligações tubulares, mas seu custo é muito elevado e por isso esse tipo de ligação acaba sendo utilizado apenas quando houver exigência arquitetônica.

A utilização das chapas de ligação facilita tanto no processo de corte, quanto no processo de soldagem, pois a geometria simples das chapas, o corte reto nos tubos e as soldas para unir esses são de fácil execução. Este tipo de ligação com chapas vem sendo utilizado em maior escala e é adequado para estruturas padronizadas como, por exemplo, galpões industriais, supermercados e demais estruturas de grande porte. As Figuras 5 e 6 mostram dois exemplos de ligações com chapas e dois exemplos de ligações com boca de lobo respectivamente.



Figura 5 – Ligações tubulares em chapa (Arquivo Pessoal)



Figura 6 – Ligações tubulares com boca de lobo (Arquivo Pessoal)

O desafio de encontrar uma solução para ligações tubulares em treliças multiplanares que seja segura, de fácil execução, com baixo custo de fabricação e montagem, levou ao desenvolvimento da ligação deste estudo.

Para certificação desta ligação, avaliação dos fenômenos envolvidos e desenvolvimento de um procedimento de cálculo capaz de prever eficientemente sua resistência, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre o tema, serão desenvolvidos modelos numéricos com a utilização de elementos finitos e estes modelos serão comparados com os resultados da ligação pinada com chapa em treliças tubulares planares analisadas por MINCHILLO (2011) para elaboração de um fator de correlação entre os dois tipos.

1.2 PROPOSTA DE TRABALHO

Muitos engenheiros e arquitetos não utilizam estruturas tubulares em seus projetos por causa da dificuldade na elaboração, execução e custo da ligação para estas estruturas. Assim, a proposta deste trabalho consiste em estudar uma ligação em estruturas metálicas treliçadas multiplanares tubulares de seções circulares com chapa de topo com as extremidades das diagonais de um lado superpostas por um único parafuso e a isso denominamos ligação pinada.

Em geral quando se tem esse tipo de estrutura utiliza-se a ligação soldada que nem sempre é tão fácil e barata especialmente se essa ligação tem que ser feita em campo. Com essa ligação em chapa e pinada proposta no trabalho, será possível obter um ganho no custo de fabricação, na rapidez da montagem e facilidade no transporte das peças, além da versatilidade no detalhamento das ponteiros das diagonais, lembrando que uma montagem rápida reflete em ganhos econômicos no caso de obras industriais e comerciais e por esses motivos essa ligação foi visada para o estudo.

Outra vantagem dessa ligação em estudo diz respeito à estética, já que apresenta apenas chapa e o pino, quando vista a distância, praticamente não é percebida tornando-a harmoniosa com o conjunto da estrutura tubular treliçada multiplanar.

Esse tipo de ligação já foi pesquisada por MINCHILLO (2011), porém a pesquisadora analisou essa ligação apenas em treliças planares e chegou a sugerir no final do seu trabalho a realização de estudos paramétricos para esta ligação no caso de treliças multiplanares. Dessa forma, este trabalho consiste em utilizar os resultados obtidos na pesquisa de MINCHILLO (2011), modelando no programa de elementos finitos ANSYS novas ligações com as mesmas dimensões de tubos, chapas e pinos, porém agora com a treliça multiplanar, analisando os resultados dos dois tipos de ligação visando uma comparação dos resultados obtidos nos dois estudos para a elaboração de um fator de correlação entre os mesmos.

A Figura 7 apresenta um exemplo de treliça multiplanar onde as diagonais possuem ponteira com chapa *gusset*. Na Figura 8 é apresentado o modelo experimental de REQUENA *et al* (2008), que realizaram um ensaio em escala real de uma treliça de 30m utilizando a ligação de chapa de topo deste estudo. No detalhamento das ponteiras das diagonais foi utilizada ponta amassada.

Cabe ressaltar que neste trabalho não modelaremos as diagonais e nem os pinos. Apenas serão modelados os tubos, as chapas e a solda de contato entre os dois. Para simular as diagonais aplicaremos nos furos o carregamento que estas transmitiriam para a chapa se as mesmas estivessem no modelo como pode ser observado na Figura 9.



Figura 7 – Ligação entre banzo e diagonais com chapa de topo em uma treliça multiplanar



Figura 8 – Treliça com 30m de vão utilizando chapa de topo

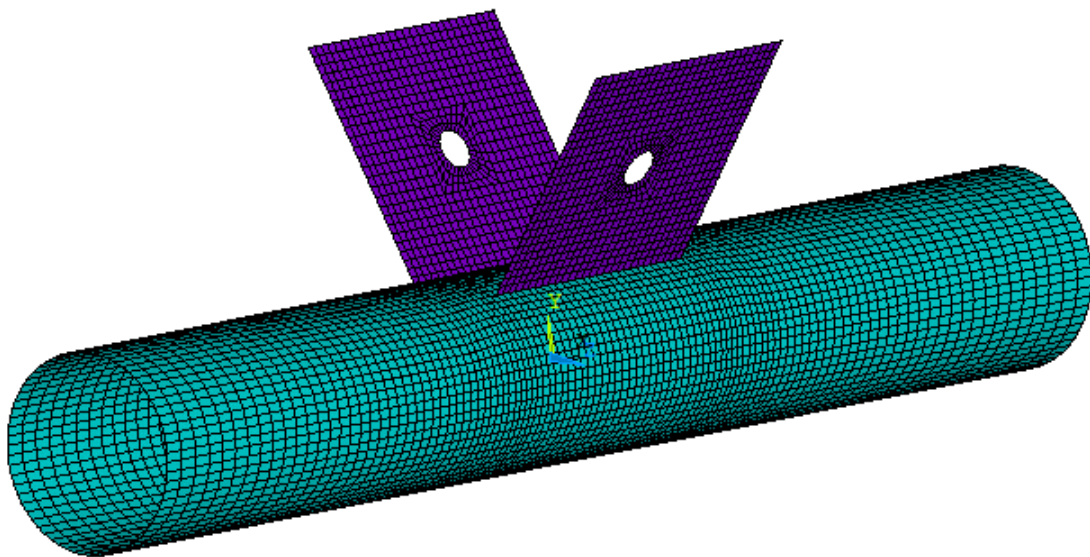


Figura 9 – Modelo da ligação multiplanar com chapa em estudo

2 ESTADO DA ARTE

2.1 HISTÓRICO DAS LIGAÇÕES TUBULARES

O uso das estruturas tubulares em grande escala começou no Japão na década de 50 segundo KURABANE (1989). Para PACKER (2000) os tubos circulares foram fabricados inicialmente por Stewarts and Lloyds, no Reino Unido em 1952, porém as primeiras recomendações para o dimensionamento de ligações entre perfis tubulares circulares de treliças foram apresentadas em 1951 por JAMM (1951). Com este trabalho inicial, diversas pesquisas referentes a esse assunto foram realizadas na Europa, Japão e Estados Unidos. Além disso, com o crescimento da indústria petrolífera e as aplicações das estruturas tubulares em plataformas marítimas no Golfo do México fez com que o desenvolvimento do cálculo para perfis tubulares circulares e suas ligações avançassem em especial nos Estados Unidos.

Por causa dessas diversas pesquisas desenvolvidas, as normas internacionais começaram a incluir recomendações e formas de dimensionamento para esse tipo de ligações com perfis tubulares.

Além das normas internacionais, existem muitos pesquisadores que com suas publicações tratando exclusivamente sobre o tema das estruturas tubulares, demonstraram a enorme importância desse tipo de estrutura. Dentre esses pesquisadores podemos citar PACKER e HENDERSON (1997) que possui um maior foco de suas pesquisas nas ligações das estruturas tubulares e na análise de treliças. Outros pesquisadores importantes são RAUTARUUKKI (1998) e WARDENIER *et al.*(2010) que pesquisaram e obtiveram resultados nas áreas de resistência das seções tubulares, fadiga, resistência das estruturas tubulares em situação de incêndio e fabricação e montagem das estruturas, além de tratar também sobre as ligações.

Juntamente com as pesquisas realizadas nos Estados Unidos a respeito das ligações tubulares ocorreram pesquisas importantes também no Canadá e na Europa.

Segundo PACKER & HENDERSON (1997), após o surgimento das estruturas tubulares na Inglaterra, em 1959 surgiram alguns estudos teóricos e experimentais na Universidade de Sheffield sobre ligações soldadas de perfis tubulares quadrados e circulares, resultando assim, na elaboração de recomendações de dimensionamento para esses tipos de ligações. Essas recomendações foram em seguida adotadas no Canadá e publicadas por STELCO INC. (1971), no primeiro manual sobre ligações de estruturas metálicas tubulares no mundo.

Em 1962, o "Comité International pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubulaire" (CIDECT) foi fundado como uma organização internacional dos maiores produtores de perfis tubulares com o objetivo de atuar com parceria entre indústria e universidades para pesquisar, desenvolver e publicar os diversos assuntos relacionados aos perfis tubulares. Na década de 70, o CIDECT realizou inúmeras pesquisas referentes à resistência e comportamento de ligações tubulares. Dois dos primeiros trabalhos que tiveram o incentivo do CIDECT são EASTWOOD & WOOD (1970), que propuseram uma formulação para ligações de perfis tubulares retangulares, sendo pioneiros no cálculo de ligações entre este tipo de perfis.

Na década de 80 foi uma época de consolidação das pesquisas nessa área de perfis tubulares. Em 1981 STELCO INC. publicou a segunda edição de seu manual sobre ligações tubulares, este foi o primeiro texto em inglês a tratar do dimensionamento de estruturas metálicas tubulares segundo o método dos estados limites.

Ainda na década de 80 outras publicações importantes foram desenvolvidas com o tema de estruturas tubulares como é o caso do livro de WARDENIER (1982), que trata especificamente de ligações em estruturas tubulares, e também os livros do CIDECT que tratam sobre o dimensionamento, a construção de estruturas tubulares e as ligações soldadas em perfis tubulares.

Em 1983 o CIDECT patrocinou o "Canadian Symposium on HSS", o "Council of Canada" e o "Canadian Steel Construction Council" com o objetivo de ensinar os engenheiros estruturais e promover o uso dos perfis tubulares no Canadá.

Além do CIDECT, outro grupo denominado "International Institute of Welding" (IIW) contribuiu para o desenvolvimento e disseminação das ligações em perfis tubulares. Esse grupo foi formado por várias associações de estudos sobre soldas ao redor do mundo. Uma das principais contribuições deste grupo foi produzir recomendações sobre ligações em perfis tubulares no formato de norma, através de sua subcomissão XV-E que foi publicada em 1981.

Como essas recomendações propostas pelo IIW e as apresentadas por WARDENIER (1982), eram mais complexas que as recomendações anteriores, propostas por STELCO INC. (1971) foram desenvolvidos uma série de artigos explicativos com o intuito de auxiliar o projeto das ligações tubulares no Canadá.

A segunda edição das recomendações da IIW (1989) serviu de base para o desenvolvimento dos volumes 1 e 3 de uma série de guias publicados pelo CIDECT a partir de 1991 sobre diversos temas relacionados aos perfis tubulares, incluindo as ligações.

As formulações propostas pelo IIW (1989) para as ligações tubulares tornaram-se um consenso internacional, sendo adotadas pelo "European Committee for Standardization" no EUROCODE 3 (1992). Segundo KUROBANE (2002), essencialmente as mesmas equações foram usadas nas normas do Canadá (CISC), Japão (AIJ) e Austrália (AISC), que juntamente com o CIDECT (2009) e o EUROCODE 3 (1992) formam um grupo internacional que se baseia nas formulações do IIW.

A mais recente edição do IIW é a terceira e foi publicada em 2009. As principais alterações apresentadas nesta nova edição podem ser encontradas em ZHAO *et al* (2010), que também apresenta uma tabela informando quais normas seguem o IIW (1989), como o EUROCODE 3 (1992), e quais seguem o IIW (2009), como as novas edições dos volumes 1 e 3 do CIDECT (2009).

As normas americanas formadas por AWS D1.1 (1996), AISC (2010) e API RP 2^a (1991) não se basearam nas formulações do IIW (1989). A primeira edição da norma americana AWS D1.1 (1996), que traz formulações sobre ligações tubulares, foi publicada em 1972 (KUROBANE (2002)). A norma AISC (2010) adotou as mesmas

formulações da AWS D1.1 (1996) para especificar as ligações de perfis tubulares. Depois de ser revisada e atualizada constantemente ao longo dos anos, a norma AISC passou a contar também com o dimensionamento segundo o método dos estados limites em 1992 (MARSHALL (1999)). A última versão desta norma lançada em 2010 está na 14ª Edição.

Para PACKER & HENDERSON (1997), as formulações para as ligações tubulares retangulares e quadradas propostas pela AWS D1.1 (1996) na grande maioria das vezes concordam com as propostas pelo IIW (1989), porém o mesmo não ocorre com as ligações tubulares circulares, pois estas foram baseadas em recomendações para estruturas tubulares de plataformas marítimas norte americanas. Por conta dessa diferença entre as formulações das duas normas para as ligações tubulares circulares, KUROBANE & OCHI (1989) realizaram uma comparação entre ambas para o caso de ligações planas e multiplanares.

Ao fazer a comparação das versões da AWS D1.1 (1996) e da IIW (1989), os pesquisadores concluíram que as formulações da AWS D1.1 apresentaram erros maiores que as formulações da IIW (1989), especialmente em ligações K multiplanares. Esses erros podem acarretar em dimensionamentos que não vão a favor da segurança para ligações com banzos de paredes grossas e dimensionamentos muito conservadores para ligações com banzos de paredes finas, assim para corrigir essa situação foram propostas algumas alterações nas formulações da AWS D1.1 (1996).

Outro caso de comparação entre critérios de dimensionamento para ligações tubulares circulares foi realizado por MARSHALL (2004). O pesquisador discutiu quatro critérios de dimensionamento que mostravam as diferenças entre as formulações de cada uma delas. Os critérios comparados são os adotados na norma americana de soldas estruturais AWS D1.1 (1996); no guia prático para dimensionamento de plataformas API RP 2A (1991); no CIDECT (2009) e finalmente na norma americana para estruturas de aço AISC (2010), sendo que nesta última as formulações são praticamente as mesmas encontradas no CIDECT (2009), com algumas alterações com relação aos fatores de segurança.

Com o fim das análises, MARSHALL (2004) concluiu que na comparação entre a AWS D1.1 (1996) e o CIDECT (2009), os erros encontrados não eram significativos ou contra a segurança. Mesmo assim, ainda existem casos que necessitam ser analisadas com mais cuidado e maior profundidade, como no caso das ligações tubulares circulares do tipo X.

Segundo KUROBANE (2002), as diferenças entre as formulações da AWS D1.1 (1996) e do IIW (1989) foram diminuindo com o passar dos anos e o lançamento de suas revisões. Atualmente as formulações para ligações tubulares do Eurocode 3 (1992) e da AISC (2010), estão bem semelhantes, diferenciando-se apenas por alguns valores nos coeficientes das fórmulas.

Por causa dessa convergência entre as formulações de dimensionamento das ligações tubulares nas normas de vários países em torno das formulações propostas pelo IIW (1989), a norma brasileira de estruturas tubulares NBR16239, que se foi publicada em 2013 e que inclui recomendações de cálculo para diversos tipos de ligações tubulares, está sendo baseada nas formulações do EUROCODE 3 (1992) e do CIDECT (2009).

2.2 LIGAÇÕES PLANARES

O dimensionamento de ligações tubulares multiplanares requer o conhecimento de ligações planares, já que as resistências das ligações multiplanares são descritas na literatura, como a resistência de uma ligação planar multiplicada por fatores de correlação.

As ligações planares mais usuais em treliças recebem nomes de X, T, Y, N, K e KT dependendo da forma que as diagonais e as montantes são ligadas ao banzo, e possuem estes nomes por causa do desenho da ligação possuir semelhança com essas letras como pode ser visto na Figura 10.

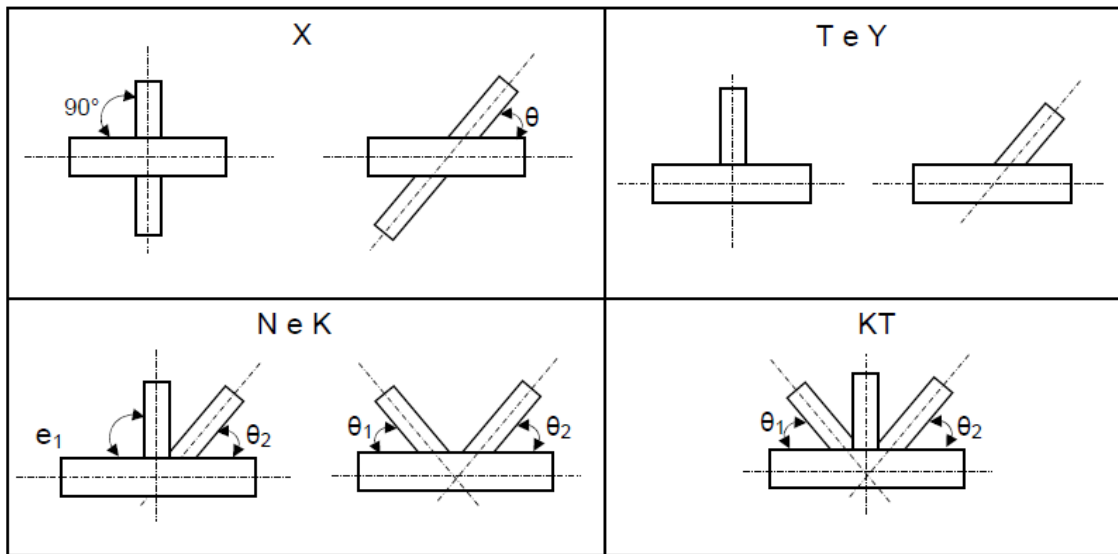


Figura 10 – Tipos de ligações de perfis tubulares em treliças planares por WARDENIER (2000)

Quando soldadas, as ligações dos tipos N, K e KT possuem dois tipos. Em um deles as barras das diagonais ou das montantes são afastadas (possuem um gap). No outro as barras estão sobrepostas. O tamanho do afastamento, gap, e a inclinação das diagonais determinam a excentricidade da ligação. A Figura 11 indica exatamente esse afastamento ou sobreposição das barras na treliça.

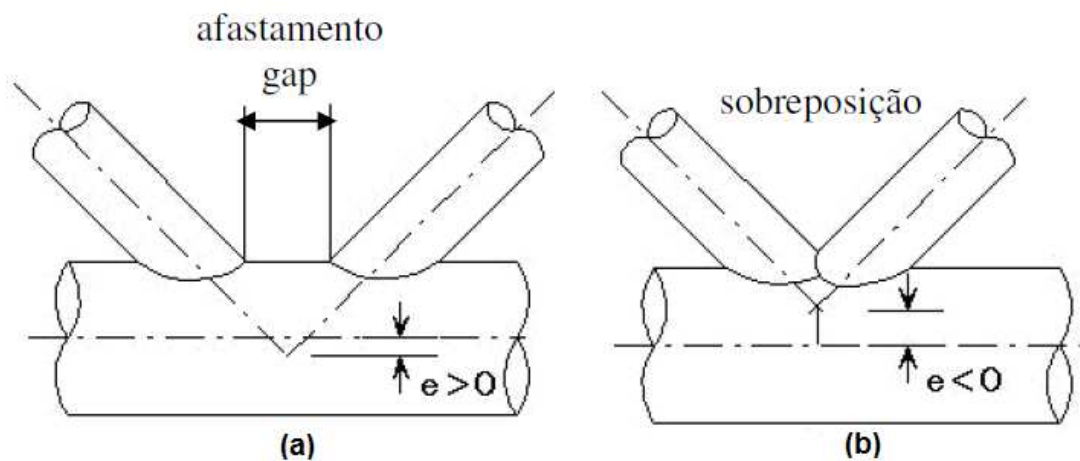
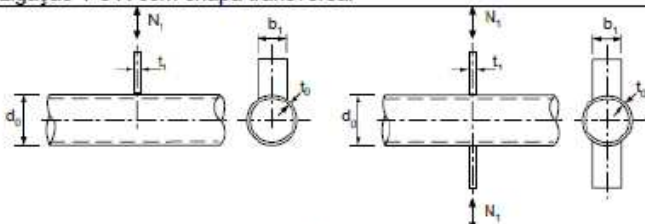
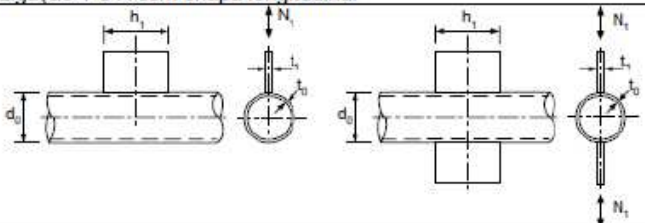
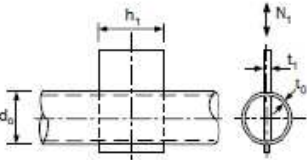


Figura 11 – Definição de afastamento (a) e sobreposição (b) por Wardenier (2001)

MINCHILLO (2011) ao analisar a ligação pinada com chapa de topo em treliças tubulares planar, que será melhor descrita no capítulo 2.5, classificou inicialmente essa ligação como T com chapa, também chamada de TP. Mas observando a Tabela 1 de KUROBANE *et al.* (2004), com as verificações paramétricas e o cálculo da resistência de ligações do tipo T e X, com chapas em diferentes configurações, observou-se que os critérios de dimensionamento propostos eram apenas para esforços verticais, típicos de esforços provenientes de montantes. A excentricidade que aparecia na ligação em estudo, devido à colocação da chapa de topo e à sobreposição das diagonais, não está prevista nos critérios de dimensionamento existentes por KUROBANE *et al.* (2004) e nem em outras bibliografias.

Tabela 1 – Resistência de ligações planas com chapa para perfis circulares por KUROBANE *et al.* (2004).

Tipo de Ligação	Estado Limite
<p>Ligação T e X com chapa transversal</p> 	<p>Plastificação do Banzo</p> $N_1 = \frac{5 \cdot f_{y0} \cdot t_0^2}{1 - 0,81\beta} \cdot f(n')$ <p>Cisalhamento</p> <p>Quando $b_1 \leq d_0 - 2t_0$</p> $N_1 = 2 \cdot t_0 \cdot b_1 \cdot \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}}$
<p>Ligação T e X com chapa longitudinal</p> 	<p>Plastificação do Banzo</p> $N_1 = 5 \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot (1 + 0,25\eta) \cdot f(n')$ <p>Cisalhamento</p> $N_1 = 2 \cdot (h_1 + t_1) \cdot \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}}$
<p>Ligação chapa longitudinal atravessando o tubo</p>  <p>Nota: Postulado conservador somente para plastificação da parede do banzo</p>	<p>Plastificação do Banzo</p> $N_1 = 5 \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot (1 + 0,25\eta) \cdot f(n')$ <p>Cisalhamento</p> $N_1 = 4 \cdot (h_1 + t_1) \cdot \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}}$
Parâmetros	
Para $n' < 0$ (compressão): $f(n') = 1 + 0,3n'(1 - n') \leq 1,0$	$\beta = b_1 / d_0$
Para $n' \geq 0$ (tração): $f(n') = 1,0$	
Quando $n' = \sigma_0 / f_y$ e σ_0 é a tensão normal no perfil do banzo na chapa de ligação devido à carga axial e ao momento fletor (se aplicável).	$\eta = h_1 / d_0$
Limites de validade	
$10 \leq d_0 / t_0 \leq 40$	
$\eta \leq 4$	

O esquema da Figura 12 apresenta três formas estruturais iguais (um banzo e duas diagonais), porém com três tipos de ligações distintas.

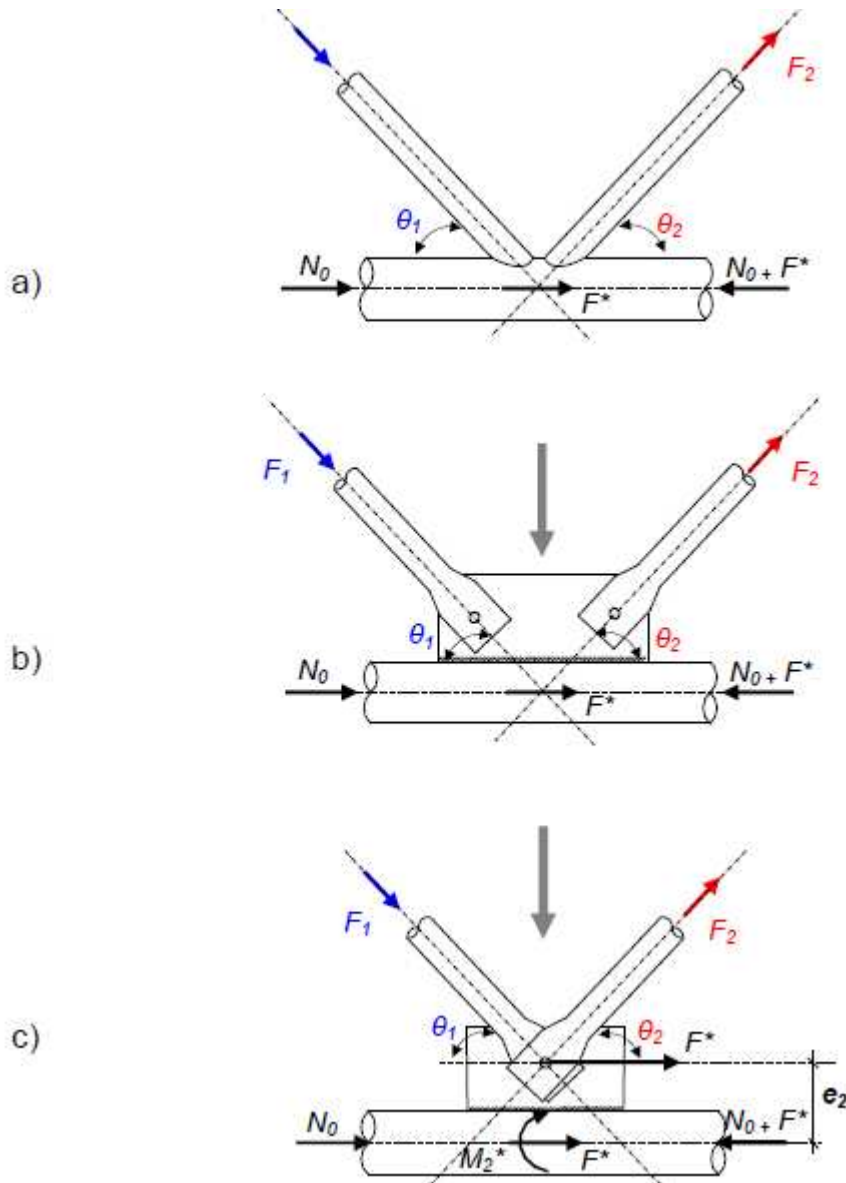


Figura 12 – Esquema ligações planares por MINCHILLO (2011)

A Figura 12(a) apresenta uma ligação K tubo-tubo soldada, com as forças atuantes e os ângulos de inclinação das diagonais. As linhas de centro das barras da ligação se interceptam em um mesmo ponto de trabalho, não havendo, portanto, nenhum tipo de excentricidade na ligação.

Na sequência, a Figura 12(b) apresenta a colocação de uma chapa de ligação no topo da barra do banzo. A chapa possui geometria e dimensões adequadas para que as linhas de centro sejam mantidas e não apareça excentricidade. A inclinação das diagonais, que podem ser parafusadas ou soldadas à chapa, também é mantida.

Por último, na Figura 12(c) as diagonais são sobrepostas e ligadas à chapa de topo por um único parafuso (um pino), tornando-se uma ligação pinada. Aparece, então, uma excentricidade entre o eixo da barra do banzo e o centro do furo da chapa, promovendo um momento fletor na chapa, que por sua vez solicitará a parede do perfil do banzo. Esta configuração possibilita a utilização de chapas de ligação menores, cordões de solda menores e ainda um único parafuso, reduzindo custos e facilitando a montagem da estrutura.

Neste último tipo de ligação, a falha pode ocorrer na solda entre a chapa e o banzo, no parafuso que une as diagonais e a chapa, além de falhas nos próprios elementos que constituem a ligação, como a flambagem da chapa, o esmagamento e/ou abaulamento do furo e a plastificação da parede do banzo.

Por não haver em nenhuma bibliografia e em normas nacionais e internacionais a análise desse último tipo de ligação, MINCHILLO (2011) a analisou experimentalmente e numericamente para chegar a uma formulação de resistência desse tipo de ligação que hoje se encontra apresentada na norma de tubos brasileira NBR16239 (2013).

2.2.1 Modo de Falha em Ligações Planares Soldadas

Segundo WARDENIER *et al.* (2010) os modos falha da ligação de perfis tubulares podem ocorrer de modo geral por capacidade última de resistência, limitação da deformação e observação de início de ruptura.

A literatura apresenta diferentes falhas que podem ocorrer dependendo do tipo de ligação, das condições de carregamento e dos vários parâmetros geométricos.

PACKER et. al. (1997), RAUTARUUKKI (1998) e PACKER et. al. (1992), apresentam seis modos de falhas para ligações tipo K, onde uma diagonal é comprimida e a outra tracionada que podem ser observadas na Figura 13:

Modo A: Plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo junto a diagonais e montantes. Neste modo A, uma das diagonais comprime a face do tubo do banzo, enquanto a outra traciona. É o modo de falha mais comum em ligações com afastamentos (gap);

Modo B: Ruptura por punção da parede do banzo na área de contato com as montantes ou as diagonais (tração ou compressão);

Modo C: Ruptura ou plastificação na região da solda ou flambagem localizada de diagonais ou montantes devido à distribuição não uniforme de tensão. Este caso de ruptura ocorre em ligações sobrepostas;

Modo D: Flambagem localizada de diagonais ou montantes comprimidos ou do banzo, na região da ligação. Amassamento da parede do banzo próximo à diagonal tracionada ocorre ocasionalmente em ligações tubulares quadradas e retangulares com banzo em que é expressiva a razão da largura pela espessura (b_0/t_0 ou h_0/t_0);

Modo E: Plastificação ou instabilidade por cisalhamento do banzo junto a diagonais ou montantes. A situação de escoamento por cisalhamento do banzo na região de espaçamento é observado em ligações com afastamento em que a largura ou o diâmetro das diagonais é próxima da largura do banzo ($\beta = 1$)

Modo F: Plastificação, amassamento ou instabilidade da face lateral da seção transversal do banzo junto as diagonais ou montantes submetidos à tração.

