



Projeto Final de Graduação em Engenharia Civil

Avaliação Estrutural de Ligações “T” em Perfis Tubulares Estruturais de Aço Através do Método dos Elementos Finitos

Autores: Raphael Santos da Silva

Sarah Nívea Fernandes Soares

Orientador: Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

Co-orientador: José Guilherme Santos da Silva

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Avaliação Estrutural de Ligações “T” em Perfis Tubulares Estruturais de Aço através do Método dos Elementos Finitos

Raphael Santos da Silva
Sarah Nívea Fernandes Soares

Projeto Final apresentado a Faculdade de Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Civil. Ênfase: Estruturas.

Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada

Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima, DSc – Orientador
Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

Prof. José Guilherme Santos da Silva, DSc – Co-orientador
Departamento de Engenharia Mecânica – UERJ

Prof. Pedro C. G. da S. Vellasco, PhD
Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

Profa. Ana Cristina Castro Fontenela Sieira, DSc
Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

SILVA, RAPHAEL SANTOS DA
SOARES, SARAH NÍVEA FERNANDES

Avaliação Estrutural de Ligações “T” em Perfis Tubulares Estruturais de Aço através do Método dos Elementos Finitos [Rio de Janeiro] 2008.

xxii , 3 p. 29,7 cm (FEN/UERJ, Graduação, Faculdade de Engenharia Civil - Área de Concentração: Estruturas, 2005.)

v, 3 f. : il. ; 30 cm

Projeto Final - Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UERJ

1. Introdução
2. Dimensionamento de Ligações Tubulares
3. Modelo Numérico
4. Análise Paramétrica
5. Conclusões

I. FEN/UERJ II. Título (série)

Agradecimentos

Agradeço a Deus por toda proteção, saúde e serenidade concedida durante todos esses anos e que foram fundamentais a essa vitória.

A toda a minha família em especial à minha mãe Maxima, mulher guerreira, que sempre esteve ao meu lado me incentivando e acreditando neste sonho. Obrigado por suportar todos os momentos de stress e impaciência durante minha vida acadêmica.

A todos os queridos amigos que a UERJ colocou em minha vida e que foram imprescindíveis na conquista desse objetivo. Agradeço especialmente a Laura Assunção, Alexandre Passos e Marcela Negreiros por terem sido para mim além de grandes irmãos, exemplos de força e determinação.

Agradeço a todos os meus colegas de trabalho que de alguma forma contribuíram para meu crescimento e aperfeiçoamento profissional.

A todos os professores pelo excelente trabalho realizado e por contribuírem para meu desenvolvimento profissional. E um agradecimento especial ao professor, orientador e amigo Luciano Rodrigues Ornelas de Lima, que com sua dedicação e seriedade, mostrou-se muito mais que um professor. Tornou-se orientador, e, além disso, um amigo sempre disposto a ajudar e a aconselhar, mesmo com o meu constante problema em conciliar os horários de trabalho e faculdade. Muito obrigado por todo o apoio, dedicação e paciência.

Agradeço também a uma pessoa muito especial que entrou na minha vida na fase final dessa jornada e que nesse momento tão importante me trouxe um incrível bem estar, sendo fundamental para que tudo terminasse da melhor forma possível. Obrigado por participar deste momento e torná-lo ainda melhor.

Raphael Santos da Silva

Agradeço especialmente a Deus, por sempre me amar, proteger e iluminar meus caminhos.

Aos meus amados pais e irmã, que além de cuidarem do meu filho com todo amor e carinho, também souberam suportar as horas de estudo e dedicação, estando presentes nos momentos de glória e dificuldades em minha vida, sempre me incentivando a continuar a caminhada e acreditando na realização deste sonho.

Ao meu amado filho José Paulo Afonso, que sempre esteve do meu lado alegrando a minha vida.

A todos os amigos que fiz na UERJ - especialmente ao Anderson, André, Bruna, Felipe, Fernanda, Flávia, Laura, Lauro, Monique, Natália, e Tatiana - que estiveram presentes nos momentos de alegria e de dificuldade, sempre me auxiliando nos estudos.

Ao meu parceiro de Projeto Final, meu amado amigo e companheiro Raphael, que sempre esteve disposto a me ensinar e, principalmente, por ter sonhado junto comigo.

A todos os Mestres – especialmente ao Luiz Antônio Jóia, Eduardo Barata, Rodolfo Suanno, Denise Gerscovich e Ana Sieira – por sempre me auxiliarem a evoluir pessoal e profissionalmente. Agradeço simplesmente por serem meus queridos amigos.

Em especial ao meu orientador, Luciano Rodrigues Ornelas de Lima, que foi um grande professor e amigo, mostrando-se muito dedicado à profissão, sempre disposto a ajudar, mesmo com meus horários apertados.

Sarah Nívea Fernandes Soares

Resumo

Silva, Raphael Santos da; Soares, Sarah Nívea Fernandes; Lima, Luciano Rodrigues Ornelas de (Orientador). **Avaliação Estrutural de Ligações “T” em Perfis Tubulares Estruturais de Aço através do Método dos Elementos Finitos**. Rio de Janeiro, 2007. 3p. Projeto Final da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Atualmente, os perfis tubulares contam com uma industrializada produção com alto grau de desenvolvimento tecnológico, principalmente na América do Norte e em países asiáticos e europeus. No Brasil, a utilização desses tipos de perfis tem crescido muito nos últimos anos devido à fabricação destes por empresas existentes no mercado brasileiro. Porém, as normas brasileiras ainda não contemplam seu dimensionamento no que tange as ligações de perfis tubulares. Dentro desta perspectiva, o presente projeto apresenta um trabalho de pesquisa acerca do comportamento estrutural de ligações soldadas do tipo “T” entre perfis tubulares quadrados. Desenvolveu-se um modelo numérico através do Método dos Elementos Finitos baseado no programa Ansys 10.0 contemplando uma análise não-linear geométrica e do material. O modelo desenvolvido possibilitou investigar a formulação proposta pelo Eurocode 3 comparando com o critério de deformação limite, proposto por Zhao (1991) e Lu et al (1994). Desenvolveu-se ainda, um estudo complementar para investigar a influência da solda na ligação e uma análise paramétrica com intuito de verificar a influência do parâmetro beta no comportamento da ligação.

Palavras-chave

Estrutura de Aço; Perfis Tubulares Estruturais, Ligações Soldadas; Eurocode 3; Método dos Elementos Finitos; Análise Paramétrica.

Abstract

Silva, Raphael Santos da; Soares, Sarah Nívea Fernandes; Lima, Luciano Rodrigues Ornelas de (Advisor). **Structural Evaluation of the Connections “T” in the Hollow Structural Section Based on Finites Elements Method**. Rio de Janeiro, 2007. 3p. Projeto Final da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Nowadays, the hollow structural sections have an industrialized production, with high grade of development technology, mainly in the North America, in Asian and in European. In Brazil, the application of this profile kind, i.e., the hollow sections, has increased in the last years due to fabrication of these sections by V&M – Vallourec & Mannesmann. However, the Brazilian design codes are not able yet to consider the evaluation of the hollow structural sections connections behaviour. About this aspect, the present work presents a numerical study about the structural behaviour of “T” connections between square hollow structural sections. It was developed a numerical model based on Finite Element Method using Ansys 10 software. In this model, the geometric and material non-linearities were considered. The developed model was used to evaluate the formulation proposed by Eurocode 3 and after this, the results were compared with the limit deformation rule cited by Zhao (1991) e Lu et al (1994). Finally, it was developed a complementary study for evaluate the connection weld influence and also a parametric analysis in order to evaluate the influence of the beta parameter (ratio between brace width and chord width) in the connection behaviour.

Key-words

Steel Structural; Hollow Structural Sections; Connection Welded; Eurocode 3; Finites Elements Methods; Parametric Analysis.

Sumário

1. Introdução	13
1.1. Considerações Gerais	13
1.2. Objetivos	16
1.3. Escopo do Trabalho.....	16
2. Dimensionamento de Ligações Tubulares	18
2.1. Introdução	18
2.2. Recomendações do Eurocode 3.....	18
2.3. Parâmetros Geométricos.....	20
2.4. Dimensionamento de uma Treliça.....	21
2.4.1. Dimensionamento das peças tracionadas	22
2.4.1.1. Banzo	22
2.4.1.2. Montante.....	22
2.4.2. Dimensionamento das peças comprimidas	22
2.4.2.1. Banzo	22
2.4.2.2. Montante.....	23
2.4.3. Verificação dos parâmetros geométricos recomendados pelo Eurocode 3 [9]	24
2.4.4. Verificação dos nós de acordo com o Eurocode 3	25
3. Modelo Numérico	26
3.1. Modelo Experimental	26
3.2. Modelo Numérico Desenvolvido.....	27
3.3. Comparação entre modelo com solda x modelo sem solda	30
3.4. Análise de Resultados	31
4. Análise Paramétrica	35
5. Conclusões	38
Anexo A - Arquivo APDL	42

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Exemplo de estruturas em perfis tubulares	13
Figura 1.2 – Exemplo de estruturas em perfis tubulares.	14
Figura 2.1 - Tipos de ruína em ligações “K”	19
Figura 2.2 – Parâmetros Geométricos	20
Figura 2.3 – Treliza e detalhe da ligação “T”	21
Figura 3.1 – Esquema estrutural analisado	26
Figura 3.2 – Geometria do Elemento SHELL181.....	27
Figura 3.3 – Lei constitutiva do material	28
Figura 3.4 – Duas alternativas de malha propostas.....	28
Figura 3.5 – Curva carga x deslocamento das malhas 1, 2 e o modelo numérico do artigo.....	29
Figura 3.6 – Modelo e detalhe da solda.....	29
Figura 3.7 – Curva carga x deslocamento: perfil com solda e sem solda	31
Figura 3.8 – Esquema do ponto de aplicação da carga	31
Figura 3.9 – Evolução das tensões de <i>Von Mises</i> – parte 1.....	32
Figura 3.10 – Evolução das tensões de <i>Von Mises</i> – parte 2.....	33
Figura 3.11 – Curva carga x deslocamento	34
Figura 4.1 – Comparação da curva carga x deslocamento dos oito casos analisados.....	35
Figura 4.2 – Curvas carga x deslocamento de cada um dos oito casos analisados	36
Figura 4.3 – Curva N1RD X BETA	37

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Características dos Materiais	22
Tabela 2.2 – Cargas nos membros	22
Tabela 2.3 – Valor do fator de imperfeição α	23
Tabela 2.4 – Comparação entre perfis calculados e adotados.....	24
Tabela 2.5 – Comparação entre perfis calculados e adotados.....	25
Tabela 3.1 – Características do Projeto:	30

Lista de Símbolos

b_0	Largura do banzo
b_1	Largura do montante
h_0	Altura do banzo
h_1	Altura do montante
t_0	Espessura do banzo
t_1	Espessura do montante
θ	Ângulo entre o montante e o banzo
β	Razão entre a largura do montante e a largura do banzo
μ_1	Razão entre a largura do banzo e a espessura do montante
μ_0	Razão entre a largura do banzo e a espessura do banzo
γ	Razão entre a largura do banzo e duas vezes a espessura do banzo
$N_{1,Rd}$	Carga que provoca a plastificação da face carregada do banzo
k_n	Coefficiente. Para membros tracionados é igual a 1,0
f_{y0}	Tensão de escoamento do aço do banzo
N_r	Esforço axial solicitante
λ	Índice de esbeltez
r	Raio de giração

Lista de Abreviaturas

HSS	Hollow Structural Sections
Eurocode 3	European Committee for Standardisation
ECCS	European Convention for Constructional Steelwork
CIDECT	The International Committee for the Study and Development of Tubular Structures
AWS	American Welding Society
AISI	American Iron and Steel Institute
ISS	International Institute of Welding
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro

1. Introdução

1.1. Considerações Gerais

Seções tubulares quadradas, retangulares e circulares são os membros mais jovens da família das seções de aço, tendo sua produção industrial iniciada por volta de 1959 na Inglaterra. Muitos exemplos na natureza demonstram as excelentes propriedades de seções tubulares como elemento resistente à compressão, tração, flexão e torção.

A necessidade de solucionar problemas de projetos relacionados à versatilidade na utilização de estruturas com seções tubulares, levou a criação da maior organização internacional dos fabricantes de seções tubulares, o CIDECT (The International Committee for the Study and Development of Tubular Structures) em 1962 [1]. A idéia principal foi reunir todos os recursos disponíveis na indústria, universidades, e outros órgãos nacionais e internacionais para pesquisa e disseminação de informações técnicas, desenvolvimento de projetos, métodos matemáticos e divulgação dos resultados em pesquisas e publicações. Desde o início das atividades do CIDECT o foco principal têm sido os aspectos que envolvem os projetos de seções tubulares, incluindo comportamento estrutural, resistência estática e a fadiga das ligações, propriedades aerodinâmicas, resistência à corrosão, fabricação e manutenção dessas estruturas.



Figura 1.1 – Exemplo de estruturas em perfis tubulares

Fonte: Vallourec & Mannesman Tubes

O estudo das ligações em estruturas treliçadas que utilizam seções tubulares representa um importante papel e requer uma profunda avaliação do seu comportamento, já que estas provocam no tubo, tensões que devem ser conhecidas para que seja possível a

elaboração de projetos otimizados. As ligações desse tipo de estruturas podem ser executadas por meio de chapas de ligação ou sistemas que usam a união direta das barras secundárias na parede da seção tubular da barra principal, podendo ser aparafusadas ou soldadas. Atualmente, o processo de fabricação deste tipo de estrutura se divide em duas etapas distintas: a primeira consiste na montagem dos elementos estruturais por solda, e por existir maior necessidade de um rígido controle de qualidade, esta fase é executada ainda na indústria; a segunda etapa consiste na montagem dos elementos através de flanges aparafusados. Esta etapa permite uma maior racionalização na fabricação e na montagem das estruturas além de facilitarem o transporte, já que as peças podem ser fabricadas por trechos separados sendo unidas no campo, como mostra a Figura 1.2. O presente trabalho se propõe a tratar apenas das ligações soldadas.



