

Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas
Departamento Engenharia Civil
Programa de Pós - Graduação em Engenharia Civil

ANÁLISE TEÓRICO - EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES TUBULARES TIPO LUVA

Janaína Maria da Silva

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Construções Metálicas.

Orientadores: Prof^a. Dr^a. Arlene Maria Sarmanho Freitas
Prof. Dr. Marcílio Sousa da Rocha Freitas

Ouro Preto, Agosto de 2012

S586a Silva, Janaína Maria da.
Análise teórico-experimental de ligações tubulares tipo luva [manuscrito]
/ Janaína Maria da Silva - 2012.

xiii, 81f.: il. color.; graf.; tabs.

Orientadores: Profª Drª Arlene Maria Sarmanho Freitas.
Prof. Dr. Marcílio Sousa da Rocha Freitas.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Área de concentração: Construção Metálica.

1. Estruturas metálicas - Teses. 2. Ligações metálicas -
Teses. 3. Perfis tubulares - Teses. 4. Análise experimental -

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES TUBULARES TIPO LUVA

AUTORA: JANAÍNA MARIA DA SILVA

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 28 de agosto de 2012, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Dr. Marcílio Sousa da Rocha Freitas (Orientador / UFOP)



Prof. Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas (Orientadora / UFOP)



Prof. Dr. João Alberto Venegas Requena (UNICAMP)



Eng. Dr. Roberval José Pimenta (CODEME)

“Tem sempre presente que a pele se enruga, que o cabelo se torna branco, que os dias se convertem em anos, mas o mais importante não muda: tua força interior”

Madre Teresa de Calcutá

A minha família e meus orientadores.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me iluminar e dar forças para vencer mais esta etapa.

Aos meus queridos pais, Luiz e Lourdinha, pelo bom exemplo, apoio e compreensão.
Aos meus irmãos, Ulisses e Fabrícia, pelo incentivo e amizade. As minhas avós, Dona Lilica e Delva, pelas orações e carinho.

Aos meus orientadores, Arlene e Marcílio, pelos ensinamentos, apoio, tempo dedicado e por acreditarem na minha capacidade. Obrigada pela compreensão e amizade.

As minhas amigas Dalilah Maximiano e Gisele Martins por sempre estarem presentes em todos os momentos.

Aos amigos Denisson, Gabriel, Tiago, Walliston e Wanderson, por toda alegria e bons momentos.

A todos os amigos do laboratório. Em especial ao Juliano, Gabriel e Flávio pela imensa ajuda na realização dos ensaios. A Ana Amélia e a Letizia pela amizade.

Aos funcionários do laboratório: Dequinha, João e Sr. Osvaldo pela disposição nos ensaios experimentais.

A Róvia, pela atenção e apoio.

À Capes e a Vallourec & Mannesmann do Brasil pelo apoio e financiamento deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos a todos que acreditaram e que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

Os perfis tubulares possuem propriedades geométricas que possibilitam a elaboração das mais variadas obras com soluções modernas, arrojadas e econômicas. Uma das aplicações possíveis é em sistemas treliçados de cobertura atendendo a padronização, rapidez de montagem e alto grau de industrialização. Visando contribuir para o alcance desses objetivos, este trabalho apresenta um estudo teórico e experimental de um novo tipo de ligação denominada “luva”. Essa ligação é composta por dois tubos ligados internamente a partir de um terceiro tubo de diâmetro menor. Trata-se de uma ligação com parafusos passantes e dispostos em linha. A luva propicia uma fácil junção entre os elementos da seção tubular circular e facilita a montagem da estrutura. A ligação proposta foi testada em laboratório sob carregamento de tração, o que possibilitou a identificação de alguns modos de falha, capacidade resistente e deslocamentos. Os parâmetros considerados para investigação foram: diâmetro dos tubos, espessura e número de parafusos. A partir da análise dos resultados experimentais e teóricos, observou-se a necessidade da consideração de um estado limite adicional de flexão no parafuso para a qual é proposta uma metodologia de cálculo. Os bons resultados obtidos demonstraram a viabilidade da utilização desse novo tipo de ligação.

Abstract

The hollow sections have geometric properties that allow their use in various types of construction with modern, bold and economical solutions. One possible application is in roof trusses systems achieving standardization, speed of assembly and high degree of industrialization. This dissertation presents a theoretical and experimental study of a new type of connection called "glove". The connection is a tube sleeve, used to splice two tubes, composed of an inner tube with a less diameter to connected tubes. The tubes were connected to the outer by passing bolts. The connection "glove" provides an easy jointing of the elements of circular hollow sections (CHS) to be connected and facilitates assembly of the structure. The connection "gloves" was tested under tension loading. The experimental failure modes, strength and displacements were observed. The parameters considered for the investigation were the tube diameter and thickness and number of bolts. The theoretical and experimental results shows bolt flexural limit state. A new procedure for determining the capacity of such connections is presented. The results demonstrated the viability of using this new type of connection.

SUMÁRIO

| | |
|--|-------------|
| LISTA DE FIGURAS..... | VIII |
| LISTA DE TABELAS..... | XII |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Construção com perfis tubulares de aço | 1 |
| 1.2. Objetivo | 3 |
| 1.3. Justificativa..... | 3 |
| 1.4. Descrição do trabalho | 4 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 2.1. Introdução | 5 |
| 2.2. Barras prismáticas submetidas à força de tração | 6 |
| 2.3. Efeito shear lag em ligações tubulares em perfil circular | 9 |
| 2.4. Planilha de cálculo para dimensionamento teórico da ligação | 10 |
| 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL | 14 |
| 3.1. Introdução | 14 |
| 3.2. Protótipos ensaiados | 14 |
| 3.2.2 Propriedades do material..... | 17 |
| 3.2.3 Montagem dos protótipos..... | 18 |
| 3.2.4 Aparato para aplicação de carga | 20 |
| 3.3. Equipamentos de ensaio | 24 |
| 3.3.2 Extensômetros | 25 |
| 3.3.3 Aquisição de dados | 29 |
| 3.4. Metodologia de ensaio | 30 |
| 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 32 |
| 4.1. Introdução | 32 |
| 4.2. Série A | 32 |
| 4.3. Série B | 35 |
| 4.4. Série C | 35 |
| 4.5. Série D | 39 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 4.6. | Série E..... | 42 |
| 4.7. | Série F..... | 47 |
| 5. PROPOSTA DE FORMULAÇÃO | | 53 |
| 5.1. | Introdução | 53 |
| 5.2. | Força experimental no parafuso mais solicitado | 53 |
| 5.3. | Proposição de expressão teórica para a força resistente total da ligação para o estado limite de flexão do parafuso | 58 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | | 64 |
| 6.2 | Conclusões | 65 |
| 6.3. | Sugestões para trabalhos futuros | 67 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | | 69 |
| ANEXO A..... | | 72 |

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

| | |
|---|---|
| Figura 1.1 – Treliça - Aeroporto de Hamburgo, Alemanha. (V & M do Brasil, 2010) ... | 2 |
| Figura 1.2 – Ligação flangeada entre perfis tubulares circulares (Vieira, 2011) | 3 |
| Figura 1.3 – Ligação proposta | 3 |

Capítulo 2

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 a e b - Ligação parafusada em perfis circulares conectados por parafusos passantes e possibilidade de aplicação (Vieira, 2011)..... | 6 |
| Figura 2.2 - Ligação parafusada entre um perfil cantoneira e uma chapa de ligação – Fonte: Kulak et al (2001)..... | 8 |
| Figura 2.3 - Ligação soldada de chapa de ligação concêntrica em perfil de seção tubular circular – Fonte: Packer e Sacuedo (2009)..... | 9 |
| Figura 2.4 – Esquema utilizado para consideração da ruptura da seção líquida efetiva . | 12 |

Capítulo 3

| | |
|--|----|
| Figura 3.1 - Protótipo da ligação tubo com luva interna. | 14 |
| Figura 3.2 - Ligação com parafusos passantes dispostos em linha. | 15 |
| Figura 3.3 – Disposição dos parafusos na ligação (unidades em milímetros)..... | 18 |
| Figura 3.4 – Dimensões dos protótipos da série E-6-X3Y3 (unidades em milímetros). 19 | |
| Figura 3.5 – Garra da máquina de ensaios..... | 20 |
| Figura 3.6 – Perfil de seção transversal T soldado às extremidades dos tubos. | 20 |
| Figura 3.7 – Ligação tubo – perfil T. (CIDECT, 2008)..... | 21 |
| Figura 3.8 – Perfil T. | 22 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.9 – Máquina de ensaio (Prensa Servohidráulica Instron)..... | 24 |
| Figura 3.10.a e b – Posicionamento do LVDT no ensaio..... | 25 |
| Figura 3.11 – Parafuso após lixamento para colocação dos extensômetros..... | 26 |
| Figura 3.12 a e b – Posicionamento dos extensômetros elétricos nos parafuso..... | 26 |
| Figura 3.13 - Distribuição de tensões, modelo com 3 parafusos (Vieira et al (2011))... | 27 |
| Figura 3.14.a e b – Posicionamento dos extensômetros elétricos nos tubos..... | 27 |
| Figura 3.15.a – Série C4-X1Y2..... | 28 |
| Figura 3.15.b – Série D5-X2Y1..... | 28 |
| Figura 3.15.c – Série E5-X3Y3..... | 28 |
| Figura 3.15.d – Série E6-X3Y3..... | 28 |
| Figura 3.15.e – Série F5-X2Y3..... | 28 |
| Figura 3.16 – Sistema de aquisição de dados software Partner..... | 29 |
| Figura 3.17.a – Sistema de aquisição de dados Spider 8..... | 29 |
| Figura 3.17.b – Saídas gráficas e numéricas fornecidas pelo software Catman 4.5..... | 30 |
| Figura 3.18 – Posicionamento do LVDT..... | 30 |

Capítulo 4

| | |
|---|----|
| Figura 4.1 - Curvas carga de tração (P) versus deslocamento, série A..... | 32 |
| Figura 4.2 a – Protótipo A-5-X3Y2/1 após o ensaio..... | 34 |
| Figura 4.2 b – Protótipo A-4-X3Y2/1 após o ensaio..... | 34 |
| Figura 4.2 c – Protótipo A-3-X3Y2/1 após o ensaio..... | 34 |
| Figura 4.2 d – Protótipo A-2-X3Y2/1 após o ensaio – (Cisalhamento do parafuso) | 35 |
| Figura 4.3 - Curvas carga de tração (P) versus deslocamento, série C..... | 36 |
| Figura 4.4 – Protótipo C-4-X2Y2/2 após o ensaio..... | 36 |
| Figura 4.5 - Carga de tração (P) versus deformação no parafuso mais solicitado, protótipo instrumentado C-4-X2Y2/3..... | 37 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.6 - Carga de tração (P) versus deformação na parede do tubo externo, protótipo instrumentado C-4-X2Y2/3..... | 38 |
| Figura 4.7 - Curvas carga de tração (P) versus deslocamento, série D. | 39 |
| Figura 4.8 – Protótipo D-5-X2Y1/6 após o ensaio..... | 39 |
| Figura 4.9 - Carga de tração (P) versus deformação no parafuso mais solicitado, série D. | 40 |
| Figura 4.10 – Carga de tração (P) versus deformação na parede do tubo externo, protótipo instrumentado D-5-X2Y1/6. | 41 |
| Figura 4.11 - Curvas carga de tração (P) versus deslocamento, série E..... | 42 |
| Figura 4.12 a – Protótipo instrumentado E-5-X3Y3/3 após o ensaio..... | 43 |
| Figura 4.12 b – Protótipo instrumentado E-6-X3Y3/3 após o ensaio. | 43 |
| Figura 4.13 a – Carga de tração (P) versus deformação no parafuso mais solicitado, série E com 5 parafusos. | 44 |
| Figura 4.13 b – Carga de tração (P) versus deformação no parafuso mais solicitado, série E com 6 parafusos..... | 44 |
| Figura 4.14 a – Carga de tração (P) versus deformação na parede do tubo externo, protótipo E-5-X3Y3/3. | 45 |
| Figura 4.14 b – Carga de tração (P) versus deformação na parede do tubo externo, protótipo E6-X3Y3/3..... | 45 |
| Figura 4.15 - Curvas carga de tração (P) versus deslocamento, série F..... | 47 |
| Figura 4.16 – Protótipo instrumentado F-5-X2Y3/5 após o ensaio..... | 47 |
| Figura 4.17 - Carga de tração (P) versus deformação no parafuso mais solicitado, protótipo F-5-X2Y3/5..... | 48 |
| Figura 4.18 – Carga de tração (P) versus deformação na parede do tubo externo, protótipo. F-5-X2Y3/5..... | 49 |

Capítulo 5

Figura 5.1 – Representação esquemática da barra sob flexão, representada pelo parafuso da ligação, e diagrama de momento. 55

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2

Tabela 2.1 – Planilha de cálculo para dimensionamento teórico da ligação proposta. ... 73

Capítulo 3

Tabela 3.1 – Séries de protótipos ensaiados. 15

Tabela 3.2 – Variação do número de parafusos nas séries de protótipos. 16

Tabela 3.3 – Nomenclatura utilizada para a identificação do tipo de aço. 16

Tabela 3.4 – Resultado da caracterização do aço dos tubos V&M. 17

Tabela 3.5 – Resultado da caracterização do aço dos parafusos. 17

Tabela 3.6 – Comprimento das mesas do perfil T para cada diâmetro. 22

Tabela 3.7 – Descrição dos protótipos. 23

Capítulo 4

Tabela 4.1 – Resultados teóricos e experimentais para a capacidade resistente da ligação, série A. 33

Tabela 4.2 – Resultados teóricos e experimentais para a capacidade resistente da ligação, protótipos série C. 38

Tabela 4.3 – Resultados teóricos e experimentais para a capacidade resistente da ligação, protótipos série D. 41

Tabela 4.4 – Resultados teóricos e experimentais para a capacidade resistente da ligação, protótipos série E. 46

Tabela 4.5 – Resultados teóricos e experimentais para a capacidade resistente da ligação, protótipos série F. 49

Tabela 4.6 – Resultados teóricos e experimentais para a capacidade resistente da ligação. 51

Capítulo 5

| | |
|---|----|
| Tabela 5.1 – Resultados experimentais para o estado limite de flexão do parafuso. | 54 |
| Tabela 5.2 – Cálculo da força experimental unitária atuante no parafuso mais solicitado. | 56 |
| Tabela 5.3 – Cálculo da força total na ligação considerando os parafusos menos solicitados. | 58 |
| Tabela 5.4 – Valores teóricos, expressões proposta. | 60 |
| Tabela 5.5 – Valores experimentais versus valores teóricos (expressões propostas)..... | 60 |
| Tabela 5.6 – Estados limites para a ligação proposta | 61 |
| Tabela 5.7 – Estados limites para a ligação proposta, todas as séries | 62 |

INTRODUÇÃO

1.1. Construção com perfis tubulares de aço

No Brasil a utilização de elementos estruturais metálicos na construção tem se intensificado nos últimos anos devido aos inúmeros benefícios que o aço oferece, podendo se destacar o custo e a rapidez de execução.

O aço adapta-se com muita facilidade a outros materiais, tem grande resistência, é leve, permite o vencimento de grandes vãos e elementos estruturais metálicos podem ser produzidos em uma grande variedade de tipos e formas.

Dentre os diversos tipos envolvendo a fabricação e forma das seções transversais dos perfis estruturais tem-se os perfis tubulares que, devido às suas propriedades geométricas, tornam possível a elaboração das mais variadas obras com soluções modernas, arrojadas e econômicas.

O processo de fabricação e montagem das estruturas tubulares é basicamente o mesmo utilizado para as estruturas constituídas de perfis de seção aberta. As principais seções transversais são as circulares, quadradas ou retangulares e apresentam ótimo desempenho estrutural aos esforços de compressão, torção ou mesmo a esforços combinados, além de possibilitar, por exemplo, o uso como perfil misto (aço e concreto).

Os perfis tubulares são largamente utilizados em sistemas treliçados de cobertura possibilitando o uso em grandes vãos com peso próprio reduzido e gerando redução de custos.

Na Figura 1.1 tem-se um exemplo da utilização de perfis tubulares de seção circular em um sistema treliçado de cobertura.



Figura 1.1 – Treliça - Aeroporto de Hamburgo, Alemanha. (V & M do Brasil, 2010)

Conforme as necessidades construtivas, diferentes tipos de ligações podem ser utilizadas neste sistema estrutural resultando no tipo de treliça a ser empregado. A escolha do tipo da ligação depende de vários fatores tais como: arquitetônicos, facilidade de fabricação, facilidade de transporte e montagem, vão livre a ser vencido, entre outros.

A possibilidade de utilização de comprimentos padronizados é um dos fatores que pode ser determinante no custo de uma obra, uma vez que permite a otimização da fabricação e facilidade de transporte. No caso de ligações entre perfis tubulares, os elementos podem ser conectados em campo a partir da ligação flangeada. Nesse tipo de ligação, os flanges, formados por duas placas metálicas, são soldados no topo dos tubos. A união entre esses tubos é viabilizada através desses flanges que por sua vez são ligados entre si por meio de um número suficiente de parafusos. Na Figura 1.2 tem-se um exemplo de uma ligação flangeada entre perfis tubulares circulares.



Figura 1.2 – Ligação flangeada entre perfis tubulares circulares (Vieira, 2011 - comunicação pessoal)

1.2. Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um novo tipo de ligação entre perfis tubulares, chamada “luva”, bem como o desenvolvimento de uma metodologia de projeto para o seu dimensionamento.

A ligação foi testada em laboratório sob carregamento de tração o que possibilitou a identificação de alguns mecanismos de colapso, a capacidade resistente e seus deslocamentos. E, a partir de uma análise dos dados obtidos foi possível o desenvolvimento de uma formulação teórica para os estados limites encontrados.

1.3. Justificativa

Algumas das principais características da montagem de estruturas de grandes vãos são a rapidez e a eficiência dos sistemas estruturais envolvidos. Associada a essas características tem-se, no caso de sistemas treliçados tubulares, planares ou não, a utilização de elementos padronizados. Essa padronização facilita a montagem da estrutura e também o processo de fabricação e transporte das peças, contribuindo assim para a redução do custo final da estrutura.

Visando possibilitar a padronização dos vãos, a utilização de treliças tubulares em grandes vãos de cobertura, o transporte e içamentos das treliças em vãos adequados e padronizados, pretendeu-se com este trabalho a análise de uma nova ligação, que por ser

parafusada, permite a união entre elementos padronizados de sistemas treliçados de cobertura. A ligação proporciona a fácil junção entre os elementos facilitando a montagem da estrutura como um todo. A Figura 1.3 ilustra a ligação proposta.

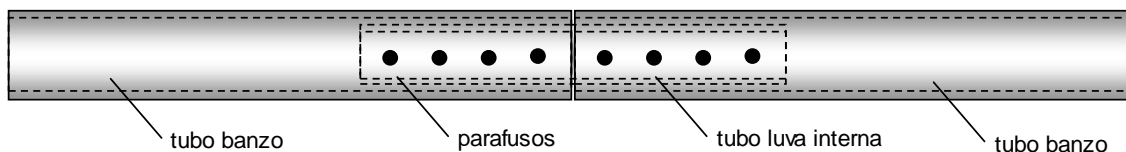


Figura 1.3 – Ligação proposta

As ligações são parte importante da estrutura metálica tanto do ponto de vista estrutural quanto em relação ao custo de produção. Assim, o aumento do uso de perfis tubulares, destacada a necessidade de métodos de cálculo que racionalizem as ligações com barras tubulares e que levem a prescrições normativas nacionais.

1.4. Descrição do trabalho

A apresentação deste trabalho é realizada em 6 capítulos:

O capítulo 2 aborda os fundamentos teóricos do dimensionamento da ligação proposta, apresentando equações normatizadas e pesquisas realizadas na área de ligações parafusadas.

No capítulo 3 é realizada a identificação dos protótipos, apresentando as suas dimensões, propriedades do material e padrão utilizado para identificação dos mesmos. São apresentadas também a metodologia empregada na realização dos ensaios experimentais, bem como a descrição do esquema de montagem, equipamentos e instrumentos utilizados e sistemas de aplicação de carga e aquisição de dados.

No capítulo 4 é apresentada a análise dos resultados experimentais obtidos, com a descrição de cada série de protótipos ensaiados.

O capítulo 5 apresenta o desenvolvimento da formulação proposta para o dimensionamento da ligação.

No capítulo 6 tem-se a conclusão deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução

Nos últimos anos, devido a crescente utilização de perfis tubulares, várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas no Brasil com o intuito de aprimorar técnicas e soluções para a aplicação eficiente dos perfis na construção civil. Alguns trabalhos estão relacionados com as ligações em estruturas metálicas, podendo-se citar Freitas e Requena (2009), Mayor (2010), Mendes (2008), Vieira et al (2011).

Dentre os vários trabalhos desenvolvidos, tem-se, como exemplo, o trabalho desenvolvido por Samarra (2007), que apresentou o estudo de um sistema de cobertura padronizado utilizando perfis tubulares para estruturas que necessitam de grandes vãos como lojas, indústrias, shoppings, centros de distribuição, etc. Para análise do comportamento estrutural do sistema, foi montado um protótipo, em escala real, de 900 m². A montagem desse protótipo possibilitou a aplicação de carregamentos reais que ocorrem nesse tipo de estrutura e a comparação do modelo real com o modelo computacional, possibilitando a identificação do modelo computacional que mais se aproxima da estrutura real.

O presente trabalho busca a proposição de um tipo de ligação entre perfis tubulares, que permita a utilização de elementos padronizados, contribuindo em diversos aspectos como transporte e montagem, entre outros.

Com a finalidade de aplicação em elementos de sistemas estruturais para vencimento de grandes vãos como treliças de cobertura, a ligação proposta é formada por dois tubos de mesmo diâmetro conectados internamente a partir de um terceiro tubo de diâmetro

menor e parafusos passantes. A ligação proporciona a fácil junção entre os elementos facilitando a montagem da estrutura como um todo. As Figuras 2.1 a e b mostram um exemplo da ligação em estudo e uma possibilidade de aplicação em banzos de sistemas estruturais treliçados para grandes vãos.



Figura 2.1 a e b - Ligação parafusada em perfis circulares conectados por parafusos passantes e possibilidade de aplicação. (Vieira, 2011 - comunicação pessoal).

2.2. Barras prismáticas submetidas à força de tração

Em ligações parafusadas quando os elementos estruturais são submetidos a esforços de tração, os principais estados limites últimos que podem ocorrer em chapas e perfis, são os seguintes (Salmon e Johnson, 2009):

- Escoamento da seção bruta;
- Rasgamento entre furo e borda;
- Esmagamento da chapa junto ao parafuso;
- Ruptura da seção líquida;
- Cisalhamento do parafuso;
- Block Shear.

A norma brasileira para dimensionamento de estruturas de aço e de estrutura mista de aço e concreto de edifícios ABNT NBR 8800:2008 estabelece, em seu item 5.2, os critérios a serem observados no cálculo de barras prismáticas submetidas à força axial

de tração. Esses critérios abrangem o escoamento da seção bruta e a ruptura da seção líquida, dados, respectivamente, pelas seguintes relações:

$$N_{t,Rd} = A_g \cdot f_y / \gamma_{a1} \quad (2.1)$$

$$N_{t,Rd} = C_t \cdot A_n \cdot f_u / \gamma_{a2} \quad (2.2)$$

onde $N_{t,Rd}$ é a força de tração resistente de cálculo, A_g é a área bruta da seção transversal do perfil, A_n é a sua área líquida, C_t é o coeficiente de redução da área líquida, f_y é a resistência ao escoamento do aço, f_u é a resistência à ruptura do aço à tração e γ_{a1} e γ_{a2} são os coeficientes de ponderação da resistência. De acordo com a NBR 8800:2008, γ_{a1} e γ_{a2} podem assumir os valores de, respectivamente, 1,1 e 1,35 para combinações de ações normais e especiais ou de construção, ou 1,0 e 1,15 para combinações de ações excepcionais.