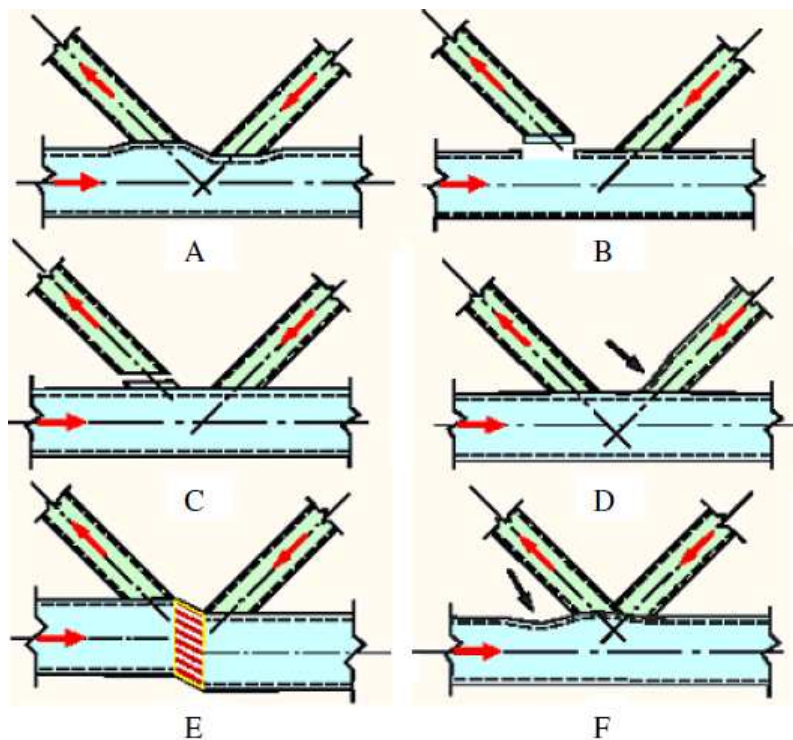


Figura 13 – Modos de falha em ligações tipo K por WARDENIER (2001)

2.3 LIGAÇÕES MULTIPLANARES

Uma ligação multiplanar consiste em uma ligação com diversos perfis dispostos em diferente planos e são comumente usadas em estruturas tipo torres, coberturas de grandes vãos e plataformas de petróleo.

Existem diferentes tipos de ligações multiplanares tais como XX, TT, TX e KK como se pode observar na Figura 14. A partir do comportamento das ligações nos quatro grupos, é possível generalizar a interação entre cargas em planos diferentes segundo KUROBANE (1995).

Conexões Uniplanares

Conexões Multiplanares

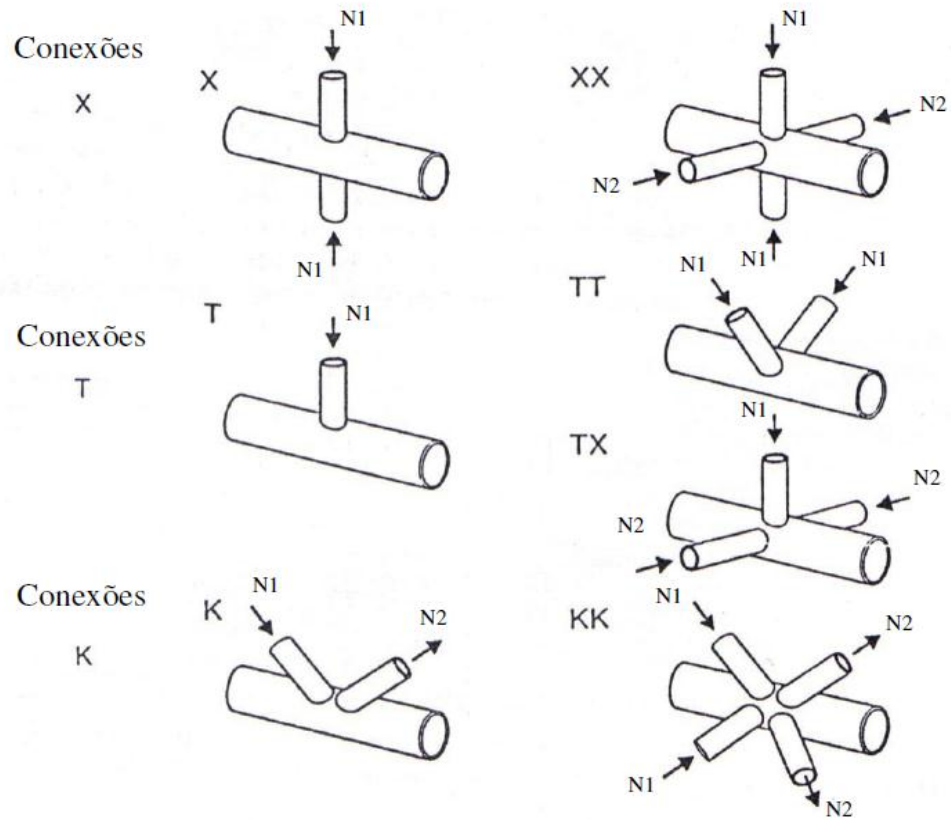
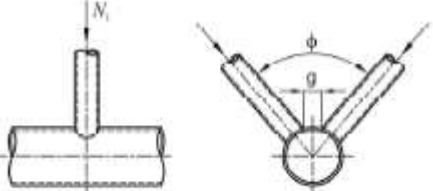
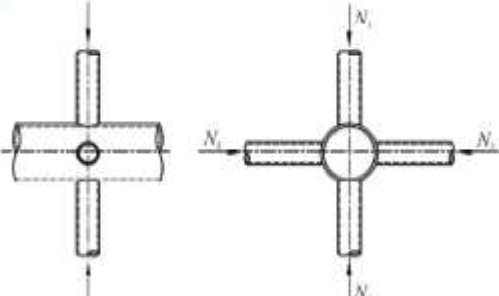
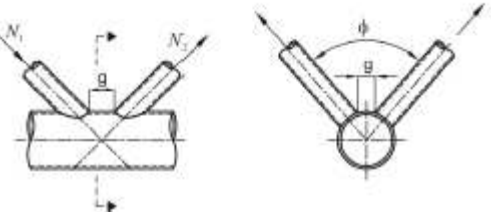


Figura 14 – Tipos básicos de ligações multiplanares por KUROBANE (1995)

As resistências de ligações multiplanares são obtidas utilizando-se a resistência de uma ligação planar correspondente (já que as mesmas possuem equações para o cálculo de sua resistência) multiplicada por fatores de correção que foram encontrados em ensaios experimentais ou numéricos feitos com ligações de estruturas multiplanares. Na Tabela 2 encontram-se os valores resumidos desses fatores para as ligações TT, XX e KK submetidos a carregamentos simétricos e com as ligações sendo soldadas. Nessa tabela os fatores de correção são menos precisos que os encontrados por KUROBANE (1995), mas correspondem a valores médios apresentados pelo autor.

Tabela 2– Fatores de correção da resistência de ligação das conexões multiplanares de seção circular por PACKER (1997) e EUROCODE (2005)

Tipo de ligação	Fator de redução μ
<p>TT</p> <p>A diagonal 1 pode ser tracionada ou comprimida</p> 	<p>$60^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$</p> <p>$\mu = 1,0$</p>
<p>XX</p> <p>As diagonais 1 e 2 podem ser comprimidas ou tracionadas. $N_{2,sd} / N_{1,sd}$ é negativo se uma diagonal está tracionada e a outra comprimida</p> 	<p>$\mu = 1,0 + 0,33 N_{2,sd} / N_{1,sd}$</p> <p>Levando-se em conta o sinal de $N_{1,sd}$ e $N_{2,sd}$</p> <p>Onde: $N_{2,sd} \leq N_{1,sd}$</p>
<p>KK</p> <p>A diagonal 1 é sempre comprimida e a diagonal 2 é sempre tracionada.</p> 	<p>$60^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$</p> <p>$\mu = 0,9$</p> <p>Garantindo que, nas ligações afastadas, a seção 1-1 do banzo satisfaça:</p> $\left[\frac{N_{0,sd}}{A_0 f_{y0}} \right]^2 + \left[\frac{V_{0,sd}}{A_v f_{y0} / \sqrt{3}} \right]^2 \leq 1,0$

2.3.1 Histórico das Ligações Multiplanares

Segundo MAKINO *et al.* (1984), o estudo do efeito multiplanar na resistência estática em ligações tubulares começou no início dos anos de 1980 com uma série de

ligações multiplanares KK ensaiadas e analisadas no Japão. Nos anos seguintes, o interesse foi cada vez mais aumentando e assim surgiram diversas pesquisas em todo o mundo. Dentre os trabalhos realizados nessa área, podem-se citar os seguintes pesquisadores: MITRI *et al.* (1987), NAKACHO *et al.* (1989), SCOLA *et. al* (1990) e PAUL *et al.* (1993a) sobre ligações TT; PAUL *et al.* (1989) e VAN DER VEGTE *et al.* (1991) sobre ligações X; e COUTIE *et al.* (1983), MOUTY & RONDAL (1990), MAKINO *et al.* (1993) e PAUL *et al.* (1992) sobre ligações KK.

MAKINO *et al.* (1984) ensaiaram 20 ligações do tipo KK e perceberam dois modos de colapso para ligações submetidas a carregamento simétrico como pode ser observado na Figura 15.

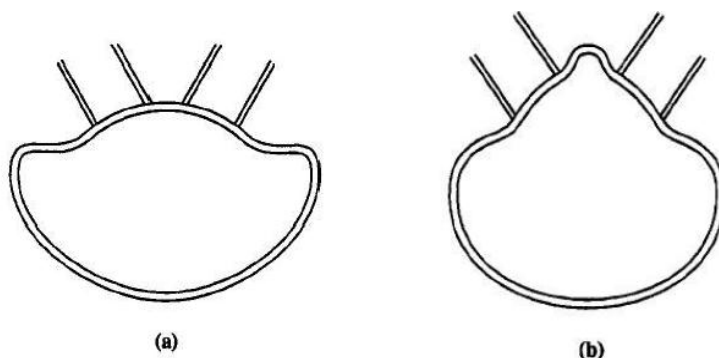


Figura 15 – Tipos de colapsos em ligações “KK” por LEE e WILMSHURST (1997)

MOUTY & RONDAL (1990) realizou 96 testes e os resultados dos mesmos foram analisados por PAUL (1992) que concluiu que as relações de resistência nesses testes eram menores do que as obtidas por MAKINO *et al.* (1984). No ano seguinte, os cálculos numéricos de WILMSHURST & LEE (1993) confirmaram os resultados de PAUL (1992).

Os manuais do CIDECT (WARDENIER *et al* (1991) e PACKER *et al.* (1992)), a American Welding Society (AWS (1996)), KUROBANE (1995) e PACKER *et al.* (1997) mostram metodologias de cálculo para estruturas planares e multiplanares.

PAUL *et al.* (1992) estenderam o trabalho de MAKINO *et al.* (1984) e ensaiaram mais 18 ligações. Com a junção desses dois trabalhos, PAUL *et al.* (1993)

desenvolveram duas equações de resistência, uma para cada modo de colapso, para estimar a capacidade da ligação.

Em 1995, LEE & WILMSHURST (1995) apresentaram uma análise numérica de ligações KK com a utilização do método dos elementos finitos. No ano seguinte eles fizeram um estudo paramétrico de ligações KK e em 1997 estudaram as ligações KK submetidas a esforços assimétricos

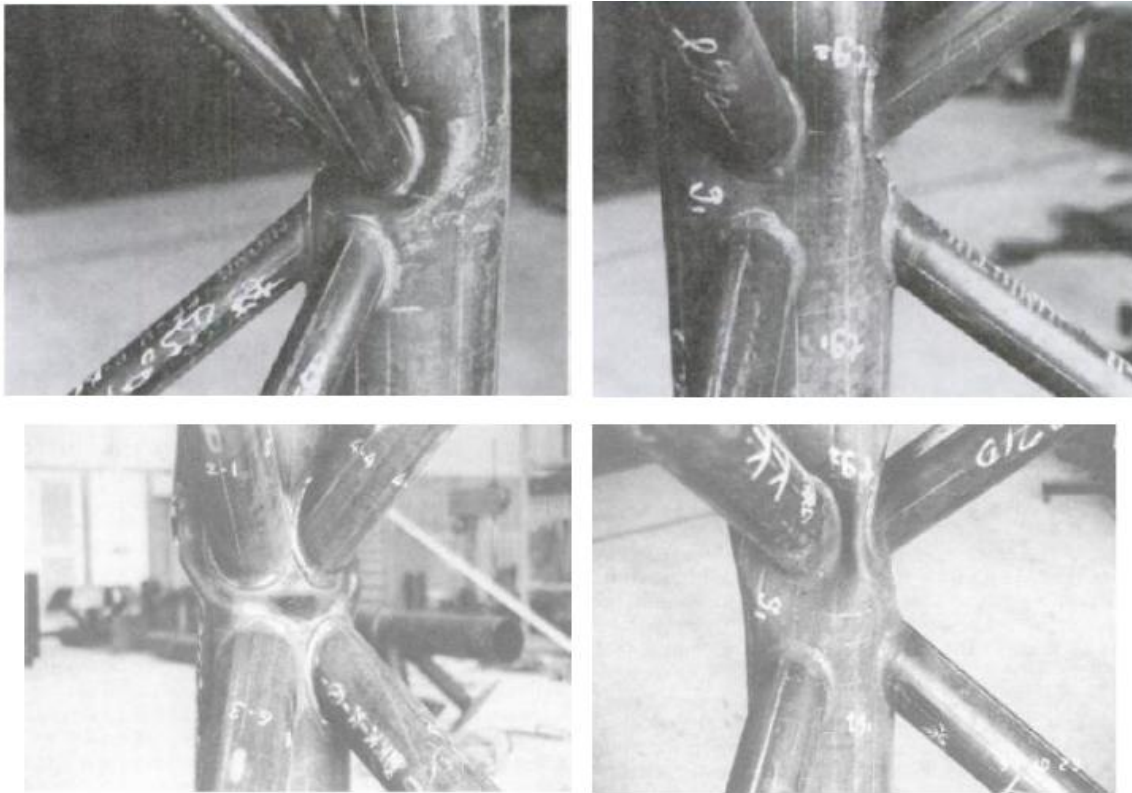
2.3.2 Modo de Falha em Ligações Multiplanares Soldadas

As ligações com afastamento (gap) KK e TT quando carregadas com carregamentos simétricos apresentam dois tipos possíveis de colapso como pode ser observado na Figura 16.

A Figura 16(a) apresenta um colapso que ocorre quando um par de diagonais próximas está carregado no mesmo sentido ocorrendo assim um “aperto ou esticamento” na parede do banzo. Essas diagonais por estarem muito próximas funcionam como um elemento penetrante no banzo e com isso não ocorre distorção da parede do banzo entre as diagonais vizinhas.

Já a Figura 16(b) apresenta um colapso onde ocorre uma deformação radial na parede do banzo entre as diagonais vizinhas, formando quinas e dobras entre essas diagonais.

Segundo KUROBANE (1995), o colapso observado na Figura 16(a) ocorre quando o afastamento (gap) transversal g_t ou o ângulo φ são pequenos como pode ser observado nas Figuras 17 e 18. À medida que g_t ou o ângulo φ aumentam, pode ocorrer o colapso observado na Figura 16(b).



(a)

(b)

Figura 16 - Modos de colapso de ligação KK com esforços axiais simétricos por KUROBANE (1995)

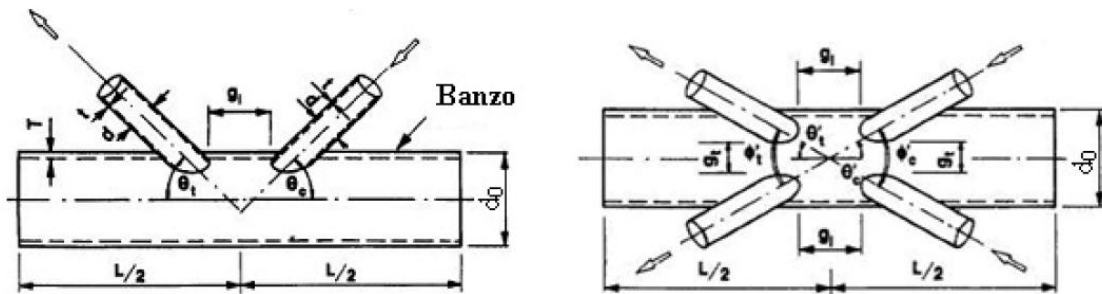


Figura 17 - Configurações e parâmetros geométricos da ligação multiplanar KK por WARDENIER (2001)

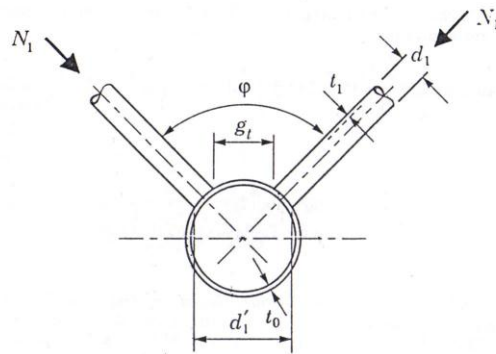


Figura 18 - Parâmetros de ligação KK com afastamento (gap) por PACKER (1997)

Segundo PAUL *et al.* (1994) no colapso observado na Figura 16(a), a resistência última da ligação KK e TT é a resultante da força axial nas duas diagonais comprimidas. A resistência da ligação é calculada pelo produto de um fator de correção multiplanar com a resistência da ligação planar. Para esse caso, as equações de dimensionamento são empíricas.

Assim, para as ligações KK com o colapso da Figura 16(a), a resistência da ligação multiplanar é igual ao fator de correção multiplanar, calculado pela equação 2.1, multiplicado pela resistência planar da ligação K (Tabela 12 no Anexo B).

$$\text{Fator de correção} = 0,746 \cdot \left(1 + 0,693 \cdot \frac{d_1}{d_0}\right) \cdot \left(1 + 0,741 \cdot \frac{g}{d_0}\right) \quad 2.1$$

Já para as ligações TT com o colapso da Figura 16(a), a resistência da ligação multiplanar é calculada da mesma forma, porém utilizando o fator de correção multiplanar dada pela equação 2.2, e multiplicado este pela resistência planar da ligação T (Tabela 12 no Anexo B).

$$\text{Fator de correção} = 0,747 \cdot \left(1 + 0,586 \cdot \frac{d_1}{d_0}\right) \quad 2.2$$

Como para as ligações KK e TT com o colapso da Figura 16(a) a resistência da ligação é calculada por uma força resultante em um par de diagonais adjacentes, a

resistência da ligação será maior do que a resultante combinada das forças atuando nessas duas diagonais adjacentes.

No colapso observado da Figura 16(b), os dois planos de diagonais trabalham de maneira independentes uma da outra e assim a resistência última das ligações KK e TT é calculada apenas com os termos de correção multiplanar para as resistências planares das ligações K e T. As equações encontradas por PAUL (1992) são empíricas.

Assim, para as ligações KK com o colapso da Figura 16(b), a resistência multiplanar da ligação é igual ao fator de correção multiplanar da equação 2.3 multiplicado pela resistência planar da ligação K (Tabela 12 no Anexo B). E para ligações TT o cálculo é dado da mesma forma, porém para esta deve ser utilizado o fator de correção multiplanar da equação 2.4 multiplicado pela resistência planar da ligação T (Tabela 12 no Anexo B).

$$\text{Fator de correção} = 0,798.(1 + 0,808.\beta) \left(1 - 0,410.\frac{g_t}{d_0} \right) \left(1 + 0,423.\frac{g}{d_0} \right) \quad 2.3$$

$$\text{Fator de correção} = 1,33.\left(1 - 0,336.\frac{g_t}{d_0} \right) \quad 2.4$$

Para ligações KK e TT com o colapso da Figura 16(b) a resistência da ligação é calculada como a carga limite em uma diagonal (no caso da ligação KK, a diagonal é a comprimida). Com isso a resistência de ligação de uma diagonal será maior do que a força fatorada nessa diagonal.

Até agora foi mostrado como a ligação se comporta quando o carregamento é simétrico, ou seja, a treliça triangular tem dois de seus banzos comprimidos e o carregamento está nos dois planos da diagonal como pode ser observado na Figura 19, a carga estava na direção de V.

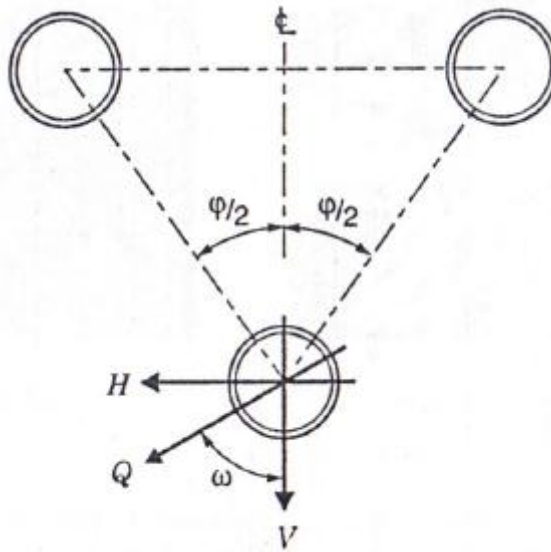


Figura 19 - Treliça triangular submetida a carregamento em qualquer direção por PACKER (1997)

Para ser considerado um carregamento assimétrico basta existir um carregamento na horizontal incidindo sobre a estrutura, como exemplo pode-se citar o vento, que na Figura 19 aparece como H, e nesse caso na ligação KK aparecerão forças axiais nas diagonais que não serão mais simétricas como anteriormente mostrado.

Com o carregamento assimétrico, as barras das diagonais opostas entre si estão carregadas com forças de mesmo sentido e dessa forma cada par de ligação K possui um comportamento distinto e independente uma da outra. Por esse motivo, o colapso apresentado anteriormente na Figura 16(a) não ocorre. Assim, pode-se encontrar a resistência da ligação KK apenas considerando as equações de resistência da ligação K planar (Tabela 13 no Anexo B) com os multiplicadores de correção de KUROBANE (1995) apresentados nas equações 2.5 e 2.6.

$$C_{KK} = 0,858 \quad \text{quando } \frac{g^t}{d_0} \geq 0,16 \quad 2.5$$

$$C_{KK} = \left(1,36 - 3,17 \cdot \frac{g}{d_0} \right) \quad \text{quando } \frac{g}{d_0} < 0,16 \quad 2.6$$

Outro caso onde pode aparecer um carregamento assimétrico na ligação KK ocorre quando se tem um carregamento diagonal, mostrado na Figura 19 como Q que está girado de um ângulo ω com a vertical. Nesse caso, KUROBANE (1995) para determinar a resistência da ligação seguiu a técnica de interpolação usando o critério descrito a seguir.

Quando o ângulo ω for igual a $\varphi/2$, as diagonais do plano transmitem toda a carga e por esse motivo deve-se considerar a resistência da ligação de uma ligação K planar.

Resumindo, quando $\omega = 0$ considera-se o carregamento como simétrico, já com $\omega = \varphi/2$ ligação deve ser considerada como uma ligação de um K planar e finalmente com $\omega = 90^\circ$ o carregamento é assimétrico.

A American Welding Society (AWS 1996) apresenta um critério geral de dimensionamento para todas as ligações multiplanares com perfis circulares sem sobreposição e sem a necessidade de classificar o tipo de ligação. Porém ao utilizar esse critério deve-se tomar cuidado, pois o mesmo não é tão preciso quanto aos inúmeros resultados dos ensaios experimentais de PACKER *et. al.* (1997).

As formulações da AWS não estão a favor da segurança quando o banzo da treliça se torna menos esbelto, ou seja, quando a relação d_0/t_0 diminui. Isso foi atribuído por KUROBANE (1995) à formulação da força “espessura ao quadrado” na formulação da AWS, enquanto deveria ser de uma potência entre 1,7 e 1,8 da espessura.

2.4 CHAPAS GUSSET

Um dos primeiros estudos mais significativos realizados para determinar a distribuição elástica de tensões em chapas de *gusset* foi feita por WHITMORE (1952).

Nesse estudo, o autor utilizou uma treliça Warren com chapa de alumínio em escala 1:4 para analisar a ligação no banzo inferior. Na Figura 20 é possível ver o desenho do protótipo e o detalhe da ligação ensaiada pelo autor.

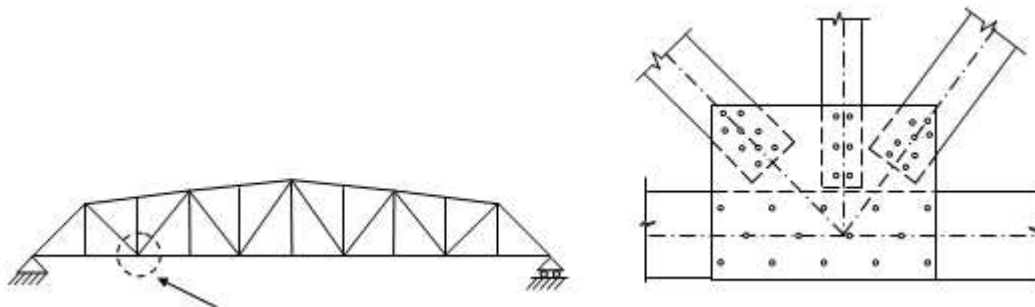


Figura 20 – Protótipo de ligação com chapa *gusset* de WHITMORE (1952)

Nos ensaios, WHITMORE (1952) concluiu que a teoria de viga para determinar a flexão e o cisalhamento em um plano com as extremidades das diagonais, não reflete com precisão o estado de tensões nas chapas. Podem-se estimar com precisão as tensões máximas de compressão e tração se for assumido que a força em cada diagonal deve ser aplicada na chapa como uma pressão uniformemente distribuída pela área que resulta da multiplicação da espessura da chapa por uma dimensão que é chamada de “largura efetiva de Whitmore” ao longo do eixo diagonal.

Para obter essa largura efetiva é necessário traçar linhas que formam um ângulo de 30° a partir da primeira linha de parafusos e prolongando-as até cruzar com uma linha perpendicular à barra, por meio da linha inferior de parafusos como pode ser observado na Figura 21. Como esse conceito apresentou boa correlação com os resultados dos ensaios, essa forma tem sido uma das principais formas de dimensionamento de chapas de ligação. A carga de escoamento da chapa pode ser obtida aproximadamente pela multiplicação da tensão de escoamento pela área da placa na seção de largura efetiva.

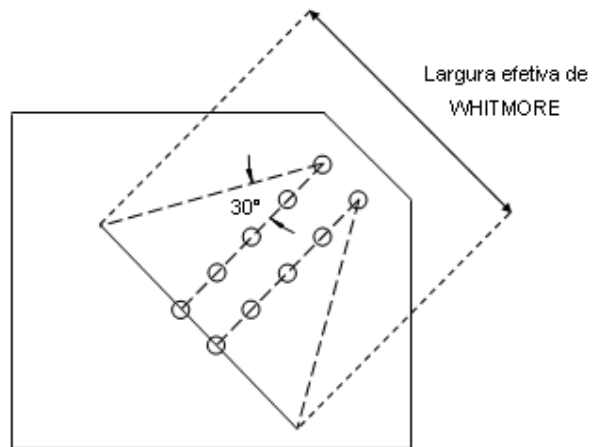


Figura 21 – Largura efetiva de WHITMORE (1952)

Outros pesquisadores elaboraram pesquisas para verificar e confirmar os resultados obtidos na pesquisa de WHITMORE (1952), dentre eles podemos citar IRVAN (1957), HARDIN (1958).

IRVAN (1957) pesquisou a distribuição de tensões nas chapas de *gusset* duplas em treliça Pratt e obteve como respostas localizações de tensões máximas semelhantes à WHITMORE (1952), porém com um método de cálculo um pouco diferente.

HARDIN (1958) também pesquisou uma ligação de chapa de *gusset* em uma treliça Pratt e confirmou os resultados de IRVAN (1957).

Foram feitos estudos em elementos finitos para determinar a distribuição de tensões elásticas em chapa de *gusset* pelos pesquisadores DAVIS (1967) e VASARHELYI (1971). Os estudos realizados por DAVIS (1967) confirmaram os resultados de WHITMORE (1952).

VASARHELYI (1971) realizou análises elásticas com o auxílio de elementos finitos em um modelo de uma treliça Warren e descobriu que as tensões máximas determinadas por vários métodos analíticos simplificados diferem um pouco quanto à localização dos pontos de máximo.

Para determinar a resistência última à tração de uma placa, THORNTON (1984) considerou a ruptura por corte ou rasgamento (*tear-out*) da placa. A resistência está relacionada com os requisitos para cisalhamento de bloco da AISC (1978) e baseia-se na seção líquida.

A seção líquida considera o tamanho do furo como sendo o diâmetro do parafuso acrescido de 1/16 de polegada. O cisalhamento de bloco, tanto em perfis como em chapas tracionadas e ligadas por parafusos, é um tipo de colapso caracterizado por rasgamento das chapas de ligação ao longo de uma ou mais linhas de parafusos.

Já na compressão, THORNTON (1984) abordou a flambagem da placa *gusset* analogicamente com a resistência de uma coluna de seção equivalente. Este método considera uma faixa de coluna fictícia com as extremidades engastadas (dando um comprimento efetivo com coeficiente $k = 0,65$) de largura unitária, em uma região abaixo da seção de WHITMORE (1952). O comprimento da faixa de coluna deve ser considerado como o maior entre L_1 , L_2 e L_3 mostrados na Figura 22.

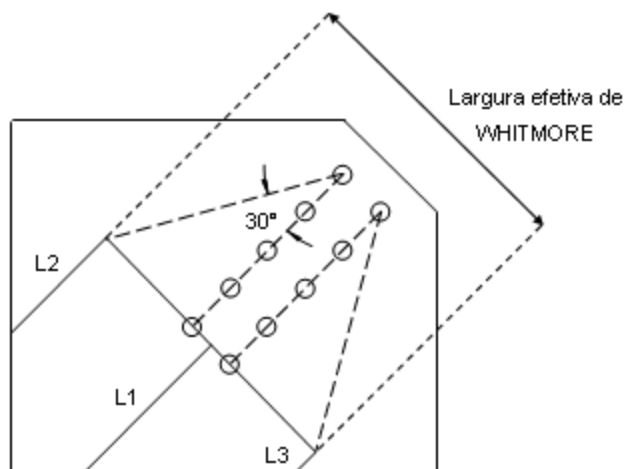


Figura 22 – Método de coluna equivalente de THORNTON (1984)

Esta faixa de coluna é utilizada para determinar um índice de esbeltez equivalente (kL/r). THORNTON (1984) sugere em sua pesquisa uma alternativa que diz que o comprimento mais curto, a média de L_1 , L_2 e L_3 , pode resultar em uma aproximação mais razoável para a resistência à flambagem da chapa.

THORNTON (1984) apresentou a sua abordagem como um Método de Tensão Admissível. Se observado com uma perspectiva de estados limites últimos, a resistência de flambagem à compressão da placa pode ser avaliada de acordo com as curvas para pilar da norma canadense CAN/CSA-S16.1-M89 (1989), usando a largura efetiva de WHITMORE (WHITMORE, 1952) como a área da coluna e a esbeltez equivalente da faixa de coluna engastada-engastada. A abordagem feita por THORNTON (1984) é conservadora porque ignora a contribuição e a resistência pós-flambagem da placa.

