



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Guilherme Cássio Elias

Análise Numérico - Experimental de Resistência a Flexão
em Ligações Tubulares Flangeadas

Ouro Preto
2016

GUILHERME CÁSSIO ELIAS

Análise Numérico - Experimental de Resistência a Flexão
em Ligações Tubulares Flangeadas

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Civil da Universidade Federal de Ouro
Preto como parte dos requisitos para a
obtenção do Grau de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Arlene Maria Cunha Sarmanho – DECIV / UFOP

Co-orientador: Caio Orsi Vieira Ramos Pereira – PROPEC / DECIV / UFOP

Ouro Preto
2016

E422a

Elias, Guilherme Cássio.

Análise Numérico [manuscrito]: Experimental de Resistência a Flexão em Ligações Tubulares Flangeadas / Guilherme Cássio Elias. - 2016.

32f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Arlene Maria Cunha Sarmanho .

Coorientador: Prof. Dr. Caio Orsi Vieira Ramos Pereira .

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil.

1. Estrutura Metálica. 2. Perfis Tubulares. 3. Ansys. 4. Ligações. 5. Ligação Flangeada. I. Sarmanho , Arlene Maria Cunha. II. Pereira , Caio Orsi Vieira Ramos. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

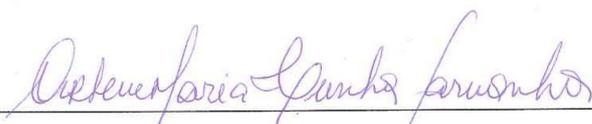
CDU: 624

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

GUILHERME CÁSSIO ELIAS

Análise Numérico - Experimental de Resistência a Flexão
em Ligações Tubulares Flangeadas

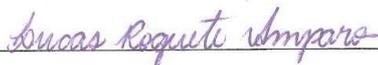
Trabalho de Conclusão de Curso
para obtenção do Grau de
Engenheiro Civil na Universidade
Federal de Ouro Preto, defendida e
aprovada em 24 de março de 2016,
pela banca examinadora constituída
pelos professores:



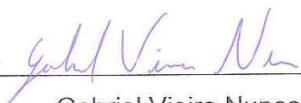
Prof^a. Dr^a. Arlene Maria Cunha Sarmanho – Orientadora – UFOP



Flávio Teixeira de Souza – IFMG – Campus Ouro Preto



Lucas Roquete Amparo – UFSJ – Campus Alto Paraopeba



Gabriel Vieira Nunes – IFMG – Campus Congonhas

Dedico este trabalho aos meus pais, Arlindo e Elza,
que não mediram esforços para tornar possível esta graduação.

Agradeço aos meus familiares e amigos pelo apoio.

E agradeço em especial à professora Arlene,
pelas oportunidades e experiências compartilhadas.

RESUMO

A implementação de sistemas estruturais metálicos em aço vem aumentando a cada dia mais em várias partes do mundo. Este fato se justifica pelas vantagens proporcionadas por esta tipologia e à boa performance construtiva em diversos tipos de edificações. Os perfis tubulares de seção circular é um dos tipos mais utilizados devido à sua eficiência, que agrega características geométricas que muito interessam para o uso estrutural, com uso mínimo de material, o que torna seu uso adequado em estruturas reticuladas, treliças planas ou espaciais. Diante disso, este trabalho foi desenvolvido para avaliar a flexão em ligações do tipo flangeada entre tubos de seção circular. Os estudos foram executados no Laboratório de Estruturas da UFOP. Um modelo numérico foi desenvolvido e ajustado utilizando APDL para viabilizar o estudo paramétrico. As análises numéricas em elementos finitos foram realizadas utilizando o software comercial ANSYS. A metodologia utilizada foi a aplicação de cargas de tração nos tubos que estão conectados por uma ligação flangeada, avaliando os limites entre o valor desta carga e a espessura da placa do flange. As relações avaliadas entre os dois parâmetros vão desde o momento onde não ocorre o efeito alavanca (prying), até onde ocorre o escoamento do flange, variando a espessura do flange na ligação. Na ligação flangeada, a força de tração aplicada no tubo é distribuída uniformemente ao longo da sua seção, que é transferida para a solda e transmitida para a placa do flange, podendo ocasionar a sua flexão. Em seguida, foi analisada a tração nos parafusos que compõem a ligação, considerando os mesmos parâmetros de composição da ligação flangeada. E finalmente foram preparados os protótipos no Laboratório de Estruturas para a realização de ensaios experimentais. Os ensaios foram realizados com os equipamentos do próprio laboratório e os resultados foram comparados com as análises numéricas anteriores e com a análise teórica prévia ao início dos estudos.

Palavras Chaves: Estrutura Metálica. Perfis Tubulares. Ansys. Ligações. Ligação Flangeada.

ABSTRACT

Currently the implementation of metal structural systems for steel is increasing every day more in various parts of the world. This fact is justified by the benefits you offer for this type constructive and good performance in various types of buildings. The circular section tubular profiles is one of the most used types because of its efficiency, which adds geometric characteristics that much interest for structural use, with minimal use of material, which makes proper use of cross-linked structures, flat or space trusses. Thus, this study was conducted to evaluate the bending of the flange type connections between circular section tubes. The studies were performed in the Structures Laboratory UFOP. A numerical model has been developed and adjusted using APDL to enable the study parametric. The finite element numerical analyzes were performed using the commercial software ANSYS. The methodology used was the application of tensile loads in the tubes that are connected by a flange connection, assessing the limits of the value of this charge and the thickness of the flange plate. The relationship between the two parameters measured since the moment will not occur lever effect (prying), to which flange the flow occurs by varying the thickness of the flange at the connection. In the flange connection, the tensile force applied to the tube is evenly distributed throughout its section, which is transferred to the solder and transmitted to the flange plate, causing the bending. Then traction was analyzed on bolts that make the connection, considering the same composition parameters of the flange connection. And they were finally ready prototypes in the Structures Laboratory for conducting experimental tests. The assays were performed with laboratory equipment itself and the results were compared with the prior numerical analysis and theoretical analysis prior to the start of the studies.

Keywords: Metallic Structure. Tubular profiles. Ansys. Connections. Flanged Connection.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
1.1. Estruturas Tubulares e Ligações.....	7
1.2. A Ligação Flangeada.....	10
2. OBJETIVOS	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
4. METODOLOGIA.....	13
5. MODELO NUMÉRICO.....	14
5.1. Características dos Materiais	18
5.2. Resultados Análise Numérica.....	18
6. ENSAIOS EXPERIMENTAIS	19
6.1. Resultados dos Ensaios Experimentais	25
7. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS – NUMÉRICO E EXPERIMENTAL	27
8. CONCLUSÕES	31
REFERÊNCIAS.....	32

1 INTRODUÇÃO

A utilização de sistemas de estruturas metálicas em aço vem sendo implementada em grande escala, em diversos países do mundo. Esta tipologia estrutural apresenta indicadores de utilização em escala industrial a partir da última década do século XVIII e no Brasil se apresenta no início do século XX, porém o grande avanço na fabricação de perfis em larga escala ocorreu com a implantação de grandes siderúrgicas nacionais.

Com o avanço da indústria e do estudo de novos materiais e compósitos foi verificado que o aço (composto basicamente por ferro e carbono), apresenta grandes vantagens em relação a outras ligas quando aplicadas na construção civil, além da boa performance construtiva comparada a outras tipologias.