2.2.1 Coeficiente de redução da área líquida C_t

Quando uma força de tração é aplicada em qualquer ponto de uma placa, a distribuição de tensões em toda a sua largura não é uniforme. O mecanismo pelo qual a tensão é transmitida a partir da localização da força aplicada aos pontos distantes é pelo cisalhamento agindo no plano da placa. O fato de que a tensão é menor quanto mais distante for do local de aplicação significa que a transferência de cisalhamento é não uniforme. Assim, a não uniformidade da distribuição da tensão de cisalhamento em chapas largas ou elementos de placas de seções laminadas quando uma força de tração é aplicada, é conhecido como “shear lag” (Salmon e Johnson, 2009).

Em vários estudos, Munse e Chesson (1963) examinaram o comportamento à tração de seções transversais. Foi observado que a perda da eficiência na área líquida devido ao shear lag, estava relacionada com a razão entre o comprimento L da ligação e a excentricidade x da seção transversal da placa ligada em relação ao plano de corte dos parafusos. A Figura 2.2 ilustra uma ligação parafusada entre um perfil cantoneira e uma chapa de ligação.

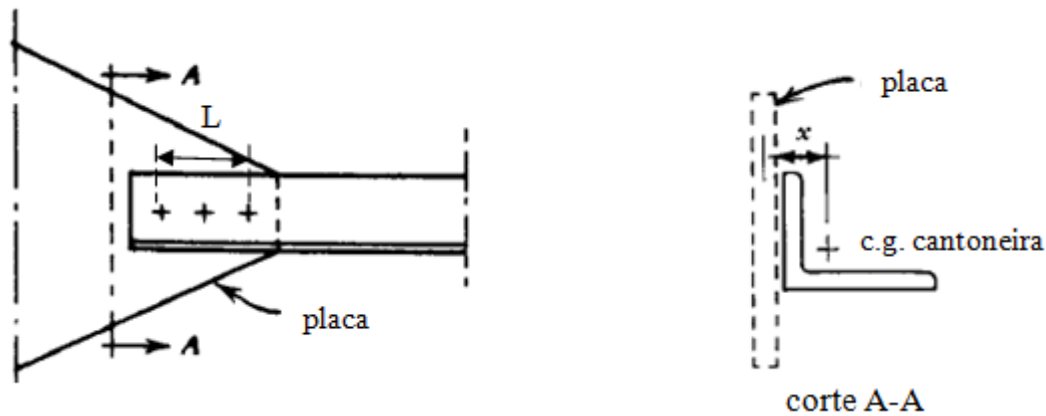


Figura 2.2 - Ligação parafusada entre um perfil cantoneira e uma chapa de ligação – Fonte: Kulak et al (2001)

Para aproximar a eficiência da seção líquida considerando o comprimento da ligação e a geometria do conjunto, Munse e Chesson sugeriram que a área líquida real fosse reduzida para uma área líquida efetiva, aplicando um fator de redução que considera o efeito “shear lag”.

O fator de redução, denominado por V , foi definido pela seguinte relação empírica:

$$V = 1 - (x/L) \quad (2.3)$$

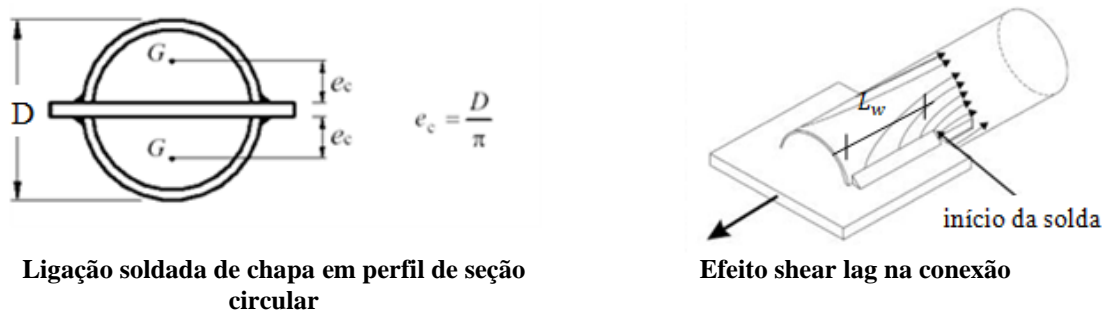
onde L é o comprimento da ligação e x é a excentricidade, igual à distância do centro geométrico da seção da barra ao plano de cisalhamento da ligação. (Figura 2.2)

As expressões para o cálculo da força normal resistente de tração para o estado limite de ruptura da seção líquida efetiva em ligações parafusadas adotadas nas especificações da norma estadunidense AISC (2010) e na norma brasileira NBR 8800:2008, foram baseadas nos estudos feitos por Munse e Chesson (1963). Esses estudos mostraram que vários parâmetros influenciam esta resistência: geometria e área líquida da seção transversal, efeito “shear lag” e resistência do material.

2.3. Efeito shear lag em ligações tubulares em perfil circular

Um estudo específico sobre o efeito “shear lag” em ligações tubulares, começou no início dos anos 1990 com o estudo de ligações de chapas (gusset plates) em seções circulares, quadradas e retangulares sob força de tração e compressão. (British Steel, 1992).

Durante a transferência de força do tubo para a chapa de ligação, uma distribuição não uniforme de tensão ocorre na seção transversal do tubo devido ao fato do material não conectado não participar da transferência de força. Esse fenômeno cria uma elevada concentração de tensão na região da solda que pode eventualmente provocar a fratura do material do tubo no início da solda. A Figura 2.3 representa uma ligação soldada de chapa de ligação concêntrica em perfil de seção tubular circular e o efeito shear lag nessa ligação.



Ligação soldada de chapa em perfil de seção circular

Efeito shear lag na conexão

Figura 2.3 - Ligação soldada de chapa de ligação concêntrica em perfil de seção tubular circular –
Fonte: Packer e Saucedo (2009)

Para a ligação da Figura 2.3, a norma brasileira NBR 8800:2008, assim como a norma estadunidense AISC (2010) utilizam a seguinte expressão para o cálculo do coeficiente de redução da área líquida efetiva (C_t):

$$C_t = 1 - \frac{e_c}{L_w} \quad (2.4)$$

onde a excentricidade e_c , dada por $e_c = \frac{D}{\pi}$, é comparada com o comprimento de solda L_w .

O efeito shear lag em seções estruturais abertas foi largamente estudado por vários autores e expressões para a contabilização do efeito nesse tipo de seção se encontram descritas em várias normas. Porém, pesquisas sobre o efeito em ligações tubulares circulares são muito recentes e em âmbito limitado.

Martinez-Saucedo e Packer (2006) estudaram o comportamento estrutural de ligações simples entre placas de reforço soldadas às extremidades de elementos tubulares, muito empregados em sistemas de contaventamento. Foram consideradas seções tubulares circulares e elípticas, com várias configurações de solda entre o tubo e a chapa, e avaliado o efeito shear lag nestas ligações.

Recentemente, Martínez-Saucedo e Packer (2009) propuseram uma nova expressão para o cálculo do coeficiente C_t para esse tipo de ligação. Essa nova expressão será adotada na futura norma brasileira de perfis tubulares (PN 02 125.03-004 Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares) em análise na ABNT :

$$C_t = \left[1 + \left(\frac{e_c}{l_w} \right)^{3,2} \right]^{-10} \quad (2.5)$$

onde e_c é a excentricidade da ligação, igual à distância do centro geométrico da seção da barra, G , a cada plano de cisalhamento da ligação e l_w é o comprimento efetivo da ligação (comprimento da solda na direção da força axial). (Figura 2.3)

Para a ligação em estudo, que se trata de uma conexão parafusada entre seções circulares, além do presente trabalho tem-se um estudo em desenvolvimento por Vieira et al (2011), que trata da análise numérica de ligações com a mesma configuração.

2.4. Planilha de cálculo para dimensionamento teórico da ligação

Para a análise teórica da ligação em estudo, foi desenvolvida uma planilha de cálculo pelo engenheiro Afonso Henrique Mascarenhas de Araújo da V&M do Brasil (comunicação pessoal), onde são verificados os possíveis estados limites para a ligação

submetida a esforço de tração. Seguindo as prescrições da NBR 8800:2008 foram verificados os seguintes estados limites:

a) escoamento da seção bruta

$$N_{t,Rd} = A_g \cdot f_y / \gamma_{a1} \quad (2.6)$$

onde $N_{t,Rd}$ é a força de tração resistente de cálculo, A_g é a área bruta da seção transversal, f_y é a resistência ao escoamento do material obtido experimentalmente pela caracterização do aço, γ_{a1} é o coeficiente de ponderação da resistência.

b) Ruptura da seção líquida efetiva

$$N_{t,Rd} = A_e \cdot f_u / \gamma_{a2} \quad (2.7)$$

onde A_e é a área líquida efetiva da seção transversal, f_u é a resistência à ruptura do material obtido experimentalmente pela caracterização do aço, γ_{a2} é o coeficiente de ponderação da resistência.

A área líquida efetiva é dada por:

$$A_e = C_t \cdot A_n \quad (2.8)$$

onde A_n é a área líquida da seção transversal e C_t é o coeficiente de redução da área líquida efetiva que foi adotado igual a um para investigação da presença do efeito shear lag na ligação.

Para o cálculo da área líquida A_n , considerou-se a seção dos tubos como a de uma chapa. A seção circular foi “aberta” transformando-se em uma seção retangular e desta forma a área líquida A_n foi calculada.

Segundo a NBR 8800:2008 em regiões com furos a área líquida, A_n , é a soma dos produtos da espessura pela largura líquida efetiva de cada elemento. A largura líquida

crítica é obtida pela sequência de furos que produz a menor das larguras líquidas, para as diferentes possibilidades de linhas de ruptura.

A Figura 2.4 (a) mostra uma visão geral da ligação, a Figura 2.4 (b) mostra o corte da seção com a visão do parafuso passante e a Figura 2.4 (c) ilustra como foram obtidas as larguras líquidas da seção em estudo, considerando a seção circular como uma chapa.

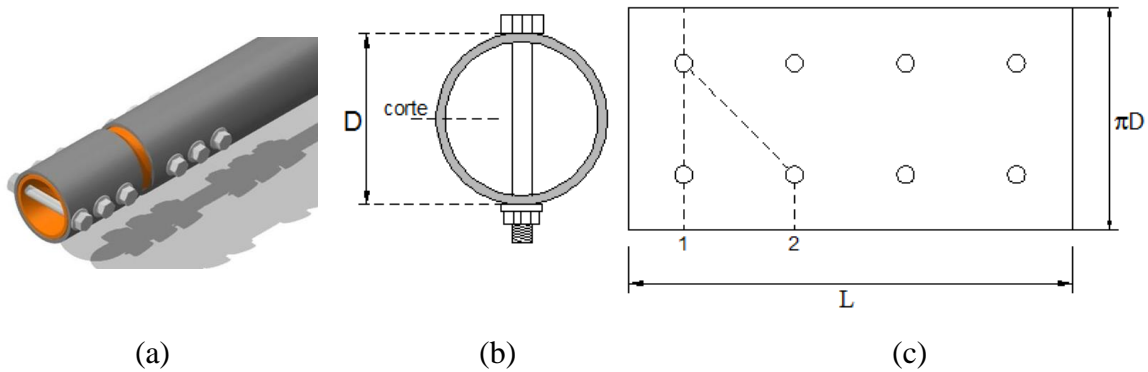


Figura 2.4 – Esquema utilizado para consideração da ruptura da seção líquida efetiva.

c) Pressão de contato entre furos

De acordo com a NBR 8800:2008, a força resistente de cálculo à pressão de contato na parede de um furo, já levando em consideração o rasgamento entre dois furos consecutivos e entre furo e borda, quando a deformação no furo para forças de serviço for uma limitação de projeto, é dada pela seguinte expressão:

$$F_{c,Rd} = 1,2 \cdot l_f \cdot t \cdot f_u / \gamma_{a2} \leq 2,4 \cdot d_b \cdot t \cdot f_u / \gamma_{a2} \quad (2.9)$$

onde l_f é a distância, na direção da força, entre a borda do furo e a borda do furo adjacente ou a borda livre, t é a espessura da parte ligada, d_b é o diâmetro do parafuso, f_u é a resistência à ruptura do material obtido experimentalmente pela caracterização do aço e γ_{a2} é o coeficiente de ponderação da resistência.

d) Cisalhamento do parafuso

Para parafusos de alta resistência e barras redondas rosqueadas, quando o plano de corte passa pela rosca e para parafusos comuns em qualquer situação a força resistente é dada pela equação 2.10:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,4 \cdot A_b \cdot f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (2.10)$$

onde A_b é a área bruta baseada no diâmetro do parafuso, f_{ub} é a resistência à ruptura do material do parafuso e γ_{a2} é o coeficiente de ponderação da resistência.

A área bruta baseada no diâmetro do parafuso é dada por:

$$A_b = 0,25 \cdot \pi \cdot d_b^2 \quad (2.11)$$

onde d_b é o diâmetro do parafuso.

Para efeito de comparação entre os resultados teóricos e experimentais, nas expressões apresentadas anteriormente, os valores dos coeficientes γ_{a1} e γ_{a2} foram adotados iguais a um.

No anexo A são apresentadas as planilhas de dimensionamento teórico da ligação para cada série de protótipos ensaiada.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. Introdução

Neste capítulo é apresentada a descrição do programa experimental utilizado para o estudo da ligação proposta. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas “Prof. Altamiro Tibiriçá Dias” do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Em ligações parafusadas submetidas a esforços de tração, vários estados limites últimos podem ocorrer, dessa forma os ensaios experimentais de tração realizados neste trabalho tiveram como objetivo investigar os possíveis estados limites para a ligação proposta. O programa experimental envolveu a definição, preparação, montagem dos protótipos, realização dos ensaios e armazenamento de resultados.

3.2. Protótipos ensaiados

Devido à simetria da ligação os protótipos ensaiados foram constituídos por apenas dois tubos, o externo representando o banzo e o interno a luva. A Figura 3.1 ilustra um protótipo da ligação tubo com luva interna por meio de parafusos.

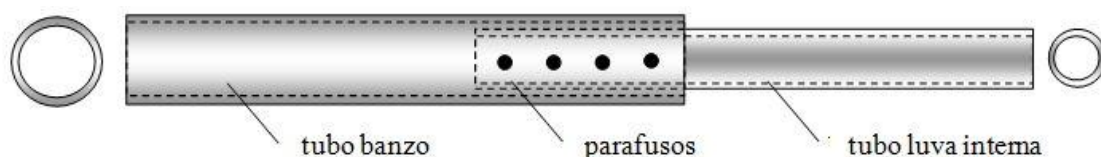


Figura 3.1 - Protótipo da ligação tubo com luva interna.

A ligação entre os tubos externo e interno é feita por parafusos passantes dispostos em linha como representado na Figura 3.2.

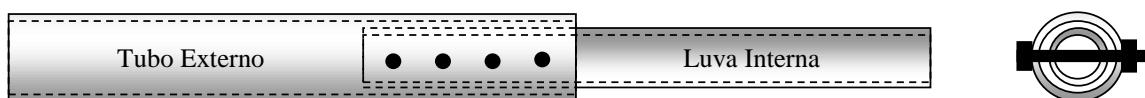


Figura 3.2 - Ligação com parafusos passantes dispostos em linha.

Para a avaliação dos estados limites e resistência da ligação, foram confeccionados e ensaiados vinte e oito protótipos, apresentando variações de diâmetro e espessura dos tubos e variação do número de parafusos na ligação. Nos itens a seguir são apresentadas as propriedades mecânicas e geométricas dos protótipos ensaiados.

3.2.1 Identificação dos protótipos

A fim de facilitar a identificação dos protótipos, foi estabelecida uma nomenclatura que contemplou suas características principais, como apresentado a seguir:

a) **Série:** Os protótipos foram divididos em seis séries distintas de acordo com as dimensões da seção transversal dos tubos (diâmetro e espessura). Os diâmetros foram escolhidos por serem os mais usuais em treliças tubulares de sistemas de cobertura. A Tabela 3.1 mostra como essas séries foram definidas:

Tabela 3.1 – Séries de protótipos ensaiados.

| Série | Tubo externo (diâmetro x espessura) mm | Tubo interno (diâmetro x espessura) mm |
|--------------|---|---|
| A | 73 x 5,5 | 60,3 x 5,5 |
| B | 76,1 x 3,6 | 60,3 x 3,6 |
| C | 76,1 x 3,6 | 60,3 x 5,5 |
| D | 88,9 x 4,8 | 73 x 5,2 |
| E | 88,9 x 4,8 | 73 x 5,5 |
| F | 88,9 x 5,5 | 73 x 5,5 |

b) **Número de parafusos:** Varia de uma série para outra e também dentro de uma mesma série. A Tabela 3.2 mostra a variação do número de parafusos nas séries de protótipos.

Tabela 3.2 – Variação do número de parafusos nas séries de protótipos.

| Série | Nº de parafusos |
|--------------|------------------------|
| A | 2,3,4 e 5 |
| B | 4 |
| C | 4 |
| D | 5 |
| E | 5 e 6 |
| F | 5 |

c) **Aço tubo interno e externo:** Os perfis tubulares utilizados na confecção dos protótipos foram fabricados pela empresa Vallourec & Mannesmann Tubes – V&M do Brasil. Dada a disponibilidade de material, pode-se utilizar tubos com aços diferentes. Os aços utilizados foram o aço VMB 250 com limite de escoamento nominal de 250 MPa e limite de ruptura nominal de 400 MPa, aço VMB 300 com limite de escoamento nominal de 300 MPa e limite de ruptura nominal de 415 MPa e aço VMB 350 COR, com limite de escoamento nominal de 350 MPa e limite de ruptura nominal de 485 MPa. A Tabela 3.3 mostra a nomenclatura utilizada para a identificação do tipo de aço.

Tabela 3.3 – Nomenclatura utilizada para a identificação do tipo de aço.

| Aço | Tubo externo | Tubo interno |
|------------|---------------------|---------------------|
| VMB 250 | X1 | Y1 |
| VMB 300 | X2 | Y2 |
| VMB 350 | X3 | Y3 |

A seguir tem-se um exemplo da identificação dos protótipos organizada como:

Série - nº de parafusos - aço tubo externo - aço tubo interno

F-5-X2Y3: protótipo composto por tubo interno de diâmetro igual a 73 mm e espessura de 5,5 mm conectado a um tubo externo de diâmetro igual a 88,9 mm e espessura de 5,5 mm, ligação com 5 parafusos, aço do tubo externo: VMB 300 e aço do tubo interno: VMB 350.

3.2.2 Propriedades do material

A caracterização do material dos tubos foi feita pela Vallourec & Mannesman atendendo as especificações da norma ASTM-EM8 (1995). Foram obtidos a curva tensão versus deformação, os valores da tensão de escoamento f_y , da tensão de ruptura f_u e o alongamento total para cada um dos tubos como apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Resultado da caracterização do aço dos tubos V&M.

| Tubo (diâmetro x espessura) mm | f_y (MPa) | f_u (MPa) | ΔL (%) |
|---|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 88,9 x 5,5 | 375,0 | 474,0 | 34,0 |
| 88,9 x 4,8 | 403,0 | 544,5 | 36,0 |
| 88,9 x 4,8 | 369,0 | 535,0 | 36,0 |
| 76,1 x 3,6 | 386,0 | 545,0 | 34,0 |
| 73 x 5,5 | 399,5 | 539,5 | 35,0 |
| 73 x 5,2 | 303,0 | 448,0 | 37,5 |
| 60,3 x 5,5 | 381,0 | 479,0 | 34,5 |
| 60,3 x 3,6 | 424,0 | 535,0 | 36,0 |

Para a união dos tubos utilizaram-se parafusos ASTM A325 com diâmetro de 12,7mm, limite de escoamento nominal de 635 MPa e limite de ruptura nominal de 825 MPa. Foram utilizados dois comprimentos diferentes de parafuso: 114,3 mm (ou 4 1/2 polegadas) para os tubos externos com diâmetro de 88,9 mm e 101,6 mm (ou 4 polegadas) para tubos com diâmetros de 76,1 mm e 73 mm.

A caracterização do material dos parafusos foi feita pela fornecedora A. Friedberg do Brasil atendendo as especificações da norma ASTM A325-T1. A Tabela 3.5 apresenta os valores da tensão de escoamento f_y obtida para cada comprimento de parafuso e a deformação específica do material, ϵ , calculada a partir da tensão de escoamento:

Tabela 3.5 – Resultado da caracterização do aço dos parafusos.

| Comprimento parafuso | f_y (MPa) | ϵ (μ) |
|-----------------------------|-------------------------------|---|
| 4'' (101,6 mm) | 714 | 3482,93 |
| 4 1/2'' (114,3 mm) | 634 | 3092,68 |

3.2.3 Montagem dos protótipos

O comprimento total dos tubos varia entre 355 mm e 435 mm, devido à disponibilidade de material para fabricação dos protótipos, o que impossibilitou que todos possuíssem o mesmo comprimento. Essa variação não interfere na ligação nem nos resultados ou procedimentos dos ensaios.

Para o encaixe dos parafusos foram realizados furos com diâmetro de 14,3 mm, de modo a permitir uma folga de 1,6 mm para o uso de parafusos de 12,7 mm de diâmetro. Os furos foram executados em linha e afastados entre si 35 mm, correspondente a 2,75 diâmetros do parafuso, sendo o primeiro furo distante 40 mm da borda do tubo. Os espaçamentos entre furos e furo e borda foram definidos seguindo as prescrições da NBR 8800:2008 que, em seu item 6.3.9 (espaçamento mínimo entre furos), estabelece que a distância entre centros de furos-padrão não pode ser inferior a 2,7 diâmetros do parafuso.

A Figura 3.3 mostra um esquema da disposição dos parafusos na ligação e a Figura 3.4 mostra um esquema geral das dimensões de um protótipo de uma das séries ensaiadas (série E-6-X3Y3).

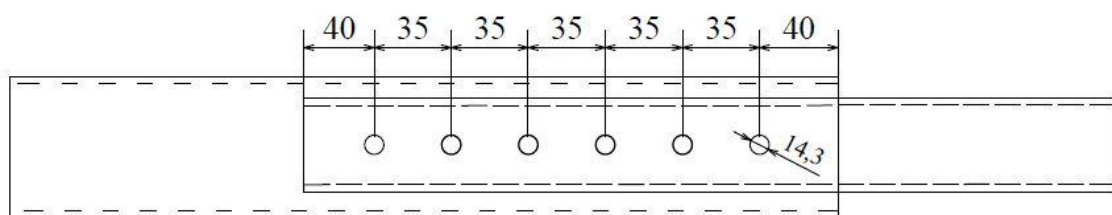


Figura 3.3 – Disposição dos parafusos na ligação (unidades em milímetros).

