

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES
METÁLICAS SOLDADAS ENTRE COLUNA EM PERFIL
TUBULAR CIRCULAR E VIGA EM PERFIL DE SEÇÃO
TRANSVERSAL “I”.**

SYLVIA LETIZIA FERRAREZI REIS

ORIENTADORES: Profa. Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas

Prof. Dr. Geraldo Donizetti de Paula

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.

Ouro Preto, Março de 2011

R375a Reis, Sylvia Letizia Ferrarezi.
Análise teórico experimental de ligações metálicas soldadas entre coluna em perfil tubular circular e viga em perfil de seção transversal I [manuscrito] / Sylvia Letizia Ferrarezi Reis - 2011.

104f.: il. color., graf., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Arlene Maria Sarmanho 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 metálicas - Teses. 2. Juntas soldadas - Teses. 4. Método de elementos finitos - Teses I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

CDU: 624.014.27

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

**ANÁLISE TEÓRICO EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES METÁLICAS
SOLDADAS ENTRE COLUNA EM PERFIL TUBULAR CIRCULAR E
VIGA EM PERFIL DE SEÇÃO TRANSVERSAL I**

AUTORA: SYLVIA LETIZIA FERRAREZI REIS

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 16 de março de 2011, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:


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


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


Prof. Dr. Luiz Fernando Loureiro Ribeiro (UFOP)


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

Agradecimentos

Agradeço a Deus, que tanto me deu força para vencer mais esta etapa.

Aos meus pais Silvio e Edith e minhas irmãs, Patrícia e Déborah pelo apoio e incentivo de sempre.

Aos meus sempre queridos Assis e Bruno pelo apoio e compreensão nos momentos mais difíceis.

A todos os meus amigos, Iara, Roberta Machado, Flavio e Róvia pelos conselhos e ajudas e a todos que de certa forma me ajudaram nessa etapa.

A todos os funcionários do Laboratório de Estruturas, João, Dequinha e Sr. Osvaldo que sempre solícitos, foram imprescindíveis nas realizações dos ensaios experimentais.

Aos professores Arlene Maria Sarmanho Freitas e Geraldo Donizetti de Paula, por acreditarem em mim na realização desse trabalho, pela amizade, orientação e diversos ensinamentos.

Aos professores do PROPEC pela contribuição da minha formação.

À Universidade Federal de Ouro Preto.

À CAPES e a Vallourec & Mannesmann Tubes do Brasil pelo apoio financeiro.

Resumo

Neste trabalho é apresentado um estudo de ligações soldadas formadas por coluna tubular sem costura de seção transversal circular e viga em aço de seção transversal tipo “I”. Para este estudo foram desenvolvidas análise experimental, teórica e numérica das ligações. Os ensaios experimentais foram realizados em protótipos em escala real, com a geometria definida através de estudos de esbeltez, resistência e rigidez. Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Estruturas “Prof. Altamiro Tibiriçá Dias” do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Os ensaios dos protótipos da ligação visaram a obtenção do comportamento momento-rotação, carga última e modo de colapso da ligação e a comparação destes com modelos teóricos e numéricos, o que permitiu a classificação da ligação quanto a sua rigidez. As análises teóricas foram realizadas a partir das prescrições de norma. A análise numérica em elementos finitos envolveu a geração e análise de modelos calibrados a partir dos resultados obtidos nos ensaios experimentais. O modelo numérico foi constituído de forma que representasse o comportamento e a capacidade de carga das ligações ensaiadas experimentalmente bem como a determinação de sua rigidez. As ligações ensaiadas apresentaram como modo de falha a plastificação da face da coluna. Os resultados obtidos experimentalmente mostraram boa convergência com os resultados numéricos e teóricos e sugestão de ajuste das prescrições é proposto.

Abstract

This work presents a study of welded joints, formed by a structural steel hot rolled hollow section, having circular hollow sections at the columns and steel "I" sections at the beam. The study developed theoretical and numerical analyses for the joints, experimental tests in full scale prototypes. The experimental tests on the joints were performed at the Prof. Altamiro Tibiriçá Dias Structures Laboratory of the Civil Engineering Department in the School of Mines, at the Universidade Federal de Ouro Preto. Here, the results for behavior, ultimate load, stiffness, and collapse mode were analyzed and compared with numerical and theoretical models. The theoretical analysis was carried out from the codes prescriptions. The numerical analysis finite element methods involved the generation and analysis from the results obtained in experimental results. The model represents the behavior and load capacity and the stiffness of the tested joints. The joints tested indicated the plastic failure of the column face. The numerical model and experimental results had good agreement and a theoretical equation revision was proposed to analyze these joints.