Dentre as principais características positivas do aço utilizado em estruturas, pode-se destacar a alta resistência a esforços normais e cisalhantes, além da redução do peso próprio da estrutura, por apresentar resistência semelhante a outros materiais, porém com seção transversal reduzida. Também a sua estética agradável, que introduz arrojo e modernidade às estruturas. Diferindo do concreto armado que é moldado em função das formas disponíveis, o aço estrutural é solicitado com exatidão do projeto. Este fato traz para a edificação agilidade na sua execução.

1.1 Estruturas Tubulares e Ligações

As seções de aço em perfis tubulares mais comuns são as circulares, quadradas e retangulares. Estes tipos de seções são mais econômicas comparadas às de seções abertas, quando usadas para resistir a esforços normais aplicados em treliças e colunas. Tal fato pode ser explicado devido ao momento de inércia variar pouco ou quase nada nas direções ao longo da seção, no caso das seções circulares.

A norma brasileira direcionada para perfis tubulares, NBR 16239:2013 (Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares) ainda é pouco conhecida, pelo fato de ser uma norma elaborada recentemente.

As ligações são partes da estrutura destinadas a conectar duas ou mais peças, transmitindo seus carregamentos até que se chegue ao solo, onde finalmente os esforços são descarregados. As ligações existem para que a execução da obra seja possível mesmo longe do local de fabricação de sua estrutura, facilitando o transporte e reduzindo a dimensão das peças a serem montadas no canteiro de obras.

As ligações mais comuns em estruturas metálicas tubulares (mais especificamente em treliças) são ligações soldadas do tipo K, T, KT, e as ligações flangeadas, que são ligações que conectam tubos através do parafusamento de flanges.

A Figura 1.1 a seguir exemplifica as ligações dos tipos K, T e KT e a Figura 1.2 a ligação do tipo flangeada.

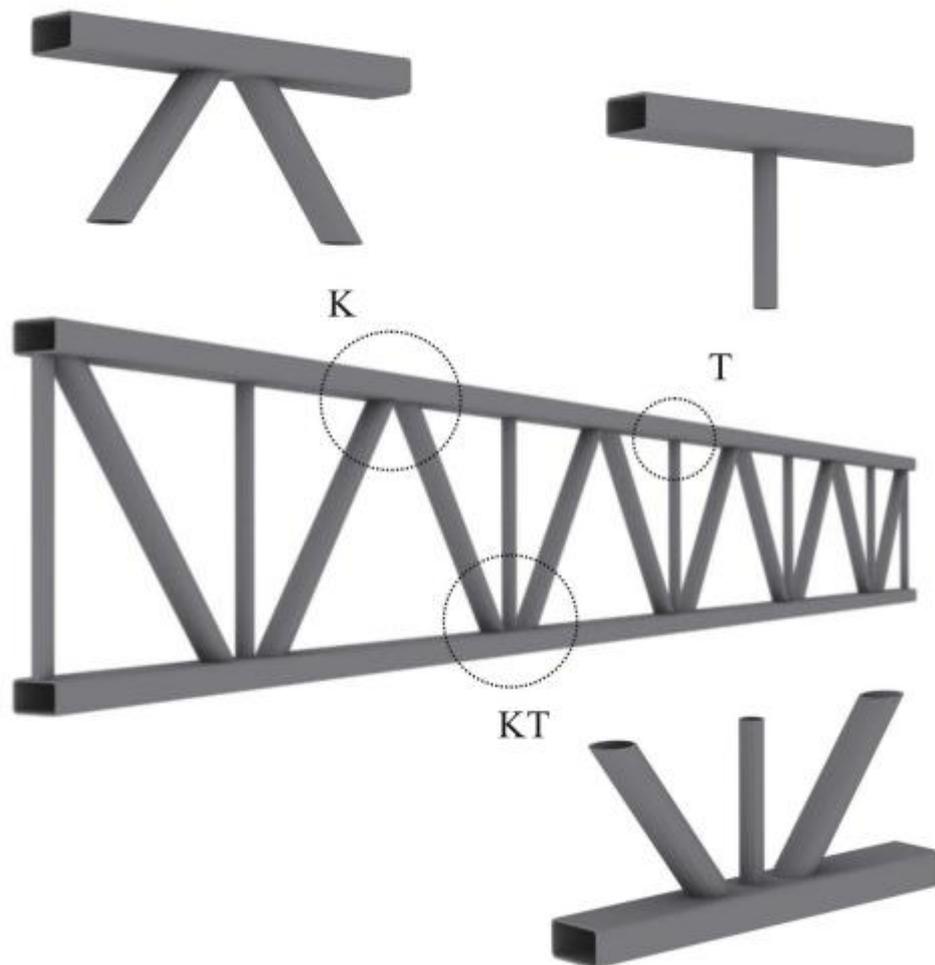


FIGURA 1.1: Esquema das ligações dos tipos K, T e KT



FIGURA 1.2: Ligação Flangeada

1.2 A Ligação Flangeada

A ligação flangeada é composta por duas placas circulares soldadas nos tubos a serem conectados, e estas placas são parafusadas finalizando a ligação. A Figura 1.3 apresenta um detalhe da ligação flangeada utilizada em uma treliça.



FIGURA 1.3: Detalhe daLigação Flangeada

O mecanismo sob o qual funciona se inicia com a força de tração aplicada nos tubos a serem conectados, que é distribuída uniformemente ao longo da seção dos mesmos. Essas tensões caminham então para a solda, que através desta é transmitida para a placa do flange, podendo causar a sua flexão (Flexão dependente da rigidez da placa e do parafuso). O flange flexionado transmite a solicitação para as arruelas, que conduz para os parafusos. Estes parafusos estão em contato com as porcas do lado oposto, que através dos mesmos transmitem a solicitação para a placa do flange, concluindo o mecanismo de funcionamento da ligação.

Este tipo de ligação é o objeto de estudos deste trabalho. Foi analisado o comportamento deste tipo de ligação quanto à flexão, quando aplicadas cargas de tração na mesma.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento das ligações do tipo flangeadas em tubos de seção circular quanto à flexão. Esta análise foi feita aplicando-se cargas de tração nos tubos em questão.

Em seguida, variou-se a espessura da placa dos flanges, para serem avaliados os limites entre esta espessura e as reações de contato entre os flanges, e também as reações nos parafusos.

Os resultados obtidos pelo modelo numérico foram comparados com estudos prévios e estabeleceu-se uma modelagem numérica para o sistema.

A segunda etapa do projeto foi a preparação dos protótipos para a execução de ensaios experimentais, com o objetivo de comparar os resultados obtidos nos modelos numéricos com os encontrados nas análises experimentais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este tópico apresenta uma síntese de alguns trabalhos realizados sobre ligações entre perfis tubulares do tipo flangeada.

O estudo das bibliografias começa por Rockey e Griffiths (1970). O texto descreve detalhadamente os experimentos e resultados. Tal referência é um estudo feito por professores da britânica UniversityCollege Cardiff, na qual são estudados flanges vazados, ou seja, a placa não é continua sob o tubo, existindo um furo.

Kato e Hirose (1985) publicaram pela primeira vez um estudo da ligação flangeada levando-se em conta o efeito alavanca. Neste trabalho foi estudado o efeito alavanca do tipo “Prying” (efeito responsável pelo acréscimo da tensão de tração nos parafusos da ligação causado pelo efeito alavanca gerado pela flexão do flange) em ligações com flange vazado e alguns modelos com flange inteiro para se verificar a influência da geometria.

As obras de Requena e Santos (2007) e Santos (2003) explicam o mecanismo do efeito alavanca, principalmente a segunda, e seguem o dimensionamento proposto pelo AISC. Entretanto, a primeira também comenta o dimensionamento proposto pelo CIDECT.