HARDASH & BJORHOVDE (1985) continuaram com o estudo da resistência das chapas de *gusset* solicitadas à tração. A fim de desenvolver uma abordagem de Estados Limites para o dimensionamento das chapas, os resultados de testes da Universidade do Arizona, da Universidade de Illinois e da Universidade de Alberta foram incorporados à avaliação.

Após a análise dos ensaios, observou-se a ruptura total por tração na última linha de parafusos, independentemente dos parâmetros de resistência, do tamanho do furo, ou do material da placa e assim, concluiu-se que o modelo de cisalhamento de bloco incorpora a tensão de ruptura, f_u , sobre a área líquida, entre a última linha de parafusos e uma tensão de cisalhamento efetiva uniforme.

Com isso, obteve-se o conjunto de equações desenvolvidas para o cálculo da resistência nominal final, R_N , de uma placa solicitada à tração:

$$R_N = f_u \cdot A_n + 1,15 \cdot F_{eff} \cdot L_t \quad 2.7$$

$$F_{eff} = (1 - C_1) \cdot f_y + C_1 \cdot f_u \quad 2.8$$

$$C_1 = 0,95 - 0,047 \cdot L \text{ (com L em polegadas)} \quad 2.9$$

Foi observado também que a distribuição da tensão de cisalhamento não é uniforme, que depende da geometria da ligação e das características dos materiais utilizados. A variação na distribuição da tensão de cisalhamento é representada por um fator de comprimento da ligação, C_1 . Se C_1 for igual a zero, a tensão de cisalhamento

efetiva é igual à tensão de escoamento, mas se C_1 for igual a um, a tensão de cisalhamento efetiva passará a ser igual à tensão de ruptura.

YAM & CHENG (2002) fizeram ensaios em escala real para analisar o comportamento e a resistência de ligações com chapa à compressão. Os parâmetros dos ensaios incluíram espessuras, dimensões da chapa e ângulo da diagonal. Em geral, as chapas de ligação flambaram, pois não foi prevista uma contenção fora do plano para a diagonal. A carga de colapso dos protótipos foi aumentada de forma quase linear, notando-se uma proporcionalidade com a espessura da chapa e diminuindo com o aumento da largura da chapa. Percebeu-se uma pequena diminuição da carga de colapso nos protótipos com diagonais com um ângulo de 30° ao invés de 45° . O momento fletor entre a viga e o pilar apresentou pouco efeito sobre a carga de colapso dos protótipos, no entanto, o escoamento dos protótipos com momento fletor foi detectado em um nível de carga significativamente menor do que aqueles sem momento fletor.

SHENG *et al* (2002) realizaram um estudo paramétrico do comportamento inelástico de compressão e da resistência das ligações com chapa. O estudo foi realizado através do programa de elementos finitos ABAQUS. Com base no estudo paramétrico, foram propostas orientações gerais de dimensionamento.

Com base na equação 2.10 para flambagem inelástica de placa, os autores propuseram um método de dimensionamento para chapas, de formato retangular, sujeitas à compressão:

$$\sigma_u = \frac{k_g \cdot \pi^2 \cdot \gamma \cdot E}{12(1-\nu^2)(b_0 \cdot t)^2} \quad 2.10$$

Onde,

$$\gamma = \sqrt{\frac{E_t}{E}} \quad 2.11$$

Variando os parâmetros geométricos os autores produziram ábacos para a definição dos valores de k_g . Substituindo-se o valor de k_g na equação 2.10, calcula-se o valor da tensão crítica σ_u . Assim, a carga crítica da chapa P_u pode ser obtida:

$$P_u = \sigma_u \cdot b_1 \cdot t_1 \quad 2.12$$

Os ábacos para o cálculo de k_g estão reproduzidos nas Figuras 58 à 61 do Anexo A.

2.5 LIGAÇÕES PINADAS EM TRELIÇAS PLANAS TUBULARES

MINCHILLO (2011) desenvolveu uma ligação para treliças planas tubulares circulares com chapa de topo cujas diagonais que chegam à chapa são unidas através de um único parafuso fazendo com que a ligação seja pinada.

Por se tratar de uma ligação nova a pesquisadora teve que avaliar o modo de comportamento dessa ligação para poder certificá-la e em seguida formular um cálculo adequado de resistência para a mesma visto que em nenhuma bibliografia ou publicação existia tal cálculo.

MINCHILLO (2011) realizou 45 ensaios experimentais da ligação, com protótipos de diferentes diâmetros de perfis tubulares, larguras e espessuras de chapas, para avaliar o comportamento da ligação, através do levantamento dos mecanismos de colapso e verificando a resistência do conjunto chapa mais perfil tubular.

Após a realização e análise dos ensaios experimentais, a pesquisadora utilizando o software ANSYS estudou 168 modelos numéricos e os resultados destes foram comparados com os resultados experimentais. Em todos os modelos a ligação de chapa de topo possuíam elementos de casca onde foram consideradas a não linearidade física e geométrica. Essa consideração serviu para poder avaliar os deslocamentos, a distribuição de tensões e a resistência da ligação. O modelo numérico desenvolvido apresentou uma boa correlação com os ensaios experimentais.

Os resultados numéricos e experimentais demonstraram que este tipo de ligação possui um modo de falha típico, que é a plastificação da superfície do banzo, caracterizada pela deformação diametral de 3% de d_0 . Esse tipo de falha é um efeito localizado e a literatura já prevê isso em ligações de perfis tubulares. Ao longo do histórico de carga-deslocamento da ligação, as tensões se redistribuíam durante a plastificação, não sendo o fator crítico do colapso, para os casos avaliados.

Finalmente com os resultados experimentais e com os resultados dos modelos numéricos MINCHILLO (2011) realizou uma análise para parametrizar a ligação. A formulação proposta mostrou-se eficaz para o dimensionamento seguro da ligação, evitando-se o colapso no tubo.

3 ANÁLISE NUMÉRICA

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Desde a década de 90, com o surgimento de novas ferramentas computacionais mais rápidas e com menores custos, as pesquisas nessa área de ligações tubulares desenvolveram-se rapidamente aparecendo o estudo de vários tipos de ligações. A ferramenta computacional que mais auxiliou esses estudos foi à utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF). Para utilizar esse método é feito um modelo numérico, e se este estiver bem calibrado, há a simulação do comportamento real da ligação ou até mesmo da estrutura como um todo. Além disso, com esse modelo é possível gerar uma base de dados e repetir diversas análises numéricas modificando algumas variáveis resultando em um estudo paramétrico importante para a pesquisa.

Após o modelo estar completo, ou seja, com sua geometria, apoios e carregamentos definidos, é possível prever falhas, identificar os pontos de concentração de tensões, a tendência de deformação da estrutura e seus deslocamentos, durante a análise desses modelos e antes de os mesmos serem executados.

Quando uma estrutura é analisada com elementos de barras são feitas simplificações de cálculo durante o dimensionamento e estas podem ser verificadas através de um modelo de elementos finitos, minimizando as incertezas decorrentes dessas aproximações. Além disso, em alguns casos é necessária a elaboração de modelos mais detalhados para uma maior precisão e nestes é possível detalhar parafusos, soldas e contato entre as partes utilizando o Método dos Elementos Finitos.

O Método dos Elementos Finitos é bastante apropriado para análise de ligações e vem sendo utilizado por diversos autores nacionais como, MINCHILLO (2011), FORTI (2010), LIMA *et al* (2008), VIEIRA (2007), MENDANHA (2006), MENDES (2008), SOUZA (2007), e outros tantos internacionais.

Segundo MINCHILLO (2011) o grau de semi-rigidez de uma ligação é difícil de ser implementado em modelos simplificados e para isto se tornar mais simples é utilizado a modelagem pelo Método dos Elementos Finitos, através do qual podem ser simuladas as mais diversas condições de interação entre as partes envolvidas, permitindo considerar transferência de forças por contato, molas, características dos materiais, etc. É possível direcionar a análise para a avaliação tanto dos efeitos globais, como deslocamentos, tensões e deformações, quanto dos efeitos locais na ligação, como flambagem de chapa, punção, rasgamento, simulação de trincas e imperfeições.

3.2 MODELOS NUMÉRICOS

Neste trabalho, foram desenvolvidos 72 modelos numéricos utilizando o programa de elementos finitos ANSYS 14.0, visando analisar o comportamento da ligação pinada com chapa em treliças tubulares multiplanares. Como na pesquisa de MINCHILLO (2011) já haviam sido analisados os melhores elementos a serem utilizados para modelar a ligação pinada e as formas de calibração do modelo, esses dados foram utilizados para a obtenção do modelo numérico de ligação pinada com chapa em treliças tubulares multiplanares.

A Figura 23 e 24 apresentam os modelos numéricos utilizados nas análises das ligações planares analisados pela MINCHILLO (2011) e multiplanares respectivamente. Os modelos possuem recortes que foram utilizados para a definição da malha e para leitura de resultados. No Apêndice A encontra-se um exemplo de arquivo APDL para geração da ligação multiplanar no programa ANSYS.

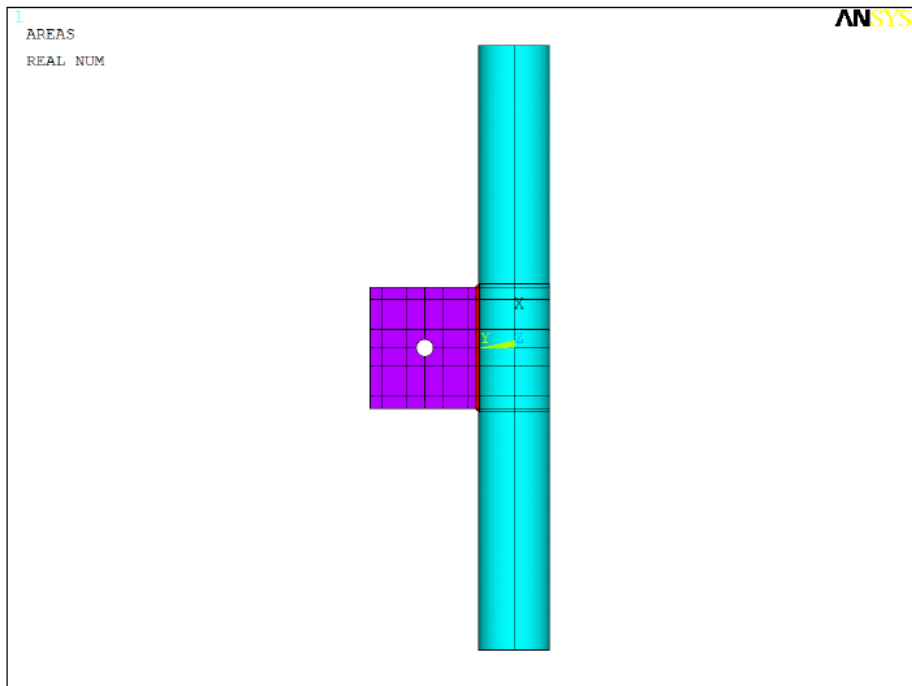


Figura 23 – Geometria do modelo de elementos finitos da ligação planar por MINCHILLO (2011)

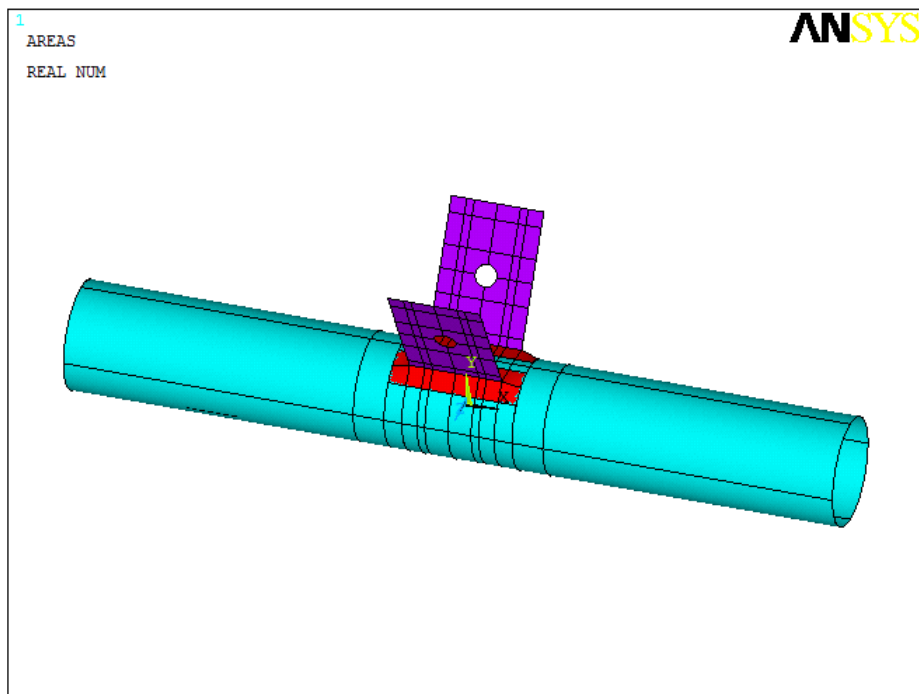


Figura 24 – Geometria do modelo de elementos finitos da ligação multiplanar

Os primeiros modelos analisados por MINCHILLO (2011) não possuíam a solda entre a chapa e o tubo, mas como os resultados encontrados não foram satisfatórios, uma pesquisa foi feita e tomando em consideração os trabalhos de MENDANHA (2006), LIMA *et al* (2008), LEE e WILMSHURST (1995) e DAVIS e CROKETT (1996), a solda foi implementada para obtenção de resultados mais realistas tanto nos modelos de ligação planar como na multiplanar. A norma ASME em sua Seção VIII - Divisão 2 (2010) permite a modelagem da solda em elementos de casca, para bocais de vasos de pressão, com considerações definidas na Figura 25.

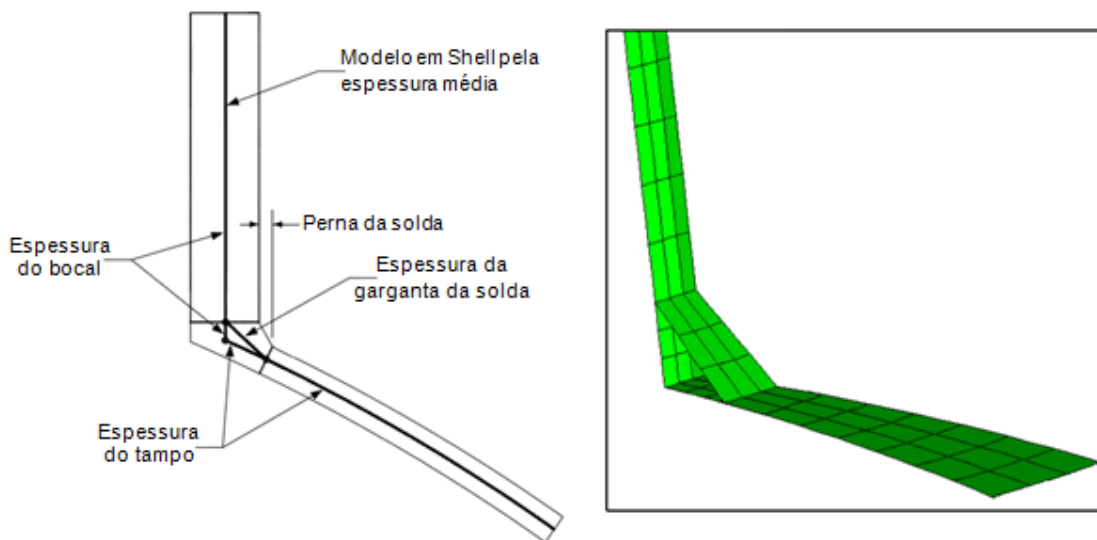


Figura 25 – Solda em elementos de casca, adaptado de ASME (2010)

A solda adotada foi modelada em elementos de casca de espessura t_w igual à espessura do tubo (t_0), e a perna da solda (d_w) igual à metade da espessura da chapa (t) mais a espessura do tubo (t_0).

A Figura 26 e 27 mostram os detalhes da solda dos modelos das ligações planares e multiplanares respectivamente.

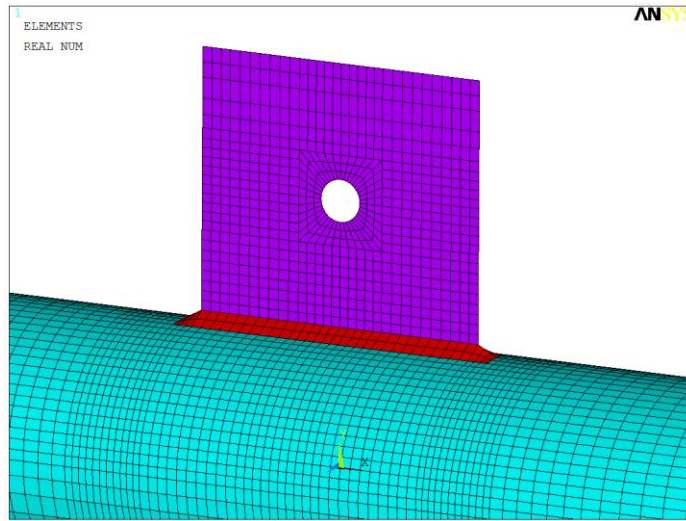


Figura 26 – Detalhe da solda do modelo de elementos finitos da ligação planar por MINCHILLO (2011)

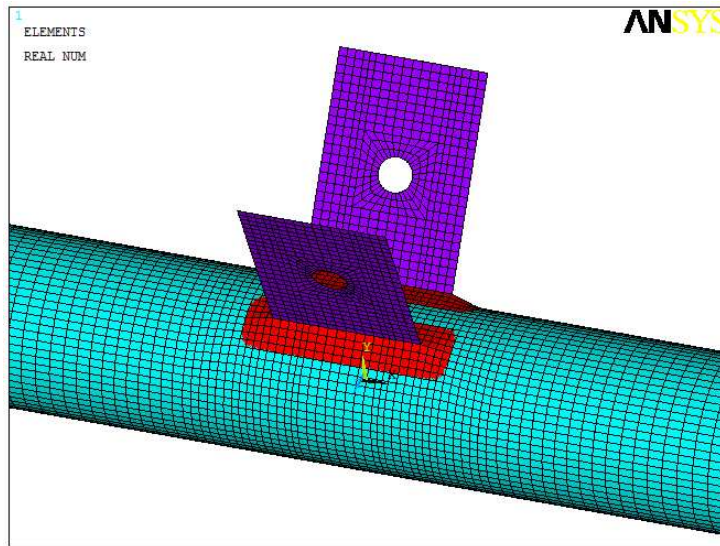


Figura 27 – Detalhe da solda do modelo de elementos finitos da ligação multiplanar

3.2.1 Os Elementos dos Modelos Numéricos

MINCHILLO (2011) na modelagem da ligação planar utilizou o elemento SHELL181, da mesma forma foi utilizado este elemento nos modelos para ligação

multiplanar. Este é um elemento de casca que pode trabalhar como membrana ou como placa, possibilitando a aplicação de carregamento paralelo e perpendicular ao plano do elemento. Além disso, possui capacidade plástica, é definido por quatro nós e apresenta seis graus de liberdade por nó: translações nas direções X, Y e Z, e rotações em torno de X, Y, Z. A Figura 28 mostra a geometria, a posição dos nós e o sistema de coordenadas deste elemento.

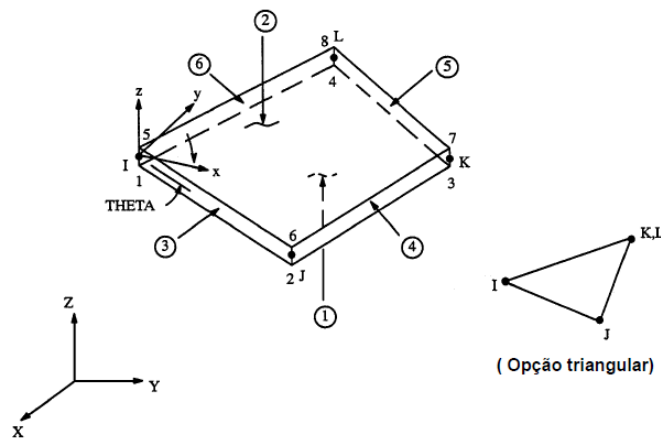


Figura 28 – Elemento SHELL 181. Fonte: ANSYS User's Manual – Volume III – Elements

3.2.2 Tipos de Análises

- Não linearidade geométrica

Os modelos desenvolvidos no programa ANSYS incluem os efeitos de não linearidade geométrica com grandes deslocamentos. O programa adota a formulação Lagrangeana Total e o processo iterativo que o programa utiliza para a solução do sistema de equações de equilíbrio é o Newton-Raphson.

- Não linearidade física

Este tipo de análise permite levar em consideração a mudança de comportamento do material ao longo do carregamento. Admite-se, como hipótese

simplificadora, que os materiais têm um comportamento elástico até certo limite e que, a partir desse limite, apresentam comportamento plástico.

No modelo numérico desenvolvido, para incorporar o efeito da não linearidade física, foram adicionadas as propriedades dos materiais, através de uma relação constitutiva tensão x deformação multilinear, utilizando o material *Multilinear Isotropic Hardening*, cuja definição depende da curva tensão-deformação obtida através da caracterização dos materiais feita por MINCHILLO(2011), de acordo com as Figuras do Anexo C.

3.2.3 Malhas das Chapas e dos Tubos

Na definição da malha, optou-se por uma malha mapeada da mesma forma como foi feito por MINCHILLO (2011) nos modelos das ligações planares. Este tipo de malha é utilizado principalmente quando existe a comparação entre modelos, pois se consegue impor nos elementos, o tamanho e forma desejados.

MINCHILLO (2011) definiu a malha da chapa com início na borda do furo e progredindo para um quadrado, definido em torno do furo. Como todos os modelos das ligações planares e das ligações multiplanares possuem o mesmo diâmetro de furo, então a mesma malha, foi mantida no quadrado central, e conforme o comprimento da chapa é variado, apenas elementos retangulares são acrescentados ao longo do comprimento. Isso pode ser observado na Figura 29 que indica a malha de dois comprimentos distintos de chapa: um com 100 mm de comprimento e outro com 150 mm.

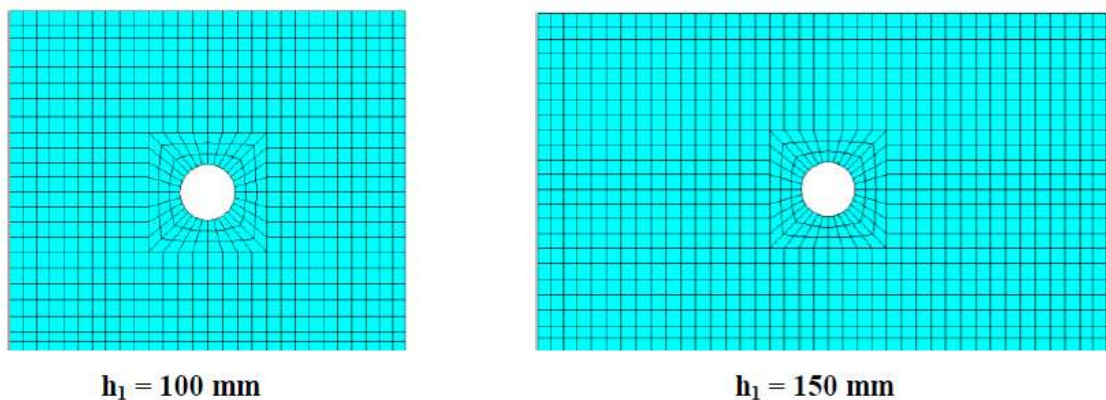


Figura 29 – Malha da chapa de topo por MINCHILLO (2011)

Já para o tubo MINCHILLO (2011) definiu uma malha mais refinada na região imediatamente abaixo da chapa, e menos refinada progressivamente à medida que se aproxima dos apoios. A Figura 30 mostra a malha característica utilizada para o perfil tubular tanto para as ligações planares quanto para as ligações multiplanares.

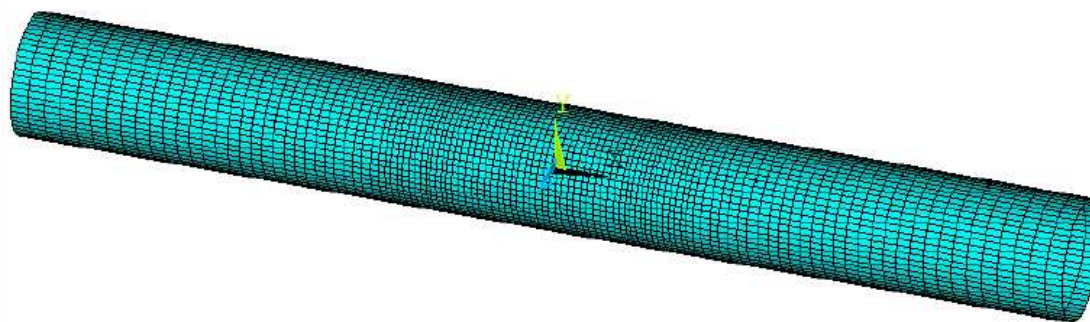


Figura 30 – Malha do perfil tubular por MINCHILLO (2011)

Quando se estuda o refinamento de uma malha e sua eficiência costuma-se comparar o resultado obtido nos elementos com os resultados obtidos nos nós. Ao compararmos se a diferença for maior que 15%, isso indica que os pontos de integração de Gauss estão distantes e isso leva a necessidade de um refinamento na malha para melhorar essa precisão.

Após análise dos modelos planares e pela bibliografia, MINCHILLO (2011) percebeu que de um modo geral elementos de casca são eficientes quando seu tamanho é próximo da sua espessura. Assim, tanto nos modelos planares como nos multiplanares foi utilizado esse conceito.

3.2.4 Condições de Contorno e Carregamento

MINCHILLO (2011) analisou experimentalmente e numericamente os modelos da ligação planar em estudo. Para que os modelos numéricos ficassem o mais parecidos com o real, os mesmos foram calibrados com base nos resultados dos modelos experimentais. Assim, para representar os apoios dos protótipos ensaiados no pórtico de ensaio, as extremidades do tubo no modelo numérico receberam restrições de deslocamento nas três direções, pois os protótipos experimentais possuíam duas chapas de extremidade, sendo cada uma delas presa ao pórtico por quatro parafusos de 12,7 mm, conforme pode ser observado na Figura 31. As Figuras 32 e 33 mostram as condições de contorno dos modelos numéricos da ligação planar e da multiplanar respectivamente.

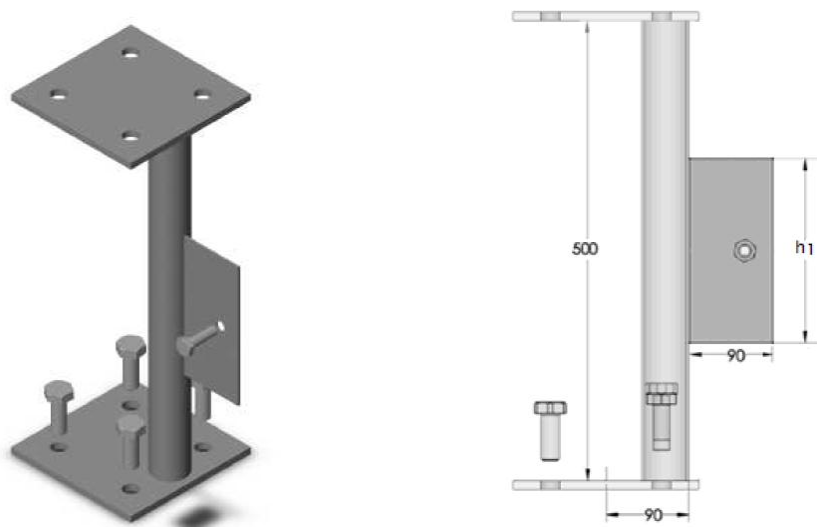


Figura 31 – Protótipo da ligação planar pinada com chapa de topo por MINCHILLO (2011)

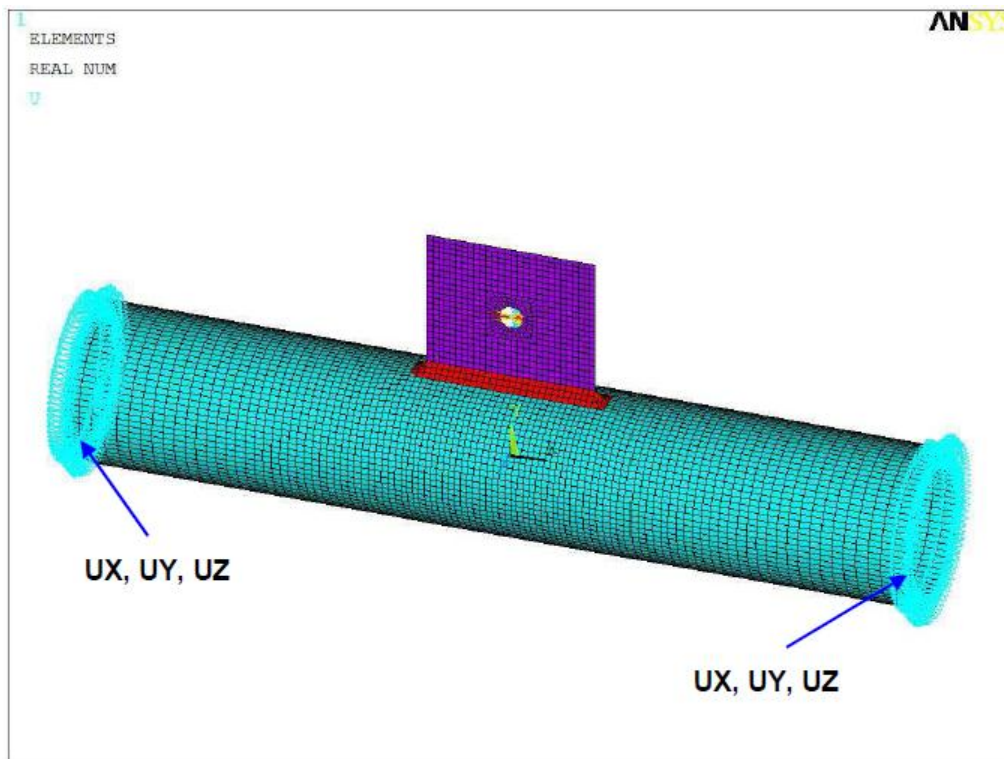


Figura 32 – Malha e condição de contorno de ligação planar por MINCHILLO (2011)

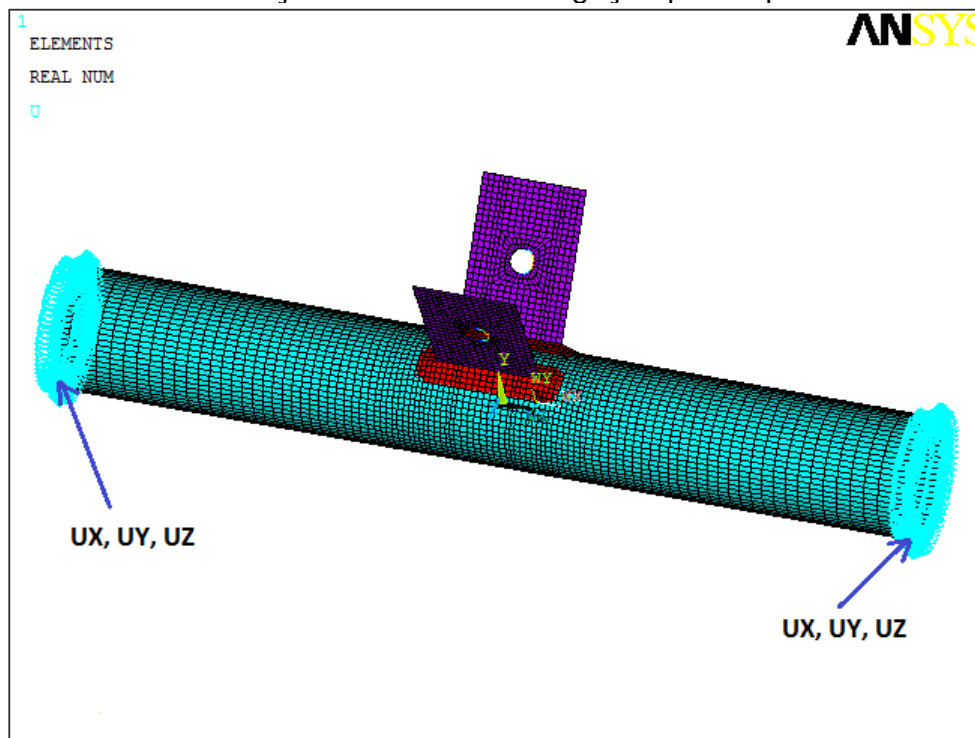
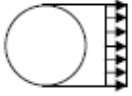
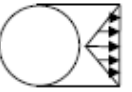
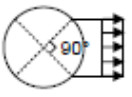
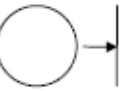


Figura 33 – Malha e condição de contorno de ligação multiplanar

Segundo MINCHILLO (2011), para definir de forma mais eficiente a aplicação da força na região do furo, de forma a minimizar o problema da concentração de tensões em borda de furo, foi realizado um estudo com diferentes configurações para a aplicação do carregamento, conforme é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Estudo de aplicação do carregamento no furo por MINCHILLO (2011).