Sumário

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Considerações Iniciais..... | 1 |
| 1.2 Ligações Tubulares..... | 2 |
| 1.2.1 Ligações Soldadas Planas e Tridimensionais | 3 |
| 1.2.2 Ligações Viga-Coluna..... | 5 |
| 1.3 Semi-Rigidez das Ligações | 7 |
| 1.4 Objetivo..... | 9 |
| 1.5 Estudos em Ligações Tubulares..... | 9 |
| | |
| 2. ANÁLISE TEÓRICA..... | 15 |
| 2.1 Considerações Iniciais | 15 |
| 2.2 Procedimento Segundo o Eurocode (2005)..... | 16 |
| 2.3 Procedimento Segundo o CIDECT (2004)..... | 19 |
| | |
| 3. MODELAGEM COMPUTACIONAL..... | 23 |
| 3.1 Considerações Iniciais | 23 |
| 3.2 Preparação dos Modelos Numéricos | 24 |
| 3.3 Elementos Finitos Utilizados..... | 24 |
| 3.4 Parâmetros de Entrada | 27 |
| 3.5 Modelos Numéricos Avaliados | 28 |
| | |
| 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL | 32 |
| 4.1 Introdução | 32 |
| 4.2 Características dos Materiais e Dimensões dos Protótipos..... | 32 |
| 4.3 Esquema de Montagem dos Ensaios | 35 |
| 4.4 Sistema de Aplicação do Carregamento | 36 |
| 4.5 Instrumentação e Sistema de Aquisição de Dados | 37 |
| 4.6 Metodologia do Ensaio | 40 |
| | |
| 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS | 42 |
| 5.1 Considerações Iniciais | 42 |
| 5.2 Determinação da Rigidez de Uma Ligação com a Utilização de Ensaios Experimentais | 42 |
| 5.3 Apresentação dos Resultados Experimentais | 44 |
| 5.3.1 Ensaio do Protótipo P1 | 44 |
| 5.3.2 Ensaio do Protótipo P2 | 44 |
| 5.3.2.1 Ensaio N2-1 | 45 |
| 5.3.2.2 Ensaio N2-2 | 50 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.3.3 | Ensaio do Protótipo P3 | 55 |
| 5.3.3.1 | Ensaio N3-1 | 56 |
| 5.3.3.2 | Ensaio N3-2 | 60 |
| 6. | APRESENTAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS, EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS | 64 |
| 6.1 | Considerações Iniciais | 64 |
| 6.2 | Comparação Entre os Resultados do Modelo Numérico MN2 e Ensaio Experimentais N2-1 e N2-2 do Protótipo P2 | 64 |
| 6.2.1 | Comparação Entre os Resultados do Modelo Numérico MN2 e Ensaio Experimental N2-1 | 65 |
| 6.2.2 | Comparação Entre os Resultados do Modelo Numérico MN2 e Ensaio Experimental N2-2 | 68 |
| 6.3 | Comparação Entre os Resultados do Modelo Numérico MN3 e Ensaio Experimentais N3-1 e N3-2 do Protótipo P3..... | 70 |
| 6.4 | Comparação Entre os Resultados Experimentais e Teóricos..... | 74 |
| 6.5 | Classificação das Ligações Analisadas Experimentalmente e Numericamente..... | 77 |
| 7. | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 79 |
| | REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA..... | 82 |