Assim como em Hirose e Kato (1985), Santos (2003) também constatou a influência da espessura da placa na resistência do flange. É explicado que a espessura do flange é inversamente proporcional à intensidade do efeito prying, uma vez que um flange espesso é mais rígido, logo, sua flexão será menor, ocorrendo o contrário em uma chapa fina. Dessa forma, a ruptura do parafuso pode ocorrer antes ou depois do escoamento da placa.

No artigo de Yang (2010) no qual se utilizou o Ansys, foi modelada uma ligação parafusada entre tubos, semelhante ao flange, sendo a parte inferior conectada em um suporte rígido, e ambas as partes conectadas com dez parafusos. Foram construídos dois modelos diferentes, um linear e outro não linear, para comparação. No modelo linear, não foram considerados parafusos nem furos, sendo que as partes superior e inferior foram conectadas sem consideração de contato.

4 METODOLOGIA

Este trabalho tem como objetivo avaliar a flexão em ligações flangeadas, utilizando modelos numéricos que simulem as características da ligação, para logo depois serem realizados ensaios experimentais para a validação do modelo numérico.

Foi utilizado o software ANSYS 2012 (Ansysprogramversion 12.0, FiniteElement Software, AnsysIncorporation, 2010)– disponível no Laboratório de Estruturas com equipamento adequado para análises –, ferramenta que utiliza o método dos elementos finitos para o cálculo de esforços solicitantes, deslocamentos e deformações, para a análise numérica. E os modelos experimentais foram realizados no Laboratório de Estruturas da UFOP, Departamento de Engenharia Civil.

Para a avaliação da flexão nas ligações, foram aplicadas cargas de tração nos tubos que estão conectados por uma ligação flangeada, avaliando os limites entre o valor desta carga e a espessura da placa do flange. Foram avaliadas as relações entre os dois parâmetros desde o momento onde não ocorre o efeito alavanca, até onde ocorre o escoamento do flange.

O projeto foi iniciado por uma atualização do estudo de bibliografias que tratam do tema em questão, buscando reunir informações que servirão de base para estudos posteriores. Em seguida, iniciou-se a etapa de análise numérica dos modelos. E por fim foram realizados os ensaios experimentais com os protótipos.

5 MODELOS NUMÉRICOS

A geometria dos modelos foi desenvolvida e ajustada no programa ANSYS 12, através do sistema de linguagem APDL (ANSYS Parametric Design Language).

A ligação flange com tubos de seção circular, é composta por parafusos e placas. Os tubos a serem conectados recebem uma placa circular de aço, composta por seis furos, através dos quais serão conectados os seis parafusos. As placas circulares são soldadas na extremidade de cada tubo. Em campo, as barras são alinhadas e as placas parafusadas, finalizando a ligação.

Para as análises realizadas no software escolheu-se metade da ligação, devido à mesma ser simétrica, para que assim pudessem ser verificadas as reações em cada parafuso da ligação, assim como no contato entre os flanges, em um tempo menor de processamento.

O elemento utilizado nos Tubos e Áreas de contato entre os flanges do modelo, foi o Elemento de Casca SHELL 181. Nos flanges, parafusos, arruelas, porcas e soldas foi utilizado o Elemento Sólido SOLID 95. E a malha foi mapeada.

As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 mostram a geometria do modelo utilizado.

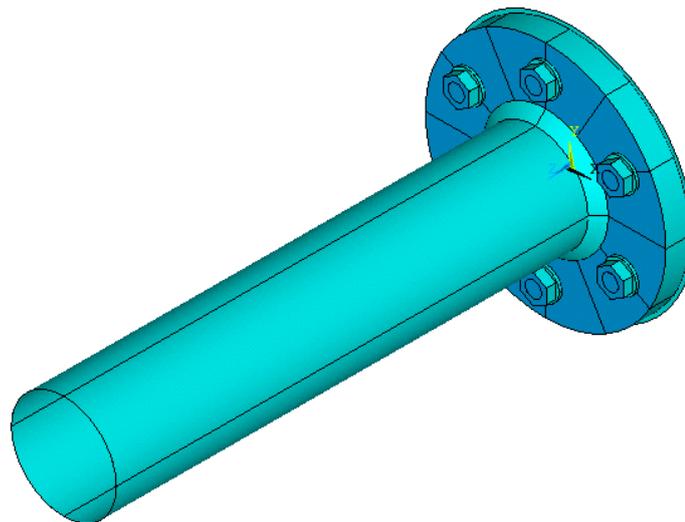


Figura 5.1: Geometria do modelo – Vista isométrica

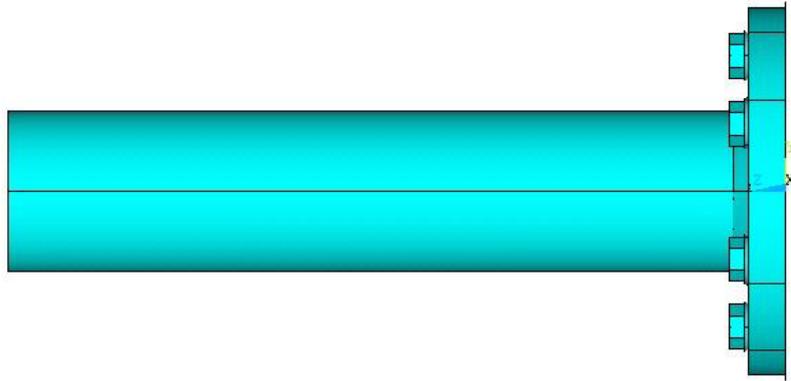


Figura 5.2: Geometria do modelo – Vista lateral

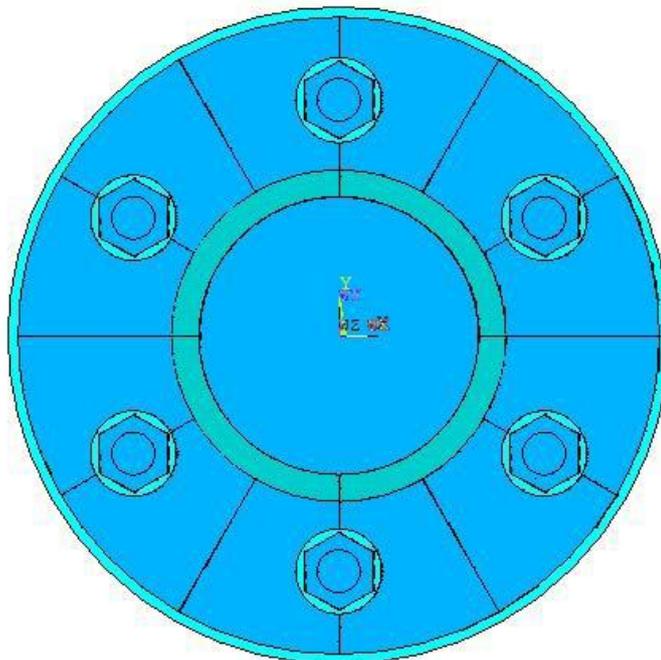


Figura 5.3: Geometria do modelo – Vista frontal

A Figura 5.4 apresenta o modelo numérico completo, com os elementos detalhados.