**Figura 1.2 – Exemplo de estruturas em perfis tubulares.
Fonte: Vallourec & Mannesman Tubes**

No que tange as ligações, para a designação da disposição entre as barras da ligação convencionam-se a utilização de letras, tais como, ligação “K” para o encontro dos banzos com as diagonais inclinadas, “T” para o encontro entre o banzo e um montante, “N” para o encontro entre o banzo, montante e diagonal, “KT” para o encontro de cinco barras e assim por diante.

Devido à resistência das ligações serem influenciadas diretamente pelos parâmetros geométricos dos membros, um projeto otimizado pode ser obtido apenas se o projetista entender o real comportamento da ligação e considerá-lo conceitualmente no projeto. Para garantir a integridade estrutural das ligações é de vital importância que o dimensionamento dos membros construtivos bem como a configuração das ligações resulte numa capacidade adequada de deformação e rotação. É necessário executar extensivas investigações experimentais além de análises teóricas para entender e chegar a uma solução técnica confiável. Formulações e regras construtivas têm surgido destas informações técnicas obtidas por trabalhos de pesquisas teóricas e experimentais. Nos últimos 20 anos a CIDECT iniciou muitos programas de pesquisas no campo das estruturas tubulares, como por exemplo, estudos de estabilidade, proteção contra o fogo, carregamento de ventos,

composição estrutural, e comportamento das ligações sujeitas a carregamento estático e fadiga.

As vantagens estruturais de seções tubulares são aparentes para a maioria dos projetistas, particularmente para membros carregados a compressão e torção. Embora o custo unitário do material de seções tubulares seja mais alto em relação ao custo do material das seções abertas, isso pode ser facilmente compensado tirando partido das inúmeras vantagens apresentadas pelas estruturas tubulares. Muitas construções existentes executadas com esse tipo de estrutura mostram que essa concepção pode ser economicamente competitiva com as estruturas de seções abertas. Podem-se enumerar algumas das principais vantagens de se utilizar estruturas tubulares, tais como:

- a) Por serem constituídas por aço de elevada resistência, atendem desta forma a uma enorme variedade de solicitações de projeto;
- b) Resistem de maneira mais econômica a altas solicitações de torção, carga axial e efeitos combinados;
- c) Propiciam soluções leves e econômicas, face a sua elevada resistência e baixo peso próprio, propiciando, conseqüentemente, uma redução significativa nos custos, devido a uma possibilidade de execução de uma fundação mais econômica, um canteiro de obras menos obstruído, mais limpo e racionalizado;
- d) O desenvolvimento da fabricação desses tubos tem tornado este tipo de concepção mais atrativa, traduzindo um aspecto de arrojo e modernidade;
- e) A alta resistência à flambagem das barras da estrutura possibilita o uso de maiores vãos livres com significativa redução do número de pilares e diagonais com espaçamentos maiores;
- f) Visto que a construção passa a ser regida por um sistema de montagem industrial com alta precisão, elimina significativamente desperdícios oriundos de improvisações, correções e adequações, comuns nos métodos convencionais de construção, além de possibilitar orçamentos mais precisos reduzindo significativamente os prazos de construção, os custos de gerenciamento do canteiro de obras antecipando o retorno do capital;
- g) Podem ser utilizados como estruturas mistas (tubos preenchidos com concreto), ganhando resistência adicional a esforços de compressão;
- h) Possuem menor área superficial se comparadas às seções abertas, o que conduz a menores custos de pintura e proteção contra o fogo, facilitando os serviços de manutenção e minimizando seus custos.

Os principais países de primeiro mundo, como Canadá, Inglaterra, Alemanha e Holanda fazem uso intensivo dessas estruturas, contando com uma produção corrente, industrializada e contínua com alto grau de desenvolvimento tecnológico. Entretanto, no Brasil, até cerca de quatro anos atrás, o uso desses perfis na construção civil era bastante limitado, restringindo-se apenas a coberturas espaciais (Gerken, 2004) [7]. Porém, com o significativo aumento da oferta de perfis tubulares estruturais principalmente pela Vallourec & Mannesmann do Brasil (2004), a situação do mercado brasileiro começa a se alterar. Diante desta novidade tecnológica, surge também aqui no Brasil, a necessidade de divulgação e implementação do uso desses perfis em projetos de arquitetura e engenharia. Além disso, surge a necessidade de uma ampliação do número de trabalhos de pesquisa que justifique a inclusão do assunto na NBR 8800, ou então, que seja elaborada uma norma específica para o dimensionamento dessas estruturas. Com isso, os projetistas de estruturas de aço contarão com procedimentos e técnicas de análise consistentes para utilização de perfis tubulares, sobretudo no que tange às ligações, consideradas como sendo um ponto vulnerável nesse tipo de estrutura.

1.2. Objetivos

Como apresentado, a contínua difusão da utilização de perfis estruturais tubulares vem sendo uma tendência no mundo todo. Com isso, além da necessidade de se conhecer o comportamento dessas estruturas, é fundamental que seja elaborada uma norma que regule o uso dessas estruturas ou que a NBR 8800 contemple a utilização das mesmas com procedimentos e técnicas construtivas. Portanto, o presente projeto tem por objetivo desenvolver um trabalho de pesquisa da utilização dessas estruturas no que tange ao comportamento de ligações soldadas do tipo “T”, visando com isso, juntamente com outras informações técnicas e pesquisas teóricas e experimentais existentes, contribuir de alguma forma para que o assunto seja cada vez mais difundido no Brasil.

1.3. Escopo do Trabalho

No presente capítulo, foi apresentada uma introdução com uma visão do cenário do mercado internacional e nacional da utilização dos perfis estruturais tubulares.

No capítulo dois, serão abordados conceitos referentes ao dimensionamento de ligações tubulares, apresentando as principais recomendações do Eurocode 3, os parâmetros e mecanismos que governam as ligações, dando uma maior ênfase às ligações soldadas do tipo “T”.

O capítulo três apresentará o modelo numérico de uma ligação soldada do tipo “T”, bem como o modelo numérico e experimental existente na literatura técnica e que foi usado para comparação com o modelo desenvolvido neste trabalho. Apresenta-se ainda neste capítulo, um estudo de malha do modelo desenvolvido, um estudo comparativo entre o modelo considerando a utilização da solda e sem a utilização da solda e a análise dos resultados com a evolução das tensões de Von Mises.

No capítulo quatro, serão abordados conceitos referentes à influência do parâmetro beta no comportamento da ligação através de uma análise parametrizada.

O capítulo cinco apresentará a conclusão deste trabalho de pesquisa. E por último, o anexo A, apresentará o arquivo APDL do modelo desenvolvido.

2. Dimensionamento de Ligações Tubulares

2.1. Introdução

Depois do advento das seções estruturais tubulares (HSS) na Inglaterra, estudos experimentais e teóricos sobre ligações soldadas com membros quadrados e circulares foram desenvolvidos na Sheffield University. Estes estudos foram facilmente implementados no Canadá e publicados pela Stelco como o primeiro manual de ligações entre perfis estruturais tubulares. Depois disso, eles foram disponibilizados para os engenheiros americanos no guia da AISI (American Iron and Steel Institute) e em manuais desenvolvidos pela AWS (American Welding Society). Originalmente, as recomendações da AWS envolvem práticas e experiências baseadas em plataformas marítimas de aço e construções tubulares soldadas. A capacidade das ligações, entretanto, foi expressa com uma maior acurácia para tubos circulares do que para tubos quadrados ou retangulares.

Durante os anos 70 e 80 muitas pesquisas sobre ligações entre os perfis tubulares estruturais foram desenvolvidas em muitos países, mas a grande maioria foi coordenada pelos comitês técnicos da CIDECT e IIS (International Institute of Welding). Estas recomendações já têm sido parcialmente ou completamente implementadas em vários países, além de já terem sido adotadas pelo Eurocode 3 garantindo uma difundida aceitação.

Nas treliças planas ou espaciais o principal objetivo da ligação é desenvolver a resistência à tração ou à compressão necessária sem comprometer a integridade estrutural da barra a qual é ligada. Por muitos anos esta premissa foi atingida por barras tubulares soldadas, utilizadas na montagem de aeronaves e torres leves. Entretanto, em muitas destas ligações os diâmetros dos tubos eram pequenos e as paredes relativamente finas, e não havia muitas diferenças entre os diâmetros das barras que formavam a ligação.

Este trabalho apresenta o estudo de uma ligação do tipo “T” executada em treliça plana com barras de seções tubulares quadradas sob carregamentos predominantemente estáticos, submetidas a esforços axiais e ligações soldadas.

2.2. Recomendações do Eurocode 3

Packer, Rautaruukki, AISC - Hollow Structural Sections e o Eurocode 3 apresentam diferentes tipos de ruína de ligações que dependem da configuração da ligação, das condições de carregamento, e dos parâmetros geométricos, conforme ilustra a Figura 2.1:

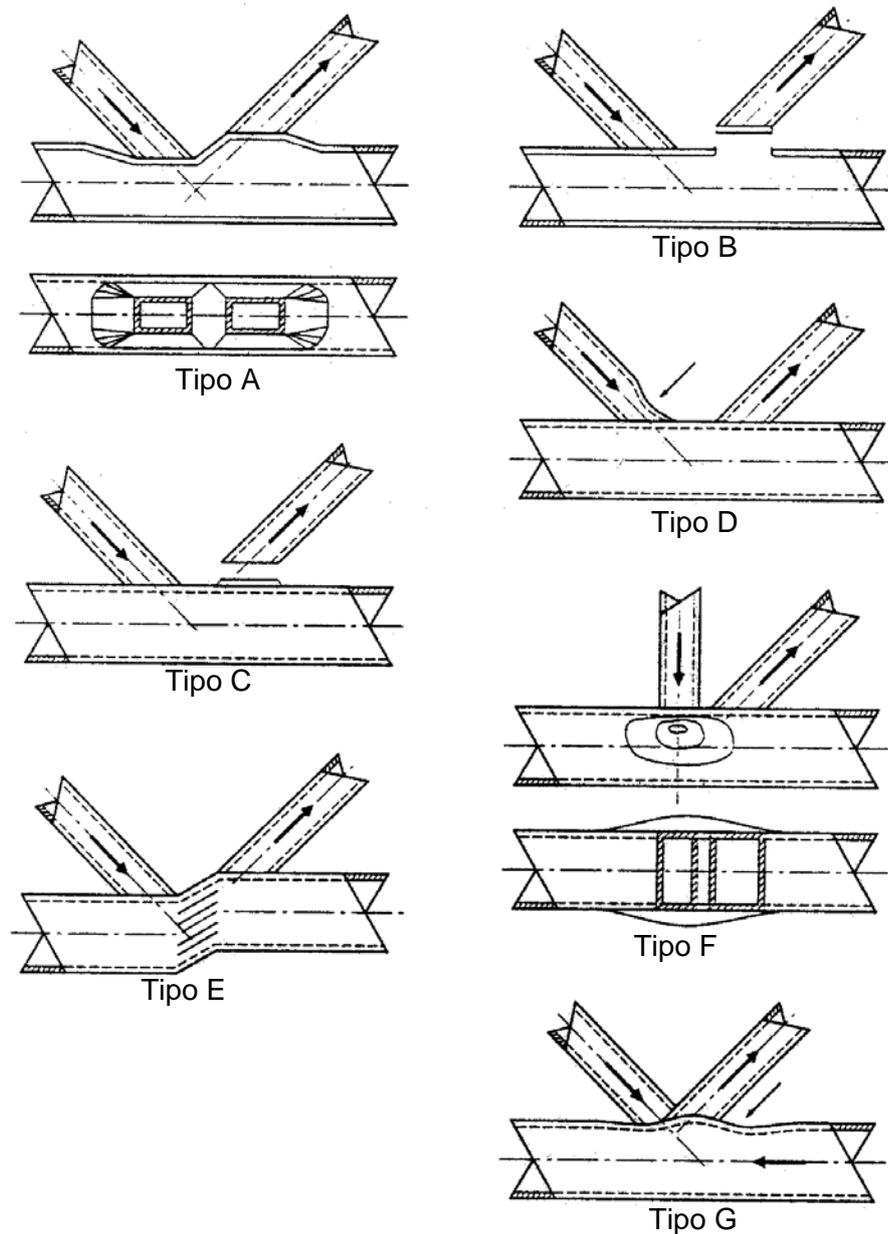


Figura 2.1 - Tipos de ruína em ligações “K”

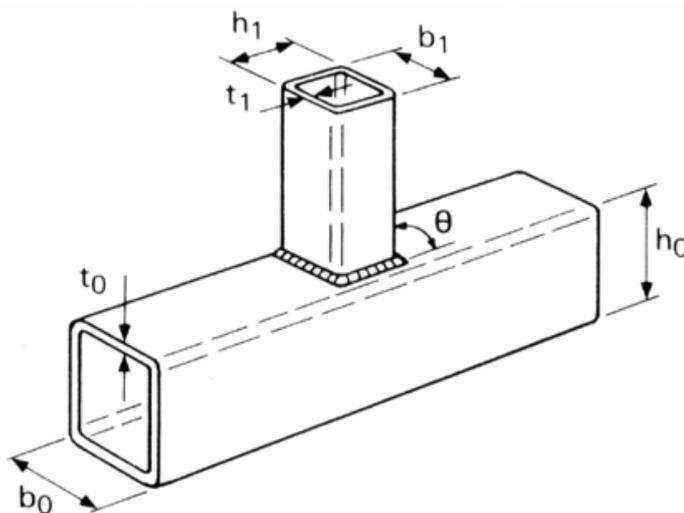
Fonte: Packer, 1997, p.70

- a) Tipo A: Plastificação da face superior do banzo (uma das diagonais empurra a face do tubo do banzo enquanto a outra puxa);
- b) Tipo B: Punçoamento da face do banzo ao redor do perímetro da diagonal (tração ou compressão);
- c) Tipo C: Ruptura por tração da diagonal ou ruptura da solda;
- d) Tipo D: Flambagem local da diagonal comprimida;
- e) Tipo E: Escoamento por cisalhamento no tubo do banzo na região de espaçamento;
- f) Tipo F: Flambagem local da parede do banzo sob o montante comprimido;
- g) Tipo G: Amassamento da parede do banzo próximo à diagonal tracionada.