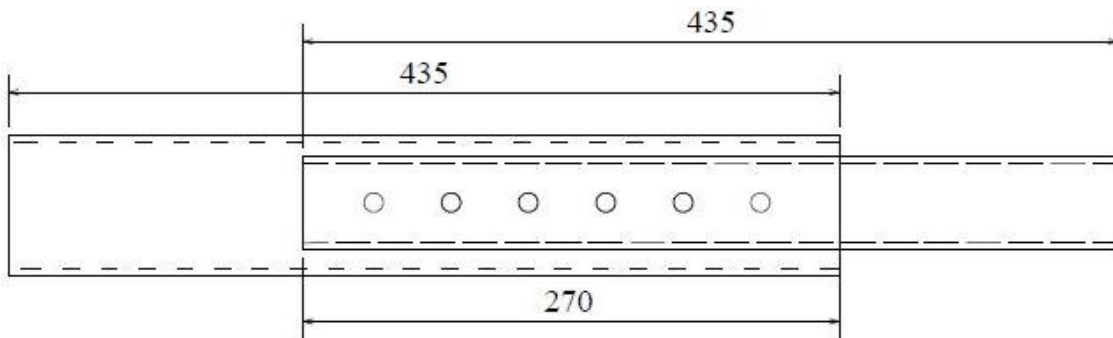


Figura 3.4 – Dimensões dos protótipos da série E-6-X3Y3 (unidades em milímetros).

3.2.4 Aparato para aplicação de carga

Devido à geometria circular da seção dos protótipos, foi necessário o desenvolvimento de um sistema que permitisse o encaixe nas garras da máquina de ensaio, possibilitando a aplicação da carga de tração de forma uniforme em toda a seção transversal. Dessa forma, optou-se por soldar um perfil de aço de seção transversal T nas extremidades dos tubos viabilizando a conexão com a máquina de ensaios. As Figuras 3.5 e 3.6 mostram, respectivamente, a garra da máquina de ensaios, na qual o protótipo é encaixado, e o esquema de ligação tubo-perfil T para possibilitar a conexão.



Figura 3.5 – Garra da máquina de ensaios.



Figura 3.6 – Perfil de seção transversal T soldado às extremidades dos tubos.

Para garantir a não ocorrência de falhas, a ligação tubo-perfil T foi previamente dimensionada seguindo as recomendações do CIDECT (2008). A Figura 3.7 representa a ligação e as suas dimensões.

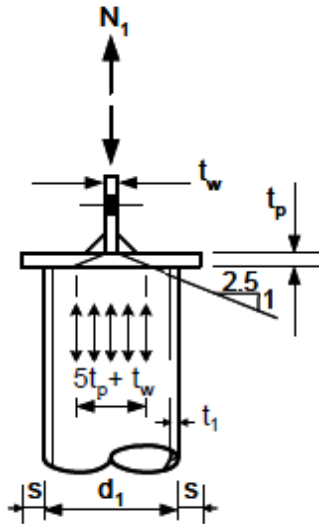


Figura 3.7 – Ligação tubo – perfil T. (CIDECT, 2008).

Para esse tipo de ligação, as seguintes relações devem ser atendidas:

Para o tubo

$$N_1 = 2 \cdot f_{y_1} \cdot t_1 (t_w + 5t_p) \leq A_1 \cdot f_{y_1} \quad (3.1)$$

onde N_1 é a força resistente de cálculo, f_{y_1} é a tensão de escoamento do tubo, t_1 é a espessura da parede do tubo, t_w é a espessura da alma do perfil T, t_p é a espessura da mesa do perfil T e A_1 é a área da seção circular do tubo.

Para a alma

$$N_1 = 2 \cdot f_{y_w} \cdot t_w (t_1 + 2,5t_p + s) \leq 2 \cdot f_{y_w} \cdot t_w (t_1 + 5t_p) \quad (3.2)$$

onde f_{y_w} é a tensão de escoamento do perfil T e s é a distância entre o tubo e a borda da mesa do mesmo.

A partir do dimensionamento da ligação obteve-se para cada diâmetro a geometria do perfil T a ser utilizado.

Todos os perfis T foram fabricados a partir de um perfil I laminado, com espessura da alma de 9,7 mm, espessura da mesa de 16 mm e aço A 572 Grau 50 (tensão de escoamento nominal igual a 345 MPa e tensão de ruptura nominal igual a 450 MPa). A mesa foi cortada de acordo com cada diâmetro a ser conectado. A Tabela 3.6 apresenta os comprimentos das mesas para cada diâmetro, identificados como $d_1 + 2s$ na Figura 3.7:

Tabela 3.6 – Comprimento das mesas do perfil T para cada diâmetro.

| Diâmetro (mm) | s (mm) | Comprimento mesa peça T (mm) |
|----------------------|---------------|-------------------------------------|
| 60,3 | 39,85 | 140 |
| 73,0 | 38,5 | 150 |
| 76,1 | 39,45 | 155 |
| 88,9 | 38,05 | 165 |

Devido à limitação de largura das garras da máquina em 140 mm, para os perfis T com comprimento de alma maior que 140 mm, foi feito um raio de concordância a uma distância de aproximadamente 60 mm da mesa, de forma a permitir o encaixe nas garras e garantir uma distribuição uniforme da carga de tração aplicada. A Figura 3.8 mostra um perfil T pronto para ser soldado no tubo e o detalhe do raio de concordância.



Figura 3.8 – Perfil T

Na Tabela 3.7 são apresentadas as principais propriedades geométricas dos protótipos de cada série bem como o número de parafusos e os valores da caracterização do aço.

Tabela 3.7 – Descrição dos protótipos.

| Séries | N° Protótipos | Instrumentados | N° Parafusos | Tubo Externo | | | | | Tubo Interno | | | | |
|----------|---------------|----------------|--------------|---------------|----------------|------------------|----------------------|----------------------|---------------|----------------|------------------|----------------------|----------------------|
| | | | | Diâmetro (mm) | Espessura (mm) | Comprimento (mm) | Aço | | Diâmetro (mm) | Espessura (mm) | Comprimento (mm) | Aço | |
| | | | | | | | f _y (MPa) | f _u (MPa) | | | | f _y (MPa) | f _u (MPa) |
| A-5-X3Y2 | 2 | 0 | 5 | 73,0 | 5,5 | 415,0 | 399,5 | 539,5 | 60,3 | 5,5 | 415,0 | 381,0 | 479,0 |
| A-4-X3Y2 | 2 | 0 | 4 | 73,0 | 5,5 | 415,0 | 399,5 | 539,5 | 60,3 | 5,5 | 415,0 | 381,0 | 479,0 |
| A-3-X3Y2 | 1 | 0 | 3 | 73,0 | 5,5 | 415,0 | 399,5 | 539,5 | 60,3 | 5,5 | 415,0 | 381,0 | 479,0 |
| A-2-X3Y2 | 1 | 0 | 2 | 73,0 | 5,5 | 415,0 | 399,5 | 539,5 | 60,3 | 5,5 | 415,0 | 381,0 | 479,0 |
| | | | | | | | | | | | | | |
| B-4-X2Y3 | 1 | 0 | 4 | 76,1 | 3,6 | 355,0 | 386,0 | 545,0 | 60,3 | 3,6 | 355,0 | 424,0 | 535,0 |
| | | | | | | | | | | | | | |
| C-4-X2Y2 | 3 | 1 | 4 | 76,1 | 3,6 | 315,0 | 386,0 | 545,0 | 60,3 | 5,5 | 415,0 | 381,0 | 479,0 |
| | | | | | | | | | | | | | |
| D-5-X2Y1 | 6 | 1 | 5 | 88,9 | 4,8 | 435,0 | 369,0 | 535,0 | 73,0 | 5,2 | 395,0 | 303,0 | 448,0 |
| | | | | | | | | | | | | | |
| E-5-X3Y3 | 3 | 1 | 5 | 88,9 | 4,8 | 435,0 | 403,0 | 544,5 | 73,0 | 5,5 | 435,0 | 399,5 | 539,5 |
| E-6-X3Y3 | 3 | 1 | 6 | 88,9 | 4,8 | 435,0 | 403,0 | 544,5 | 73,0 | 5,5 | 435,0 | 399,5 | 539,5 |
| | | | | | | | | | | | | | |
| F-5-X2Y3 | 5 | 1 | 5 | 88,9 | 5,5 | 395,0 | 375,0 | 474,0 | 73,0 | 5,5 | 415,0 | 399,5 | 539,5 |

3.3. Equipamentos de ensaio

Após a montagem, os protótipos foram instrumentados e instalados na prensa servohidráulica (fabricante: Instron) com capacidade de 2000 kN. Para a instrumentação dos ensaios, foram utilizados um transdutor de deslocamento (LVDT– Linear Variational Displacement Transducer) e extensômetros elétricos de resistência. A Figura 3.9 mostra uma vista geral da máquina de ensaio, que é acionada e controlada por computador.



Figura 3.9 – Máquina de ensaio (Prensa Servohidráulica Instron).

3.3.1 Transdutor de deslocamento (LVDT)

Para acompanhar os deslocamentos na ligação oriundos da aplicação da carga, foram utilizados em todos os ensaios LVDT (modelo 2601-095, fabricado pela Solartron) posicionado entre as extremidades dos tubos, paralelamente a linha de parafusos. As Figuras 3.10.a e b mostram o posicionamento do LVDT no ensaio.



Figura 3.10.a e b – Posicionamento do LVDT no ensaio.

3.3.2 Extensômetros

A fim de realizar um acompanhamento das distribuições de tensões, em um protótipo das séries C, D, E e F foram utilizados, além do LVDT, extensômetros elétricos posicionados no tubo externo e em um dos parafusos da ligação. Os protótipos instrumentados com extensômetros elétricos foram separados para a instrumentação e ensaiados ao fim dos ensaios de todas as séries.

Para possibilitar a colocação do extensômetro no parafuso foi necessário realizar um lixamento na sua superfície. O furo correspondente ao parafuso instrumentado foi alargado em 1,7 mm passando de 14,3 mm para 16 mm. A Figura 3.11 mostra a preparação do parafuso para instrumentação.



Figura 3.11 – Parafuso após lixamento para colocação dos extensômetros.

A partir de uma análise visual dos primeiros ensaios realizados, observou-se em qual posição da ligação se encontrava o parafuso mais solicitado de cada série. Dessa forma pode-se definir para cada série subsequente o parafuso a ser instrumentado.

Para a instrumentação do parafuso foram utilizados dois extensômetros, um na parte inferior (EER1) e outro na parte superior (EER2), diametralmente opostos e posicionados no eixo longitudinal da ligação. Durante o posicionamento do parafuso na ligação tomou-se o cuidado para que os extensômetros fossem posicionados na parte superior e inferior considerando a região de compressão e tração máxima. As Figuras 3.12.a e b apresentam respectivamente o posicionamento dos extensômetros no parafuso e o posicionamento na ligação.

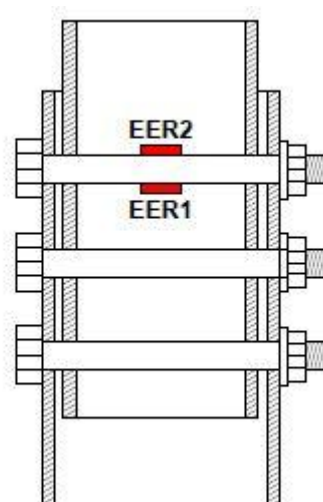


Figura 3.12 a e b – Posicionamento dos extensômetros elétricos no parafuso.

Nos tubos externos da ligação foram posicionados dois extensômetros unidirecionais. Baseando-se em uma análise numérica realizada por Vieira et al (2011), observou-se que a região de maior concentração de tensão ocorre na lateral do tubo, próximo à linha de centro entre os dois primeiros parafusos mais solicitados da ligação (Figura 3.13).

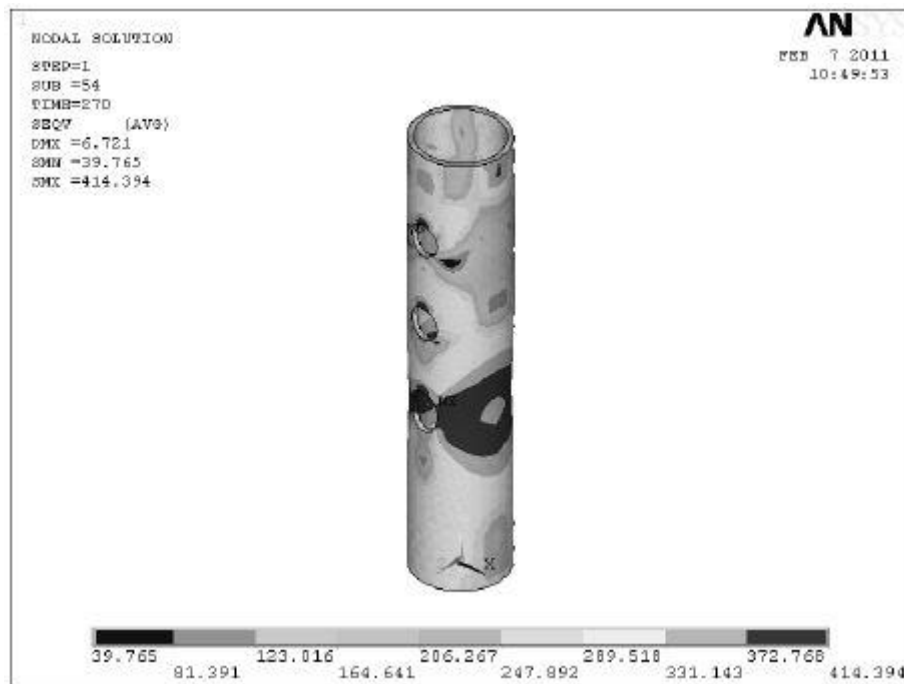


Figura 3.13 - Distribuição de tensões, modelo com 3 parafusos (Vieira et al (2011)).

Nesta posição foram instalados dois extensômetros elétricos, um na direção horizontal (EER3) e outro a 90° na posição vertical (EER4) As Figuras 3.14.a e b mostram o posicionamento dos extensômetros no tubo.

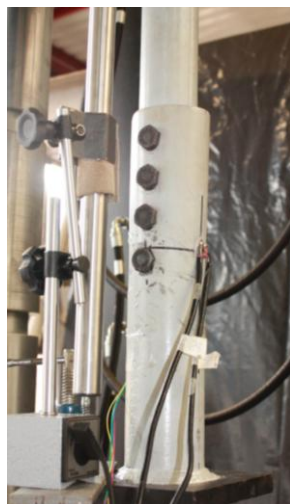


Figura 3.14.a e b – Posicionamento dos extensômetros elétricos nos tubos.

As Figuras 3.15.a, b, c, d e e mostram a posição dos extensômetros nos tubos externos e a identificação do parafuso instrumentado na ligação para cada um dos protótipos.

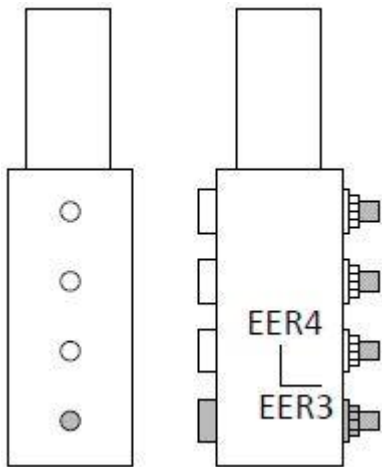


Figura 3.15.a – Série C4-X1Y2

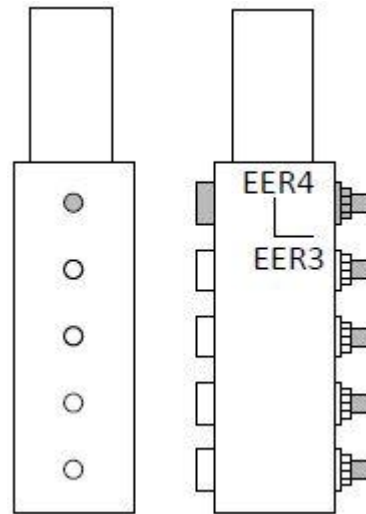


Figura 3.15.b – Série D5-X2Y1

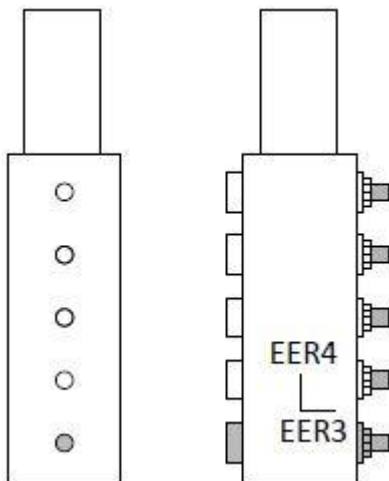


Figura 3.15.c – Série E5-X3Y3

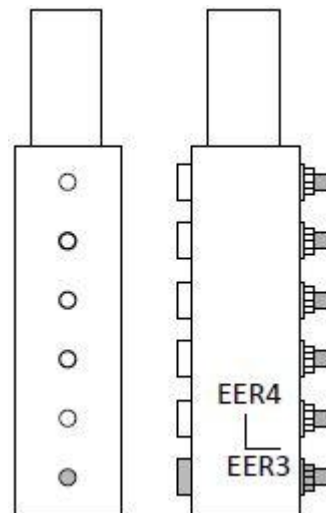


Figura 3.15.d – Série E6-X3Y3

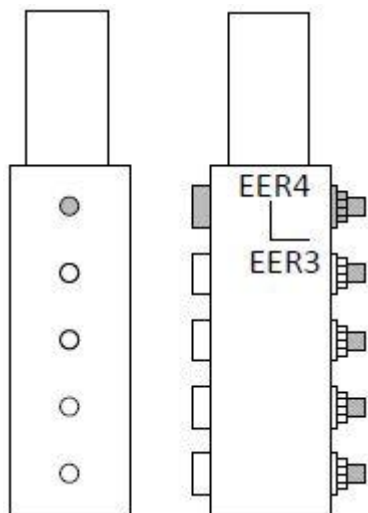


Figura 3.15.e – Série F5-X2Y3

3.3.3 Aquisição de dados

A prensa servohidráulica Instron possui um canal de saída para LVDT controlado pelo software Partner instalado no computador. Esse sistema, que fornece saídas gráficas e numéricas tanto para o acompanhamento durante os ensaios quanto para análise posterior dos resultados, permitiu a aquisição automática dos dados referentes à carga e ao deslocamento relativo do LVDT. A Figura 3.16 mostra a obtenção em tempo real dos dados do ensaio pelo software Partner.

Para a aquisição dos dados obtidos a partir dos extensômetros, foi utilizado um sistema automático controlado por computador, dotado de um sistema eletrônico de medição o “Spider 8” fabricado pela HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik, 2003), com aquisição de dados efetuada através do programa “Catman 4.5” que fornece saídas gráficas e numéricas. As Figuras 3.17.a e b apresentam uma vista desse sistema de aquisição de dados.



Figura 3.16 – Sistema de aquisição de dados software Partner.



Figura 3.17.a – Sistema de aquisição de dados Spider 8.

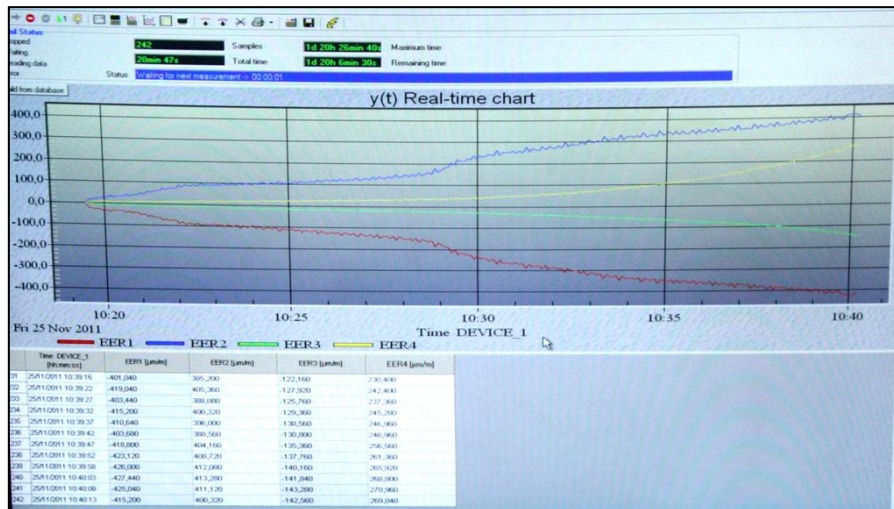


Figura 3.17.b – Saídas gráficas e numéricas fornecidas pelo software Catman 4.5.

3.4. Metodologia de ensaio

Depois de prontos, os protótipos foram presos na prensa servohidráulica na posição vertical, sendo o tubo com diâmetro maior posicionado na parte inferior e o tubo com diâmetro menor na parte superior. Antes de serem instalados na máquina de ensaios todos os parafusos da ligação foram apertados manualmente com a utilização de chaves de boca.

Para o posicionamento do LVDT foram utilizados dois suportes instalados nas mesas das peças Ts. A Figura 3.18 mostra o esquema de posicionamento do LVDT.



Figura 3.18 – Posicionamento do LVDT.

O software Partner instalado no computador permitiu a aquisição automática dos dados referentes à carga aplicada e ao deslocamento na ligação. A frequência de aquisição dos dados foi de 5 Hz e a carga foi aplicada com controle de deslocamento a uma velocidade de 0,4 mm/min. Esse controle de velocidade de deslocamento utilizado no ensaio possibilita uma melhor obtenção e controle do comportamento da ligação em função da carga aplicada.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para cada série de ensaios. A partir do tratamento dos dados obtidos do ensaio de tração, foram feitos gráficos com as respostas do LVDT e extensômetros para cada uma das séries ensaiadas.

4.2. Série A

Na série A, foram ensaiados protótipos com variação do número de parafusos na ligação. Na Figura 4.1 são apresentadas as curvas carga de tração (P) versus deslocamento para os protótipos da série A.

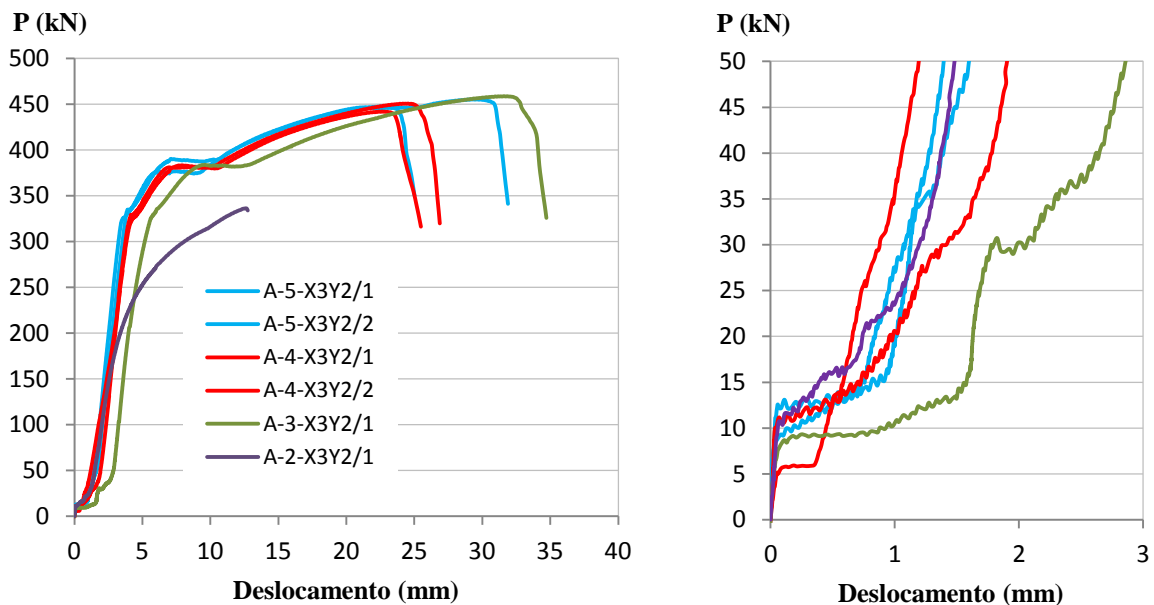


Figura 4.1 - Curvas carga de tração (P) versus deslocamento, série A.