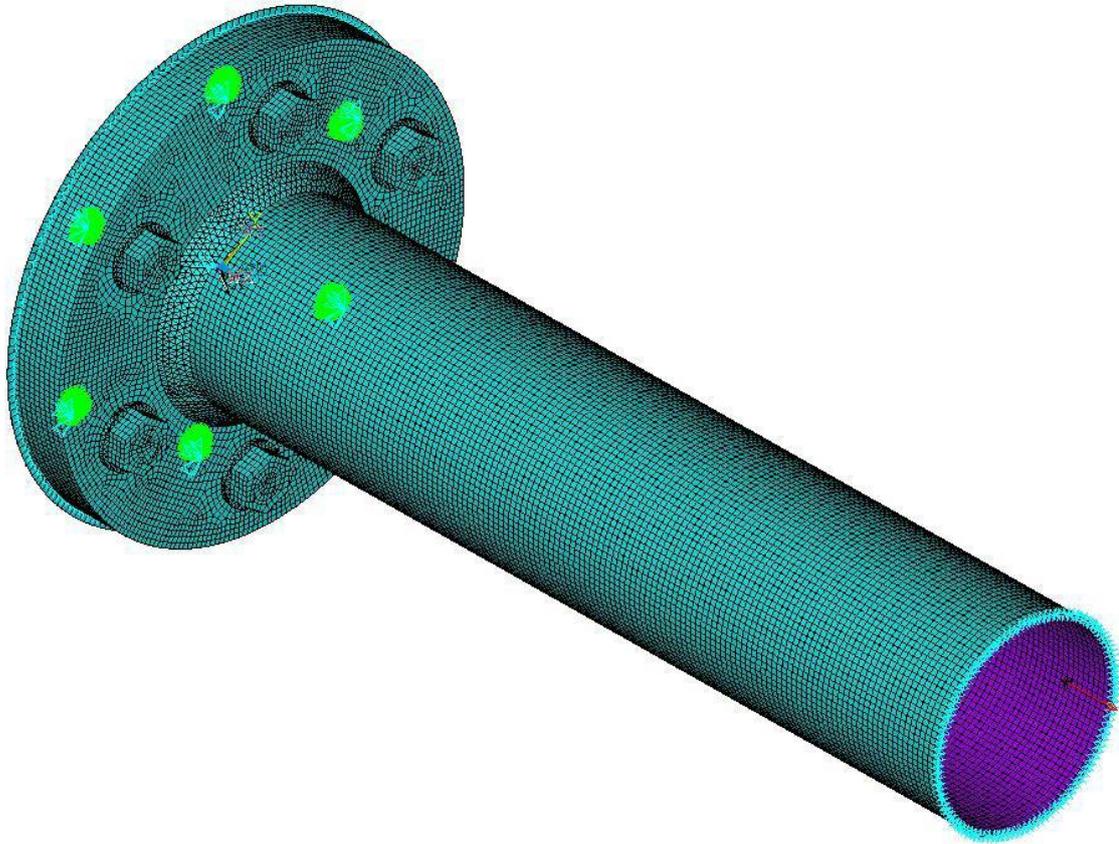


Figura 5.4: Modelo numérico completo – Detalhamento dos elementos

As condições de contorno foram aplicadas, juntamente com os carregamentos. As análises foram feitas variando a espessura dos flanges de cada ligação. As espessuras de chapas consideradas foram as seguintes: 9,5mm, 12,5mm, 16mm, 19mm, 22,4mm, 25mm, 31,5mm e 37,5mm, de acordo com a disponibilidade das chapas disponíveis no mercado, como pode ser observado na Tabela 5.1 de chapas grossas da Gerdau.

Tabela 5.1: Chapas grossas comerciais – Espessuras disponíveis

Fonte: Comercial Gerdau



COMERCIAL GERDAU

CHAPAS GROSSAS

CHAPAS GROSSAS SÃO PRODUTOS LAMINADOS PLANOS COM ESPESSURA SUPERIOR A 5,0mm, PODENDO EM DETERMINADAS QUALIDADES E DIMENSÕES SER PRODUZIDAS NA LINHA DE TIRAS A QUENTES (BG E CGT).

ESPESSURAS PADRÃO (mm)		
6.30	19.00	44.50
8.00	22.40	50.00
9.50	25.00	63.00
12.50	31.50	75.00
16.00	37.50	100.00

LARGURAS PADRÃO (mm)		
1000	1500	2440
1200	2000	

COMPRIMENTOS PADRÃO (mm)	
6000	12000

A força aplicada foi no valor de 350 kN, centrada, aplicada e dividida entre os nós de cada parafuso e a reação de contato.

O carregamento foi feito simulando o flange como uma placa rígida, para serem melhor avaliados os resultados das ligações.

5.1 Características dos Materiais

Dados dos materiais considerados nas análises das ligações:

Tubos: $f_y=345$ MPa, $f_u=450$ MPa

Flanges: $f_y=350$ MPa, $f_u=400$ MPa

Solda: $f_y=600$ MPa, $f_u=600$ MPa

Parafusos: $f_y=635$ MPa, $f_u=825$ MPa

Onde:

f_y = Tensão de Escoamento

f_u = Tensão Última

5.2 Resultados da Análise Numérica

Foi aplicada a carga de tração nos tubos conectados pela ligação flangeada. Os valores encontrados para as reações em cada um dos seis parafusos da ligação e no contato, devido à carga aplicada, para cada espessura de flange considerada, estão na tabela 5.2 a seguir.

Tabela 5.2: Reações nos parafusos para cada espessura de flange considerada
(unidade das Reações em kN)

	Espessura dos flanges (Ef)	Nós (parafusos)						Contato
		1	2	3	4	5	6	
Reações (kN)	9,5 mm	89,993	90,551	90,748	91,397	91,105	90,205	194,870
	12,5 mm	76,795	79,721	81,078	82,243	81,500	79,123	131,340
	16 mm	64,717	69,996	76,321	77,915	76,691	69,687	86,202
	19 mm	56,403	61,184	69,764	73,213	69,928	61,150	44,698
	22,4 mm	48,259	52,991	62,450	66,463	62,456	53,134	0,147x10 ⁻⁴
	25 mm	29,717	32,541	38,101	40,859	38,110	32,535	0,597x10 ⁻⁷
	31,5 mm	47,440	51,779	59,443	62,950	59,494	51,627	0,502x10 ⁻⁶
	37,5 mm	19,284	3,045	18,266	37,532	43,857	24,408	0,353x10 ⁻⁶

No modelo com flange de espessura 22,4 mm, a reação de contato com o flange foi igual a zero, assim como nas Espessuras superiores consideradas. Este é o ponto de zero Alavanca, ou seja, onde a partir do qual não ocorre o efeito Prying.

6 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Para garantir que o modelo numérico representa bem o comportamento real da ligação, se fez necessário comparar os resultados numéricos com os resultados experimentais. Para validação do modelo numérico utilizou-se os resultados das análises experimentais apresentadas a seguir. Foram comparados os modos de falha da ligação e os gráficos de Força *versus* Deslocamento.

Os ensaios experimentais são parte dos estudos do mestrando do Laboratório de Estruturas da UFOP, Caio Orsi Vieira Ramos Pereira, que é o Co-Orientador neste trabalho.

As características dos perfis circulares utilizados nos ensaios, foram apresentados no item 5.1 – Características dos Materiais. Porém, nos ensaios experimentais foi considerada a Tensão de Escoamento do Flange (f_y) de 250 Mpa, diferente do considerado na Análise Numérica, que foi 350 Mpa. Devido a este fato, as comparações a serem feitas nos gráficos de Força *versus* Deslocamento do Numérico e Experimental, serão de caráter **qualitativo**, e não quantitativo.