2.3. Parâmetros Geométricos

Nas ligações soldadas em estruturas de perfis tubulares, para uma correta previsão da carga de ruína da face do perfil, devem ser considerados os efeitos de flexão, de cisalhamento, da punção e do comportamento de membrana. Deve-se ressaltar que as normas de projeto de ligações de perfis tubulares em aço são normalmente baseadas numa análise plástica, ou em critérios de deformações limites.

Os mecanismos plásticos consideram a formação de linhas de ruptura segundo diferentes formatos, podendo ser lineares, retangulares, circulares ou uma combinação destes. Packer et al. (1993) avaliaram três formas diferentes de mecanismos, mas os melhores resultados foram obtidos considerando mecanismos de linhas retas com um parâmetro de otimização associado.



$$\beta = \frac{b_1}{b_0} \quad (2.1)$$

$$\mu_1 = \frac{b_0}{t_1} \quad (2.2)$$

$$\mu_0 = \frac{b_0}{t_0} \quad (2.3)$$

$$\gamma = \frac{b_0}{2t_0} \quad (2.4)$$

Figura 2.2 – Parâmetros Geométricos

Para a ligação do tipo “T” abordada neste trabalho, o Eurocode 3 recomenda que sejam considerados os critérios de ruína do perfil tubular através dos mecanismos a, b, d, e ou f conforme apresentado na Figura 2.1, respeitando os seguintes limites de validade:

$0,25 \leq \beta \leq 0,85$, $\mu_1 \leq 35$ e $\mu_0 \leq 35$. O estado limite que controla o dimensionamento é a plastificação da face carregada do banzo obtida através da eq. (2.5) a seguir cujos parâmetros geométricos estão definidos na Figura 2.2. Vale ressaltar que N_{1Rd} representa a carga a ser aplicada no montante que provoca a plastificação da face carregada do banzo e que esta equação somente é válida para valores de $\beta \leq 0,85$ (Eurocode 3, 2003).

$$N_{1,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1-\beta) \text{sen}\theta_1} \left(\frac{2\beta}{\text{sen}\theta_1} + 4\sqrt{1-\beta} \right) \quad (2.5)$$

onde k_n é igual a 1,0 para membros submetidos a tração, f_{y0} é a tensão de escoamento do aço do banzo, t_0 é a espessura do perfil do banzo, β é a razão entre a largura do montante e largura do banzo e θ_1 é o ângulo entre o montante e o banzo.

A equação (2.6) foi proposta por Packer et al. (1992) e é válida para valores de $\beta = 1,00$. Nesta condição, o estado limite que controla a ruína da ligação é a plastificação da parede do lateral do banzo. Para valores de β entre 0,85 e 1,00, sugere-se que seja feita uma interpolação linear.

$$N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} t_0}{\text{sen}\theta_1} \left(\frac{2h_1}{\text{sen}\theta_1} + 10t_0 \right) \quad (2.6)$$

onde h_1 é a altura do perfil do montante (Figura 2.2).

2.4. Dimensionamento de uma Treliça

O dimensionamento apresentado a seguir, refere-se à estrutura treliçada da passarela elevada que liga os blocos 2 e 5 do edifício do Hospital Pediátrico de Coimbra [5].



Figura 2.3 – Treliça e detalhe da ligação “T”

A passarela é formada por duas treliças planas compostas por perfis tubulares de seção quadrada ligadas entre si por perfis laminados H ao nível do piso e da cobertura. A esses níveis existem lajes de concreto armado de 20 cm de espessura (inferior) e 15 cm (superior) apoiadas nos perfis H entre treliças. As treliças são simplesmente apoiadas nas suas extremidades, através de consoles curtos nos pilares dos edifícios que a passarela liga vencendo um vão total de 27,0 m. A Tabela 2.1 apresenta as propriedades características dos aços utilizados na treliça e a Tabela 2.2 apresenta os esforços solicitantes máximos nas barras considerados neste dimensionamento. Este trabalho apresenta apenas o

dimensionamento estrutural das barras tubulares da treliça. Maiores informações no que tange à análise estrutural desenvolvida ou quaisquer outras informações relevantes podem ser obtidas na memória memória de cálculo desenvolvida por Neves [5].

Tabela 2.1 – Características dos Materiais

	A500 NR	S275	S355
Tensão de Escoamento (MPa)	500	275	355
Módulo de Elasticidade (MPa)	200	200	200
Tensão de Escoamento de Cálculo (MPa)	435	250	323

Tabela 2.2 – Cargas nos membros

	Tração	Compressão
Carga máxima no banzo (KN)	850	760
Carga máxima no montante (KN)	127	680

2.4.1. Dimensionamento das peças tracionadas

2.4.1.1. Banzo

De acordo com a equação a seguir, tem-se que: $A = \frac{N_r}{0,9 \times f_{yd}} = \frac{850000}{0,9 \times 250} \Rightarrow A = 37,8 \text{ cm}^2$.

Analisando o resultado encontrado, adotou-se um perfil de **120 x 120 x 8,8** de área igual a 38,3cm².

2.4.1.2. Montante

De acordo com a equação a seguir, tem-se que: $A = \frac{N_r}{0,9 \times f_{yd}} = \frac{127000}{0,9 \times 250} \Rightarrow A = 5,64 \text{ cm}^2$.

Analisando o resultado encontrado, adotou-se um perfil de **50 x 50 x 3,2** de área igual a 5,88cm².

2.4.2. Dimensionamento das peças comprimidas

2.4.2.1. Banzo

Adotando um $\rho = 1,0$, tem-se que: $A = \frac{N_r}{0,9 \times \rho \times f_{yd}} \Rightarrow A = \frac{760000}{0,9 \times 1,0 \times 250} \Rightarrow A = 33,8 \text{ cm}^2$.

Verificando o limite de esbeltez máximo, tem-se que: $\lambda = \frac{k \times \ell}{r} \leq 200 \Rightarrow r = \frac{4600}{200} = 23mm$,

onde k é igual a 1,0 devido à consideração de que na treliça todos os nós são rotulados e $\ell = 4,6m$ é o comprimento da barra solicitada.

Analisando os resultados, adotou-se um perfil de **150 x 150 x 6,3** com uma área de $35,8cm^2$, um momento de inércia igual a $1220cm^4$, um raio de giração igual a $58,5mm$ e um

índice de esbeltez igual $\lambda = \frac{4600}{58,5} = 78,6$. Verificando o valor de ρ , tem-se que:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \times \lambda \times \sqrt{\frac{fyd}{I}} \Rightarrow \bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \times 78,6 \times \sqrt{\frac{250}{1,22 \times 10^7}} \Rightarrow \bar{\lambda} = 0,113. \text{ Como } 0 < \bar{\lambda} = 0,113 \leq 0,20,$$

então temos que $\rho = 1,0 \Rightarrow OK$.

2.4.2.2. Montante

Adotando um $\rho = 1,0$, tem-se que: $A = \frac{680000}{0,9 \times 1,0 \times 250} \Rightarrow A = 30,2cm^2$. Verificando o limite

de esbeltez máximo, tem-se que: $\lambda = \frac{k \times \ell}{r} \leq 200 \Rightarrow r = \frac{6600}{200} = 33mm$, onde k é igual a 1,0

devido à consideração de que na treliça todos os nós são rotulados e $\ell = 6,6m$ é o comprimento da barra solicitada.

Analisando os resultados, adotou-se um perfil de **120 x 120 x 7,1** com uma área de $31,5cm^2$, um momento de inércia igual a $663cm^4$, um raio de giração igual a $45,9mm$ e um

índice de esbeltez igual $\lambda = \frac{6600}{45,9} = 143,8$. Verificando o valor de ρ , tem-se que:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \times 143,8 \times \sqrt{\frac{250}{6,63 \times 10^6}} \Rightarrow \bar{\lambda} = 0,28. \text{ Como } \bar{\lambda} = 0,28 \geq 0,20 \rightarrow \rho = 1,0 \text{ não atende.}$$

Então, para um $\bar{\lambda} > 0,20$, tem-se que $\rho = \beta - \sqrt{\beta^2 - \frac{1}{\lambda^2}}$ e $\beta = \frac{1}{2\lambda^2} \left[1 + \alpha \sqrt{\bar{\lambda}^2 - 0,04 + \bar{\lambda}^2} \right]$

onde α pode ser obtido na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Valor do fator de imperfeição α

Curva de Flambagem	a	b	c	d
Fator de imperfeição	0,158	0,281	0,384	0,572

$$\beta = \frac{1}{2 \times 0,28^2} \left[1 + 0,158 \sqrt{0,28^2 - 0,04} + 0,28^2 \right] \Rightarrow \beta = 7,08$$

$$\rho = 7,08 - \sqrt{7,08^2 - \frac{1}{0,28^2}} \Rightarrow \rho = 0,966. \text{ Portanto, } A = \frac{680000}{0,9 \times 0,966 \times 250} \Rightarrow A = 31,3 \text{ cm}^2.$$

Analisando os resultados, adotou-se o mesmo perfil de **120 x 120 x 7,1**, com as mesmas características mencionadas anteriormente.

A Tabela 2.4 apresenta um quadro comparativo entre os perfis calculados e os perfis adotados para a execução da passarela. Percebe-se, que embora os perfis necessários para garantir a estabilidade estrutural sejam mais esbeltos, por decisão do projetista foram adotados perfis de bitolas bem acima do que foi dimensionado em razão de critérios estéticos e arquitetônicos.

Tabela 2.4 – Comparação entre perfis calculados e adotados

	Membros Tracionados		Membros Comprimidos	
	Banzo	Montante	Banzo	Montante
Perfis calculados	120 x 120 x 8,8	50 x 50 x 3,2	150 x 150 x 6,3	120 x 120 x 7,1
Perfis adotados	300 x 300 x 8	260 x 260 x 6	300 x 300 x 8	260 x 260 x 6

2.4.3. Verificação dos parâmetros geométricos recomendados pelo Eurocode 3 [9]

De acordo com as recomendações do Eurocode 3, o dimensionamento dos nós, deve respeitar os seguintes limites de validade: $0,25 \leq \beta \leq 0,85$, $\mu_1 \leq 35$ e $\mu_0 \leq 35$. Portanto, para a ligação em questão, tem-se que:

$$\text{a) } \beta = \frac{b_1}{b_0} = \frac{260}{300} \Rightarrow \beta = 0,86 > \beta = 0,85, \text{ não atende ao Eurocode 3;}$$

$$\text{b) } \mu_1 = \frac{b_0}{t_1} = \frac{300}{6} \Rightarrow \mu_1 = 50 > \mu_1 = 35, \text{ não atende ao Eurocode 3;}$$

$$\text{c) } \mu_0 = \frac{b_0}{t_0} = \frac{300}{8} \Rightarrow \mu_0 = 37,5 > \mu_0 = 35, \text{ não atende ao Eurocode 3;}$$

Realizadas as verificações, observa-se a necessidade de se modificar os perfis adotados no projeto para que os limites de validade propostos pelo Eurocode 3 sejam respeitados. Assim, modificou-se o perfil do banzo que era de 300 x 300 x 8 para um de 300 x 300 x 8,8 e o da diagonal que era de 260 x 260 x 6 para um de 250 x 250 x 8,8. Com isso,, foram obtidos os seguintes novos parâmetros:

$$\text{a) } \beta = \frac{b_1}{b_0} = \frac{250}{300} \Rightarrow \beta = 0,83 \leq \beta = 0,85, \text{ atende ao Eurocode 3;}$$

$$b) \mu_1 = \frac{b_0}{t_1} = \frac{300}{8,8} \Rightarrow \mu_1 = 34,1 \leq \mu_1 = 35, \text{ atende ao Eurocode 3;}$$

$$c) \mu_0 = \frac{b_0}{t_0} = \frac{300}{8,8} \Rightarrow \mu_0 = 34,1 \leq \mu_0 = 35, \text{ atende ao Eurocode 3;}$$

Atendidas as recomendações, a Tabela 2.5 apresenta um quadro comparativo entre os perfis calculados e os perfis adotados com suas respectivas propriedades geométricas. Observa-se que as modificações na utilização dos perfis respeitam as dimensões mínimas calculadas, não representando qualquer risco a segurança da estrutura.