Observa-se pela Figura 4.1 que no início dos ensaios ocorre um pequeno deslizamento, onde há deslocamento sem ganho de carga, que acontece devido às folgas de 1,6 mm existentes entre furo e parafuso. O primeiro trecho do gráfico se mantém linear e em seguida ocorre uma perda de linearidade com aumento do deslocamento e baixo ganho de carga, caracterizando a predominância de um estado limite que leva ao colapso da ligação. A Tabela 4.1 apresenta estados limites para a série A, obtidos pela planilha de cálculo (apresentada no Capítulo 2 – Tabela 2.1) e a capacidade resistente da ligação, obtida pelo ensaio, para cada protótipo da série A.

Tabela 4.1 – Resultados teóricos e experimentais para a capacidade resistente da ligação, série A.

| Protótipo | Estados limites (valor teórico) | | | Experimental | |
|------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| | Escoamento da seção bruta (kN) | Ruptura da seção líquida efetiva (kN) | Cisalhamento do parafuso (kN)* | Capacidade de carga experimental (kN) | Modo de colapso |
| A-5-X3Y2/1 | 360,76 tubo interno | 378,21 tubo interno | 522,54 | 447,55 | Ruptura da seção líquida |
| A-5-X3Y2/2 | 360,76 tubo interno | 378,21 tubo interno | 522,54 | 455,36 | Ruptura da seção líquida |
| A-4-X3Y2/1 | 360,76 tubo interno | 378,21 tubo interno | 418,03 | 442,04 | Ruptura da seção líquida |
| A-4-X3Y2/2 | 360,76 tubo interno | 378,21 tubo interno | 418,03 | 450,66 | Ruptura da seção líquida |
| A-3-X3Y2/1 | 360,76 tubo interno | 378,21 tubo interno | 313,53 | 458,70 | Ruptura da seção líquida |
| A-2-X3Y2/1 | 360,76 tubo interno | 378,21 tubo interno | 209,02 | 336,28 | Cisalhamento do parafuso |

* Para o estado limite de cisalhamento do parafuso, utilizou-se o valor nominal da resistência à ruptura do material do parafuso ($f_{ub} = 825$ MPa).

Ao final dos ensaios, nos protótipos da série A com 5, 4 e 3 parafusos, foi observada a ruptura da seção líquida efetiva no tubo interno. Já no protótipo com apenas dois parafusos ocorreu falha por cisalhamento.

Pela análise da Figura 4.1 e dos dados apresentados na Tabela 4.1 pode-se concluir que o aumento do número de parafusos, a partir de certo número, não contribui de forma significativa para o ganho de capacidade resistente final da ligação, uma vez que, o nível de carga de ruptura se mantém bem próximo para as ligações com 3, 4 e 5 parafusos.

Para ilustrar os estados limites dos protótipos da série A, são apresentadas a seguir figuras de um dos protótipos segundo o número de furos nos mesmos. As Figuras 4.2 a, b, c e d mostram os protótipos após o ensaio e os seus respectivos parafusos. Em nenhum protótipo da série A foi instrumentado o parafuso.



Figura 4.2 a – Protótipo A-5-X3Y2/1 após o ensaio.



Figura 4.2 b – Protótipo A-4-X3Y2/1 após o ensaio.



Figura 4.2 c – Protótipo A-3-X3Y2/1 após o ensaio.



Figura 4.2 d – Protótipo A-2-X3Y2/1 após o ensaio – (Cisalhamento do parafuso)

Para a série A foram apresentadas figuras de cada protótipo segundo o número de furos nos mesmos. Porém, para as demais séries serão apresentadas as figuras referentes apenas aos protótipos instrumentados, uma vez que, todos os protótipos da mesma série são iguais e apresentaram as mesmas configurações de deformação.

4.3. Série B

A série B, composta por apenas um protótipo, apresentou resultados ruins (por exemplo, capacidade resistente muito baixa) e não conclusivos quando comparado com as demais séries. Sendo assim, optou-se por excluir esta série.

4.4. Série C

Analogamente ao que ocorreu na série A, na série C pode-se também observar um deslizamento no início dos ensaios – Figura 4.3. O trecho inicial se mantém linear até certo nível de carregamento (aproximadamente 250 kN) a partir do qual ocorre a predominância de um estado limite. O gráfico perde a linearidade apresentando aumento do deslocamento com baixo ganho de carga até atingir um nível de carregamento que leva a ruptura da ligação. Na Figura 4.3 são apresentadas as curvas carga de tração (P) versus deslocamento para os protótipos da série C.

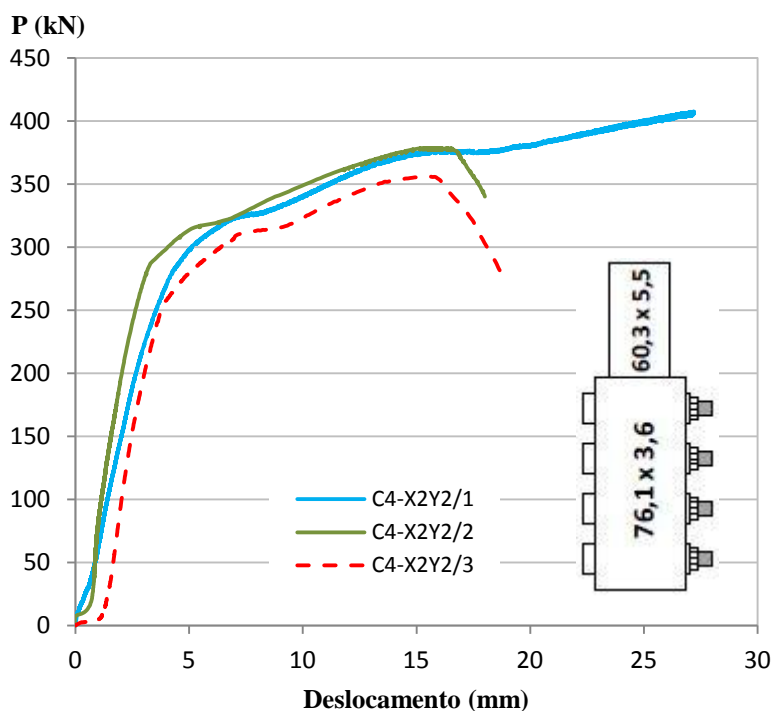


Figura 4.3 - Curvas carga de tração (P) versus deslocamento, série C.

Observa-se pela Figura 4.3 que o primeiro protótipo da série C ensaiado, C-4-X2Y2/1, apresentou uma capacidade resistente maior que os demais e o seu ensaio foi finalizado antes de ser atingida a carga máxima de ruptura.

Nos demais protótipos da série C foi observada a ruptura da seção líquida efetiva no tubo externo ao final dos ensaios. A Figura 4.4 mostra o protótipo C-4-X2Y2/2 após o ensaio e os seus respectivos parafusos (os demais protótipos da série C apresentaram as mesmas configurações de deformação).



Figura 4.4 – Protótipo C-4-X2Y2/2 após o ensaio.

Após os primeiros ensaios, foi observada uma flexão excessiva nos parafusos. A partir dessa observação, para o último ensaio de cada série, optou-se por instrumentar com extensômetros o parafuso posicionado onde ocorreu a ruptura da seção líquida efetiva. Este parafuso foi escolhido por ser o mais solicitado da ligação. Na série C o protótipo instrumentado corresponde ao C-4-X2Y2/3 que aparece destacado em linhas pontilhadas no gráfico da Figura 4.3.

A Figura 4.5 apresenta a curva carga de tração (P) versus deformação obtida a partir dos resultados encontrados para os extensômetros (EER1 e EER2) posicionados no parafuso instrumentado do protótipo C-4-X2Y2/3 da série C.

Observa-se pela Figura 4.5 que a deformação do parafuso supera o nível de deformação para o material referente ao escoamento, que corresponde a 3482,93 μS (parafuso com comprimento de 101,6 mm, Tabela 3.5 – Capítulo 3), e está marcada no gráfico da Figura 4.5 por linhas pontilhadas.

A partir destas análises, concluiu-se a existência de um possível e novo estado limite, caracterizado pela flexão excessiva do parafuso que deve ser verificado na avaliação da capacidade resistente da ligação. A flexão do parafuso está presente em todas as séries ensaiadas.

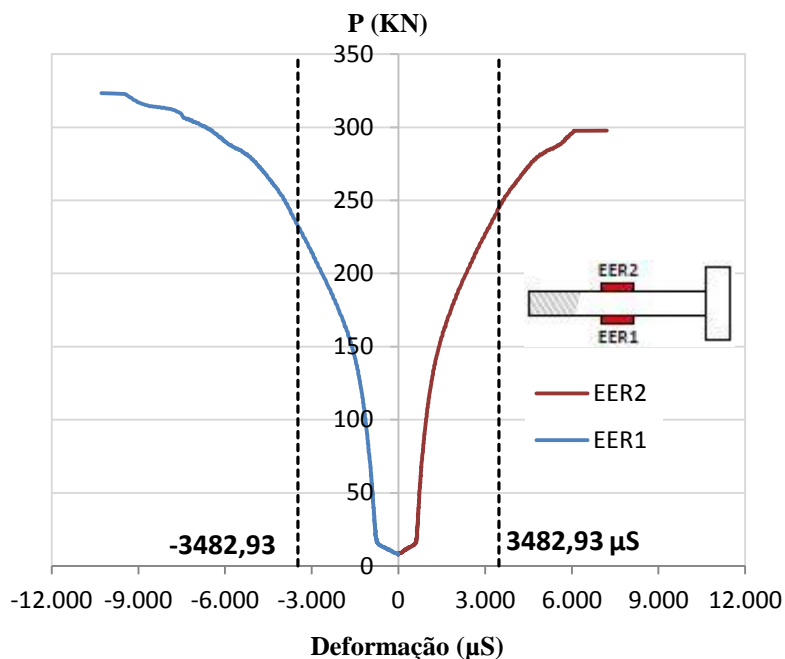


Figura 4.5 - Carga de tração (P) versus deformação no parafuso mais solicitado, protótipo instrumentado C-4-X2Y2/3.

A Figura 4.6 mostra a curva carga de tração (P) versus deformação obtida a partir dos resultados encontrados para os extensômetros (EER3 e EER4) posicionados no tubo externo do protótipo instrumentado C-4-X2Y2/3. Observa-se pela Figura 4.6 o escoamento do material do tubo externo, fabricado em aço VMB 250.

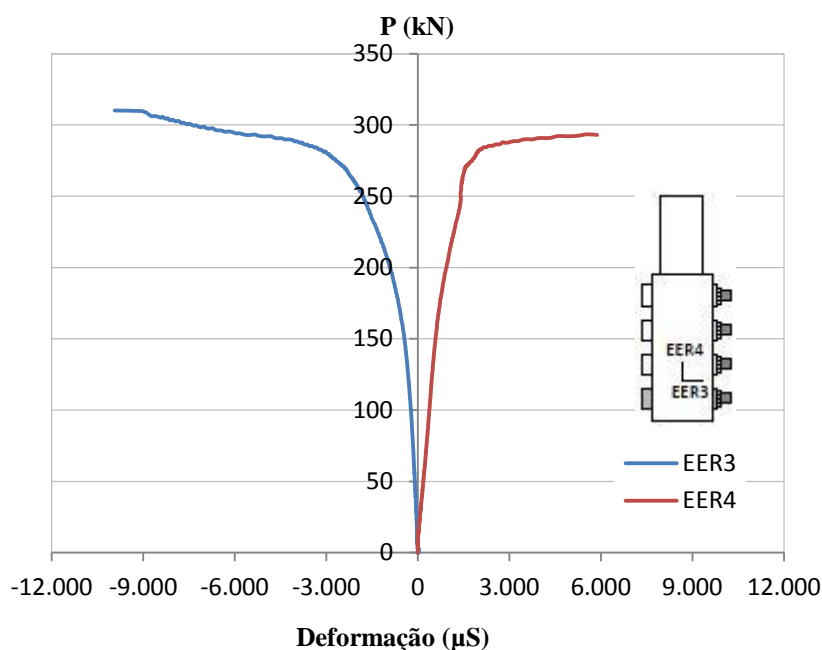


Figura 4.6 - Carga de tração (P) versus deformação na parede do tubo externo, protótipo instrumentado C-4-X2Y2/3.

A Tabela 4.2 apresenta os estados limites para a série C, obtidos pela planilha de cálculo (apresentada no Capítulo 2 – Tabela 2.1), a capacidade resistente da ligação obtida pelo ensaio e o nível de carga com o qual o parafuso instrumentado atinge o seu limite de deformação, denominado por flexão do parafuso.

Tabela 4.2 – Resultados teóricos e experimentais para a capacidade resistente da ligação, protótipos série C.

| Protótipo | Estados limites (valor teórico) | | | Experimental | | Flexão parafuso (kN) |
|------------|---------------------------------|------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|----------------------|
| | Escoamento seção bruta (kN) | Ruptura seção líquida efetiva (kN) | Cisalhamento parafuso (kN) | Capacidade de carga experimental (kN) | Modo de colapso | |
| C-4-X2Y2/1 | 316,50 tubo externo | 390,76 tubo externo | 418,03 | 447,55 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| C-4-X2Y2/2 | 316,50 tubo externo | 390,76 tubo externo | 418,03 | 455,36 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| C-4-X2Y2/3 | 316,50 tubo externo | 390,76 tubo externo | 418,03 | 442,04 | ruptura da seção líquida efetiva | 232,51 |

4.5. Série D

Na Figura 4.7 são apresentadas as curvas carga de tração (P) versus deslocamento para os protótipos da série D. A curva que aparece em linhas tracejadas corresponde ao protótipo instrumentado da série D, D-5-X2Y1/6.

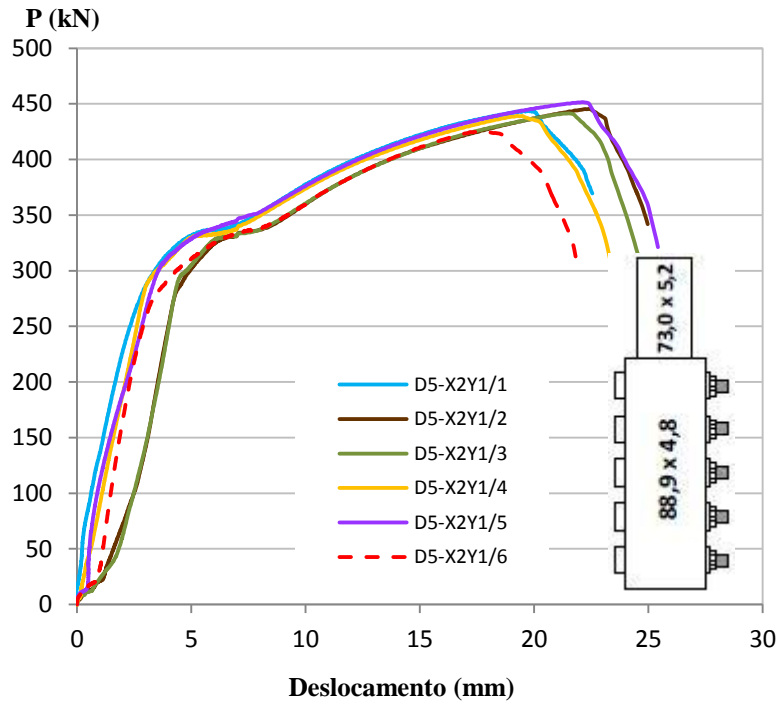


Figura 4.7 - Curvas carga de tração (P) versus deslocamento, série D.

Ao final dos ensaios, em todos os protótipos da série D, foi observada a ruptura da seção líquida efetiva no tubo interno como mostrado na Figura 4.8, que ilustra o protótipo instrumentado D-5-X2Y1/6. Os demais protótipos da série D também apresentaram a mesma configuração de deformação.



Figura 4.8 – Protótipo D-5-X2Y1/6 após o ensaio.

A Figura 4.9 mostra a curva carga de tração (P) versus deformação obtida a partir dos resultados encontrados para os extensômetros (EER1 e EER2) posicionados no parafuso instrumentado do protótipo D-5-X2Y1/6 da série D.

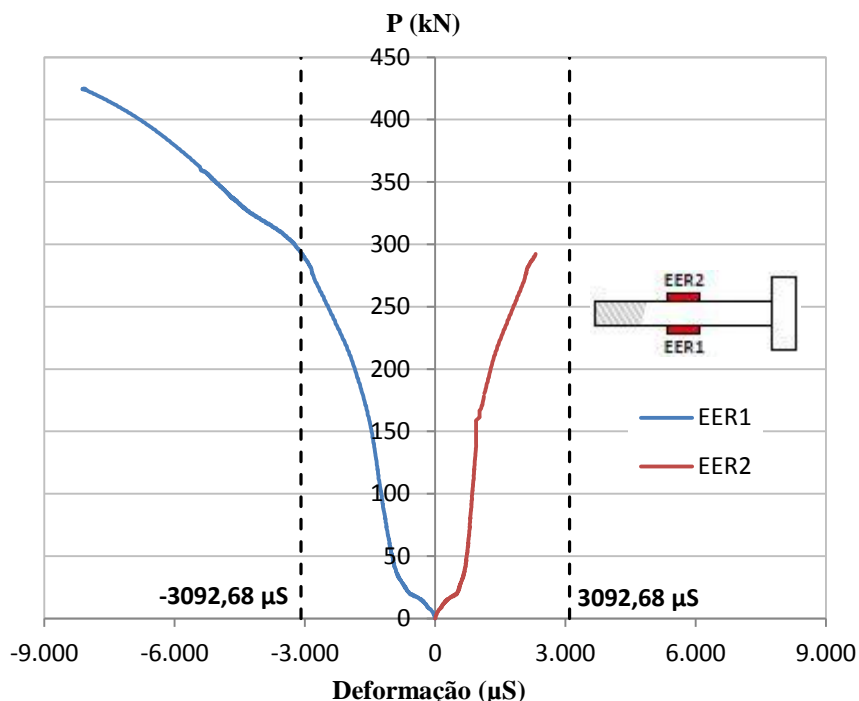


Figura 4.9 - Carga de tração (P) versus deformação no parafuso mais solicitado, série D.

Analogamente ao que ocorre na série C, na série D também é observada a presença de flexão do parafuso. A deformação do parafuso supera o nível de deformação máxima permitida para o material, que corresponde a 3092,68 μS (parafuso com comprimento de 114,3 mm, Tabela 3.5 – Capítulo 3), e aparece marcada no gráfico da Figura 4.9 por linhas pontilhadas.

Para a série D, apesar de a ruptura estar ocorrendo no tubo interno, os extensômetros foram posicionados no tubo externo devido à impossibilidade do posicionamento no tubo interno. A Figura 4.10 mostra a curva carga de tração (P) versus deformação obtida a partir dos resultados encontrados para os extensômetros (EER3 e EER4) posicionados no tubo externo do protótipo D-5-X2Y1/6.

Observa-se pela Figura 4.10 o escoamento do material do tubo externo do protótipo D-5-X2Y1/6, fabricados com aço VMB 300.

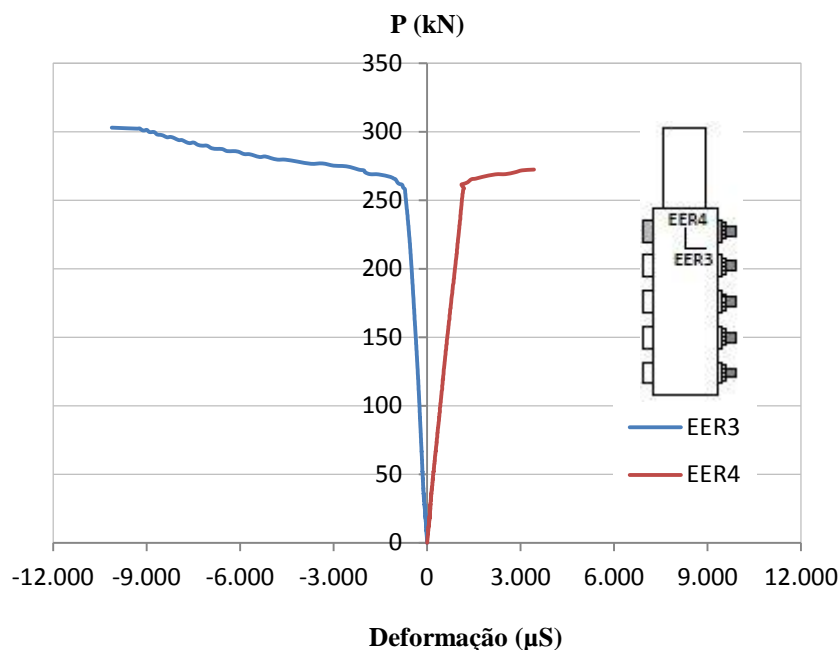


figura 4.10 – Carga de tração (P) versus deformação na parede do tubo externo, protótipo instrumentado D-5-X2Y1/6.

A Tabela 4.3 apresenta os estados limites para a série D, obtidos pela planilha de cálculo (apresentada no Capítulo 2 – Tabela 2.1), a capacidade resistente da ligação obtida pelo ensaio e o nível de carga com o qual o parafuso instrumentado atinge o seu limite de deformação, denominado por flexão do parafuso.

Tabela 4.3 – Resultados teóricos e experimentais para a capacidade resistente da ligação, protótipos série D.

| Protótipo | Estados limites (valor teórico) | | | Experimental | | Flexão do parafuso (kN) |
|------------|---------------------------------|------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | Escoamento seção bruta (kN) | Ruptura seção líquida efetiva (kN) | Cisalhamento parafuso (kN) | Capacidade de carga experimental (kN) | Modo de colapso | |
| D-5-X2Y1/1 | 335,60 tubo interno | 429,58 tubo interno | 522,54 | 444,08 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| D-5-X2Y1/2 | 335,60 tubo interno | 429,58 tubo interno | 522,54 | 445,49 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| D-5-X2Y1/3 | 335,60 tubo interno | 429,58 tubo interno | 522,54 | 441,59 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| D-5-X2Y1/4 | 335,60 tubo interno | 429,58 tubo interno | 522,54 | 439,16 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| D-5-X2Y1/5 | 335,60 tubo interno | 429,58 tubo interno | 522,54 | 451,63 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| D-5-X2Y1/6 | 335,60 tubo interno | 429,58 tubo interno | 522,54 | 424,89 | ruptura da seção líquida efetiva | 293,99 |

4.6. Série E

Os protótipos da série E apresentam variação do número de parafusos na ligação (5 e 6 parafusos). A Figura 4.11 mostra as curvas carga de tração (P) versus deslocamento para os protótipos da série E. As curvas pontilhadas correspondem aos protótipos instrumentados E-5-X3Y3/3 (com 5 parafusos) e E-6-X3Y3/3 (com 6 parafusos).