Utilizou-se parafusos estruturais CISER ASTM A325, com diâmetro de 12,7 mm e comprimento de 114,3 mm.

Com a definição dos parâmetros geométricos dos protótipos, a análise experimental se torna de grande importância como referência para os resultados obtidos numericamente. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas (DECIV/EM/UFOP).

Foram realizados ensaios com os dois tubos do protótipo perfeitamente alinhados, ou seja, com zero de excentricidade em relação ao centro dos tubos, e também com protótipos com excentricidade em sua montagem. Os valores considerados para excentricidades nos protótipos foram de 8%, 16% e 24%.

O posicionamento dos protótipos na máquina de ensaios somente foi possível mediante a utilização de um perfil “T” soldado nos tubos de tal forma que permitisse o encaixe dos protótipos na máquina de ensaio e a transmissão uniforme do carregamento de tração para os mesmos.

As Figuras 6.1 e 6.2 apresentam os protótipos sendo preparados para o ensaio experimental.

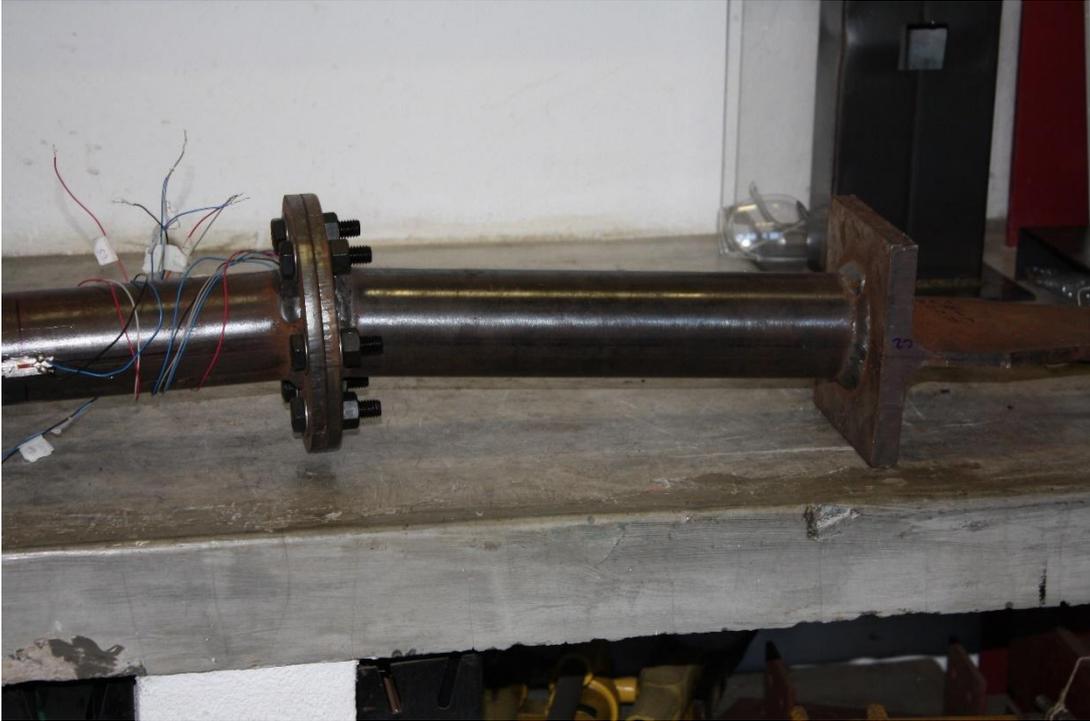


Figura 6.1: Esquema de preparação dos protótipos para ensaio
Fonte: Pereira (2016)

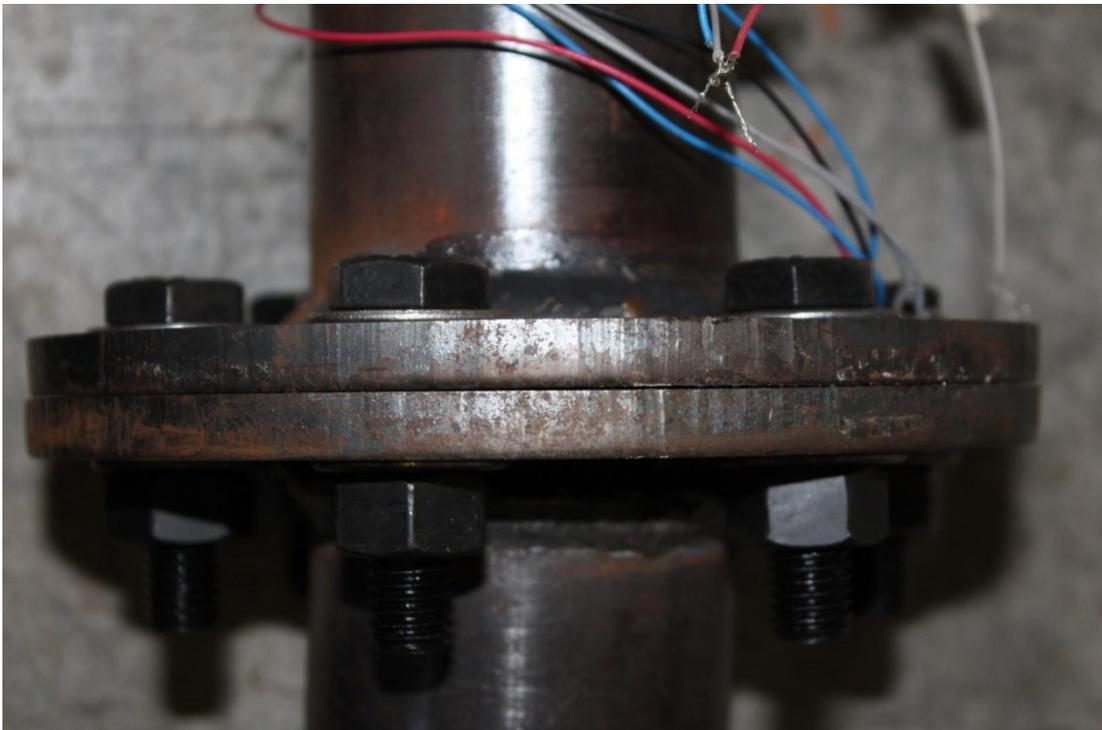


Figura 6.2: Detalhe do protótipo a ser ensaiado

As Figuras 6.3 e 6.4 mostram um esquema geral de fixação dos tubos na prensa hidráulica, momentos antes de ser realizado o ensaio.



Figura 6.3: Tubofixado na prensa hidráulica



Figura 6.4: Tubofixado na prensa hidráulica

A máquina utilizada na aplicação da força centrada de tração foi a prensa servo hidráulica (INSTRON SATEC 5569), apresentada na Figura 6.5. Os deslocamentos verticais, oriundos da carga de tração aplicada no protótipo, foram acompanhados por um transdutor de deslocamento (LVDT), localizado no perfil “T” soldado ao tubo, detalhado na Figura 6.6.



Figura 6.5: Prensa hidráulica INSTRON



Figura 6.6: Perfil T utilizado na fixação dos tubos

A aquisição de dados foi feita através do software da própria prensa Partner (Instron, 2008), que coletou os dados da célula de carga e também por um sistema de aquisição independente, Spider8 (Hottinger Baldwin Messtechnik, 2003a), responsável pelos transdutores de deslocamento. Todos os ajustes necessários foram feitos através de computador por meio do software de aquisição, Catman 4.5 (Hottinger Baldwin Messtechnik, 2003b). A Figura 6.7 apresenta os sistemas mencionados.