Tipo de carregamento		Carga última	Tensão de von Mises
a)		64	465,79
b)		50	462,76
c)		45,2	464,11
d)		21,6	449,04

A seguir, tem-se a explicação do estudo feito por MINCHILLO (2011) para que um dos quatro tipos de carregamento fosse escolhido para ser utilizado em todos os modelos de ligação planar e que também foram adotados para as ligações multiplanares.

O estudo foi feito a partir de uma chapa quadrada de 100 mm de lado com um furo centralizado de 14 mm e espessura de 6,3 mm.

A forma de aplicação da carga em cada caso pode ser observada na Tabela 2. Observa-se ainda na Tabela 2 que os casos (b) e (c) apresentam, por exclusão, os resultados mais realistas para a resistência da ligação.

Para definir finalmente, o melhor entre estes dois (b e c), levou-se em consideração a configuração deformada da chapa no modelo numérico e no experimental. A Figura 34 possibilita visualizar esta deformada tanto no modelo experimental como nos modelos numéricos, de onde se conclui que a distribuição apresentada pela carga triangular é mais próxima da obtida pelo ensaio de laboratório, sendo esta adotada pra todas as simulações.

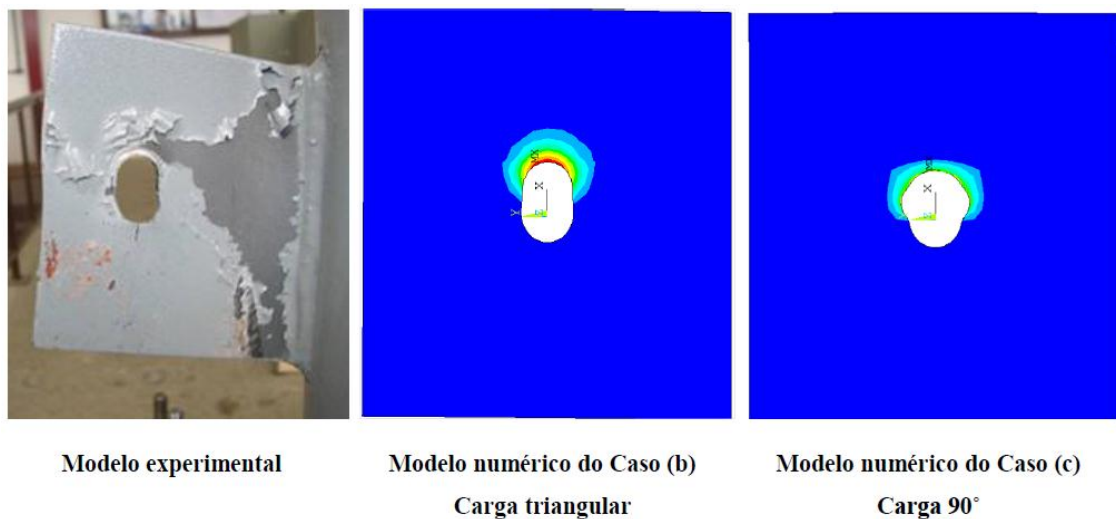


Figura 34 – Deformada dos modelos por MINCHILLO (2011)

Nas comparações com os ensaios experimentais, o carregamento foi aplicado de forma incremental, dividido em passos de carga de 1 kN cada. A carga foi aplicada na chapa, na região do contato entre o furo e o parafuso, como mostra a Figura 35.

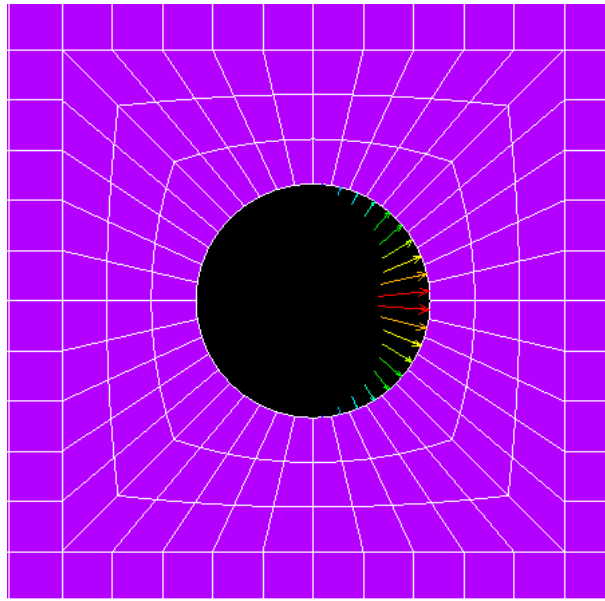


Figura 35 – Detalhe da chapa com distribuição triangular do carregamento no furo adotada nos modelos por MINCHILLO (2011)

3.3 MODOS DE COLAPSO

Os critérios de definição de cargas máximas nos modelos de ligação multiplanares são os mesmos definidos para as ligações planares, e desses temos os seguintes modos de ruptura: pico de carga no diagrama força-deslocamento, critério de falha por ruptura do material e deformação diametral.

3.3.1 Pico de Carga

Este modo de colapso ocorre nos modelos numéricos, quando a tensão atuante não aumenta com o incremento de carga aplicada. Este fenômeno ocorre em função dos efeitos de plastificação da estrutura.

O pico representa a carga máxima que a ligação resiste e se nenhum outro modo de falha for observado para uma carga menor, este é o modo de falha da ligação.

3.3.2 Critério de Falha por Ruptura

Uma estrutura pode ser considerada sem nenhum problema quando ela pode suportar os carregamentos de projeto com uma probabilidade mínima de falha durante sua vida útil. As falhas estruturais sob condições estáticas podem ocorrer por excessiva deformação plástica, para os materiais dúcteis, e por fratura, para os materiais frágeis e frágeis.

O aço possuem propriedades elástoplásticas que significa que quando existe uma solicitação crescente o material se comporta como elásticos até certo limite, após esse limite, o mesmo passa a se comportar como plásticos. A descrição deste comportamento pode ser encontrada em CHEN (1988). Para prever quando a estrutura entra no regime plástico, é preciso conhecer qual é o estado de tensões que leva o material ao escoamento.

O critério de von Mises estabelece que o escoamento se iniciará quando a tensão de cisalhamento octaédrica igualar a um determinado valor crítico, função da tensão de escoamento no cisalhamento puro. Desta forma a tensão de von Mises é calculada pela equação (3.1):

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]} \quad 3.1$$

Assim, de acordo com o critério de von Mises, o material se comporta elasticamente quando:

$$\sigma_{VM} < f_y \quad 3.2$$

Em termos de deformações, calcula-se a deformação equivalente de Von Mises, ε_{VM} pela Equação (3.3):

$$\varepsilon_{VM} = \frac{1}{1+\nu} \sqrt{\frac{1}{2} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2]} \quad 3.3$$

Neste trabalho será adotado como um dos critérios de ruptura, a deformação de von Mises máxima igual à deformação de ruptura do material.

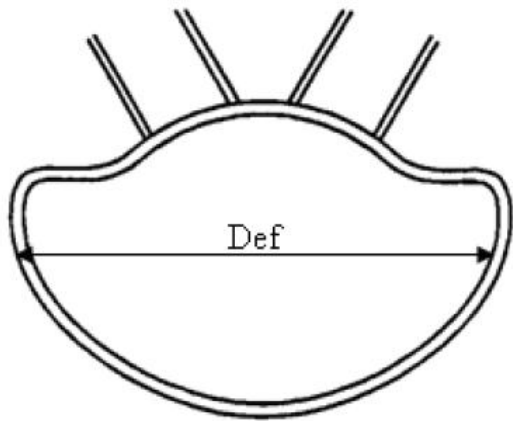
$$\varepsilon_{VM} \leq \varepsilon_u \quad 3.4$$

O material utilizado nos ensaios por MINCHILLO (2011) possuíam tensão de ruptura (447MPa) com 19,8% de deformação específica. Neste caso, definiu-se que a ligação atinge sua carga última nesse modo de colapso quando a deformação equivalente atingir 19,8%. Por se tratar de uma deformação localizada, esse valor encontrado é um valor aproximado.

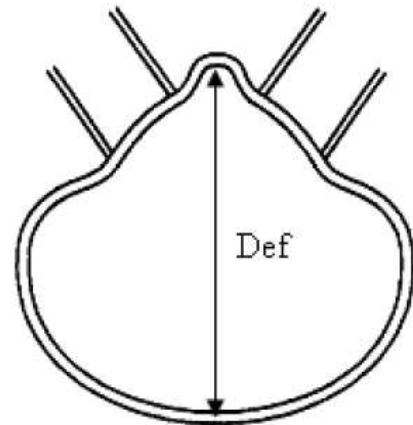
3.3.3 Limite de Deformação

A deformação diametral, também conhecida como deformação de LU *et al* (1994), calcula a ovalização da seção do banzo. Seu valor é dado pelo deslocamento relativo entre nós ($\mu_2 - \mu_1$), diametralmente opostos, dividido pelo diâmetro do banzo (d_0).

A Figura 36 mostra a deformação diametral na direção horizontal e vertical. Para ligações planares, verifica-se apenas a deformação diametral na direção horizontal, já para ligações multiplanares soldadas ou com chapas, calcula-se também na direção vertical.



Deformação Horizontal



Deformação Vertical

Figura 36 – Deformação diametral do banzo por FORTI (2010)

A deformação diametral é limitada em 3% do diâmetro da barra principal, pois se considera que a ligação atinge seu limite de utilização quando a deformação diametral ultrapassa 3% de d_0 . Deformações acima deste limite alteram a forma da estrutura e devem ser evitadas.

As Figuras 37 e 38 exemplificam, no modelo planar e multiplanar respectivamente, os deslocamentos ao longo de toda extensão do perfil tubular decorrentes da flexão da chapa de topo. A geometria nas duas figuras são tubo de 60,3mmx3,2mm e chapa de 100mmx12,7mm.

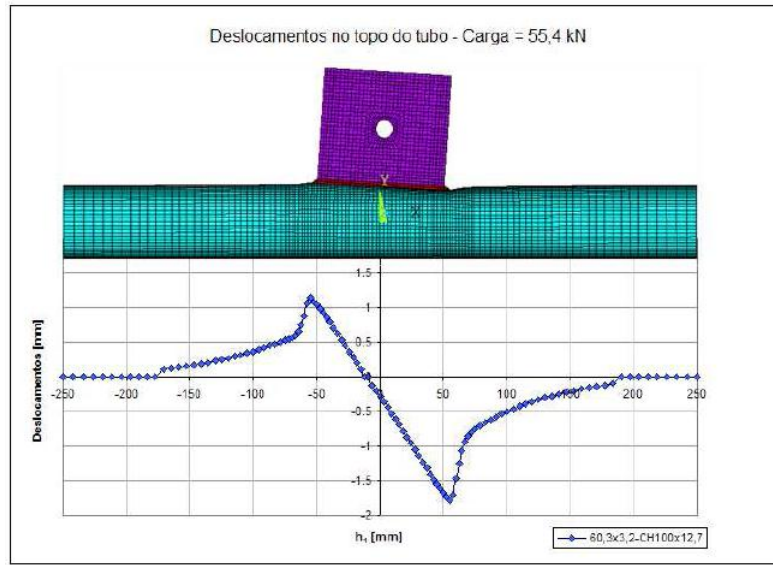


Figura 37 – Deslocamento do perfil tubular na ligação planar por MINCHILLO (2011)

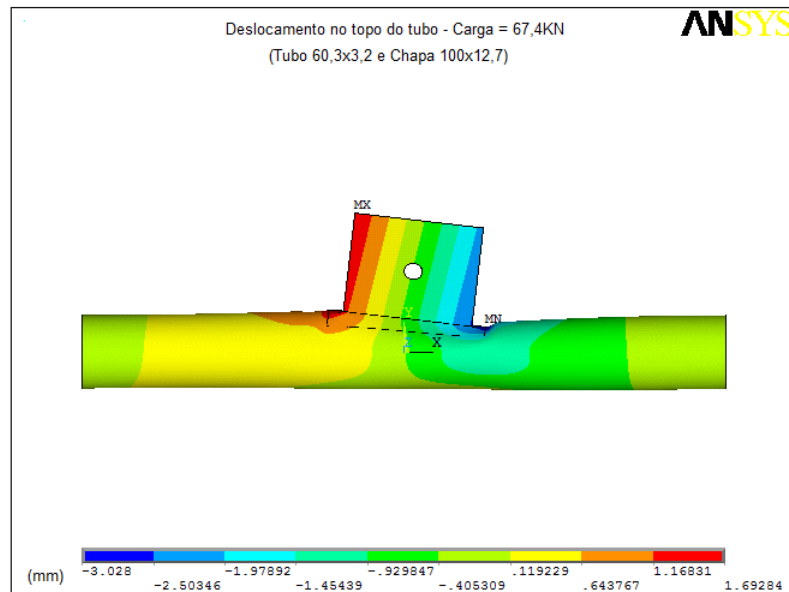


Figura 38 – Deslocamento do perfil tubular na ligação multiplanar

As Figuras 39 e 40 apresentam uma vista lateral da configuração deformada do perfil tubular de 60,3mmx3,2mm do modelo planar e multiplanar respectivamente. Observa-se na Figura 51 que quase não há deformação na região inferior do tubo, e mesmo na lateral, esta deformação é muito pequena comparada àquela que ocorre na

região da chapa. Já na Figura 52 observa-se o mesmo que na Figura 51, porém nota-se que a lateral do tubo neste caso está muito mais deformada por se tratar de uma ligação multiplanar.

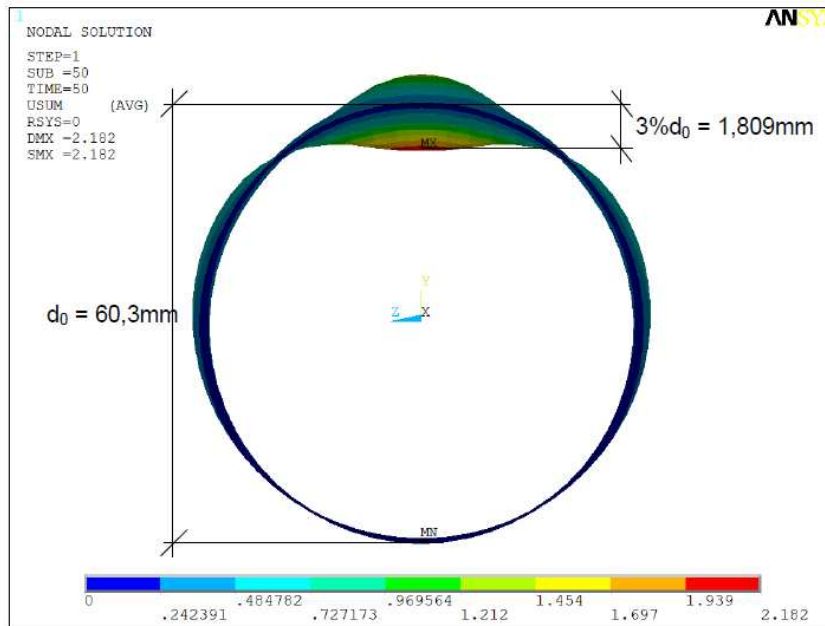


Figura 39 – Deformação diametral na ligação planar por MINCHILLO (2011)

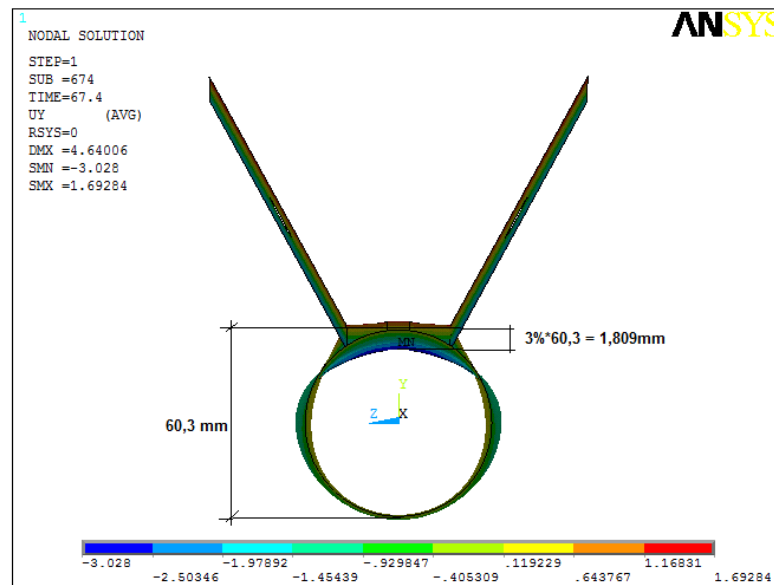


Figura 40 – Deformação diametral na ligação multiplanar

4 ANÁLISE PARAMÉTRICA

O objetivo deste trabalho é analisar os modelos de treliça multiplanares com chapa de topo, verificando onde ocorre o modo de colapso da ligação (chapa ou tubo), qual o modo de colapso ocorreu na ligação (pico de carga, falha por ruptura ou limite de deformação) e comparar as resistências de ligações multiplanares tipo KK analisadas nesse trabalho com suas respectivas ligações planares tipo K analisadas por MINCHILLO (2011) encontrando assim um fator de correção entre elas.

Além disso, com o valor do fator de correção da ligação com chapa de topo encontrado será possível analisar esse com o fator encontrado em norma e na pesquisa de FORTI (2010) que descrevem esse fator para ligações soldadas.

Neste capítulo será apresentado um estudo paramétrico comparando-se as resistências de 72 ligações através de simulação numérica.

Os diâmetros dos perfis tubulares, o comprimento e a espessura das chapas foram variados e foram adotados os mesmos tipos de material, critérios de aplicação de carregamento e condições de contorno como já definidos no capítulo anterior.

4.1 ESTUDO PARAMÉTRICO DA LIGAÇÃO COM CHAPA DE TOPO

Os dados utilizados na análise do colapso de tubo estão descritos nos itens 4.1.1 à 4.1.3 que são os mesmos utilizados nos modelos numéricos analisados por MINCHILLO (2011) e foram utilizados no estudo paramétrico da ligação de chapa de topo.

4.1.1 Variáveis do Modelo

Os dados das análises foram os seguintes:

- Perfil tubular: 60,3 mm x 3,2 mm, 73,0 mm x 3,6 mm, 96,5 mm x 4,0mm e 101,6 mm x 4,0mm;
- Comprimento das chapas: 60 mm, 100 mm e 150 mm;
- Espessuras de chapa: 4,75 mm, 6,3 mm, 8,0 mm, 9,5 mm, 12,7 mm e 16,0 mm.

4.1.2 Critério de Leitura da Carga Máxima

Os critérios de definição da cargas máxima são os mesmos definidos no Capítulo 3, sendo considerados os modos de ruptura:

- $\varepsilon_{VM} \leq \varepsilon_u$
- 3% de d_0 ;
- Pico de carga.

4.1.3 Características do Material do Tubo e da Chapa

- Tensão de escoamento, $f_y = 354$ MPa;
- Tensão de ruptura, $f_u = 447$ MPa;
- Deformação de ruptura, $\varepsilon_u = 19,8\%$.

4.1.4 Resultados

As Tabelas 4 a 7 apresentam os resultados encontrados nos modelos analisados. Para cada conjunto de dados foi gerado um modelo numérico segundo a metodologia de análise, malha, condições de contorno, carregamento, tipo de análise e leitura de resultados, definidos no Capítulo 3.

Nestas Tabelas estão apresentadas, as dimensões da chapa e do perfil tubular, onde ocorre e qual o modo de colapso, a carga de ruptura da ligação, o binário de forças verticais, o parâmetro β_1 que representa a relação entre o comprimento da chapa h_1 e sua espessura t_1 , e (d_0 / β_1) que relaciona o diâmetro do tubo à esbeltez da chapa β_1 .

A coluna P_u representa a carga última da ligação, sendo esta a de menor valor encontrada através do critério de leitura de carga máxima descrito no item 4.1.2. A coluna P_v representa o binário de forças verticais atuantes no perfil tubular, decorrentes da carga P_u , da excentricidade, $e_1 = 45$ mm, e do comprimento da chapa h_1 , conforme equacionado na equação 4.1 e esquematizado na Figura 41.

$$P_v = \frac{P_u \times e_1}{h_1} \quad 4.1$$

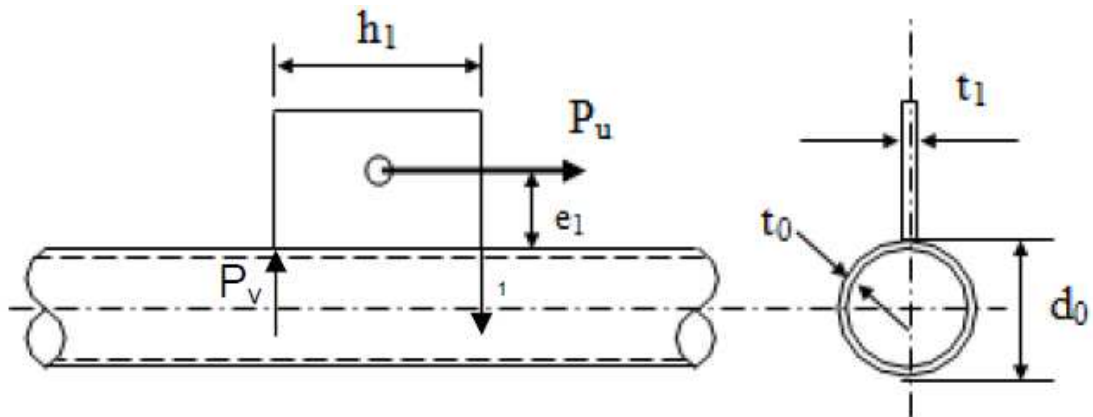


Figura 41 – Forças P_u e P_v atuantes nas ligações por MINCHILLO (2011).

Tabela 4 – Dados da análise paramétrica – Perfil Tubular 60,3mm x 3,2mm

d_0 (mm)	t_0 (mm)	h_1 (mm)	t_1 (mm)	β_1	d_0 / β_1	P_u (KN)	P_v (KN)	Local de Colapso	Modo de Colapso
60,3	3,2	60	4,75	12,63	4,77	32,4	24,3	tubo	3% de d_0
60,3	3,2	60	6,30	9,52	6,33	34,7	26,0	tubo	3% de d_0
60,3	3,2	60	8,00	7,50	8,04	37,1	27,8	tubo	Falha por Ruptura (19,8%)
60,3	3,2	60	9,50	6,32	9,55	38,6	29,0	tubo	3% de d_0
60,3	3,2	60	12,70	4,72	12,76	40,9	30,7	tubo	3% de d_0
60,3	3,2	60	16,00	3,75	16,08	42,8	32,1	tubo	3% de d_0
60,3	3,2	100	4,75	21,05	2,86	34,0	15,3	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
60,3	3,2	100	6,30	15,87	3,80	55,9	25,2	tubo	3% de d_0
60,3	3,2	100	8,00	12,50	4,82	58,5	26,3	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
60,3	3,2	100	9,50	10,53	5,73	61,9	27,9	tubo	3% de d_0
60,3	3,2	100	12,70	7,87	7,66	64,0	28,8	tubo	3% de d_0
60,3	3,2	100	16,00	6,25	9,65	65,7	29,6	tubo	3% de d_0
60,3	3,2	150	4,75	31,58	1,91	34,0	10,2	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
60,3	3,2	150	6,30	23,81	2,53	43,3	13,0	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
60,3	3,2	150	8,00	18,75	3,22	58,5	17,6	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
60,3	3,2	150	9,50	15,79	3,82	72,3	21,7	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
60,3	3,2	150	12,70	11,81	5,11	83,6	25,1	tubo	3% de d_0
60,3	3,2	150	16,00	9,38	6,43	85,5	25,7	tubo	3% de d_0

Tabela 5 – Dados da análise paramétrica – Perfil Tubular 73,0mm x 3,6mm

d_0 (mm)	t_0 (mm)	h_1 (mm)	t_1 (mm)	β_1	d_0 / β_1	P_u (KN)	P_v (KN)	Local de Colapso	Modo de Colapso
73,0	3,6	60	4,75	12,63	5,78	33,8	25,4	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
73,0	3,6	60	6,30	9,52	7,67	39,9	29,9	tubo	3% de d_0
73,0	3,6	60	8,00	7,50	9,73	43,3	32,5	tubo	Falha por Ruptura (19,8%)
73,0	3,6	60	9,50	6,32	11,56	45,0	33,8	tubo	3% de d_0
73,0	3,6	60	12,70	4,72	15,45	48,8	36,6	tubo	3% de d_0
73,0	3,6	60	16,00	3,75	19,47	51,1	38,3	tubo	3% de d_0
73,0	3,6	100	4,75	21,05	3,47	34,0	15,3	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
73,0	3,6	100	6,30	15,87	4,60	43,3	19,5	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
73,0	3,6	100	8,00	12,50	5,84	58,5	26,3	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
73,0	3,6	100	9,50	10,53	6,94	70,2	31,6	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
73,0	3,6	100	12,70	7,87	9,27	83,3	37,5	tubo	3% de d_0
73,0	3,6	100	16,00	6,25	11,68	86,1	38,7	tubo	3% de d_0
73,0	3,6	150	4,75	31,58	2,31	34,0	10,2	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
73,0	3,6	150	6,30	23,81	3,07	43,3	13,0	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
73,0	3,6	150	8,00	18,75	3,89	58,5	17,6	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
73,0	3,6	150	9,50	15,79	4,62	70,2	21,1	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
73,0	3,6	150	12,70	11,81	6,18	99,1	29,7	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
73,0	3,6	150	16,00	9,38	7,79	114,5	34,4	tubo	3% de d_0

Tabela 6 – Dados da análise paramétrica – Perfil Tubular 96,5mm x 4,0mm

d_0 (mm)	t_0 (mm)	h_1 (mm)	t_1 (mm)	β_1	d_0 / β_1	P_u (KN)	P_v (KN)	Local de Colapso	Modo de Colapso
96,5	4,0	60	4,75	12,63	7,64	34,6	26,0	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
96,5	4,0	60	6,30	9,52	10,13	42,7	32,0	chapa	Pico de Carga
96,5	4,0	60	8,00	7,50	12,87	46,6	35,0	tubo	3% de d_0
96,5	4,0	60	9,50	6,32	15,28	48,8	36,6	tubo	3% de d_0
96,5	4,0	60	12,70	4,72	20,43	52,7	39,5	tubo	Pico de Carga
96,5	4,0	60	16,00	3,75	25,73	55,4	41,6	tubo	Pico de Carga
96,5	4,0	100	4,75	21,05	4,58	34,9	15,7	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
96,5	4,0	100	6,30	15,87	6,08	44,5	20,0	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
96,5	4,0	100	8,00	12,50	7,72	60,2	27,1	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
96,5	4,0	100	9,50	10,53	9,17	72,3	32,5	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
96,5	4,0	100	12,70	7,87	12,26	98,3	44,2	chapa	Pico de Carga
96,5	4,0	100	16,00	6,25	15,44	104,8	47,2	chapa	Pico de Carga
96,5	4,0	150	4,75	31,58	3,06	34,9	10,5	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
96,5	4,0	150	6,30	23,81	4,05	44,5	13,4	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
96,5	4,0	150	8,00	18,75	5,15	60,2	18,1	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
96,5	4,0	150	9,50	15,79	6,11	72,3	21,7	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
96,5	4,0	150	12,70	11,81	8,17	99,1	29,7	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
96,5	4,0	150	16,00	9,38	10,29	128,5	38,6	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)

Tabela 7 – Dados da análise paramétrica – Perfil Tubular 101,6mm x 4,0mm

d_0 (mm)	t_0 (mm)	h_1 (mm)	t_1 (mm)	β_1	d_0 / β_1	P_u (KN)	P_v (KN)	Local de Colapso	Modo de Colapso
101,6	4,0	60	4,75	12,63	8,04	34,6	26,0	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
101,6	4,0	60	6,30	9,52	10,67	41,9	31,4	chapa	Pico de Carga
101,6	4,0	60	8,00	7,50	13,55	45,7	34,3	tubo	3% de d_0
101,6	4,0	60	9,50	6,32	16,09	47,7	35,8	tubo	3% de d_0
101,6	4,0	60	12,70	4,72	21,51	51,3	38,5	tubo	Pico de Carga
101,6	4,0	60	16,00	3,75	27,09	54,3	40,7	tubo	Pico de Carga
101,6	4,0	100	4,75	21,05	4,83	34,9	15,7	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
101,6	4,0	100	6,30	15,87	6,40	44,5	20,0	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
101,6	4,0	100	8,00	12,50	8,13	60,2	27,1	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
101,6	4,0	100	9,50	10,53	9,65	72,3	32,5	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
101,6	4,0	100	12,70	7,87	12,90	96,2	43,3	chapa	Pico de Carga
101,6	4,0	100	16,00	6,25	16,26	102,8	46,3	tubo	Pico de Carga
101,6	4,0	150	4,75	31,58	3,22	34,9	10,5	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
101,6	4,0	150	6,30	23,81	4,27	44,5	13,4	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
101,6	4,0	150	8,00	18,75	5,42	60,2	18,1	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
101,6	4,0	150	9,50	15,79	6,43	72,3	21,7	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
101,6	4,0	150	12,70	11,81	8,60	99,1	29,7	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)
101,6	4,0	150	16,00	9,38	10,84	128,5	38,6	chapa	Falha por Ruptura (19,8%)

As Tabelas 8 a 11 apresentam a comparação dos resultados encontrados neste trabalho e no trabalho feito por MINCHULLO (2011) e o fator de correção entre as ligações K (planar) e KK (multiplanar), que consiste no P_u da ligação planar dividido pelo P_u da ligação multiplanar.