Tabela 2.5 – Comparação entre perfis calculados e adotados

Critério de Escolha	Membro	Dimensões	Área [cm ²]	Inércia [cm ⁴]	Raio de giração [cm]
Calculado	Banzo	150 x 150 x 6,3	35,8	1220	5,85
	Montante	120 x 120 x 7,1	31,5	663	4,59
Adotado por recomendações arquitetônicas	Banzo	300 x 300 x 8	92,8	13130	11,9
	Montante	260 x 260 x 6	63,5	6790	10,3
Adotado seguindo recomendações do Eurocode 3	Banzo	300 x 300 x 8,8	102	14310	11,9
	Montante	250 x 250 x 8,8	84,1	8110	9,82

2.4.4. Verificação dos nós de acordo com o Eurocode 3

A carga de solicitação máxima em uma das ligações “T” da treliça proposta é de $N_{\min} = -62$ KN (compressão) e $N_{\max} = 126$ kN (tração). De acordo com o Eurocode 3, a carga de plastificação da face carregada do banzo é dada por:

$$N_{1,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1 - \beta) \text{sen} \theta_1} \left(\frac{2\beta}{\text{sen} \theta_1} + 4\sqrt{1 - \beta} \right).$$

Calculando a carga de plastificação do banzo, tem-se que:

$$N_{1,Rd} = \frac{250 \times 8,8^2}{(1 - 0,83) \text{sen} 90^\circ} \left(\frac{2 \times 0,83}{\text{sen} 90^\circ} + 4\sqrt{1 - 0,83} \right) \Rightarrow N_{1,Rd} = 376,9 \text{ KN}.$$

Portanto, $N_{\max.} = 126 \text{ KN} \leq N_{1,Rd} = 376,9 \text{ KN} \Rightarrow OK$.

3. Modelo Numérico

3.1. Modelo Experimental

Para que se obtivessem parâmetros comparativos, o modelo desenvolvido no presente trabalho segue as mesmas características do modelo experimental e numérico proposto por Lie, S-T, Chiew, S-P, Lee, C-K and Yang, Z-M nos artigos “Static Strength of Cracked Square Hollow Section T Joints under Axial Loads. I: Experimental” [3] e “Static Strength of Cracked Square Hollow Section T Joints under Axial Loads. II: Numerical” [4].

No modelo experimental, para ensaiar a ligação, um sistema de carregamento e um equipamento de teste foi especialmente projetado como mostra a Figura 3.1. O equipamento consiste em dois atuadores hidráulicos que podem aplicar uma carga de aproximadamente 1000 KN e um deslocamento de 125mm. Os dois atuadores hidráulicos aplicam a carga no montante através do êmbolo fixado no mesmo por seis parafusos. O equipamento é comandado por um controlador que pode gerar cargas ou deslocamentos. Uma extremidade do banzo está apoiada sobre roletes e a outra fixada com um parafuso simulando apoios de 1º e 2º gêneros, respectivamente, apoiados no topo de um pilar de concreto de 600x600mm. O banzo e o montante são constituídos de perfis tubulares quadrados com 350 e 200 mm de lado e espessura de 15 e 12 mm, respectivamente.

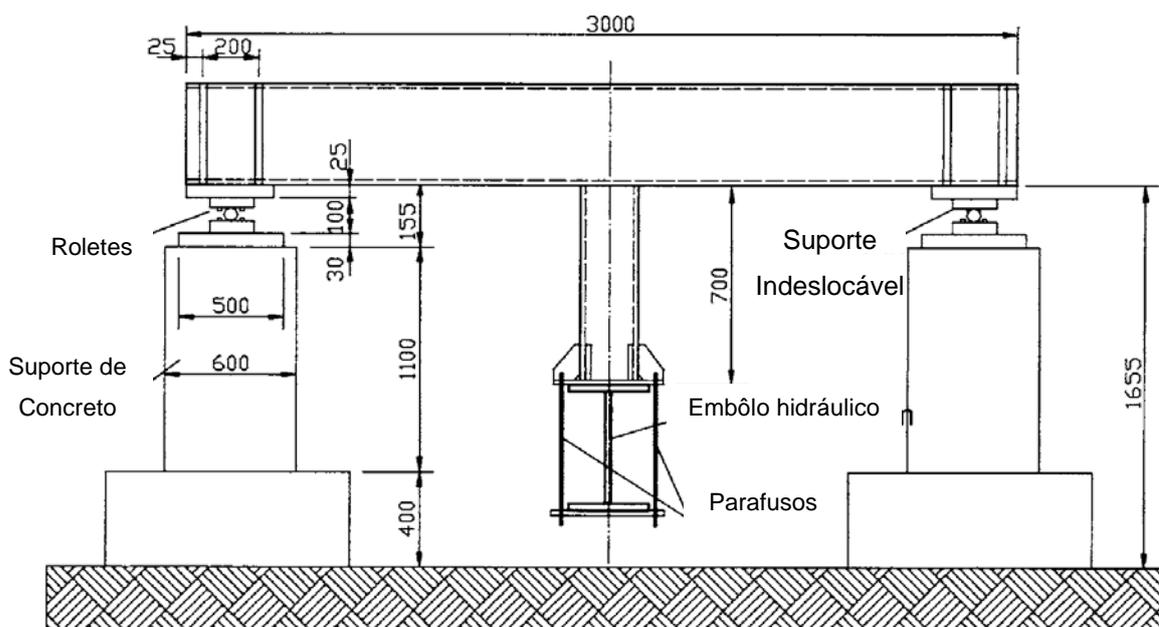


Figura 3.1 – Esquema estrutural analisado

Os perfis foram fabricados utilizando o aço estrutural BS4360-50D que apresenta tensão de escoamento de 380,3MPa. O perfil da solda foi preparado de acordo com as especificações do Código de Estruturas Soldadas da AWS, com tensão de ruptura de 600,0MPa. As extremidades do banzo foram reforçadas com enrijecedores a fim de se evitar uma possível flambagem local da parede do banzo.

Para o modelo numérico desenvolvido no artigo foram realizadas análises elástica e elasto-plástica da ligação “T” sobre carregamento axial no montante, usando o software de elementos finitos ABAQUS (2002). Todas as condições de carregamento, geometria e características do material são idênticas ao do modelo experimental. De acordo com a equação (2.5) apresentada no capítulo anterior, a resistência para esta ligação seria de 748,8KN.

3.2. Modelo Numérico Desenvolvido

O modelo desenvolvido no presente trabalho foi desenvolvido no software Ansys versão 10.0 e foi constituído de elementos de casca com quatro nós tendo seis graus de liberdade por nó, sendo, translação e rotação nos eixos X, Y e Z (SHELL181 - Ansys Manual Reference, 2003 - Figura 3.2). As leis constitutivas do material dos perfis e da solda são apresentadas na Figura 3.3. Observa-se que foi adotado um comportamento multi-linear para o perfil permitindo a consideração da não linearidade do material. Também foi considerada a não-linearidade geométrica através atualização da matriz de rigidez da estrutura a cada incremento de carga . Este tipo de análise possibilita obter uma resposta global da ligação efetuando-se uma comparação coerente entre os resultados obtidos através do Eurocode 3 e os numéricos no que diz ao estado limite último da ligação. Considerou-se também, os efeitos de flexão, cisalhamento e de membrana.

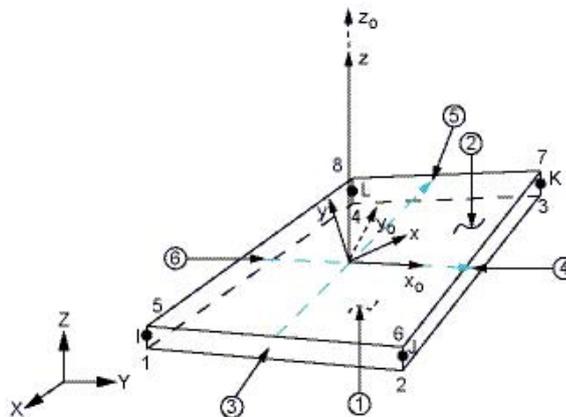


Figura 3.2 – Geometria do Elemento SHELL181.

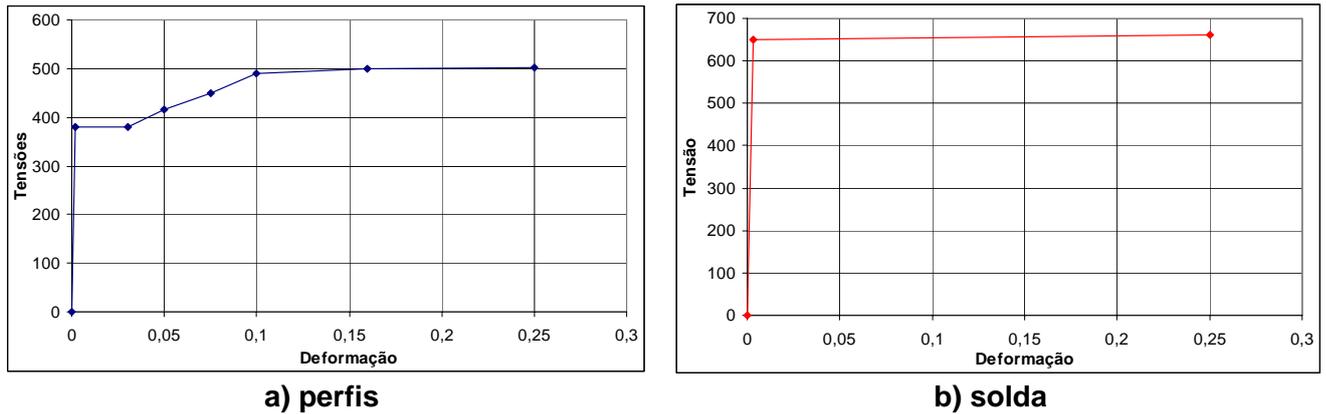


Figura 3.3 – Lei constitutiva do material

Embora a maioria dos programas comerciais de elementos finitos tenham a capacidade de gerar a malha automaticamente, a construção da malha ainda requer algumas intervenções e especial atenção por parte dos projetistas. Portanto, desenvolveu-se um estudo preliminar, onde foram utilizadas duas opções de malha (Figura 3.4) para comparação com o modelo experimental do artigo supracitado.

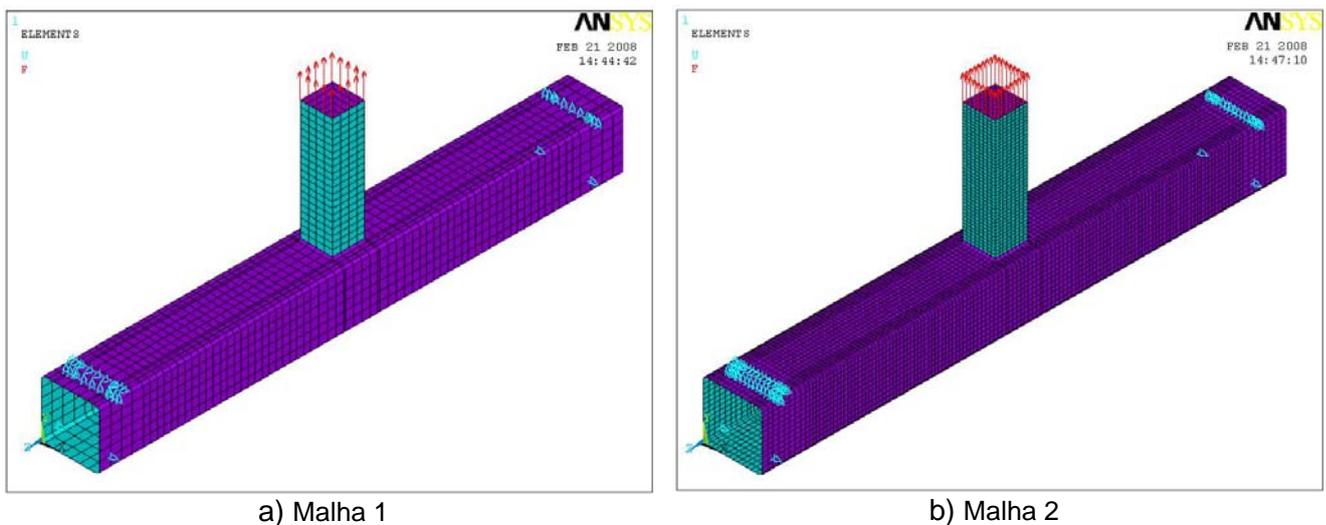


Figura 3.4 – Duas alternativas de malha propostas.

As duas malhas foram desenvolvidas cuidadosamente com a preocupação de garantir que todos os elementos tivessem uma proporção e tamanho regular, tanto entre os lados do elemento quanto de seus ângulos, evitando assim possíveis problemas na resolução das equações numéricas. A malha 1 foi constituída de 2584 elementos com 2608 nós, enquanto que a malha 2, bem mais refinada, foi composta de 9876 elementos e 9930 nós. A Figura 3.5 apresenta uma comparação entre as curvas carga x deslocamento dos modelos analisados com a malha 1, malha 2 e o modelo numérico do artigo de Lie e Chiew. Embora no regime elástico as curvas das duas malhas apresentassem um resultado bastante satisfatório comparando com a curva do artigo, adotou-se a malha 2 devido a

mesma possuir um maior refinamento o que possibilita um maior grau de acurácia. Além disso, pode-se perceber que na fase plástica, os resultados obtidos com a malha 2 aproximam-se mais dos resultados do artigo em relação aos resultados da malha 1.

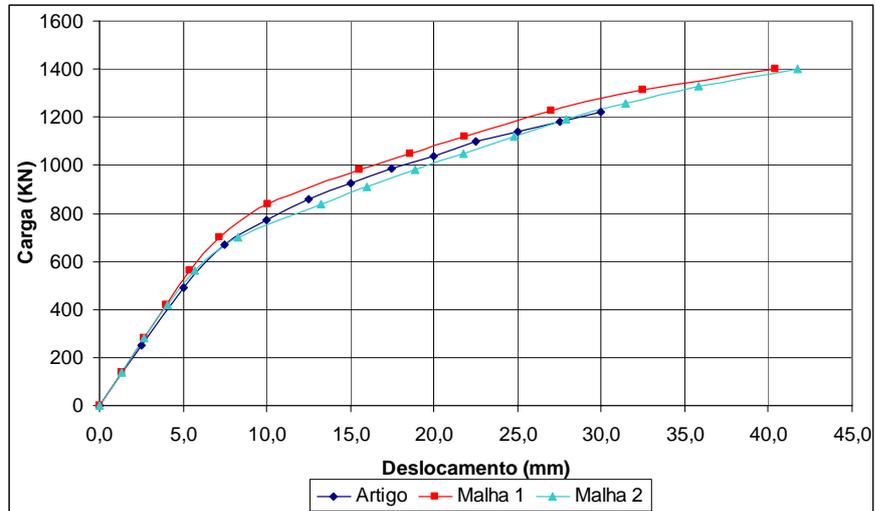


Figura 3.5 – Curva carga x deslocamento das malhas 1, 2 e o modelo numérico do artigo.