Lista de Figuras

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| | Figura 1.1 – Ligação entre coluna tubular circular e viga de seção tipo “I”. | 2 |
| | Figura 1.2 – Ligações soldadas planas..... | 3 |
| | Figura 1.3 – Treliça espacial plana.Estádio João Havelange “Engenhão”. | 4 |
| | Figura 1.4 – Ligações tridimensionais soldadas entre barras tubulares. | 4 |
| | Figura 1.5 – Treliça espacial – Aeroporto de Hamburgo, Alemanha. | 5 |
| | Figura 1.6 – Ligação por chapa simples. | 5 |
| | Figura 1.7 – Ligação viga-coluna com diafragmas transversais externos..... | 6 |
| | Figura 1.8 – Ligação viga-coluna com enrijecedor e ligação parafusada entre as mesas da viga e os diafragmas..... | 6 |
| | Figura 1.9 – Ligação viga-coluna com anéis externos circulares. | 7 |
| | Figura 1.10 – Classificação dos limites de rigidez para ligações viga-coluna. | 8 |
| 2 | ANÁLISE TEÓRICA | |
| | Figura 2.1 – Ligação soldada entre coluna tubular circular e viga de perfil I. ... | 17 |
| 3 | MODELAGEM COMPUTACIONAL..... | 23 |
| | Figura 3.1 – Elemento “ <i>Shell 281</i> ”..... | 25 |
| | Figura 3.2 – Elemento “ <i>Solid 45</i> ”. | 25 |
| | Figura 3.3 – Malha em elementos finitos do modelo..... | 26 |
| | Figura 3.4 – Acoplamento dos nós da chapa com o flange da viga..... | 26 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 3.5 – Condições de contorno do modelo. | 27 |
| Figura 3.6 – Aplicação do carregamento vertical na viga..... | 28 |
| Figura 3.7 – Curva Momento-Rotação das análises preliminares. | 29 |
| | |
| 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL..... | 32 |
| Figura 4.1 – Esquema geral da ligação..... | 33 |
| Figura 4.2 – Nomenclatura utilizada para as dimensões dos protótipos ensaiados. | 34 |
| Figura 4.3 – Placa de base. | 35 |
| Figura 4.4 – Placa de fixação do pilar no pórtico de reação..... | 36 |
| Figura 4.5 – Peças de fixação inferior (a), superior (b) e pórticos de reação | 35 |
| Figura 4.6 – Sistema de aplicação de cargas. | 37 |
| Figura 4.7 – LVDT. | 37 |
| Figura 4.8 – Deflectômetro de haste com mostrador analógico. | 38 |
| Figura 4.9 – Posicionamento dos LVDT's..... | 38 |
| Figura 4.10 – Extensômetro e roseta..... | 39 |
| Figura 4.11 – Sistema automático de aquisição de dados “spider 8”. | 39 |
| Figura 4.12 – Sistema de aquisição de dados..... | 39 |
| Figura 4.13 – Deflectômetros posicionados na coluna..... | 41 |
| | |
| 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | |
| EXPERIMENTAIS..... | 42 |
| Figura 5.1 – Exemplo de curva momento-rotação obtida de ensaio experimental. | 43 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.2 – Método da Inclinação Inicial..... | 43 |
| Figura 5.3 – Vista do protótipo P1, flambagem lateral por torção na viga. | 44 |
| Figura 5.4 – Localização da extensometria do ensaio N2-1..... | 45 |
| Figura 5.5 – Carga x deformação específica da viga: E1, E2, E15 e E16..... | 47 |
| Figura 5.6 – Carga x Deslocamento na viga do ensaio N2-1. | 47 |
| Figura 5.7 – Carga x Tensão de von Mises para as rosetas do ensaio N2-1. | 48 |
| Figura 5.8 – Deformação da viga para a carga de 140,90 kN. | 49 |
| Figura 5.9 – Curva Momento-Rotação da ligação do ensaio N2-1 do protótipo P2(coluna 219,1x9,5 e viga W310x38,7). | 49 |
| Figura 5.10 – Rompimento da solda no flange superior da viga..... | 50 |
| Figura 5.11 – Posição das rosetas e extensômetros no protótipo. | 51 |
| Figura 5.12 – Carga x deformação específica da viga para os E1, E2, E15 e E16. | 52 |
| Figura 5.13 – Carga x Deslocamento da viga. | 52 |
| Figura 5.14 – Carga x Tensão de von Mises para as rosetas do ensaio N2-2. ... | 53 |
| Figura 5.15 – Deformação da viga para uma carga de 135,08 kN. | 53 |
| Figura 5.16 – Curva Momento-Rotação da ligação do protótipo do ensaio N2-2. | 54 |
| Figura 5.17 – Rompimento da solda no flange superior da viga W 310 x 38,7 Coluna 219,1 x 9,5. | 55 |

| | |
|--|----------|
| Figura 5.18 – Atuador hidráulico com chapas de aço para aplicação de carga. | 56 |
| Figura 5.19 – Carga x Tensão de von Mises para as rosetas do ensaio N3-1. | ...57 |
| Figura 5.20 – Carga x deformação específica da viga para o ensaio N3-1. | 57 |
| Figura 5.21 – Carga x Deslocamento da viga para o ensaio N3-1. | 58 |
| Figura 5.22 – Deformação da viga para uma carga de 71,73 kN. |58 |
| Figura 5.23 – Curva Momento-Rotação da ligação para o ensaio N3-1. |59 |
| Figura 5.24 – Detalhe do rompimento da solda no flange da viga. |59 |
| Figura 5.25 – Carga x Tensão de von Mises para as rosetas do ensaio N3-2. | ..60 |
| Figura 5.26 – Carga x deformação específica da viga para o ensaio N3-2. |61 |
| Figura 5.27 – Carga x Deslocamento da viga para o ensaio N3-2. |61 |
| Figura 5.28 – Deformação da viga para uma carga de 66,15 kN. |62 |
| Figura 5.29 – Curva Momento-Rotação da ligação para o ensaio N3-2. | 62 |
| Figura 5.30 – Esmagamento da coluna pelo flange da viga por forças de compressão. |63 |

6. APRESENTAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS, EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS64

| | |
|---|----------|
| Figura 6.1 – Comparação experimental e numérica para a Carga x Tensão de von Mises do protótipo P2, ensaio N2-1. |66 |
| Figura 6.2 – Distribuição das tensões de von Mises para o modelo MN2. | 67 |
| Figura 6.3 – Curvas Momento-Rotação experimental e numérica para o ensaio | |

| | |
|--|----|
| N2-1. | 67 |
| Figura 6.4 – Comparação experimental e numérica para a Carga x Tensão de von Mises do protótipo P2, ensaio N2-1. | 68 |
| Figura 6.5 – Distribuição das tensões de von Mises para o modelo MN2. | 69 |
| Figura 6.6 – Curvas Momento-Rotação experimental e numérica para o ensaio N2-2. | 70 |
| Figura 6.7 – Comparação experimental e numérica para a Carga x Tensão de von Mises do protótipo P3, ensaio N3-1 e modelo numérico MN3 | 71 |
| Figura 6.8 – Comparação experimental e numérica para a Carga x Tensão de von Mises do protótipo P3, ensaio N3-2 e modelo numérico MN3..... | 71 |
| Figura 6.9 – Distribuição das tensões de von Mises para o modelo MN3. | 72 |
| Figura 6.10– Curvas Momento-Rotação experimental e numérica para o ensaio N3-1. | 73 |
| Figura 6.11 – Curvas Momento-Rotação experimental e numérica para o ensaio N3-2. | 73 |
| Figura 6.12 – Curvas rigidez versus 2γ experimental e teórico. | 75 |
| Figura 6.13 – Ajuste da curva teórica. | 76 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|-----------|
| 2. ANÁLISE TEÓRICA..... | 15 |
| Tabela 2.1 – Equações de resistência em ligações envolvendo colunas tubulares. | 18 |
| Tabela 2.2 – Procedimento para verificação da resistência da ligação. | 19 |
| Tabela 2.3 – Denominação das ligações capazes de transmitir momento com elementos de perfil de seção tubular. | 19 |
| Tabela 2.4 – Equação de resistência de cálculo para ligações IC planas. | 20 |
| | |
| 3. MODELAGEM COMPUTACIONAL..... | 23 |
| Tabela 3.1 – Dimensões nominais dos perfis utilizados nas modelagens numéricas. | 29 |
| Tabela 3.2 – Resultados teóricos e numéricos das análises preliminares. | 30 |
| | |
| 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL | 32 |
| Tabela 4.1 – Definição e nomenclatura dos protótipos ensaiados. | 32 |
| Tabela 4.2 – Dimensões nominais dos perfis utilizados na composição dos protótipos. | 33 |
| Tabela 4.3 – Propriedades mecânicas do aço dos perfis das colunas dos protótipos. | 34 |

| | |
|---|-----------|
| 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS..... | |
| EXPERIMENTAIS | 62 |
| Tabela 5.1 – Resultados obtidos nos ensaios experimentais. | 63 |
| 6. APRESENTAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS, EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS | 64 |
| Tabela 6.1 – Nomenclatura dos modelos numéricos. | 65 |
| Tabela 6.2 – Comparação entre os resultados experimentais e numéricos das ligações estudadas. | 74 |
| Tabela 6.3 – Cargas últimas das ligações. | 74 |
| Tabela 6.4 – Comparação entre os resultados teóricos e experimentais. | 75 |
| Tabela 6.5 – Classificação quanto a rigidez das ligações, pelo Eurocode 3 (2005). 77 | |
| Tabela 6.6– Comparação entre os resultados experimentais, numéricos e teóricos..... | 77 |
| 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 79 |
| Tabela 7.1 – Dimensões nominais dos perfis utilizados na avaliação teórica e nas modelagens numéricas com o parâmetro β correspondente. | 80 |

Lista de Símbolos

Letras romanas maiúsculas.

A = área da seção transversal da coluna.

$C_{b,ip}$ = rigidez da ligação.

E = módulo de elasticidade.

E_t = módulo tangente.

K = rigidez axial do flange.

M_{Ed} = momento fletor solicitante proveniente do elemento conectado.

$M_{ip,i,Rd}$ = momento fletor resistente de cálculo no plano da ligação.

M_{max} = momento máximo.

$M_{op,i,Rd}$ = momento fletor resistente de cálculo fora do plano da ligação.

$M_{op,Ed}$ = momento fletor solicitante fora do plano da ligação.

N_{Ed} = força normal solicitante proveniente do elemento conectado.

$N_{i,Ed}$ = força normal solicitante proveniente do elemento conectado i .

$N_{i,Rd}$ = força normal resistente de cálculo.

P_{max} = carga máxima.

W = módulo elástico.

a) Letras romanas minúsculas

b_f = largura da mesa da viga.

d_c = diâmetro da coluna tubular circular.

f_u = limite de ruptura do aço.

f_y = tensão de escoamento do aço.

f_{y0} = tensão de escoamento do aço da coluna.

h_b = altura da viga.

k_p = coeficiente para consideração do efeito axial da coluna.

t_b = espessura da mesa da viga.

t_w = espessura da alma da viga.

t_c = espessura da coluna tubular circular.

b) Letras gregas minúsculas

β = razão entre o comprimento da mesa e o diâmetro da coluna tubular circular.

γ = relação entre o diâmetro da coluna pelo dobro de sua espessura.

$\gamma_{M5} = 1,0$, fator de ponderação da resistência.

ϕ = rotação da ligação.

ν = coeficiente de Poisson.

$\sigma_{p,Ed}$ = tensão axial solicitante na coluna.

