

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

**ANÁLISE TEÓRICO - EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES
TIPO LUVA COMPOSTAS POR PERFIS TUBULARES
COM PARAFUSOS EM LINHA E CRUZADOS**

Lucas Roquete Amparo

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.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Arlene Maria Sarmanho

Co-Orientador: Prof. Dr. Geraldo Donizete de Paula

Ouro Preto, Março de 2014

A526a Amparo, Lucas Roquete.
Análise teórico-experimental de ligações tipo luva compostas por perfis tubulares com parafusos em linha e cruzados [manuscrito] / Lucas Roquete Amparo. - 2014.

80f.: il. color., graf., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Arlene Maria Sarrmanho Freitas.
Co-orientador: Prof. Dr. Geraldo Donizetti de Paula.

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 parafusadas - Teses.
I. Freitas, Arlene Maria Sarrmanho. II. Paula, Geraldo Donizetti de.
III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 624.014.2

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES TIPO LUVA
COMPOSTAS POR PERFIS TUBULARES COM PARAFUSOS EM
LINHA E CRUZADOS**

AUTOR: LUCAS ROQUETE AMPARO

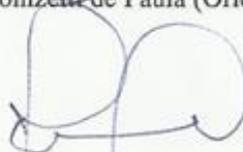
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 10 de março de 2014, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



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



Prof. Dr. Geraldo Donizetti de Paula (Orientador / UFOP)



Prof. Dr. João Alberto Venegas Requena (UNICAMP)



Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima (UERJ)

"A fortaleza é a virtude moral que dá segurança nas dificuldades, firmeza e constância na procura do bem. Ela firma a resolução de resistir às tentações e superar os obstáculos na vida moral. A virtude da fortaleza nos torna capazes de vencer o medo, inclusive da morte, de superar a provação e as perseguições. Dispõe a pessoa a aceitar até a renúncia e o sacrifício de sua vida para defender uma causa justa." "Minha força e meu canto é o Senhor" (Sl 118)

Pe. Fabrício Andrade (Fortes na Tribulação)

*Dedico esta dissertação
Aos meus pais e minhas irmãs*

AGRADECIMENTOS

Ao mestre dos mestres, meu Senhor e meu Deus. Obrigado por ter me escolhido, por me oferecer vosso infinito amor e cuidado. Pela saúde que me destes, pela coragem nos momentos de decisões, e pela força para que eu pudesse sempre seguir em frente, diante de qualquer dificuldade. Obrigado por todos aqueles que colocastes na minha vida.

À minha família, em especial aos meus pais Anete e Mauro, sem o sim de vocês hoje não estaria aqui. Sou eternamente grato por terem aceitado o desejo de Deus: me acolher como filho. Obrigado pelas orações, pelo aprendizado, por todo amor que me oferecestes, pelos conselhos, por mostrarem-me o caminho a seguir. Às minhas irmãs, Maura e Tatiane, ter vocês do meu lado é mais que especial. Obrigado por tudo, por serem meu consolo, meu equilíbrio, meu exemplo e admiração. À minha madrinha, Arlene, pelo carinho, pela presença, principalmente pelo amor que me oferecestes. À toda a minha família por todas as orações e torcidas. Amo vocês.

À Profa. Dr.^a. Arlene Sarmanho por desempenhar o papel de orientadora repleto de sabedoria e educação. Obrigado professora pela amizade, pelos conselhos, pela oportunidade e por todos os ensinamentos partilhados.

Aos amigos do Laboratório de Estruturas, Vinícius, Messias, Gabriel, Juliano, Ana Amélia, Caio e Flávio, pelo aprendizado, pelo companheirismo, pelas ajudas nos ensaios, pelo respeito e amizade.

Aos funcionários do laboratório, João, Dequinha, Sr. Osvaldo e Aloísio pela disposição na realização e preparo dos ensaios.

Aos professores do PROPEC pelos ensinamentos. À Rovia pela disposição.

Aos demais amigos e colegas do PROPEC, em especial ao Everton, pela amizade, pelo companheirismo, farras, estudos, conselhos, por poder compartilhar das alegrias e dificuldades de uma pós-graduação.

A todos os amigos de Ouro Preto, em especial ao Wanderson, Renan, Mateus, Gê, Júnia e Denisson, pela presença, pela amizade, alegria, pelos telefonemas, conselhos e tudo mais... Obrigado a todos do Ministério Universidades Renovadas-MUR (GOU e GPP), família de coração, obrigado pela intercessão e por todo crescimento pessoal e espiritual.

Aos amigos da SMPDU, em especial à Karine, Poly e Wanderson, pela amizade, aprendizado e compreensão.

Aos amigos de Ouro Branco, em especial Fabinho e Ananda, GOU peregrinos e aos meus alunos.

À FAPEMIG pelo apoio financeiro concedido na realização deste trabalho.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

OBRIGADO!

RESUMO

Os perfis tubulares de aço possuem ótimo desempenho estrutural aos esforços de tração, compressão e torção, bem como à combinação dos mesmos. Assim, novas pesquisas tem se intensificado para avaliar o comportamento e a resistência dos elementos desses perfis. Dentre as diversas utilizações de perfis tubulares pode-se citar os sistemas treliçados de coberturas. Nesses sistemas um fator importante é o processo de padronização associado a rapidez de montagem. Este trabalho apresenta um estudo teórico e experimental de uma nova tipologia de ligação denominada luva, desenvolvida para atender aos princípios de facilidade de montagem. A ligação é composta por dois tubos ligados internamente por meio de um terceiro tubo de diâmetro menor com parafusos passantes dispostos em linha e cruzados. Essa ligação facilita a montagem da estrutura como um todo sendo esteticamente mais vantajosa quando comparada com a ligação flangeada, mais usual em perfis tubulares. Foi realizado um programa experimental de ligação luva com parafusos dispostos em linha (longitudinal ao tubo) e cruzados a 90°. Foram realizados 3 ensaios com protótipos com parafusos em linha complementares a resultados obtidos em pesquisa anterior e 12 ensaios para ligação com parafusos cruzados. Os parâmetros considerados para investigação foram: diâmetro e espessura dos tubos e o número de parafusos. Com os resultados experimentais identificou-se o mecanismo de colapso e capacidade resistente da ligação. Pela análise dos dados experimentais e teóricos observou-se que o modo de falha dominante foi o de flexão do parafuso e ainda que há necessidade de determinação de um coeficiente de redução da resistência final da ligação. Com as análises foi proposta uma expressão para a determinação da falha por flexão dos parafusos apresentando-se um novo procedimento para a determinação da capacidade resistente da ligação tipo luva. Os bons resultados obtidos demonstraram a viabilidade da utilização dessa nova tipologia de ligação, desde que observados os mecanismos de falha possíveis.

ABSTRACT

Steel hollow sections have good resistance under tension, compression and torsion loads, considered isolated or combined. Recent researches have been carried out to evaluate the behavior and resistance of these structures. A current use of steel hollow sections is roof trusses, a kind of structure that demands standard procedures and fast assemblage. This work presents an experimental study of a new type of connection called sleeve, developed to attend the assembly process. The connection consists of two tubes internally connected through a third tube with a smaller diameter with passing bolts arranged in line and cross. This connection makes easier the structure assemblage and is aesthetically advantageous if compared to usual flanged connection used in hollow sections. An experimental program of the sleeve connection with bolts in line (along the tube) and crossed at 90° was developed. In this work were tested 3 prototypes with staggered bolts to complement previous research and 12 prototypes with crossed bolts. The parameters considered in investigation were tube diameter and thickness and number of bolts. Experimental results lead to identification of failure mode and the resistance of sleeve connection. The analysis of theoretical and experimental data revealed that the dominant failure mode was bending in the bolts, and indicated a reduction in connection resistance that needs to be quantified. The analysis also let the development of an expression for the determination of flexural failure in the bolts. The results have demonstrated the viability of this new type of connection, but indicated that all possible failure modes need to be carefully checked.

Sumário

Lista de Figuras	X
Lista de Tabelas	XIII
CAPÍTULO 1	1
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo.....	4
1.2 Justificativa.....	4
1.3 Metodologia	5
1.4 Estudos Realizados.....	6
CAPÍTULO 2	18
2 PROGRAMA EXPERIEMENTAL	18
2.1 Definição dos protótipos	18
2.2 Instrumentação e equipamentos de ensaio	24
2.3 Propriedades dos materiais.....	28
2.4 Metodologia de ensaio	30
CAPÍTULO 3	31
3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	31
3.1 Protótipos da SÉRIE LA	31
3.2 Protótipos da SÉRIE CB	39
3.3 Protótipos da SÉRIE CC	48
3.4 Protótipos da SÉRIE CD.....	53
CAPÍTULO 4	59
4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS E PROPOSIÇÃO DA EQUAÇÃO	59
4.1 Análise global da força resistente teórica.....	59
4.2 Protótipos com parafusos em linha	61
4.3 Protótipos com parafusos cruzados.....	68
CAPÍTULO 5	75
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
5.1 Trabalhos futuros.....	78
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Passarela em perfil tubular. (V&M do Brasil,2008).....	1
Figura 1.2 - Tubos estruturais: (a) sem costura; (b) com costura. (Araújo, 2011)	2
Figura 1.3 - Estruturas treliçadas compostas por perfis tubulares: (a) cobertura em estádio multifuncional, Veltins Arena, Alemanha (V&M do Brasil, 2008); (b) cobertura do aeroporto de Hamburgo (V&M do Brasil, 2008).	2
Figura 1.4 - Treliça de cobertura de grandes vãos com detalhes das ligações entre banzos com ligação flangeada. (comunicação pessoal; Viera, 2011)	3
Figura 1.5 - Flange: (a) vista lateral; (b) flange circular; (c) flange retangular/quadrado (Requena e Santos, 2007).	3
Figura 1.6 - (a) Esquema geral das luvas ensaiadas com parafusos em linha (Silva, 2012); (b) Ligação "luva" em sistema treliçado (Vieira, 2011).	5
Figura 1.7 - Ligação tipo "luva" com parafusos cruzados a 90°.	5
Figura 1.8 - Possíveis modos de falha em conexões parafusadas. Adaptada de Salmon e Johnson (2009).	8
Figura 1.9 - Distribuição real das tensões. Adaptada de Salmon e Johnson, 2009.	9
Figura 1.10 - Ligação parafusada entre um perfil cantoneira e uma chapa de ligação (Kulak et al, 2001).	10
Figura 1.11 - Ligação soldada de chapa de ligação concêntrica em perfil de seção tubular circular (Martinez-Saucedo e Packer, 2009).	10
Figura 1.12 - Configuração utilizada para ruptura da seção líquida.....	12
Figura 1.13 - Ilustração dos espaçamentos s e g entre os furos 1 e 2 (ABNT NBR 8800:2008).	13
Figura 1.14 - Representação esquemática da viga sob flexão, representada pelo parafuso da ligação e diagrama de momento fletor (Adaptada de Silva, 2012).	17
Figura 2.1 - Ligação tipo "luva" com parafusos dispostos em linha.	18
Figura 2.2 - Representação dos protótipos com dois tubos para ligações tipo "luva" com parafusos alinhados e cruzados.	19

Figura 2.3 - Representação esquemática da disposição dos parafusos na ligação.	22
Figura 2.4 - Representação dos componentes de fixação do protótipo.	23
Figura 2.5 - Vista do ensaio de ligação tipo luva com parafusos cruzados, equipamentos auxiliares e LVDT.	24
Figura 2.6 - Parafusos preparados para instrumentação.	25
Figura 2.7 - Esquema da instrumentação do conjunto de parafusos. Extensômetros elétricos posicionados na face superior ou inferior ou em ambas.	26
Figura 2.8 - Sistema de aquisição de dados, software Partner.	27
Figura 2.9 - Equipamento de aquisição de dados, Spider 8 e software Catman.	27
Figura 3.1 - Curva carga <i>versus</i> deslocamento, LA-3-X2Y3/1, e modos de falha da ligação.	32
Figura 3.2 - Protótipo LA-3-X2Y3/1 após a realização do ensaio.	33
Figura 3.3 - Curva carga <i>versus</i> deslocamento, protótipos LA-4-X2Y3 e LA-4-X2Y3/2, e modos de falha da ligação.	34
Figura 3.4 - Protótipos LA-4-X2Y3/1 e LA-4-X2Y3/2 após a realização do ensaio.	35
Figura 3.5 - Curva carga <i>versus</i> deslocamento.	36
Figura 3.6 - Curva carga <i>versus</i> deformação, parafusos do protótipo LA-3-X2Y3/1.	37
Figura 3.7 - Curva carga <i>versus</i> deformação, parafusos do protótipo LA-4-X2Y3/1.	38
Figura 3.8 - Curva carga <i>versus</i> deformação, parafusos do protótipo LA-4-X2Y3/2.	39
Figura 3.9 - Curva carga <i>versus</i> deslocamento, CB-3-X2Y3, e modos de falha da ligação.	40
Figura 3.10 - Curva carga <i>versus</i> deslocamento, CB-4-X2Y3, e modos de falha da ligação.	41
Figura 3.11 - Rompimento do tubo interno, série CB com 3 parafusos.	42
Figura 3.12 - Rompimento do tubo interno, série CB com 4 parafusos.	43
Figura 3.13 - Curva carga <i>versus</i> deslocamento, CC-5-X2Y3, e modos de falha da ligação.	49
Figura 3.14 - Curva carga <i>versus</i> deslocamento, protótipos CC-5-X2Y3/1 e CC-5-X2Y3/2.	50

Figura 3.15 - Rompimento do tubo interno, série CC.	51
Figura 3.16 - Detalhe do rompimento em diagonal dos tubos internos, série CC.....	51
Figura 3.17 - Curva carga versus deslocamento, protótipos CD-6-X2Y3.	54
Figura 3.18 - Curva carga <i>versus</i> deslocamento, desconsiderando o deslocamento inicial, protótipos CD-6-X2Y3.	55
Figura 3.19 - Rompimento do tubo interno, série CD.	56
Figura 4.1 - Força de flexão experimental, normalizada em relação à força de escoamento do aço versus a espessura do tubo de ruptura.	63
Figura 4.2 - Força de flexão experimental, normalizada em relação à força de escoamento do aço versus o diâmetro do tubo de ruptura.	64
Figura 4.3 - Esquema da determinação de f_b	65
Figura 4.4 - Relação: (a) espessura e carga máxima e (b) diâmetro e carga máxima. ...	69
Figura 4.5 - Esquema da determinação de f_b	71

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Identificação do tipo de aço dos tubos na nomenclatura dos protótipos.	20
Tabela 2.2 - Identificação das séries dos protótipos ensaiados.	20
Tabela 2.3 - Comprimento da mesa do perfil "T". (Fonte: Silva (2012)).....	23
Tabela 2.4 - Resultados da caracterização do aço dos tubos.	28
Tabela 2.5 - Resultado da caracterização do aço dos parafusos.	28
Tabela 2.6 - Séries dos protótipos e suas respectivas características.	29
Tabela 3.1 - Curvas carga <i>versus</i> deslocamento, série CB, e cargas máximas.	44
Tabela 3.2 - Curvas carga <i>versus</i> deformação dos parafusos, série CB.	45
Tabela 3.3 - Curvas carga <i>versus</i> deformação dos parafusos, série CC.	52
Tabela 3.4 - Curvas carga <i>versus</i> deformação dos parafusos, série CD.	57
Tabela 4.1 - Valores dos modos de falha teórico e experimental para os protótipos das séries ensaiadas.	60
Tabela 4.2 - Características dos protótipos em linha.	62
Tabela 4.3 - Resultados experimentais e resultados da equação proposta.	67
Tabela 4.4 - Características dos protótipos com parafusos cruzados.	68
Tabela 4.5 - Resultados experimentais e resultados da equação proposta.	72

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

A utilização de estruturas metálicas apresenta um grande crescimento, principalmente em grandes edificações como, por exemplo, supermercados, shoppings, ginásios, aeroportos. A velocidade de projeto, fabricação e montagem é uma das grandes vantagens dos perfis em estruturas metálicas, que são sistemas pré-fabricados, o que está tornando perceptível a troca de estruturas tradicionais de concreto armado por estruturas metálicas (Samarra, 2007).

A grande utilização de perfis tubulares em construções metálicas pode ser associada a várias vantagens como alta resistência a torção, a cargas axiais e a efeitos combinados, além de fatores estéticos que permitem alternativas inovadoras de projetos e uma economia de material. Na Figura 1.1 é exemplificado a utilização de perfis tubulares em passarelas de pedestres.

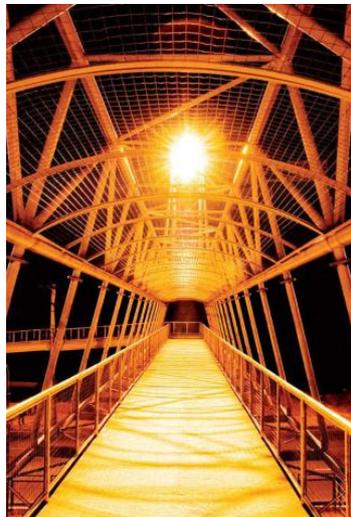


Figura 1.1 - Passarela em perfil tubular. (V&M do Brasil,2008)

Os tubos podem ser fabricados de duas maneiras, sem e com costura. O primeiro por meio de um processo de laminação a quente, onde a partir de uma barra circular maciça de aço é laminado o perfil tubular sem costura, por processo de extrusão, Figura 1.2 (a). Já os perfis tubulares com costura são produzidos a partir de chapas de aço que são dobradas e soldadas longitudinalmente, Figura 1.2 (b), Araújo (2011).



Figura 1.2 - Tubos estruturais: (a) sem costura; (b) com costura. (Araújo, 2011)

Os perfis tubulares também podem ser utilizados em estruturas mistas, sendo preenchidos com concreto, adicionando capacidade resistente à compressão e melhoria no comportamento estrutural em situação de incêndios. Os perfis tubulares quando comparados às seções abertas, possuem menor área reduzindo custos, como por exemplo, pinturas e proteção ao fogo, facilitando a manutenção (Requena e Santos, 2007).

A eficiência dos perfis tubulares quando solicitados a esforços axiais é uma das razões pela qual são utilizados em sistemas estruturais treliçados. Outro fator para utilização desses perfis em treliças é vencer grandes vãos livres com peso próprio reduzido. A Figura 1.3 apresenta exemplos de utilização de treliças de coberturas com perfis tubulares de seção circular.

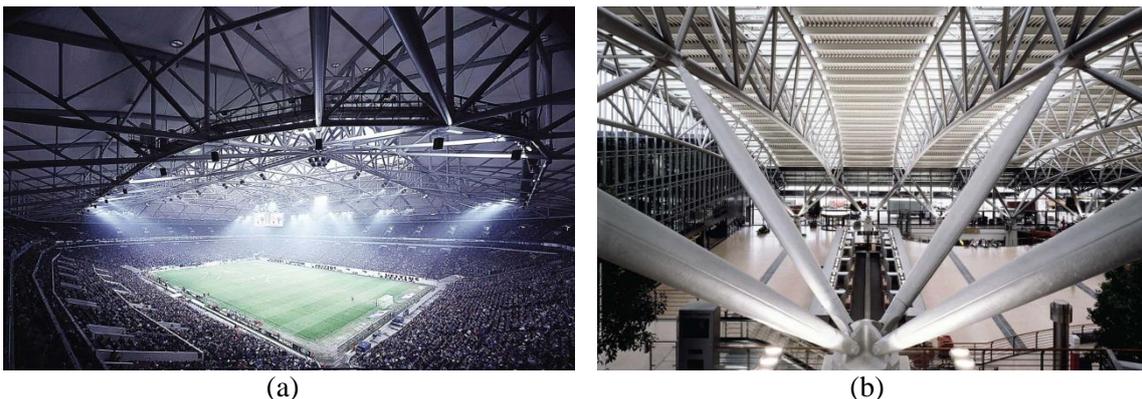


Figura 1.3 - Estruturas treliçadas compostas por perfis tubulares: (a) cobertura em estádio multifuncional, Veltins Arena, Alemanha (V&M do Brasil, 2008); (b) cobertura do aeroporto de Hamburgo (V&M do Brasil, 2008).

Os custos de um edifício metálico estão associados aos processos de fabricação e montagem e também ao sistema de ligação da estrutura. Dependendo das necessidades

construtivas, diferentes tipos de ligações podem ser utilizados no sistema estrutural treliçado, resultando no tipo de treliça a ser usada.

No caso de emendas em barras de treliças é comum o uso de ligações tipo flangeada. A Figura 1.4 ilustra um sistema de cobertura para grandes vãos com o princípio de um sistema estrutural treliçado com o uso de ligações flangeadas.

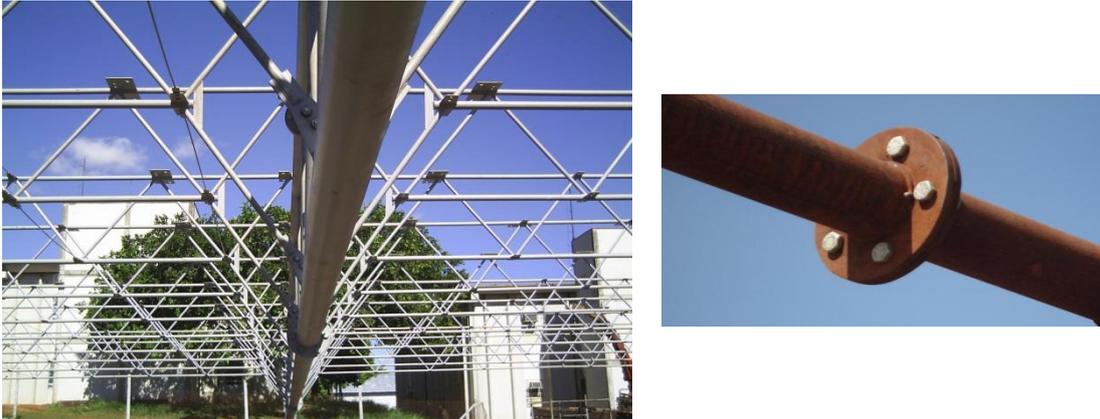


Figura 1.4 - Treliça de cobertura de grandes vãos com detalhes das ligações entre banzos com ligação flangeada. (comunicação pessoal; Viera, 2011)

Os flanges são formados por duas placas soldadas na extremidade dos tubos. A união entre esses tubos é viabilizada através destas placas que são ligadas por meio de parafusos, Figura 1.5 (a) (b) e (c) e pode ser realizada in loco. A importância dessas ligações deve-se ao fato dos flanges permitirem a racionalização da fabricação e da montagem de uma estrutura metálica, possibilitando a subdivisão de barras e módulos mais longos, facilitando, dessa forma, o transporte.

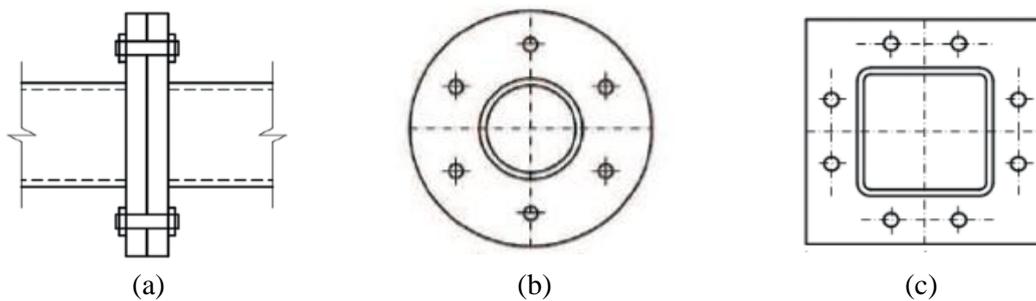


Figura 1.5 - Flange: (a) vista lateral; (b) flange circular; (c) flange retangular/quadrado (Requena e Santos, 2007).

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é a análise do comportamento de uma nova tipologia de ligação chamada luva, visando obter uma metodologia de projeto para seu dimensionamento baseado em prescrições normativas e considerando parafusos em linha e cruzados.

Assim, a ligação foi avaliada experimentalmente visando o desenvolvimento de formulação teórica para os estados limites possíveis.

1.2 Justificativa

Este trabalho apresenta um estudo experimental de uma nova tipologia de ligação denominada luva, desenvolvida para atender aos princípios de facilidade de montagem. A ligação é composta por dois tubos ligados internamente por meio de um terceiro tubo de diâmetro menor com parafusos passantes dispostos em linha ou cruzados. Essa ligação facilita a montagem da estrutura como um todo sendo esteticamente mais vantajosa quando comparada com a ligação flangeada, mais usual em perfis tubulares.

A luva possibilita a continuidade do perfil de maneira harmoniosa e elegante tornando-se uma ligação mais discreta na estrutura real. Com os resultados experimentais identifica-se o mecanismo de colapso e capacidade resistente da ligação. Os parâmetros considerados para investigação foram: diâmetro e espessura dos tubos e o número de parafusos.

Assim, o desenvolvimento deste trabalho é avaliar esse novo tipo de ligação entre perfis tubulares, denominado por “luva” com a finalidade de aplicação em sistemas estruturais treliçados.

1.3 Metodologia

A partir de um estudo concluído por Silva (2012) foi proposta uma formulação para a tipologia de ligação luva com um arranjo de furação com parafusos em linha (Figura 1.6(a) e 1.6(b)). No entanto, a falta de uma avaliação da distribuição da carga nos parafusos da ligação, indicou a necessidade da realização de novos ensaios com instrumentação em todos os parafusos, visando uma avaliação mais precisa do comportamento dessa ligação.