A Figura 3.6 apresenta o modelo com detalhamento esquemático da solda, as condições de contorno e o carregamento aplicado. Os dados do projeto são apresentados na Tabela 3.1.

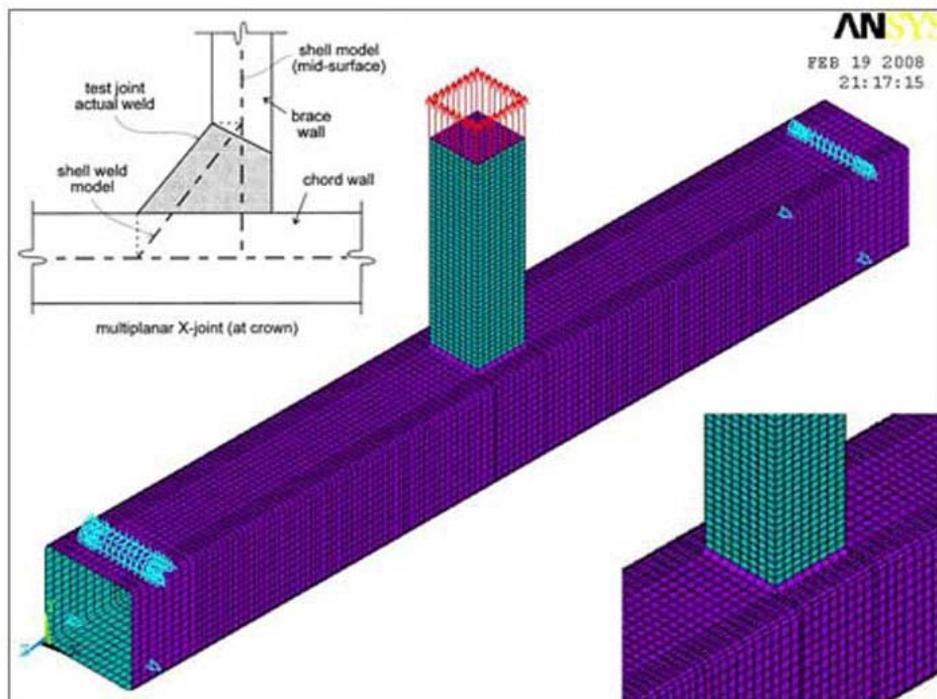


Figura 3.6 – Modelo e detalhe da solda.

Tabela 3.1 – Características do Projeto:

B0 [mm]	350	Largura do banzo
H0 [mm]	350	Altura do banzo
T0 [mm]	15	Espessura do banzo
R0 [mm]	15	Raio de concordância do banzo
L0 [mm]	3000	Tamanho do banzo
B1 [mm]	200	Largura do montante
H1 [mm]	200	Altura do montante
T1 [mm]	16	Espessura do montante
L1 [mm]	700	Tamanho do montante
TW [mm]	12	Espessura da solda
FY [KN]	1400	Carregamento
FW [MPa]	380,3	Tensão de escoamento do aço
F [MPa]	600,0	Tensão de ruptura na solda
E [GPa]	210	Módulo de Elasticidade do aço
ν	0,3	Coefficiente de Poisson

3.3. Comparação entre modelo com solda x modelo sem solda

O presente trabalho apresenta também uma comparação entre o modelo utilizando a solda e sem a utilização da solda. Conforme apresentado na curva carga x deslocamento da Figura 3.7, percebe-se que a utilização da solda confere a ligação um ganho de resistência.

Tal fato já era esperado, pois das equações básicas da Resistência dos Materiais tem-se que $\sigma = E \times \varepsilon = M / W$. Conforme apresentado na Figura 3.8, observa-se que na transferência da carga do montante ao banzo, a solda muda o ponto de aplicação da carga no banzo, gerando menores momentos e, conseqüentemente, menores deslocamentos para um mesmo carregamento.

Observa-se ainda na Figura 3.7, que na região elástica o modelo sem solda apresenta uma maior rigidez em relação ao modelo com solda, representando um comportamento divergente dos conceitos teóricos. Tal fato ocorreu tendo em vista a diferença de malha entre os dois modelos analisados.

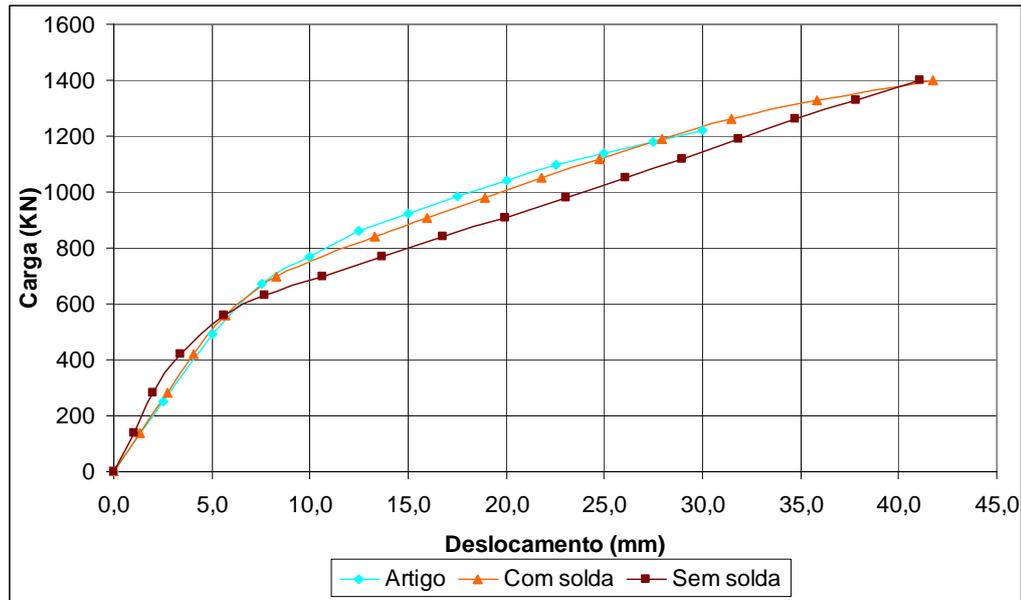


Figura 3.7 – Curva carga x deslocamento: perfil com solda e sem solda

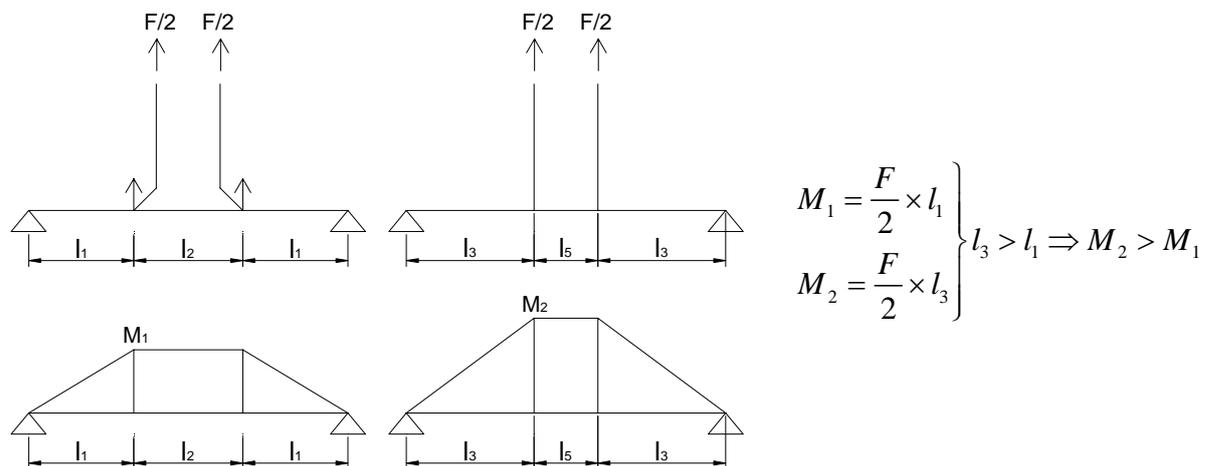
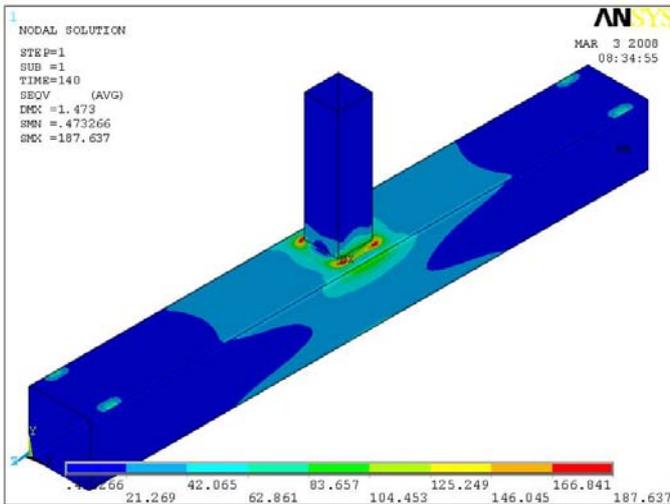


Figura 3.8 – Esquema do ponto de aplicação da carga

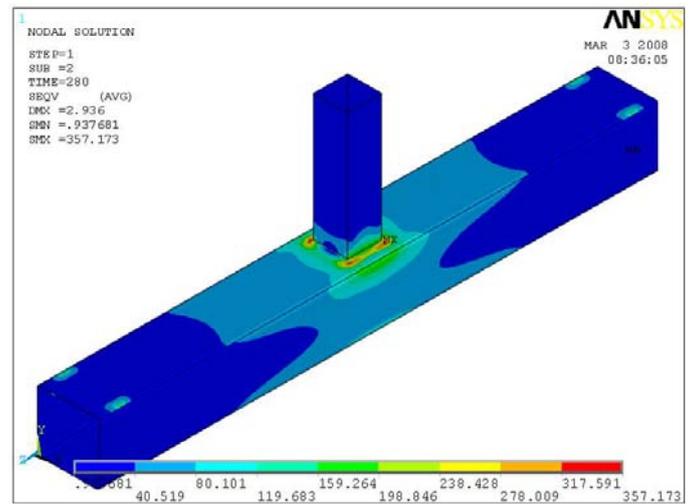
3.4. Análise de Resultados

A Figura 3.9 e a Figura 3.10 apresentam a evolução das tensões de *Von Mises* observadas no modelo numérico. Observa-se que a falha da ligação inicia no quinto incremento de carga com a aplicação de 700 KN. Nota-se que a face superior do banzo começa a plastificar, comprovando que o estado limite que controla este tipo de ligação é a plastificação da face carregada do banzo, conforme preconiza o Eurocode 3. A curva carga x deslocamento apresentada na Figura 3.11 permite comparar o resultado do modelo numérico com a formulação proposta pelo Eurocode 3 e com o método proposto por Zhao (1991) e Lu et al (1994). Este último sugere que o estado limite último da ligação está associado a uma deformação igual a 3% da largura da face do banzo, correspondendo à

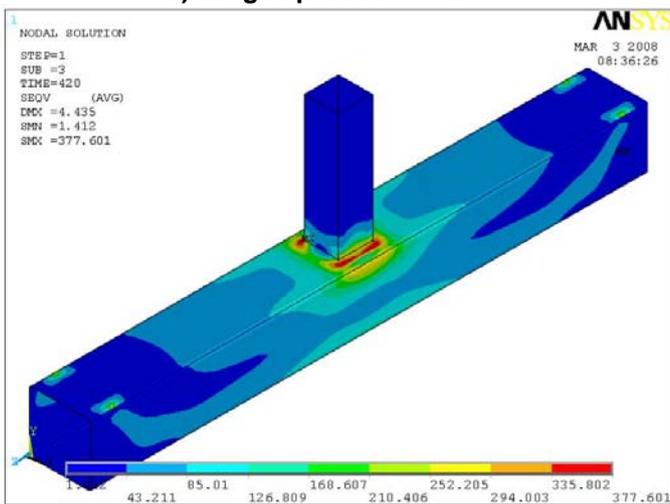
carga máxima atingida nos ensaios experimentais. Esta teoria também foi proposta e é atualmente adotada pelo Instituto Internacional de Soldagem para definir o estado limite último da ligação.