Tabela 8 – Comparação entre ligação planar (K) e multiplanar (KK) com respectivo fator de correção – Perfil Tubular 60,3mm x 3,2mm

d_0 (mm)	t_0 (mm)	h_1 (mm)	t_1 (mm)	β_1	Local de Colapso (KK)	Local de Colapso (K)	P_u (KK)	P_u (K)	Fator de Correção
60,3	3,2	60	4,75	12,63	tubo	chapa	32,4	31,8	0,98
60,3	3,2	60	6,30	9,52	tubo	tubo	34,7	36,3	1,05
60,3	3,2	60	8,00	7,50	tubo	tubo	37,1	40,0	1,08
60,3	3,2	60	9,50	6,32	tubo	tubo	38,6	42,5	1,10
60,3	3,2	60	12,70	4,72	tubo	tubo	40,9	48,0	1,17
60,3	3,2	60	16,00	3,75	tubo	tubo	42,8	36,6	0,86 (*)
60,3	3,2	100	4,75	21,05	chapa	chapa	34,0	32,0	0,94
60,3	3,2	100	6,30	15,87	tubo	chapa	55,9	41,0	0,73 (*)
60,3	3,2	100	8,00	12,50	chapa	chapa	58,5	55,4	0,95
60,3	3,2	100	9,50	10,53	tubo	chapa	61,9	66,5	1,07
60,3	3,2	100	12,70	7,87	tubo	tubo	64,0	74,5	1,16
60,3	3,2	100	16,00	6,25	tubo	tubo	65,7	80,8	1,23
60,3	3,2	150	4,75	31,58	chapa	chapa	34,0	32,0	0,94
60,3	3,2	150	6,30	23,81	chapa	chapa	43,3	41,0	0,95
60,3	3,2	150	8,00	18,75	chapa	chapa	58,5	55,4	0,95
60,3	3,2	150	9,50	15,79	chapa	chapa	72,3	66,5	0,92
60,3	3,2	150	12,70	11,81	tubo	chapa	83,6	91,7	1,10
60,3	3,2	150	16,00	9,38	tubo	tubo	85,5	113,4	1,33

(*) Valor não considerado na análise, pois saiu padrão.

Tabela 9 – Comparação entre ligação planar (K) e multiplanar (KK) com respectivo fator de correção – Perfil Tubular 73,0mm x 3,6mm

d_0 (mm)	t_0 (mm)	h_1 (mm)	t_1 (mm)	β_1	Local de Colapso (KK)	Local de Colapso (K)	P_u (KK)	P_u (K)	Fator de Correção
73,0	3,6	60	4,75	12,63	chapa	chapa	33,8	32,0	0,95
73,0	3,6	60	6,30	9,52	tubo	chapa	39,9	40,5	1,02
73,0	3,6	60	8,00	7,50	tubo	tubo	43,3	47,0	1,09
73,0	3,6	60	9,50	6,32	tubo	tubo	45,0	51,0	1,13
73,0	3,6	60	12,70	4,72	tubo	tubo	48,8	57,0	1,17
73,0	3,6	60	16,00	3,75	tubo	tubo	51,1	63,1	1,23
73,0	3,6	100	4,75	21,05	chapa	chapa	34,0	32,0	0,94
73,0	3,6	100	6,30	15,87	chapa	chapa	43,3	40,8	0,94
73,0	3,6	100	8,00	12,50	chapa	chapa	58,5	55,4	0,95
73,0	3,6	100	9,50	10,53	chapa	chapa	70,2	66,4	0,95
73,0	3,6	100	12,70	7,87	tubo	tubo	83,3	88,4	1,06
73,0	3,6	100	16,00	6,25	tubo	tubo	86,1	97,0	1,13
73,0	3,6	150	4,75	31,58	chapa	chapa	34,0	32,0	0,94
73,0	3,6	150	6,30	23,81	chapa	chapa	43,3	40,8	0,94
73,0	3,6	150	8,00	18,75	chapa	chapa	58,5	55,4	0,95
73,0	3,6	150	9,50	15,79	chapa	chapa	70,2	66,5	0,95
73,0	3,6	150	12,70	11,81	chapa	chapa	99,1	91,4	0,92 (*)
73,0	3,6	150	16,00	9,38	tubo	chapa	114,5	119,0	1,04

(*) Valor não considerado na análise, pois saiu padrão.

Tabela 10 – Comparação entre ligação planar (K) e multiplanar (KK) com respectivo fator de correção – Perfil Tubular 96,5mm x 4,0mm

d_0 (mm)	t_0 (mm)	h_1 (mm)	t_1 (mm)	β_1	Local de Colapso (KK)	Local de Colapso (K)	P_u (KK)	P_u (K)	Fator de Correção
96,5	4,0	60	4,75	12,63	chapa	chapa	34,6	32,1	0,93
96,5	4,0	60	6,30	9,52	chapa	chapa	42,7	41,0	0,96
96,5	4,0	60	8,00	7,50	tubo	tubo	46,6	52,8	1,13
96,5	4,0	60	9,50	6,32	tubo	tubo	48,8	56,0	1,15
96,5	4,0	60	12,70	4,72	tubo	tubo	52,7	63,0	1,20
96,5	4,0	60	16,00	3,75	tubo	tubo	55,4	70,0	1,26
96,5	4,0	100	4,75	21,05	chapa	chapa	34,9	32,2	0,92
96,5	4,0	100	6,30	15,87	chapa	chapa	44,5	41,2	0,93
96,5	4,0	100	8,00	12,50	chapa	chapa	60,2	56,0	0,93
96,5	4,0	100	9,50	10,53	chapa	chapa	72,3	67,5	0,93
96,5	4,0	100	12,70	7,87	chapa	chapa	98,3	93,0	0,95
96,5	4,0	100	16,00	6,25	chapa	chapa	104,8	109,0	1,04
96,5	4,0	150	4,75	31,58	chapa	chapa	34,9	32,2	0,92
96,5	4,0	150	6,30	23,81	chapa	chapa	44,5	41,2	0,93
96,5	4,0	150	8,00	18,75	chapa	chapa	60,2	56,0	0,93
96,5	4,0	150	9,50	15,79	chapa	chapa	72,3	67,5	0,93
96,5	4,0	150	12,70	11,81	chapa	chapa	99,1	93,1	0,94
96,5	4,0	150	16,00	9,38	chapa	chapa	128,5	121,5	0,95

Tabela 11 – Comparação entre ligação planar (K) e multiplanar (KK) com respectivo fator de correção – Perfil Tubular 101,6mm x 4,0mm

d_0 (mm)	t_0 (mm)	h_1 (mm)	t_1 (mm)	β_1	Local de Colapso (KK)	Local de Colapso (K)	P_u (KK)	P_u (K)	Fator de Correção
101,6	4,0	60	4,75	12,63	chapa	chapa	34,6	32,1	0,93
101,6	4,0	60	6,30	9,52	chapa	chapa	41,9	41,0	0,98
101,6	4,0	60	8,00	7,50	tubo	chapa	45,7	52,0	1,14
101,6	4,0	60	9,50	6,32	tubo	tubo	47,7	55,0	1,15
101,6	4,0	60	12,70	4,72	tubo	tubo	51,3	62,0	1,21
101,6	4,0	60	16,00	3,75	tubo	tubo	54,3	68,5	1,26
101,6	4,0	100	4,75	21,05	chapa	chapa	34,9	32,2	0,92
101,6	4,0	100	6,30	15,87	chapa	chapa	44,5	41,2	0,93
101,6	4,0	100	8,00	12,50	chapa	chapa	60,2	56,0	0,93
101,6	4,0	100	9,50	10,53	chapa	chapa	72,3	67,5	0,93
101,6	4,0	100	12,70	7,87	chapa	chapa	96,2	93,1	0,97
101,6	4,0	100	16,00	6,25	tubo	tubo	102,8	106,5	1,04
101,6	4,0	150	4,75	31,58	chapa	chapa	34,9	32,2	0,92
101,6	4,0	150	6,30	23,81	chapa	chapa	44,5	41,2	0,93
101,6	4,0	150	8,00	18,75	chapa	chapa	60,2	56,0	0,93
101,6	4,0	150	9,50	15,79	chapa	chapa	72,3	67,5	0,93
101,6	4,0	150	12,70	11,81	chapa	chapa	99,1	93,1	0,94
101,6	4,0	150	16,00	9,38	chapa	chapa	128,5	121,5	0,95

4.1.5 Análise dos Resultados

Com os resultados descritos nas Tabelas 4 a 7 no item 4.1.4, foi possível fazer uma série de gráficos que exemplificam melhor o que está acontecendo com as ligações multiplanares e em seguida compará-los com a ligação planar estudada por MINCHILLO (2011).

Os primeiros gráficos apresentados nas Figuras 42 a 49 representam a relação entre a carga última da ligação de chapa de topo, P_u em função da espessura da chapa t_1 das ligações planares e multiplanares. Foi feito um gráfico para cada perfil avaliado onde estão plotadas as curvas para os diferentes comprimentos de chapa h_1 .

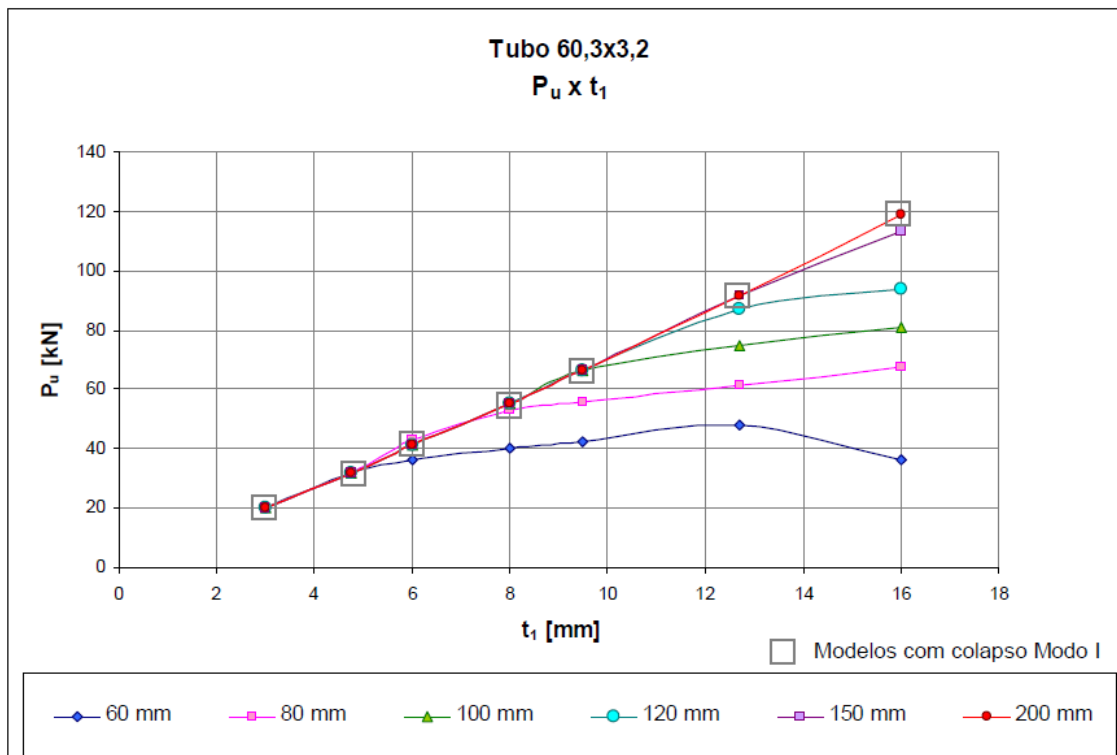


Figura 42 – Carga última x espessura da chapa, para cada h_1 – Perfil tubular 60,3mm x 3,2mm – Ligação Planar por MINCHILLO (2011)

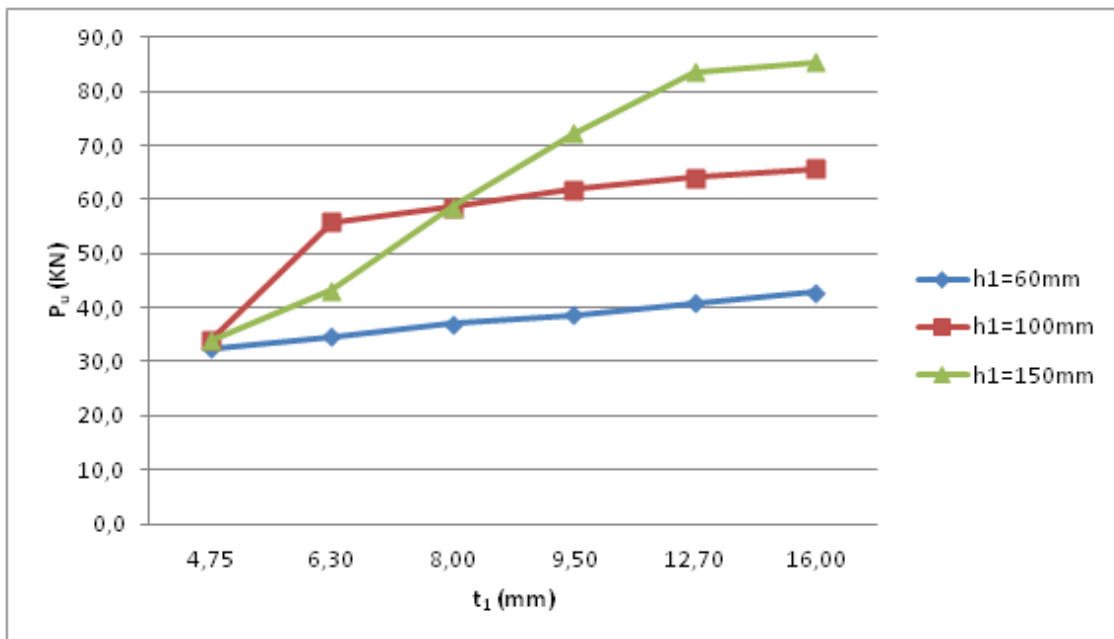


Figura 43 – Carga última x espessura da chapa, para cada h_1 – Perfil tubular 60,3mm x 3,2mm – Ligação Multiplanar

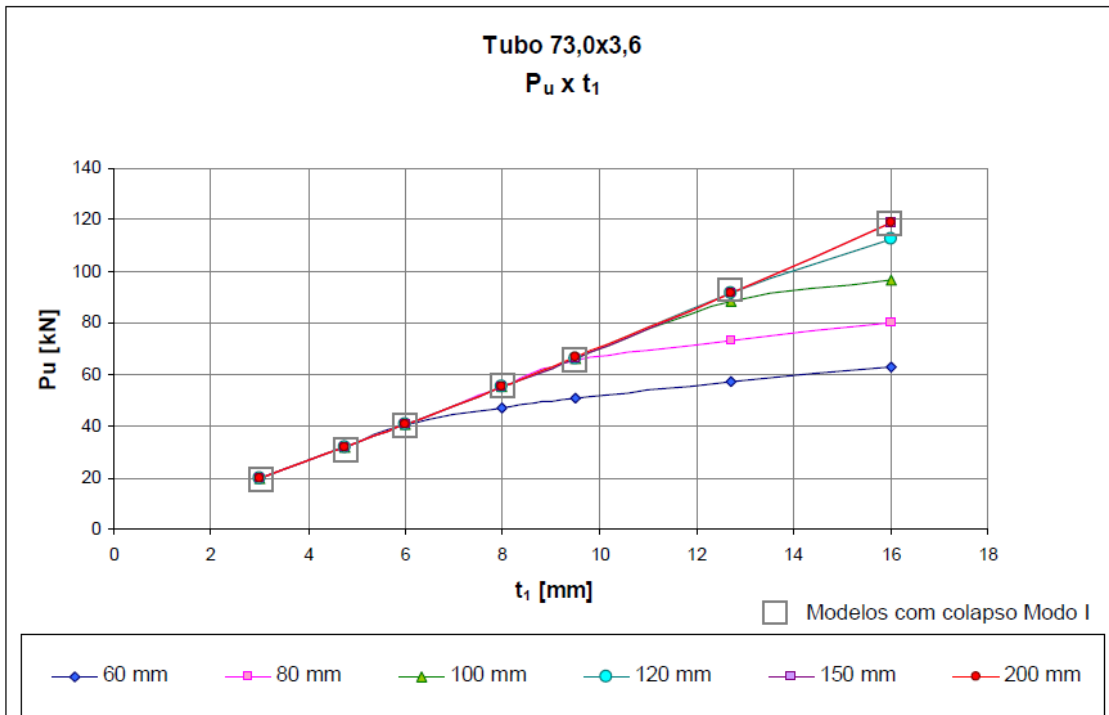


Figura 44 – Carga última x espessura da chapa, para cada h_1 – Perfil Tubular 73,0mm x 3,6mm – Ligação Planar por MINCHILLO (2011)

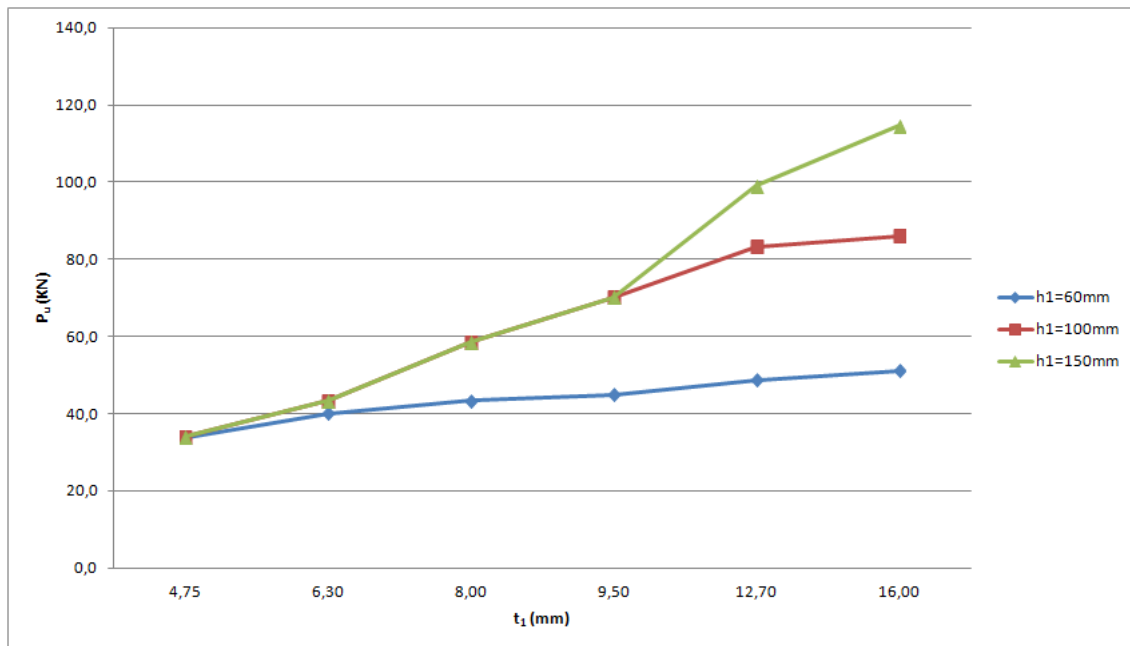


Figura 45 – Carga última x espessura da chapa, para cada h_1 – Perfil Tubular 73,0mm x 3,6mm – Ligação Multiplanar

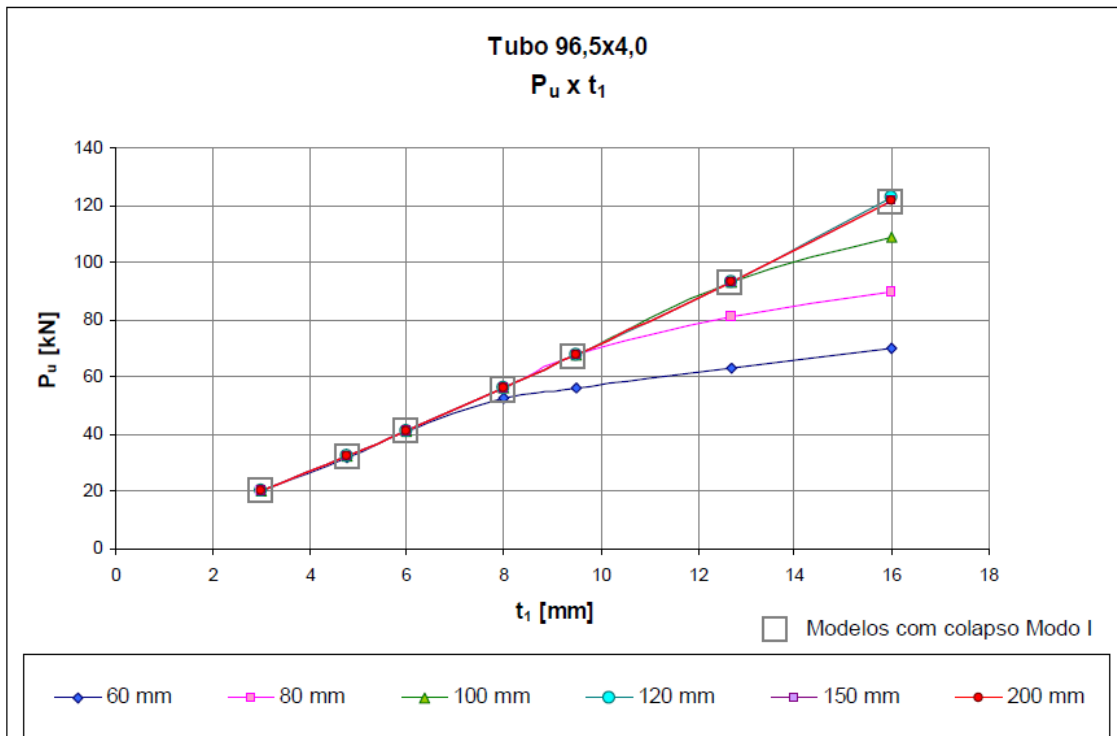


Figura 46 – Carga última x espessura da chapa, para cada h_1 – Perfil Tubular 96,5mm x 4,0mm – Ligação Planar por MINCHILLO (2011)

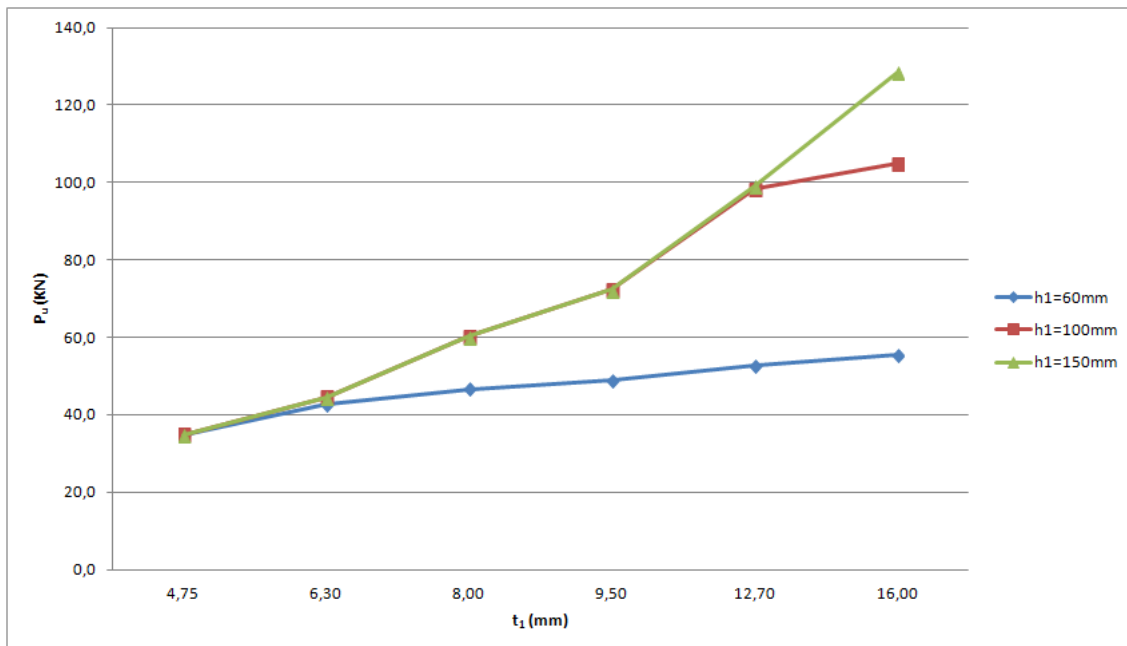


Figura 47 – Carga última x espessura da chapa, para cada h_1 – Perfil Tubular 96,5mm x 4,0mm – Ligação Multiplanar

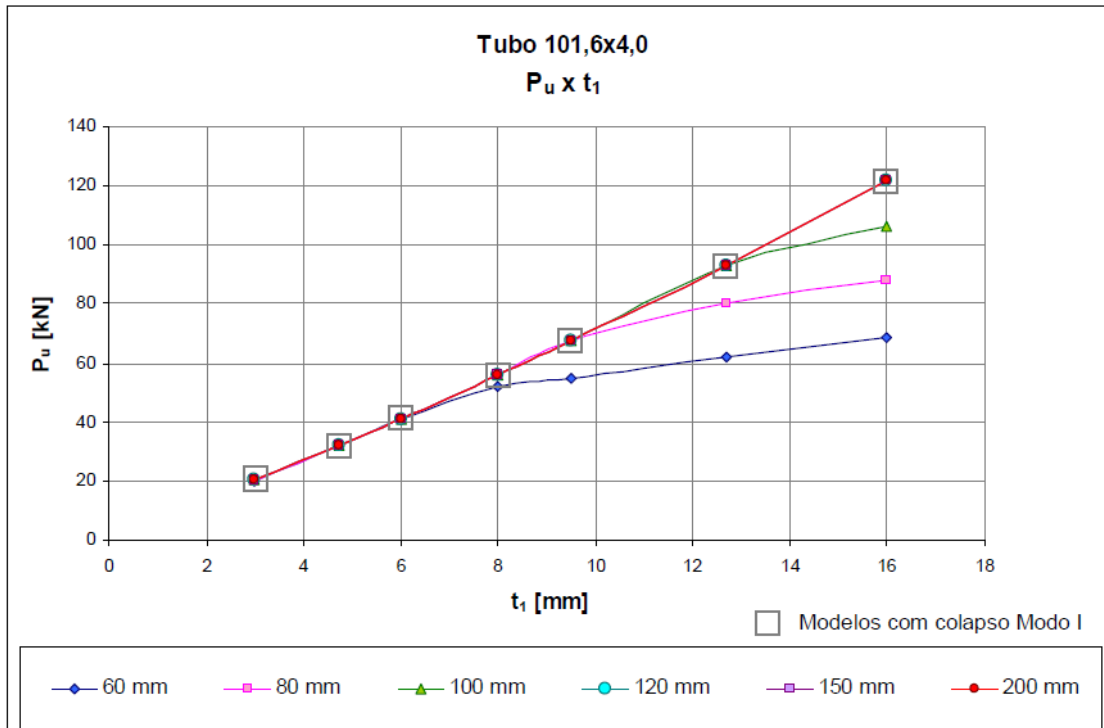


Figura 48 – Carga última x espessura da chapa, para cada h_1 – Perfil Tubular 101,6mm x 4,0mm – Ligação Planar por MINCHILLO (2011)

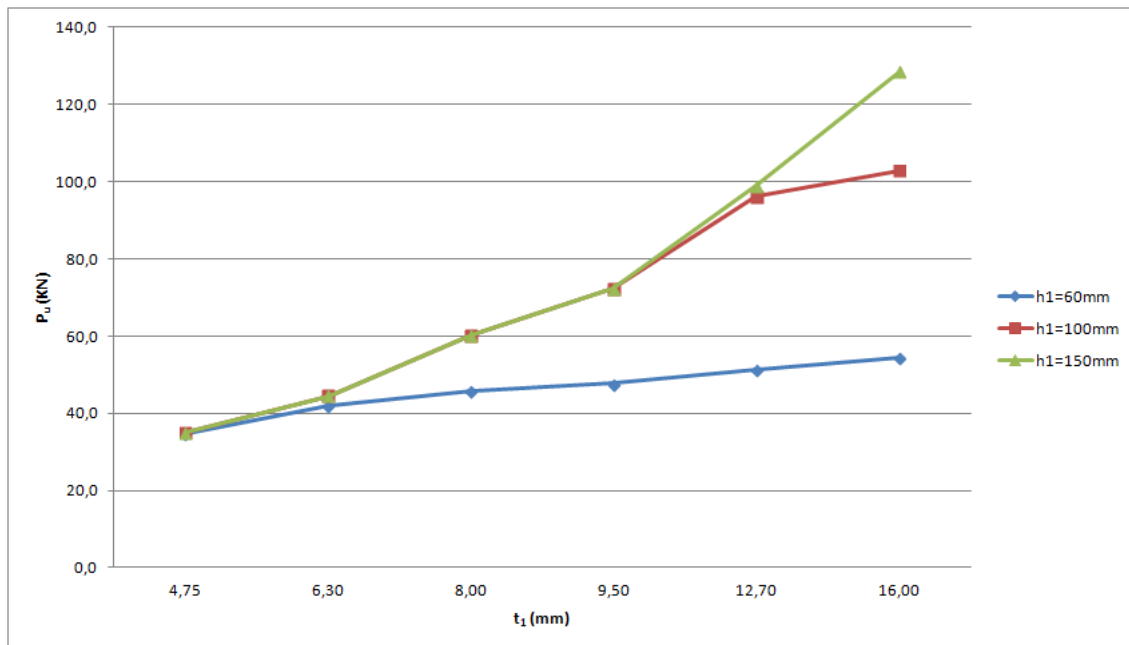


Figura 49 – Carga última x espessura da chapa, para cada h_1 – Perfil Tubular 101,6mm x 4,0mm – Ligação Multiplanar

Esses gráficos mostram que tanto na ligação com chapa de topo planar como na multiplanar, a largura e a espessura da chapa influenciam na determinação da resistência da ligação.