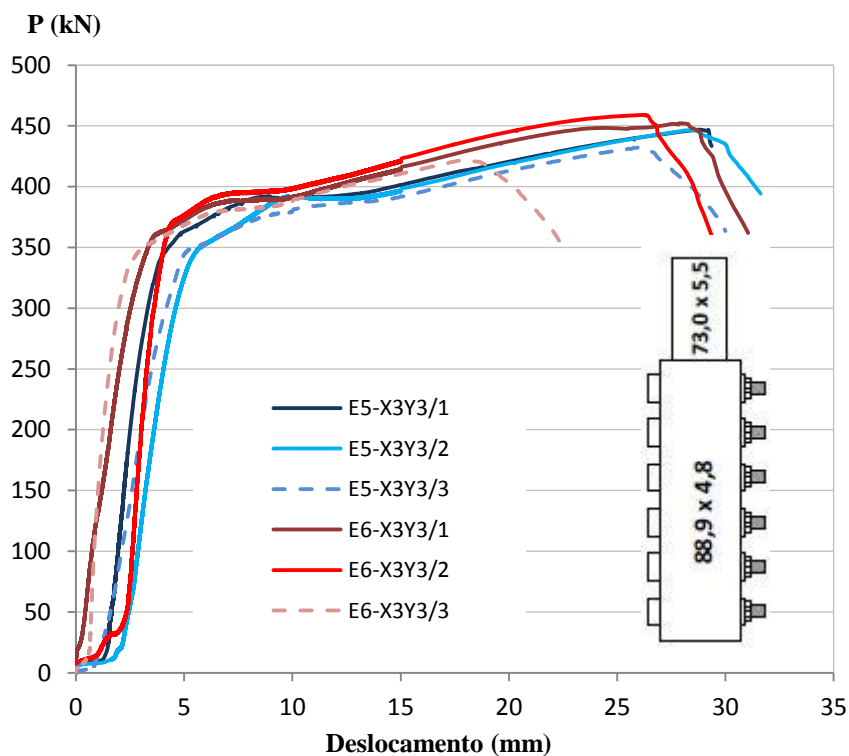


Figura 4.11 - Curvas carga de tração (P) versus deslocamento, série E.

Em todos os ensaios da série E, para protótipos com 5 e 6 parafusos, foi observada a ruptura da seção líquida efetiva no tubo externo ao término dos ensaios. As Figuras 4.12 a e b mostram os protótipos instrumentados da série E com 5 e 6 parafusos após o ensaio. Todos os demais protótipos da série também apresentaram a mesma configuração de deformação.

Observa-se pela Figura 4.11 que os protótipos instrumentados (linhas pontilhadas) apresentam capacidade resistente menor quando comparados com os demais da mesma série. Como o colapso se deu por ruptura da seção líquida efetiva concluiu-se que esta

pequena redução da capacidade resistente ocorre devido ao aumento do diâmetro do furo que foi realizado para permitir o encaixe do parafuso instrumentado.



Figura 4.12 a – Protótipo instrumentado E-5-X3Y3/3 após o ensaio.



Figura 4.12 b – Protótipo instrumentado E-6-X3Y3/3 após o ensaio.

As Figuras 4.13 a e b apresentam a curva carga de tração (P) versus deformação obtida a partir dos resultados encontrados para os extensômetros (EER1 e EER2) posicionados no parafuso instrumentado dos protótipos E-5-X3Y3/3 e E-6-X3Y3/3 da série E.

Assim como nas séries C e D, na série E a deformação do parafuso supera o nível de deformação permitida para o escoamento do material, que corresponde a $3092,68 \mu\text{S}$ (parafuso com comprimento de 114,3 mm, Tabela 3.5 – Capítulo 3), e aparece marcada nos gráficos das Figuras 4.13 a e b por linhas pontilhadas. Para a ligação com 6 parafusos, a ligação se apresenta mais resistente chegando a um nível de carga maior, se comparado com a ligação de 5 parafusos.

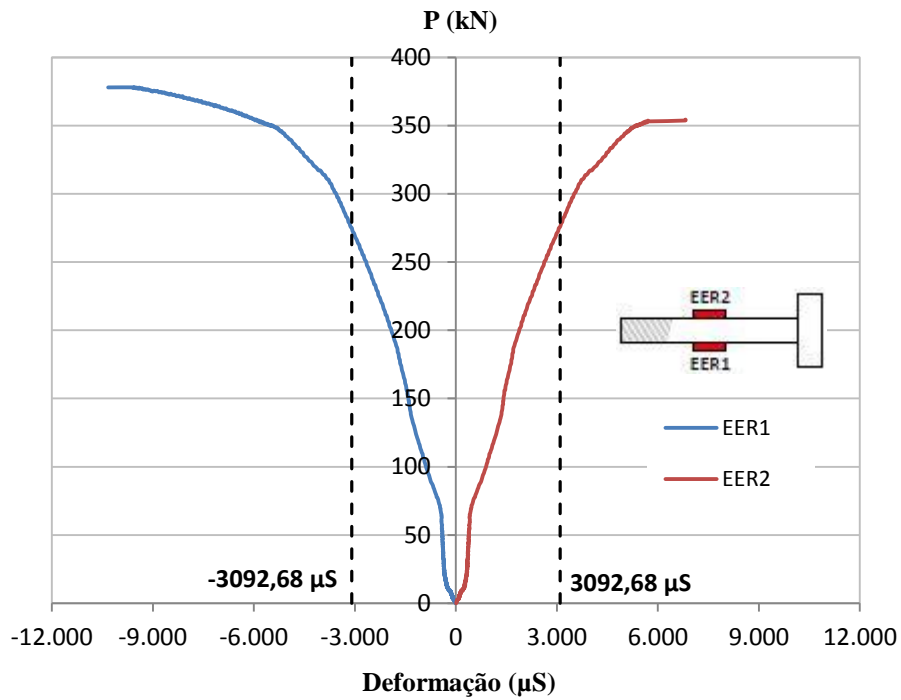


Figura 4.13 a – Carga de tração (P) versus deformação no parafuso mais solicitado, série E com 5 parafusos.

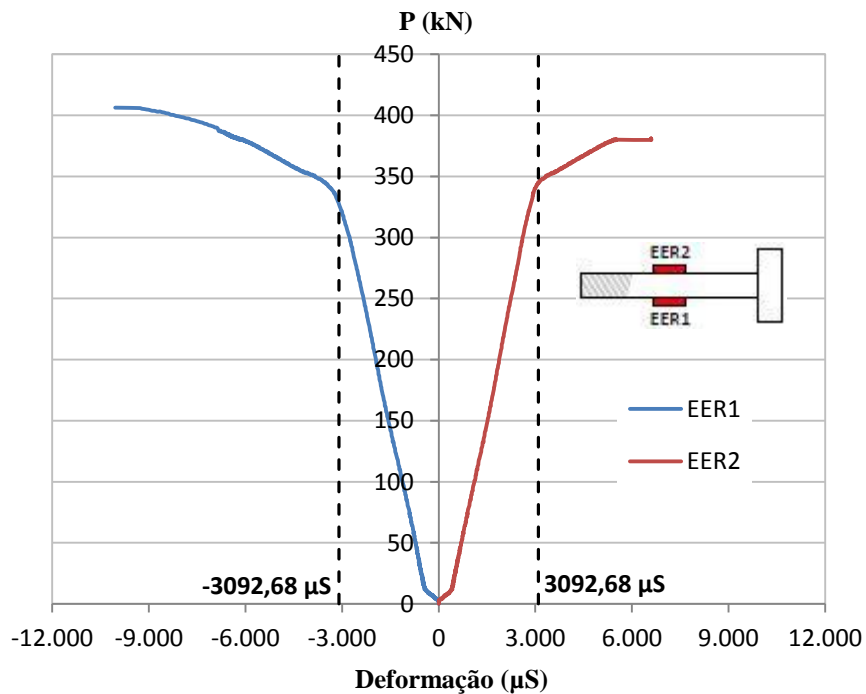


Figura 4.13 b – Carga de tração (P) versus deformação no parafuso mais solicitado, série E com 6 parafusos.

As Figuras 4.14 a e b mostram a curva carga de tração (P) versus deformação obtida a partir dos resultados encontrados para os extensômetros (EER3 e EER4) posicionados nos tubos externos dos protótipos E-5-X3Y3/3 e E-6-X3Y3/3 da série E.

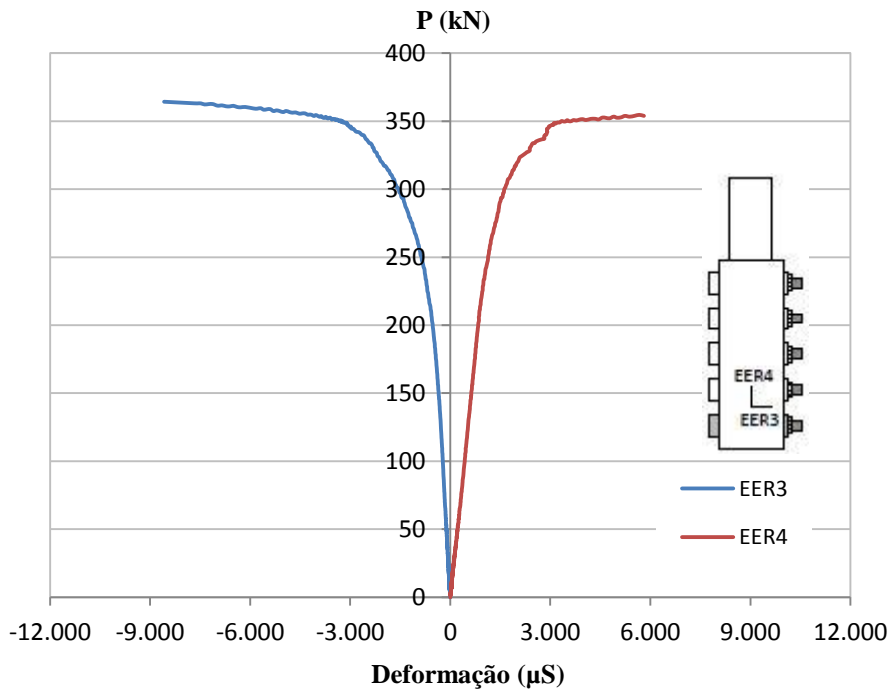


Figura 4.14 a – Carga de tração (P) versus deformação na parede do tubo externo, protótipo E-5-X3Y3/3.

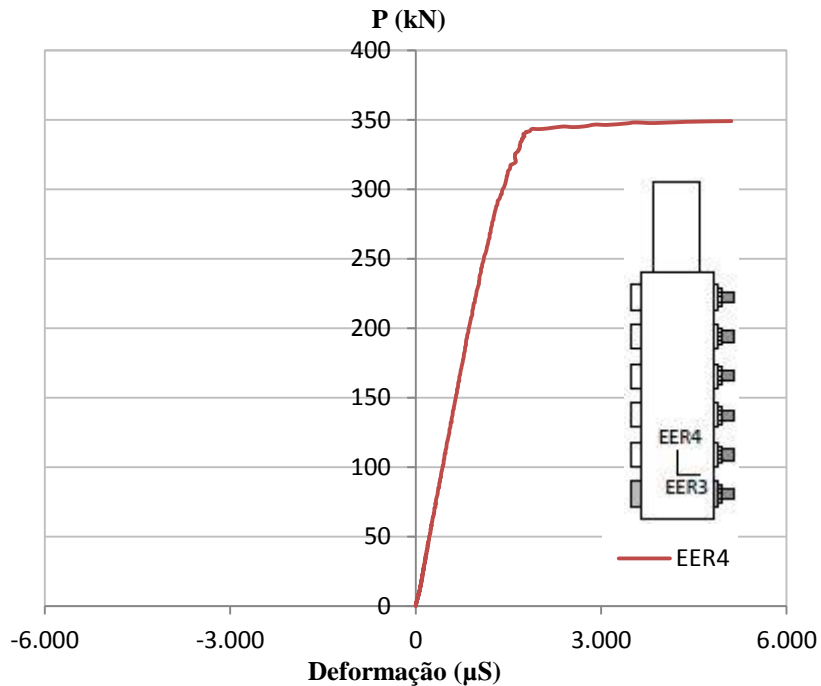


Figura 4.14 b – Carga de tração (P) versus deformação na parede do tubo externo, protótipo E6-X3Y3/3.

As Figuras 4.14 a e b mostram a ocorrência de escoamento do material do tubo externo, fabricados em aço VMB 350. No protótipo E-6-X3Y3/3 o extensômetro EER3 se descolou do tubo logo no início do ensaio e assim a sua leitura foi descartada.

A Tabela 4.4 apresenta os estados limites para a série E, obtidos pela planilha de cálculo (apresentada no Capítulo 2 – Tabela 2.1), a capacidade resistente da ligação obtida pelo ensaio e os níveis de carga com os quais os parafusos instrumentados E-5-X3Y3/3 e E-6-X3Y3/3 atingem o limite de deformação, denominado por flexão do parafuso.

Tabela 4.4 – Resultados teóricos e experimentais para a capacidade resistente da ligação, protótipos série E.

| Protótipo | Estados limites (valor teórico) | | | Experimental | | Flexão do parafuso (kN) |
|------------|---------------------------------|------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | Escoamento seção bruta (kN) | Ruptura seção líquida efetiva (kN) | Cisalhamento parafuso (kN) | Capacidade de carga experimental (kN) | Modo de colapso | |
| E-5-X3Y3/1 | 511,08 tubo externo | 615,78 tubo externo | 522,54 | 447,07 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| E-5-X3Y3/2 | 511,08 tubo externo | 615,78 tubo externo | 522,54 | 446,34 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| E-5-X3Y3/3 | 511,08 tubo externo | 615,78 tubo externo | 522,54 | 432,47 | ruptura da seção líquida efetiva | 275,02 |
| E-6-X3Y3/1 | 511,08 tubo externo | 615,78 tubo externo | 627,05 | 452,33 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| E-6-X3Y3/2 | 511,08 tubo externo | 615,78 tubo externo | 627,05 | 458,95 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| E-6-X3Y3/3 | 511,08 tubo externo | 615,78 tubo externo | 627,05 | 421,91 | ruptura da seção líquida efetiva | 327,65 |

Assim como na série A, pode-se observar que o aumento do número de parafusos na ligação (de 5 para 6 parafusos) também não proporciona ganho significativo de capacidade resistente.

4.7. Série F

A série F foi a última série ensaiada e assim como as séries A e D, apresentou ruptura da seção líquida efetiva do tubo interno. As curvas carga de tração (P) versus deslocamento para os protótipos da série F são apresentadas na Figura 4.15. A curva representada por linha pontilhada corresponde ao protótipo instrumentado F-5-X2Y3/5.

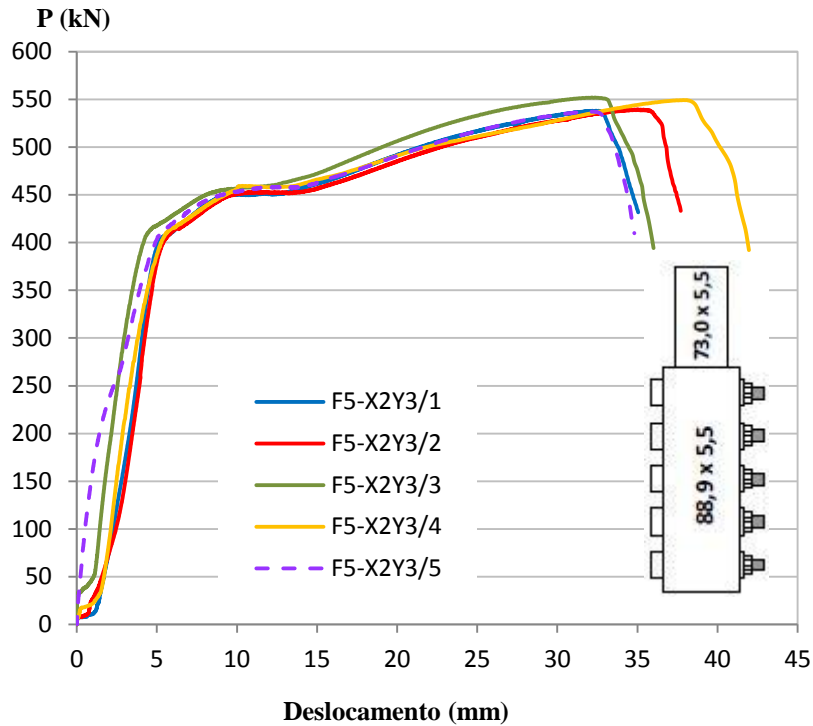


Figura 4.15 - Curvas carga de tração (P) versus deslocamento, série F.

A Figura 4.16 mostra o protótipo instrumentado da série F após o ensaio e os seus respectivos parafusos.

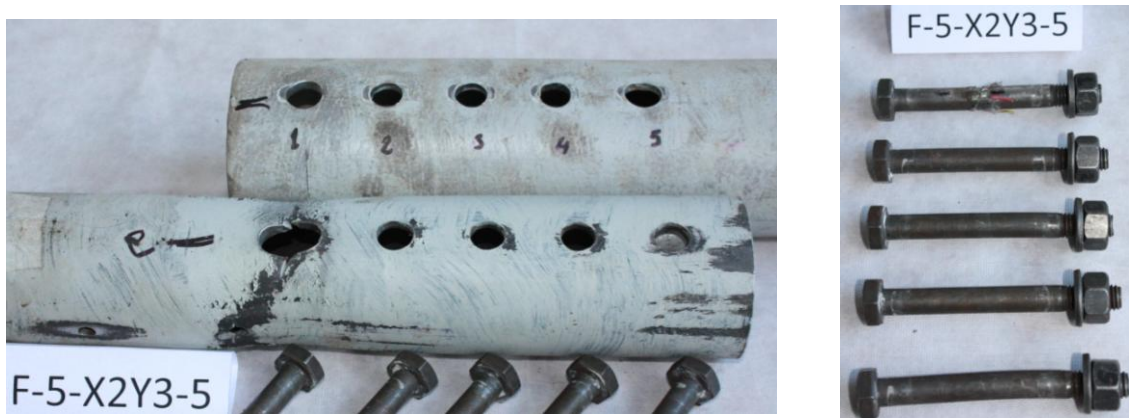


Figura 4.16 – Protótipo instrumentado F-5-X2Y3/5 após o ensaio.

A Figura 4.17 mostra a curva carga de tração (P) versus deformação obtida a partir dos resultados encontrados para os extensômetros (EER1 e EER2) posicionados no parafuso instrumentado do protótipo F-5-X2Y3/5.

Assim como nas séries anteriores, a deformação do parafuso supera o nível de deformação para o escoamento do material, que corresponde a 3092,68 μS (parafuso com comprimento de 114,3 mm, Tabela 3.5 – Capítulo 3) e aparece marcada nos gráfico da Figura 4.17 por linhas pontilhadas.

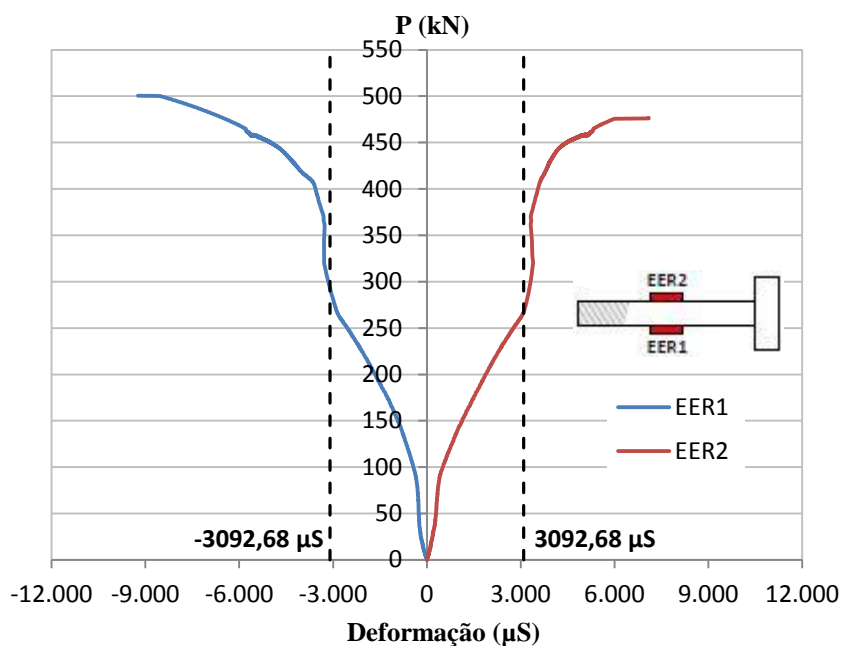


Figura 4.17 - Carga de tração (P) versus deformação no parafuso mais solicitado, protótipo F-5-X2Y3/5.

Analogamente ao que acontece na série D, na série F a ruptura da seção líquida efetiva também ocorre no tubo interno, porém os extensômetros foram posicionados no tubo externo devido à impossibilidade do posicionamento no tubo interno.

A Figura 4.18 mostra a curva carga de tração (P) versus deformação obtida a partir dos resultados encontrados para os extensômetros (EER3 e EER4) posicionados no tubo externo do protótipo instrumentado F-5-X2Y3/5. Observa-se pela Figura 4.18 o escoamento do material do tubo externo do protótipo F5-X2Y3/5 da série F, fabricado em aço VMB 300. O extensômetro EER3 se descolou do tubo logo no início do ensaio e a sua leitura foi descartada.

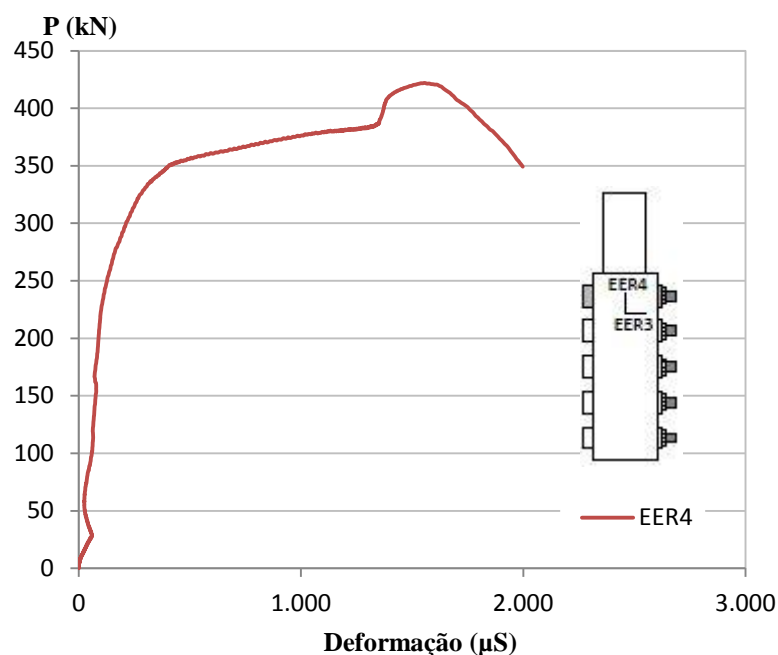


Figura 4.18 – Carga de tração (P) versus deformação na parede do tubo externo, protótipo F-5-X2Y3/5.

A Tabela 4.5 apresenta os estados limites para a série F, obtidos pela planilha de cálculo (apresentada no Capítulo 2 – Tabela 2.1), a capacidade resistente da ligação obtida pelo ensaio e o nível de carga com o qual o parafuso instrumentado atinge o seu limite de deformação, denominado por flexão do parafuso.

Tabela 4.5 – Resultados teóricos e experimentais para a capacidade resistente da ligação, protótipos série F.

| Protótipo | Estados limites (valor teórico) | | | Experimental | | Flexão do parafuso (kN) |
|------------|---------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | Escoamento da seção bruta (kN) | Ruptura da seção líquida efetiva (kN) | Cisalhamento do parafuso (kN) | Capacidade de carga experimental (kN) | Modo de colapso | |
| F-5-X2Y3/1 | 465,94 tubo interno | 544,36 tubo interno | 522,54 | 538,19 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| F-5-X2Y3/2 | 465,94 tubo interno | 544,36 tubo interno | 522,54 | 539,47 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| F-5-X2Y3/3 | 465,94 tubo interno | 544,36 tubo interno | 522,54 | 551,91 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| F-5-X2Y3/4 | 465,94 tubo interno | 544,36 tubo interno | 522,54 | 549,30 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| F-5-X2Y3/5 | 465,94 tubo interno | 544,36 tubo interno | 522,54 | 537,24 | ruptura da seção líquida efetiva | 292,73 |

Na Tabela 4.6 é apresentado um resumo geral de todos os protótipos ensaiados de todas as séries, bem como a resistência para os estados limites baseados na norma brasileira NBR 8800:2008 obtidos pela planilha de cálculo (apresentada no Capítulo 2 – Tabela 2.1), a capacidade resistente da ligação obtida pelo ensaio e o nível de carga com o qual os parafusos instrumentados atingiram o limite de deformação, denominado anteriormente por flexão do parafuso.