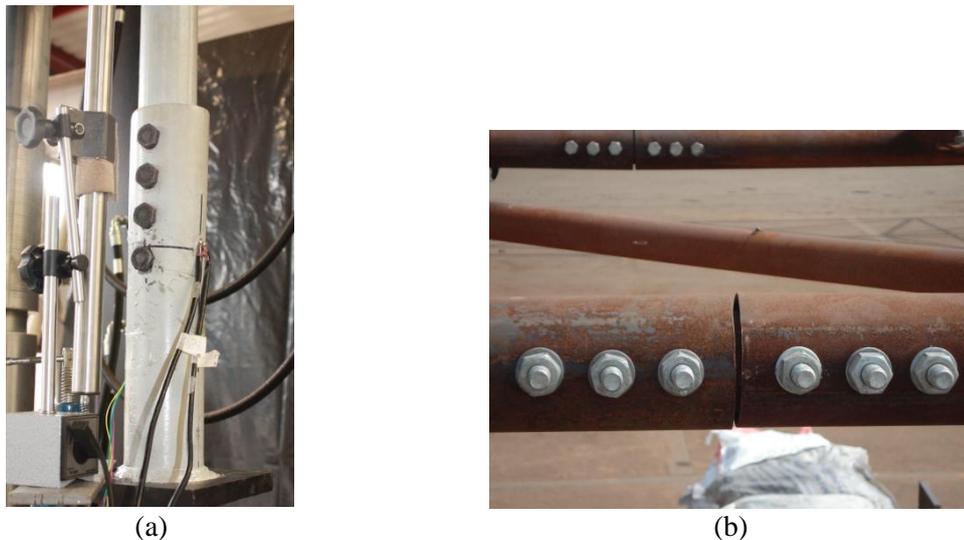


Figura 1.6 - (a) Esquema geral das luvas ensaiadas com parafusos em linha (Silva, 2012); (b) Ligação "luva" em sistema treliçado (Vieira, 2011).

Além do arranjo com parafusos alinhados, foi proposto um arranjo cruzado complementar de furos (Figura 1.7) e uma nova série de ensaios foi realizada. Nos ensaios foram observados os modos de falha desenvolvidos na ligação. No caso da flexão dos parafusos foi analisada a distribuição da força total da ligação para cada parafuso. A partir dos resultados foi proposta uma nova formulação para o arranjo de furos em linha e cruzados. No caso da flexão dos parafusos não ser o modo de falha da ligação, foi avaliado o modo de falha dominante considerando-se as prescrições da NBR8800:2008 com adaptações em alguns modos.

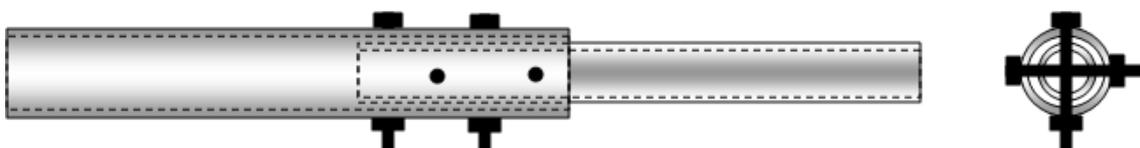


Figura 1.7 - Ligação tipo "luva" com parafusos cruzados a 90°.

1.4 Estudos Realizados

Com o passar dos anos a evolução tecnológica fez com que vários países dessem início a elaboração e aprimoramento de normas de projeto para o dimensionamento, fabricação e construção de estruturas metálicas.

A evolução nos processos dos projetos, fabricação e montagem de estruturas metálicas, juntamente com a introdução de materiais de construção de alto desempenho, têm conduzido a alterações na filosofia de dimensionamento de estruturas metálicas e de suas ligações. As ligações são dispositivos utilizados para transmitir forças entre elementos estruturais. Em estruturas metálicas pode-se usar ligações soldadas e ligações parafusadas, sendo que as ligações parafusadas estão sendo cada vez mais utilizadas pela sua facilidade de fabricação e montagem (Silva e Santiago, 2003).

Diversas pesquisas têm sido realizadas visando a utilização perfis tubulares na construção civil, Choo *et al* (2006), Beke e Kvocak (2008), Fleischer e Puthli (2006), Kindman *et al* (2008) e Freitas e Requena (2009). Observa-se que para as ligações diversas análises experimentais e numéricas têm sido realizadas. Inúmeras pesquisas estão sendo estudadas no país com o objetivo de se desenvolver novas técnicas e propor soluções para adequada utilização desses perfis. Trabalhos realizados por Mendes (2008), Freitas e Requena (2009), Mayor (2010), Vieira *et al* (2011), Silva (2012) podem ser citados no âmbito de estudos relacionados à ligações em estruturas metálicas.

A união de elementos de uma estrutura com perfil tubular pode ser feita por meio de ligação soldada ou chapas parafusadas. Diversos estudos estão sendo realizados para avaliar o comportamento das ligações com perfis tubulares. Para ligações de campo, principalmente barras de treliças, é comum a utilização de flanges (Figura 1.5). Essas ligações permitem que peças longas sejam subdivididas, facilitando o transporte e a montagem das mesmas. Neste sentido um estudo de um sistema de cobertura com a utilização de perfis tubulares com ligações flangeadas foi apresentado por Samarra (2007).

Nesse estudo tem-se a continuidade de pesquisas desenvolvidas por meio de análise experimental, teórica e numérica das ligações. As pesquisas anteriores integram

dissertações de mestrado, Mayor (2010), Nunes (2012) e Silva (2012), já concluídas, e uma tese de doutorado em andamento, no âmbito de linha de pesquisa do PROPEC (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil).

Em seus estudos, Vieira et al (2011) e Silva (2012) analisam uma nova tipologia de ligação para perfis tubulares denominada de luva, sendo o primeiro numericamente e o segundo, experimentalmente. O presente trabalho é uma continuação do estudo experimental iniciado por Silva (2012) visando analisar o comportamento da ligação e seus elementos. A aplicação da ligação dá-se em sistemas estruturais para grandes vãos como treliças de cobertura. A ligação é formada por dois tubos de mesmo diâmetro conectados internamente por outro tubo de menor diâmetro e com parafusos passantes em linha e cruzado.

1.4.1 Barras Submetidas à Tração

Os estados limites ou modos de falha para elementos estruturais, chapas e perfis, conectados por parafusos e submetidos a força de tração são os seguintes (Salmon e Johnson, 2009):

- falha por tração na chapa (seção líquida) (Figura 1.8(a));
- falha por cisalhamento da chapa (Figura 1.8 (b));
- falha por pressão de contato no conector (esmagamento) (Figura 1.8 (c));
- falha por pressão de contato na chapa (esmagamento) (Figura 1.8 (d));
- falha por tração no conector (Figura 1.8 (e));
- falha por flexão no conector (Figura 1.8 (f));
- falha por cisalhamento do conector (Figura 1.8 (g)).

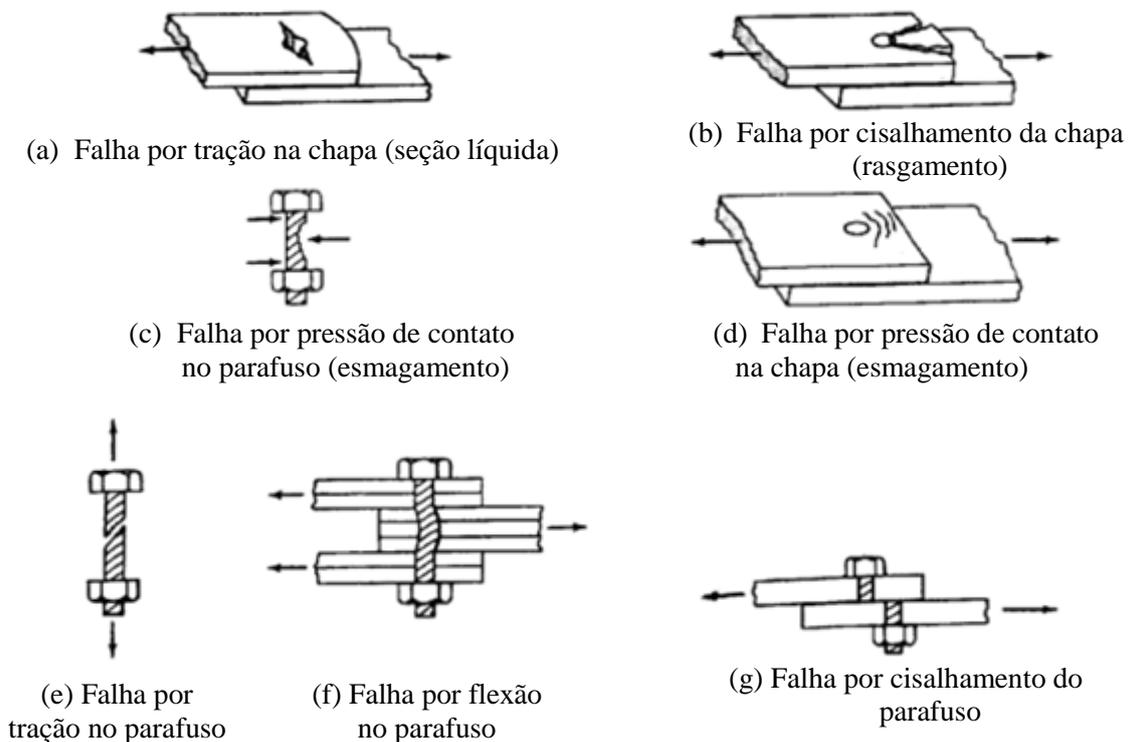


Figura 1.8 - Possíveis modos de falha em conexões parafusadas. Adaptada de Salmon e Johnson (2009).

Nas ligações parafusadas as falhas podem ocorrer tanto no parafuso quanto na chapa, dependendo das variáveis envolvidas a saber: o diâmetro e comprimento do parafuso, a largura e a espessura da chapa, bem como a distância parafuso-parafuso e parafuso-borda (Valenciani, 1997).

Os critérios utilizados no cálculo da força axial de tração resistente de cálculo para barras prismáticas submetidas à força axial de tração são prescritos no item 5.2 da norma brasileira para projeto de estruturas de aço e de estrutura mista de aço e concreto de edifícios (ABNT NBR 8800:2008) e considera os estados limites últimos de escoamento da seção bruta e ruptura da seção líquida.

Os estados limites verificados para parafusos, segundo a norma ABNT NBR 8800:2008 são: tração, cisalhamento, pressão de contato em furos e a combinação da tração com o cisalhamento. No caso do uso de pinos são verificados ainda, o momento fletor resistente de cálculo, a força cortante resistente de cálculo e a tensão normal resistente de cálculo ao esmagamento.

1.4.2 Coeficiente de Redução da Área Líquida

Placas submetidas à um esforço de tração não possuem uma distribuição uniforme de tensões em toda sua largura, Figura 1.9. Essa não uniformidade de distribuição de tensão é conhecida como "shear lag" (Salmon e Johnson, 2009).

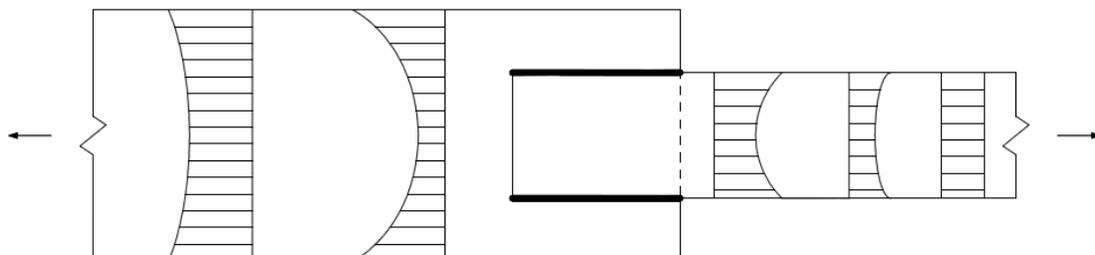


Figura 1.9 - Distribuição real das tensões. Adaptada de Salmon e Johnson, 2009.

O efeito *shear lag* leva a picos de tensão nas extremidades da ligação. Esse fenômeno cria uma elevada concentração de tensão que pode resultar na falha da ligação.

Paula (2006) afirma que o efeito *shear lag* ocorre quando um perfil não é conectado através de todos os elementos componentes da seção transversal havendo nessa situação, uma redução da resistência à tração do elemento quando ele é determinado pela ruptura da seção líquida. E o tipo da ruptura da seção líquida, com ligações parafusadas, submetidas à tração, é afetado pela ligação parcial dos elementos que compõem a seção do perfil, o chamado efeito *shear lag*.

Munse e Chesson (1963), estudando o comportamento de seções transversais submetidas a esforço de tração, sugeriram que a área líquida real fosse reduzida para uma área líquida efetiva, por meio de um fator de redução. Esse fator, denominado pelas normas técnicas como coeficiente de redução da área líquida, C_t , que considera o comprimento L da ligação e a excentricidade x da seção transversal da placa ligada em relação ao plano de corte dos parafusos, Figura 1.10.

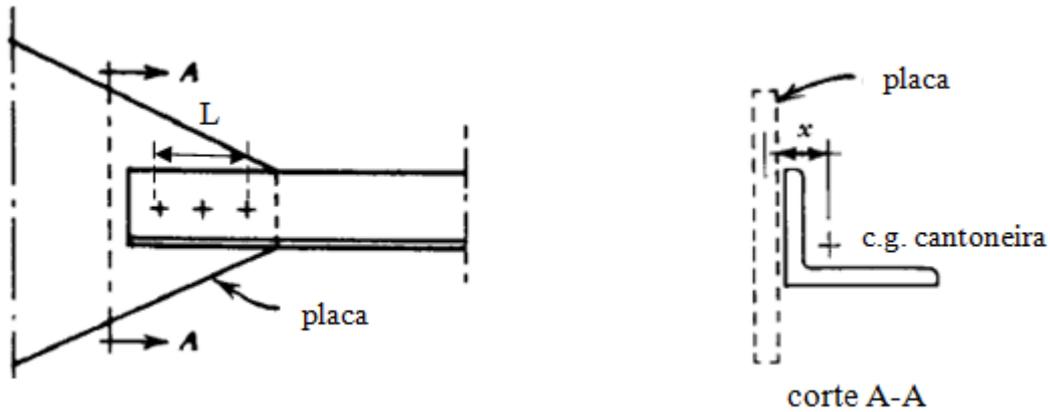
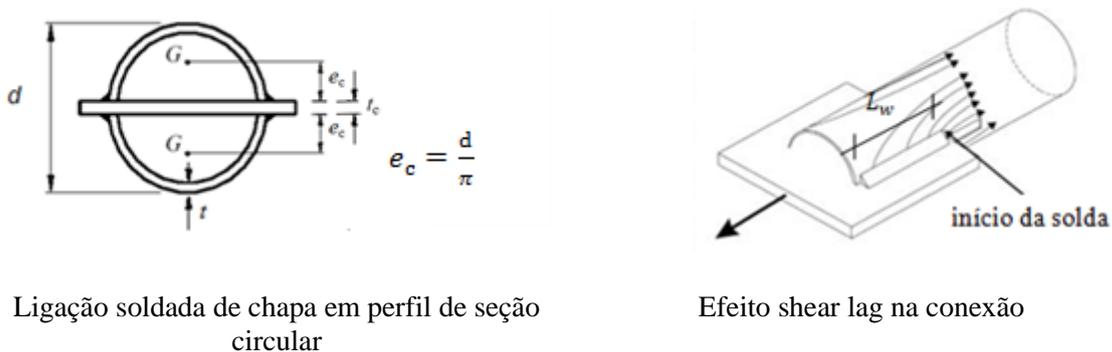


Figura 1.10 - Ligação parafusada entre um perfil cantoneira e uma chapa de ligação (Kulak et al, 2001).

Estudos para ligações parafusadas em perfis tubulares, vem sendo realizados devido à carência de estudos que verificam a qualidade e a validade dos estados limites para esses tipos de ligações. Uma distribuição desigual de tensão é esperada na ligação. Entretanto, observa-se que este fenômeno não é considerado pelas normas em algumas tipologias não usuais de ligações, e que pode causar uma deformação localizada no tubo no início da ligação (Martinez-Saucedo e Packer, 2006).

Em estudos recentes, Martinez-Saucedo e Packer (2009), baseando-se em resultados experimentais para barras com seção tubular circular quando a força de tração é transmitida por meio de uma chapa de ligação concêntrica, propuseram uma expressão para o cálculo do coeficiente C_t , para ligação soldada conforme a Figura 1.11.



Ligação soldada de chapa em perfil de seção circular

Efeito shear lag na conexão

Figura 1.11 - Ligação soldada de chapa de ligação concêntrica em perfil de seção tubular circular (Martinez-Saucedo e Packer, 2009).

Em seus estudos Vieira *et al* (2011) através de modelos numéricos para ligações tipo luva identificaram o modo de colapso na área líquida da seção. Nos estudos, a obtenção

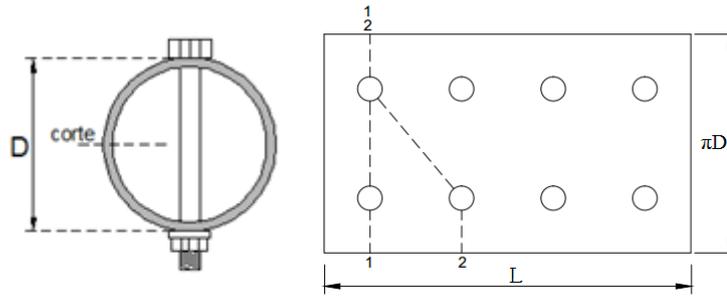
da força resistente de tração demonstra a existência do coeficiente *shear lag* para esse tipo de ligação. Enquanto padrões internacionais ainda não incluem a tipologia de ligações tipo luva, os coeficientes que levam em consideração o do efeito *shear lag* encontrados no estudo são comparados com os obtidos através da formulação do AISC (2005) para ligações similares com chapas de ligação. Assim, existe a necessidade de se desenvolver uma formulação específica para determinar o coeficiente do efeito *shear lag* para ligações tipo luva com tubos parafusados. Por isso, os autores citados observaram a necessidade de realização de mais análises variando parâmetros como o número e o diâmetro dos parafusos, e a espessura e o diâmetro dos tubos. Análises experimentais também se fazem necessárias com alguns tubos com ligações tipo luva para comparação de resultados numéricos. A meta destas investigações numéricas e experimentais é o desenvolvimento de formulações específicas para avaliar tubos parafusados com ligação tipo luva. Destaca-se que este trabalho contribui para avaliação deste efeito na ligação tipo luva.

1.4.3 Dimensionamento Teórico da Ligação

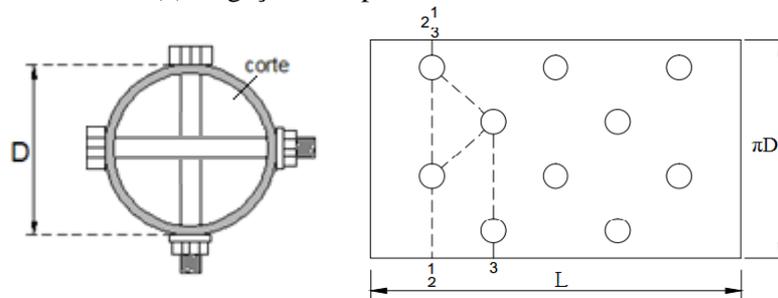
Para a verificação da capacidade resistente da ligação tipo luva foram observados os estados limites citados no item 1.4.1.

A capacidade resistente foi determinada segundo a NBR 8800:2008 e foram realizadas adaptações nas formulações para considerar a seção tubular, descritas a seguir. No caso do estado limite de flexão no parafuso foi utilizada, inicialmente, a proposta de Silva (2012).

Para a determinação da área bruta e da área líquida da seção, considera-se a seção tubular como uma barra prismática retangular (chapa retangular). A área líquida é calculada considerando o esquema apresentado na Figura 1.12. Na Figura 1.12(a) tem-se a configuração para chapa com parafusos dispostos em linha e na Figura 1.12(b) a representação para parafusos cruzados a 90°. Observa-se também as linhas de ruptura possíveis para as configurações da ligação.



(a) Ligação com parafusos em linha.



(b) Ligação com parafusos cruzados à 90°.

Figura 1.12 - Configuração utilizada para ruptura da seção líquida.

Atendendo aos critérios da ABNT NBR 8800:2008 e considerando-se as adaptações da seção tubular para barras, os estados limites verificados são:

a) Escoamento da seção bruta, conforme equação (1.1)

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (1.1)$$

b) Ruptura da seção líquida, conforme equação (1.2)

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} \quad (1.2)$$

onde $N_{t,Rd}$ é a força de tração resistente de cálculo, A_g é a área bruta da seção transversal da barra tubular dada pela equação (1.3), A_e é a área líquida efetiva da seção transversal da barra, determinada conforme a equação (1.4), f_y é a resistência ao escoamento do aço, f_u é a resistência à ruptura do aço, e γ_{a1} e γ_{a2} são coeficientes de ponderação.

$$A_g = \frac{\pi}{4} [D^2 - (D - 2t)^2] \quad (1.3)$$

onde D é o diâmetro do tubo e t é a espessura do tubo.

$$A_e = C_t A_n \quad (1.4)$$

onde A_n é a área líquida da barra e C_t é um coeficiente de redução da área líquida.

O cálculo de A_n de uma barra, equação (1.5), em regiões com furos para ligações, é a soma dos produtos pela largura líquida de cada elemento, de acordo com os critérios prescritos no item 5.2.4 da ABNT NBR 8800:2008.

$$A_n = \left[b - \sum (d_b + 1,5 \text{ mm}) + \sum \frac{s^2}{4g} \right] t \quad (1.5)$$

Onde b é a largura da chapa, $(d_b + 1,5 \text{ mm})$ é o diâmetro do furo, sendo que o valor 1,5 pode ser diferente dependendo do alargamento do furo em relação ao diâmetro do parafuso d_b e s e g , respectivamente, os espaçamentos longitudinal e transversal entre furos, Figura 1.13.

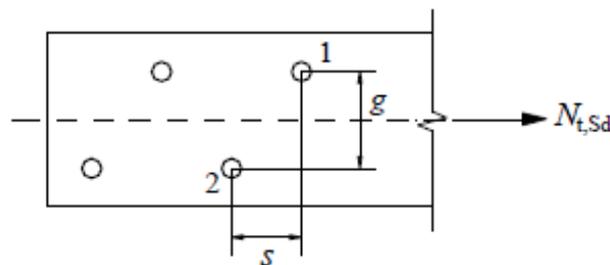


Figura 1.13 - Ilustração dos espaçamentos s e g entre os furos 1 e 2 (ABNT NBR 8800:2008).

c) Pressão de contato entre furos

Quando a deformação no furo, para forças de serviço, for uma limitação de projeto, de acordo com o item 6.3.3.3 da ABNT NBR 8800:2008, a equação (1.6) fornece a força resistente de cálculo de pressão de contato na parede de furo, considerando o rasgamento entre dois furos consecutivos ou entre um furo extremo e a borda.

$$F_{c,Rd} = \frac{1,2 l_f t f_u}{\gamma_{a2}} \leq \frac{2,4 d_b t f_u}{\gamma_{a2}} \quad (1.6)$$

onde l_f é a distância, na direção da força, entre borda e 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 aço da parede do furo e γ_{a2} é o coeficiente de ponderação de resistência do aço.

d) Cisalhamento do parafuso

A força resistente de cálculo de um parafuso de alta resistência ou barra redonda rosqueada, quando o plano de corte passa pela rosca e para os parafusos comuns em qualquer situação, é dada pela equação (1.7).

$$F_{v,Rd} = \frac{0,4 A_b f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (1.7)$$

onde A_b é a área bruta baseada no diâmetro do parafuso, dada pela equação 1.8, f_{ub} é a resistência à ruptura do parafuso e γ_{a2} é o coeficiente de ponderação de resistência.

$$A_b = 0,25 \pi d_b^2 \quad (1.8)$$

onde d_b é o diâmetro do parafuso.

e) Cisalhamento de bloco (Colapso por rasgamento)

A força resistente de colapso por rasgamento é determinada pela soma das forças resistentes ao cisalhamento de uma ou mais linhas de falha e a tração em um segmento perpendicular. Essa força é dada conforme a equação (1.9) a seguir.

$$F_{r,Rd} = \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,60 f_u A_{nv} + C_{ts} f_u A_{nt}) \leq \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,60 f_y A_{gv} + C_{ts} f_u A_{nt}) \quad (1.9)$$

onde A_{gv} é a área bruta sujeita a cisalhamento, A_{nv} é a área líquida sujeita a cisalhamento, A_{nt} é a área líquida sujeita à tração e C_{ts} é igual a 1,0 quando a tensão de tração na área for uniforme, e igual a 0,5 quando for não uniforme.

e) Flexão no Parafuso

Na análise de parafusos a NBR 8800:2008 não prevê a verificação do estado limite de flexão para parafusos, apenas para pinos. No entanto, no caso da ligação tipo luva, foi observada a presença significativa de flexão nos parafusos utilizados nas ligações de perfis tubulares em estudos realizados por Silva (2012), caracterizando um estado limite neste tipo de ligação que deve ser considerado.

Em um estudo realizado em ligações com pinos McGuire (1968) afirma que, se os pinos são rígidos, a força na ligação distribui-se igualmente para todos os pinos. Todavia se forem flexíveis a distribuição não é uniforme.