Os próximos gráficos apresentados nas Figuras 50 a 57 representam a relação entre a carga última da ligação de chapa de topo, P_u em função do parâmetro (d_0 / β_1) que relaciona o diâmetro do tubo à esbelteza da chapa β_1 das ligações planares e multiplanares. Foi feito um gráfico para cada perfil avaliado onde estão plotadas as curvas para os diferentes comprimentos de chapa h_1 .

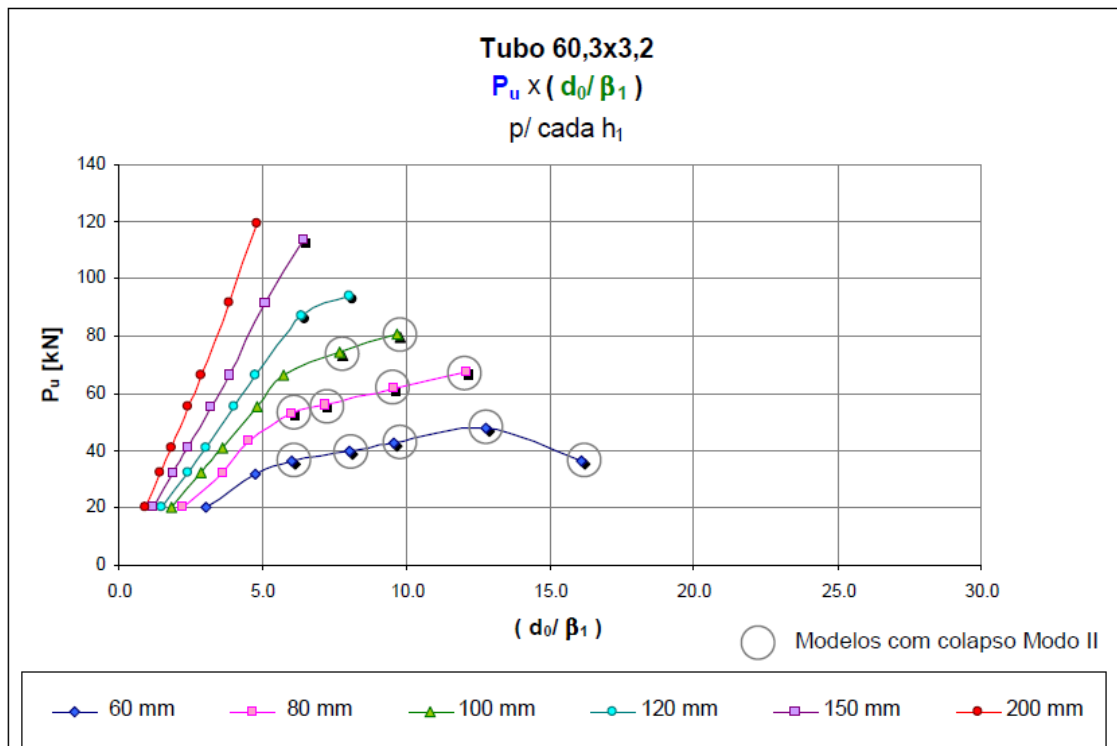


Figura 50 – Carga última $\times (d_0 / \beta_1)$, para cada h_1 – Perfil tubular 60,3mm x 3,2mm – Ligação Planar por MINCHILLO (2011)

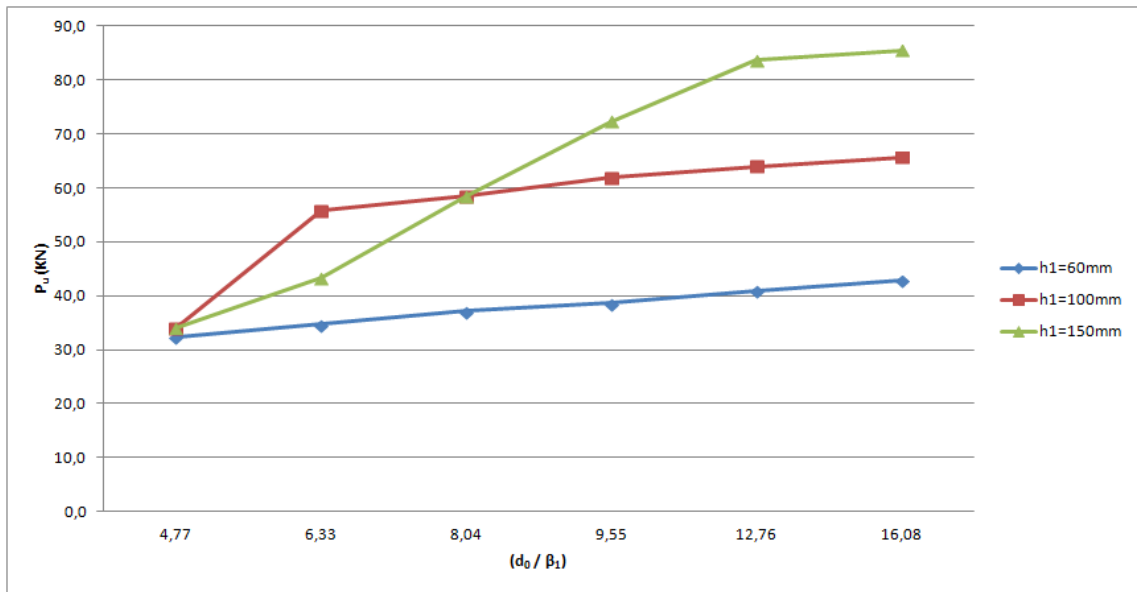


Figura 51 – Carga última $\times (d_0 / \beta_1)$, para cada h_1 – Perfil tubular 60,3mm x 3,2mm – Ligação Multiplanar

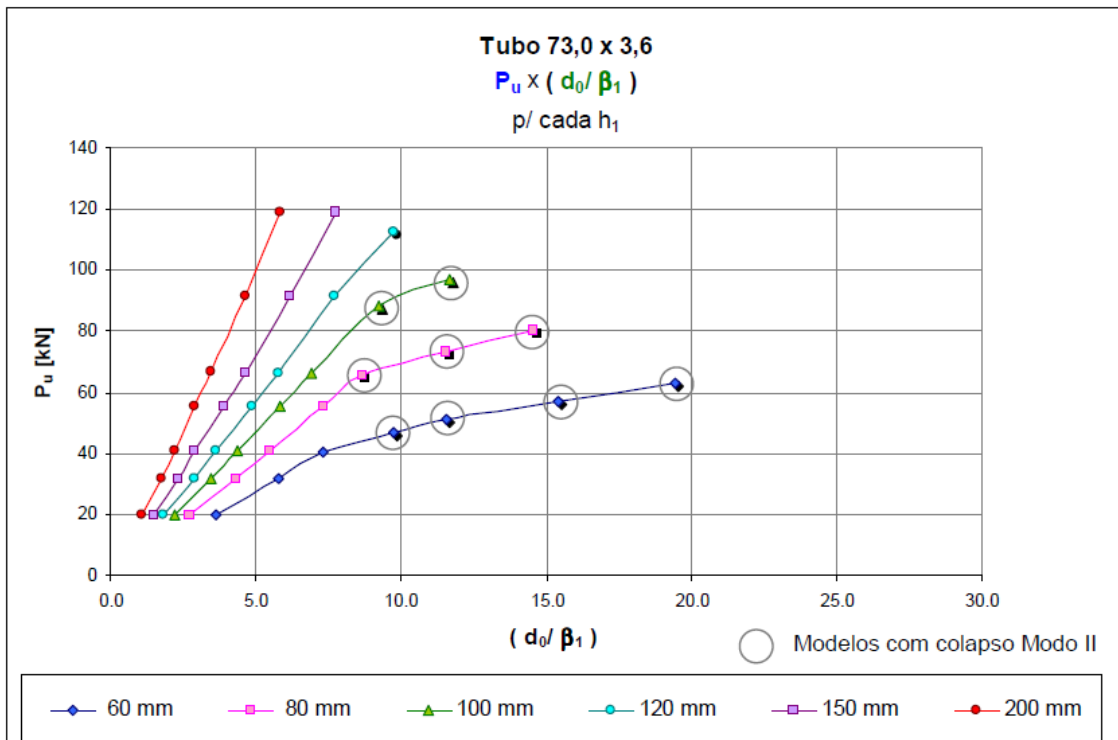


Figura 52 – Carga última $\times (d_0 / \beta_1)$, para cada h_1 – Perfil Tubular 73,0mm x 3,6mm – Ligação Planar por MINCHILLO (2011)

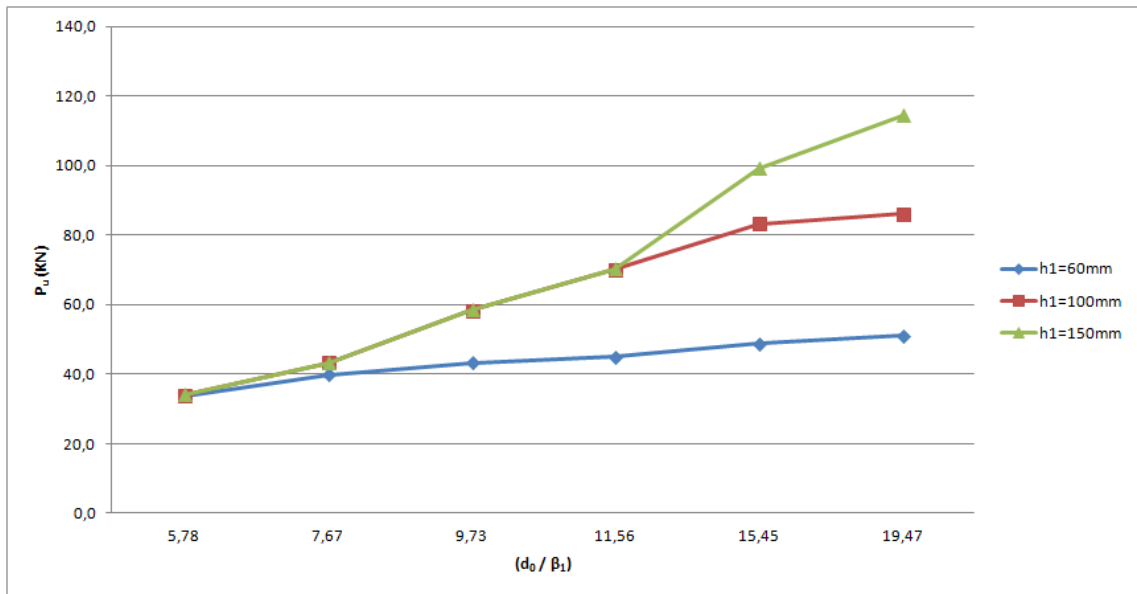


Figura 53 – Carga última $\times (d_0 / \beta_1)$, para cada h_1 – Perfil Tubular 73,0mm \times 3,6mm – Ligação Multiplanar

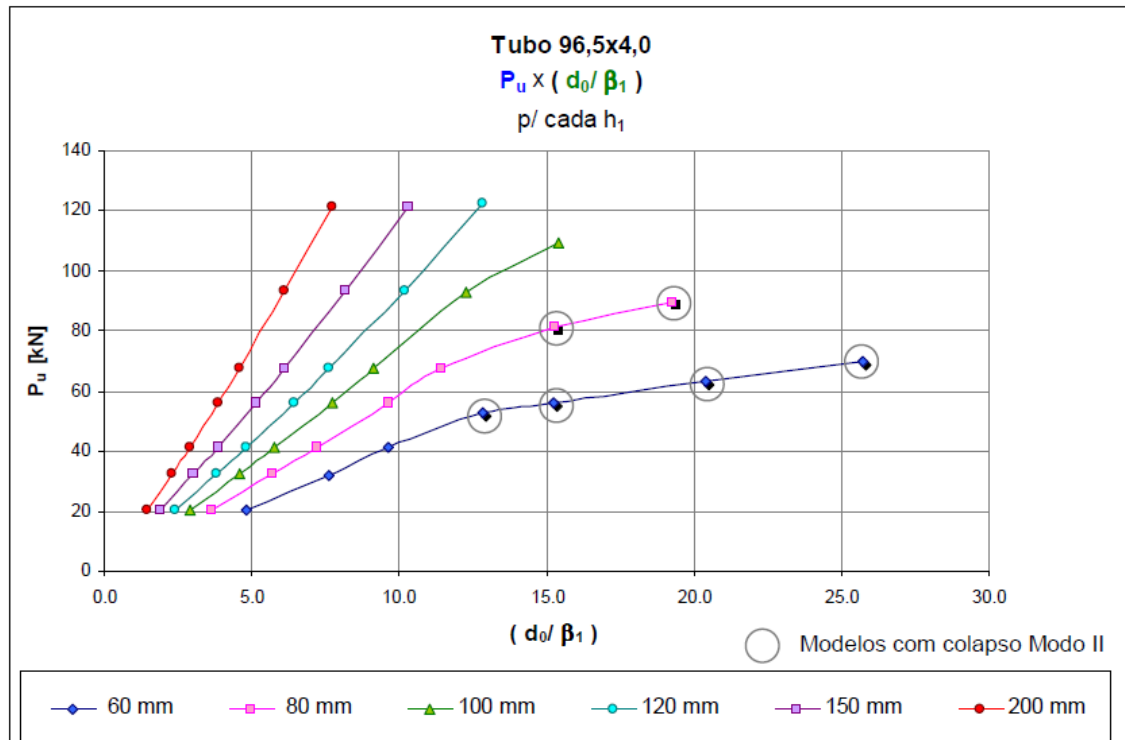


Figura 54 – Carga última $\times (d_0 / \beta_1)$, para cada h_1 – Perfil Tubular 96,5mm \times 4,0mm – Ligação Planar por MINCHILLO (2011)

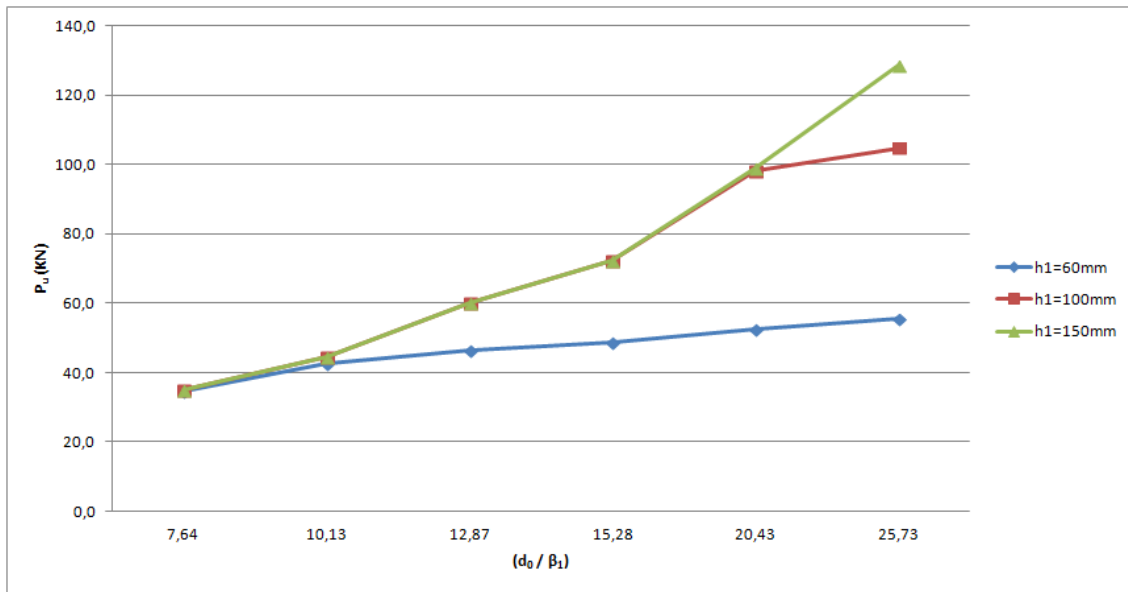


Figura 55 – Carga última $\times (d_0 / \beta_1)$, para cada h_1 – Perfil Tubular 96,5mm x 4,0mm – Ligação Multiplanar

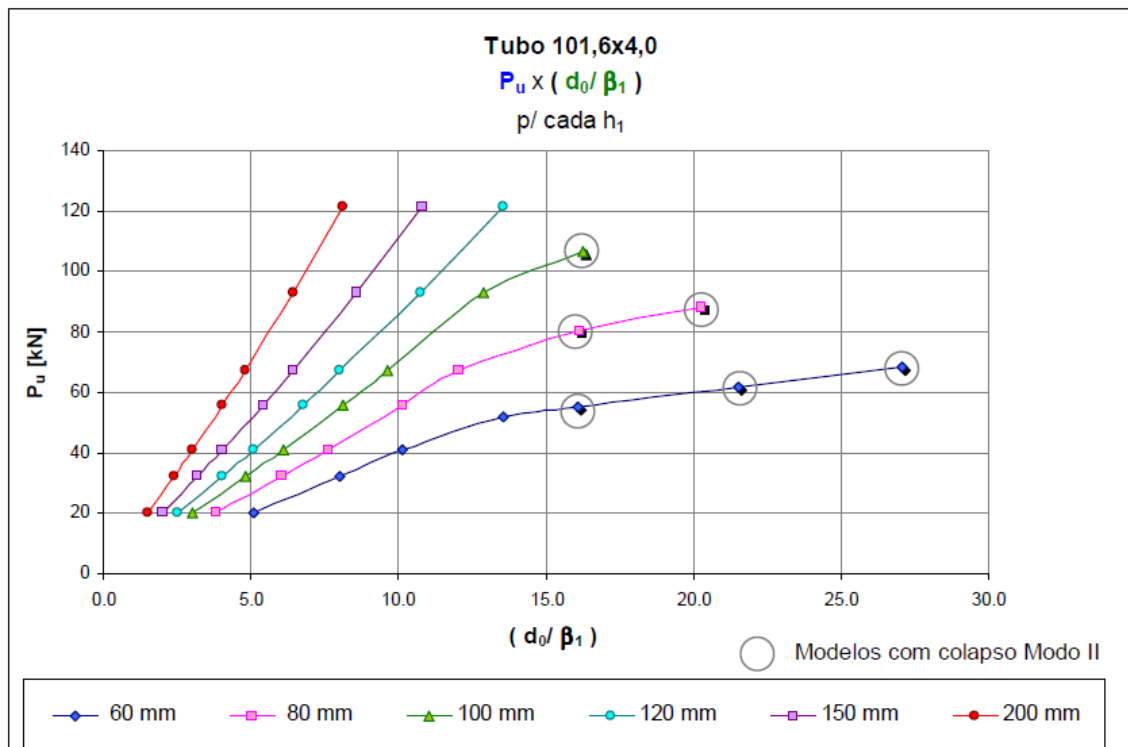


Figura 56 – Carga última $\times (d_0 / \beta_1)$, para cada h_1 – Perfil Tubular 101,6mm x 4,0mm – Ligação Planar por MINCHILLO (2011)

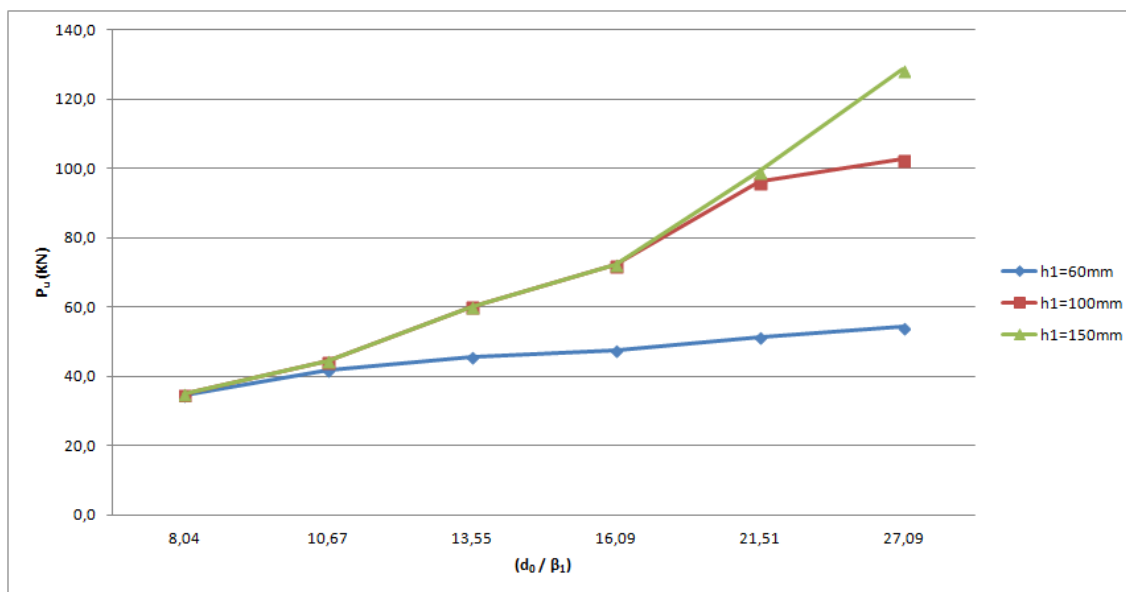


Figura 57 – Carga última $\times (d_0 / \beta_1)$, para cada h_1 – Perfil Tubular 101,6mm x 4,0mm – Ligação Multiplanar

Esses gráficos mostram que quanto maior for a relação (d_0 / β_1) que relaciona o diâmetro do tubo à esbelteza da chapa β_1 , maior é a resistência da ligação tanto na ligação planar como na multiplanar.

As Tabelas 8 a 11 no item 4.1.4 mostram os resultados de resistência das ligações tipo K (planar) e KK (multiplanar) e o fator de correção para cada modelo analisado. Os fatores de correção apresentados nas mesmas variam de 0,92 a 1,33. Pelas normas internacionais e pela norma brasileira de tubos NBR 16239 (2013) este valor é de 0,9 para ligações soldadas. Pelo estudo feito por FORTI (2010) com a ligação soldada esse valor ficou entre 0,81 e 1,09. Tanto no caso da ligação multiplanar soldada como no caso ligação multiplanar com chapa de topo verifica-se que os valores encontrados nas normas não correspondem à realidade do comportamento das ligações tipo KK.

Como a ligação multiplanar pinada com chapa de topo é uma ligação nova e por esse motivo não está descrita em normas nacionais ou internacionais a comparação do fator de correção está sendo feito através da ligação soldada e pelos valores observados nota-se que a ligação com chapa de topo está dando valores a favor da

segurança. Ou seja, se for utilizado o fator de correção de 0,9 a ligação multiplanar com chapa de topo estará a favor da segurança, mas em alguns casos estará superdimensionada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de uma nova ligação para treliças multiplanares feitas de estruturas tubulares com chapa de topo, na qual as diagonais chegam unidas à chapa através de um único parafuso fazendo com que a ligação seja pinada.

Foram modeladas através do programa comercial de elementos finitos ANSYS 72 ligações do tipo KK (multiplanar) para comparar com as ligações correspondentes K (planar). As resistências das ligações do tipo K foram retiradas do estudo elaborado por MINCHILLO (2011).

As análises numéricas tanto da ligação K como da KK consistiram em ligação de chapa de topo, utilizando elemento de casca que considerassem não linearidade física e geométrica, onde se pode avaliar os deslocamentos, a distribuição de tensões e a resistência da ligação.

Com os valores de resistência da ligação K e KK foi possível achar o fator de correção entre elas e fazer uma análise simplificada desses valores já que não existe em normas nacionais e internacionais um valor para esse fator nesse tipo de ligação com chapa de topo.

5.1 CONCLUSÃO

Este estudo contribuiu no entendimento do comportamento das ligações tubulares com chapa de topo em treliças multiplanares, onde a chapa é solicitada à flexão causando com isso uma excentricidade no perfil tubular.

Os resultados mostraram que quando o colapso ocorre no tubo o modo de colapso crítico é a plastificação da superfície do banzo, caracterizada pela deformação

de 3% de d_0 . Esse efeito localizado já é previsto na literatura e também ocorrem nas demais ligações de perfis tubulares.

Foi possível perceber que a largura e a espessura da chapa influenciam na determinação da resistência da ligação, principalmente a espessura, pois quanto maior for essa, maior será a resistência da ligação. Isso tanto na ligação planar como na multiplanar.

Observou-se que quanto maior for a relação (d_0 / β_1) que relaciona o diâmetro do tubo à esbeltez da chapa β_1 , maior é a resistência da ligação.

Assim como ocorrido na ligação planar, pode-se perceber na multiplanar que mesmo nos modelos com chapas mais grossas, houve o esmagamento na região de contato entre a chapa e o parafuso (no modelo simulado pelo carregamento). Isso acontece, pois ocorre uma plastificação na borda do furo da chapa na região de contato onde há a transmissão de esforços entre os dois elementos. A NBR 8800 (2008) por causa desse fenômeno utiliza o limite de ruptura do aço (f_u) no cálculo da pressão de contato entre a chapa e o parafuso e no cálculo da ruptura da seção líquida.

Pelo fato da ligação em estudo ser nova e por esse motivo não aparecer em normas nacionais ou internacionais o fator de correção entre essa ligação e a ligação planar conclui-se que o engenheiro quando precisar desse fator nesse tipo de ligação terá duas opções. Uma é utilizar o valor de 0,9 como é utilizado em ligações multiplanares soldadas presente nas normas nacionais e internacionais, pois estará a favor da segurança, mas em alguns casos a ligação estará sendo superdimensionada. Outra opção é utilizar as tabelas deste trabalho com os valores descritos nela e se alguns dos parâmetros forem diferentes dos encontrados nas tabelas é possível ainda que o engenheiro faça a análise da ligação no ANSYS utilizando o APDL que está no Apêndice A deste trabalho.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realização de mais análises numéricas com este tipo de ligação, diferenciando os parâmetros tais como: os diâmetros e espessuras dos tubos, os comprimentos e espessuras das chapas, angulação entre as chapas.

Realização de análise experimental dessas ligações para comparação com os modelos numéricos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios –2ª Edição.** Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16239: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edificações com Perfis Tubulares – 1ª Edição.** Rio de Janeiro, 2013.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION –AISC, **Hollow Structural Sections Connections Manual.** AISC, Chicago, Illinois, EUA, 1997.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION-AISC. **Hollow Structural Section Connection Manual.** AISC, Chicago, Illinois, EUA, 2010.

ANSYS USER'S MANUAL. Swanson Analysis Systems, Inc., Houston, Pa., Version 10.0, 2000.

A.P.I. **Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms RP-2A.** American Petroleum Institute, U.S.A, 1991.

A.W.S. **Structural Welding Code – Steel.** ANSI/AWS D1.1-1996. American Welding Society, Miami, Florida, U.S.A, 1996.

CHEN, W. F.; HAN, D. J.; **Plasticity for Structural Engineers,** Springer-Verlag, 1988.

CIDECT – Construction With Hollow Steel Sections. Volumes 1-9, Alemanha, 1995-2009.

COUTIE, M. G., DAVIES, G., BETTISON, M., PLATT, J. **Developments Recommendation for the Desing of Welded Joints Between Steel Structural Hollow Section or Between Steel Structure Sections and H Section.** Final report, Part 3 – three-dimensional joint. Report on ECSC contract 7210.SA/814, University of Nottingham, England, 1983.

DAVIS, C.S. **Computer Analysis of the Stresses in a Gusset Plate.** Thesis presented to the University of Washington, at Seattle, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, 1967. *apud* RABINOVITCH & CHENG, 1993.

DAVIES, G., CROCKETT, P. The strength of welded T-DT joints in rectangular and circular hollow section under variable axial loads. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 37, n. 1, p. 1-31,1996.

EASTWOOD, W. e WOOD, A. A. **Recent Research on Joints in Tubular Structures.** Proceedings, Canadian Structural Engineering Conference, Toronto, Canada, 1970.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EUROCODE 3: Design of Steel Structures:** ENV 1993 – 1 - 1: General rules and rules for buildings, 1992.

FORTI, N. C. da S. **Estudo Paramétrico de Estruturas Tubulares com Ligações Multiplanares.** Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Unicamp, Campinas, Brasil 2010.

HARDIN, B.O. **Experimental Investigation of the Primary Stress Distribution in the Gusset Plates of a Double Plane Pratt Truss Joint with Chord Splice at the Joint.** University of Kentucky Engineering Experiment Station, Bulletin No. 49, 1958. *apud* RABINOVITCH & CHENG, 1993.

IRVAN, W. G. **Experimental Study of Primary Stresses in Gusset Plates of a Double Plane Pratt Truss.** University of Kentucky Engineering Experiment Station, Bulletin No. 46, 1957. *apud* RABINOVITCH & CHENG, 1993

JAMM, W. **Form Strength of Welded Tubular Connections and Tubular Structures Under Static Loading** (tradução do alemão), Schweissen und Schneiden, 1951:3.

KUROBANE, Y., Ogawa, K. e OCHI, K. **Recent Research Developments in the Design of Tubular Structures.** Journal of Constructal Steel Research 13, 169-188, 1989.

KUROBANE, Y. **Ultimate Behavior and Design of Multiplanar Tubular Joint.** Proceedings, Workshop on Requalification of Tubular Steel Joint in Offshore Structure, Houston, Texas, USA, 1995.

KUROBANE, Y. **Connections in Tubular Structures.** Prog. Struct. Engng. Mater., 4:35-45, 2002.

KUROBANE, Y.; PACKER, J. A.; WARDENIER, J.; YEOMANS, N. **Design Guide for Structural Hollow Section Column Connections.** Köln: CIDECT and Verlag TÜV Rheinland GmbH. ISBN 3-8249-0802-6, 2004.

LEE, M. K., WILMSHURST, S. R. **Numerical Modeling of CHS Joints with Multiplanar Double-K Configuration.** J. Constr. Steel Res., 32, p. 281-301, 1995.

LIMA, L. R. O.; VELLASCO, P. C. G. S.; ANDRADE, S. A. L.; SILVA, J. G. S.; NEVES, L. F.C. ; BITTENCOURT, M. C. Structural Response of K and T Tubular Joints Under Static Loading. **Proceedings of the International Workshop on Connections in Steel Structures**, AISC, Chicago, v. 1. p. 1-10, 2008.

LU L.H., DE WINKEL G.D., YU Y., WARDENIER J. **Deformation Limit for the Ultimate Strength of Hollow Section Joints.** Proceedings of 6th International Symposium on Tubular Structures, Melbourne, Australia, 1994:341–347. *apud* KOSTESKI *et al*, 1994.

MAKINO, Y., KUROBANE, Y., OCHI, K. **Ultimate Capacity of Tubular Double K-Joints.** Proceedings of the IIW Conference on Welding of Tubular Structures, Boston, USA, pp. 451-458, 1984.

MAKINO, Y., KUROBANE, Y., PAUL, J. C. **Ultimate Behaviour of Diaphragm Stiffened Tubular KK-Joints.** Proceedings, Int. Symp. On Tubular Struct., p.465-472, 1993.

MARSHALL, P. W. **Welded Tubular Connections - CHS Trusses.** Structural Engineering Handbook, Ed. Chen Wai-Fah, 1999.