Observa-se pela Tabela 4.6 que ocorre uma combinação dos estados limites. Na maioria dos casos é esperado pelo cálculo teórico a ocorrência de falha por escoamento da seção bruta, porém os resultados experimentais mostram a ocorrência de falha por ruptura da seção líquida efetiva.

O estado limite de ruptura da seção líquida efetiva ocorre em nível de carga superior ao escoamento da seção bruta, evidenciando a ocorrência da combinação dos estados limites, e em alguns casos a um nível inferior ao esperado pela teoria, demonstrando a necessidade da consideração de um coeficiente de redução da seção líquida efetiva (C_1).

O estado limite de flexão do parafuso ocorre a um nível de carga bem inferior aos demais, demonstrando ser o predominante no cálculo da ligação. A fim de avaliar o estado limite de flexão do parafuso, foi feita uma análise segundo uma viga biapoiada (considerando o parafuso como uma barra sob flexão e a posição do apoio no contato do parafuso com o tubo externo), carregada com carga concentrada na posição do contato do parafuso com o tubo interno. A análise desse estado limite é apresentada no capítulo 5.

Tabela 4.6 – Resultados teóricos e experimentais para a capacidade resistente da ligação.

| Protótipo | Estados limites (valor teórico) | | | Experimental | | Flexão do Parafuso (kN) |
|------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---|----------------------------------|-------------------------|
| | Escoamento da seção bruta (kN) | Ruptura da seção líquida efetiva (kN) | Cisalhamento do parafuso (kN)* | Capacidade de carga experimental 1 (kN) | Modo de colapso | |
| A-5-X3Y3/1 | 360,76 (tubo interno) | 378,21 (tubo interno) | 522,54 | 447,55 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| A-5-X3Y3/2 | 360,76 (tubo interno) | 378,21 (tubo interno) | 522,54 | 455,36 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| A-4-X3Y3/1 | 360,76 (tubo interno) | 378,21 (tubo interno) | 418,03 | 442,04 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| A-4-X3Y3/2 | 360,76 (tubo interno) | 378,21 (tubo interno) | 418,03 | 450,66 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| A-3-X3Y3/1 | 360,76 (tubo interno) | 378,21 (tubo interno) | 313,53 | 458,70 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| A-2-X3Y3/1 | 360,76 (tubo interno) | 378,21 (tubo interno) | 209,02 | 336,28 | cisalhamento parafuso | - |
| | | | | | | |
| C-4-X2Y2/1 | 316,50 (tubo externo) | 390,76 (tubo externo) | 418,03 | 447,55 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| C-4-X2Y2/2 | 316,50 (tubo externo) | 390,76 (tubo externo) | 418,03 | 455,36 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| C-4-X2Y2/3 | 316,50 (tubo externo) | 390,76 (tubo externo) | 418,03 | 442,04 | ruptura da seção líquida efetiva | 232,51 |
| | | | | | | |
| D-5-X2Y1/1 | 335,60 (tubo interno) | 429,58 (tubo interno) | 522,54 | 444,08 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| D-5-X2Y1/2 | 335,60 (tubo interno) | 429,58 (tubo interno) | 522,54 | 445,49 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| D-5-X2Y1/3 | 335,60 (tubo interno) | 429,58 (tubo interno) | 522,54 | 441,59 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| D-5-X2Y1/4 | 335,60 (tubo interno) | 429,58 (tubo interno) | 522,54 | 439,16 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| D-5-X2Y1/5 | 335,60 (tubo interno) | 429,58 (tubo interno) | 522,54 | 451,63 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| D-5-X2Y1/6 | 335,60 (tubo interno) | 429,58 (tubo interno) | 522,54 | 424,89 | ruptura da seção líquida efetiva | 293,99 |

| Protótipo | Estados limites (valor teórico) | | | Experimental | | Flexão do Parafuso (kN) |
|------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---|----------------------------------|-------------------------|
| | Escoamento da seção bruta (kN) | Ruptura da seção líquida efetiva (kN) | Cisalhamento do parafuso (kN)* | Capacidade de carga experimental 1 (kN) | Modo de colapso | |
| E-5-X3Y3/1 | 511,08 (tubo externo) | 615,78 (tubo externo) | 522,54 | 447,07 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| E-5-X3Y3/2 | 511,08 (tubo externo) | 615,78 (tubo externo) | 522,54 | 446,34 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| E-5-X3Y3/3 | 511,08 (tubo externo) | 615,78 (tubo externo) | 522,54 | 432,47 | ruptura da seção líquida efetiva | 275,02 |
| E-6-X3Y3/1 | 511,08 (tubo externo) | 615,78 (tubo externo) | 627,05 | 452,33 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| E-6-X3Y3/2 | 511,08 (tubo externo) | 615,78 (tubo externo) | 627,05 | 458,95 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| E-6-X3Y3/3 | 511,08 (tubo externo) | 615,78 (tubo externo) | 627,05 | 421,91 | ruptura da seção líquida efetiva | 327,65 |
| | | | | | | |
| F-5-X2Y3/1 | 465,94 (tubo interno) | 544,36 (tubo interno) | 522,54 | 538,19 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| F-5-X2Y3/2 | 465,94 (tubo interno) | 544,36 (tubo interno) | 522,54 | 539,47 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| F-5-X2Y3/3 | 465,94 (tubo interno) | 544,36 (tubo interno) | 522,54 | 551,91 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| F-5-X2Y3/4 | 465,94 (tubo interno) | 544,36 (tubo interno) | 522,54 | 549,30 | ruptura da seção líquida efetiva | - |
| F-5-X2Y3/5 | 465,94 (tubo interno) | 544,36 (tubo interno) | 522,54 | 537,24 | ruptura da seção líquida efetiva | 292,73 |

* Para o estado limite de cisalhamento do parafuso (valor teórico), utilizou-se o valor nominal da resistência à ruptura do material do parafuso ($f_{ub} = 825$ MPa).

PROPOSTA DE FORMULAÇÃO

5.1. Introdução

A partir da análise dos resultados obtidos nos ensaios notou-se a presença de um estado limite na ligação não previsto nas análises teóricas anteriores, caracterizado por uma significativa flexão no parafuso. Este estado limite é considerado no caso de ligações com pinos e a ABNT NBR 8800:2008 estabelece, em seu item 6.4, o critério a ser observado no cálculo do momento fletor resistente do pino como apresentado a seguir:

$$M_{Rd} = 1,2 \cdot W \cdot f_y / \gamma_{a1} \quad (5.1)$$

onde W é o módulo de resistência elástico da seção e f_y é a resistência ao escoamento do material do pino.

Buscando-se fazer uma analogia com o que ocorre no caso de pinos, foi desenvolvida uma metodologia para o cálculo da força unitária no parafuso mais solicitado da ligação, obtida a partir dos resultados experimentais, e definida uma equação para o estado limite de flexão no parafuso. Esta metodologia é apresentada nos itens seguintes.

5.2. Força experimental no parafuso mais solicitado

A tensão limite de escoamento do parafuso mais solicitado e a força resistente da ligação para o estado limite de flexão do parafuso foram obtidas a partir dos ensaios experimentais.

A partir do valor da tensão obtida experimentalmente foi calculado o momento fletor na seção do parafuso mais solicitado, conforme a seguinte expressão:

$$M = W \cdot \sigma_{\text{paraf.}} \quad (5.2)$$

onde M é o momento fletor atuante no parafuso mais solicitado, W é o módulo de resistência elástico da seção do parafuso e $\sigma_{\text{paraf.}}$ é a resistência ao escoamento do material do parafuso.

A Tabela 5.1 apresenta os valores obtidos experimentalmente para a força resistente na ligação, $F_{\text{Rd exp.paraf.}}$, no momento em que o parafuso atinge o nível de deformação máxima para o escoamento do material (denominado no Capítulo 4 por estado limite de flexão do parafuso), a tensão de escoamento obtida pelos extensômetros posicionados nos parafusos, $\sigma_{\text{paraf.}}$ e o momento fletor atuante no parafuso mais solicitado da ligação, M , calculado conforme a equação 5.2.

Tabela 5.1 – Resultados experimentais para o estado limite de flexão do parafuso.

| Protótipo | Ruptura | $F_{\text{Rd exp.paraf.}}$ (kN) | $\sigma_{\text{paraf.}}$ (MPa) | M (N.m) |
|------------------|----------------|---|--|--------------------|
| C-4-X1Y2/3 | Tubo Externo | 232,51 | 713,40 | 286,93 |
| D-5-X2Y1/6 | Tubo Interno | 293,99 | 635,86 | 255,74 |
| E-5-X3Y3/3 | Tubo Externo | 275,02 | 633,00 | 254,59 |
| E-6-X3Y3/3 | Tubo Externo | 327,65 | 636,21 | 255,88 |
| F-5-X2Y3/5 | Tubo Interno | 292,73 | 634,68 | 255,27 |

$F_{\text{Rd exp. paraf.}}$ = Força experimental total na ligação para a flexão do parafuso
 $\sigma_{\text{paraf.}}$ = Tensão no parafuso
 M = Momento fletor unitário no parafuso mais solicitado

Em um estudo realizado para casos de ligações pinadas em chapas metálicas é proposta uma equação para o cálculo da distribuição da força na ligação. Segundo o estudo realizado, se os pinos forem considerados rígidos pode-se dizer que a força na ligação se distribui igualmente em todos os pinos; porém, se forem flexíveis, a distribuição é não uniforme (McGuire, 1968).

Considerando os parafusos da ligação proposta flexíveis, a distribuição da força nos mesmos não é uniforme e, dessa forma, o cálculo da força unitária atuante no parafuso mais solicitado não pode ser feito a partir da divisão da força experimental da ligação, para o estado limite de flexão do parafuso, pelo número de parafusos da ligação.

Buscando-se uma alternativa para quantificar o valor da força unitária experimental atuante no parafuso mais solicitado, foi desenvolvido um método de cálculo fazendo-se uma analogia do parafuso na ligação com uma viga bi-apoiada.

A Figura 5.1 ilustra a teoria de viga bi-apoiada aplicada a ligação, onde a posição do apoio corresponde ao contato do parafuso com o tubo externo, $f_{\text{paraf.}}$ corresponde à força concentrada no parafuso (transmitida pelo contato com o tubo interno) a qual se deseja determinar, d é o braço de alavanca e M é o momento fletor atuante no parafuso e obtido conforme a expressão 5.2.

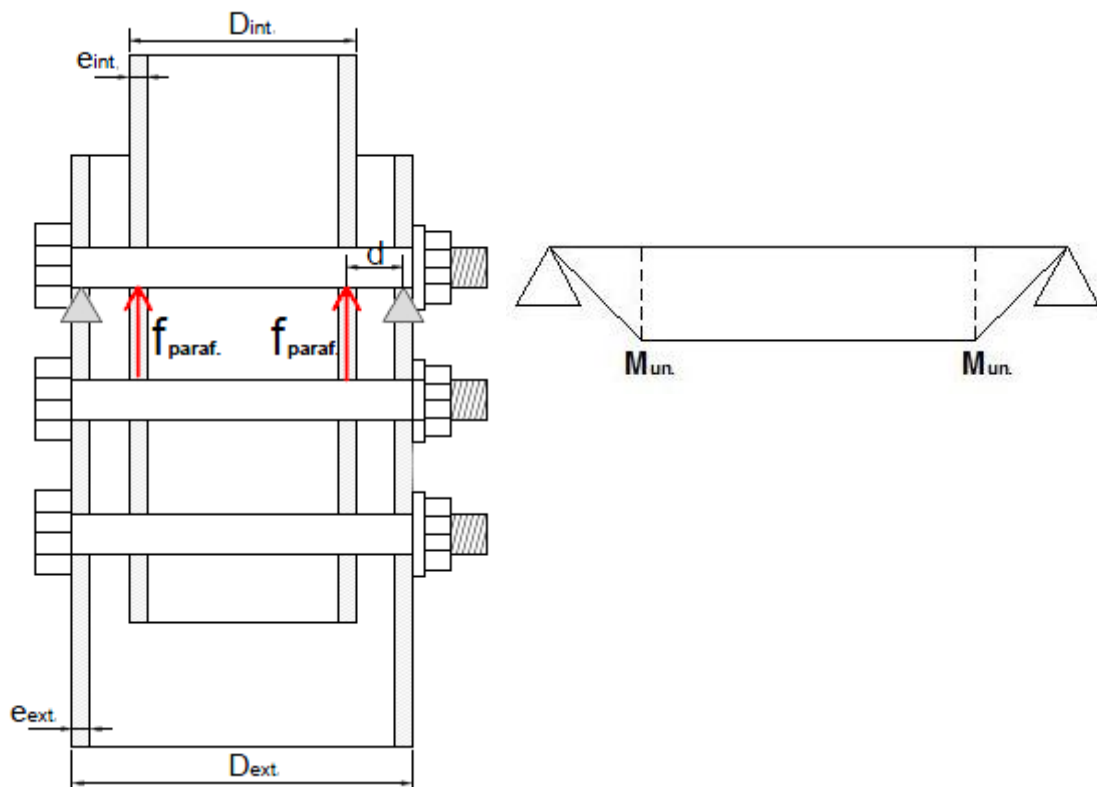


Figura 5.1 – Representação esquemática da barra sob flexão, representada pelo parafuso da ligação, e diagrama de momento.

O braço de alavanca d foi calculado de acordo com a expressão 5.3, apresentada a seguir:

$$d = \frac{(D_{\text{ext.}} - e_{\text{ext.}}) - (D_{\text{int.}} - e_{\text{int.}})}{2} \quad (5.3)$$

onde,

$D_{\text{ext.}}$ = diâmetro externo do tubo externo

$D_{\text{int.}}$ = diâmetro externo do tubo interno

$e_{\text{ext.}}$ = espessura do tubo externo

$e_{\text{int.}}$ = espessura do tubo interno

A força unitária experimental atuante no parafuso mais solicitado ($f_{\text{paraf.}}$) foi obtida pela seguinte expressão:

$$f_{\text{paraf.}} = \frac{M}{d} \quad (5.4)$$

onde, M é o momento fletor no parafuso mais solicitado e d é o braço de alavanca obtido conforme a expressão 5.3.

A Tabela 5.2 apresenta os valores calculados para o braço de alavanca d em cada protótipo, o momento fletor no parafuso, M , e os resultados encontrados para a força experimental, $f_{\text{paraf.}}$, atuante no parafuso mais solicitado da ligação.

Tabela 5.2 – Cálculo da força experimental unitária atuante no parafuso mais solicitado.

| Protótipo | M (N.m) | d (mm) | $f_{\text{paraf.}}$ (kN) |
|------------------|----------------|---------------|--|
| C-4-X1Y2/3 | 286,93 | 8,85 | 32,42 |
| D-5-X2Y1/6 | 255,74 | 8,15 | 31,38 |
| E-5-X3Y3/3 | 254,59 | 8,30 | 30,67 |
| E-6-X3Y3/3 | 255,88 | 8,30 | 30,83 |
| F-5-X2Y3/5 | 255,27 | 7,95 | 32,11 |

M = Momento fletor atuante no parafuso mais solicitado
d = Braço de alavanca
 $f_{\text{paraf.}}$ = Força experimental atuante no parafuso mais solicitado da ligação

Observa-se a partir da Tabela 5.2 que obtido o valor experimental da força atuante no parafuso mais solicitado, a força total na ligação não pode ser calculada como o produto do número de parafusos pela força no parafuso mais solicitado, uma vez que, as forças atuantes nos demais parafusos são menores devido a não uniformidade da distribuição da força total nos parafusos da ligação. Este cálculo levaria a uma força total na ligação bem maior do que a obtida experimentalmente e assim a capacidade resistente da ligação seria majorada.

Considerando que quanto menor o número de parafusos na ligação mais próximos os valores das forças, para o cálculo das forças atuantes nos demais parafusos da ligação, foi sugerida a expressão 5.5 com a qual se buscou descontar a parcela dos dois primeiros parafusos que correspondem aos mais solicitados.

As forças atuantes nos demais parafusos, f_2 , da ligação foram calculadas conforme a seguinte expressão:

$$f_2 = \frac{\left(\frac{F_{Rd \text{ exp.paraf.}}}{2}\right) - 2 * f_{\text{paraf.}}}{n - 2} \quad (5.5)$$

onde $F_{Rd \text{ exp.paraf.}}$ é a força experimental total na ligação para a flexão do parafuso (Tabela 5.1), $f_{\text{paraf.}}$ é a força experimental atuante no parafuso mais solicitado da ligação (Tabela 5.2) e n é o número de parafusos da ligação.

Quando a ligação possui apenas dois parafusos a distribuição da força se dá de forma igual.

A partir do valor obtido para as forças atuantes nos parafusos menos solicitados, foi calculada a força total na ligação como o produto da força em cada parafuso menos solicitado pelo número de parafusos na ligação. O valor obtido é menor que o valor experimental, o que é adequado quanto ao dimensionamento, pois considera todos os parafusos com uma força atuante equivalente a força atuante nos parafusos menos solicitados.

A Tabela 5.3 apresenta os valores obtidos para a força total na ligação considerando os parafusos menos solicitados, obtida pelos resultados experimentais e de formulações propostas.

Tabela 5.3 – Cálculo da força total na ligação considerando os parafusos menos solicitados.

| Protótipo | F_{Rd exp.paraf.} (kN) | M (N.m) | d (mm) | f_{paraf.} (kN) | f₂ (kN) | F_{Total lig.} (kN) |
|------------------|---|----------------|-------------------|------------------------------------|-------------------------------|--|
| C4-X1Y2/3 | 232,51 | 286,93 | 8,85 | 32,42 | 25,71 | 205,65 |
| D5-X2Y1/6 | 293,99 | 255,74 | 8,15 | 31,38 | 28,08 | 280,79 |
| E5-X3Y3/3 | 275,02 | 254,59 | 8,30 | 30,67 | 25,39 | 253,87 |
| E6-X3Y3/3 | 327,65 | 255,88 | 8,30 | 30,83 | 25,54 | 306,50 |
| F5-X2Y3/5 | 292,73 | 255,27 | 7,95 | 32,11 | 27,38 | 273,82 |

F_{Rd exp.paraf.} = Força experimental total na ligação para a flexão do parafuso
M = Momento fletor atuante no parafuso mais solicitado
d = Braço de alavanca
f_{paraf.} = Força experimental atuante no parafuso mais solicitado da ligação
f₂ = Força atuante nos parafusos menos solicitados da ligação
F_{Total lig.} = Força total na ligação considerando os parafusos menos solicitados

5.3. Proposição de expressão teórica para a força resistente total da ligação para o estado limite de flexão do parafuso

A partir de uma análise dos resultados experimentais obtidos, é proposta uma expressão teórica para o cálculo da força resistente total da ligação para o estado limite de flexão do parafuso. A expressão proposta é baseada na equação utilizada para pinos (expressão 5.1) apresentada na norma ABNT NBR 8800:2008.

O momento fletor resistente de cálculo pode ser obtido pela expressão:

$$M_{Rd} = W \cdot f_y / \gamma_{a1} \quad \gamma_{a1} = 1,1 \quad (5.6)$$

onde W é o módulo de resistência elástico da seção do parafuso e f_y é a resistência ao escoamento do material do mesmo.

A força resistente em cada parafuso pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$f = \frac{M_{Rd}}{d} \quad (5.7)$$

onde M_{Rd} é o momento fletor resistente de cálculo no parafuso e d é o braço de alavanca obtido conforme a expressão 5.3 fazendo-se uma analogia do parafuso com uma viga bi-apoiada.

A Força resistente total de cálculo da ligação, para o estado limite de flexão do parafuso, pode ser obtida pela expressão a seguir:

$$F_{Rd \text{ paraf.}} = 2 * f * n * C_{oef.} \quad (5.8)$$

onde f é a força unitária resistente em cada parafuso da ligação obtida conforme 5.7, n é o número de parafusos da ligação e $C_{oef.}$ corresponde a um coeficiente que considera a não uniformidade da distribuição da força por parafusos da ligação.

A partir de uma comparação entre a força experimental resistente total da ligação para o estado limite de flexão do parafuso, $F_{Rd \text{ exp.paraf.}}$, e a força total na ligação considerando os parafusos menos solicitados, $F_{\text{Total lig.}}$, vários coeficientes foram encontrados. Adotou-se o valor de 0,8 por atender a todos os casos analisados e garantir uma força resistente de cálculo inferior a força resistente experimental.

Considerando as expressões propostas anteriormente para o dimensionamento da ligação quanto ao estado limite de flexão do parafuso, a Tabela 5.4 apresenta os valores teóricos obtidos para a força resistente da ligação a partir das expressões propostas.

É importante ressaltar que as expressões propostas estão limitadas ao estado limite de flexão do parafuso, estando os mesmos dispostos em linha, e diâmetro dos tubos variando entre 60,3 e 88,9 mm.

Tabela 5.4 – Valores teóricos, expressões proposta.

| Protótipo | M_{Rd} (N.m) | f(kN) | F_{Rd} paraf. (kN) |
|------------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------------|
| C4-X1Y2/3 | 255,40 | 28,86 | 184,69 |
| D5-X2Y1/6 | 255,40 | 31,34 | 250,69 |
| E5-X3Y3/3 | 255,40 | 30,77 | 246,16 |
| E6-X3Y3/3 | 255,40 | 30,77 | 295,39 |
| F5-X2Y3/5 | 255,40 | 32,13 | 257,00 |

M_{Rd} = Momento fletor resistente de cálculo
f = Força unitária resistente em cada parafuso
F_{Rd} paraf. = Força resistente total de cálculo da ligação

A fim de se fazer uma comparação, a Tabela 5.5 apresenta os resultados obtidos experimentalmente e os resultados obtidos a partir das expressões propostas para o dimensionamento da ligação quanto ao estado limite de flexão do parafuso.

Tabela 5.5 – Valores experimentais versus valores teóricos (expressões propostas).

| Protótipo | Experimental | | | Teórico (expressões propostas) | | |
|------------------|---------------------|--------------------------------|--|---------------------------------------|---------------|-----------------------------------|
| | M (N.m) | f_{paraf.} (kN) | F_{Rd} exp. paraf. (kN) | M_{Rd} (N.m) | f (kN) | F_{Rd} paraf. (kN) |
| C-4-X1Y2/3 | 286,93 | 32,42 | 232,51 | 255,40 | 28,86 | 184,69 |
| D-5-X2Y1/6 | 255,74 | 31,38 | 293,99 | 255,40 | 31,34 | 250,69 |
| E-5-X3Y3/3 | 254,59 | 30,67 | 275,02 | 255,40 | 30,77 | 246,16 |
| E-6-X3Y3/3 | 255,88 | 30,83 | 327,65 | 255,40 | 30,77 | 295,39 |
| F-5-X2Y3/5 | 255,27 | 32,11 | 292,73 | 255,40 | 32,13 | 257,00 |

M_{um} = Momento fletor unitário no parafuso mais solicitado
f_{paraf.} = Força experimental unitária atuante no parafuso mais solicitado da ligação
F_{Rd} exp. paraf. = Força experimental total na ligação para a flexão do parafuso
M_{Rd} = Momento fletor resistente de cálculo
f = Força unitária resistente em cada parafuso
F_{Rd} paraf. = Força resistente total de cálculo da ligação

Observa-se pela Tabela 5.5 que o valor encontrado para a força resistente da ligação para flexão do parafuso, F_{Rd} paraf., pela expressão teórica proposta, é menor que o valor obtido experimentalmente (F_{Rd} exp. paraf.) indicando que a expressão proposta é válida para o dimensionamento da ligação quanto ao estado limite de flexão do parafuso.