Figura 6.7: Aquisição de dados

Quando uma parte de um sistema estrutural está sendo estudado é necessário analisar o seu comportamento através de análises numéricas e experimentais. Análises experimentais demandam mais tempo na sua preparação e realização e são mais dispendiosas. Devido a este fato, optou-se pelas análises numéricas que são mais rápidas e econômicas, podendo variar parâmetros de forma relativamente rápida e com precisão, porém para se conhecer o real comportamento do modelo tornou-se necessária a realização de análises experimentais.

6.1 Resultados dos Ensaio Experimentais

Foram preparados dois protótipos para cada ensaio a ser realizado (Protótipo P1 e P2). O protótipo P1 possui tubos com diâmetro externo de 61,1mm e espessura de 6,0mm. Os flanges possuem diâmetro de 160mm e espessura de 9,5mm, e solda de 8,0mm. O protótipo P2 possui tubos com diâmetro externo de 73,0mm e espessura de 5,5mm. Os flanges possuem diâmetro de 170mm e espessura de 9,5mm, e solda de 8,0mm.

Foram consideradas para a montagem dos mesmos, a excentricidade em relação ao alinhamento dos tubos conectados pela ligação flangeada, de valores iguais a zero, oito por cento, dezesseis por cento e vinte e quatro por cento.

Os gráficos de Força versus Deslocamento das Figuras 6.8 e 6.9 apresentam como varia estas duas grandezas, à medida que o carregamento é efetuado e são dados os passos de carga. São mostrados os efeitos para cada protótipo, e o comportamento para cada valor de excentricidade considerados, podendo-se comparar cada um deles.

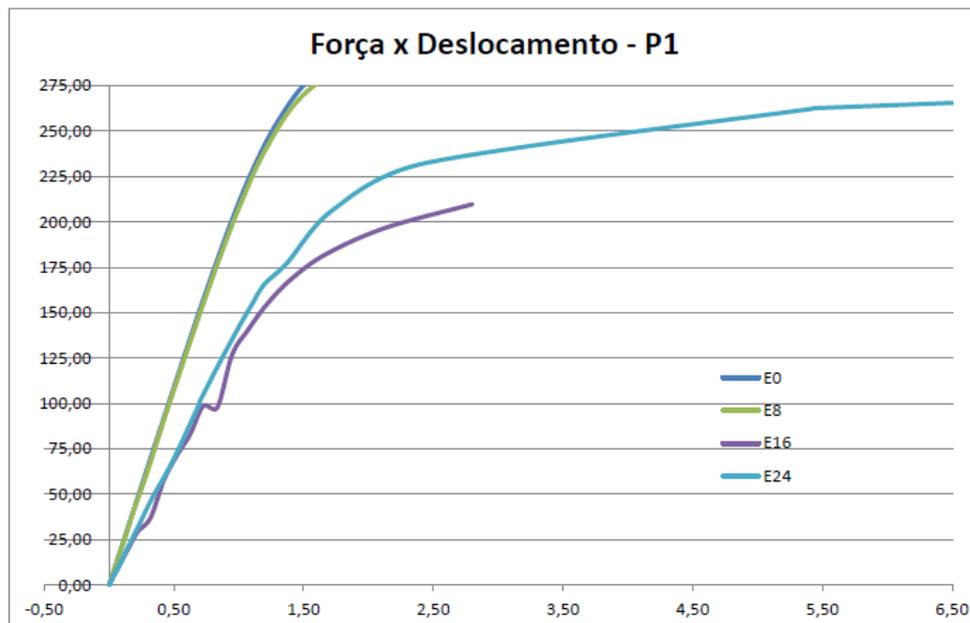


Figura 6.8: Força versus Deslocamento para Protótipo 1 (P1)
Excentricidades 0, 8%, 16% e 24 %

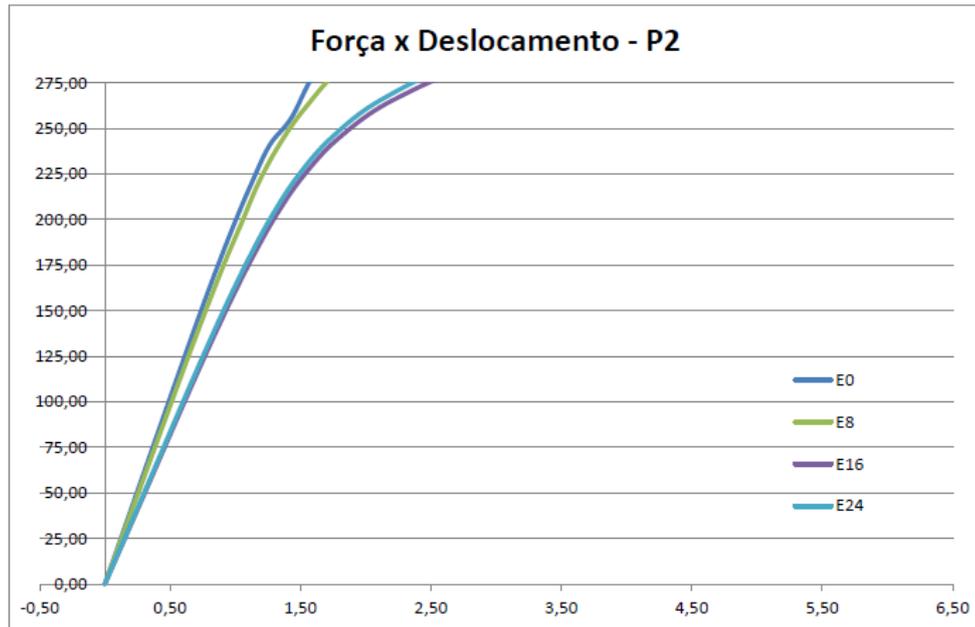


Figura 6.9: Força versus Deslocamento para Protótipo 2 (P2)
Excentricidades 0, 8%, 16% e 24 %

7 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS – NUMÉRICO E EXPERIMENTAL

Após feitas as análises numérica e experimental dos protótipos, comparou-se através dos gráficos abaixo, o comportamento dos protótipos nos parâmetros Força *versus* Deslocamento.

Porém, como dito anteriormente, esta análise será apenas qualitativa quanto ao comportamento dos gráficos, e não quantitativa. Este fato se justifica ao fato da Tensão de Escoamento do Flange no Experimental ter sido diferente do Numérico.

Primeiramente, sem considerar excentricidade inicial na análise, os gráficos das figuras 7.1 e 7.2 representam o comportamento destes parâmetros.