σ_{max} = máxima tensão solicitante proveniente do elemento conectado.

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A tecnologia da construção metálica conta hoje com conhecimentos teóricos sistematizados e com normas técnicas reconhecidas internacionalmente para orientar as concepções de projeto, os cálculos estruturais e os processos de fabricação e montagem de estruturas metálicas tubulares (Gerken 2003). Apesar da disseminação e do crescimento do uso de estruturas tubulares no Brasil, ainda existe uma carência de pesquisas que forneçam ferramentas capazes de prever o comportamento real desses elementos estruturais. O aumento do uso de perfis tubulares em estruturas metálicas tem destacado a necessidade de métodos de cálculo que racionalizem as ligações com elementos tubulares.

Os perfis tubulares possuem propriedades geométricas que tornam possível a elaboração das mais variadas obras com soluções arrojadas e econômicas (FIRMO 2005). Estes perfis, devido à geometria, possuem também grande resistência à torção e resistência equilibrada à flexão. Não necessitando de formas, os tubos podem ser preenchidos com concreto aumentando assim a resistência mecânica e a resistência ao fogo.

Os perfis tubulares podem ser fabricados através de laminação à quente ou podem ser dobrados a frio, e podem ser sem ou com costura fechados através de solda. Os perfis tubulares possuem, na maioria das vezes, seções transversais circulares, quadradas ou retangulares.

Com relação às ligações entre coluna tubular de aço de seção transversal circular e viga de seção transversal tipo I, utilizadas, por exemplo, em edificações de andares

múltiplos, têm poucas contribuições em pesquisas, principalmente no Brasil. A Figura 1.1 a seguir, ilustra a ligação que é objeto de estudo desse trabalho.



Figura 1 - Ligação entre coluna tubular circular e viga de seção tipo "I". Fonte: Arquivo pessoal.

As ligações estruturais desempenham um papel fundamental no comportamento global das estruturas de aço. Diversos trabalhos de pesquisa têm sido desenvolvidos com o objetivo de se entender o comportamento real de uma ligação e sua influência na resistência de edificações em aço. Com a análise do comportamento real das ligações, é possível o desenvolvimento para novas recomendações de projeto para se avaliar as propriedades mecânicas das ligações.

1.2 Ligações Tubulares

Os perfis tubulares geralmente são utilizados em elementos estruturais, como colunas, treliças planas, espaciais, etc. e as ligações possuem diversas combinações possíveis entre os membros que a compõem.

Nesse sentido, visando a contextualização deste trabalho, serão apresentadas a seguir as ligações entre perfis de barras tubulares, e perfis de seção tubular compostos com seção transversal tipo I, caracterizando uma ligação viga-coluna.

1.2.1 Ligações Soldadas Planas e Tridimensionais

Os tipos mais usuais de ligações soldadas planas são denominadas *T*, *Y*, *X*, *K*, *N*, *KT*, *duplo K* e *duplo Y*. Essas ligações podem ser executadas tanto em perfis tubulares retangulares como circulares e com a junção dos dois. A Figura 1.2 a seguir ilustra estes tipos de ligações.