A Tabela 5.6 apresenta os valores teóricos obtidos para todos os estados limites verificados para a ligação: escoamento da seção bruta (E.S.B), ruptura da seção líquida efetiva (R.S.L), cisalhamento do parafuso (C.Paraf.), flexão do parafuso ($F_{Rd \text{ paraf.}}$) e os resultados experimentais, obtidos para a capacidade de carga final da ligação ($F_{Rd \text{ exp.}}$) e para o estado limite de flexão do parafuso ($F_{Exp.paraf.}$).

Tabela 5.6 – Estados limites para a ligação proposta

| Protótipo | Estados limites teóricos | | | | Experimental | |
|--|--------------------------|--------------------------|---------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| | E.S.B (kN) | R.S.L (kN) | C.Paraf. (kN) | $F_{Rd \text{ paraf.}}$ (kN) | $F_{Rd \text{ exp.}}$ (kN) | $F_{Rd \text{ exp.paraf.}}$ (kN) |
| C-4-X2Y2/3 | 316,50 (tubo externo) | 390,76 (tubo externo) | 418,03 | 184,69 | 442,04 | 232,51 |
| D-5-X2Y1/6 | 335,60 (tubo interno) | 429,58 (tubo interno) | 522,54 | 250,69 | 424,89 | 293,99 |
| E-5-X3Y3/3 | 511,08 (tubo externo) | 615,78 (tubo externo) | 522,54 | 246,16 | 432,47 | 275,02 |
| E-6-X3Y3/3 | 511,08 (tubo externo) | 615,78 (tubo externo) | 627,05 | 295,39 | 421,91 | 327,65 |
| F-5-X2Y3/5 | 465,94 (tubo interno) | 544,36 (tubo interno) | 522,54 | 257,00 | 537,24 | 292,73 |
| <p>E.S.B = Estado limite de escoamento da seção bruta R.S.L = Estado limite de ruptura da seção líquida efetiva C.Paraf. = Estado limite de cisalhamento do parafuso $F_{Rd \text{ paraf.}}$ = Estado limite de flexão do parafuso $F_{Rd \text{ exp.}}$ = Capacidade de carga resistente final da ligação $F_{Exp.paraf.}$ = Capacidade de carga experimental para o estado limite de flexão do parafuso</p> | | | | | | |

Observa-se pela Tabela 5.6 que o estado limite de flexão do parafuso é dominante no dimensionamento. Apesar da resistência final da ligação atingir um valor alto, é importante a consideração e avaliação deste estado limite

Todos os protótipos apresentaram ruptura da seção líquida efetiva após os ensaios, evidenciando a ocorrência deste estado limite em nível de carga inferior ao previsto pelo dimensionamento e demonstrando a necessidade da consideração de um coeficiente de redução da seção líquida efetiva (C_1) para o dimensionamento quanto a esse estado

limite. A Tabela 5.7 apresenta os estados limites para todas as séries que foram ensaiadas, considerando também o estado limite de flexão do parafuso.

Tabela 5.7 – Estados limites para a ligação proposta, todas as séries

| Protótipo | Estados limites teóricos | | | | Experimental | |
|------------|--------------------------|--------------------------|----------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| | E.S.B (kN) | R.S.L (kN) | C.Paraf. (kN)* | F _{Rd} paraf. (kN) | F _{Rd} exp. (kN) | F _{Rd} exp.paraf. (kN) |
| A-5-X3Y3/1 | 360,76 (tubo interno) | 378,21 (tubo interno) | 522,54 | 321,76 | 447,55 | - |
| A-5-X3Y3/2 | 360,76 (tubo interno) | 378,21 (tubo interno) | 522,54 | 321,76 | 455,36 | - |
| A-4-X3Y3/1 | 360,76 (tubo interno) | 378,21 (tubo interno) | 418,03 | 257,41 | 442,04 | - |
| A-4-X3Y3/2 | 360,76 (tubo interno) | 378,21 (tubo interno) | 418,03 | 257,41 | 450,66 | - |
| A-3-X3Y3/1 | 360,76 (tubo interno) | 378,21 (tubo interno) | 313,53 | 193,05 | 458,70 | - |
| A-2-X3Y3/1 | 360,76 (tubo interno) | 378,21 (tubo interno) | 209,02 | 128,79 | 336,28 | - |
| C4-X2Y2/1 | 316,50 (tubo externo) | 390,76 (tubo externo) | 418,03 | 184,69 | 442,04 | - |
| C4-X2Y2/2 | 316,50 (tubo externo) | 390,76 (tubo externo) | 418,03 | 184,69 | 442,04 | - |
| C4-X2Y2/3 | 316,50 (tubo externo) | 390,76 (tubo externo) | 418,03 | 184,69 | 442,04 | 232,51 |
| D5-X2Y1/1 | 335,60 (tubo interno) | 429,58 (tubo interno) | 522,54 | 250,69 | 424,89 | - |
| D5-X2Y1/2 | 335,60 (tubo interno) | 429,58 (tubo interno) | 522,54 | 250,69 | 424,89 | - |
| D5-X2Y1/3 | 335,60 (tubo interno) | 429,58 (tubo interno) | 522,54 | 250,69 | 424,89 | - |
| D5-X2Y1/4 | 335,60 (tubo interno) | 429,58 (tubo interno) | 522,54 | 250,69 | 424,89 | - |
| D5-X2Y1/5 | 335,60 (tubo interno) | 429,58 (tubo interno) | 522,54 | 250,69 | 424,89 | - |
| D5-X2Y1/6 | 335,60 (tubo interno) | 429,58 (tubo interno) | 522,54 | 250,69 | 424,89 | 293,99 |

| Protótipo | Estados limites teóricos | | | | Experimental | |
|------------|--------------------------|--------------------------|----------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| | E.S.B (kN) | R.S.L (kN) | C.Paraf. (kN)* | F _{Rd} paraf. (kN) | F _{Rd} exp. (kN) | F _{Rd} exp.paraf. (kN) |
| E5-X3Y3/1 | 511,08 (tubo externo) | 615,78 (tubo externo) | 522,54 | 246,16 | 432,47 | - |
| E5-X3Y3/2 | 511,08 (tubo externo) | 615,78 (tubo externo) | 522,54 | 246,16 | 432,47 | - |
| E5-X3Y3/3 | 511,08 (tubo externo) | 615,78 (tubo externo) | 522,54 | 246,16 | 432,47 | 275,02 |
| E6-X3Y3/1 | 511,08 (tubo externo) | 615,78 (tubo externo) | 627,05 | 295,39 | 421,91 | - |
| E6-X3Y3/2 | 511,08 (tubo externo) | 615,78 (tubo externo) | 627,05 | 295,39 | 421,91 | - |
| E6-X3Y3/3 | 511,08 (tubo externo) | 615,78 (tubo externo) | 627,05 | 295,39 | 421,91 | 327,65 |
| F5-X2Y31/1 | 465,94 (tubo interno) | 544,36 (tubo interno) | 522,54 | 257,00 | 537,24 | - |
| F5-X2Y31/2 | 465,94 (tubo interno) | 544,36 (tubo interno) | 522,54 | 257,00 | 537,24 | - |
| F5-X2Y31/3 | 465,94 (tubo interno) | 544,36 (tubo interno) | 522,54 | 257,00 | 537,24 | - |
| F5-X2Y31/4 | 465,94 (tubo interno) | 544,36 (tubo interno) | 522,54 | 257,00 | 537,24 | - |
| F5-X2Y31/5 | 465,94 (tubo interno) | 544,36 (tubo interno) | 522,54 | 257,00 | 537,24 | 292,73 |

E.S.B = Estado limite de escoamento da seção bruta

R.S.L = Estado limite de ruptura da seção líquida efetiva

C.Paraf. = Estado limite de cisalhamento do parafuso

F_{Rd} paraf. = Estado limite de flexão do parafuso

F_{Rd} exp. = Capacidade de carga resistente final da ligação

F_{Exp.paraf.} = Capacidade de carga experimental para o estado limite de flexão do parafuso

* Para o estado limite de cisalhamento do parafuso (valor teórico), utilizou-se o valor nominal da resistência à ruptura do material do parafuso ($f_{ub} = 825$ MPa).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Introdução

A crescente utilização de perfis tubulares no Brasil, devido aos inúmeros benefícios oferecidos, como, ótimo desempenho estrutural aos esforços solicitantes, estética etc, demanda o desenvolvimento e aprimoramento de técnicas e soluções para a aplicação eficiente nas construções civis. Frente a isso, diversas pesquisas no Brasil têm sido realizadas visando a utilização de perfis tubulares na construção civil, como exemplo, Freitas e Requena (2009).

Uma das principais aplicações de perfis de seção transversal tubular na construção civil são os sistemas treliçados como os de cobertura. Estes sistemas possibilitam o vencimento de grandes vãos com peso próprio reduzido. A possibilidade de utilização de vãos padronizados permite a otimização da fabricação e facilita o transporte, porém a utilização de vãos padronizados requer o desenvolvimento de ligações que permitam a posterior união dos mesmos.

Este trabalho teve como objetivo a avaliação de uma nova tipologia de ligação entre perfis tubulares, chamada “luva”, e desenvolver um programa experimental da ligação proposta buscando identificar os possíveis estados limites, capacidade resistente, comportamento e influência da esbeltez dos tubos e do número de parafusos que compõem a ligação.

6.2 Conclusões

Para a análise da ligação proposta, foram montados e ensaiados 28 protótipos constituídos por tubos ligados a partir de parafusos passantes dispostos em linha. De acordo com as variações dimensionais, número de parafusos na ligação e tipo de material dos tubos, os protótipos foram subdivididos em séries, descritas no capítulo 3, e ensaiados sob carregamento de tração.

A metodologia desenvolvida para realização dos ensaios experimentais, também descrita no capítulo 3, apresentou-se adequada e permitiu a obtenção de dados experimentais a partir dos quais se observou a presença de um novo estado limite na ligação, definido no capítulo 4 por flexão do parafuso. Uma análise dos resultados experimentais obtidos possibilitou a proposição de uma expressão para o dimensionamento da ligação quanto ao estado limite de flexão do parafuso (Capítulo 5). Foi possível também, estabelecer algumas conclusões quanto ao comportamento da ligação em relação aos demais estados limites e o método utilizado para o dimensionamento dos mesmos. As conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas a seguir.

- Quanto à metodologia

Devido a geometria dos protótipos ensaiados, foi necessário o desenvolvimento de um sistema que permitisse o encaixe nas garras da máquina de ensaio. O sistema utilizado, apresentado no capítulo 3, constituído por um perfil T soldado aos tubos, se mostrou eficiente e resistente, possibilitando o encaixe do protótipo na máquina e a aplicação adequada da carga de tração de maneira uniforme em toda a seção dos tubos.

A instrumentação dos protótipos e parafusos pelos extensômetros elétricos e LVDT foi adequada para a análise, possibilitando a obtenção de dados experimentais que levaram a resultados conclusivos sobre a capacidade resistente da ligação. Também, a forma de aplicação do carregamento por controle de deslocamento bem como a frequência de aquisição dos dados foram eficientes, permitindo que os ensaios ocorressem de forma controlada e os dados adquiridos pelo sistema automático de aquisição fossem

suficientes para análise. Os resultados experimentais obtidos indicaram que a metodologia de teste utilizada foi adequada.

-Quanto a análise dos resultados

Os resultados experimentais obtidos, apresentados no capítulo 4, evidenciaram a existência de um novo estado limite na ligação, caracterizado pela flexão excessiva do parafuso.

Pela análise dos resultados obtidos através do LVDT, dos extensômetros e por uma observação visual dos protótipos ao final dos ensaios que apresentaram ruptura da seção líquida efetiva, pode-se concluir que o estado limite de flexão do parafuso inicia-se, porém ocorre uma redistribuição de esforços com contribuição do tubo e demais parafusos que de certa forma contribuem para o aumento da capacidade resistente final da ligação, ocorrendo assim uma transferência de um estado limite para outro.

Embora a falha final da ligação tenha ocorrido devido a ruptura da seção líquida efetiva, fica evidente a necessidade da consideração do estado limite de flexão do parafuso no dimensionamento da ligação, pois, apresenta a menor capacidade resistente e caso não ocorra redistribuição de esforços, a ocorrência efetiva deste estado limite pode levar a ligação ao colapso.

Diante da necessidade de consideração do estado limite de flexão do parafuso no dimensionamento da ligação, foi desenvolvida uma expressão para cálculo do mesmo, apresentada no capítulo 5. No desenvolvimento dessa expressão foram propostos métodos para obtenção da força atuante no parafuso mais solicitado da ligação, a partir da consideração do parafuso como uma barra bi-apoiada sob flexão, e consideração da não uniformidade de distribuição da força nos parafusos. Em geral, os métodos utilizados no desenvolvimento da expressão se mostraram coerentes, uma vez que a expressão proposta para o cálculo teórico da capacidade resistente da ligação para o estado limite de flexão do parafuso apresentou bons resultados, sendo conservadores quando comparados com os valores experimentais obtidos, como desejável.

É importante ressaltar que a expressão proposta deve ser aplicada apenas para ligações que apresentem as mesmas configurações dos protótipos apresentados neste trabalho: parafusos dispostos em linha, diâmetro dos tubos variando entre 60,3 e 88,9mm e submetidos a esforços de tração.

Além da identificação do estado limite de flexão do parafuso, foi possível com este trabalho demonstrar a necessidade da consideração de um coeficiente de redução da seção líquida (C_1) para o dimensionamento quanto ao estado limite de ruptura da seção líquida efetiva, uma vez que, a ocorrência desse estado limite aconteceu a um nível de carga inferior ao esperado pelo cálculo teórico.

6.3. Sugestões para trabalhos futuros

Como trabalhos futuros pode-se sugerir:

- ✓ Realização de novas análises experimentais instrumentando-se todos os parafusos da ligação a fim de se obter a real sollicitação de cada um na resistência da ligação (em andamento);
- ✓ Ensaio de tubos com maior variação de esbeltez (relação diâmetro/espessura) buscando-se a proposição de equações mais abrangentes para o estado limite de flexão do parafuso;
- ✓ Ensaio da ligação submetida a carregamento de compressão a fim de analisar o comportamento sobre esse tipo de carregamento, verificando se a possibilidade de utilização como banzo superior de treliça;
- ✓ Verificação do estado limite de flexão do parafuso como estado limite de serviço;
- ✓ Substituição dos parafusos ASTM A325 por parafusos mais resistentes de modo a evitar a ocorrência do estado limite de flexão do parafuso, permitindo assim uma análise mais efetiva do estado limite de ruptura da seção líquida efetiva e investigação do efeito shear lag na ligação;

- ✓ Análise numérica utilizando como calibração os resultados experimentais;
- ✓ Mudança na disposição dos parafusos da ligação, com a adoção de parafusos cruzados, e variação do espaçamento entre furos.
- ✓ Calibração do coeficiente de resistência com a utilização da teoria de confiabilidade estrutural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2008). NBR 8800/2008: Projeto de Estrutura de Aço e de Estrutura Mista de Aço e Concreto de Edifícios. - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

American Institute of Steel Construction - AISC (2010), Specification for Structural Steel Buildings. Manual of Steel Construction. Chicago.

British Steel (1992) Slotted end plate connections. Report No. SL/HED/TN/22/- 92/D, Swinden Laboratories, Rotherham, U.K.

CIDECT (2008) Design Guide for Circular Hollow Section (CHS) Joints Under Predominantly Static Loading. Köln:Verl. TÜV Rheinland.

Freitas, A. M. S., Requena, J. A. V. Ligações em estruturas metálicas tubulares. In: Kripka, M., Chamberlain, Z.M (Org.). UPF Editora, 2009. 221p. cap. 1, p. 7-29. (Novos Estudos e pesquisas em construção metálica).

Hottinger Baldwin Messtechnik (2003a). Manual de operação Spider8 e Spider8-30.

Kulak, G.L., Fisher, J. W. e Struik, J.H. Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints. Chicago, 2001.

Martinez-Saucedo, G. e Packer, J.A. (2006). "Slotted end Connections to Hollow Sections". Canadian Institute of Steel Construction, Toronto, Canada.

Martinez-Saucedo, G. e Packer, J.A. (2009). Static Design Recommendations for Slotted End HSS Connections in Tension. Journal of Constructional Steel Research, 135 (7), 797-805.

Mayor, I. S. (2010) Análise Teórica-Experimental de ligações tipo K e KT composta por perfis tubulares de seção retangular e circular. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.

Mendes, F. C. (2008) Análise teórica-experimental de ligações tipo “T”, “K” e “KT” com perfis metálicos tubulares. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.

McGuire, W. Prentice-Hall International Series in Theoretical and Applied Mechanics, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1968.

Munse, W. H.; Chesson, E. Jr. Riveted and bolted joints: net section design. Journal of Structural Division, ASCE, v. 89, p. 107-126, 1963.

Paula, V. F. de (2006). Análise Experimental e Numérica de Cantoneiras de Aço Formadas a Frio, sob Tração e Conectadas por Parafusos, Publicação nº E. TD 005A/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 167p.

PN 02 125.03-004 Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares.

Salmon, C. G. e Johnson, J. E. Steel Structures – Design and Behavior. EUA: Pearson, 2009.

Saidani, M. Behaviour of welded T-end connection to rectangular hollow section (RHS) in axial tension. Journal of Constructional Steel Research, vol.64, pp.447-453, 2008.

Samara, F. A., 2007. Estudo numérico – experimental de treliças tubulares planas para coberturas padronizadas para grandes vãos. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

V & M do Brasil, Imagination & Inspiração, Coletânea de Estruturas Tubulares, 2010. Belo Horizonte: Tamóios Editora Gráfica Ltda.

Vieira, R. C., Vieira, R. F. Requena, J. A. V and Araújo, A. H.M. (2011). Numerical Analysis of CHS bolted sleeve connections. Eurosteel 2011, Budapest, Hungary.

ANEXO A

**ANEXO A – PLANILHA DE CÁLCULO PARA DIMENSIONAMENTO TEÓRICO DA
LIGAÇÃO PROPOSTA**

| DADOS - TUBO EXTERNO | | |
|----------------------|-------|-----|
| $D_{TE} =$ | 73 | mm |
| $t_{TE} =$ | 5,5 | mm |
| Aço VMB= | 350 | MPa |
| $D_{paraf} =$ | 1/2 | in |
| Tipo de parafuso= | A325N | |
| Nº de parafusos= | 5 | |
| a= | 35 | mm |
| b= | 40 | mm |
| Comp.tubo Externo= | 415 | mm |

| | | | | | |
|-------------------|------|-----------------|-------------------|-------|-----|
| $A_{TE} =$ | 1166 | mm ² | $f_{y_{TE}} =$ | 399,5 | MPa |
| $L_{ef} =$ | 212 | mm | $f_{u_{TE}} =$ | 539,5 | MPa |
| $m_{TE} =$ | 53,0 | mm | $f_{y_{LI}} =$ | 381,0 | MPa |
| $D_{furo} =$ | 14,3 | mm | $f_{u_{LI}} =$ | 479 | MPa |
| $f_{y_{paraf}} =$ | 635 | MPa | $f_{u_{paraf}} =$ | 825 | MPa |

| VERIFICAÇÃO DO TUBO EXTERNO | |
|---|-------------------------------|
| Escoamento da seção bruta | $\Phi R_n = 465,94$ KN |
| Ruptura da seção líquida efetiva - | $\Phi R_{n_{S1}} = 544,36$ KN |
| | $\Phi R_{n_{TE}} = 465,94$ KN |
| Rasg. furo e borda (limite 2.4) | $\alpha = 2,40$ |
| Pressão contato 1 parafuso extremidade= | 180,88 KN |
| Resistência à pressão de contato ligação= | 904,42 KN |

| DADOS - TUBO INTERNO | | |
|----------------------|------|-----|
| $D_{TI} =$ | 60,3 | mm |
| $t_{TI} =$ | 5,5 | mm |
| Aço VMB= | 350 | MPa |
| Comp.tubo Interno= | 415 | mm |

| VERIFICAÇÃO DO PARAFUSO | |
|---|------------------|
| $\Phi v V_n$ (Resis. cisalhamento do parafuso)= | 104,51 KN |
| Resistência cisalhamento ligação TE= | 522,54 KN |
| Resistência da Ligação TE= | 465,94 KN |

| | |
|-----------------------------------|------------------|
| Resistência da Ligação TE= | 360,76 KN |
| Ruptura Tubo Interno | |

SÉRIE A
5 parafusos

| VERIFICAÇÃO DO TUBO INTERNO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------|-----------------|------------|------|----|
| $D_{TI} \leq$ | 56,2 | mm | $L_{ef} =$ | 172 | mm |
| $A_{TI} =$ | 947 | mm ² | $m_{TI} =$ | 43,0 | mm |
| Escoamento da seção bruta | $\Phi R_n =$ | 360,76 | KN | | |
| Ruptura da seção líquida efetiva - | $\Phi R_{n_{S1}} =$ | 378,21 | KN | | |
| | $\Phi R_{n_{TI}} =$ | 360,76 | KN | | |
| Rasg. furo e borda (limite 2.4) | $\alpha =$ | 2,40 | | | |
| Pressão de contato em 1 furo= | | 160,60 | KN | | |
| Resistência cisalhamento ligação TI= | | 803,00 | KN | | |
| Resistência da Ligação TI= | 360,76 | KN | | | |

| DADOS - TUBO EXTERNO | | |
|----------------------|-------|-----|
| $D_{TE} =$ | 73 | mm |
| $t_{TE} =$ | 5,5 | mm |
| Aço VMB= | 350 | MPa |
| $D_{paraf} =$ | 1/2 | in |
| Tipo de parafuso= | A325N | |
| Nº de parafusos= | 4 | |
| a= | 35 | mm |
| b= | 40 | mm |
| Comp.tubo Externo= | 415 | mm |

| DADOS - TUBO INTERNO | | |
|----------------------|------|-----|
| $D_{TI} =$ | 60,3 | mm |
| $t_{TI} =$ | 5,5 | mm |
| Aço VMB= | 350 | MPa |
| Comp.tubo Interno= | 415 | mm |

Resistência da Ligação TE= 360,76 KN

Ruptura Tubo Interno

| | | | | | |
|-------------------|------|-----------------|-------------------|-------|-----|
| $A_{TE} =$ | 1166 | mm ² | $f_{y_{TE}} =$ | 399,5 | MPa |
| $L_{ef} =$ | 212 | mm | $f_{u_{TE}} =$ | 539,5 | MPa |
| $m_{TE} =$ | 53,0 | mm | $f_{y_{LI}} =$ | 381,0 | MPa |
| $D_{furo} =$ | 14,3 | mm | $f_{u_{LI}} =$ | 479 | MPa |
| $f_{y_{paraf}} =$ | 635 | MPa | $f_{u_{paraf}} =$ | 825 | MPa |

| VERIFICAÇÃO DO TUBO EXTERNO | |
|---|-------------------------------|
| Escoamento da seção bruta | $\Phi R_n = 465,94$ KN |
| Ruptura da seção líquida efetiva - | $\Phi R_{n_{S1}} = 544,36$ KN |
| | $\Phi R_{n_{TE}} = 465,94$ KN |
| Rasg. furo e borda (limite 2.4) | $\alpha = 2,40$ |
| Pressão contato 1 parafuso extremidade= | 180,88 KN |
| Resistência à pressão de contato ligação= | 723,53 KN |

| VERIFICAÇÃO DO PARAFUSO | |
|---|------------------|
| $\Phi v V_n$ (Resis. cisalhamento do parafuso)= | 104,51 KN |
| Resistência cisalhamento ligação TE= | 418,03 KN |
| Resistência da Ligação TE= | 418,03 KN |