MARSHALL, P. W. **Review of Tubular Joint Criteria.** Connections in Steel Structures V - Amsterdam - June 3-4, 2004.

MENDANHA, F. O. Análise de Ligações de Perfis Tubulares em Aço do Tipo K e KT. **Dissertação de Mestrado**, Universidade de Ouro Preto, UFOP, 2006.

MENDES, F. C. Análise Teórica-Experimental de Ligações Tipo T, K e KT com Perfis Metálicos Tubulares. **Dissertação de Mestrado**, Universidade de Ouro Preto, UFOP, 2008.

MINCHILLO, D. G. V. **Estudo de Ligações Pinadas com Chapa de Topo para Aplicações em Estruturas Metálicas Treliçadas Tubulares Planas**. Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Unicamp, Campinas, Brasil 2011.

MITRI, H. S., Scola, S., REDWOOD, R. G. **Experimental investigation into the behaviour of axially loaded tubular V-joint**. Proceedings, CSCE Centennial Conf., Can. Soc. For Civ. Engrg., Montreal, Canada, p. 397-410, 1987.

MOUTY, J., RONDAL, J. **Etude du Comportement sous Charge Statique des Assemblages Soudes de Profils Creux Circulaires dans les Poutres de Section Triangulaires et Quadrangulaires**. Res. Rep., Univ. Of Liège, Liège, Belgium, 1990.

NAKACHO, K., OKADA, M., UEDA, Y. **Stiffness and yield strength of simple V joint of offshore structures**. J. Japanese Naval Inst. (in Japanese), 1989.

PACKER, J.A., WARDENIER, J., KUROBANE, Y., DUTTA, D., YEOMANS, N. **Design Guide for Rectangular Hollow Section (RHS) Joints under Predominantly Static Loading**. CIDECT (ed) and Verlag TÜV Rheinland, 1992.

PACKER, J. A. e HENDERSON, J. E. **Hollow Structural Section Connections and Trusses – A Design Guide**, 2ª edição, Canadian Institute of Steel Construction, Universal Offset Limited, Toronto, Canadá, 1997.

PACKER, J. A. **Tubular Construction**. Prog. Struct. Engng Mater., 2: 41-49, 2000.

PAUL, J. C., van der VALK, C. A. C., WARDENIER, J. **The Static Strength of Multiplanar X-Joints**. Proceedings, Int. Symp. on Tubular Struct., p.73-80, 1989.

PAUL, J.C., MAKINO, Y., KUROBANE, Y. **Ultimate Behaviour of Multiplanar Double Kjoints**. Proceedings, Int. Offshore and polar Engrg. Conf., p. 377-383, 1992.

PAUL, J.C., MAKINO, Y., KUROBANE, Y. **Ultimate Resistance of Tubular Double T-Joints Axial Brace Loading**. J. Constr Steel Res., 24, p. 205-228, 1993.

RASMUSSEN, K. J. R. **Strength of Welded T-Joint Truss Connections Between Equal Width Cold-Formed RHS**. Department of Civil Engineering, University of Sydney, Austrália, 2003.

RAUTARUUKK Oyj, H. V. **Design Handbook for Rautaruukki Structural Hollow Sections.** Hämeenlinna, Finlândia, 1998.

SANTOS, A.L.E. de F. **Ligação de Barras Tubulares para Estruturas Metálicas Planas.** Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Unicamp, Campinas, Brasil, 2003.

SCOLA, S., REDWOOD, R. G., MITRI, H. S. **Behaviour of Axially Loaded Tubular V-Joints.** Journal of Constructional Steel Research 16, pp 89-109, 1990.

SEPÚLVEDA, B. D. G. **Influência das Ligações no Dimensionamento das Estruturas Tubulares Circulares de Aço Treliçada.** Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Unicamp, Campinas, Brasil 2013.

SHENG, N., YAM, C. H., IU, V. P. **Analytical Investigation and the Design of the Compressive Strength of Steel Gusset Plate Connections.** Journal of Constructional Steel Research, v. 58, p. 1473 -1493, 2002.

SOUZA, A. S. C.; GONCALVES, R. M. Treliças Espaciais Aspectos Gerais, Comportamento Estrutural e Informações para Projetos. **Construção Metálica**, v. 81, p. 21-25, 2007.

STELCO INC. **Hollow Structural Sections - Design Manual for Connections.** 1ª edição, Hamilton , Ontario, Canadá, 1971.

THORNTON, W. A. **Bracing Connections for Heavy Construction.** Engineering Journal, AISC, v. 21, n. 3, p. 139-148, 1984.

VAN DER VEGTE, G. J., VAN DER KONING, C. H. M., PUTHLI, R. S., WARDENIER, J. **Numerical Simulation of Experiments on Multiplanar Tubular Steel X-Joints.** Int. J. of Offshore and Polar Engrg, n, 1, p. 200-207, 1991.

VASARHELYI, D. O. **Tests of Gusset Plate Models.** Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, February, p. 665-678, 1971.

VIEIRA, R. F. Análise Teórico-Experimental de Ligações de Barras Tubulares do Tipo K. **Tese de Doutorado**, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, 2007.

WARDENIER, J. **Hollow Section Joints.** Delft University Press, Delft, Holanda, 1982.

WARDENIER J. **Hollow Section in Structural Applications**, 2000.

WARDENIER J.; KUROBANE, Y.; PACKER, J. A.; VEGTE, G. J.; ZAO, X. L.; **Design guide for circular hollow section (CHS) joints under predominantly static loading**, Paris, CIDECT (Comité International pour le Développement et L'Étude da la Construcion Tubulaire), 2a ed., 2010.

WHITMORE, R. E. **Experimental Investigation of Stresses in Gusset Plates.** Bulletin No. 16, Engineering Experiment Station, University of Tennessee, 1952. *apud* RABINOVITCH & CHENG, 1993.

WILMSHURST, S. R., LEE, M. M. K. **Finite Element Analysis of KK-joints - an Assessment of the Test Data of Mouny & Rondal.** IIW Doc. XV-E-93-190, Int. Inst. Of Welding, Cambridge, U.K, 1993.

ZHAO, X.-L., WARDENIER, J., PACKER, J. A. e van der VEGTE, G. J. **Current Static Design Guidance for Hollow-Section Joints.** Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings 163, Issue SB6, pp. 361-373, 2010.

ZHAO, X. L e TONG, L. W. **New Development in Steel Tubular Joints.** Advances in Structural Engineering, Vol. 14, N° 4, 2011.

YAM, M.C.H., CHENG, J.J.R. **Behavior and Design of Gusset Plate Connections in Compression.** Journal of Constructional Steel Research, v.58, p.1143–1159, 2002.

APÊNDICE A

/PREP7

!*****

! Geometria

!*****

! Parâmetros

D0=96.5 !Diametro do tubo

Et=4 !Espessura do tubo

Df=14 !Diâmetro do furo

Dist=30 !Distancia do furo à borda da chapa

H1=120 !Largura da chapa

Hch=90 !Altura da chapa

Ech=16 !Espessura da chapa

Es=Et !Espessura da solda igual a espessura do tubo

Hs=Et+Ech/2

carga= 200 !Valor de força em kN

ang= 30 !Ângulo de 30º com a vertical

!*****

! Elemento

!*****

ET,1,SHELL181

!*****

! Material

!*****

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,1,,206000

MPDATA,PRXY,1,,.3

MPDATA,EX,2,,206000

MPDATA,PRXY,2,,0.3

!*****

! Tubo

!*****

TB,MISO,1,1,5,0

TBTEMP,0

TBPT,,	0.001718447,	354
TBPT,,	0.032	, 355
TBPT,,	0.089	, 421
TBPT,,	0.198	, 447
TBPT,,	0.275	, 447

!*****

! Chapa

!*****

TB,MISO,2,1,5,0

TBTEMP,0

TBPT,,	0.001718447,	354
TBPT,,	0.032	, 355
TBPT,,	0.089	, 421
TBPT,,	0.198	, 447
TBPT,,	0.275	, 447

!*****

! Propriedades reais

!*****

R,1,Et

!*

R,2,Ech

!*

R,3,Es

!*****

! Geometria

!*****

Dt=D0-et

wpro,,,90.000000

wpoff,,,250

CYL4, , ,Dt/2, , , -500

wpoff,,, -250

VDELE, 1

ADELE,1

ADELE,2

ASBW,3

ASBW,4

wpoff,,,-H1/2

ASBW,1

ASBW,3

wpoff,,,H1

ASBW,2

ASBW,5

WPCSYS,-1,0

ASBW,1

ASBW,2

ASBW,3

ASBW,4

ASBW,6

ASBW,7

ASBW,8

ASBW,9

FLST,3,2,4,ORDE,2

FITEM,3,21

FITEM,3,30

LGEN,2,P51X, , , ,Hch-Dist, , ,0

FLST,3,2,4,ORDE,2

FITEM,3,21

FITEM,3,30

LGEN,2,P51X, , , ,Hch, , ,0

LSTR, 20, 22

LSTR, 22, 25

LSTR, 18, 21

LSTR, 21, 24

LSTR, 19, 23

LSTR, 23, 26

al,21,43,37,41

al,30,45,38,43

al,38,46,40,44

al,37,44,39,42

aplot

CYL4,0,Dt/2+Hch-Dist,Df/2

FLST,2,4,5,ORDE,3

FITEM,2,9

FITEM,2,18

FITEM,2,-20

ASBA,P51X, 21

!*****Cortes na chapa*****!

KWPLAN,-1, 26, 19, 24

wpro,,90.000000,

wpoff,,,-10

FLST,2,6,5,ORDE,6

FITEM,2,1

FITEM,2,-2

FITEM,2,11

FITEM,2,-12

FITEM,2,23

FITEM,2,25

ASBW,P51X

wpoff,80

wpro,,,90.000000

FLST,2,3,5,ORDE,3

FITEM,2,22

FITEM,2,29

FITEM,2,32

ASBW,P51X

KWPLAN,-1, 25, 20, 24

wpro,,,90.000000,

wpoff,,, -10

FLST,2,7,5,ORDE,7

FITEM,2,1

FITEM,2,3

FITEM,2,5

FITEM,2,10

FITEM,2,13

FITEM,2,23

FITEM,2,-24

ASBW,P51X

wpoff,10

wpro,,,90.000000

FLST,2,4,5,ORDE,4

FITEM,2,30

FITEM,2,-31

FITEM,2,40

FITEM,2,42

ASBW,P51X

WPSTYLE,,,,,,,,,0

WPCSYS,-1,0

wpro,,,90.000000

wpoff,,,15

FLST,2,8,5,ORDE,7

FITEM,2,2

FITEM,2,5

FITEM,2,18

FITEM,2,-20

FITEM,2,24

FITEM,2,-25

FITEM,2,27

ASBW,P51X

wpoff,,, -30

FLST,2,8,5,ORDE,8

FITEM,2,22

FITEM,2,-23

FITEM,2,33

FITEM,2,-34

FITEM,2,36

FITEM,2,38

FITEM,2,43

FITEM,2,-44

ASBW,P51X

wpoff,,Dt/2+Hch-Dist,

wpoff,,15,

wpro,,90.000000,

FLST,2,6,5,ORDE,6

FITEM,2,1

FITEM,2,10

FITEM,2,42

FITEM,2,55

FITEM,2,61

FITEM,2,63

ASBW,P51X

wpoff,,30

FLST,2,6,5,ORDE,6

FITEM,2,12

FITEM,2,41

FITEM,2,54

FITEM,2,56

FITEM,2,60

FITEM,2,64

ASBW,P51X

!*****Cortes para solda*****!

KWPAVE, 19

wpoff,,hs

wpro,,90.000000,

FLST,2,4,5,ORDE,4

FITEM,2,7

FITEM,2,-8

FITEM,2,16

FITEM,2,-17

ASBW,P51X

KWPAVE, 20

wpoff,,hs

FLST,2,4,5,ORDE,4

FITEM,2,4

FITEM,2,6

FITEM,2,14

FITEM,2,-15

ASBW,P51X

wpoff,hs

wpro,,90.000000

FLST,2,8,5,ORDE,8

FITEM,2,5

FITEM,2,26

FITEM,2,-27

FITEM,2,31

FITEM,2,-32

FITEM,2,51

FITEM,2,75

FITEM,2,77

ASBW,P51X

!wpoff,,,-hs*2

!FLST,2,8,5,ORDE,8

!FITEM,2,20

!FITEM,2,28

!FITEM,2,39

!FITEM,2,48

!FITEM,2,53

!FITEM,2,59

!FITEM,2,76

!FITEM,2,80

!ASBW,P51X

wpoff,,,-Es

wpro,,90.000000,

FLST,2,6,5,ORDE,6

FITEM,2,2

FITEM,2,11

FITEM,2,25

FITEM,2,29

FITEM,2,-30

FITEM,2,47

ASBW,P51X

/REPLO

/REPLO

LSTR, 102, 90

LSTR, 103, 91

LSTR, 101, 94

LSTR, 99, 92

LSTR, 100, 93

LSTR, 105, 96

LSTR, 104, 95

AL,11,194,12,19

AL,12 ,202,30,185

AL,30,57,51,174

AL,51,29,52,172

AL,52,203,53,186

AL,53,197,54,181

FLST,3,6,5,ORDE,6

FITEM,3,2

FITEM,3,11

FITEM,3,25

FITEM,3,29

FITEM,3,-30

FITEM,3,47

ARSYM,Z,P51X, , , 0,0

WPCSYS,-1,0

KWPAVE, 83

wpoff,20

wpro,,,90.000000

FLST,2,4,5,ORDE,4

FITEM,2,12

FITEM,2,41

FITEM,2,54

FITEM,2,56

ASBW,P51X

KWPAVE, 89

wpoff,,,-20

FLST,2,4,5,ORDE,4

FITEM,2,7

FITEM,2,-8

FITEM,2,16

FITEM,2,-17

ASBW,P51X

WPSTYLE,,,,,,,,,0

/REPLO

!*****

! Atributos

!*****

!*****

! Tubo

!*****

WPCSYS,-1,0

wpro,,90.000000

CSWPLA,12,1,1,1,

ASEL,S,LOC,X,0,dt/2

AATT, 1, 1, 1, 0,

!*****

! Chapa

!*****

csys,0

asel,s,loc,z,,

AATT, 1, 2, 1, 0,

!*****

! Solda

!*****

allsel,all

ASEL,u,real,,1,2

AATT, 2, 3, 1, 0,

allsel,all

/PNUM,KP,0

/PNUM,LINE,0

/PNUM,AREA,0

/PNUM,VOLU,0

/PNUM,NODE,0

/PNUM,TABN,0

/PNUM,SVAL,0

/NUMBER,1

!*

/PNUM,REAL,1

/REPLOT

!*

!*****

! Chapa inclinada

!*****

WPCSYS,-1,0

wpro,,ang,

CSWPLA,11,0,1,1,

csys,0

asel,u,real,,1

cm,chapa_1,area

ATLAN,11,all, , , ,0,0

cmsel,s,chapa_1

allsel,belo,area

adel,all, , ,1

allsel,all

ASEL,S,LOC,Z,0,-dt

allsel,belo,area

adel,all, , ,1

allsel,all

/repla

KWPAVE, 133

FLST,2,2,5,ORDE,2

FITEM,2,76

FITEM,2,80

ASBW,P51X

KWPAVE, 165

FLST,2,2,5,ORDE,2

FITEM,2,1

FITEM,2,4

ASBW,P51X

KWPAVE, 195

FLST,2,2,5,ORDE,2

FITEM,2,9

FITEM,2,10

ASBW,P51X

/REPLO

FLST,2,6,5,ORDE,6

FITEM,2,20

FITEM,2,28

FITEM,2,39

FITEM,2,48

FITEM,2,53

FITEM,2,59

FLST,3,18,4,ORDE,18

FITEM,3,244

FITEM,3,251

FITEM,3,258

FITEM,3,275

FITEM,3,278

FITEM,3,282

FITEM,3,284

FITEM,3,288

FITEM,3,312

FITEM,3,316

FITEM,3,351

FITEM,3,-352

FITEM,3,354

FITEM,3,357

FITEM,3,360

FITEM,3,363

FITEM,3,366

FITEM,3,369

ASBL,P51X,P51X

aglue,all

L, 132, 21

L, 180, 23

!Solda canto

FLST,2,4,4

FITEM,2,62

FITEM,2,27

FITEM,2,4

FITEM,2,13

AL,P51X

FLST,2,4,4

FITEM,2,27

FITEM,2,72

FITEM,2,5

FITEM,2,16

AL,P51X

FLST,2,4,4

FITEM,2,76

FITEM,2,32

FITEM,2,30

FITEM,2,28

AL,P51X

FLST,2,4,4

FITEM,2,28

FITEM,2,19

FITEM,2,12

FITEM,2,74

AL,P51X

|*****

! Atualizando Atributos

|*****

|*****

! Tubo

|*****

CSYS,12

ASEL,S,LOC,X,0,dt/2

AATT, 1, 1, 1, 0,

|*****

! Chapa

|*****

```
csys,11
asel,s,loc,z,,
AATT, 1, 2, 1, 0,
```

```
!*****
```

```
! Solda
```

```
!*****
```

```
csys,0
allsel,all
ASEL,u,real,,1,2
AATT, 2, 3, 1, 0,
```

```
allsel,all
```

```
/repla
```

```
!*****
```

```
! Reflete a Geometria
```

```
!*****
```

```
ARSYM,Z,all, , ,0,0
```

```
asel,s,real,,1
```

```
aglu,all
```

```
allsel,all
```

|*****

! Malha

|*****

|*****

! Densidade da malha

|*****

AESIZE,all,et,

|*****

! Áreas em volta do furo

|*****

FLST,5,8,4,ORDE,8

FITEM,5,333

FITEM,5,335

FITEM,5,-336

FITEM,5,345

FITEM,5,431

FITEM,5,433

FITEM,5,-434

FITEM,5,443

LSEL,S, , ,P51X

LESIZE,all, , ,3, , , , ,1

FLST,5,16,4,ORDE,16

FITEM,5,112

FITEM,5,164

FITEM,5,257

FITEM,5,299

FITEM,5,307

FITEM,5,309

FITEM,5,332

FITEM,5,338

FITEM,5,343

FITEM,5,373

FITEM,5,403

FITEM,5,411

FITEM,5,413

FITEM,5,430

FITEM,5,436

FITEM,5,441

LSEL,S, , ,P51X

LESIZE,all, , ,4, , , , ,1

FLST,5,8,4,ORDE,8

FITEM,5,334

FITEM,5,337

FITEM,5,344

FITEM,5,346

FITEM,5,432

FITEM,5,435

FITEM,5,442

FITEM,5,444

LSEL,S, , ,P51X

LESIZE,all, , ,8, , , , ,1

allsel,all

AMAP,200,235,233,223,232

AMAP,199,233,234,218,223

AMAP,206,234,236,51,218

AMAP,205,236,235,232,51

AMAP,146,192,190,176,189

AMAP,145,190,191,171,176

AMAP,152,191,171,129,193

AMAP,151,193,192,189,129

AMAP,107,83,121,122,84

AMAP,235,83,121,133,66

AMAP,113,126,88,89,127

AMAP,236,89,127,109,68

!*****

!Pontas dos tubos

!*****

FLST,5,8,4,ORDE,8

FITEM,5,70

FITEM,5,115

FITEM,5,208

FITEM,5,224

FITEM,5,226

FITEM,5,228

FITEM,5,236

FITEM,5,354

LSEL,S, , ,P51X

LESIZE,all, , ,30,2, , , ,1

*GET,_z1,LINE,,COUNT

*SET,_z2,0

*DO,_z5,1,_z1

*SET,_z2,LSNEXT(_z2)

*GET,_z3,LINE,_z2,ATTR,NDNX

*GET,_z4,LINE,_z2,ATTR,SPNX

*get,_z6,line,_z2,attr,kynd

*IF,_z3,GT,0,THEN

*IF,_z4,NE,0,THEN

LESIZE,_z2,,, _z3,1/_z4,,,,_z6

*ENDIF

*ENDIF

*ENDDO

MSHAPE,0,2D

MSHKEY,0

MSHKEY,1

FLST,5,212,5,ORDE,33

FITEM,5,1

FITEM,5,-60

FITEM,5,63

FITEM,5,-68

FITEM,5,70

FITEM,5,-71

FITEM,5,73

FITEM,5,-77

FITEM,5,79

FITEM,5,-82

FITEM,5,85

FITEM,5,-87

FITEM,5,89

FITEM,5,91

FITEM,5,-99

FITEM,5,101

FITEM,5,-102

FITEM,5,104

FITEM,5,-108

FITEM,5,110

FITEM,5,-113

FITEM,5,115

FITEM,5,-126

FITEM,5,128

FITEM,5,-135

FITEM,5,137

FITEM,5,139

FITEM,5,-159

FITEM,5,161

FITEM,5,-163

FITEM,5,165

FITEM,5,172

FITEM,5,-236

CM,_Y,AREA

ASEL, , , ,P51X

CM,_Y1,AREA

CHKMSH,'AREA'

CMSEL,S,_Y

! ANSYS MACRO CHKMSH CREATED COMPONENT _Y2

AMESH,_Y2

CMDELE,_Y

CMDELE,_Y1

CMDELE,_Y2

allsel,all

!*****

! Carregamento USANDO CARGA DISTRIBUÍDA

!*****

LSCLEAR,ALL

SFL,334,PRES,112.5714286*carga,0

SFL,432,PRES,112.5714286*carga,0

SFL,346,PRES,0,112.5714286*carga

SFL,444,PRES,0,112.5714286*carga

Sbctran

!*****

! Restrições

!*****

DL, 2, ,ux,

DL, 3, ,ux,

DL, 6, ,ux,

DL, 7, ,ux,

DL,460, ,ux,

DL,469, ,ux,

DL,471, ,ux,

DL,473, ,ux,

DL, 2, ,uy,

DL, 3, ,uy,

DL, 6, ,uy,

DL, 7, ,uy,

DL,460, ,uy,

DL,469, ,uy,

DL,471, ,uy,

DL,473, ,uy,

DL, 2, ,uz,

DL, 3, ,uz,

DL, 6, ,uz,

DL, 7, ,uz,

DL,460, ,uz,

DL,469, ,uz,

DL,471, ,uz,

DL,473, ,uz,

Sbctran

eplo

!*****

! Solution

!*****

FINISH

/SOL

NSUBST,carga,0,0

OUTRES,ERASE

OUTRES,ALL,1

AUTOTS,0

TIME,carga

ANTYPE,0

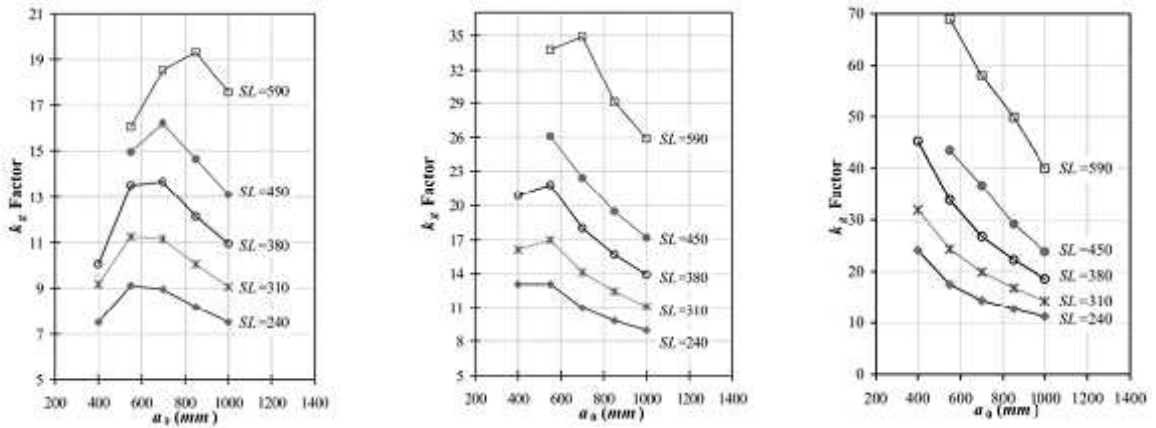
NLGEOM,1

/SOLU

SOLVE

ANEXO A

Fatores k_g para cálculo da carga crítica P_u de chapas retangulares solicitadas à compressão, obtidos por SHENG et al (2002).

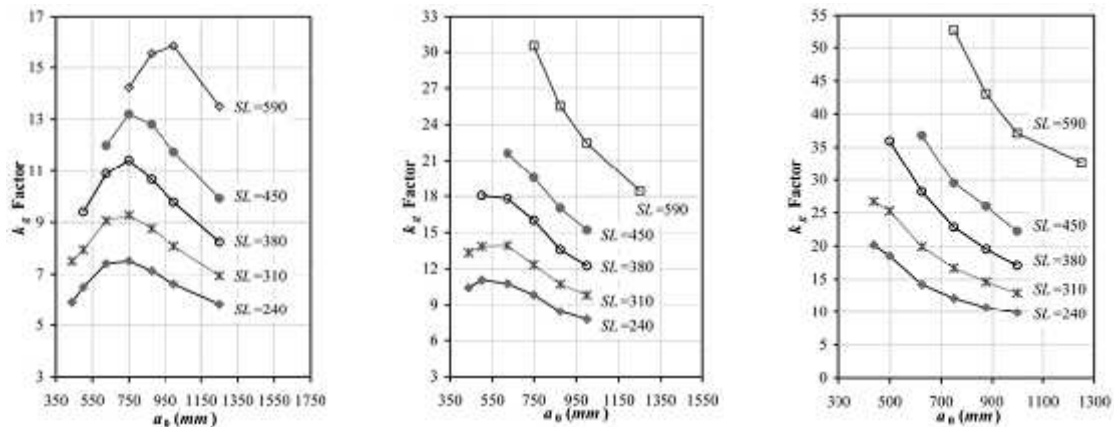


a) Fator k_g para chapa com $a_0/b_0=1,0$ mm, $t= 13,3$ mm, $E_t=E/50$

b) Fator k_g para chapa com $a_0/b_0=1,0$ mm, $t= 9,87$ mm, $E_t=E/50$.

c) Fator k_g para chapa com $a_0/b_0=1,0$ mm, $t= 6,5$ mm, $E_t=E/50$.

Figura 58 – Fator k_g para chapa com $a_0/b_0=1,0$ mm

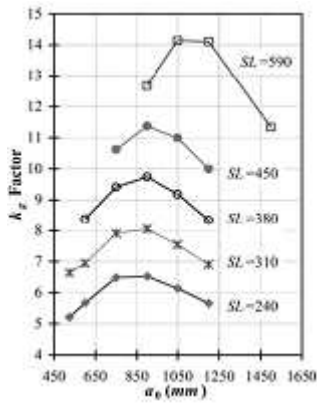


a) Fator k_g para chapa com $a_0/b_0=1,25$ mm, $t= 13,3$ mm, $E_t=E/50$.

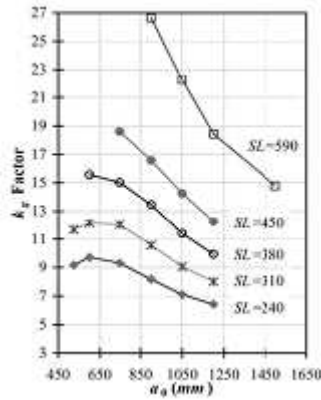
b) Fator k_g para chapa com $a_0/b_0=1,25$ mm, $t= 9,87$ mm, $E_t=E/50$.

c) Fator k_g para chapa com $a_0/b_0=1,25$ mm, $t= 6,5$ mm, $E_t=E/50$.

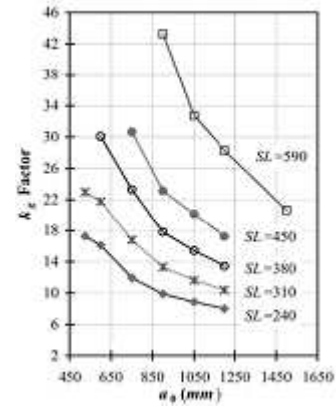
Figura 59 – Fator k_g para chapa com $a_0/b_0=1,25$ mm



a) Fator k_g para chapa com $a_0/b_0=1,5$ mm, $t=13,3$ mm, $E_t=E/50$.

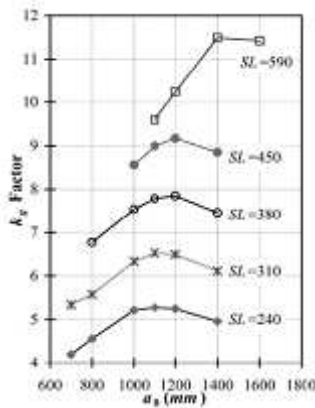


b) Fator k_g para chapa com $a_0/b_0=1,5$ mm, $t=9,87$ mm, $E_t=E/50$.

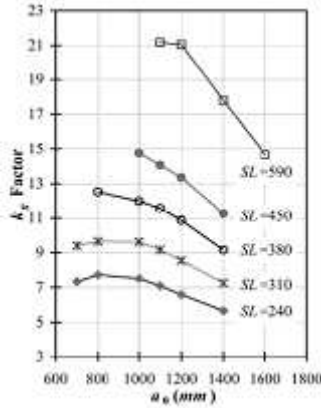


c) Fator k_g para chapa com $a_0/b_0=1,5$ mm, $t=6,5$ mm, $E_t=E/50$.

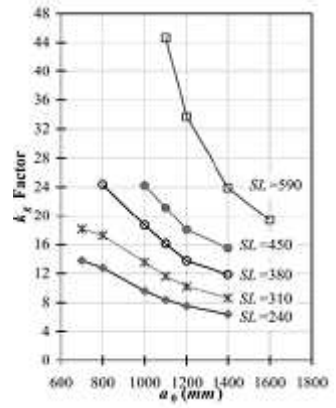
Figura 60 – Fator k_g para chapa com $a_0/b_0=1,5$ mm



a) Fator k_g para chapa com $a_0/b_0=2,0$ mm, $t=13,3$ mm, $E_t=E/50$.



b) Fator k_g para chapa com $a_0/b_0=2,0$ mm, $t=9,87$ mm, $E_t=E/50$.



c) Fator k_g para chapa com $a_0/b_0=2,0$ mm, $t=6,5$ mm, $E_t=E/50$.

Figura 61 – Fator k_g para chapa com $a_0/b_0=2,0$ mm

Outra forma para determinação da carga limite de escoamento a partir de curvas de carga-deformação é pelo método de determinação da carga de escoamento de LU et al (1994).