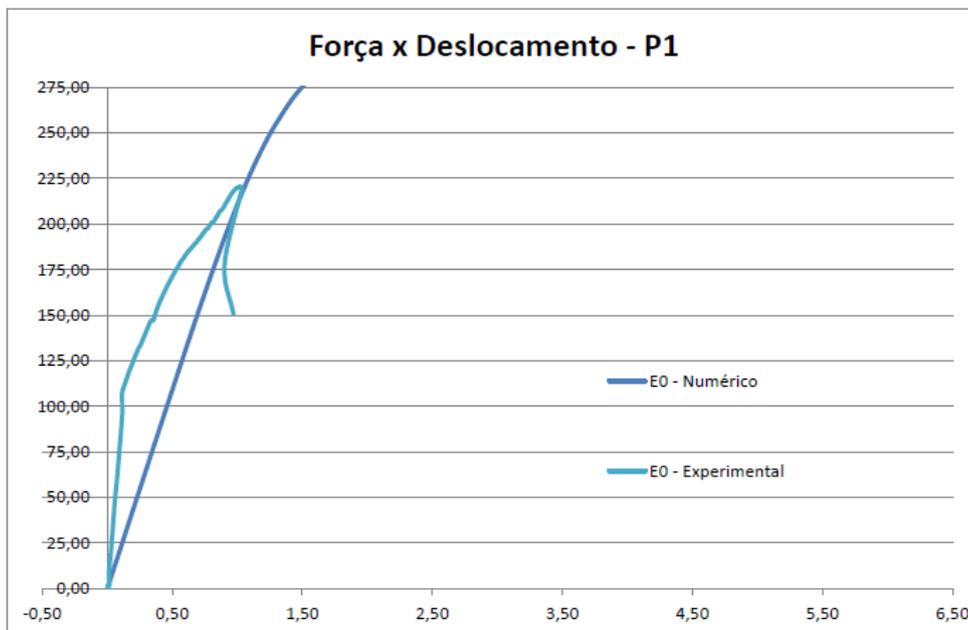


Figura 7.1: Força versus Deslocamento para Protótipo 1 (P1)
Excentricidade 0 (Numérico e Experimental)

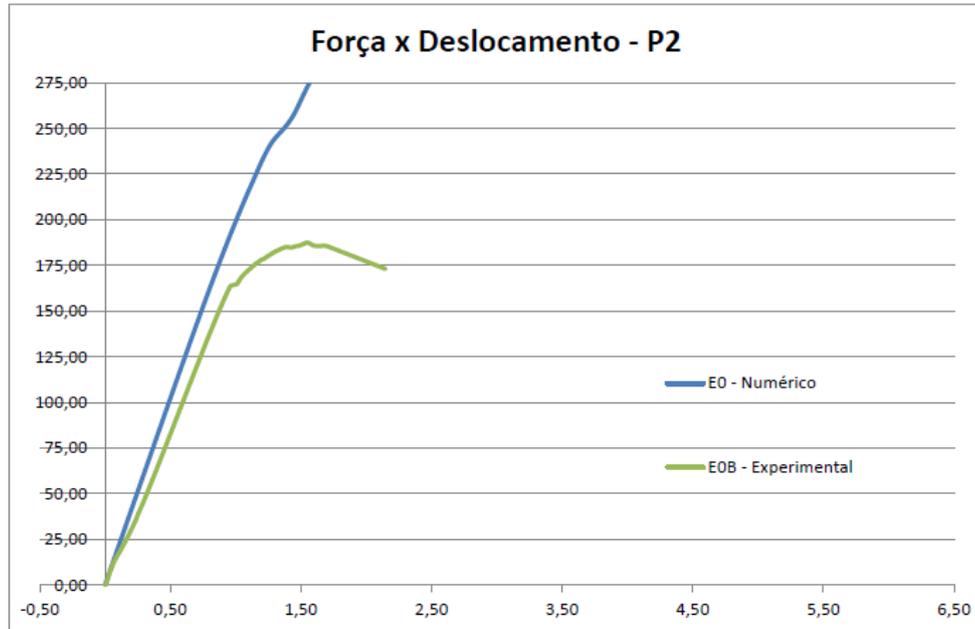


Figura 7.2: Força versus Deslocamento para Protótipo 2 (P2)
Excentricidade 0 (Numérico e Experimental)

A título de comparação, tem-se também o comportamento destes parâmetros considerando a excentricidade inicial de 8%, conforme os gráficos das figuras 7.3 e 7.4 apresentadas a seguir.

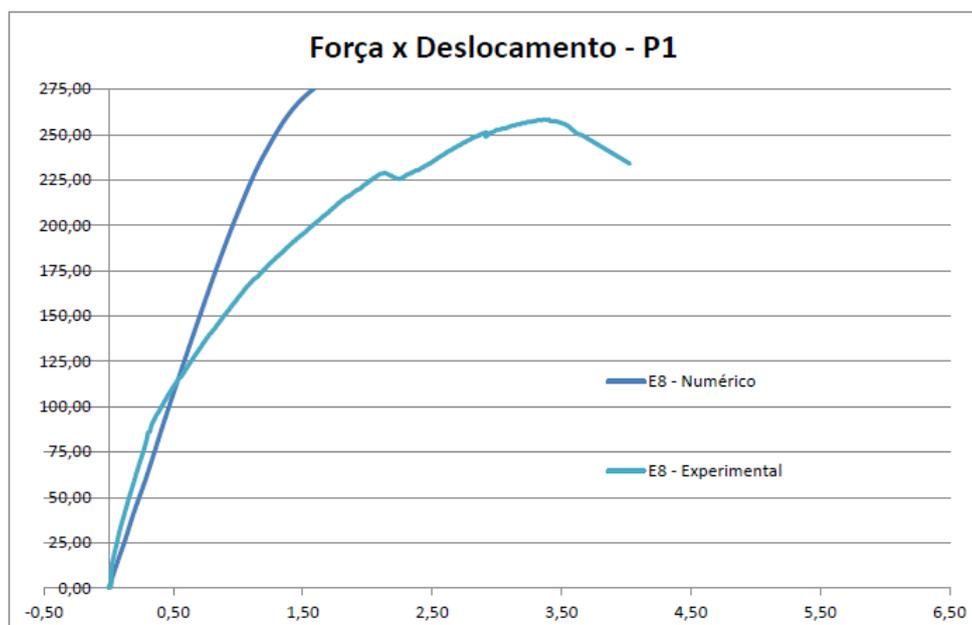


Figura 7.3: Força versus Deslocamento para Protótipo 1 (P1)
Excentricidade 8% (Numérico e Experimental)

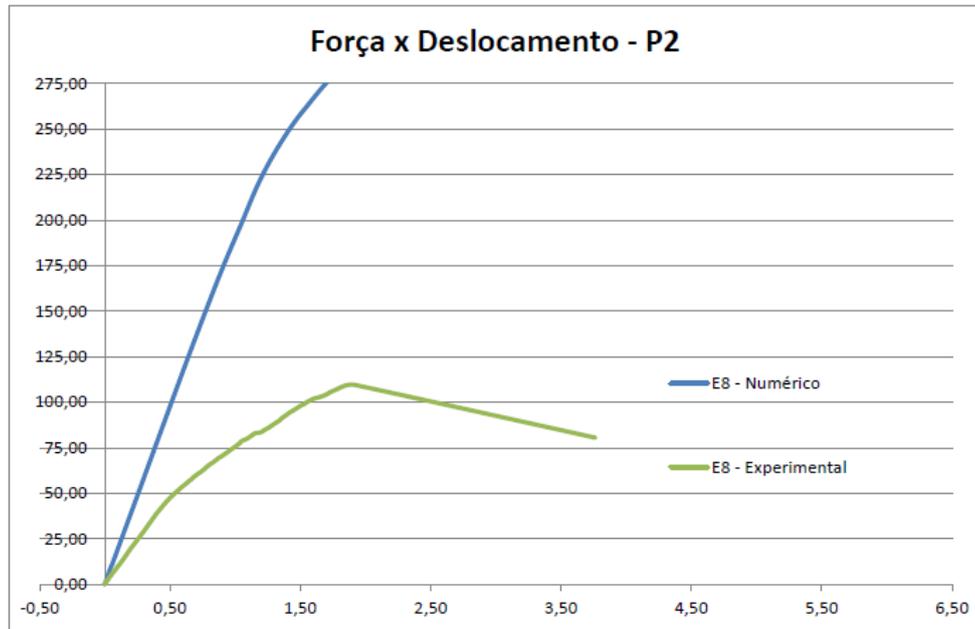


Figura 7.4: Força versus Deslocamento para Protótipo 2 (P2)
Excentricidade 8% (Numérico e Experimental)

E por fim, o comportamento dos parâmetros Força *versus* Deslocamento considerando-se excentricidade inicial de 24%, nas figuras 7.5 e 7.6.