Diante deste estado limite, baseando-se nas prescrições para pinos da ABNT NBR 8800:2008 e considerando os resultados experimentais, Silva (2012) propôs uma formulação (equação (1.10)) para a força resistente total de cálculo da ligação, para o estado limite de flexão do parafuso, considerando parafusos dispostos em linha e tubos com diâmetro entre 60,3 mm e 88,9 mm.

$$F_m = 2f_b n C_{oef} \quad (1.10)$$

sendo:

$$f_b = \frac{M}{x} \quad (1.11)$$

$$M = W_b f_{y,b} \quad (1.12)$$

$$x = \frac{(D_{ext} - e_{ext}) - (D_{int} - e_{int})}{2} \quad (1.13)$$

onde f_b é a força unitária em cada parafuso da ligação obtida conforme a equação (1.11); n é o número de parafusos presentes na ligação; C_{oef} é um coeficiente de ajuste para a não uniformidade da distribuição da força nos parafusos da ligação; M é o momento fletor resistente de cálculo obtido pela equação (1.12); x é o braço de alavanca obtido conforme (1.13); W_b é o módulo de resistência elástico da seção do parafuso; $f_{y,b}$ é a resistência ao escoamento do parafuso; D_{ext} e D_{int} são os diâmetros externos dos tubos externo e interno, respectivamente; e e_{ext} e e_{int} representam a espessura do tubo externo e tubo interno, respectivamente.

A Figura 1.14 representa o modelo teórico proposto por Silva (2012) que se baseia na teoria de uma viga bi-apoiada submetida à flexão onde a posição do apoio corresponde ao contato do parafuso com o tubo externo, f_b corresponde à força concentrada no parafuso (transmitida pelo contato com o tubo interno) a se determinar, x é o braço de alavanca e M é o momento fletor atuante no parafuso.

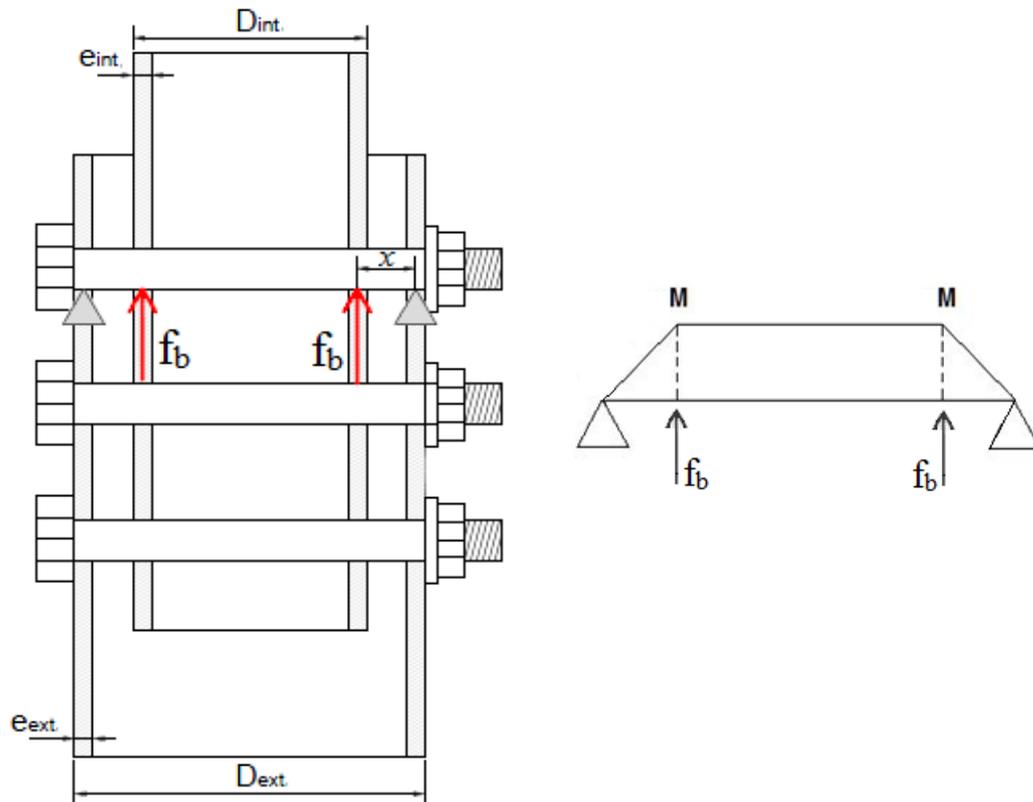


Figura 1.14 - Representação esquemática da viga sob flexão, representada pelo parafuso da ligação e diagrama de momento fletor (Adaptada de Silva, 2012).

CAPÍTULO 2

2 PROGRAMA EXPERIEMANTAL

A investigação experimental realizada neste trabalho consistiu no ensaio de ligações parafusadas em perfis tubulares, na ligação denominada como luva, buscando avaliar os modos de falha para essa ligação. Os protótipos foram submetidos a um esforço normal de tração.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas “Prof. Altamiro Tibiriçá Dias” do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto, com a utilização da prensa servohidráulica INSTRON. Foram dimensionados outros elementos para melhor fixação dos protótipos nas garras da máquina de ensaios.

O programa experimental é composto pela definição, preparação e montagem dos protótipos seguido da realização dos seus respectivos ensaios e o armazenamento dos resultados. No decorrer deste capítulo tem-se a descrição do programa experimental.

2.1 Definição dos protótipos

A ligação em desenvolvimento é chamada de luva sendo composta por dois tubos (banzos) ligados internamente por um terceiro tubo (luva), de menor diâmetro. A ligação é feita por meio de sequência de parafusos. Na Figura 2.1 observa-se as características de uma ligação tipo luva, ligação tubo banzo-tubo banzo por meio de uma luva interna.

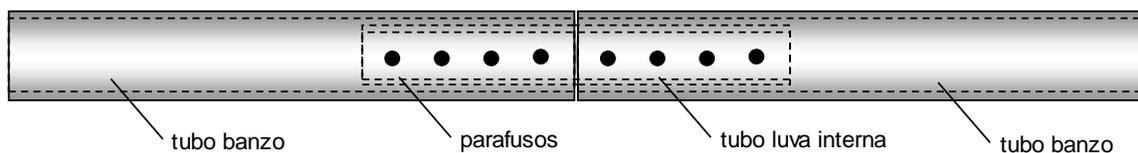


Figura 2.1 - Ligação tipo "luva" com parafusos dispostos em linha.

Para a realização dos ensaios foram utilizados apenas dois tubos, um externo e um interno, representando o banzo e a luva, respectivamente. A Figura 2.2 ilustra a

disposição de dois tubos com diâmetros diferentes, interno e externo, ligados por parafusos passantes, podendo estar dispostos de diversas maneiras como representado na Figura 2.2(a)(b)(c). Sendo o objeto de estudo as configurações representadas na Figura 2.2(a) e (b).

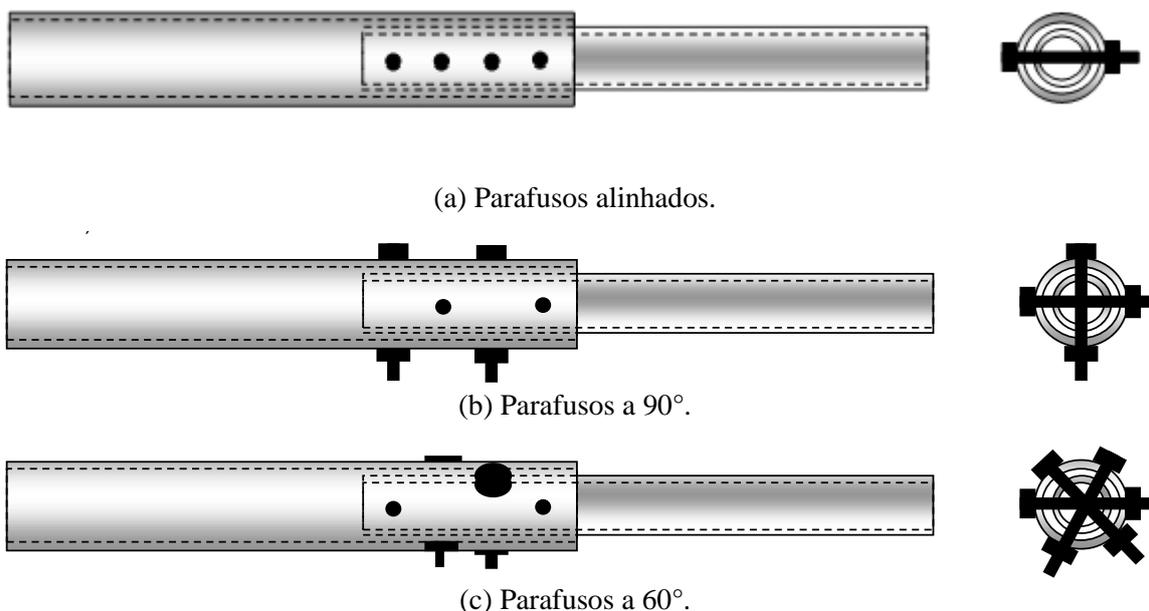


Figura 2.2 - Representação dos protótipos com dois tubos para ligações tipo "luva" com parafusos alinhados e cruzados.

Foram fabricados 15 protótipos, de modo a identificar e avaliar os estados limites e a resistência da ligação proposta. Os protótipos apresentavam variações de espessura e de diâmetro dos tubos bem como no número de parafusos existentes na ligação.

A escolha dos tubos de cada protótipo foi de acordo com a disponibilidade em estoque no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da UFOP e considerando a tipologia típica de uma treliça de cobertura.

Os perfis tubulares foram fabricados pela empresa Vallourec. Foram utilizados tubos com diferentes tipos de aço, sendo eles o aço VMB 250 cujo limite de escoamento nominal é 250 MPa e limite de ruptura nominal de 400 MPa, o aço VMB 300 com limite de escoamento nominal de 300 MPa e limite de ruptura nominal de 415 MPa e o aço VMB 350 que apresenta limite de escoamento nominal de 350 MPa e limite de ruptura nominal de 485 MPa.

Na Tabela 2.1 é apresentada a nomenclatura de identificação do tipo de aço utilizado em cada protótipo e em cada elemento tubo externo e tubo interno (luva).

Tabela 2.1 - Identificação do tipo de aço dos tubos na nomenclatura dos protótipos.

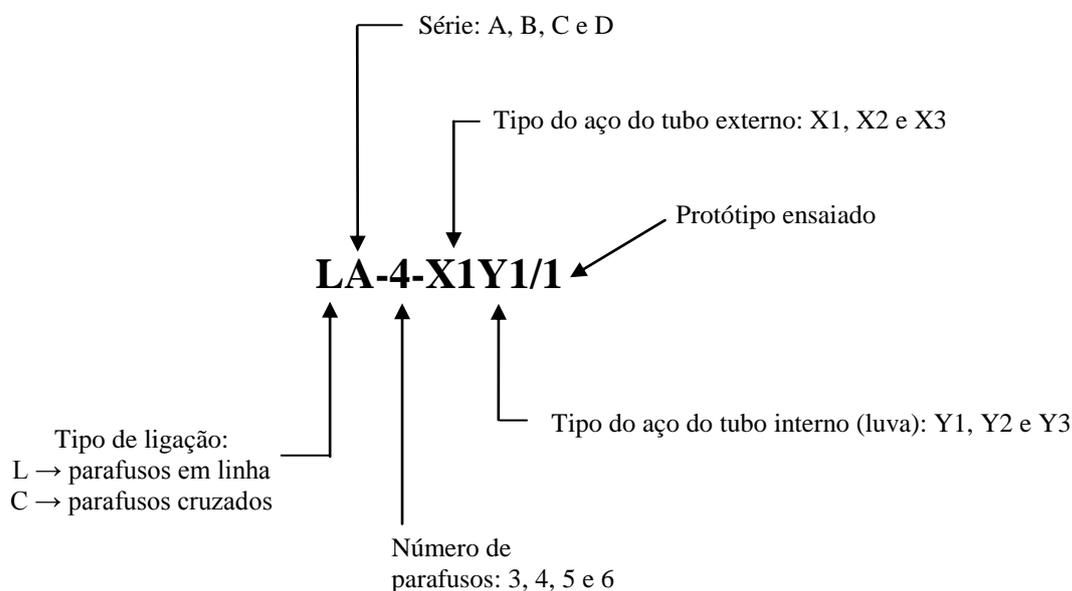
Tipo do Aço	Tubo externo	Tubo interno
VMB 250	X1	Y1
VMB 300	X2	Y2
VMB 350	X3	Y3

Para permitir a análise e a identificação adequada de cada protótipo foi necessário dividi-los em séries distintas. Criou-se, então, uma nomenclatura que contemplasse todas as informações necessárias, disposição dos parafusos em linha ou cruzados, diâmetros e espessuras dos tubos, quantidade de parafusos e o tipo do aço. Assim, foram definidas 4 séries distintas de perfis tubulares segundo as dimensões da seção transversal dos tubos (diâmetro e espessura), conforme a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Identificação das séries dos protótipos ensaiados.

Série	Tubo externo	Tubo interno
	(diâmetro x espessura) mm	(diâmetro x espessura) mm
A	73,0 x 5,5	60,3 x 5,5
B	76,1 x 3,6	60,3 x 3,6
C	88,9 x 5,5	73,0 x 5,5
D	88,9 x 5,5	73,0 x 5,5

A nomenclatura utilizada permite melhor identificação dos protótipos de forma a diferenciá-los entre si, bem como identifica as características de cada protótipo facilitando as análises realizadas posteriormente. A nomenclatura utilizada na representação dos protótipos é apresentada esquematicamente a seguir:



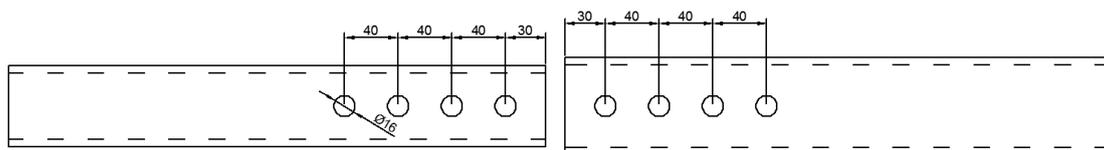
A leitura das características do protótipo LA-4-X1Y1/1 é feita da seguinte maneira: protótipo com 4 parafusos em linha, com tubo externo de diâmetro igual a 73,0 mm, espessura de 5,5 mm e aço tipo VMB 250, com tubo interno (luva) de diâmetro de 60,3 mm, espessura de 5,5 mm e aço tipo VMB 250.

Um exemplo também pode ser dado para os protótipos cruzados. A leitura do protótipo CB-3-X2Y3/1 é feita da seguinte maneira: protótipo com 3 parafusos cruzados, com tubo externo de diâmetro igual a 76,1 mm, espessura de 3,6 mm e aço tipo VMB 300, com tubo interno (luva) de diâmetro de 60,3 mm, espessura de 3,6 mm e aço tipo VMB 350.

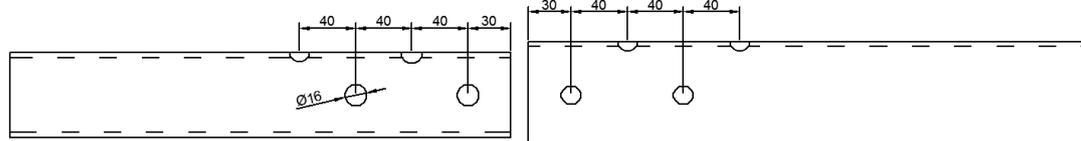
Os tubos utilizados para fabricação dos protótipos possuíam um comprimento total que variava de 355 mm a 435 mm, de acordo com a disponibilidade de material no laboratório. Porém, essa variação do comprimento não influenciou os resultados nem os procedimentos experimentais.

Para a composição da ligação foram utilizados parafusos estruturais de 12,7 mm de diâmetro. Utilizou-se uma folga de 3,3 mm, obedecendo aos limites permitidos na NBR 8800:2008. Os protótipos foram fabricados com esta folga para possibilitar a passagem de fios da instrumentação dos parafusos.

A NBR 8800:2008 estabelece, no seu item 6.3.9, o espaçamento mínimo entre furos. Desta forma, de acordo com os limites prescritos, os furos foram espaçados entre si por uma distância de 40 mm, correspondente a 3,15 diâmetros do parafuso (maior que o limite mínimo de $2,7 d_b$ prescrito na norma). A distância do centro do furo à borda utilizada, dentro do limite permitido pelo item 6.3.11 da norma, variou de 30 mm a 35 mm. Na Figura 2.3(a)(b) está representado um esquema da disposição dos furos para os parafusos das ligações para protótipos com parafusos em linha e para protótipos com parafusos cruzados.



(a) Furos para parafusos em linha.



(b) Furos para parafusos cruzados.

Figura 2.3 - Representação esquemática da disposição dos parafusos na ligação.

O posicionamento dos protótipos na máquina de ensaios somente foi possível mediante a utilização de acessório que permitisse o encaixe dos protótipos e a transmissão uniforme de carga para os mesmos.

Silva (2012) desenvolveu um acessório que permitiu o encaixe dos tubos na máquina de ensaio e que possibilitava a aplicação da carga de tração de forma uniforme em toda a seção transversal. Adotou-se então o sistema desenvolvido por Silva (2012), que consiste em soldar um perfil "T" de aço estrutural nas extremidades dos tubos dos protótipos. Esse perfil permitiu que o protótipo fosse posicionado de maneira adequada na máquina de ensaios.

O perfil "T" foi dimensionado de maneira a não permitir a ocorrência de falhas, garantindo adequada realização do experimento. Para cada diâmetro de tubo existe um perfil "T" adequado. As dimensões dos perfis "T" (comprimento da mesa do perfil) para os diâmetros dos protótipos utilizados neste trabalho estão contemplados no dimensionamento realizado por Silva (2012), segundo as recomendações do CIDECT (2008) e estão apresentados a seguir na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Comprimento da mesa do perfil "T". (Fonte: Silva (2012))

Diâmetro tubo (mm)	Comprimento da mesa do perfil "T" (mm)
60,3	140
73,0	150
76,1	155
88,9	165

As garras da máquina de ensaios, o perfil "T" e uma representação do esquema de ligação tubo-perfil "T" estão apresentados na Figura 2.4(a)(b)(c)(d).



(a) Garra da máquina de ensaios.



(b) Perfil "T".



(c) Esquema da fixação da garra no perfil.



(d) Protótipo soldado no perfil "T".

Figura 2.4 - Representação dos componentes de fixação do protótipo.

2.2 Instrumentação e equipamentos de ensaio

A instrumentação utilizada foi para medição de deslocamentos longitudinais na direção do carregamento. Foram utilizados transdutores de deslocamentos, LVDT (*linear variable differential transformer*) modelo 2601-095, fabricado pela Solartron. O transdutor de deslocamento foi posicionado no perfil "T" com o auxílio de dois grampos e duas chapas metálicas, de modo que o deslocamento apenas da ligação fosse medido. Na Figura 2.5 é tem-se o esquema de fixação, o transdutor de deslocamento e os acessórios de fixação (grampos e chapas).



(a) Vista do ensaio, com posicionamento do transdutor de deslocamento (LVDT).



(b) Chapas metálicas e grampos.



(c) LVDT.

Figura 2.5 - Vista do ensaio de ligação tipo luva com parafusos cruzados, equipamentos auxiliares e LVDT.

Foram também utilizados na instrumentação extensômetros de resistência elétrica, EER, colados nos parafusos das ligações. Os EER foram utilizados para medir as deformações dos parafusos e para avaliar a distribuição de deformações e, conseqüentemente, da força no conjunto de parafusos da ligação.

O procedimento de fixação dos extensômetros elétricos, exige o lixamento da superfície que é colado. Inicialmente, os parafusos foram lixados excessivamente, havendo uma redução na área da seção transversal do parafuso naquela região. Com o aprimoramento dessa técnica, a redução da área da seção transversal foi minimizada.

A utilização de extensômetros justifica a necessidade do alargamento realizado nos furos dos tubos, devido a necessidade da passagem do parafuso instrumentado, com a proteção necessária dos extensômetros e da fiação conectada aos EER.

A Figura 2.6(a)(b)(c) apresenta uma comparação com um dos parafusos, dos primeiros ensaios, após o lixamento, com outro parafuso também preparado para instrumentação mas sem a redução da área da seção transversal, e um parafuso instrumentado pronto para o ensaio.



(a) Parafuso com redução na seção transversal.



(b) Parafuso sem redução na seção transversal.



(c) Parafuso instrumentado.

Figura 2.6 - Parafusos preparados para instrumentação.

O motivo da instrumentação dos parafusos foi possibilitar a avaliação do comportamento dos mesmos à flexão quando o protótipo encontra-se sob carregamento de tração no protótipo. A instrumentação utilizada foi de 2 EER colados na face inferior

e superior, diametralmente opostos entre si, Figura 2.7(a), tendo-se medidas de deformações a cada etapa de carga na região comprimida e tracionada, respectivamente.

Os valores para as deformações são próximos em módulo, diferenciando positivo (+) para deformações de tração e negativo (-) para deformações de compressão. Observando essa característica optou-se, para alguns protótipos ensaiados e em algumas situações, por instrumentar apenas uma das faces do parafuso, a face superior, Figura 2.7(b), que forneceria valores de deformações positivas ou na parte inferior fornecendo valores de deformações negativas, Figura 2.7(c).

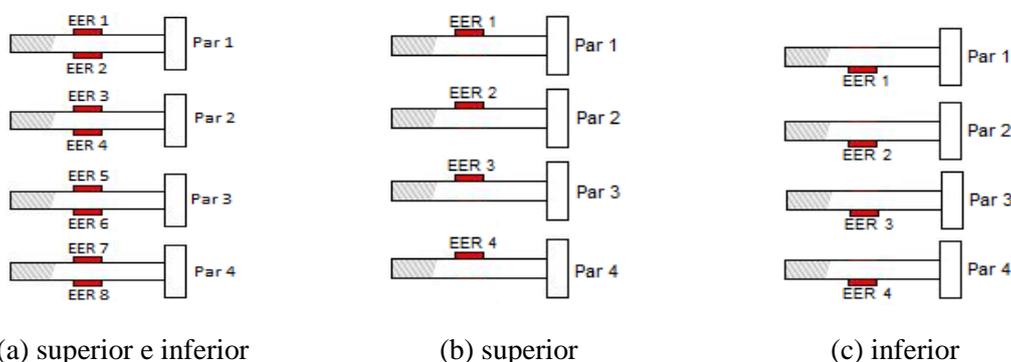


Figura 2.7 - Esquema da instrumentação do conjunto de parafusos. Extensômetros elétricos posicionados na face superior ou inferior ou em ambas.

Durante o posicionamento dos parafusos, já instrumentados, tomou-se o cuidado para que os EER ficassem posicionados corretamente e na região definida, superior/inferior, obtendo os valores adequados para análise.

Os protótipos foram ensaiados na máquina servohidráulica INSTRON, prensa do Laboratório de Estruturas da Escola de Minas da UFOP. O programa responsável pelo controle é o Partner, instalado em um computador. A prensa possui um canal de saída para um LVDT, o que possibilita fazer uma adequada relação entre carga e deslocamento. O programa fornece ao usuário a visualização gráfica e numérica de dados do ensaio, possibilita o acompanhamento gráfico carga *versus* deslocamento no momento do ensaio, além do armazenamento dos dados para posterior análise de resultados (Figura 2.8).



Figura 2.8 - Sistema de aquisição de dados, software Partner.

Para aquisição e armazenamento de dados referentes aos resultados de extensometria dos parafusos foi utilizado o sistema de aquisição automático controlado por computador, "SPIDER 8" fabricado pela HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik, 2003). O programa utilizado para controle e armazenamento dos dados é o Catman 4.5 que fornece saídas gráficas e numéricas, Figura 2.9.



Figura 2.9 - Equipamento de aquisição de dados, Spider 8 e software Catman.

2.3 Propriedades dos materiais

O material dos tubos utilizados nos experimentos foi caracterizado pela Vallourec segundo as prescrições estabelecidas pela norma ASTM-EM8 (1995). Na Tabela 2.4 são apresentados os resultados para os valores de resistência ao escoamento f_y , valores de resistência à ruptura f_u e o alongamento total, ΔL .

Tabela 2.4 - Resultados da caracterização do aço dos tubos.

Tubo (diâmetro x espessura) mm	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ΔL (%)
60,3 x 3,6	424,0	535,0	36,0
60,3 x 5,5	381,0	479,0	34,5
73,0 x 5,5	399,5	539,5	35,0
76,1 x 3,6	386,0	545,0	34,0
88,9 x 5,5	375,0	474,0	34,0

Para todos os protótipos foram utilizados parafusos estruturais CISER ASTM A325, com diâmetro de 12,7 mm (1/2 "). Segundo a NBR 8800:2008 parafusos ASTM A325 têm resistência ao escoamento nominal de 635 MPa e uma resistência à ruptura nominal de 825 MPa.

Neste trabalho foram utilizados dois comprimentos diferentes de parafuso. Para protótipos com tubos externos com diâmetro de 88,9 mm utilizou-se parafusos com comprimento de 114,3 mm (4 1/2 ") e para os demais protótipos com tubos externos de no máximo 76,1 mm o comprimento dos parafusos utilizados foi de 101,6 mm (4 ").

A A. Friedberg do Brasil foi a responsável pela caracterização do material dos parafusos, segundo as especificações da norma ASTM A325-T1. Na Tabela 2.5 são apresentados, para cada comprimento de parafuso, os resultados encontrados para os valores de resistência ao escoamento f_y e valores de deformação específica ϵ , calculada pela Lei de Hooke.

Tabela 2.5 - Resultado da caracterização do aço dos parafusos.

Comprimento do parafuso	f_y (MPa)	ϵ (μS)
101,6 mm	714	3482,93
114,3 mm	634	3092,68

A Tabela 2.6 apresenta as principais características e propriedades dos protótipos, como diâmetro e espessura dos tubos, número de parafusos utilizados na ligação, números de protótipos de cada série e valores de caracterização dos materiais.

Tabela 2.6 - Séries dos protótipos e suas respectivas características.