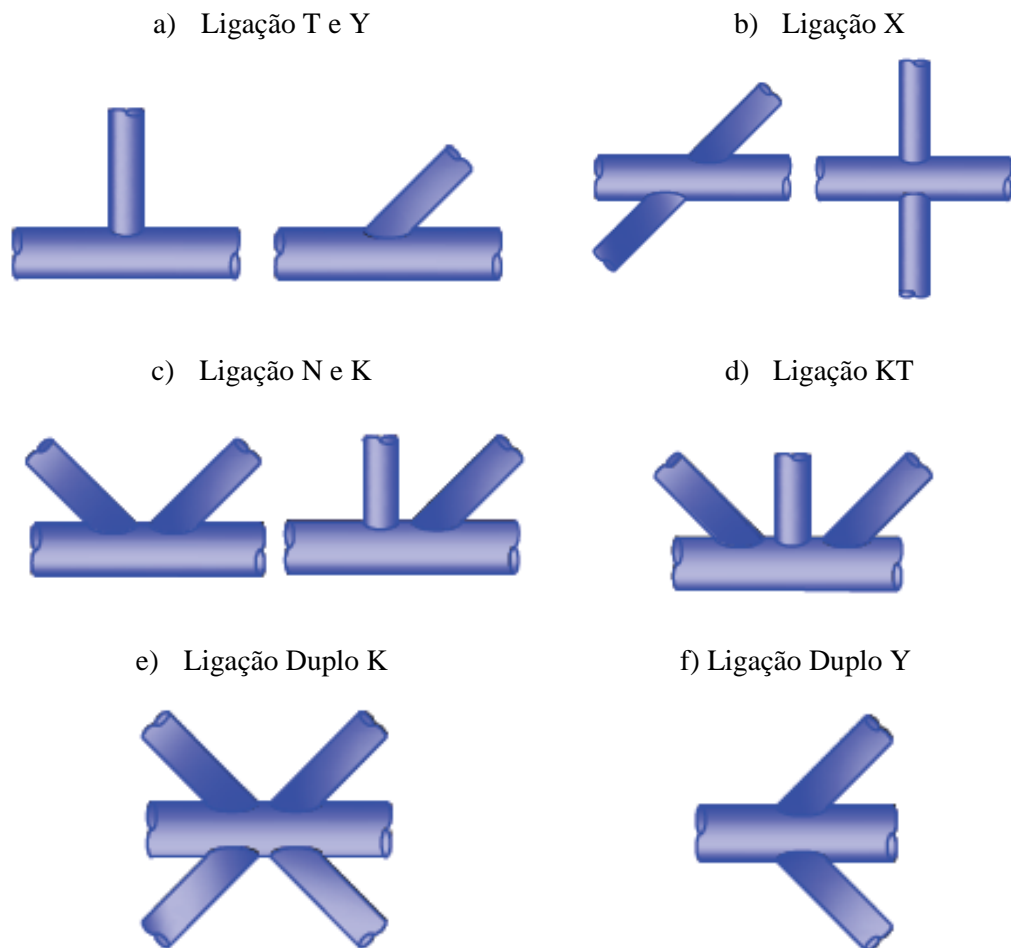


Figura 1.2 - Ligações soldadas planas.

Uma aplicação usual destas ligações são os sistemas treliçados constituídos de perfis tubulares, como ilustrado na Figura 1.3, sendo suas ligações parafusadas ou soldadas.



Figura 1.3 - Treliça espacial - Estádio João Havelange "Engenhão", Rio de Janeiro/Brasil. Fonte: Disponível em < <http://diariodorio.com/fotos-do-engenhao-a-noite>>. Acesso em: 20/04/2010.

Dentre as ligações tridimensionais, as mais comuns são as ligações *XX*, *KK* e *TT*, como ilustra a Figura 1.4 a seguir.

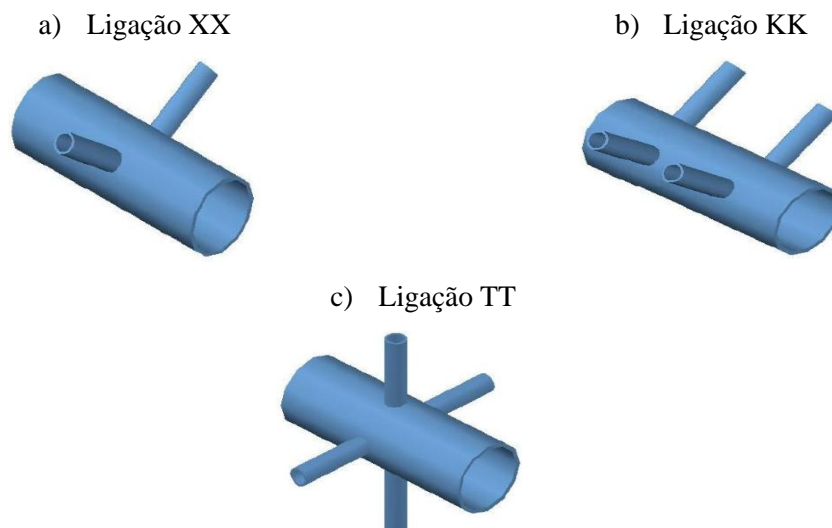


Figura 1.4 - Ligações tridimensionais soldadas entre barras tubulares.

Como exemplo de ligação tridimensional, as treliças podem ser espaciais ou multiplanares, como ilustra a Figura 1.5 e possuem elevada estabilidade lateral em relação às treliças planas, o que normalmente tornam desnecessárias medidas adicionais para garantir a sua estabilidade quanto à flambagem lateral, sendo usualmente utilizadas para vencer grandes vãos.



Figura 1.5 - Treliça espacial - Aeroporto de Hamburgo, Alemanha. Fonte: Mayor 2010.

1.2.2 Ligações Viga-Coluna

Serão apresentadas algumas tipologias de ligações viga-coluna entre coluna de seção transversal tubular circular e viga de seção transversal I, objeto deste trabalho.

Um dos tipos mais comuns de ligação em estruturas metálicas é caracterizada pela ligação por chapa simples (*single plate*) ou chapa de alma, sendo constituída por uma chapa soldada, na fábrica, ao elemento suporte, para possibilitar posterior conexão da viga por parafusos. O que caracteriza esta ligação é a sua pequena capacidade de restrição das rotações da extremidade da viga, tornando-se incapaz de transmitir momentos significantes para a coluna. A Figura 1.6 ilustra a ligação por chapa simples.

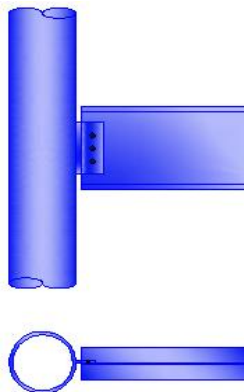


Figura 1.6 - Ligação por chapa simples.