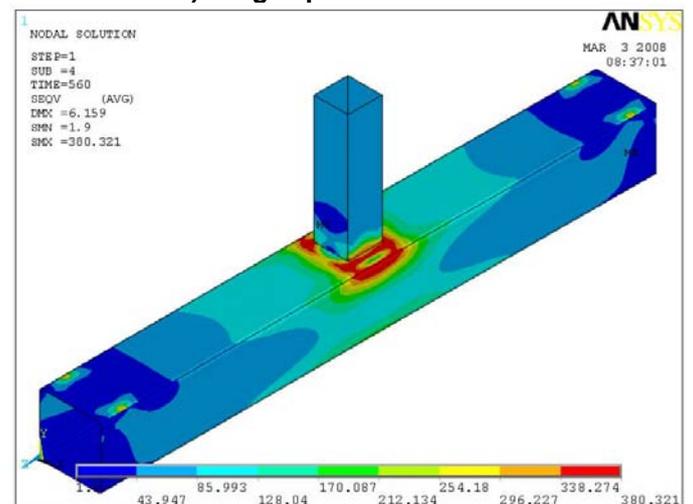
a) Carga aplicada = 140 KN



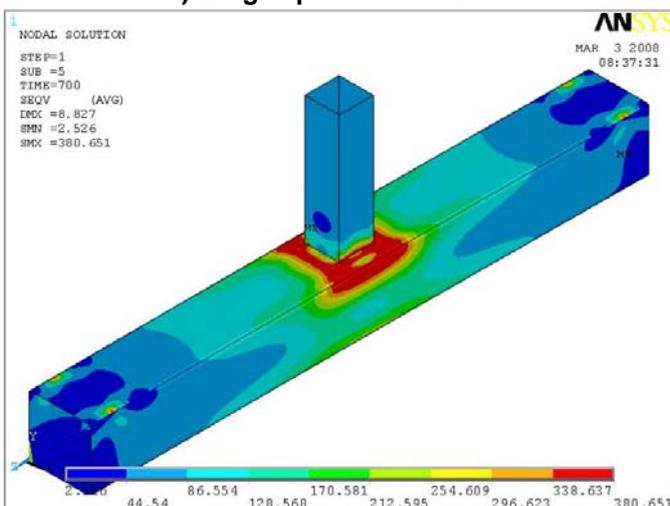
b) Carga aplicada = 280 KN



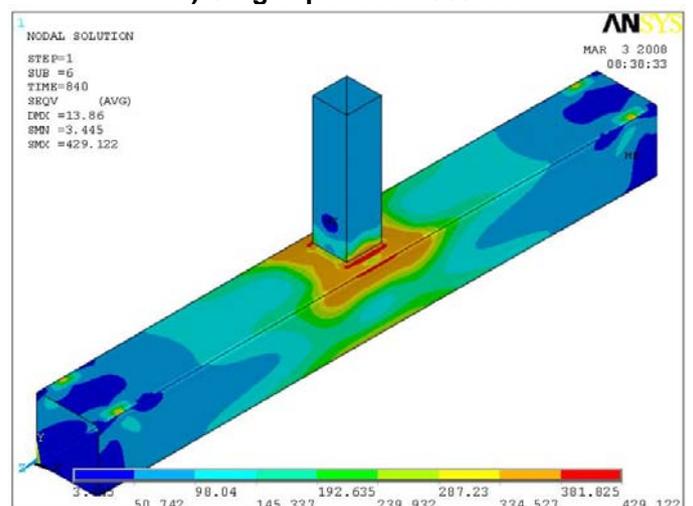
c) Carga aplicada = 420 KN



d) Carga aplicada = 560 KN

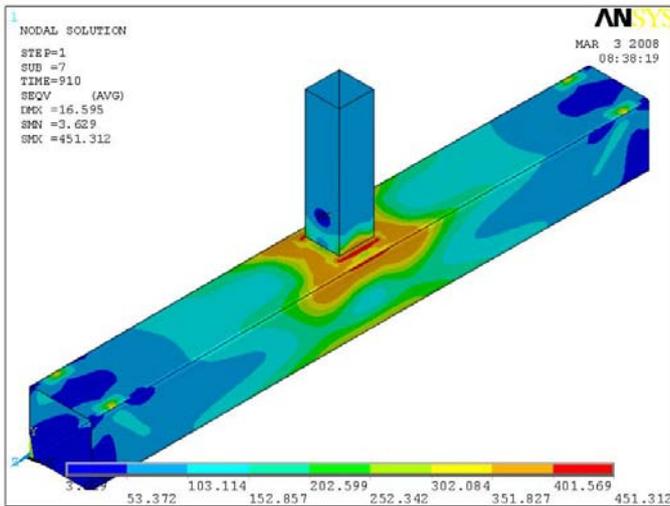


e) Carga aplicada = 700 KN

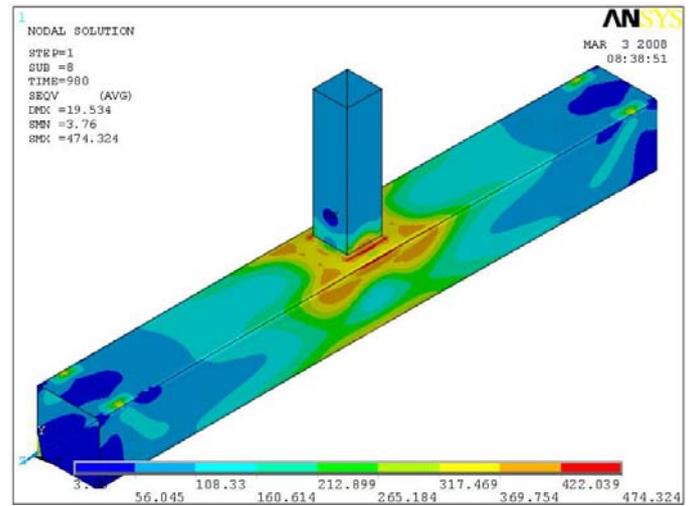


f) Carga aplicada = 840 KN

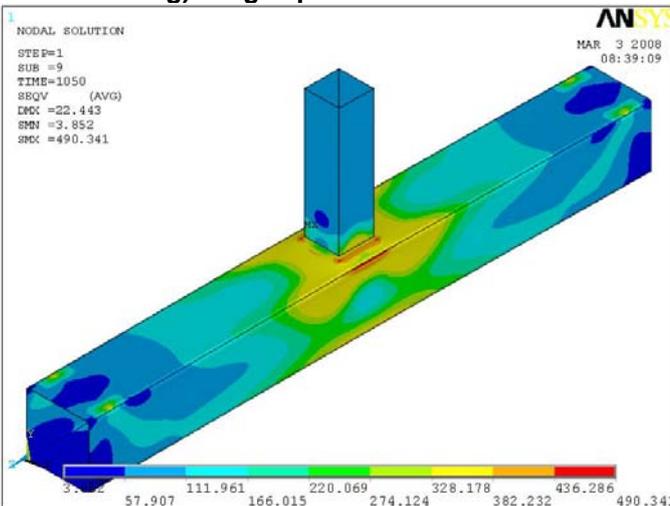
Figura 3.9 – Evolução das tensões de Von Mises – parte 1



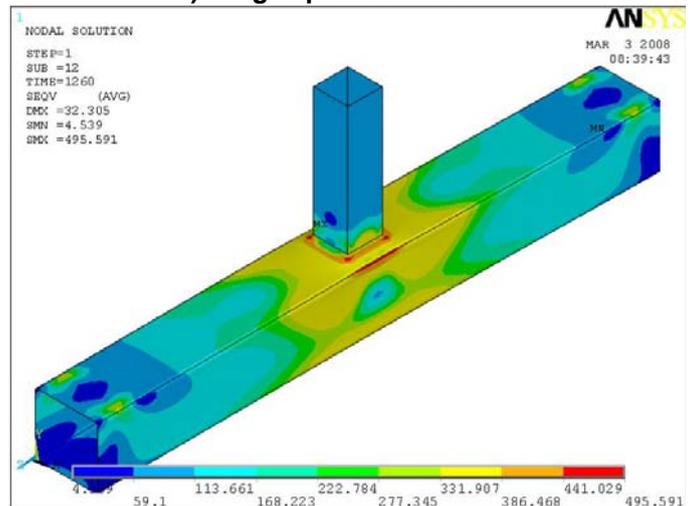
g) Carga aplicada = 910 KN



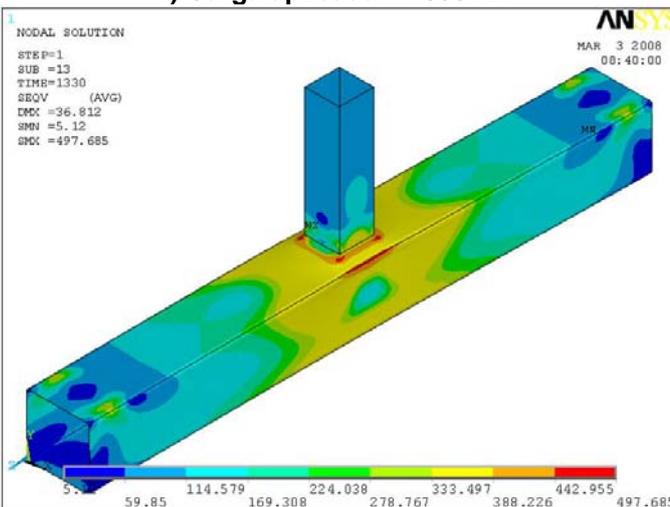
h) Carga aplicada = 980 KN



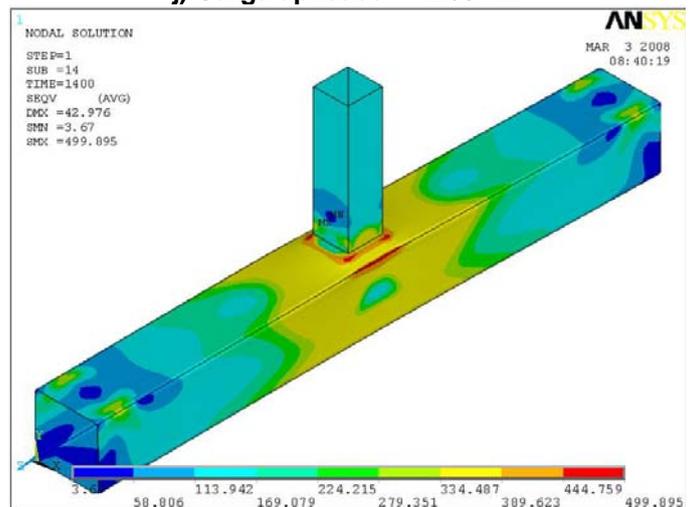
i) Carga aplicada = 1050 KN



j) Carga aplicada = 1260 KN



k) Carga aplicada = 1330 KN



l) Carga aplicada = 1400 KN

Figura 3.10 – Evolução das tensões de Von Mises – parte 2

De acordo com a equação proposta pelo Eurocode 3, tem-se que:

$$N_{1,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1-\beta) \text{sen}\theta_1} \left(\frac{2\beta}{\text{sen}\theta_1} + 4\sqrt{1-\beta} \right) \Rightarrow N_{1,Rd} = 748,81 \text{ KN} .$$

Entretanto, através da teoria do deslocamento limite proposta por Zhao (1991) e Lu et al (1994), tem-se que: 3% de $H_0 = 10,5 \text{ mm}$ e da curva carga x deslocamento, observa-se que a carga correspondente a um deslocamento de 10,5 mm é igual a 770 KN.

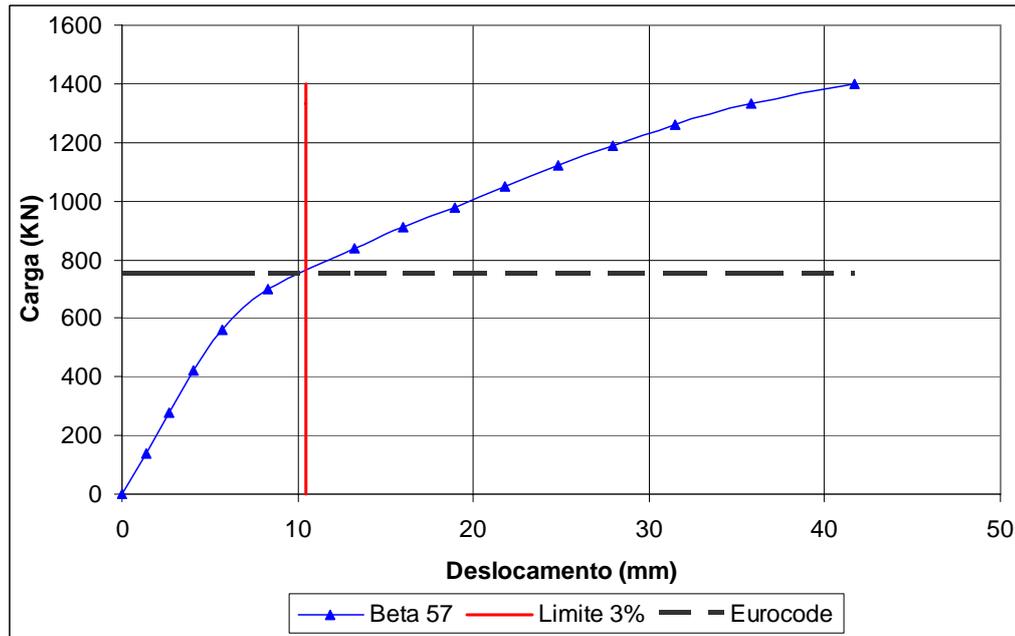


Figura 3.11 – Curva carga x deslocamento

4. Análise Paramétrica

Conforme apresentado no capítulo dois, o Eurocode 3 preconiza que a equação que fornece o valor da carga que plastifica a face carregada do banzo é válida apenas para valores de β entre 0,25 e 0,85. Objetivando avaliar a influência deste parâmetro no comportamento desta ligação, efetuou-se uma análise paramétrica a fim de que se pudesse obter o comportamento da ligação para diversos valores de β . Mantendo-se constante o perfil do banzo (350x350x15), variou-se a largura e a altura do perfil do montante de 50,25 mm até 281,00 mm, sendo possível assim obter-se valores de β de 0,15 a 0,83. Devido ao banzo possuir um raio de concordância em suas arestas e as condições geométricas da solda, não foi possível atingir um valor de β de 0,85.

A Figura 4.1 apresenta a curva carga x deslocamento dos oito casos analisados. Observa-se um ganho de resistência à medida que o valor de β aumenta. As curvas carga x deslocamento de cada um dos betas estão apresentadas na Figura 4.2, onde se pode verificar a influência deste parâmetro no comportamento global da ligação. Na mesma curva, a linha tracejada horizontal representa o critério proposto pelo Eurocode 3 (2003) e a linha vertical representa o critério da deformação limite, proposto por Zhao (1991) e Lu et al (1994).