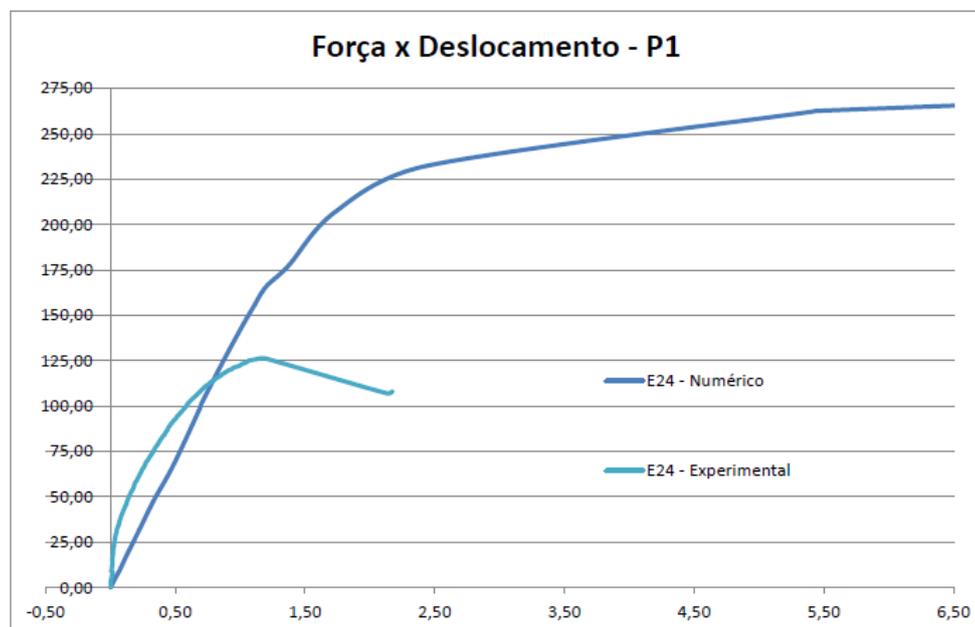


Figura 7.5: Força versus Deslocamento para Protótipo 1 (P1)
Excentricidade 24% (Numérico e Experimental)

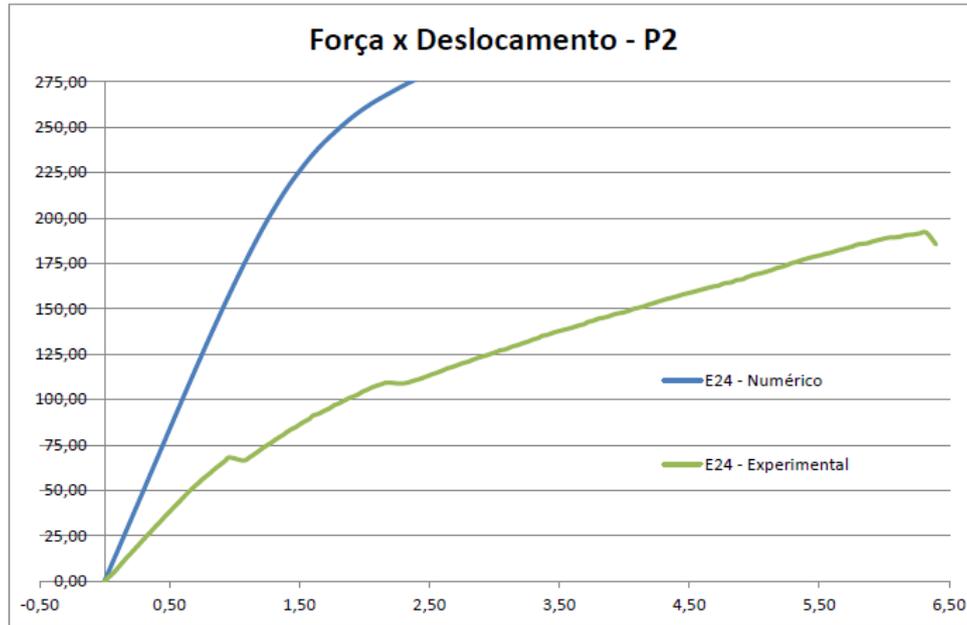


Figura 7.6: Força versus Deslocamento para Protótipo 2 (P2)
Excentricidade 24% (Numérico e Experimental)

Análise dos gráficos

Analisando-se os gráficos de Força versus Deslocamento apresentados, é possível observar que as curvas dos modelos numéricos apresentam um comportamento semelhante às curvas dos modelos experimentais, porém com diferenças perceptíveis nos níveis de carga e inclinações.

Essas diferenças podem ser atribuídas a imperfeições existentes no ensaio das ligações, e principalmente ao fato de que os protótipos apresentaram problemas com a solda do tubo na placa do flange, que rompeu em todos os casos antes de determinados os modos de falha na ligação.

Ao analisar-se os gráficos, é possível observar que o comportamento inicial das curvas de Tensão *versus* Deformação é semelhante nos modelos numéricos e experimentais, diferindo-se a partir do ponto onde o modelo experimental começa a apresentar os problemas já descritos.

8 CONCLUSÕES

A modelagem numérica apresentou boa precisão em simular a deformação do protótipo estudado e se mostrou confiável quando comparados com os estudos feitos anteriormente, porém ainda são necessários determinados ajustes nos modelos.

Os resultados dos ensaios experimentais mostraram-se condizentes ao que se esperava, quando comparados às análises dos modelos numéricos. Portanto ambas as análises, tanto numérica quanto experimental, foram importantes e relevantes para a realização deste trabalho, e também poderá servir como base para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

Associação brasileira de normas técnicas. **NBR 8800 – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios**. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR16239: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto com perfis tubulares**. Rio de Janeiro: 2013.

AMPARO, L. R. **Análise Teórico – Experimental de Ligações tipo luva compostas por perfis tubulares com parafusos em linha e cruzados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Propec - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

ANSYS, Ansysprogramversion 12.0. **FiniteElement Software.S.1**. AnsysIncorporation, 2010.

FIDALGO, A. M. **Estudo Teórico e Numérico do Comportamento de Ligações tipo Flange Circular para Estruturas Tubulares de Aço**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

KATO, B.; HIROSE, R..**Bolted Tension Flanges Joining Circular Hollow Members**. Elsevier, Tóquio, Japão, p.79-101, 1985. Mensalmente. J. Construct. Steel Research.

PEREIRA, C. O. V. R. **Análise Numérico-Experimental de Resistência a Flexão em Ligações Tubulares Flangeadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Propec - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

REQUENA, J. A. V.;SANTOS, A. L. E. d. F. e. **Dimensionamento de ligações em barras tubulares de estruturas metálicas planas**. Coleção técnico-científica V&M do Brasil, vol. 1. Campinas: V&M do Brasil, 2007.

ROCKEY, K. C.; GRIFFITHS, D. W. **The Behavior of Bolted Flanged Joints in Tension - Ring Flanges**. 1970. 71 f. Trabalhoapresentado à University of Wales – Faculty of Applied Science, Cardiff. 1970.

SANTOS, A. L. E. d. F. e., **Ligações de barras tubulares para estruturas metálicas planas**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.