Existem ainda, as ligações que possuem a capacidade de transmitir momento fletor à coluna, e para que haja esta transmissão é necessário que as mesas da viga de seção transversal I estejam ligados à coluna de seção tubular. Ligação esta, que pode ser através de soldagem direta dos flanges da viga na coluna, sendo esta tipologia objeto de estudo neste trabalho.

Em ligação viga-coluna, pode haver a ocorrência de uso de diafragmas transversais externos que são soldados na face da coluna e conectados às mesas da viga por meio de parafusos ou por soldagem. Há a recomendação para que os diafragmas externos tenham a forma poligonal, no caso de colunas que recebem vigas pelos quatro lados. A Figura 1.7 ilustra os diafragmas externos soldados e parafusados às mesas.

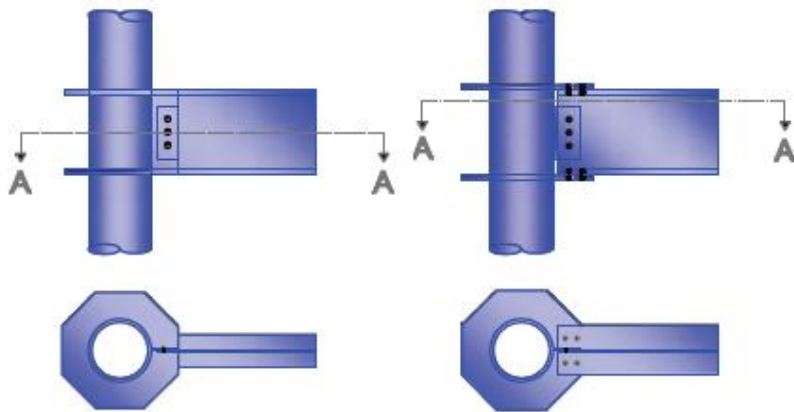


Figura 1.7-Ligação viga-coluna com diafragmas transversais externo.

Pode-se ainda enrijecer e aumentar a resistência da ligação utilizando enrijecedores soldados aos diafragmas externos como ilustra a Figura 1.8.

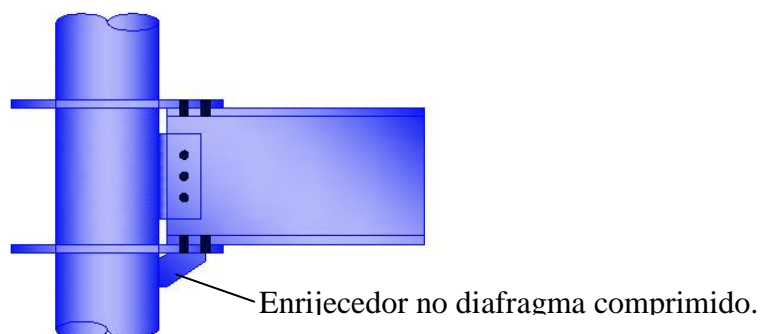


Figura 1.8 - Ligação viga-coluna com enrijecedor e ligação parafusada entre as mesas da viga e os diafragmas.

Os diafragmas externos quando devidamente conectados às mesas da viga, podem ser responsáveis pela transmissão do momento fletor para a coluna. A utilização dos diafragmas aumenta a rigidez da parede do tubo contra a ação de cargas concentradas aplicadas na direção perpendicular ao eixo da coluna na região em que se encontra o anel. Os diafragmas externos podem assumir também a forma circular como mostra a Figura 1.9 a seguir.



Figura 1.9 - Ligação viga-coluna com anéis externos circulares. Fonte: Arquivo pessoal.

1.3 Semi-Rigidez das Ligações

Os estudos e observações feitos, com base no comportamento estrutural de ligações entre elementos de estruturas metálicas, vêm a comprovar a necessidade de se considerar a resposta não-linear das estruturas e das ligações como complemento da análise estrutural.

As especificações mais recentes consideram o comportamento semi-rígido das ligações, contribuindo, dessa forma, para o aperfeiçoamento dos métodos mais tradicionais, onde são considerados comportamentos idealizados, como o caso das ligações rígidas e flexíveis (Carvalho, 2005).

Os estudos sobre o comportamento das ligações procuram considerar as características que possam classificá-las em termos de rigidez, resistência e ductilidade.

Os sistemas de classificação são concebidos de forma a permitir a inclusão e consideração de novos tipos de comportamentos de ligações, idealizados ou não.

O comportamento estrutural da ligação é caracterizado pela relação momento-rotação ($M-\Phi$), que fornece os parâmetros necessários para sua classificação, assim como a análise da estrutura na qual a ligação está inserida, e seu comportamento não-linear.

De forma geral, o diagrama $M-\Phi$ pode ser determinado de várias maneiras como simulações numéricas, modelos teóricos, modelos semi-empíricos ou por ensaios experimentais (Freitas, 2009). O Eurocode 3 (2005) estabelece os limites de rigidez que classificam a ligação a partir do diagrama $M-\Phi$, tais limites são mostrados na Figura 1.10.