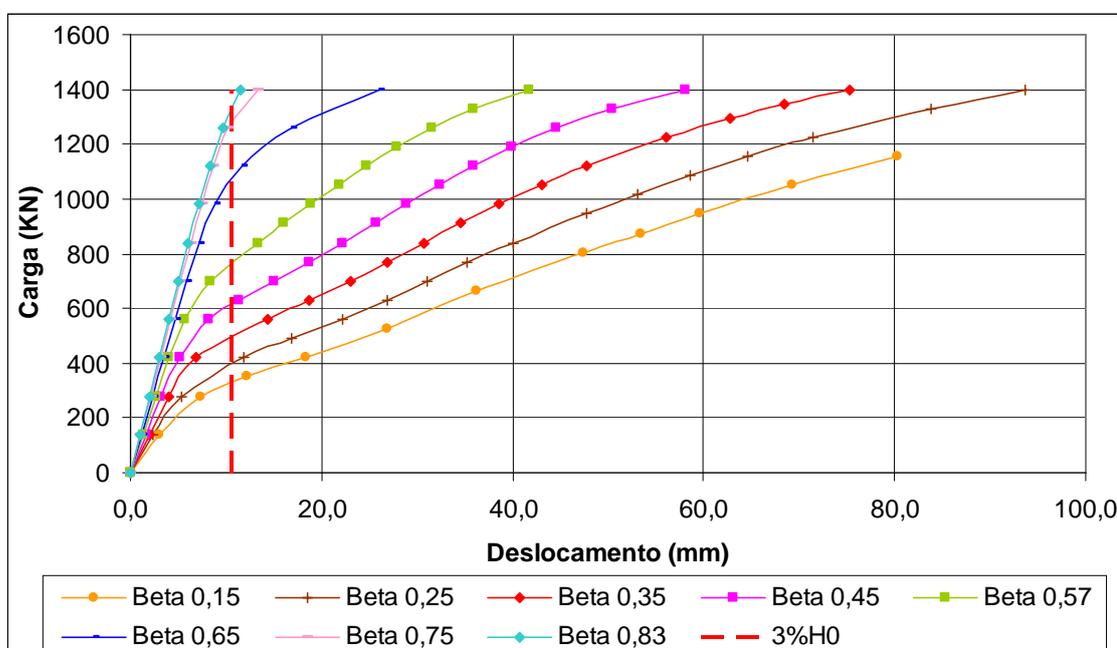


Figura 4.1 – Comparação da curva carga x deslocamento dos oito casos analisados.

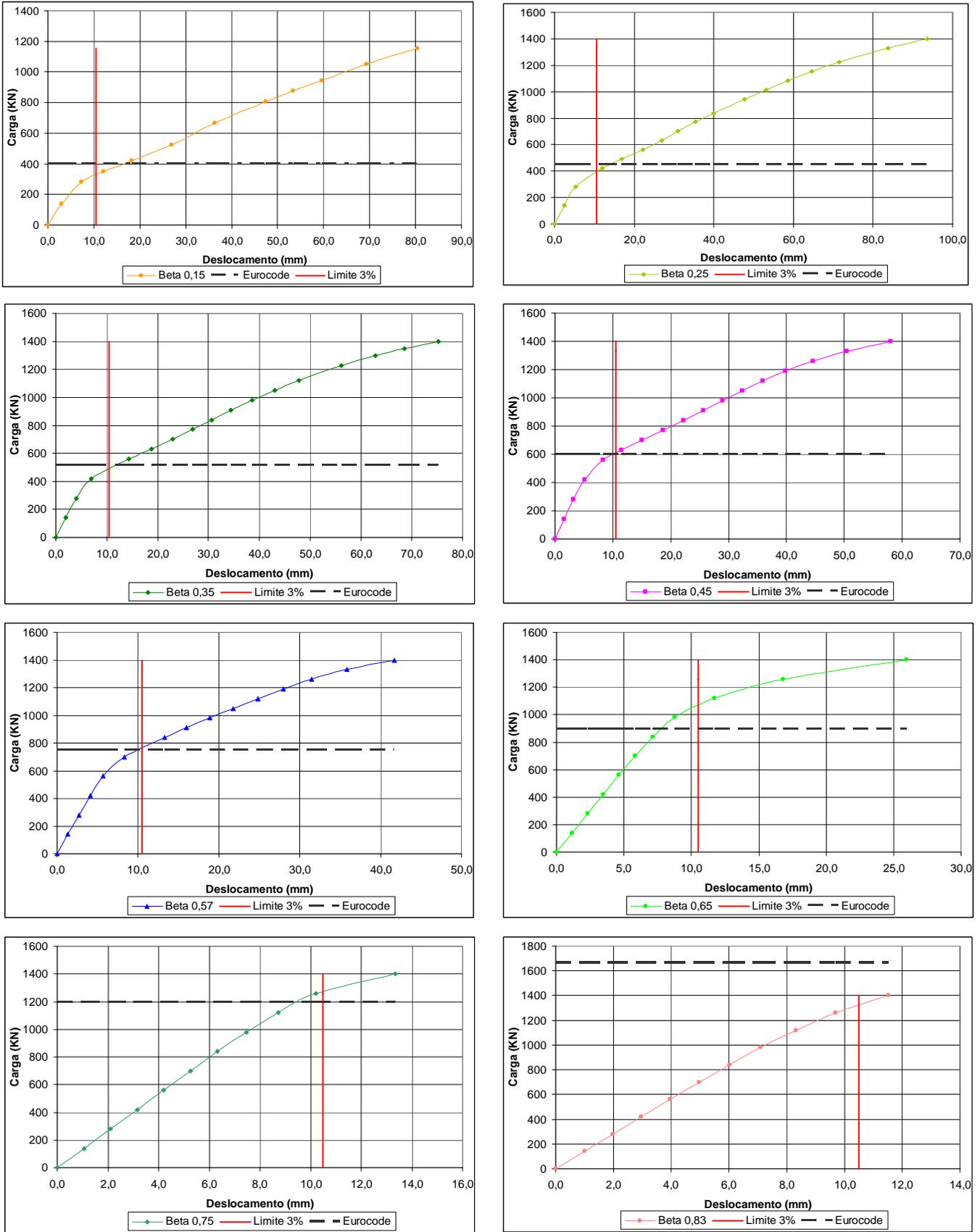


Figura 4.2 – Curvas carga x deslocamento de cada um dos oito casos analisados.

A Figura 4.3 apresenta uma comparação entre os valores obtidos de resistência das ligações estudadas para os diversos valores de β de acordo com a proposta do Eurocode 3 e pela teoria da deformação limite de Zhao (1991) e Lu et al (1994) baseada na análise numérica desenvolvida no presente trabalho.

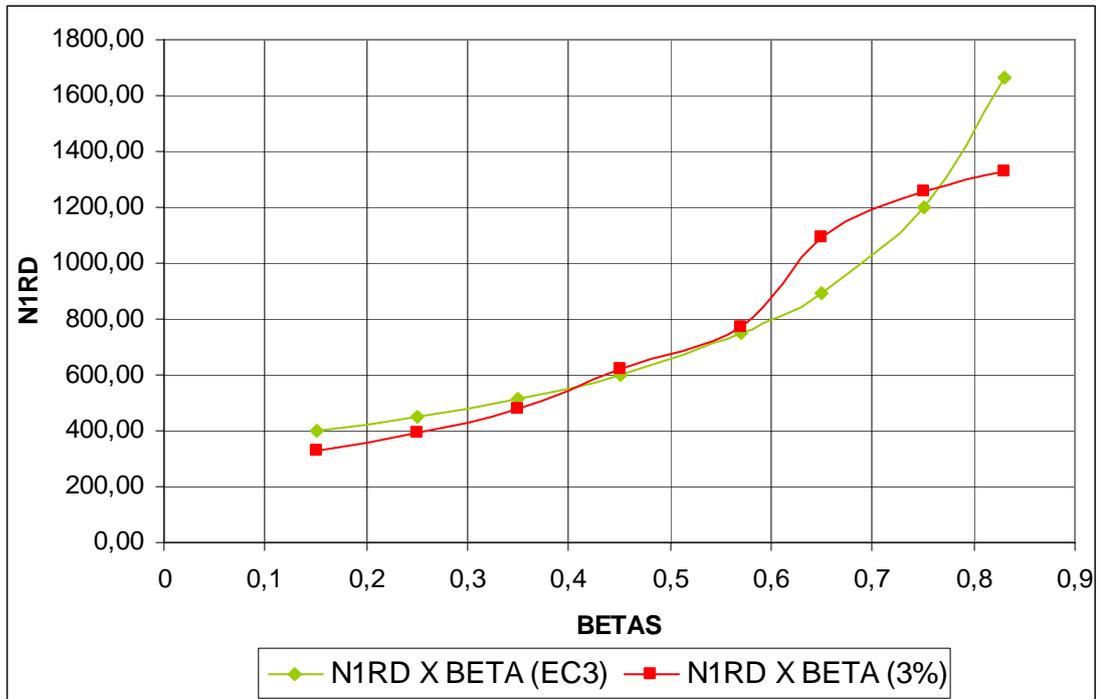


Figura 4.3 – Curva N1RD X BETA

5. Conclusões

As estruturas em perfis tubulares são largamente utilizadas na Europa, Sudeste Asiático, América do Norte e na Austrália. Países como Canadá, Inglaterra, Alemanha e Holanda fazem uso intensivo destas estruturas, contando com uma produção corrente, industrializada e contínua com alto grau de desenvolvimento tecnológico. Entretanto, no Brasil, até cerca de quatro anos atrás, o uso desses perfis na construção civil era bastante limitado, restringindo-se apenas a coberturas espaciais (Gerken, 2004).

Com o aumento da oferta destes perfis estruturais pela Vallourec & Mannesmann do Brasil (2004), o cenário do mercado brasileiro começa a se alterar. Diante desta nova tecnologia, faz-se cada vez mais necessário um trabalho de divulgação e implementação da utilização desse tipo de perfil em projetos de arquitetura e engenharia, além disso, começa a se tornar de vital importância um aumento do número de pesquisas realizadas nesta área.

As ligações soldadas de perfis tubulares são atualmente consideradas no Eurocode 3 (2003) onde são previstas ligações entre os mais diversos tipos de perfis tubulares, nomeadamente, com seções retangulares, quadradas e circulares. O Eurocode 3 relaciona ainda, os parâmetros que influenciam o comportamento das ligações e os diferentes tipos de ruína. Entretanto, a formulação proposta neste regulamento somente pode ser aplicada dentro de determinados limites consoantes a configuração geométrica das ligações.

Este trabalho apresentou um estudo numérico através do Método dos Elementos Finitos de uma ligação do tipo T entre perfis tubulares quadrados, comparando com o modelo numérico desenvolvido por Lie e Chiew. Observa-se que os resultados foram bastante satisfatórios. Atribui-se a pequena discordância encontrada entre os modelos ao fato dos modelos terem sido analisados por softwares diferentes.

Realizou-se também, um estudo comparativo entre o modelo sem e com a utilização da solda. Observando os resultados, conclui-se que a solda garante um ganho de resistência na ligação, fato este que teoricamente já era esperado. Entretanto, nota-se que na região elástica a ligação sem a solda está apresentando uma maior resistência em relação a ligação soldada, o que diverge dos conceitos teóricos.

A evolução das tensões de *Von Mises* apresenta uma comprovação do que o Eurocode 3 preconiza no que tange ao controle da ligação. Observa-se que a ruína da ligação se dá com a plastificação da face carregada do banzo. Paralelamente, este trabalho apresenta uma comparação do resultado obtido com o modelo numérico, a equação proposta pelo Eurocode 3 e a teoria da deformação limite proposta por Zhao (1991) e Lu et al (1994).

Desenvolveu-se ainda uma análise paramétrica para avaliar a influência do parâmetro β no comportamento global dessas ligações. Observando os resultados dessa análise, conclui-se que quanto maior for o valor do parâmetro β maior será a resistência da ligação. Ainda analisando os resultados da análise paramétrica, percebe-se que dentro dos limites de validade preconizados pelo Eurocode 3 os resultados da análise numérica, da equação proposta pelo Eurocode 3 e da teoria da deformação limite são bem compatíveis e satisfatórios, apesar de uma pequena divergência encontrada entre os valores. Atribui-se esta divergência ao fato de que as malhas de cada um dos modelos serem bastante diferentes, pois para garantir a regularidade na forma da malha (necessária para que o programa executasse bem a análise) foi preciso modificar a malha de cada um dos modelos especificamente. Observa-se ainda, que essas divergências começam a se tornarem consideráveis fora dos limites estabelecidos pelo Eurocode 3.

Referências Bibliográficas

- 1 Packer, J. A., Wardenier, J., Kurobane, Y., Dutta, D., and Yeomans, N, (1992). **Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading**, CIDECT 3, TÜV-Verlag GmbH, Köln, Germany.
- 2 Packer, J. A., Wardenier, J., Kurobane, Y., Dutta, D., and Yeomans, N, (1992). **Design guide for circular hollow section (CHS) joints under predominantly static loading**, CIDECT 1, TÜV-Verlag GmbH, Köln, Germany.
- 3 Lie, S T, Chiew, S P, Lee, C K and Yang, Z M. **Static Strenght of Cracked Square Hollow Section T Joints under Axial Loads I: Experimental**, Journal of Structural Engineering, 2006.
- 4 Lie, S T, Chiew, S P, Lee, C K and Yang, Z M. **Static Strenght of Cracked Square Hollow Section T Joints under Axial Loads II: Numerical**, Journal of Structural Engineering, 2006.
- 5 Neves, L. F. C. **Passarela Mista Aço-Betão: Projecto de Execução**. 2003. 46f. Hospital Pediátrico de Coimbra, Coimbra, 2003.
- 6 Packer, J.A.; Mashiri, F.R.; Zhao, X.L.; Willibald, S. **Static and fatigue design of CHS-to-RHS welded connections using a branch conversion method**, Journal of Constructional Steel Research, 2006.
- 7 Gerken, F. de S., 2005. **Projeto para estruturas em perfis tubulares**, Revista Tubo & Companhia - Ano I - Número 4.
- 8 Ansys, Inc. Theory Reference (version 10.0), 2005.
- 9 EUROCODE 3, **ENV - 1993-1-1:1992/A2, Annex J, Design of Steel Structures – Joints in Building Frames**. CEN, European Committee for Standardisation, Document CEN/TC 250/SC 3, Brussels, 1998.