SÉRIE A

4 parafusos

| VERIFICAÇÃO DO TUBO INTERNO | | | |
|--------------------------------------|-------------------------------|------------|---------|
| $D_{TI} \leq$ | 56,2 mm | $L_{ef} =$ | 172 mm |
| $A_{TI} =$ | 947 mm ² | $m_{TI} =$ | 43,0 mm |
| Escoamento da seção bruta | $\Phi R_n = 360,76$ KN | | |
| Ruptura da seção líquida efetiva - | $\Phi R_{n_{S1}} = 378,21$ KN | | |
| | $\Phi R_{n_{TI}} = 360,76$ KN | | |
| Rasg. furo e borda (limite 2.4) | $\alpha = 2,40$ | | |
| Pressão de contato em 1 furo= | 160,60 KN | | |
| Resistência cisalhamento ligação TI= | 642,40 KN | | |
| Resistência da Ligação TI= | 360,76 KN | | |

| DADOS - TUBO EXTERNO | | |
|----------------------|-------|-----|
| $D_{TE} =$ | 73 | mm |
| $t_{TE} =$ | 5,5 | mm |
| Aço VMB= | 350 | MPa |
| $D_{paraf} =$ | 1/2 | in |
| Tipo de parafuso= | A325N | |
| Nº de parafusos= | 3 | |
| a= | 35 | mm |
| b= | 40 | mm |
| Comp.tubo Externo= | 415 | mm |

| DADOS - TUBO INTERNO | | |
|----------------------|------|-----|
| $D_{TI} =$ | 60,3 | mm |
| $t_{TI} =$ | 5,5 | mm |
| Aço VMB= | 350 | MPa |
| Comp.tubo Interno= | 415 | mm |

Resistência da Ligação TE= 313,53 KN

Ruptura no parafuso

| | | | | | |
|-------------------|------|-----------------|-------------------|-------|-----|
| $A_{TE} =$ | 1166 | mm ² | $f_{y_{TE}} =$ | 399,5 | MPa |
| $L_{ef} =$ | 212 | mm | $f_{u_{TE}} =$ | 539,5 | MPa |
| $m_{TE} =$ | 53,0 | mm | $f_{y_{LI}} =$ | 381,0 | MPa |
| $D_{furo} =$ | 14,3 | mm | $f_{u_{LI}} =$ | 479 | MPa |
| $f_{y_{paraf}} =$ | 635 | MPa | $f_{u_{paraf}} =$ | 825 | MPa |

| VERIFICAÇÃO DO TUBO EXTERNO | |
|---|-------------------------------|
| Escoamento da seção bruta | $\Phi R_n = 465,94$ KN |
| Ruptura da seção líquida efetiva - | $\Phi R_{n_{S1}} = 544,36$ KN |
| | $\Phi R_{n_{TE}} = 465,94$ KN |
| Rasg. furo e borda (limite 2.4) | $\alpha = 2,40$ |
| Pressão contato 1 parafuso extremidade= | 180,88 KN |
| Resistência à pressão de contato ligação= | 542,65 KN |

| VERIFICAÇÃO DO PARAFUSO | |
|---|------------------|
| $\Phi v V_n$ (Resis. cisalhamento do parafuso)= | 104,51 KN |
| Resistência cisalhamento ligação TE= | 313,53 KN |
| Resistência da Ligação TE= | 313,53 KN |

SÉRIE A

3 parafusos

| VERIFICAÇÃO DO TUBO INTERNO | | | |
|------------------------------------|-------------------------------|------------|---------|
| $D_{TI} \leq$ | 56,2 mm | $L_{ef} =$ | 172 mm |
| $A_{TI} =$ | 947 mm ² | $m_{TI} =$ | 43,0 mm |
| Escoamento da seção bruta | $\Phi R_n = 360,76$ KN | | |
| Ruptura da seção líquida efetiva - | $\Phi R_{n_{S1}} = 378,21$ KN | | |
| | $\Phi R_{n_{TI}} = 360,76$ KN | | |
| Rasg. furo e borda (limite 2.4) | $\alpha = 2,40$ | | |
| Pressão de contato em 1 furo= | 160,60 KN | | |
| | 481,80 KN | | |
| Resistência da Ligação TI= | 360,76 KN | | |

| DADOS - TUBO EXTERNO | | |
|----------------------|-------|-----|
| $D_{TE} =$ | 73 | mm |
| $t_{TE} =$ | 5,5 | mm |
| Aço VMB= | 350 | MPa |
| $D_{paraf} =$ | 1/2 | in |
| Tipo de parafuso= | A325N | |
| Nº de parafusos= | 2 | |
| a= | 35 | mm |
| b= | 40 | mm |
| Comp.tubo Externo= | 415 | mm |

| DADOS - TUBO INTERNO | | |
|----------------------|------|-----|
| $D_{TI} =$ | 60,3 | mm |
| $t_{TI} =$ | 5,5 | mm |
| Aço VMB= | 350 | MPa |
| Comp.tubo Interno= | 415 | mm |

Resistência da Ligação TE= 209,02 KN

Ruptura no parafuso

| | | | | | |
|-------------------|------|-----------------|-------------------|-------|-----|
| $A_{TE} =$ | 1166 | mm ² | $f_{y_{TE}} =$ | 399,5 | MPa |
| $L_{ef} =$ | 212 | mm | $f_{u_{TE}} =$ | 539,5 | MPa |
| $m_{TE} =$ | 53,0 | mm | $f_{y_{LI}} =$ | 381,0 | MPa |
| $D_{furo} =$ | 14,3 | mm | $f_{u_{LI}} =$ | 479 | MPa |
| $f_{y_{paraf}} =$ | 635 | MPa | $f_{u_{paraf}} =$ | 825 | MPa |

| VERIFICAÇÃO DO TUBO EXTERNO | |
|---|-------------------------------|
| Escoamento da seção bruta | $\Phi R_n = 465,94$ KN |
| Ruptura da seção líquida efetiva - | $\Phi R_{n_{S1}} = 544,36$ KN |
| | $\Phi R_{n_{TE}} = 465,94$ KN |
| Rasg. furo e borda (limite 2.4) | $\alpha = 2,40$ |
| Pressão contato 1 parafuso extremidade= | 180,88 KN |
| Resistência à pressão de contato ligação= | 361,77 KN |

| VERIFICAÇÃO DO PARAFUSO | |
|---|------------------|
| $\Phi v V_n$ (Resis. cisalhamento do parafuso)= | 104,51 KN |
| Resistência cisalhamento ligação TE= | 209,02 KN |
| Resistência da Ligação TE= | 209,02 KN |

SÉRIE A

2 parafusos

| VERIFICAÇÃO DO TUBO INTERNO | | | |
|------------------------------------|-------------------------------|------------|---------|
| $D_{TI} \leq$ | 56,2 mm | $L_{ef} =$ | 172 mm |
| $A_{TI} =$ | 947 mm ² | $m_{TI} =$ | 43,0 mm |
| Escoamento da seção bruta | $\Phi R_n = 360,76$ KN | | |
| Ruptura da seção líquida efetiva - | $\Phi R_{n_{S1}} = 378,21$ KN | | |
| | $\Phi R_{n_{TI}} = 360,76$ KN | | |
| Rasg. furo e borda (limite 2.4) | $\alpha = 2,40$ | | |
| Pressão de contato em 1 furo= | 160,60 KN | | |
| | 321,20 KN | | |
| Resistência da Ligação TI= | 321,20 KN | | |

| DADOS - TUBO EXTERNO | | |
|----------------------|-------|-----|
| D_{TE} = | 76,1 | mm |
| t_{TE} = | 3,6 | mm |
| Aço VMB= | 300 | MPa |
| D_{paraf} = | 1/2 | in |
| Tipo de parafuso= | A325N | |
| Nº de parafusos= | 4 | |
| a= | 35 | mm |
| b= | 40 | mm |
| Comp.tubo Externo= | 315 | mm |

| DADOS - TUBO INTERNO | | |
|----------------------|------|-----|
| D_{TI} = | 60,3 | mm |
| t_{TI} = | 5,5 | mm |
| Aço VMB= | 350 | MPa |
| Comp.tubo Interno= | 415 | mm |

Resistência da Ligação TE= 316,50 KN

Ruptura Tubo Externo

| | | | | | |
|-------------------|------|-----------------|-------------------|-------|-----|
| A_{TE} = | 820 | mm ² | $f_{y_{TE}}$ = | 386 | MPa |
| L_{ef} = | 228 | mm | $f_{u_{TE}}$ = | 545 | MPa |
| m_{TE} = | 56,9 | mm | $f_{y_{LI}}$ = | 381,0 | MPa |
| D_{furo} = | 14,3 | mm | $f_{u_{LI}}$ = | 479 | MPa |
| $f_{y_{paraf}}$ = | 635 | MPa | $f_{u_{paraf}}$ = | 825 | MPa |

| VERIFICAÇÃO DO TUBO EXTERNO | |
|---|-------------------------------|
| Escoamento da seção bruta | ΦR_n = 316,50 KN |
| Ruptura da seção líquida efetiva - | $\Phi R_{n_{S1}}$ = 390,76 KN |
| | $\Phi R_{n_{TE}}$ = 316,50 KN |
| Rasg. furo e borda (limite 2.4) | α = 2,40 |
| Pressão contato 1 parafuso extremidade= | 119,60 KN |
| Resistência à pressão de contato ligação= | 478,41 KN |

| VERIFICAÇÃO DO PARAFUSO | |
|---|------------------|
| $\Phi v V_n$ (Resis. cisalhamento do parafuso)= | 104,51 KN |
| Resistência cisalhamento ligação TE= | 418,03 KN |
| Resistência da Ligação TE= | 316,50 KN |

SÉRIE C

| VERIFICAÇÃO DO TUBO INTERNO | | | |
|--------------------------------------|-------------------------------|------------|---------|
| $D_{TI} \leq$ | 62,8 mm | L_{ef} = | 172 mm |
| A_{TI} = | 947 mm ² | m_{TI} = | 43,0 mm |
| Escoamento da seção bruta | ΦR_n = 360,76 KN | | |
| Ruptura da seção líquida efetiva - | $\Phi R_{n_{S1}}$ = 378,21 KN | | |
| | $\Phi R_{n_{TI}}$ = 360,76 KN | | |
| Rasg. furo e borda (limite 2.4) | α = 2,40 | | |
| Pressão de contato em 1 furo= | 160,60 KN | | |
| Resistência cisalhamento ligação TI= | 642,40 KN | | |
| Resistência da Ligação TI= | 360,76 KN | | |

| DADOS - TUBO EXTERNO | | |
|----------------------|-------|-----|
| D_{TE} = | 88,9 | mm |
| t_{TE} = | 4,8 | mm |
| Aço VMB= | 300 | MPa |
| D_{paraf} = | 1/2 | in |
| Tipo de parafuso= | A325N | |
| Nº de parafusos= | 5 | |
| a= | 35 | mm |
| b= | 40 | mm |
| Comp.tubo Externo= | 435 | mm |

| DADOS - TUBO INTERNO | | |
|----------------------|------|-----|
| D_{TI} = | 73,0 | mm |
| t_{TI} = | 5,2 | mm |
| Aço VMB= | 250 | MPa |
| Comp.tubo Interno= | 395 | mm |

Resistência da Ligação TE= 335,60 KN

Ruptura Tubo Interno

| | | | | | |
|-------------------|------|-----------------|-------------------|-------|-----|
| A_{TE} = | 1268 | mm ² | $f_{y_{TE}}$ = | 369 | MPa |
| L_{ef} = | 264 | mm | $f_{u_{TE}}$ = | 535 | MPa |
| m_{TE} = | 66,1 | mm | $f_{y_{LI}}$ = | 303,0 | MPa |
| D_{furo} = | 14,3 | mm | $f_{u_{LI}}$ = | 448 | MPa |
| $f_{y_{paraf}}$ = | 635 | MPa | $f_{u_{paraf}}$ = | 825 | MPa |

| VERIFICAÇÃO DO TUBO EXTERNO | |
|---|-------------------------------|
| Escoamento da seção bruta | ΦR_n = 467,97 KN |
| Ruptura da seção líquida efetiva - | $\Phi R_{n_{S1}}$ = 605,04 KN |
| | $\Phi R_{n_{TE}}$ = 467,97 KN |
| Rasg. furo e borda (limite 2.4) | α = 2,40 |
| Pressão contato 1 parafuso extremidade= | 156,55 KN |
| Resistência à pressão de contato ligação= | 782,73 KN |

| VERIFICAÇÃO DO PARAFUSO | |
|---|------------------|
| $\Phi v V_n$ (Resis. cisalhamento do parafuso)= | 104,51 KN |
| Resistência cisalhamento ligação TE= | 522,54 KN |
| Resistência da Ligação TE= | 467,97 KN |

SÉRIE D

| VERIFICAÇÃO DO TUBO INTERNO | | | |
|--------------------------------------|-------------------------------|------------|---------|
| $D_{TI} \leq$ | 72,7 mm | L_{ef} = | 213 mm |
| A_{TI} = | 1108 mm ² | m_{TI} = | 53,2 mm |
| Escoamento da seção bruta | ΦR_n = 335,60 KN | | |
| Ruptura da seção líquida efetiva - | $\Phi R_{n_{S1}}$ = 429,58 KN | | |
| | $\Phi R_{n_{TI}}$ = 335,60 KN | | |
| Rasg. furo e borda (limite 2.4) | α = 2,40 | | |
| Pressão de contato em 1 furo= | 142,01 KN | | |
| Resistência cisalhamento ligação TI= | 710,06 KN | | |
| Resistência da Ligação TI= | 335,60 KN | | |

| DADOS - TUBO EXTERNO | | |
|----------------------|-------|-----|
| $D_{TE} =$ | 88,9 | mm |
| $t_{TE} =$ | 4,8 | mm |
| Aço VMB= | 350 | MPa |
| $D_{paraf} =$ | 1/2 | in |
| Tipo de parafuso= | A325N | |
| Nº de parafusos= | 5 | |
| $a =$ | 35 | mm |
| $b =$ | 40 | mm |
| Comp.tubo Externo= | 435 | mm |

| DADOS - TUBO INTERNO | | |
|----------------------|------|-----|
| $D_{TI} =$ | 73,0 | mm |
| $t_{TI} =$ | 5,5 | mm |
| Aço VMB= | 350 | MPa |
| Comp.tubo Interno= | 435 | mm |

| | | |
|-----------------------------------|---------------|-----------|
| Resistência da Ligação TE= | 465,94 | KN |
| Ruptura Tubo Interno | | |

| | | | | | |
|-------------------|------|-----------------|-------------------|-------|-----|
| $A_{TE} =$ | 1268 | mm ² | $f_{y_{TE}} =$ | 403 | MPa |
| $L_{ef} =$ | 264 | mm | $f_{u_{TE}} =$ | 544,5 | MPa |
| $m_{TE} =$ | 66,1 | mm | $f_{y_{LI}} =$ | 399,5 | MPa |
| $D_{furo} =$ | 14,3 | mm | $f_{u_{LI}} =$ | 539,5 | MPa |
| $f_{y_{paraf}} =$ | 635 | MPa | $f_{u_{paraf}} =$ | 825 | MPa |

| VERIFICAÇÃO DO TUBO EXTERNO | |
|---|-------------------------------|
| Escoamento da seção bruta | $\Phi R_n = 511,08$ KN |
| Ruptura da seção líquida efetiva - | $\Phi R_{n_{S1}} = 615,78$ KN |
| | $\Phi R_{n_{TE}} = 511,08$ KN |
| Rasg. furo e borda (limite 2.4) | $\alpha = 2,40$ |
| Pressão contato 1 parafuso extremidade= | 159,33 KN |
| Resistência à pressão de contato ligação= | 796,63 KN |

| VERIFICAÇÃO DO PARAFUSO | |
|---|------------------|
| ΦV_n (Resis. cisalhamento do parafuso)= | 104,51 KN |
| Resistência cisalhamento ligação TE= | 522,54 KN |
| Resistência da Ligação TE= | 511,08 KN |

SÉRIE E

5 parafusos

| VERIFICAÇÃO DO TUBO INTERNO | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------|-----------------|------------|------|----|
| $D_{TI} \leq$ | 76,3 | mm | $L_{ef} =$ | 212 | mm |
| $A_{TI} =$ | 1166 | mm ² | $m_{TI} =$ | 53,0 | mm |
| Escoamento da seção bruta | $\Phi R_n =$ | 465,94 | KN | | |
| Ruptura da seção líquida efetiva - | $\Phi R_{n_{S1}} =$ | 544,36 | KN | | |
| | $\Phi R_{n_{TI}} =$ | 465,94 | KN | | |
| Rasg. furo e borda (limite 2.4) | $\alpha =$ | 2,40 | | | |
| Pressão de contato em 1 furo= | | 180,88 | KN | | |
| Resistência cisalhamento ligação TI= | | 904,42 | KN | | |
| Resistência da Ligação TI= | 465,94 | KN | | | |

| DADOS - TUBO EXTERNO | | |
|----------------------|-------|-----|
| D_{TE} = | 88,9 | mm |
| t_{TE} = | 4,8 | mm |
| Aço VMB= | 350 | MPa |
| D_{paraf} = | 1/2 | in |
| Tipo de parafuso= | A325N | |
| Nº de parafusos= | 6 | |
| a= | 35 | mm |
| b= | 40 | mm |
| Comp.tubo Externo= | 435 | mm |

| DADOS - TUBO INTERNO | | |
|----------------------|------|-----|
| D_{TI} = | 73,0 | mm |
| t_{TI} = | 5,5 | mm |
| Aço VMB= | 350 | MPa |
| Comp.tubo Interno= | 435 | mm |

Resistência da Ligação TE= 465,94 KN

Ruptura Tubo Interno

| | | | | | |
|-------------------|------|-----------------|-------------------|-------|-----|
| A_{TE} = | 1268 | mm ² | $f_{y_{TE}}$ = | 403 | MPa |
| L_{ef} = | 264 | mm | $f_{u_{TE}}$ = | 544,5 | MPa |
| m_{TE} = | 66,1 | mm | $f_{y_{LI}}$ = | 399,5 | MPa |
| D_{furo} = | 14,3 | mm | $f_{u_{LI}}$ = | 539,5 | MPa |
| $f_{y_{paraf}}$ = | 635 | MPa | $f_{u_{paraf}}$ = | 825 | MPa |

| VERIFICAÇÃO DO TUBO EXTERNO | |
|---|-------------------------------|
| Escoamento da seção bruta | ΦR_n = 511,08 KN |
| Ruptura da seção líquida efetiva - | $\Phi R_{n_{S1}}$ = 615,78 KN |
| | $\Phi R_{n_{TE}}$ = 511,08 KN |
| Rasg. furo e borda (limite 2.4) | α = 2,40 |
| Pressão contato 1 parafuso extremidade= | 159,33 KN |
| Resistência à pressão de contato ligação= | 955,95 KN |

| VERIFICAÇÃO DO PARAFUSO | |
|---|------------------|
| $\Phi v V_n$ (Resis. cisalhamento do parafuso)= | 104,51 KN |
| Resistência cisalhamento ligação TE= | 627,05 KN |
| Resistência da Ligação TE= | 511,08 KN |

SÉRIE E

6 parafusos

| VERIFICAÇÃO DO TUBO INTERNO | | | |
|--------------------------------------|-------------------------------|------------|---------|
| $D_{TI} \leq$ | 76,3 mm | L_{ef} = | 212 mm |
| A_{TI} = | 1166 mm ² | m_{TI} = | 53,0 mm |
| Escoamento da seção bruta | ΦR_n = 465,94 KN | | |
| Ruptura da seção líquida efetiva - | $\Phi R_{n_{S1}}$ = 544,36 KN | | |
| | $\Phi R_{n_{TI}}$ = 465,94 KN | | |
| Rasg. furo e borda (limite 2.4) | α = 2,40 | | |
| Pressão de contato em 1 furo= | 180,88 KN | | |
| Resistência cisalhamento ligação TI= | 1085,3 KN | | |
| Resistência da Ligação TI= | 465,94 KN | | |

| DADOS - TUBO EXTERNO | | |
|----------------------|-------|-----|
| $D_{TE} =$ | 88,9 | mm |
| $t_{TE} =$ | 5,5 | mm |
| Aço VMB= | 300 | MPa |
| $D_{paraf} =$ | 1/2 | in |
| Tipo de parafuso= | A325N | |
| Nº de parafusos= | 5 | |
| a= | 35 | mm |
| b= | 40 | mm |
| Comp.tubo Externo= | 395 | mm |

| DADOS - TUBO INTERNO | | |
|----------------------|------|-----|
| $D_{TI} =$ | 73,0 | mm |
| $t_{TI} =$ | 5,5 | mm |
| Aço VMB= | 350 | MPa |
| Comp.tubo Interno= | 415 | mm |

Resistência da Ligação TE= 465,94 KN

Ruptura Tubo Interno

| | | | | | |
|-------------------|------|-----------------|-------------------|-------|-----|
| $A_{TE} =$ | 1441 | mm ² | $f_{y_{TE}} =$ | 375 | MPa |
| $L_{ef} =$ | 262 | mm | $f_{u_{TE}} =$ | 474 | MPa |
| $m_{TE} =$ | 65,5 | mm | $f_{y_{LI}} =$ | 399,5 | MPa |
| $D_{furo} =$ | 14,3 | mm | $f_{u_{LI}} =$ | 539,5 | MPa |
| $f_{y_{paraf}} =$ | 635 | MPa | $f_{u_{paraf}} =$ | 825 | MPa |

| VERIFICAÇÃO DO TUBO EXTERNO | |
|---|-------------------------------|
| Escoamento da seção bruta | $\Phi R_n = 540,39$ KN |
| Ruptura da seção líquida efetiva - | $\Phi R_{n_{S1}} = 608,50$ KN |
| | $\Phi R_{n_{TE}} = 540,39$ KN |
| Rasg. furo e borda (limite 2.4) | $\alpha = 2,40$ |
| Pressão contato 1 parafuso extremidade= | 158,92 KN |
| Resistência à pressão de contato ligação= | 794,61 KN |

| VERIFICAÇÃO DO PARAFUSO | |
|---|------------------|
| $\Phi v V_n$ (Resis. cisalhamento do parafuso)= | 104,51 KN |
| Resistência cisalhamento ligação TE= | 522,54 KN |
| Resistência da Ligação TE= | 522,54 KN |

SÉRIE F

| VERIFICAÇÃO DO TUBO INTERNO | | | |
|--------------------------------------|-------------------------------|------------|---------|
| $D_{TI} \leq$ | 76,3 mm | $L_{ef} =$ | 212 mm |
| $A_{TI} =$ | 1166 mm ² | $m_{TI} =$ | 53,0 mm |
| Escoamento da seção bruta | $\Phi R_n = 465,94$ KN | | |
| Ruptura da seção líquida efetiva - | $\Phi R_{n_{S1}} = 544,36$ KN | | |
| | $\Phi R_{n_{TI}} = 465,94$ KN | | |
| Rasg. furo e borda (limite 2.4) | $\alpha = 2,40$ | | |
| Pressão de contato em 1 furo= | 180,88 KN | | |
| Resistência cisalhamento ligação TI= | 904,42 KN | | |
| Resistência da Ligação TI= | 465,94 KN | | |