Série	Identificação do Protótipo	Nº Parafusos	Tubo Externo				Tubo Interno			
			Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Aço		Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Aço	
					f _y (MPa)	f _u (MPa)			f _y (MPa)	f _u (MPa)
A	LA-3-X3Y2	3	73,0	5,5	399,5	539,5	60,3	5,5	381,0	479,0
	LA-4-X3Y2	4	73,0	5,5	399,5	539,5	60,3	5,5	381,0	479,0
	LA-4-X3Y2	4	73,0	5,5	399,5	539,5	60,3	5,5	381,0	479,0
B	CB-3-X2Y3	3	76,1	3,6	386,0	545,0	60,3	3,6	424,0	535,0
	CB-3-X2Y3	3	76,1	3,6	386,0	545,0	60,3	3,6	424,0	535,0
	CB-3-X2Y3	3	76,1	3,6	386,0	545,0	60,3	3,6	424,0	535,0
	CB-3-X2Y3	3	76,1	3,6	386,0	545,0	60,3	3,6	424,0	535,0
	CB-4-X2Y3	4	76,1	3,6	386,0	545,0	60,3	3,6	424,0	535,0
	CB-4-X2Y3	4	76,1	3,6	386,0	545,0	60,3	3,6	424,0	535,0
	CB-4-X2Y3	4	76,1	3,6	386,0	545,0	60,3	3,6	424,0	535,0
C	CC-5-X2Y3	5	88,9	5,5	375,0	474,0	73,0	5,5	399,5	539,5
	CC-5-X2Y3	5	88,9	5,5	375,0	474,0	73,0	5,5	399,5	539,5
D	CD-6-X2Y3	6	88,9	5,5	375,0	474,0	73,0	5,5	350*	450*
	CD-6-X2Y3	6	88,9	5,5	375,0	474,0	73,0	5,5	350*	450*
	CD-6-X2Y3	6	88,9	5,5	375,0	474,0	73,0	5,5	350*	450*

* Os tubos previstos para compor a série CD tiveram que ser trocados, não sendo realizada a caracterização dos novos em tempo suficiente para inserção neste texto. Por isso para a série CD utilizou-se os valores nominais para tensão de escoamento e tensão última.

2.4 Metodologia de ensaio

Os ensaios foram realizados sob tração sendo que os protótipos foram posicionados na vertical, de modo que o tubo com maior diâmetro ficasse na direção da parte inferior, conseqüentemente na parte superior tem-se o tubo de menor diâmetro.

Após a colocação do protótipo na máquina, os fios da extensometria dos parafusos foram então ligados aos cabos que por sua vez foram conectados ao equipamento Spider 8, permitindo a aquisição e o armazenamento de dados.

O LVDT foi posicionado com o auxílio das chapas fixadas nos perfis "T" na parte inferior e superior conectados ao sistema de aquisição da prensa Instron. O programa Partner permitiu a aquisição automática dos dados e utilizou-se uma frequência de aquisição dos dados de 5 Hz, ou seja, as leituras de força e deslocamento foram realizadas em períodos de 5 segundos. O carregamento foi aplicado com controle de deslocamento segundo uma taxa de velocidade de 0,4 mm/min.

As cargas últimas registradas ao final de cada ensaio foram obtidas sem a preocupação de se estabelecer um deslocamento máximo. Houve um deslocamento inicial devido a folga existente na ligação e os deslocamentos máximos obtidos foram na faixa de 18 a 35 mm.

O critério de parada do ensaio dava-se pela verificação de algum modo de falha de acordo com os seguintes parâmetros: se observada a fratura do material junto as bordas dos furos, acompanhada ou não da estrição da seção transversal, caracterizando a falha por ruptura da seção líquida ou se a partir de um nível de deslocamento ocorresse uma queda da carga aplicada, caracterizando uma tendência decrescente na curva carga *versus* deslocamento.

CAPÍTULO 3

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados da análise experimental realizada nas ligações tipo luva em perfis tubulares de seção circular com parafusos em linha e cruzados, e suas comparações com os valores teóricos baseados nas especificações da norma brasileira NBR 8800:2008.

Nos ensaios realizados foi observada a ocorrência de dois modos de falha predominantes. O primeiro é a flexão nos parafusos da ligação e o segundo caracterizado pela ruptura da seção líquida. Em alguns protótipos, após a ruptura da seção líquida, observou-se também uma flexão nos parafusos, caracterizando uma possível associação entre esses modos de falha.

A apresentação dos resultados é feita através de gráficos de carga *versus* deslocamento onde são apresentados os resultados experimentais e os limites teóricos para os seguintes modos de falha: escoamento da seção bruta, ruptura da seção líquida, cisalhamento do parafuso, colapso por rasgamento e flexão do parafuso. Todos os valores foram obtidos pelas equações apresentadas no capítulo 1. Destaca-se que no caso da flexão do parafuso utilizou-se a equação proposta por Silva (2012) para os parafusos em linha. Nos gráficos também estão representadas as dimensões dos tubos que variam de acordo com as séries ensaiadas, Tabela 2.6.

3.1 Protótipos da SÉRIE LA

A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios para os protótipos da série LA. Esta série engloba um protótipo com três parafusos em linha e dois protótipos com quatro parafusos em linha.

A curva de carga (P) *versus* deslocamento para o protótipo LA-3-X3Y2 é apresentada na Figura 3.1, bem como os valores teóricos dos modos de falha: escoamento da seção bruta, ruptura da seção líquida, cisalhamento do parafuso, flexão do parafuso e colapso

por rasgamento. Observa-se um deslocamento inicial que é justificado pela folga dos furos, seguido de um ajustamento dos parafusos nos furos da ligação, sem ganho considerável de carga. Após o ajuste da ligação, inicialmente o protótipo absorve carga proporcionalmente ao seu deslocamento. As mudanças de inclinações na curva experimental caracterizam diferentes modos de falhas, com variação significativa de carga e deslocamento.

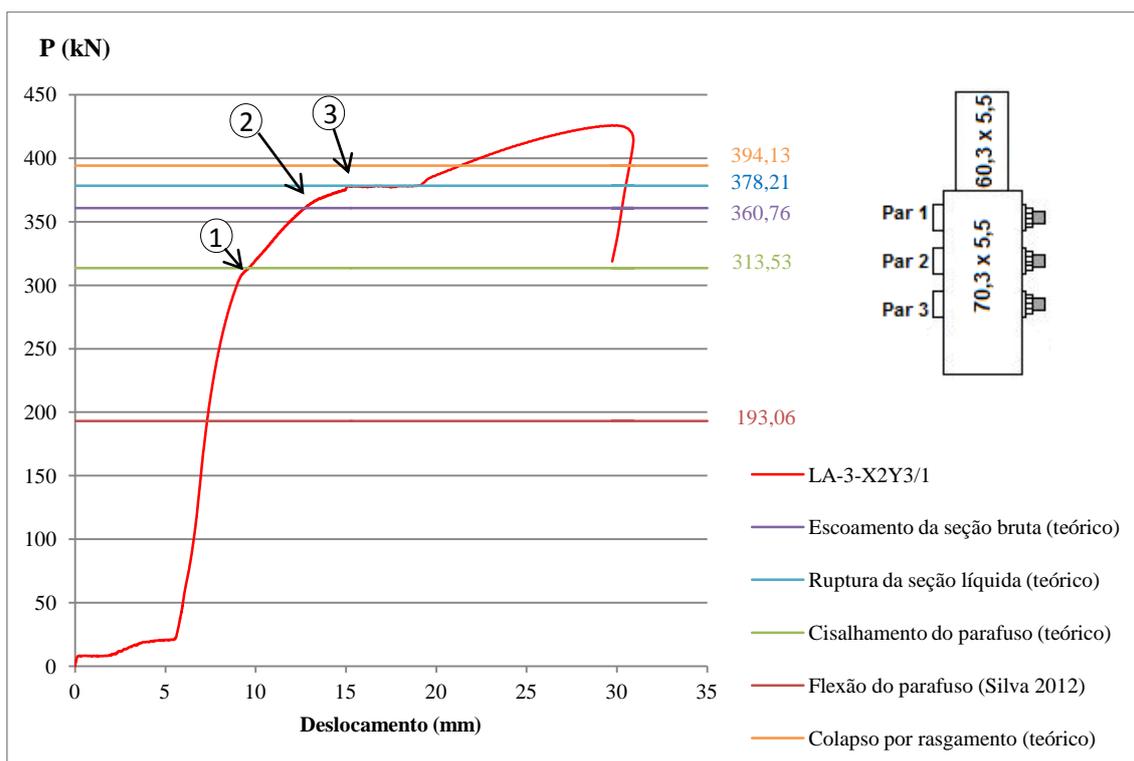


Figura 3.1 - Curva carga *versus* deslocamento, LA-3-X2Y3/1, e modos de falha da ligação.

A carga máxima do protótipo LA-3-X2Y3/1 ocorreu com um carregamento de 425,74 kN, acima dos valores obtidos nos cálculos teóricos para os modos de falha considerados, caracterizando um bom comportamento dessa ligação para esse protótipo. O primeiro modo de falha, indicado pelo número 1 na Figura 3.1, é a flexão do parafuso previsto em teoria para o carregamento de 193,06 kN. Observando a Figura 3.1, este modo de falha aconteceria, de acordo com o dimensionamento teórico, em torno de 7 mm de deslocamento do protótipo. Entretanto o resultado experimental, segundo a primeira mudança de inclinação da curva do ensaio (Figura 3.1), apresenta o primeiro modo de falha em torno de 9 mm com um carregamento de aproximadamente 305 kN.

Pode-se observar neste ensaio os modos de falha de flexão do parafuso, cisalhamento do parafuso, escoamento da seção bruta e ruptura da seção líquida. Os valores para todos os modos de falha estão abaixo da carga máxima e com relação à flexão os resultados teóricos são conservadores. Destaca-se também que os valores teóricos para o modo de falha de ruptura da seção líquida e escoamento da seção bruta estão muito próximos, portanto, de difícil identificação experimental. Assim, pode-se concluir que a primeira inclinação da curva experimental (1) caracteriza a flexão do parafuso; a segunda inclinação (2) o início do cisalhamento; a terceira inclinação (3) do escoamento da seção seguido da ruptura. A partir da terceira inclinação tem-se grandes deslocamentos.

Ao analisar os parafusos após a finalização do ensaio observou-se um cisalhamento inicial, sendo predominante a flexão do parafuso, como apresentado na Figura 3.2(a). A ruptura ocorreu no tubo interno, como previsto no cálculo teórico e apresentado na figura 3.2(b).



(a) parafusos fletidos.



(b) ruptura no tubo interno.

Figura 3.2 - Protótipo LA-3-X2Y3/1 após a realização do ensaio.

A Figura 3.3 apresenta as curvas carga *versus* deslocamento da realização dos ensaios para os protótipos com 4 parafusos em linha, LA-4-X3Y2/1 e LA-4-X3Y2/2, e os valores teóricos para os modos de falha dessa configuração de ligação.

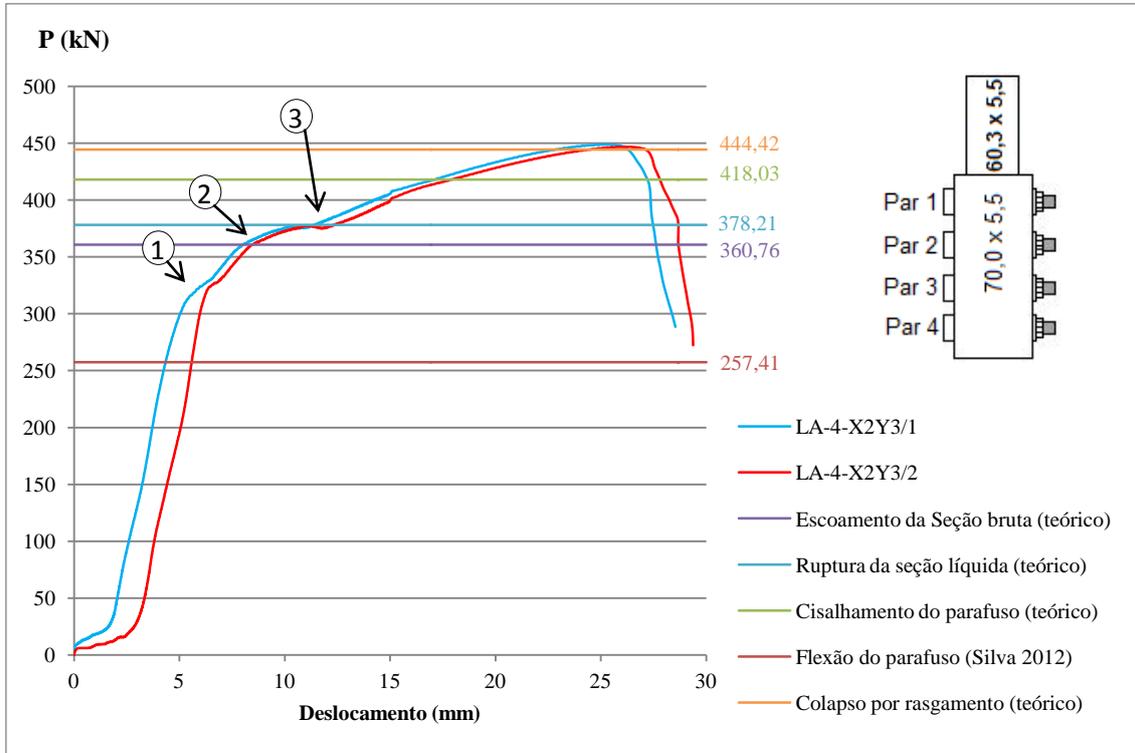


Figura 3.3 - Curva carga *versus* deslocamento, protótipos LA-4-X2Y3 e LA-4-X2Y3/2, e modos de falha da ligação.

A carga máxima do protótipo LA-4-X2Y3/1 foi de 448,73 kN e a do protótipo LA-4-X2Y3/2 a 446,91 kN. Analogamente ao protótipo de três parafusos, os valores teóricos são inferiores aos experimentais.

O primeiro modo de falha, observado experimentalmente, foi a flexão do parafuso indicado com (1) no gráfico da Figura 3.3. Os modos de falha são caracterizados como no ensaio LA-3-X2Y3/1 e analogamente os valores teóricos para a flexão são conservadores e os resultados experimentais estão acima dos teóricos.

Nas Figuras 3.4(a) e (c) é apresentada a ruptura na seção líquida ocorrida no tubo interno dos protótipos LA-4-X2Y3/1 e LA-4-X2Y3/2. As Figuras 3.4(b) e (d) apresentam os parafusos de ambos os protótipos após a realização dos ensaios. A flexão apesar de não ser tão nítida como no caso anterior é comprovada pela extensometria.



(a) ruptura do protótipo LA-4-X2Y3/1



(b) parafusos do protótipo LA-4-X2Y3/1



(c) ruptura do protótipo LA-4-X2Y3/2



(d) parafusos do protótipo LA-4-X2Y3/2

Figura 3.4 - Protótipos LA-4-X2Y3/1 e LA-4-X2Y3/2 após a realização do ensaio.

Os outros modos de falha, como o escoamento da seção bruta e ruptura da seção líquida, analisando as curvas da Figura 3.3 e 3.1, ocorrem acima dos valores teóricos previstos. Observa-se, como previsto no cálculo teórico, que para os três protótipos dessa série, não ocorre o colapso por rasgamento, primeiro há a ocorrência da ruptura da seção líquida, conforme comprovado experimentalmente.

É possível fazer uma comparação entre os três protótipos dessa série através da Figura 3.5 que apresenta as curvas carga *versus* deslocamento dos ensaios dos protótipos LA-3-X2Y3/1, LA-4-X2Y3/1 e LA-4-X2Y3/2. Neste caso, foi desconsiderado o deslocamento inicial das curvas, devido ao ajuste da posição dos parafusos. Analisando as curvas observa-se um comportamento bastante similar entre os três protótipos. Pela Figura 3.5 observa-se que os protótipos possuem um trecho inicial linear com o mesmo nível de carga e deslocamento. Há proporcionalidade entre a força aplicada e o deslocamento, até a mudança de inclinação das curvas. A carga máxima para o protótipo com 3 parafusos foi menor que para os de 4 parafusos, já esperado e explicado pelo fato do aumento no número de parafusos na ligação aumentar a resistência da mesma.

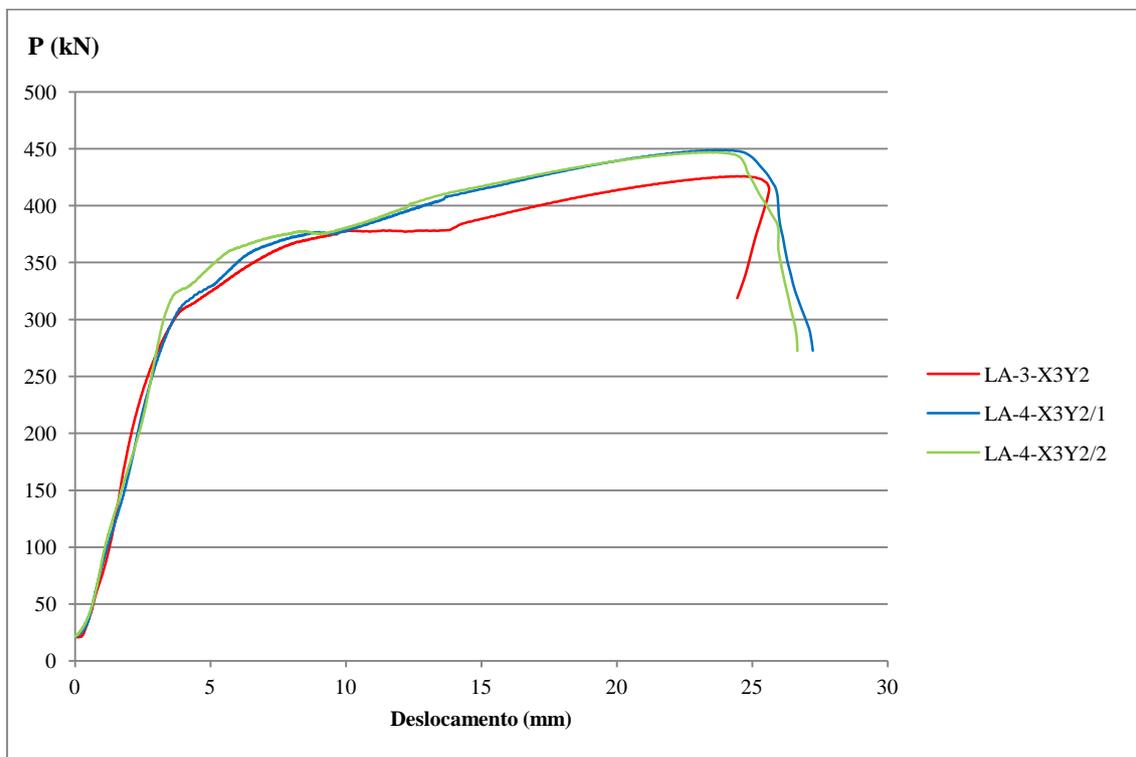


Figura 3.5 - Curva carga *versus* deslocamento.

As Figuras 3.6, 3.7, e 3.8, a seguir, apresentam as curvas carga de tração na ligação (P) *versus* deformação obtida pelos extensômetros colados nas faces superior e inferior de cada parafuso de cada protótipo. Os resultados da extensometria dos parafusos do protótipo LA-3-X2Y3/1 estão apresentados na Figura 3.6 a seguir.

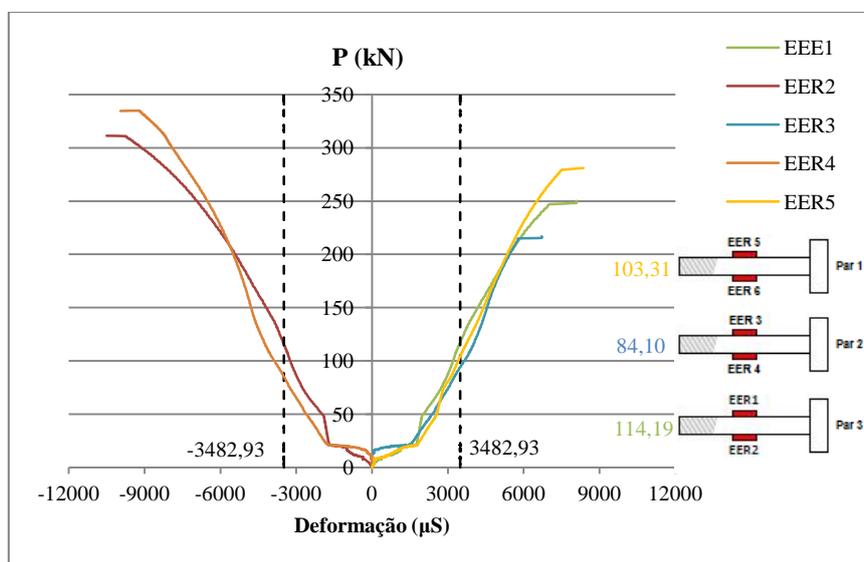


Figura 3.6 - Curva carga *versus* deformação, parafusos do protótipo LA-3-X2Y3/1.

Observa-se pela Figura 3.6 que a deformação do parafuso supera o nível de deformação referente ao escoamento do material, que corresponde a 3482,93 μS (Tabela 2.5). Este limite é apresentado no gráfico da Figura 3.6 por linhas pontilhadas. Os valores experimentais em que o parafuso atinge esse limite são apresentados ao lado do desenho esquemático de cada parafuso na Figura 3.6.

Para os protótipos LA-4-X2Y3/1 e LA-4-X2Y3/2 optou-se por instrumentar apenas a face superior de cada parafuso.

Na Figura 3.7 estão apresentados os resultados experimentais obtidos pelos extensômetros dos parafusos do protótipo LA-4-X2Y3/1 para a mesma escala visando a comparação com os resultados do protótipo LA-3-X2Y3/1

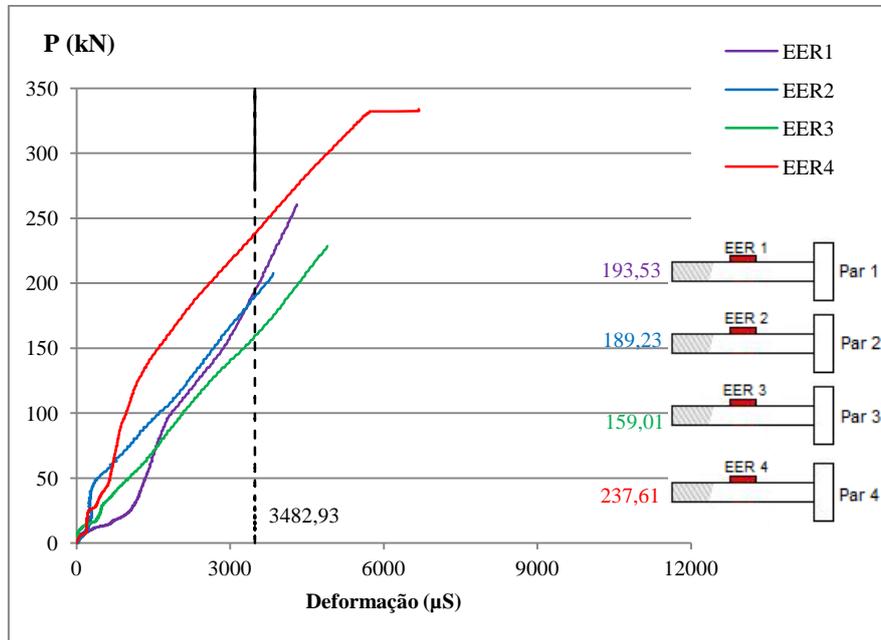


Figura 3.7 - Curva carga versus deformação, parafusos do protótipo LA-4-X2Y3/1

Assim como os parafusos do protótipo LA-3-X2Y3/1 observa-se pela Figura 3.7 que a deformação dos parafusos do protótipo LA-4-X2Y3/1 supera o nível de deformação referente ao escoamento do material, correspondente a 3482,93 μ S (Tabela 2.5). Os valores experimentais em que cada parafuso atinge o limite de escoamento do material (linhas pontilhadas no gráfico da Figura 3.7) são apresentados ao lado da representação de cada parafuso.

Na Figura 3.8 estão apresentados os resultados experimentais obtidos pelos extensômetros dos parafusos do protótipo LA-4-X2Y3/2.

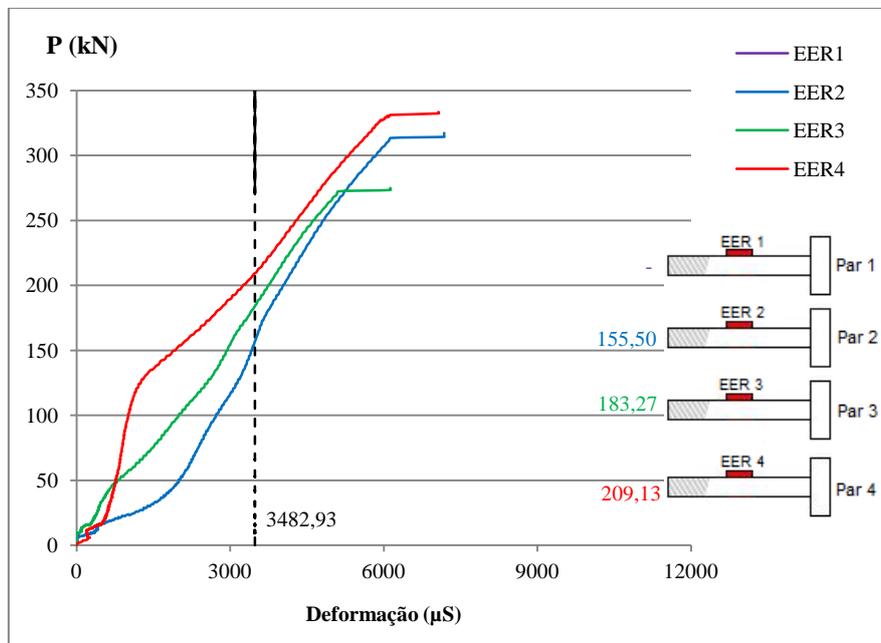


Figura 3.8 - Curva carga versus deformação, parafusos do protótipo LA-4-X2Y3/2.