- 10 EUROCODE 3, **prEN 1993-1-8, Design of steel structures – Part 1.8: Design of joints (“stage 49 draft”)**, 2003.

Anexo A - Arquivo APDL

Onde "E:" significa explicação.

```
FINISH
/CLEAR, START (E: APAGA AS INFORMAÇÕES ANTERIORES E INICIA O ARQUIVO)
/FILNAME, QUADRADOBETA57, 0 (E: NOMEIA O ARQUIVO)
/PREP7 (E: INICIA A ENTRADA DE DADOS)
/VIEW,1,1,1,1 (E: MUDA A VISUALIZAÇÃO DOS EIXOS)
/ANG,1
/REP,FAST
!*****
!DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS
!*****
DIV_0 = 1
DIV_1 = 1*2
DIV_2 = 2*2
DIV_4 = 4*2
DIV_6 = 6*2
DIV_20= 20*2
DIV_24= 24*2
TEMP=4*(DIV_4)
B0=335    !LARGURA DO BANZO - 350
H0=335    !ALTURA DO BANZO - 350
T0=15     !ESPESSURA DO BANZO - 15
R0=T0     !RAIO DA QUINA DO BANZO
L0=3000   !TAMANHO DO BANZO
B1=184    !LARGURA DO MONTANTE - 200
H1=184    !ALTURA DO MONTANTE - 200
T1=16     !ESPESSURA DO MONTANTE
L1=700    !TAMANHO DO MONTANTE
TW=12     !ESPESSURA DA SOLDA
F=1400000 !CARREGAMENTO
FY=380.3  !TENSAO DE ESCOAMENTO DO ACO
FW=600.0  !TENSAO DE RUPTURA DA SOLDA
FAPLIC= F/TEMP !FORÇA APLICADA
```

```

!*****
!DEFINIÇÃO DO TIPO DE ELEMENTO
!*****

ET,1,SHELL181

!*****

!DEFINIÇÃO DAS CONSTANTES REAIS
!*****

R,1,T0,T0,T0,T0, , ,
RMORE, , , , , ,
R,2,T1,T1,T1,T1, , ,
RMORE, , , , , ,
R,3,TW,TW,TW,TW, , ,
RMORE, , , , , ,

!*****

!DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS
!*****

!ACO

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,1,,205000
MPDATA,PRXY,1,,0.3

TB,MISO,1,1,8,0

TBTEMP,0

TBPT,,0,0

TBPT,,0.001855,380.3

TBPT,,0.030,381.0

TBPT,,0.05,415.0

TBPT,,0.075,450.0

TBPT,,0.1,490.0

TBPT,,0.16,500.0

TBPT,,0.25,501.0

!SOLDA

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,2,,205000
MPDATA,PRXY,2,,0.3

MPTEMP,,,,,,,,

```

```

MPTEMP,1,0

MPDE,EX,1

MPDE,PRXY,1

MPDATA,EX,1,,2.05E+005

MPDATA,PRXY,1,,0.3

TB,MISO,2,1,3,0

TBTEMP,0

TBPT,,0,0

TBPT,,0.0031707,650

TBPT,,0.25,660

!*****

!DEFINIÇÃO DAS KEYPOINTS

!*****

K,1,0,R0,0

K,2,R0,0,0

K,3,B0-R0,0,0

K,4,B0,R0,0

K,5,B0,H0-R0,0

K,6,B0-R0,H0,0

K,7,(B0/2)+(B1/2)+TW,H0,0

K,8,(B0/2)+(B1/2),H0,0

K,9,(B0/2)-(B1/2),H0,0

K,10,(B0/2)-(B1/2)-TW,H0,0

K,11,R0,H0,0

K,12,0,H0-R0,0

K,10000,R0,R0,0

K,10001,B0-R0,R0,0

K,10002,B0-R0,H0-R0,0

K,10003,R0,H0-R0,0

!*****

!DEFINIÇÃO DAS LINHAS

!*****

LARC,1,2,10000,R0

LSTR,2,3

LARC,3,4,10001,R0

LSTR,4,5

LARC,5,6,10002,R0

```

```

LSTR,6,7

LSTR,7,8

LSTR,8,9

LSTR,9,10

LSTR,10,11

LARC,11,12,10003,R0

LSTR,12,1

!*****

!DIVIDINDO AS LINHAS SEÇÃO TRANSVERSAL

!*****

LESIZE,1,,DIV_1

LESIZE,2,,DIV_6

LESIZE,3,,DIV_1

LESIZE,4,,DIV_6

LESIZE,5,,DIV_1

LESIZE,6,,DIV_2

LESIZE,7,,DIV_0

LESIZE,8,,DIV_4

LESIZE,9,,DIV_0

LESIZE,10,,DIV_2

LESIZE,11,,DIV_1

LESIZE,12,,DIV_6

!*****

!GERANDO OFFSET'S DAS SEÇÕES DO BANZO

!*****

LSEL,S,LOC,Z,0

LGEN,2,ALL,,,-125,,0,0

LSEL,NONE

LSEL,ALL

LSEL,S,LOC,Z,0

LGEN,2,ALL,,,-250,,0,0

LSEL,NONE

LSEL,ALL

LSEL,S,LOC,Z,0

LGEN,2,ALL,,,-((L0/2)-(B1/2)-(L0/15)),,0,0

LSEL,NONE

LSEL,ALL

```

```

LSEL,S,LOC,Z,0
LGEN,2,ALL,,,-((L0/2)-(B1/2)-TW),,0,0
LSEL,NONE
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Z,0
LGEN,2,ALL,,,-((L0/2)-(B1/2)),,0,0
LSEL,NONE
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Z,0
LGEN,2,ALL,,,-((L0/2)+(B1/2)),,0,0
LSEL,NONE
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Z,0
LGEN,2,ALL,,,-((L0/2)+(B1/2)+TW),,0,0
LSEL,NONE
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Z,0
LGEN,2,ALL,,,-((L0/2)+(B1/2)+(L0/15)),,0,0
LSEL,NONE
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Z,0
LGEN,2,ALL,,,-(L0-(250)),,0,0
LSEL,NONE
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Z,0
LGEN,2,ALL,,,-(L0-(125)),,0,0
LSEL,NONE
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Z,0
LGEN,2,ALL,,,-L0,,0,0
LSEL,NONE
LSEL,ALL
LPLOT
K,0,(B0/2)-(B1/2),H0+TW,-((L0/2)-(H1/2))
K,0,(B0/2)-(B1/2)+B1,H0+TW,-((L0/2)-(H1/2))
K,0,(B0/2)-(B1/2)+B1,H0+TW,-((L0/2)-(H1/2)+(H1))
K,0,(B0/2)-(B1/2),H0+TW,-((L0/2)-(H1/2)+(H1))

```

```

K,0,(B0/2)-(B1/2),H0+L1,-((L0/2)-(H1/2))
K,0,(B0/2)-(B1/2)+B1,H0+L1,-((L0/2)-(H1/2))
K,0,(B0/2)-(B1/2)+B1,H0+L1,-((L0/2)-(H1/2)+(H1))
K,0,(B0/2)-(B1/2),H0+L1,-((L0/2)-(H1/2)+(H1))

LPLOT

*DO,I,1,132

    LSTR,I,I+12

*ENDDO

*DO,I,145,147

    LSTR,I,I+1

*ENDDO

LSTR,148,145

*DO,I,149,151

    LSTR,I,I+1

*ENDDO

LSTR,152,149

*DO,I,145,148

    LSTR,I,I+4

*ENDDO

/REPLLOT

!*****
!DIVIDINDO AS LINHAS LONGITUDINAIS
!*****

*DO,I,145,168

    LESIZE,I,,DIV_2

*ENDDO

*DO,I,169,180

    LESIZE,I,,DIV_24

*ENDDO

*DO,I,181,192

    LESIZE,I,,DIV_4

*ENDDO

*DO,I,205,216

    LESIZE,I,,DIV_4

*ENDDO

*DO,I,229,240

    LESIZE,I,,DIV_4

```

```
*ENDDO

*DO , I , 241 , 252

    LESIZE , I , , , DIV_24

*ENDDO

*DO , I , 253 , 276

    LESIZE , I , , , DIV_2

*ENDDO

*DO , I , 277 , 284

    LESIZE , I , , , DIV_4

*ENDDO

*DO , I , 285 , 288

    LESIZE , I , , , DIV_20

*ENDDO

*DO , I , 193 , 204

    LESIZE , I , , , DIV_0

*ENDDO

*DO , I , 217 , 228

    LESIZE , I , , , DIV_0

*ENDDO

! *****

! CRIANDO AS AREAS DO BANZO

! *****

*DO , I , 1 , 11

    AL , I , I+145 , I+12 , I+144

*ENDDO

*DO , I , 13 , 23

    AL , I , I+145 , I+12 , I+144

*ENDDO

AL , 12 , 145 , 24 , 156

AL , 24 , 157 , 36 , 168

*DO , I , 25 , 35

    AL , I , I+145 , I+12 , I+144

*ENDDO

AL , 36 , 169 , 48 , 180

*DO , I , 109 , 119

    AL , I , I+145 , I+12 , I+144

*ENDDO
```

```
*DO,I,121,131
    AL,I,I+145,I+12,I+144
*ENDDO
AL,265,132,276,144
AL,253,132,264,120
*DO,I,97,107
    AL,I,I+145,I+12,I+144
*ENDDO
AL,252,120,241,108
*DO,I,37,47
    AL,I,I+145,I+12,I+144
*ENDDO
*DO,I,49,59
    AL,I,I+145,I+12,I+144
*ENDDO
*DO,I,61,71
    AL,I,I+145,I+12,I+144
*ENDDO
*DO,I,73,83
    AL,I,I+145,I+12,I+144
*ENDDO
*DO,I,85,95
    AL,I,I+145,I+12,I+144
*ENDDO
AL,48,192,60,181
AL,60,204,72,193
AL,72,216,84,205
AL,84,228,96,217
AL,96,240,108,229
!*****
!APAGANDO AS AREAS QUE DEVERAO SER REFERTAS
!*****
ADELE,90
ADELE,92
ADELE,112
ADELE,114
!*****
```

```

!CRIANDO AS LINHAS DA SOLDA
!*****

LSTR,56,146

LSTR,67,146

LSTR,56,67

LSTR,79,147

LSTR,92,147

LSTR,79,92

LSTR,93,148

LSTR,82,148

LSTR,93,82

LSTR,70,145

LSTR,57,145

LSTR,57,70

*DO,I,289,300

  LESIZE,I,,DIV_0

*ENDDO

!*****

!REFAZENDO AS AREAS DO BANZO QUE FORAM APAGADAS
!*****

AL, 55,199,291

AL,291,67,200

AL,294,91,223

AL,294,224,79

AL,297,93,226

AL,297,81,225

AL,300,202,57

AL,300,201,69

!*****

!CRIANDO AS ÁREAS DA SOLDA
!*****

AL,56,289,277,299

AL,290,211,292,278

AL,293,279,295,92

AL,298,280,214,296

AL,289,290,291

AL,292,293,294

```

```

AL,295,296,297

AL,298,299,300

!*****

!CRIANDO AS AREAS DO MONTANTE

!*****

*DO,I,277,279

    AL,I,I+8,I+4,I+9

*ENDDO

AL,280,288,284,285

!*****

!GERANDO A MALHA

!*****

REAL,1

MAT,1

*DO,I,1,136

    AMESH,I

*ENDDO

REAL,2

MAT,1

*DO,I,145,148

    AMESH,I

*ENDDO

REAL,3

MAT,2

*DO,I,137,144

    AMESH,I

*ENDDO

!*****

!DEFINIÇÃO DOS APOIOS

!*****

!(TRAVANDO DESLOCAMENTO NOS EIXOS Y E Z)

NSEL,S,LOC,Z,-125

NSEL,R,LOC,Y,H0

D,ALL,, , , ,UY,UZ, , , ,

NSEL,NONE

NSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Z,-(L0-125)

```

```

NSEL,R,LOC,Y,H0
D,ALL,, , , ,UY, , , ,
NSEL,NONE
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Z,-125 !(TRAVANDO DESLOCAMENTO NO EIXO X)
NSEL,R,LOC,Y,0
NSEL,U,LOC,X,(R0+((B0-R0-R0)/DIV_6)),(B0-R0-((B0-R0-R0)/DIV_6))
D,ALL,UX
NSEL,NONE
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Z,-(L0-125)
NSEL,R,LOC,Y,0
NSEL,U,LOC,X,(R0+((B0-R0-R0)/DIV_6)),(B0-R0-((B0-R0-R0)/DIV_6))
D,ALL,UX
NSEL,NONE
NSEL,ALL
!*****
!APLICAÇÃO DO CARREGAMENTO
!*****
NSEL,S,LOC,Y,H0+L1
F,ALL,FY,FAPLIC
NSEL,NONE
NSEL,ALL
!*****
!PARÂMETROS DA ANÁLISE NAO-LINEAR
!*****
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,10,20,10
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1
AUTOTS,1
TIME,F/1000
/SOLU
SAVE
SOLVE
SAVE

```