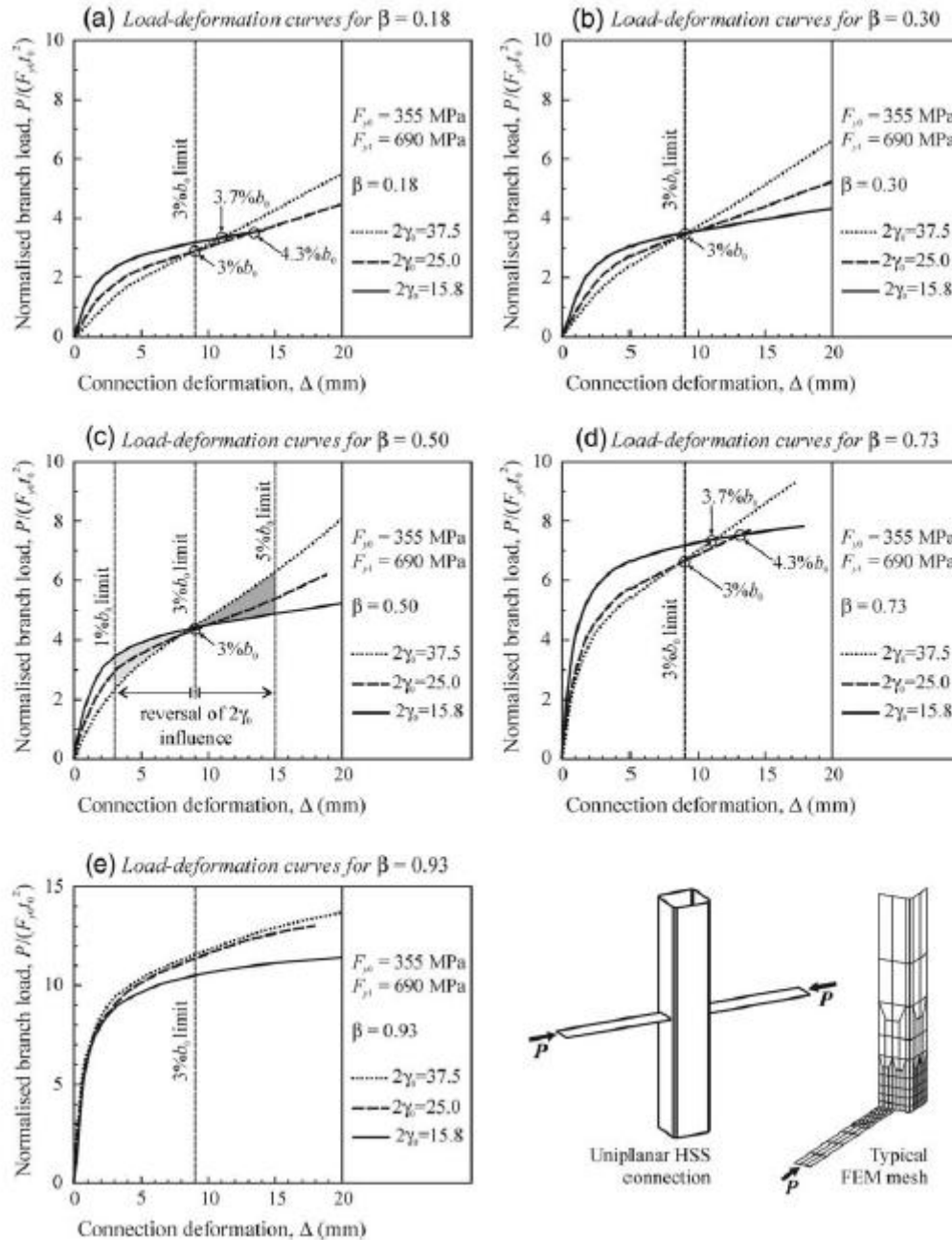


Figura 62 – FEM curvas carga-deformação para as ligações de perfis tubulares HSS com chapa de ligação transversal - adaptado de LU & WARDENIER (2003) *apud* KOSTESKI et al (2003).

ANEXO B

Tabela 12 – Resistência das ligações soldadas com esforços axiais entre perfis circulares por WARDENIER (2001).

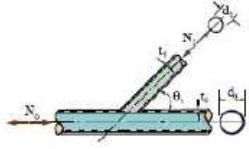
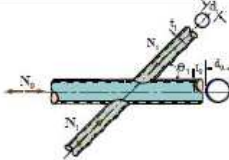
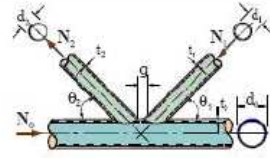
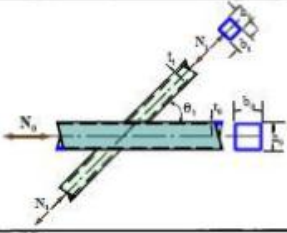
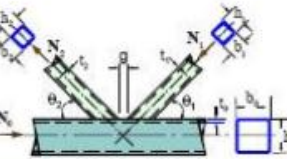
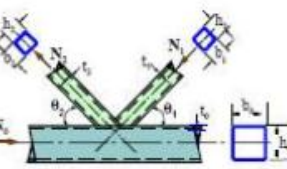
Tipo de ligação	Resistência de cálculo (i = 1,2)			
Ligações T e Y	Plastificação do banzo			
	$N_i = \frac{f_{y0} * t_0^2}{\text{sen}\theta_i} * (2.8 + 14.2\beta^2) * \gamma^{0.2} * f(n')$			
Ligações X	Plastificação do banzo			
	$N_i = \frac{f_{y0} * t_0^2}{\text{sen}\theta_i} * \left[\frac{5.2}{1 - 0.81\beta} \right] * f(n')$			
Ligações K e N afastadas e sobrepostas	Plastificação do banzo			
	$N_1 = \frac{f_{y0} * t_0^2}{\text{sen}\theta_1} * \left(1.8 + 10.2 \frac{d_1}{d_0} \right) * f(\gamma, g') * f(n')$ $N_2 = \frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2}$			
Geral	Punção			
Checar punção para as ligações T, Y, X e K, N, KT com afastamento	$N_i = \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} * t_0 * \pi * d_i * \frac{1 + \text{sen}\theta_i}{2\text{sen}\theta_i}$			
Funções				
Tração: $f(n') = 1.0$ para $n' \geq 0$ $n' = \frac{f_{op}}{f_{y0}}$ compressão: $f(n') = 1 + 0.3n' - 0.3n'^2$ para $n' < 0$	$f(\gamma, g') = \gamma^{0.2} \left[1 + \frac{0.024\gamma^{1.2}}{\exp(0.5g' - 1.33) + 1} \right]$			
Intervalo de validade				
$0.2 < \frac{d_i}{d_0} \leq 1.0$	$\frac{d_i}{2t_i} \leq 25$	$30^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ$ $-0.55 \leq \frac{e}{d_0} < 0.25$	$\gamma \leq 25$ $\gamma \leq 20 (X)$	$O_v \geq 25\%$ $g \geq t_1 + t_2$

Tabela 13 – Resistência das ligações soldadas com esforços axiais entre perfis quadrados por WARDENIER (2001).

type of joints	factored joint resistance (i = 1,2)	
T-, Y- and X-joints	$\beta \leq 0.85$	basis: chord face yielding
	$N_i^* = \frac{f_{y0} \cdot t_0^2}{(1 - \beta) \sin \theta_i} \cdot \left[\frac{2\beta}{\sin \theta_i} + 4(1 - \beta)^{0.5} \right] \cdot f(n)$	
K- and N-gap joints	$\beta \leq 1.0$	basis: chord face plastification
	$N_i^* = 8.9 \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0^2}{\sin \theta_i} \cdot \left[\frac{b_1 + b_2}{2b_0} \right] \cdot \gamma^{0.5} \cdot f(n)$ (i = 1,2)	
K- and N-overlap joints ¹	$25\% \leq O_v < 50\%$	basis: effective width
	$N_i^* = f_{yi} \cdot t_i \cdot \left[\left(\frac{O_v}{50} \right) (2h_i - 4t_i) + b_e + b_{e(ov)} \right]$	
	$50\% \leq O_v < 80\%$	basis: effective width
	$N_i^* = f_{yi} \cdot t_i [2h_i - 4t_i + b_e + b_{e(ov)}]$	
	$O_v \geq 80\%$	basis: effective width
$N_i^* = f_{yi} \cdot t_i [2h_i - 4t_i + b_i + b_{e(ov)}]$		
circular braces	multiply formulae by $\pi/4$ and replace $b_{1,2}$ and $h_{1,2}$ by $d_{1,2}$	
functions		
$f(n) = 1.0$ for $n \geq 0$ (tension)	$f(n) = 1.3 + \frac{0.4}{\beta} \cdot n$ for $n < 0$ (compression) but ≤ 1.0	
$b_e = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot b_i$ $\leq b_i$	$b_{e(ov)} = \frac{10}{b_j/t_j} \cdot \frac{f_{yj} \cdot t_j}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot b_i$ $\leq b_i$	
Note ¹ : Effective width computations need only be done for the overlapping brace member. However the efficiency (the joint resistance divided by the full yield capacity of the brace member), of the overlapped brace member is not to be taken higher than that of the overlapping brace member.		

ANEXO C

Tabela 14 – Resumo das características do aço dos tubos V&M..

MATERIAL	CP	LE [MPa]	LR [MPa]	LE/LR	k	n	$\epsilon_{u \text{ total}}$ [%]	ϵ_{up} [%]
60,3x3,2	1	412	569	0,72	322,00	0,197	17,5	15,6
73,0x3,6	2	385	465	0,83	314,00	0,206	17,8	15,9
76,5x3,6	3	367	456	0,80	300,00	0,214	18,4	16,4
96,5x4,0	4	354	447	0,79	291,00	0,216	19,2	17,1
101,6x4,0	5	377	486	0,78	336,00	0,197	16,0	15,5

NOTAS: *k e n se referem ao ajuste da curva pela Equação de Hollomon*

$\epsilon_{u \text{ total}}$ (%) é a deformação uniforme (antes do início da estricção, isto é, na carga máxima) total (plástica + elástica)

ϵ_{up} (%) é a deformação uniforme (antes do início da estricção, isto é, na carga máxima) plástica

A seguir são apresentados os gráficos com os resultados obtidos para cada corpo de prova de acordo com a numeração da Tabela 14. Os resultados foram fornecidos pela V&M Tubes do Brasil.

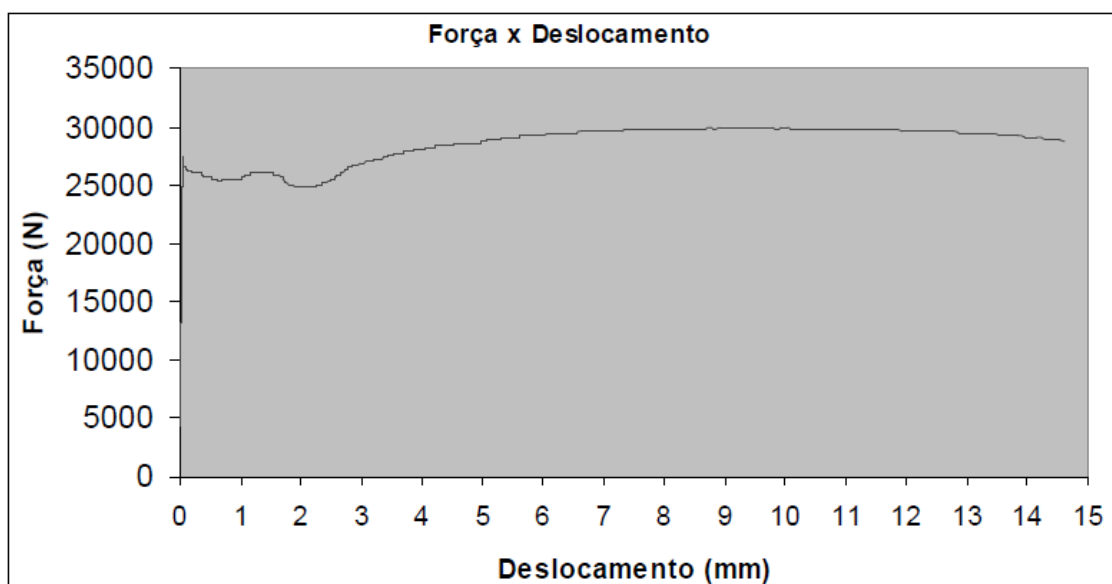


Figura 63 – Força (N) x Deslocamento (mm) - Tubo 60,3x3,2

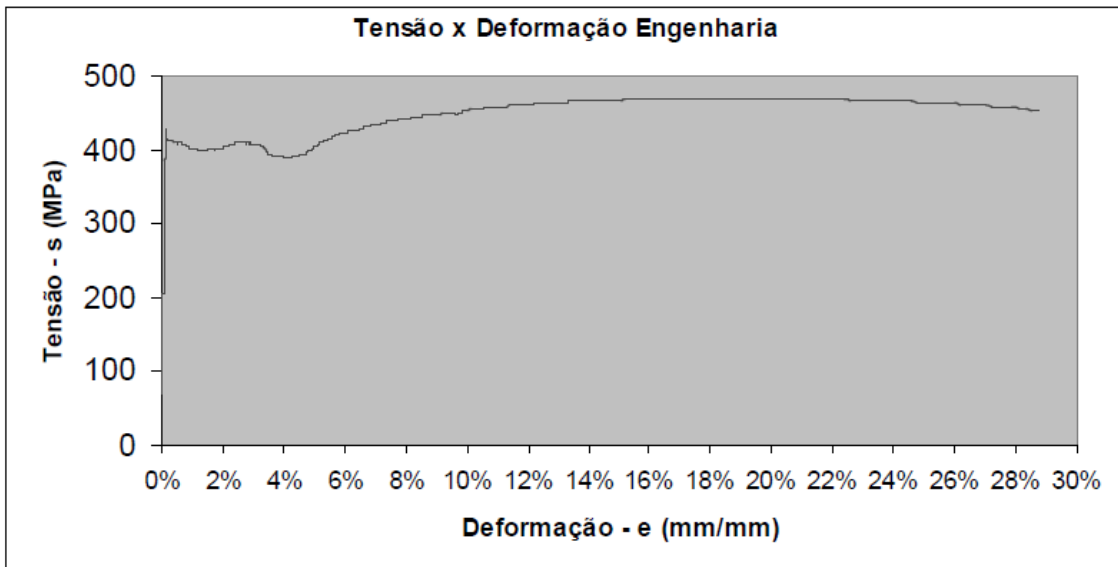


Figura 64 – Tensão (MPa) x Deformação (mm/mm) - Tubo 60,3x3,2

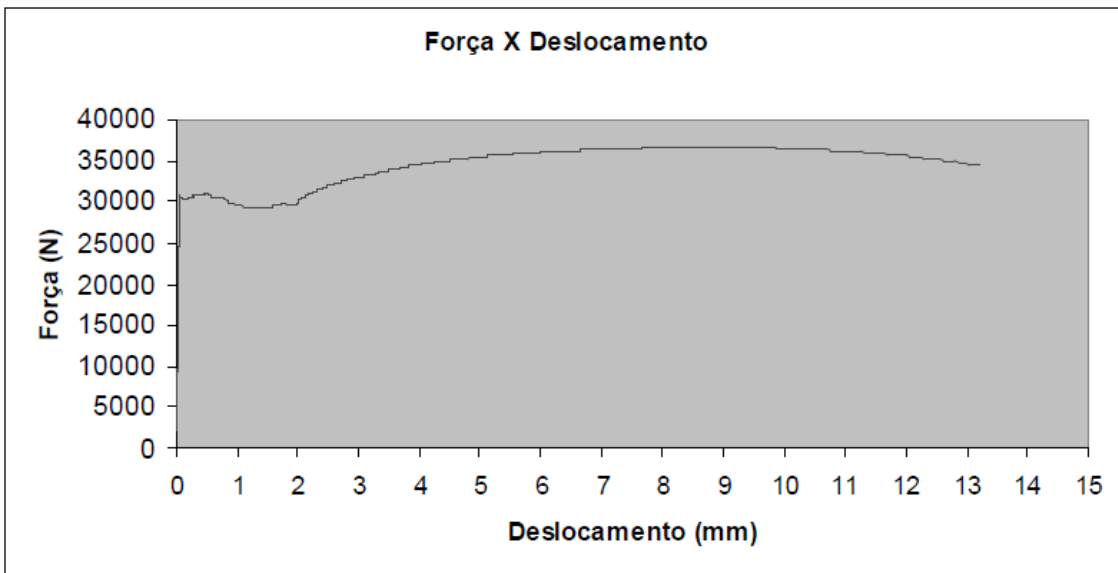


Figura 65 – Força (N) x Deslocamento (mm) - Tubo 73,0x3,6

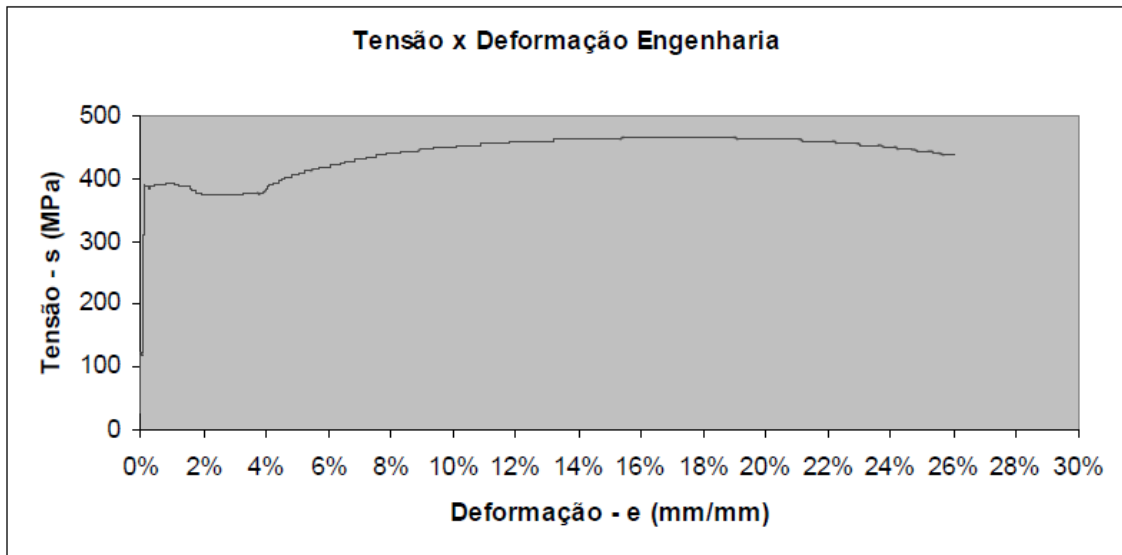


Figura 66 – Tensão (MPa) x Deformação (mm/mm) - Tubo 73,0x3,6

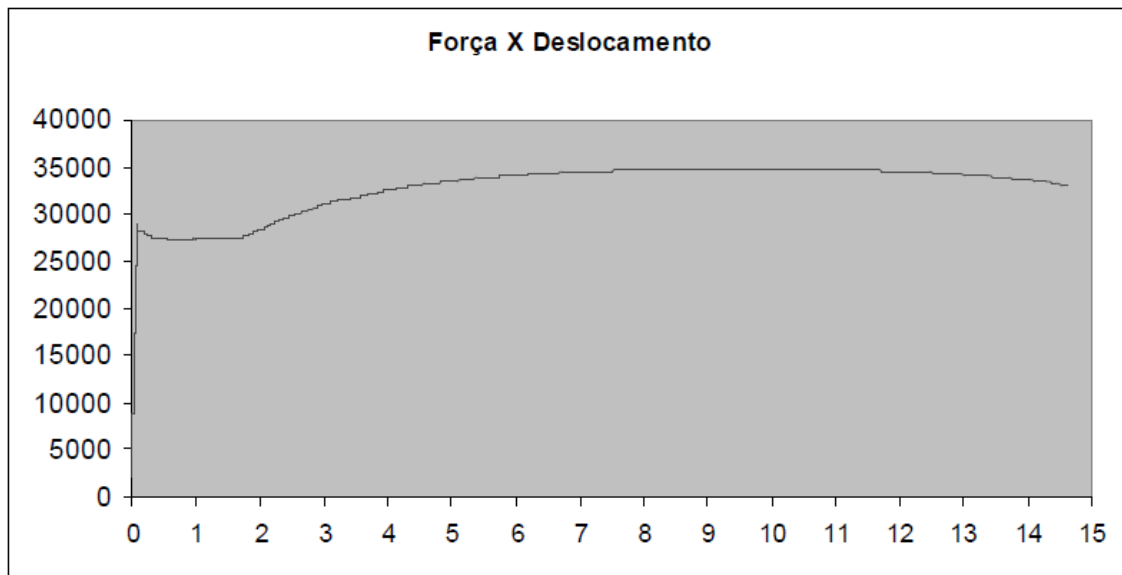


Figura 67 – Força (N) x Deslocamento (mm) - Tubo 76,5x3,6

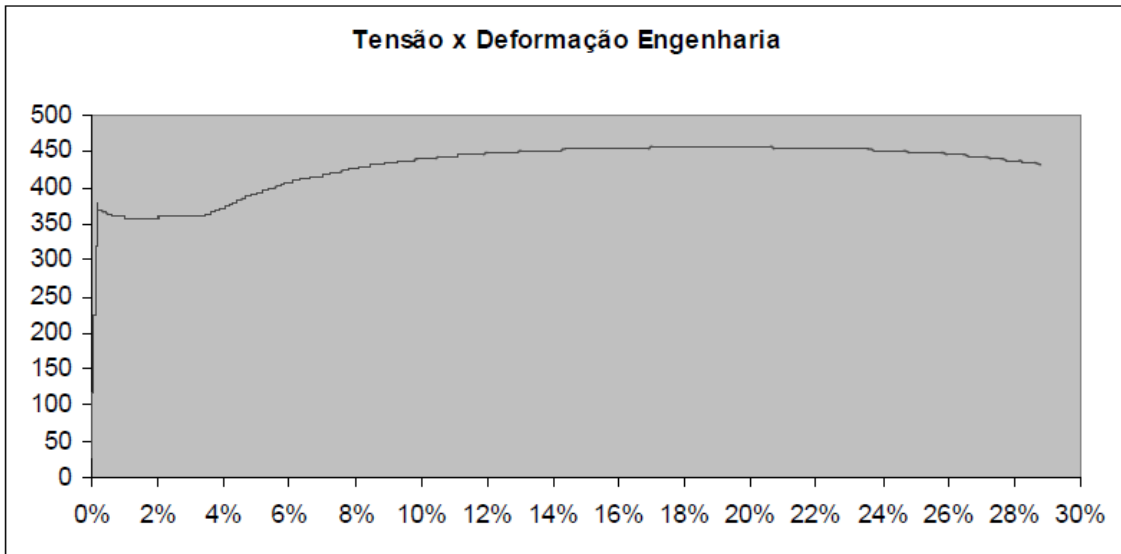


Figura 68 – Tensão (MPa) x Deformação (mm/mm) - Tubo 76,5x3,6

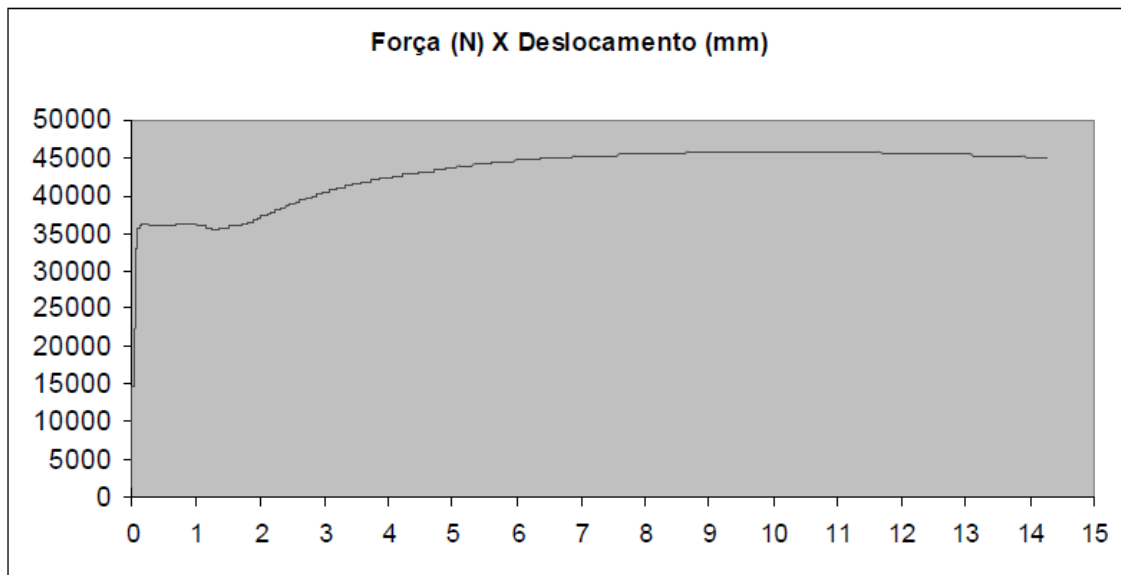


Figura 69 – Força (N) x Deslocamento (mm) - Tubo 96,5x4,0

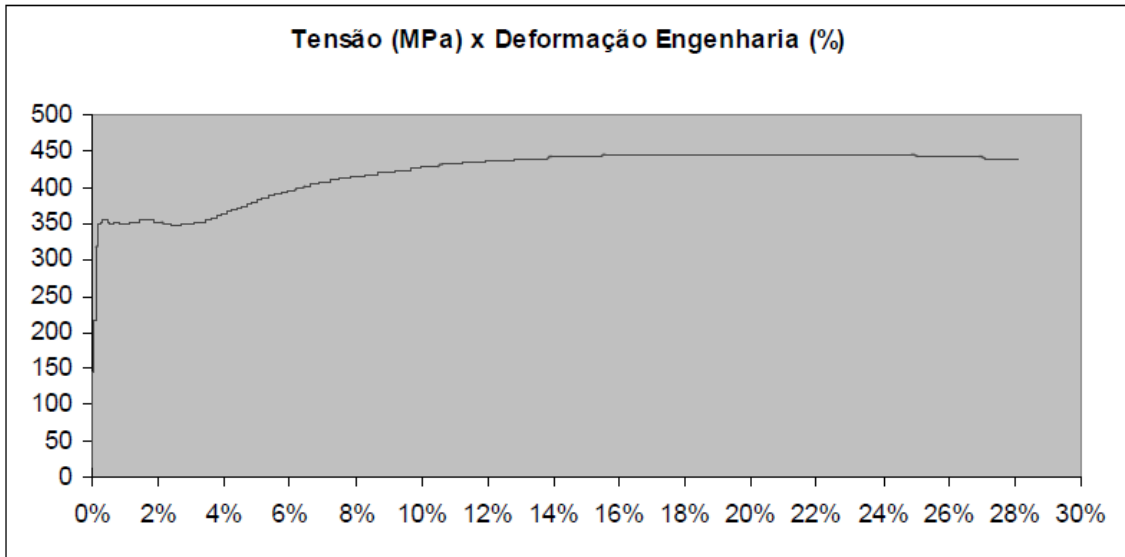


Figura 70 – Tensão (MPa) x Deformação (mm/mm) - Tubo 96,5x4,0

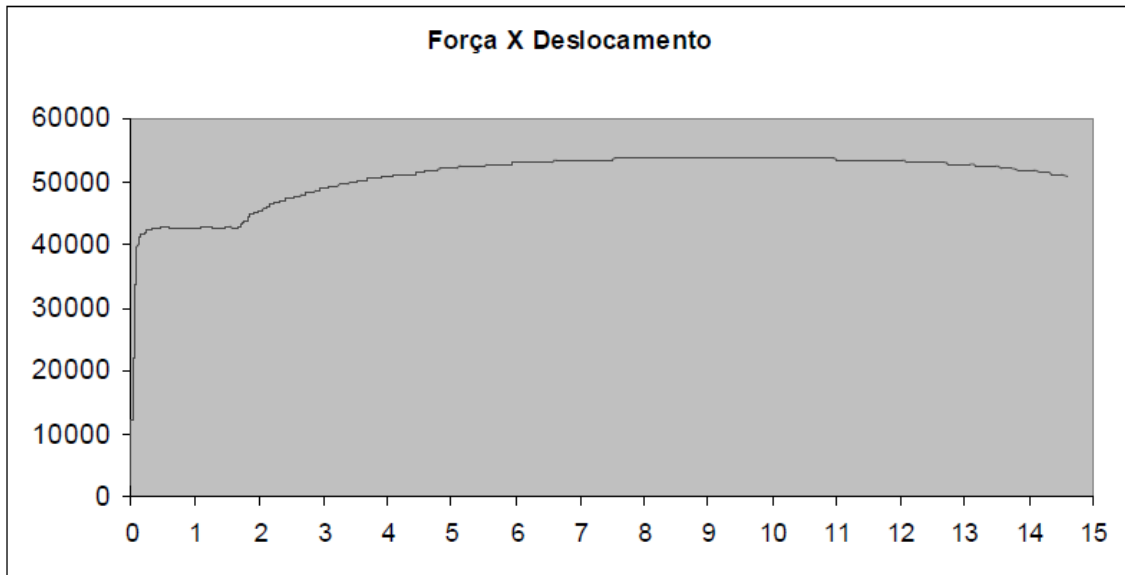


Figura 71 – Força (N) x Deslocamento (mm) - Tubo 101,6x4,0

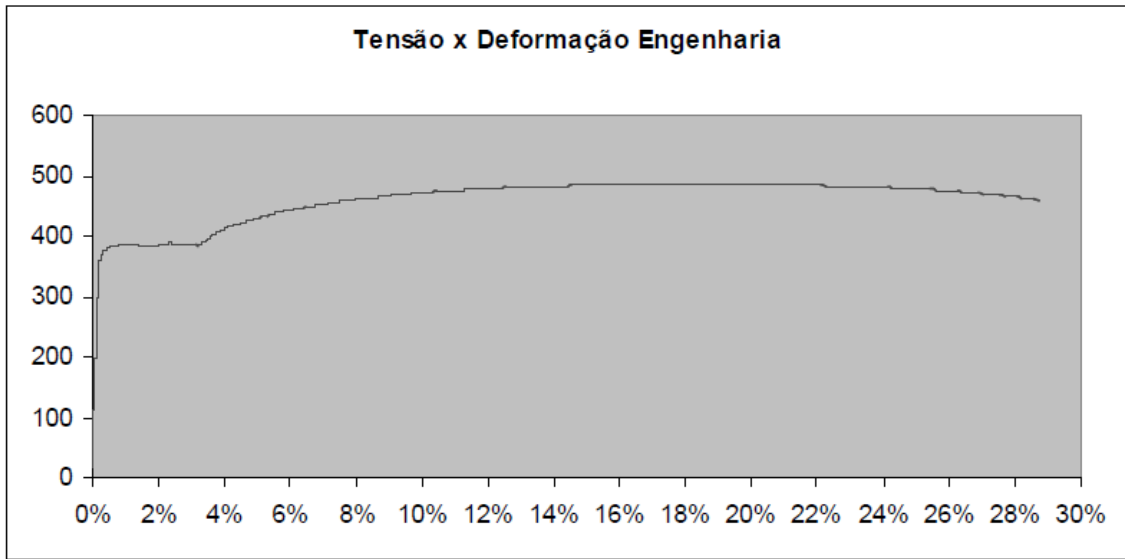


Figura 72 – Tensão (MPa) x Deformação (mm/mm) - Tubo 101,6x4,0