Observa-se na Figura 3.8 que a deformação dos parafusos também supera o nível de deformação correspondente ao escoamento de 3482,93 μS (Tabela 2.5), como os protótipos anteriores, indicado no gráfico da Figura 3.8 por linhas pontilhadas. Do mesmo modo, os valores em que cada parafuso atingiu esse limite estão apresentados, ao lado dos respectivos parafusos. O parafuso 1, neste caso, foi descartado em função de falha na leitura devido ao rompimento do fio do EER.

3.2 Protótipos da SÉRIE CB

Neste item serão apresentados os resultados dos ensaios experimentais para os protótipos da série CB. Esta engloba um grupo de protótipos com 3 parafusos e outro de protótipos com 4 parafusos. Nesta série os parafusos estão dispostos de forma cruzada à 90°.

As curvas de carga *versus* deslocamento para os protótipos CB-3-X2Y3 são apresentadas na Figura 3.9, bem como os valores teóricos dos modos de falha. Observa-se um deslocamento inicial sem ganho considerável de carga, devido a folga dos furos. Analisando as curvas, observa-se uma variação dos deslocamentos de um protótipo em relação a outro durante o ensaio. Até certo nível de carregamento, as curvas não têm uma boa correlação, o que pode ser explicado pela configuração cruzada dos parafusos, induzindo ajustes diferentes nas folgas existentes. Esta configuração altera a distribuição de tensões neste tipo de ligação. No mesmo raciocínio utilizado para os protótipos com ligações em linha, as mudanças de inclinações nas curvas, após certo nível de carregamento, podem caracterizar diferentes modos de falha. Observa-se que os modos de falha, previstos pelas equações do capítulo 1 (NRB 8800:2008) não foram adequados para os protótipos desta série, visto que os níveis de carregamento previstos estão acima de todas as curvas experimentais.

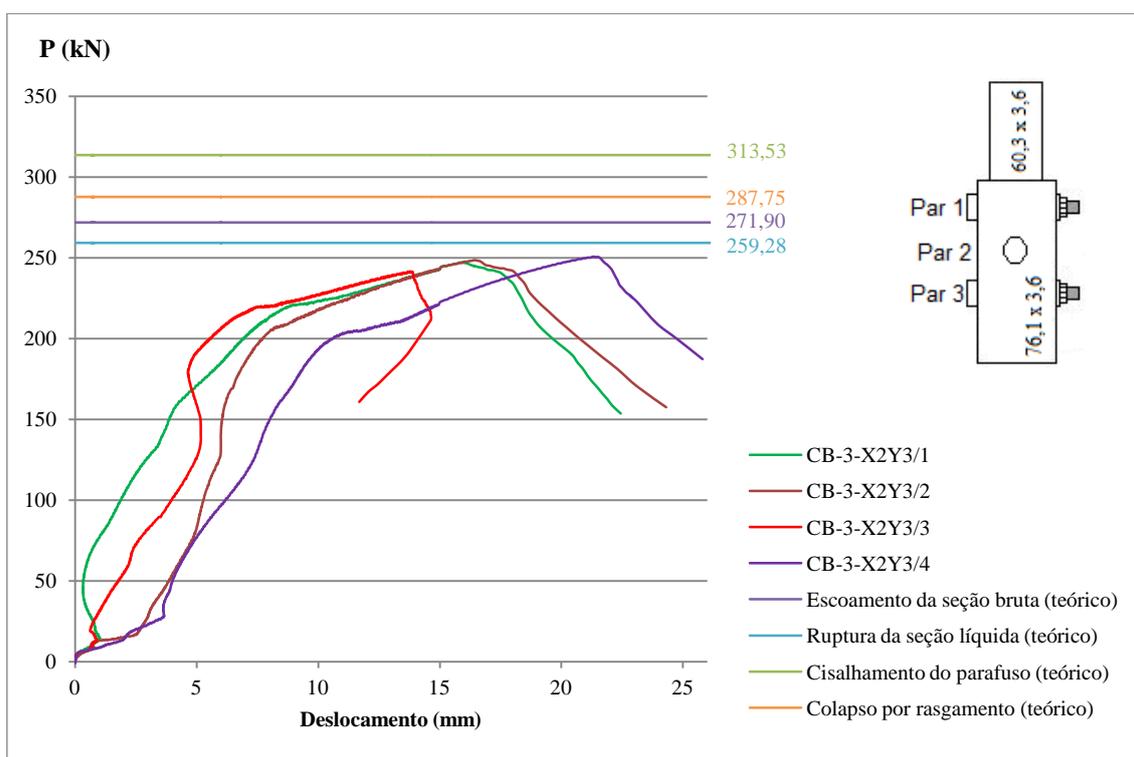


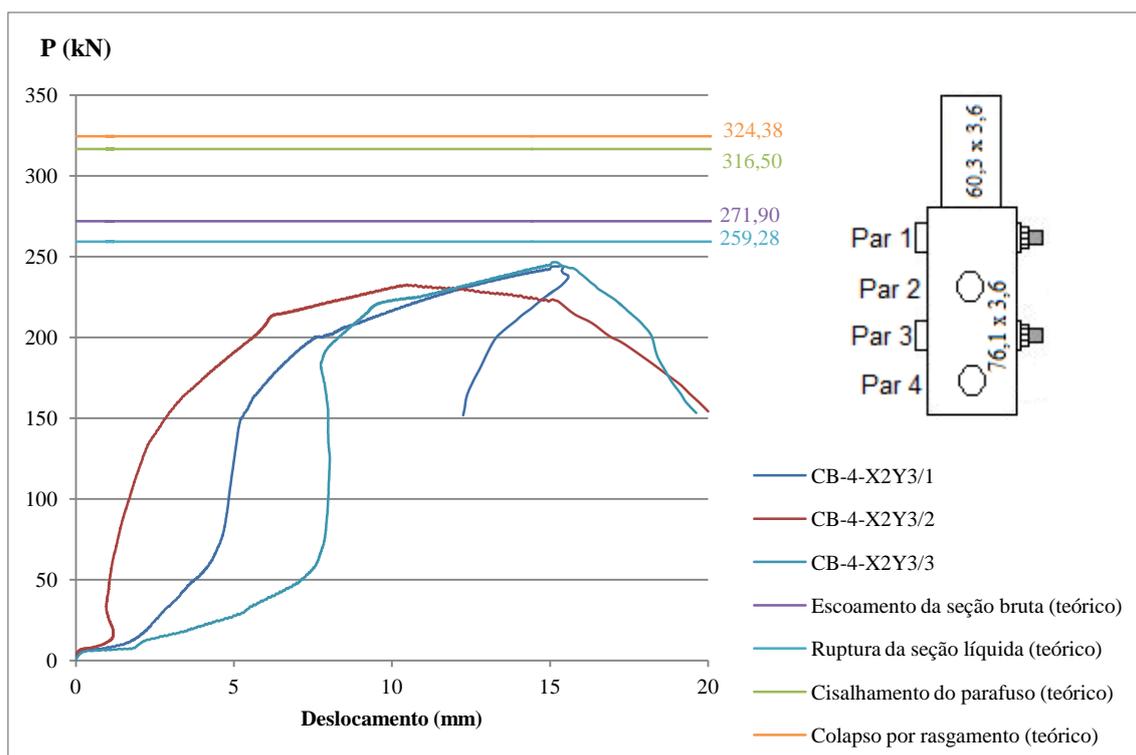
Figura 3.9 - Curva carga *versus* deslocamento, CB-3-X2Y3, e modos de falha da ligação.

A carga máxima dos protótipos CB-3-X2Y3/1, CB-3-X2Y3/2, CB-3-X2Y3/3 e CB-3-X2Y3/4 se deu com os seguintes carregamentos: 247,10 kN, 248,60 kN, 241,56 kN e

250,80 kN, respectivamente. O valor médio de ruptura desses protótipos foi de 247,02 kN com um desvio padrão de 3,94 kN.

Comportamento similar é observado nos protótipos com ligações com 4 parafusos, Figura 3.10. Analisando as curvas dos protótipos CB-4-X2Y3, observa-se uma variação nos deslocamentos alterando o comportamento inicial, uma vez que se tem valor diferente para cada protótipo. A dispersão das curvas no início dos ensaios pode ser explicada pela configuração cruzada de parafusos, como nos ensaios anteriores.

Neste grupo de protótipos também é observado que os modos de falha, calculados segundo a ABNT NBR8800:2008, não foram adequados para os protótipos desta série, visto que os níveis de carregamento previstos estão acima de todas as curvas experimentais, e os protótipos sofreram ruptura abaixo do previsto pela teoria.



Os protótipos romperam com os seguintes carregamentos CB-4-X2Y3/1 (244,16 kN), CB-4-X2Y3/2 (232,78 kN) e CB-4-X2Y3/3 (246,44 kN), com média de 241,13 kN e desvio padrão de 7,32 kN.

Como previsto, todos os protótipos desta série (CB) tiveram o rompimento na seção transversal da área líquida do tubo interno (na luva) e diametralmente como apresentado nas Figuras 3.11(a)(b)(c) e (d) para os protótipos com 3 parafusos e na Figura 3.12 (a)(b) e (c) para os protótipos com 4 parafusos.



a) CB-3-X2Y3/1



b) CB-3-X2Y3/2



c) CB-3-X2Y3/3



d) CB-3-X2Y3/4

Figura 3.11 - Rompimento do tubo interno, série CB com 3 parafusos.



a) CB-4-X2Y3/1



b) CB-4-X2Y3/2



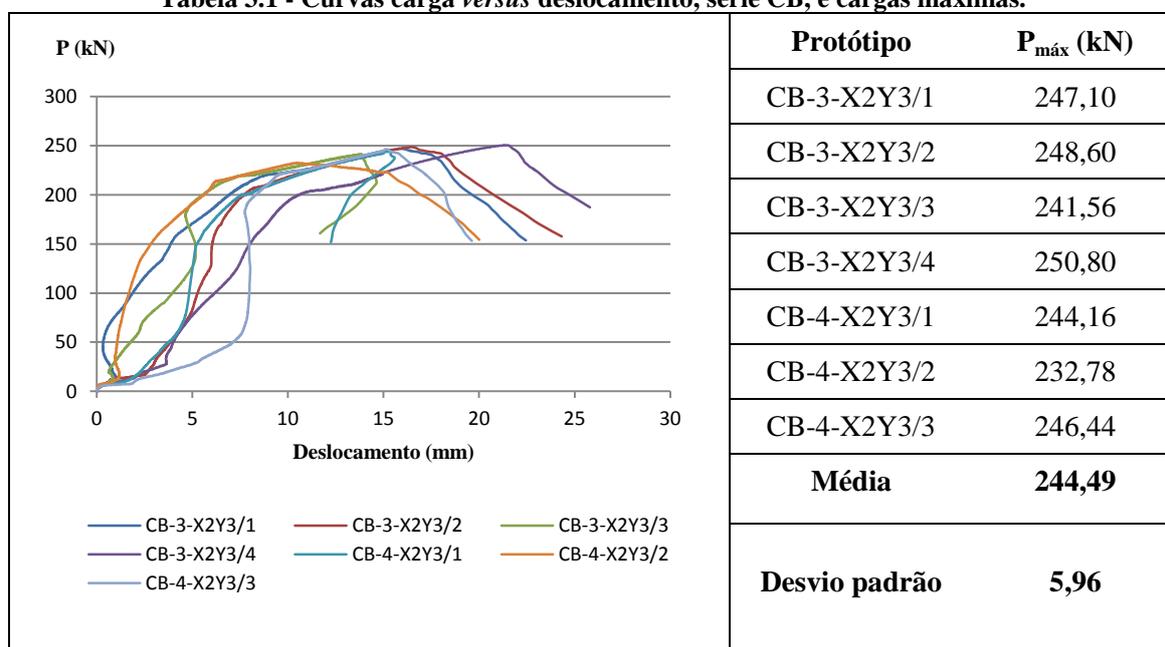
c) CB-4-X2Y3/3

Figura 3.12 - Rompimento do tubo interno, série CB com 4 parafusos.

A Tabela 3.1 apresenta um gráfico com as curvas carga *versus* deslocamento dos ensaios de todos os sete protótipos CB-3-X2Y3/1, CB-3-X2Y3/2, CB-3-X2Y3/3, CB-3-

X2Y3/4, CB-4-X2Y3/1, CB-4-X2Y3/2 e CB-4-X2Y3/3, e seus respectivos valores de carga máxima. Analisando as curvas, observa-se um comportamento bastante similar entre os protótipos. Observa-se que as cargas máximas para os protótipos com 3 parafusos não foram diferentes quando comparadas as cargas dos protótipos com 4 parafusos. A média de ruptura foi de 244,49 kN com um desvio padrão de 5,96 kN, sendo possível afirmar que, para os protótipos dessa série, o aumento do número de parafusos na ligação (de 3 para 4) não caracterizou uma melhoria na capacidade resistente da mesma.

Tabela 3.1 - Curvas carga *versus* deslocamento, série CB, e cargas máximas.



Diferente dos parafusos dos ensaios de Silva (2012), e dos parafusos da série LA, apresentados anteriormente, os parafusos da série CB, não apresentaram uma flexão que pudesse ser visualmente observada após o ensaio. Apesar deste fato, os parafusos estavam todos instrumentados e as medidas de deformação caracterizaram o início de escoamento à flexão de alguns parafusos.

Na Tabela 3.2, a seguir, são apresentadas as curvas de carga de tração (P) *versus* deformação nos parafusos e para cada protótipo ensaiado, com a linha pontilhada indicando o início do escoamento do parafuso.

Tabela 3.2 - Curvas carga versus deformação dos parafusos, série CB.

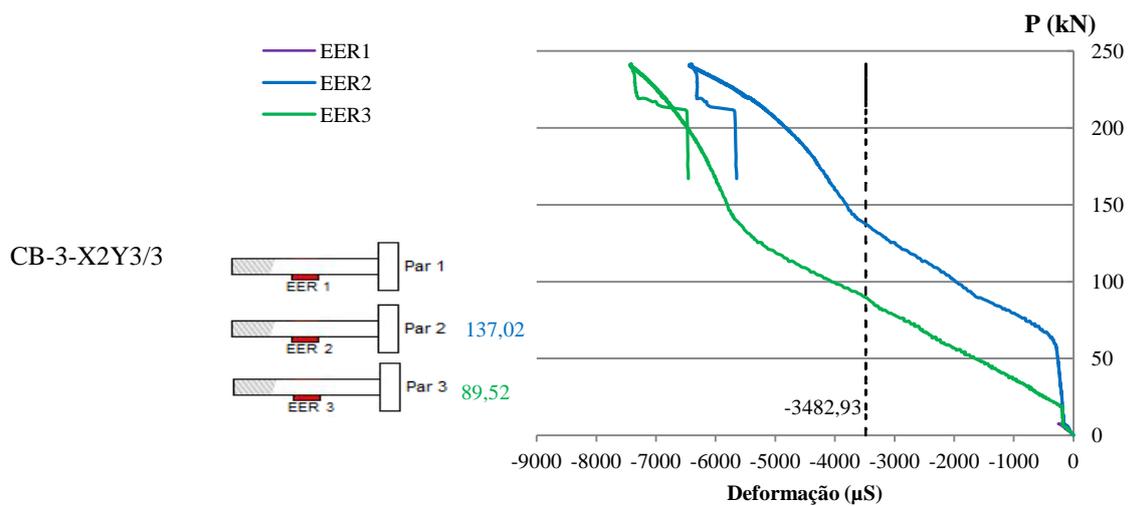
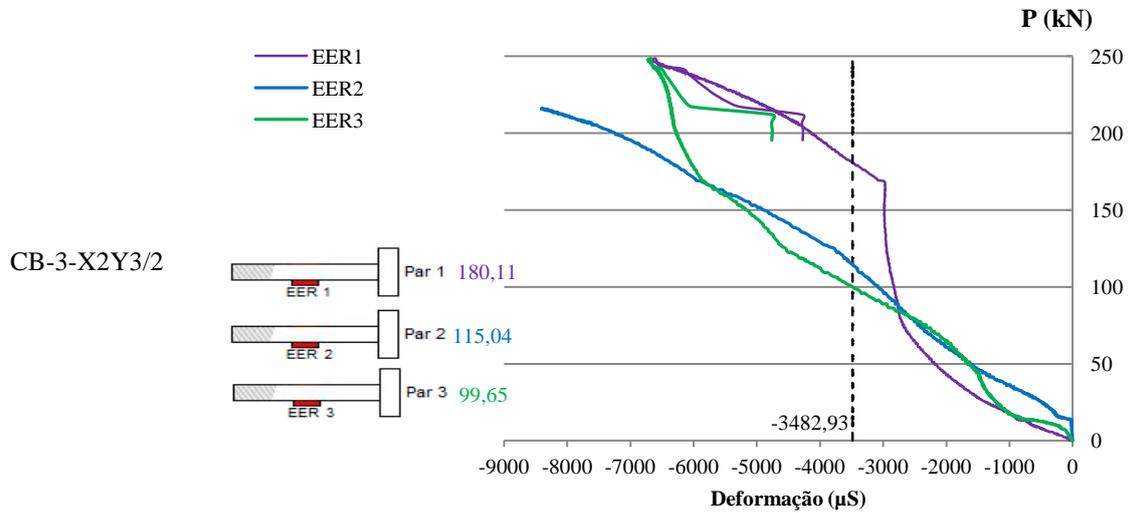
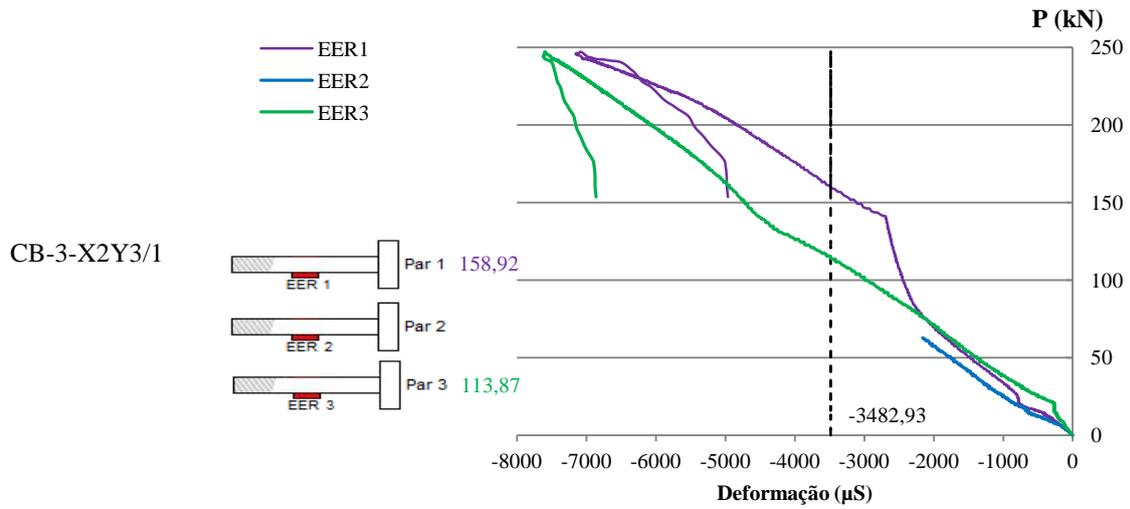


Tabela 3.2 – Curvas carga versus deformação dos parafusos, série CB (continuação)

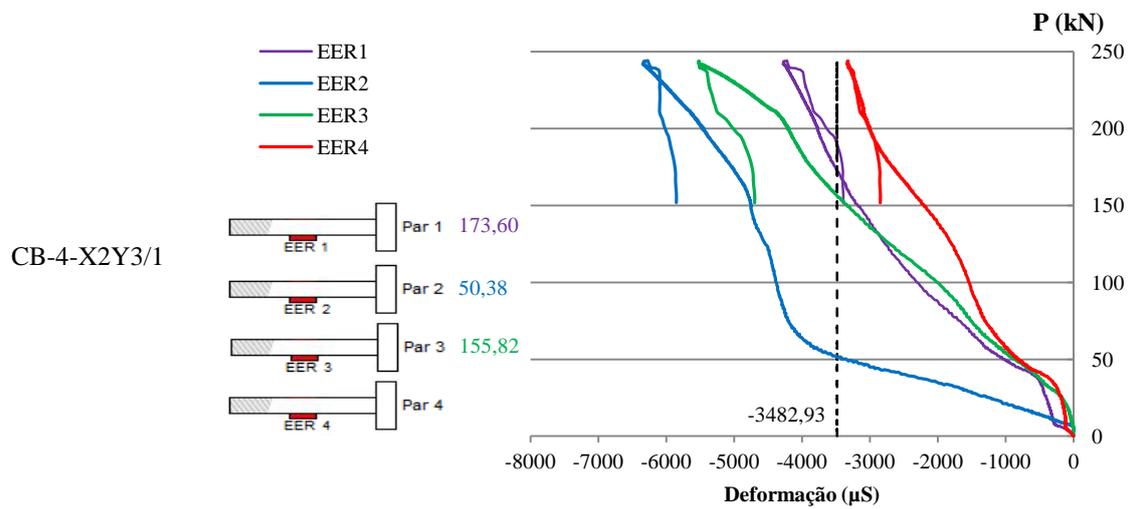
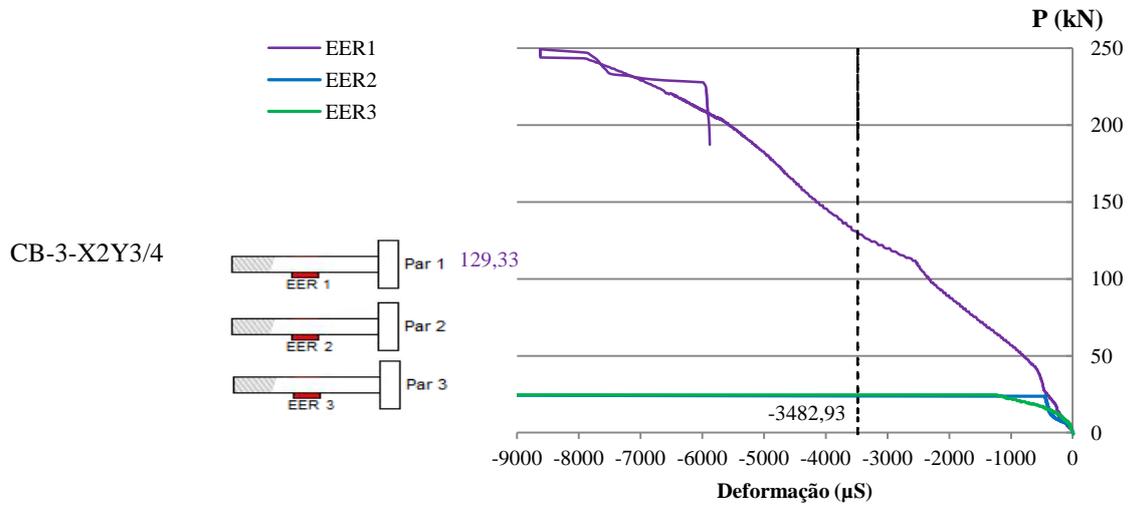
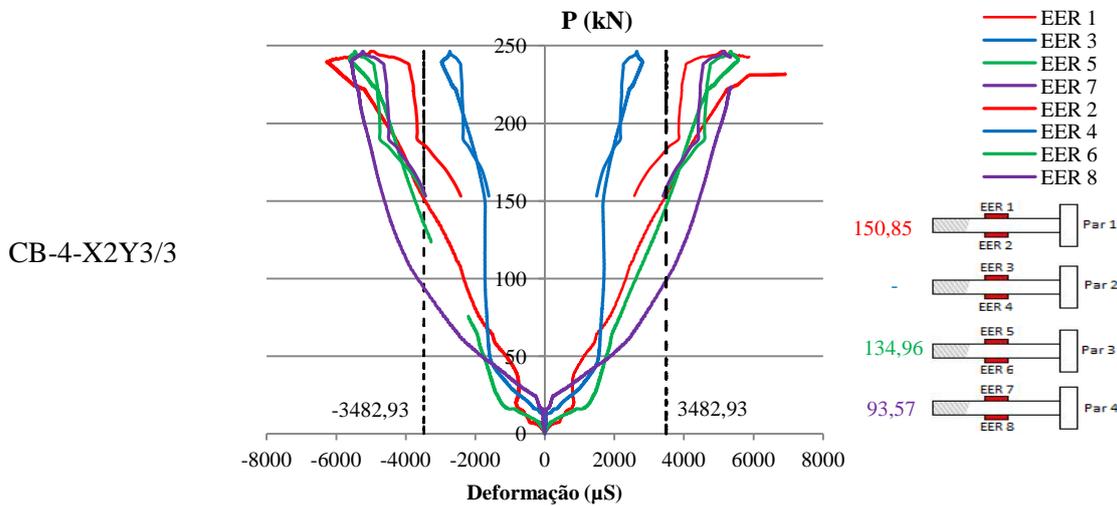
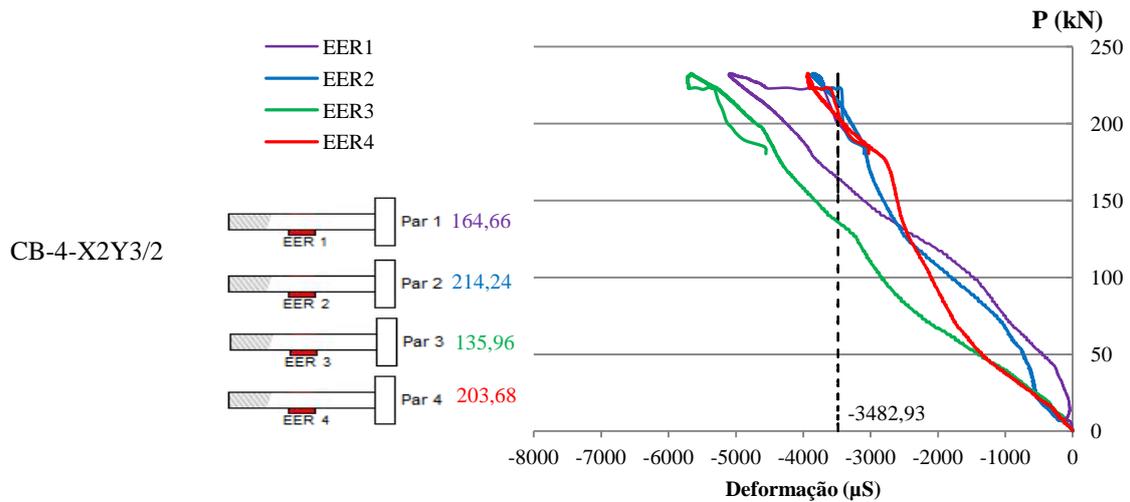


Tabela 3.2 – Curvas carga *versus* deformação dos parafusos, série CB (continuação).



A flexão nos parafusos foi caracterizada pelos valores do limite de deformação para a resistência ao escoamento do parafuso serem ultrapassados (3482,93 μ S - Tabela 2.5). Nas curvas da Tabela 3.2 é possível observar que houve flexão na maioria dos parafusos. Para alguns parafusos como o parafuso 4 do protótipo CB-4-X2Y3/1 e o parafuso 2 do CB-4-X2Y3/3, não ocorreu a flexão. Observa-se que o nível de carregamento onde os parafusos atingem a deformação para o início de escoamento a flexão do parafuso, está abaixo do previsto no cálculo teórico, se fosse utilizada a equação proposta por Silva (2012), para 3 parafusos 193,06 kN e para 4 parafusos 257,41 kN.

A análise dos resultados desta série de ensaios apresentados nas Figuras 3.9 e 3.10 e na Tabela 3.2 comprova a necessidade de adequação da equação de dimensionamento para o estado limite de flexão, proposta por Silva (2012), levando em consideração a nova configuração dos parafusos bem como a necessidade de utilização de um coeficiente de redução da área líquida da seção (C_t) para o cálculo da resistência à ruptura da seção líquida. Isto porque a ruptura prevista, com a utilização de um $C_t = 1,0$, é de 259,28 kN (Figuras 3.9 e 3.10) e o nível médio de carregamento máximo experimental dos protótipos foi de 244,49 kN (Tabela 3.1), sendo os resultados contra segurança.

Observa-se ainda que nos ensaios com 3 e 4 parafusos há pouca diferença nos resultados em termos de carga última, o que conduz a possibilidade do modo de falha ser no tubo por escoamento da seção bruta ou ruptura da seção líquida, já que em toda a série tem-se os mesmos tubos com espessura de 3,6 mm.

Outro fator importante que deve ser observado é que a dispersão inicial nos ensaios desta série está associada a influência da folga do ajuste do parafuso em relação ao furo associado com a configuração cruzada. Os parafusos podem apresentar diferentes posicionamentos na ligação e esta imperfeição da montagem pode induzir a dispersão inicial dos ensaios. Observa-se também que em todos os ensaios, quando se tem o início do escoamento dos parafusos, ocorre uma tendência de aproximação das curvas.

3.3 Protótipos da SÉRIE CC

Os resultados para os protótipos da série CC serão apresentados neste item que engloba dois protótipos com 5 parafusos dispostos de forma cruzada à 90°.

As curvas carga versus deslocamento apresentadas na Figura 3.13 descrevem o comportamento experimental da ligação dos protótipos CC-5-X2Y3/1 e CC-5-X2Y3/2. Na Figura 3.13 também são apresentados os valores da capacidade resistente para os estados limites previstos em teoria.

Seguindo o mesmo raciocínio das análises anteriores, as mudanças de inclinação nas curvas caracteriza a ocorrência de algum dos modos de falha. Nestes experimentos, as

expressões de dimensionamento adaptadas da norma brasileira e a equação para o estado limite de flexão do parafuso também não representaram adequadamente o comportamento da ligação. Observa-se valores de dimensionamento bem acima dos valores experimentais. Os protótipos CC-5-X2Y3/1 e CC-5-X2Y3/2 romperam com um carregamento de aproximadamente 19,5% e 14,6% (respectivamente) abaixo do previsto em cálculo, mostrando a necessidade de adequação com resultados contra a segurança.

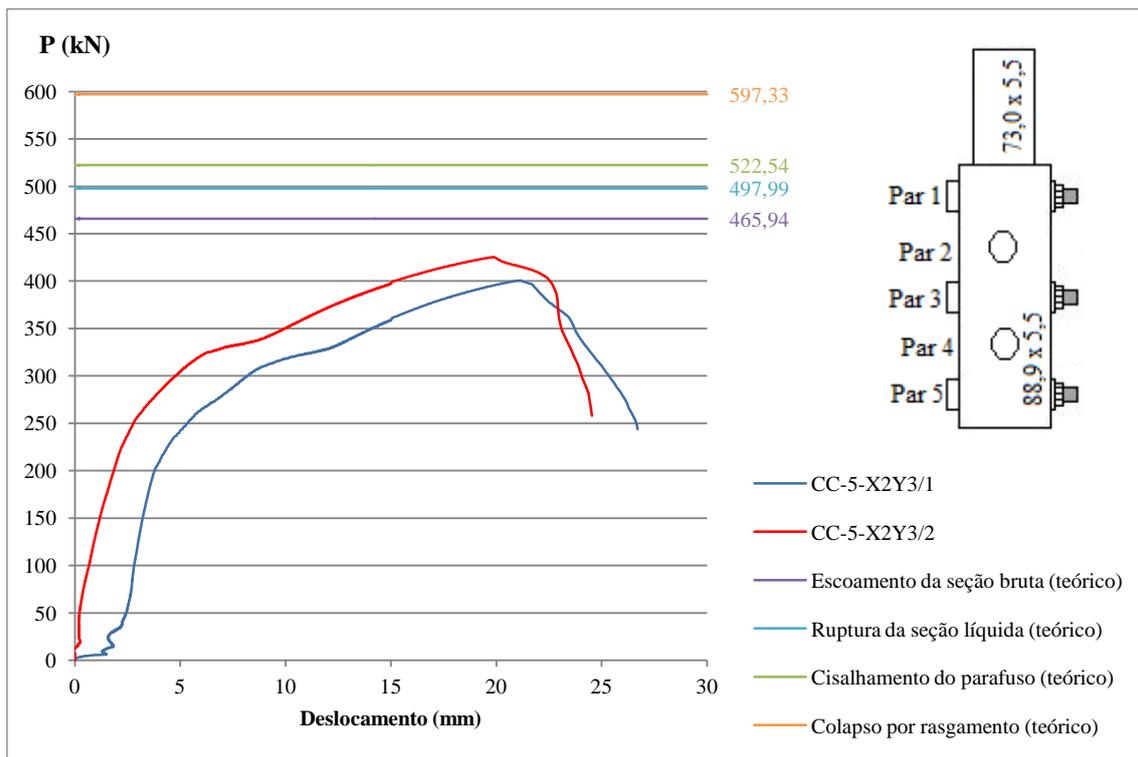


Figura 3.13 - Curva carga *versus* deslocamento, CC-5-X2Y3, e modos de falha da ligação.

Desconsiderando o deslocamento inicial, devido aos ajustes iniciais dos parafusos, observa-se pela Figura 3.14 que, diferentemente do observado nas curvas da série CB, as curvas experimentais para os dois protótipos desta série apresentaram um comportamento bastante similar, principalmente no regime elástico. Observa-se que o aumento na mudança de algumas características geométricas dos tubos (diâmetro e espessura) melhorou o comportamento da ligação, facilitando a identificação dos possíveis modos de falha.

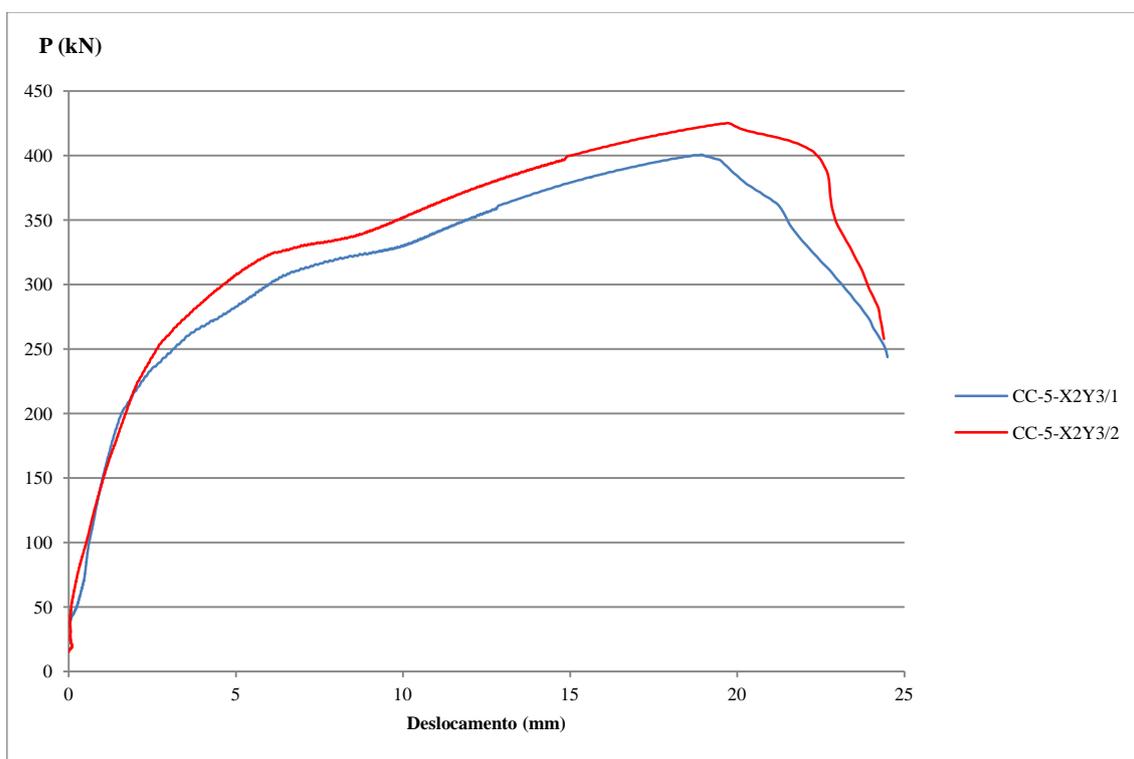


Figura 3.14 - Curva carga *versus* deslocamento, protótipos CC-5-X2Y3/1 e CC-5-X2Y3/2.

As cargas máximas dos protótipos CC-5-X2Y3/1 e CC-5-X2Y3/2 foram de 400,75 kN e 425,27 kN, respectivamente. A ruptura foi caracterizada nos tubos internos da ligação, como apresentado nas Figuras 3.15 (a) e (b).



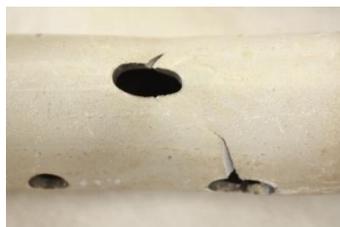
a) CC-5-X2Y3/1



a) CC-5-X2Y3/2

Figura 3.15 - Rompimento do tubo interno, série CC.

Nos protótipos ensaiados nesta série foi observada a mudança na configuração de rasgamento da seção, ocorrendo na diagonal entre os dois últimos furos do tubo interno. As Figuras 3.16 (a) e (b) apresentam mais detalhadamente a ruptura em diagonal dos protótipos.



a) CC-5-X2Y3/1

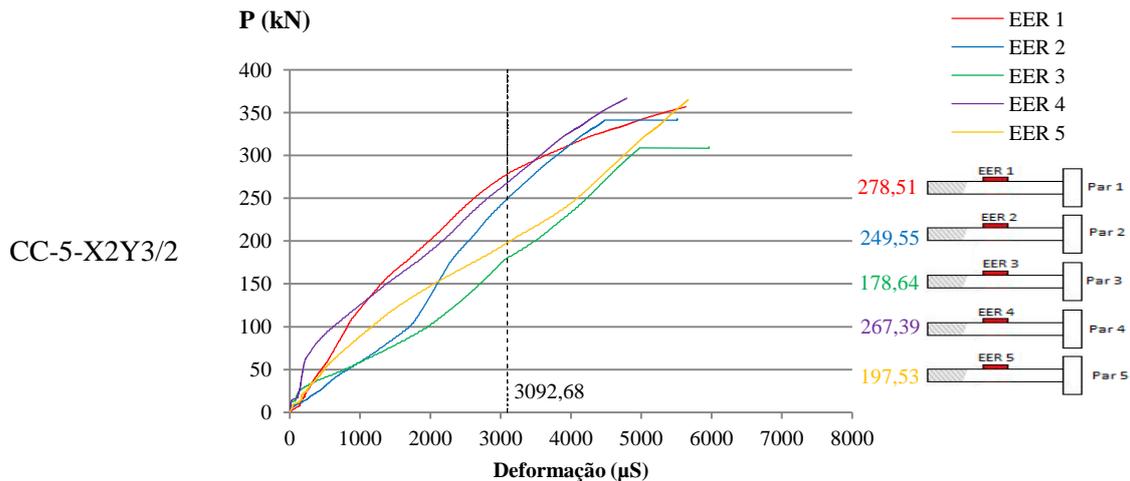
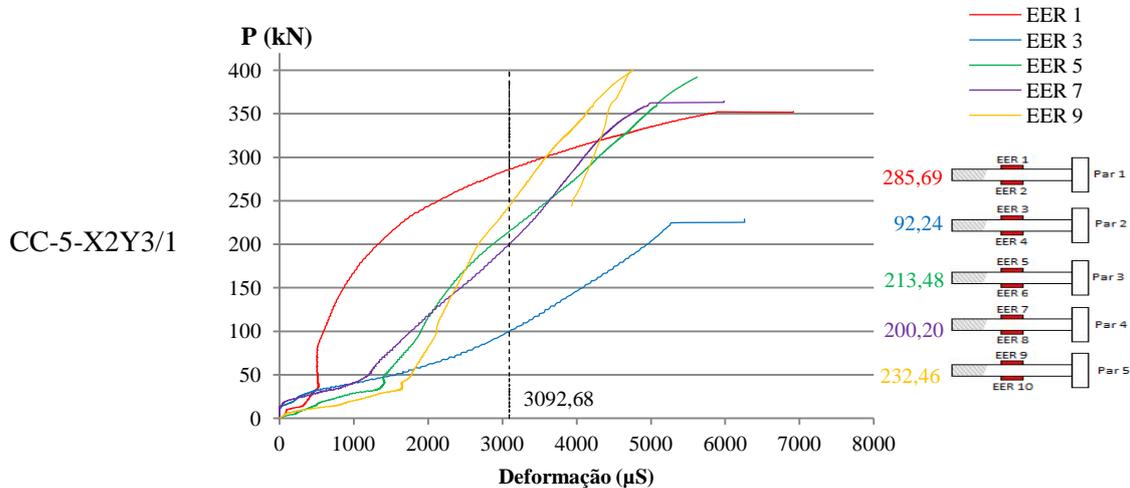


a) CC-5-X2Y3/2

Figura 3.16 - Detalhe do rompimento em diagonal dos tubos internos, série CC.

Na Tabela 3.3, a seguir, são apresentadas as curvas de carga de tração (P) *versus* deformação, obtidas a partir dos resultados dos extensômetros colados nos parafusos.

Tabela 3.3 - Curvas carga *versus* deformação dos parafusos, série CC.



Observa-se que o limite de deformação para o escoamento (3092,68 μ S - Tabela 2.5) foi ultrapassado o que caracteriza a ocorrência da flexão em todos os parafusos, caracterizando a flexão como modo de falha. Os níveis de carregamento em que os parafusos atingiram a resistência ao escoamento, assim como observado na série analisada anteriormente (CB), foram abaixo do valor teórico de cálculo 257 kN proposto por Silva (2012), em outros acima deste valor.

A análise das curvas da Figura 3.12 reafirma a necessidade de adequação das equações de dimensionamento para este tipo de ligação. Observa-se também que, para essa configuração de ligação, faz-se necessária a modificação do coeficiente de redução da área líquida (C_t), visto que a utilização deste como $C_t = 1,0$ fornece um valor de resistência para ruptura da seção líquida superior ao nível atingido experimentalmente, portanto contra a segurança.

Observa-se também que no início do carregamento, o comportamento não foi análogo ao da série CB que se justifica por esta série possuir maior espessura, ou seja, 5,5 mm.

3.4 Protótipos da SÉRIE CD

Neste item serão apresentados os resultados para os protótipos da série CD que possui três protótipos com 6 parafusos dispostos de forma cruzada a 90° . Destaca-se que esta série possui as mesmas dimensões dos tubos que a série CC.

O comportamento de cada protótipo ensaiado nesta série (CD-6-X2Y3/1, CD-6-X2Y3/2 e CD-6-X2Y3/3) é apresentado nas curvas da Figura 3.17. Observa-se que as mudanças de inclinação nas curvas caracterizam possíveis modos de falha na ligação. Assim como as séries apresentadas anteriormente, no início dos ensaios, as ligações têm deslocamentos iniciais associados ao posicionamento dos parafusos em relação aos furos da ligação.

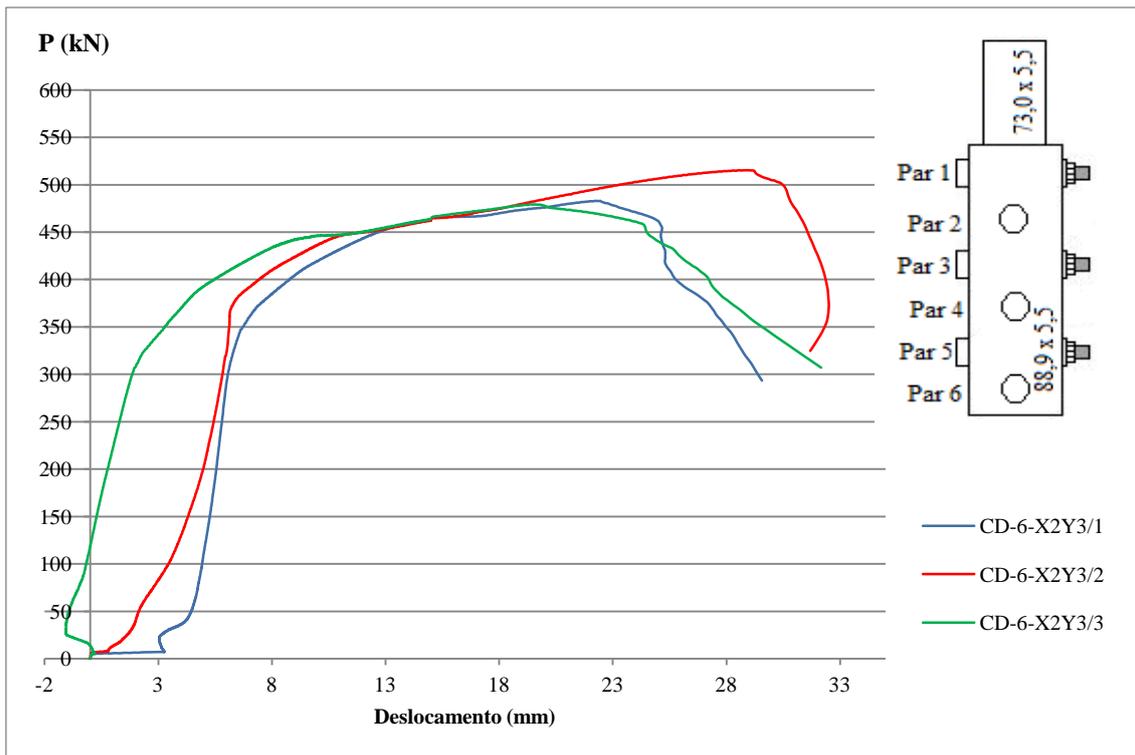


Figura 3.17 - Curva carga versus deslocamento, protótipos CD-6-X2Y3.

Os protótipos, CD-6-X2Y3/1, CD-6-X2Y3/2 e CD-6-X2Y3/3, romperam, respectivamente, com os seguintes níveis de carregamento 483,04 kN, 515,32 kN e 479,40 kN. Estes carregamentos foram superiores aos dos protótipos da série CC, (com 5 parafusos), podendo caracterizar um ganho de capacidade resistente com o aumento do número de parafusos.

Assim como as séries apresentadas anteriormente, no início dos ensaios, ocorreram deslocamentos iniciais excessivos, justificados pela necessidade de acomodação dos parafusos aos furos da ligação.

Para melhorar a análise, nas curvas apresentadas na Figura 3.18, os deslocamentos iniciais foram desconsiderados. Observa-se um comportamento similar entre os protótipos, seguindo uma proporcionalidade inicial entre carga e deslocamento. Observa-se que a faixa em que o carregamento permaneceu constante com aumento de deslocamento foi em torno de 450 kN para todos os três protótipos. Observa-se que em torno de 470 kN houve uma perturbação nas curvas dos ensaios. A mudança brusca na inclinação das curvas ocorreu na faixa de aproximadamente 330 kN a 380 kN, caracterizando o primeiro modo de falha para esta ligação.

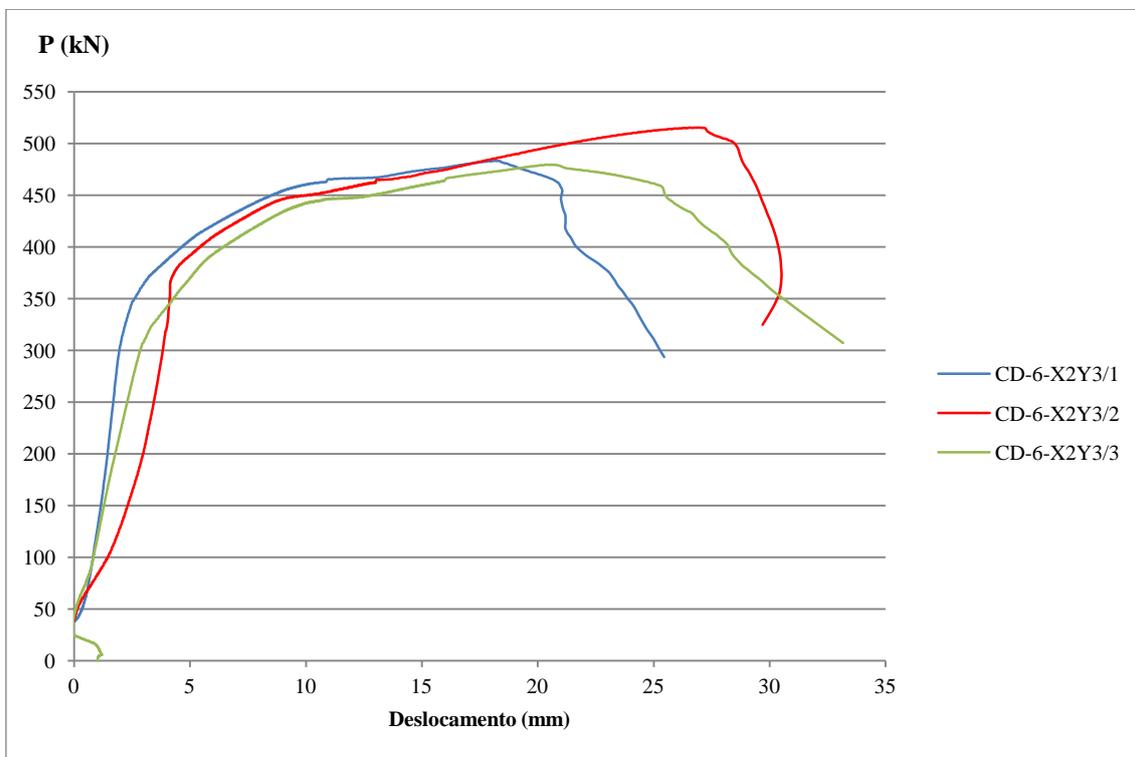


Figura 3.18 - Curva carga *versus* deslocamento, desconsiderando o deslocamento inicial, protótipos CD-6-X2Y3.

Como apresentado na Figura 3.19(a), (b) e (c) a ruptura de todos os protótipos desta série ocorreu no tubo interno. Apesar da ruptura observada nos protótipos CD-6-X2Y3/2 e CD-6- X2Y3/3 ter acontecido por completo na seção transversal do primeiro furo, nestes protótipos também é possível perceber a tendência de ruptura na seção em diagonal, entre os dois primeiros furos da ligação, caracterizada pelo alargamento observado no segundo furo das ligações, tendendo a uma ruptura.



a) CD-6- X2Y3/1



b) CD-6- X2Y3/2



c) CD-6- X2Y3/3

Figura 3.19 - Rompimento do tubo interno, série CD.

A Tabela 3.4, a seguir, apresenta as curvas de carga de tração na ligação (P) *versus* deformação dos parafusos dos protótipos CD-6-X2Y3/1, CD-6-X2Y3/2 e CD-6-X2Y3/3, obtidas a partir dos resultados dos extensômetros colados nos parafusos.

O protótipo CD-6-X2Y3/1 teve os parafusos instrumentados tanto na face inferior quanto na face superior para garantir leituras de extensometria para todos os parafusos. Nas curvas estão apresentadas apenas a leitura do extensômetro superior ou do extensômetro inferior, devido às perdas de leituras, mas se observam resultados para todos os parafusos.

Nos demais protótipos, CD-6-X2Y3/2 e CD-6-X2Y3/3, os parafusos foram instrumentados apenas na face superior, obtendo-se valores de deformação devido a tração provocada pela flexão do parafuso.

Tabela 3.4 - Curvas carga versus deformação dos parafusos, série CD.

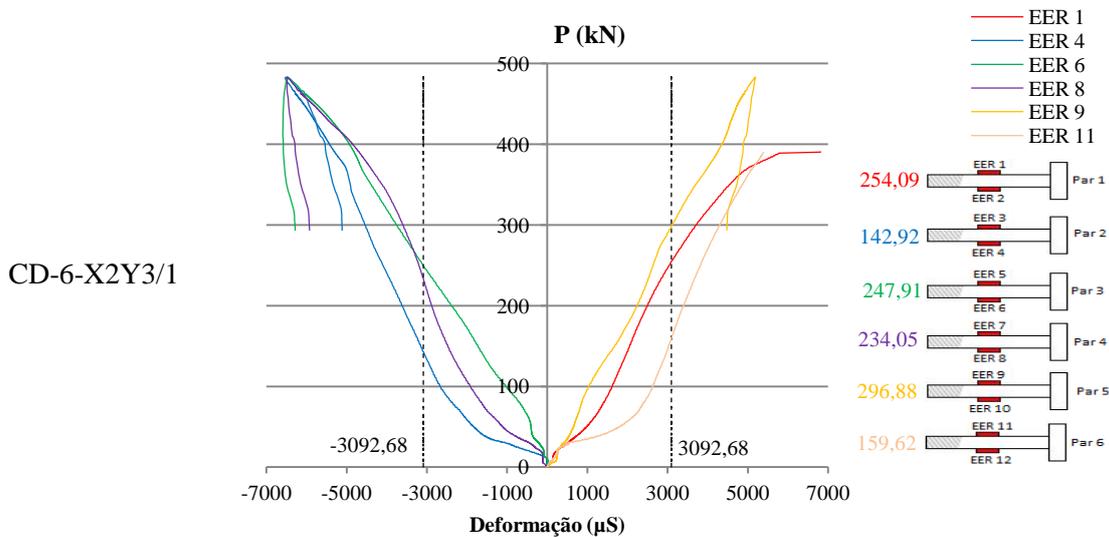
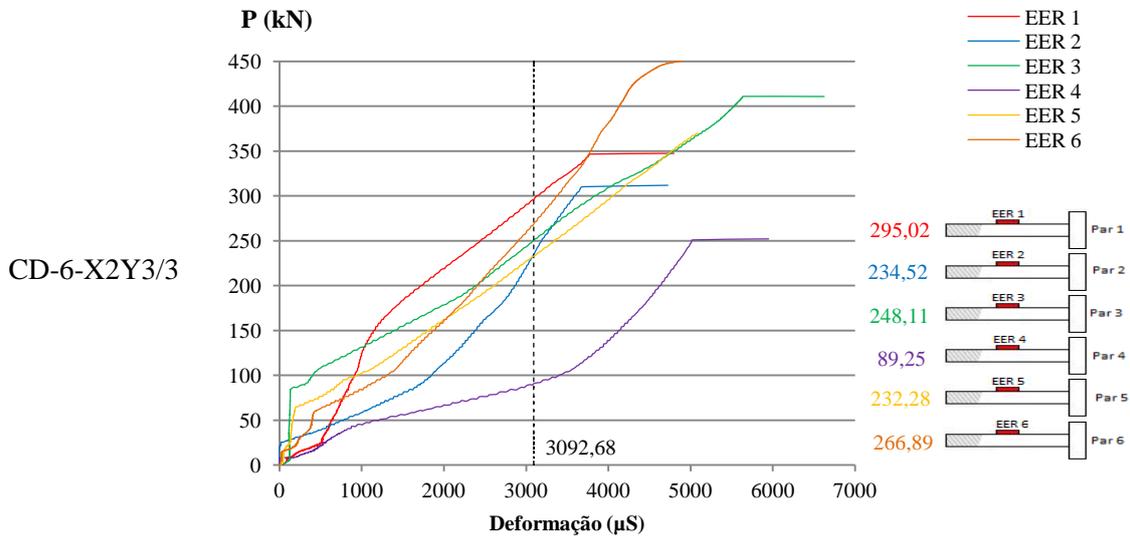
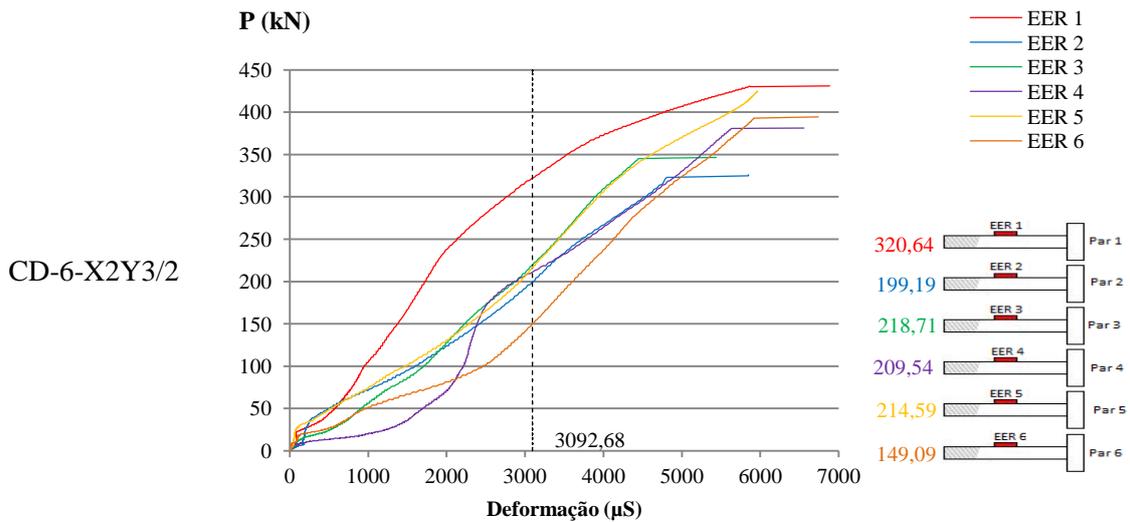


Tabela 3.4 – Curvas carga versus deformação dos parafusos, série CD (continuação).



Observando as curvas apresentadas na Tabela 3.4, é possível afirmar que houve flexão em todos os parafusos de todos os protótipos desta série, uma vez que através dos resultados dos extensômetros, os parafusos atingiram o limite de deformação para o escoamento (3092,68 μ S - Tabela 2.5) caracterizando o modo de falha da flexão nos parafusos.

Os níveis de carregamento em que os parafusos atingiram o limite para o escoamento do parafuso, assim como observado nas séries analisadas anteriormente (CB e CC), foram na maioria dos parafusos abaixo do valor teórico de cálculo esperado para esse modo de falha, 308,40 kN, como proposto por Silva (2012), portanto contra a segurança.

CAPÍTULO 4

4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS E PROPOSIÇÃO DA EQUAÇÃO

Neste capítulo tem-se as comparações dos resultados experimentais e teóricos das ligações tipo luva em perfis tubulares de seção circular com parafusos em linha e parafusos cruzados. Os resultados teóricos foram obtidos pelas equações apresentadas no capítulo 1 e são propostas novas formulações para o dimensionamento da tipologia de ligação luva considerando-se o modo de falha da flexão no parafusos.

4.1 Análise global da força resistente teórica

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores da força resistente teórica para os possíveis modos de falha da ligação e os valores da força máxima e de flexão experimentais dos protótipos ensaiados. Neste trabalho, a maioria dos resultados experimentais caracterizou a flexão do parafuso como primeiro modo de falha. Para os resultados experimentais, $F_{m\acute{a}x}$ corresponde a força máxima nos ensaios, e $F_{m,exp}$ é a carga de flexão experimental dos parafusos da ligação, determinada graficamente, considerando a primeira redução de carregamento com maiores deslocamentos, ponto 1 da Figura 3.3. Destaca-se que nos ensaios deste trabalho, todos os parafusos foram instrumentados possibilitando avaliar a distribuição do carregamento nos parafusos da ligação, o que não foi possível nos ensaios de Silva (2012).

Na Tabela 4.1 também estão representados os valores dos possíveis modos de falha da ligação de acordo com a ABNT NBR 8800:2008, sendo eles: escoamento da seção bruta (E.S.B. - N_t), ruptura da seção líquida (R.S.L. - N_t), com adaptação descrita no item 1.2.4, cisalhamento do parafuso (C.P. - F_v), o calapso por rasgamento (C.R. - F_r) e a flexão do parafuso (F.P. - F_m), não previsto nas prescrições da NBR 8800:2008.

Observa-se que no caso do modo de flexão do parafuso, os valores de carga são calculados apenas para a ligação com parafusos em linha que são previstos na formulação de Silva (2012). No caso dos parafusos cruzados não há formulação proposta para este modo de falha.

Tabela 4.1 - Valores dos modos de falha teórico e experimental para os protótipos das séries ensaiadas.

Protótipo	Estados limites teóricos					Experimental	
	E.S.B.	R.S.L.	C.P.	C.R.	F.P.	$F_{m,exp}$ (kN)	Flexão
	N_t (kN)	N_t (kN)	F_v (kN)	F_r (kN)	F_m (kN) Silva (2012)		
LA-3-X2Y3/1	360,76	378,21	313,53	394,13	193,06	425,74	308,58
LA-4-X2Y3/1	360,76	378,21	418,03	444,42	257,41	448,73	309,88
LA-4-X2Y3/2	360,76	378,21	418,03	444,42	257,41	446,91	310,28
CB-3-X2Y3/1	271,90	259,28	313,53	287,75	-	247,10	131,18
CB-3-X2Y3/2	271,90	259,28	313,53	287,75	-	248,60	167,55
CB-3-X2Y3/3	271,90	259,28	313,53	287,75	-	241,56	Não definido
CB-3-X2Y3/4	271,90	259,28	313,53	287,75	-	250,80	159,80
CB-4-X2Y3/1	271,90	259,28	418,03	324,38	-	244,16	148,30
CB-4-X2Y3/2	271,90	259,28	418,03	324,38	-	232,78	132,20
CB-4-X2Y3/3	271,90	259,28	418,03	324,38	-	246,44	Não definido
CC-5-X2Y3/1	465,94	497,99	522,54	597,33	-	400,75	197,76
CC-5-X2Y3/2	465,94	497,99	522,54	597,33	-	425,27	224,01
CD-6-X2Y3/1	408,21*	415,38*	627,05	555,23*	-	483,04	301,21
CD-6-X2Y3/2	408,21*	415,38*	627,05	555,23*	-	515,32	364,17
CD-6-X2Y3/3	408,21*	415,38*	627,05	555,23*	-	479,40	303,87
<p>E.S.B : escoamento da seção bruta R.S.L : ruptura da seção líquida C.P : cisalhamento no parafuso C.R : colapso por rasgamento F.P : flexão no parafuso segundo Silva (2012) N_t : força axial resistente de tração</p> <p>F_v : força resistente de cisalhamento F_r : força resistente de colapso por rasgamento F_m : força resistente de flexão F_{rup} : força de ruptura $F_{m,exp}$: força resistente experimental da ligação *Como descrito no item 2.3.2 (Tabela 2.6)</p>							

Observa-se que a carga máxima atingida nos protótipos da série LA, onde os parafusos estavam dispostos em linha ocorreram para valores acima dos valores teóricos para todos os modos de falha. Os protótipos com parafusos cruzados (série CB, CC e CD) tiveram uma capacidade resistente inferior aos valores estabelecidos para o dimensionamento, considerando todos os modos de falha, adaptados da NBR 8800:2008, e apresentados no capítulo 1 desta dissertação. Verifica-se então, a

necessidade de adequação das equações com correções que consideram, por exemplo, um coeficiente de redução da área líquida (C_l).

De acordo com os resultados apresentados, a equação para o estado limite de flexão do parafuso, para os parafusos em linha, (F.P.), dada por F_m , calculado segundo Silva (2012), ainda deve ser analisada e corrigida, de modo a melhorar os resultados para o dimensionamento dessa tipologia de ligação. A equação gera resultados conservadores e não contempla todos os parâmetros envolvidos na resistência da ligação e também não é válida para a ligação com parafusos cruzados. Destaca-se que este modo de falha não está previsto nas prescrições da ABNT NBR 8800:2008.

Conforme citado no capítulo 3, os protótipos da série CB não apresentaram flexão que pudesse ser visualmente observada e o modo de falha não foi claramente definido conforme apresentado nos gráficos das Figuras 3.9 e 3.10, sendo a espessura dos tubos destes protótipos de 3,6 mm e a folga entre os mesmos de 7,9 mm. Estas características levam os protótipos a um comportamento muito influenciado pelas condições de aperto dos parafusos, bem como, possivelmente, o modo de falha de flexão do parafuso e da ruptura da seção líquida estarem muito próximos. No entanto, estas afirmações devem ser confirmadas por um novo programa experimental.

Quanto as análises teóricas do modo de flexão do parafuso para a ligação cruzada, não há formulação prevista e os demais modos calculados conduzem a resultados contra a segurança, o que é uma proposta deste trabalho.

4.2 Protótipos com parafusos em linha

As análises apresentadas neste item são dos resultados experimentais e teóricos das ligações com parafusos em linha. Nas análises foram utilizados resultados experimentais deste trabalho e de Silva (2012). Destaca-se novamente que nos resultados deste trabalho todos os parafusos foram instrumentados o que não ocorreu nos ensaios de Silva (2012).

Na Tabela 4.2 são apresentadas as propriedades geométricas e do material para os protótipo ensaiados. Estas propriedades e as relações entre elas influenciam a capacidade resistente da ligação.

Tabela 4.2 - Características dos protótipos em linha.

Séries	N° Protótipos	Instrumentados	N° Parafusos	Tubo Externo				Tubo Interno			
				Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Aço		Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Aço	
						f _y (MPa)	f _u (MPa)			f _y (MPa)	f _u (MPa)
A-5-X3Y2 ^{a,c}	2	0	5	73,0	5,5	399,5	539,5	60,3	5,5	381,0	479,0
A-4- X3Y2 ^{a,c}	2	0	4								
A-3-X3Y2 ^{a,c}	1	0	3								
A-2-X3Y2 ^e	1	0	2								
C-4-X2Y2 ^{b,c}	3	1	4	76,1	3,6	386,0	545,0	60,3	5,5	381,0	479,0
D-5-X2Y1 ^{a,c}	6	1	5	88,9	4,8	369,0	535,0	73,0	5,2	303,0	448,0
E-5-X3Y3 ^{b,c}	3	1	5	88,9	4,8	403,0	544,5	73,0	5,5	399,5	539,5
E-6-X3Y3 ^{b,c}	3	1	6								
F-5-X2Y3 ^{a,c}	5	1	5	88,9	5,5	375,0	474,0	73,0	5,5	399,5	539,5
LA-3-X3Y2 ^{a,d}	1	1	3	73,0	5,5	399,5	539,5	60,3	5,5	381,0	479,0
LA-4-X3Y2 ^{a,d}	2	2	4								

^a Série em que a ruptura ocorreu no tubo interno e o modo de falha foi de flexão no parafuso
^b Série em que a ruptura ocorreu no tubo externo e o modo de falha foi de flexão no parafuso
^c Série Silva (2012)
^d Série deste trabalho
^e Série em que o modo de falha foi o cisalhamento no parafuso

Na Tabela 4.2 observa-se que a série C-4-X2Y2 possui espessura do tubo externo igual a 3,6 mm, a menor de todos os protótipos, e na série D-5-X2Y1 o aço do tubo interno possui tensão de escoamento de 303 MPa, abaixo das tensões de escoamento dos demais tubos dos protótipos.

Em relação aos resultados, quanto ao modo de falha, com exceção do protótipo com 2 parafusos, que apresentou cisalhamento do parafuso, todos os demais protótipos apresentaram a flexão do parafuso, observado experimentalmente.

A Figura 4.1 apresenta a carga de flexão experimental ($F_{m,exp}$), normalizada em relação à força no escoamento do tubo, dada pela tensão de escoamento do aço (f_y) multiplicada pela área da seção bruta (A_g) versus a espessura do tubo que ocorreu a ruptura, sendo considerado os resultados para os protótipos com 3, 4, 5 e 6 parafusos. O valor de $F_{m,exp}$ foi obtido pelos gráficos dos ensaios e considerando a primeira redução de carregamento.

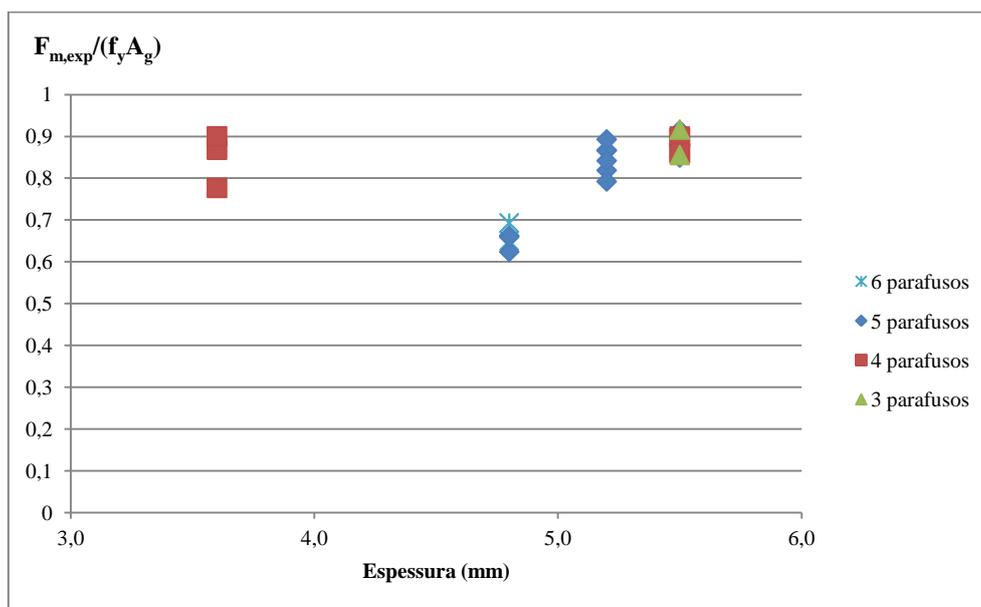


Figura 4.1 - Força de flexão experimental, normalizada em relação à força de escoamento do aço versus a espessura do tubo de ruptura.

Observa-se na Figura 4.1 que o aumento da espessura não significou ganho significativo de capacidade resistente. A Figura 4.1 confirma que o modo de falha é a flexão no parafuso, visto que os valores obtidos para razão entre a força experimental e de escoamento do tubo são menores que a unidade, portanto não ocorreu o escoamento da seção. No caso do protótipo com 2 parafusos o modo de falha é o cisalhamento do parafuso, por isso não foi considerado no gráfico. Observa-se também que não há diferença significativa da quantidade de parafusos na capacidade resistente da ligação.

Na Figura 4.2 tem-se que o aumento do diâmetro do tubo não caracteriza aumento da capacidade resistente. O aumento do diâmetro provoca uma redução da carga de flexão do parafuso, visto que o comprimento do parafuso é maior, portanto mais suscetível ao efeito da flexão.

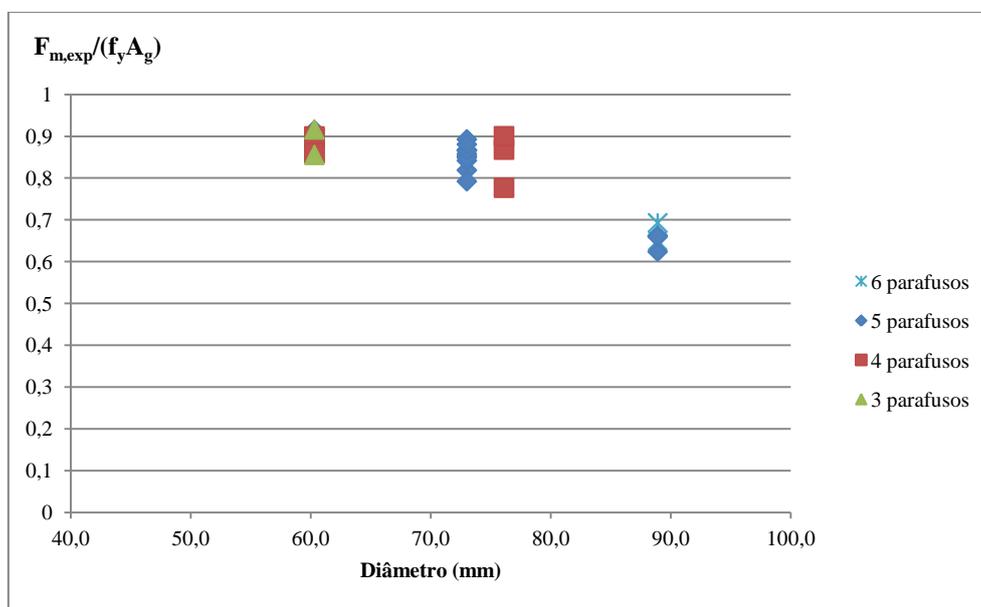


Figura 4.2 - Força de flexão experimental, normalizada em relação à força de escoamento do aço versus o diâmetro do tubo de ruptura.

4.2.1 Proposta de formulação para flexão dos parafusos em linha

Este item tem como objetivo propor uma nova equação para avaliar o modo de falha de flexão no parafuso. A equação 1.10, proposta por Silva (2012), será desconsiderada visto que o modelo proposto baseou-se nos resultados da instrumentação com EER de apenas um parafuso e não considera parâmetros como a espessura dos tubos da ligação, e ainda considera o número de parafusos como uma influência na capacidade resistente da ligação, quanto ao modo de falha de flexão do mesmo.

Os resultados experimentais deste trabalho para as ligações com parafusos em linha indicaram que a distribuição de forças por parafuso é aproximadamente a mesma, como apresentado nas Figuras 3.6, 3.7 e 3.8. Assim, na formulação proposta foi considerado que a distribuição de forças em cada parafuso da ligação é igual, sendo a favor da segurança. Nos gráficos das Figuras 3.6, 3.7 e 3.8 tem-se os valores das forças medidos

a partir da EER para a deformação de escoamento ε_y . Observa-se uma variação que para efeito de projeto pode ser considerada uniforme.

Outra observação oriunda dos resultados dos ensaios realizados é que se deve considerar a participação dos tubos na distribuição da carga aplicada na ligação, o que não foi contemplado na equação de Silva (2012).

Assim, a equação proposta neste trabalho baseia-se em considerar a força que provoca a flexão no parafuso como uma parcela da carga total aplicada na ligação. Como observado nas análises experimentais, a flexão é o estado limite dominante das ligações com parafusos em linha. Logo, a carga de tração total aplicada no protótipo será tomada como F_m , que define a força aplicada no protótipo que provoca a flexão dos parafusos. A seção transversal do tubo é considerada plana como descrito no item 1.2.4. A força F_m é então distribuída na seção transversal do tubo, de comprimento igual ao perímetro do mesmo, πD , obtendo-se uma taxa de distribuição de força por unidade de comprimento. Para obtenção da força que provoca a flexão no parafuso, f_b , foi definida uma região de influência próxima dos furos e igual a duas vezes o diâmetro do furo, $2d$. Este valor foi obtido a partir da comparação com resultados experimentais, como será colocado a seguir.

O procedimento descrito acima é esquematizado na Figura 4.3.

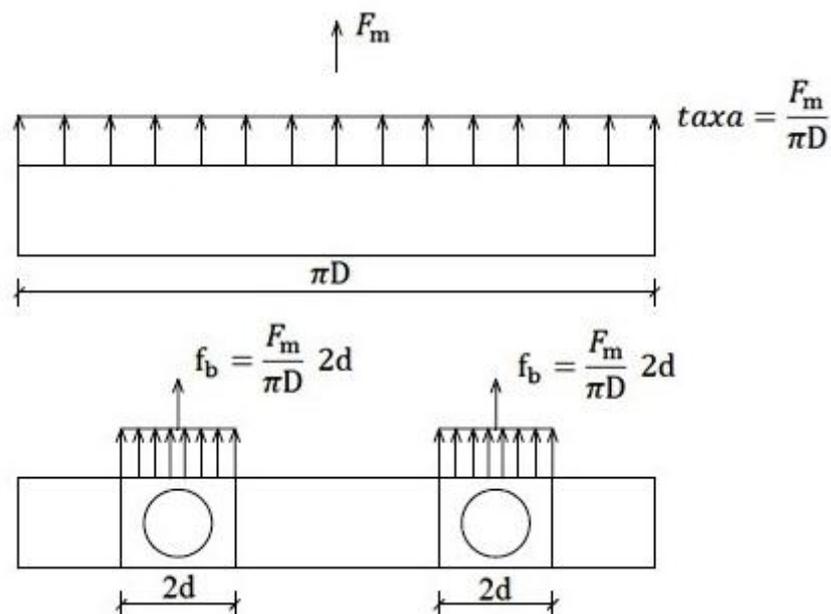


Figura 4.3 - Esquema da determinação de f_b .

A força no parafuso, f_b , é definida conforme equação 4.1.

$$f_b = \frac{F_m}{\pi D} 2d \quad (4.1)$$

Considerando a teoria clássica de viga em que no parafuso sob flexão está atuando uma força oriunda da tensão normal tem-se que, f_b , é igual a equação 4.2. A obtenção dessa força é esquematizada na Figura 1.14.

$$f_b = \frac{f_{y,b} W_b}{x} \quad (4.2)$$

onde $f_{y,b}$ é a resistência ao escoamento do parafuso;

W_b é o módulo de resistência elástico da seção do parafuso;

x é o braço de alavanca obtido conforme transcrito a seguir pela equação 4.3.

$$x = \frac{(D_{\text{ext}} - e_{\text{ext}}) - (D_{\text{int}} - e_{\text{int}})}{2} \quad (4.3)$$

Igualando-se a equação 4.1 com a equação 4.2, tem-se a equação 4.4, que fornece a força total da ligação que provoca a flexão nos parafusos.

$$F_m = \frac{f_{y,b} W_b \pi D}{2 d x} \quad (4.4)$$

onde D é o diâmetro do tubo interno (“luva”);

d é o diâmetro do furo;

A Tabela 4.3 apresenta os resultados de carga obtidos experimentalmente para o estado limite de flexão ($F_{m,\text{exp}}$), e os resultados obtidos pela equação proposta neste trabalho (equação 4.4) e a equação 1.10 proposta por Silva (2012), bem como o parâmetro x , utilizado na equação 4.4.

Tabela 4.3 - Resultados experimentais e resultados da equação proposta.

Protótipo	Par.	F_{exp} (kN)	x (mm)	$F_{m,exp}$ (kN)	F_m (kN)	$\frac{F_m}{F_{m,exp}}$	F_m (kN) Silva(2012)	$\frac{F_m^{Silva(2012)}}{F_{m,exp}}$	
LA-3-X2Y3/1 ^a	1	103,31	6,35	308,58	237,72	0,770	193,05	0,626	
	2	84,10							
	3	114,19							
LA-4-X2Y3/1 ^a	1	193,53		309,88		237,72	0,767	257,41	0,831
	2	189,23							
	3	159,01							
	4	237,61							
LA-4-X2Y3/2 ^a	1	*		310,28		237,72	0,766	257,41	0,830
	2	155,50							
	3	183,27							
	4	209,13							
A-5-X3Y2/1 ^b	-	-	6,35	321,62	237,72	0,739	321,76	1,000	
A-5-X3Y2/2 ^b	-	-		329,99		0,720		0,975	
A-4- X3Y2/1 ^b	-	-		323,24		0,735	257,41	0,796	
A-4- X3Y2/2 ^b	-	-		324,57		0,732		0,793	
A-3- X3Y2/1 ^b	-	-		330,59		0,719		193,05	0,584
C-4-X2Y2/1 ^b	-	-	8,85	274,71	170,57	0,621	184,69	0,672	
C-4-X2Y2/2 ^b	-	-		284,87		0,599		0,648	
C-4-X2Y2/3 ^b	1	232,51		245,84		0,694		0,751	
D-5-X2Y1/1 ^b	-	-	8,15	290,97	252,53	0,868	250,69	0,862	
D-5-X2Y1/2 ^b	-	-		274,75		0,919		0,912	
D-5-X2Y1/3 ^b	-	-		290,63		0,869		0,863	
D-5-X2Y1/4 ^b	-	-		282,48		0,894		0,887	
D-5-X2Y1/5 ^b	1	293,99		299,57		0,843		0,837	
E-5-X3Y3/1 ^b	-	-	8,30	318,83	247,96	0,778	246,16	0,772	
E-5-X3Y3/2 ^b	-	-		338,46		0,733		0,727	
E-5-X3Y3/3 ^b	1	275,02		336,99		0,736		0,730	
E-6-X3Y3/1 ^b	-	-		354,15		0,700	295,40	0,834	
E-6-X3Y3/2 ^b	-	-		353,92		0,701		0,835	
E-6-X3Y3/3 ^b	1	327,65		332,28		0,746		0,889	
F-5-X2Y3/1 ^b	-	-	7,95	397,12	258,88	0,652	257,00	0,647	
F-5-X2Y3/2 ^b	-	-		399,58		0,648		0,643	
F-5-X2Y3/3 ^b	-	-		395,69		0,654		0,649	
F-5-X2Y3/4 ^b	-	-		403,53		0,642		0,637	
F-5-X2Y3/5 ^b	1	292,73		410,28		0,631		0,626	
<p>* Perda de leitura do EER - Sem instrumentação F_{exp} = Força experimental no parafuso (força que causa a flexão no parafuso) x = (equação 4.3) $F_{m,exp}$ = Força de flexão experimental F_m = Força de flexão de cálculo ^a Séries deste trabalho ^b Séries do trabalho de Silva (2012)</p>									

Observa-se boa correlação de resultados e a favor da segurança dados pelas duas equações (Silva (2012) e proposta neste trabalho). No entanto a equação de Silva não é consistente pois considera que a capacidade resistente para o modo de falha de flexão dos parafusos depende do número de parafusos o que não foi observado nos ensaios. Nos gráficos das Figuras 4.1 e 4.2 observa-se que a força aplicada na ligação é parcialmente absorvida pelo tubo e que influencia na distribuição de forças para a região do furo e conseqüentemente para o parafuso, o que também não é considerado na equação de Silva (2012).

Assim, a equação proposta corrige estas distorções teóricas e considera a influência do comprimento do parafuso (associado ao diâmetro do parafuso) o que influencia diretamente na flexão do mesmo e, conseqüentemente, na resistência da ligação.

4.3 Protótipos com parafusos cruzados

As análises apresentadas neste item são dos resultados experimentais e teóricos das ligações com parafusos cruzados. Nas análises são considerados os resultados experimentais obtidos neste trabalho.

Os resultados das análises teóricas e experimentais dos ensaios dos protótipos com parafusos cruzados são apresentados a seguir. As características geométricas e mecânicas dos protótipos ensaiados são apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Características dos protótipos com parafusos cruzados.

Séries	N° Protótipos	Instrumentados	N° Parafusos	Tubo Externo				Tubo Interno			
				Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Aço		Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Aço	
						f _y (MPa)	f _u (MPa)			f _y (MPa)	f _u (MPa)
CB-3-X2Y3	4	4	3	76,1	3,6	386,0	545,0	60,3	3,6	424,0	535,0
CB-4-X2Y3	3	2	4								
CC-5-X2Y3	2	2	5	88,9	5,5	375,0	474,0	73,0	5,5	399,5	539,5
CD-6-X2Y3	3	3	6	88,9	5,5	375,0	474,0	73,0	5,5	350*	450*

*Valores nominais como explicado na Tabela 2.6.

Na Figura 4.4 (a) e (b) são representadas as relações entre a espessura e o diâmetro, do tubo em que houve a ruptura *versus* a carga máxima, considerando os ensaios com 3 a 6 parafusos.

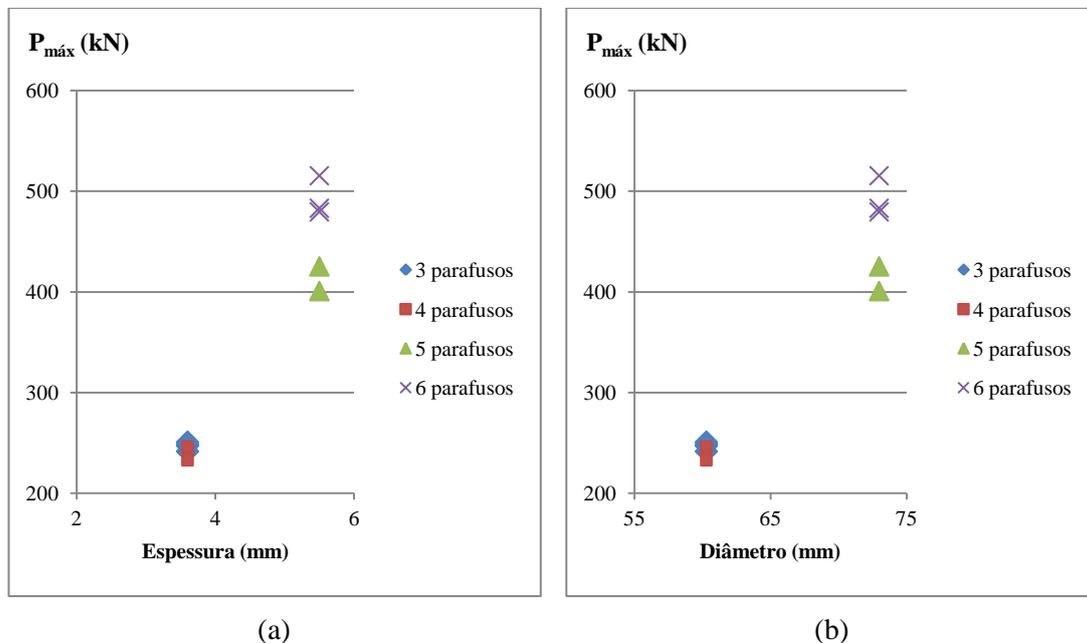


Figura 4.4 - Relação: (a) espessura e carga máxima e (b) diâmetro e carga máxima.

Para os protótipos com parafusos cruzados, diferentemente dos protótipos com parafusos em linha, é observada a influência do número de parafusos na resistência final da ligação, sendo definido dois grupos de resultados, o primeiro com 3 e 4 parafusos com tubos de espessura de 3,6 mm (série CB) e o segundo com 5 e 6 parafusos com tubos de espessura de 5,5 mm (séries CC e CD). Observa-se que o aumento da espessura ou do diâmetro, conseqüentemente da área líquida da seção, contribui para o aumento da resistência da ligação. No segundo grupo de protótipos (5 e 6 parafusos) com tubos de 73,0 mm de diâmetro e espessura de 5,5 mm é perceptível que o aumento do número de parafusos na ligação aumenta a resistência da ligação, o que não pode ser observado no primeiro grupo, com protótipos com tubos de 60,3 mm de diâmetro e espessura de 3,6 mm, em que a carga de ruína foi praticamente igual, mesmo com o aumento do número de parafusos.

Como observado nas Figuras 3.9 e 3.10 em que o modo de falha não está bem caracterizado nos gráficos de resultados, pela Figura 4.4 também é possível perceber que o estado limite para os protótipos da série CB (1º grupo) sofre influência da espessura (igual a 3,6 mm conforme Tabela 4.4) gerando distribuição de carga na ligação diferente dos protótipos da série CC e CD (2º grupo).

4.3.1 Proposta de formulação para flexão dos parafusos cruzados

Este item tem como objetivo propor uma equação para avaliar o modo de falha de flexão nos parafusos dos protótipos com parafusos cruzados.

Inicialmente verifica-se se a equação 4.4 proposta para parafusos em linha era válida para a configuração cruzada. Observou-se que a equação 4.4 não fornece bons resultados comparando-se aos resultados experimentais.

Os resultados experimentais mostram que existe um ganho na capacidade resistente para o modo de falha de flexão quando o número de parafusos é aumentado. Logo o número de parafusos deve ser um parâmetro da equação.

A formulação proposta baseia-se no princípio adotado para a configuração em linha. A proposta para os parafusos cruzados considera dois planos de parafusos devido a configuração cruzada. No entanto, a zona de influência de distribuição da taxa da força total da ligação é diferente, para o primeiro plano adotou-se a mesma zona, 2d. Na segunda zona observou-se que os parafusos atingiram a flexão com um carregamento menor, então aumentou-se a zona de influência para 3d. Obtendo-se um total de 5d, Figura 4.5.

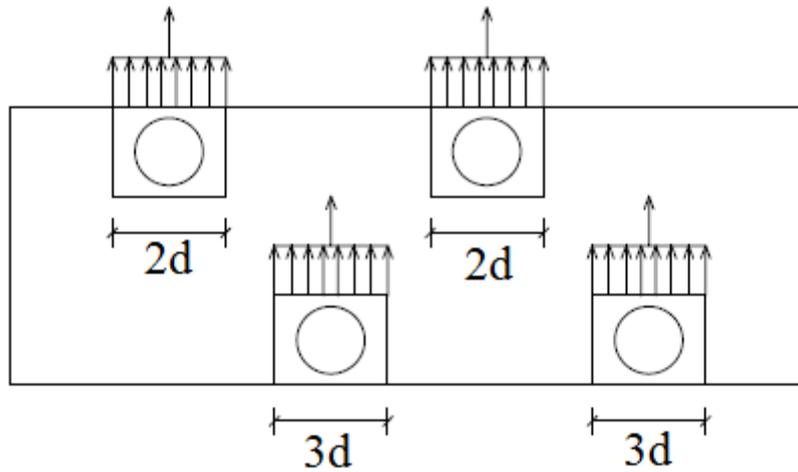


Figura 4.5 - Esquema da determinação de f_b .

A consideração apresentada na Figura 4.5 existe $\frac{n}{2}$ vezes no protótipo com parafusos cruzados, onde n é o número de parafusos da ligação. Então a equação 4.5 que fornece a força total na ligação que provoca a flexão nos parafusos é dada por:

$$F_m = \frac{f_{y,b} W_b \pi D}{5 d x} \frac{n}{2} \quad (4.5)$$

onde $f_{y,b}$ é a resistência ao escoamento do parafuso;

W_b é o módulo de resistência elástico da seção do parafuso;

x é o braço de alavanca obtido conforme a equação 4.3;

D é o diâmetro do tubo interno (“luva”);

d é o diâmetro do furo;

n é o número de parafusos da ligação.

A Tabela 4.5 apresenta os resultados obtidos experimentalmente para o estado limite de flexão ($F_{m,exp}$), e os resultados obtidos pela equação proposta neste trabalho (equação 4.3), bem como o parâmetro x utilizado na equação 4.5.

Tabela 4.5 - Resultados experimentais e resultados da equação proposta.

Protótipo	Par.	F_{exp} (kN)	x (mm)	$F_{m,exp}$ (kN)	F_m (kN)	$\frac{F_m}{F_{m,exp}}$
CB-3-X2Y3/1	1	158,92	7,90	131,18	114,65	0,874
	2	*				
	3	113,87				
CB-3-X2Y3/2	1	180,11		167,55		
	2	115,04				
	3	99,65				
CB-3-X2Y3/3	1	*		Não definido	-	
	2	137,02				
	3	89,52				
CB-3-X2Y3/4	1	129,33		159,80	0,717	
	2	*				
	3	*				
CB-4-X2Y3/1	1	173,60	148,30	1,031		
	2	50,38				
	3	155,82				
	4	**				
CB-4-X2Y3/2	1	164,66	132,20	152,87	1,156	
	2	214,24				
	3	135,96				
	4	203,68				
CB-4-X2Y3/3	1	150,85	Não definido	-		
	2	**				
	3	134,96				
	4	93,57				

Tabela 4.5 - Resultados experimentais e resultados da equação proposta (continuação).

Protótipo	Par.	F_{exp} (kN)	x (mm)	$F_{m,exp}$ (kN)	F_m (kN)	$\frac{F_m}{F_{m,exp}}$
CC-5-X2Y3/1	1	285,69	7,95	197,76	229,87	1,162
	2	92,24				
	3	213,48				
	4	200,20				
	5	232,46				
CC-5-X2Y3/2	1	278,51	7,95	224,01	229,87	1,026
	2	249,55				
	3	178,64				
	4	267,39				
	5	197,53				
CD-6-X2Y3/1	1	254,09	7,95	301,21	275,85	0,916
	2	142,92				
	3	247,91				
	4	234,05				
	5	296,88				
	6	159,62				
CD-6-X2Y3/2	1	320,64	7,95	364,17	275,85	0,757
	2	199,19				
	3	218,71				
	4	209,54				
	5	214,59				
	6	149,09				
CD-6-X2Y3/3	1	295,02	7,95	303,87	275,85	0,908
	2	234,52				
	3	248,11				
	4	89,25				
	5	232,28				
	6	266,89				
* Perda de leitura do EER ** Não caracterizou flexão no parafuso F_{exp} = Força experimental no parafuso (força que causa a flexão no parafuso) x = (equação 4.3) $F_{m,exp}$ = Força de flexão experimental F_m = Força de flexão de cálculo						

Observa-se na Tabela 4.5 que para os protótipos da série CB não existe uma lei de distribuição que configure que todos os parafusos trabalhem de maneira igualitária. Verifica-se também que alguns parafusos não atingem o limite de escoamento, isto é, não ocorre flexão no parafuso. Observa-se que esta série de protótipos apresenta tubos com a menor espessura, 3,6 mm. Esta influência pode ser observada nos gráficos da Figura 4.3. Nesta série, a equação 4.4 não apresenta bons resultados tendo uma diferença considerável quando as ligações com 3 e 4 parafusos são comparadas. No caso desta série considerando-se: a pequena espessura (3,6 mm); os valores previstos para os outros modos de falha serem superiores ao máximo experimental; a não caracterização clara da flexão em alguns parafusos (tubos com diâmetro de 60,3 mm); e a não

distribuição igualitária de forças nos parafusos induz a conclusão de que o modo de falha de ruptura da seção líquida é próximo ou até inferior à flexão no parafuso. Assim, a equação 4.5 deve ser melhor estudada para esta característica de ligação, assim como os demais modos de falha da ligação.

No entanto, no caso da série CC e CD, os resultados são satisfatórios levando a conclusão de que a equação 4.5 pode ser utilizada na avaliação da flexão dos parafusos.

CAPÍTULO 5

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi a avaliação teórica e experimental da nova tipologia de ligação chamada de "luva". A ligação é constituída por perfis tubulares de aço de seção circular sem costura. A ligação foi avaliada experimentalmente para o desenvolvimento de uma formulação teórica para os possíveis estados limites.

Os protótipos foram constituídos por dois tubos, um externo e um interno, representando a "luva", ligados por meio de parafusos passantes dispostos em linha (longitudinal ao tubo) e cruzados a 90°.

Foram ensaiados 15 protótipos, sendo 3 ensaios com protótipos com parafusos em linha complementares a estudos realizados em pesquisas anteriores e 12 ensaios para a ligação com parafusos cruzados.

A análise teórica foi baseada em adaptações das equações de dimensionamento, segundo a ABNT NBR 8800:2008, para o cálculo dos estados limites das ligações.

A metodologia desenvolvida para realização dos ensaios foi adequada para avaliação da ligação. O sistema utilizado para fixação do protótipo na máquina de ensaio, apresentado no capítulo 2, mostrou-se eficiente visto que possibilitou o correto encaixe do protótipo nas garras da máquina de ensaio gerando uma adequada aplicação e transmissão de carga de tração de maneira uniforme para o protótipo. O posicionamento do LVDT foi adequado para obtenção de medidas de deslocamento dos tubos da ligação. Os dados obtidos pelo sistema automático de aquisição de dados foram suficientes para análise.

A instrumentação dos parafusos dos protótipos por meio de extensômetros de resistência elétrica, EER, foi adequada para obtenção das medidas de deformação para análise dos resultados o que possibilitou a obtenção de resultados conclusivos para

identificação do modo de falha de flexão dos parafusos, bem como a capacidade resistente da ligação.

Verificou-se que os resultados experimentais foram satisfatórios para ambas as tipologias de ligação tipo luva, com parafusos em linha e cruzados, apresentando elevadas capacidades de resistência. Os resultados e as análises apresentadas no capítulo 3 comprovaram a necessidade/adequação de uma formulação para o estado limite de flexão dos parafusos da ligação.

Da análise dos resultados obtidos pelo transdutor de deslocamento, pelos extensômetros e pelos sistemas de aquisição de resultados, além de observações visuais no final dos ensaios, constatou-se a ruptura da seção líquida de todos os protótipos. Apesar da flexão dos parafusos ocorrer primeiro em vários ensaios o que caracteriza este como o modo de falha dominante da ligação. Os tubos da ligação contribuem na capacidade resistente do conjunto da ligação e, por isso, a ruptura da seção líquida, foi observada em todos os protótipos.

Desde o início da pesquisa sabia-se da necessidade de adequação da equação proposta por Silva (2012) para flexão dos parafusos em linha, visto que apenas um parafuso da ligação estava instrumentado com EER. Destaca-se que nos ensaios deste trabalho, todos os parafusos foram instrumentados possibilitando avaliar a distribuição do carregamento no conjunto dos parafusos da ligação. Com os resultados apresentados no capítulo 3 e 4 observou-se também que a equação, anteriormente proposta, não contemplava a participação dos tubos na distribuição da carga aplicada na ligação, característica que deve ser considerada.

No desenvolvimento da equação para o estado limite de flexão do parafuso foi proposta uma metodologia para obtenção da força total aplicada na ligação que provoca a flexão dos parafusos. Considerou-se uma taxa de distribuição dessa força por unidade de comprimento na seção transversal e de comprimento igual ao perímetro do tubo. Foi definida uma região de influência próxima dos furos para obtenção da força que provoca a flexão no parafuso.

Esta metodologia foi utilizada para propor uma equação para os protótipos em linha e uma outra equação para os protótipos cruzados. Em geral, a equação mostrou-se coerente. Os resultados dos protótipos em linha foram bons e conservadores quando comparados com os resultados experimentais.

A equação para os protótipos com parafusos cruzados, apesar de apresentar bons resultados, possui algumas restrições. Observou-se que os protótipos com 3 e 4 parafusos e tubos com espessuras de 3,6 mm (série CB) não tiveram o modo de falha de flexão bem definido, já explicado no capítulo 4, sendo necessárias novas avaliações com protótipos com o mesmo número de parafusos porém, com espessura de tubo diferentes, para afirmações mais precisas. Com a análise dos resultados dos protótipos com 5 e 6 parafusos cruzados (série CC e CD) também se observou que o aumento do número de parafusos aumentou a capacidade de resistência à flexão dos parafusos, por isso na equação para os protótipos cruzados leva-se em consideração esta influência. Os resultados encontrados para esta série CC foram bons, porém não conservadores. Devido ao número baixo de protótipos ensaiados nesta série, a equação proposta foi dada como válida. Para a série CD foram obtidos resultados conservadores como desejável, logo a equação dos protótipos cruzados também se mostrou coerente.

Vale ressaltar que a expressão proposta para a ligação tipo luva com parafusos em linha deve ser aplicada apenas para ligações que apresentem as mesmas características dos protótipos analisados neste trabalho: parafusos em linha com tubos com variação de diâmetro de 60,3 a 88,9 mm submetidos a carregamento de tração. O mesmo deve ser ressaltado para o uso da expressão proposta para a ligação tipo luva com parafusos cruzados, a equação deve ser aplicada para tubos com variação de diâmetro de 73,0 a 88,9 mm e espessura de 5,5.

Observou-se também que para a ruptura da seção líquida dos protótipos deve ser considerado um coeficiente de redução da área líquida (C_l), visto que as rupturas ocorreram a níveis de carregamento abaixo dos previstos em cálculo, principalmente nos protótipos da série CB, com tubos com baixa espessura.

5.1 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros e continuidade de pesquisas nesta área pode-se sugerir:

- A realização de novas análises experimentais com maior variação das características dos protótipos, como diâmetro e espessura dos tubos, com propósito de aprimoramento das equações propostas;
- A avaliação de análises numéricas das tipologias apresentadas neste trabalho;
- A utilização de parafusos mais resistentes, ou o aumento do diâmetro dos parafusos, permitindo uma análise mais efetiva do estado limite de ruptura da seção líquida efetiva e determinação do coeficiente de redução da área líquida C_t ;
- A avaliação teórica, experimental e numérica de um banzo de treliça em escala real;
- Avaliar numericamente a ligação em sistemas treliçados reais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araújo, A.H.M, 2011. Construção metálica tubular. Construção metálica. 2011, v104, p32-36.

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 (2005), Specification for Structural Steel Buildings. Manual of Steel Construction, Chicago.

Beke P., Kvocak V. 2008. Analysis of joints created from various types of sections. Eurosteel 2008.

Choo, Y. S., Qian, X. D., Wardenier, J., 2006. Effects of boundary conditions and chord stresses on static strength of thick-walled CHS K-joints. Journal of Constructional Steel Research 62 , p. 316–328.

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

Fleischer, O., Puthli, R., 2006. Evaluation of experimental results on slender RHS K gap joints. Anais do 11º ISTS, International Symposium on Tubular Structures, Québec, Canada.

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).

Kindman R., Kraus M., Vette J. 2008. On the verification of hollow sections joints resistances. Eurosteel 2008.

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.

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

- 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.
- Munse, W. H.; Chesson, E. Jr. Riveted and bolted joints: net section design. Journal of Structural Division, ASCE, v. 89, p. 107-126, 1963.
- Nunes, G. V., 2012. Estudo paramétrico de ligações tipo “T”, “K” e “KT” compostas por perfis tubulares de seção retangular e circular. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Paula, V. F. de., 2006. Análise experimental e numérica de cantoneiras de aço formadas a frio, sob tração e conectadas por parafusos. Tese de doutorado. Universidade de Brasília.
- Requena, J. A. V., Santos, A. L. E. F., 2007. Dimensionamento de ligações em barras tubulares de estruturas metálicas planas. (Coleção técnico-científica V&M do Brasil,1).
- Salmon, C. G. e Johnson, J. E. Steel Structures – Design and Behavior. EUA: Pearson, 2009.
- Samarra, 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.
- Silva, J. M., 2012. Análise teórica-experimental de ligações tipo tubulares tipo "luva". Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Simões da Silva, L., Santiago, A., 2003. Manual de ligações metálicas. Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista. Coimbra, Portugal.
- Valenciani, V. C., 1997. Ligações em Estruturas de Aço. Dissertação de mestrado em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- V & M do BRASIL, Imagination & Inspiração, Coletânea de estruturas tubulares, 2008. Belo Horizonte: Taimóios Efitora 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.