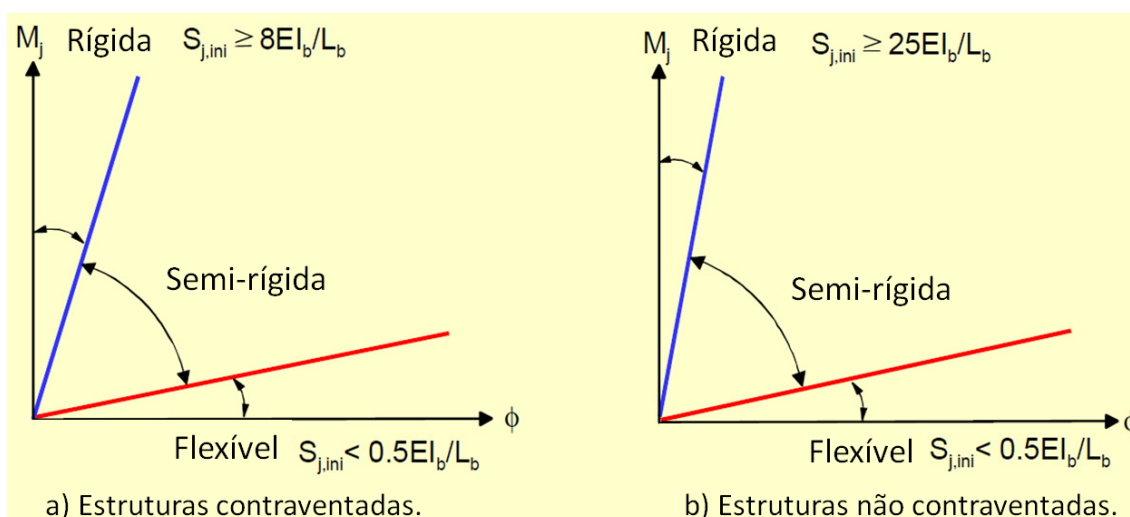


Figura 1.10 - Limites para classificação da rigidez de ligação viga-coluna conforme o Eurocode 3 (2005).

Onde:

$S_{j,ini}$ = rigidez inicial da ligação;

E = módulo de elasticidade do aço;

I_b = momento de inércia da viga;

L_b = comprimento da viga.

O comportamento da ligação, geralmente revela-se como uma variável na fase de análise estrutural. Um exemplo que ilustra este comportamento é a compressão axial da coluna tubular no desempenho da ligação, no caso da ligação viga-coluna. A compressão axial gera um estado de tensão na parede da coluna influenciando no comportamento da ligação.

1.4 Objetivo

O objetivo deste trabalho é a avaliação teórica e experimental de ligação soldada entre uma coluna tubular de seção transversal circular de aço e viga de perfil I. A avaliação teórica considera as variações das relações entre diâmetro e espessura do tubo circular da coluna, e o comprimento da mesa da viga de perfil I. Estas relações influenciam diretamente na transmissibilidade do momento fletor, e, conseqüentemente, na rigidez da ligação.

Para avaliação das ligações foi realizada uma análise numérica das mesmas, seguido de um programa experimental de modo a validar o modelo existente. Paralelamente, foi realizada a comparação experimental com procedimentos normativos.

Assim, é analisado o comportamento $M-\Phi$ das ligações experimentalmente e avaliadas as prescrições apresentadas internacionalmente e a metodologia numérica empregada.

1.5 Estudos em Ligações Tubulares

Nos últimos anos, vêm sendo desenvolvidas pesquisas de caráter experimental, numérica e analítica sobre os vários tipos de ligações soldadas, com perfis tubulares.

Packer (1979) realizou estudos numéricos com a finalidade de analisar a resistência última de ligações entre elementos tubulares retangulares, por meio de

mecanismos plásticos. Para tanto, foi elaborado um programa computacional que prevê a ruptura da ligação segundo modos de falha esperados, ou combinação deles.

Winkel *et al.* (1993) realizou um estudo numérico e experimental de ligações soldadas entre viga I e coluna tubular circular, sendo esta ligação solicitada em planos diferentes. Os estudos visaram observar os parâmetros de rigidez e resistência das ligações, bem como analisar o comportamento momento-rotação depois de atingido o momento máximo. Foram aplicadas três combinações de carregamento diferentes a fim de avaliar o comportamento da ligação. Na combinação mais simples foi simulada a presença do “steel deck” na ligação, onde foi possível observar que a presença do mesmo acarretou em um pequeno acréscimo de resistência e rigidez. Neste estudo foi constatada a influência dos momentos aplicados em planos perpendiculares no comportamento da ligação.

Davies e Crockett (1996) apresentaram alguns diagramas de interações para esforços de ligações tipo “T” com seções tubulares circulares com carregamento estático nos membros, obtidos por modelos de elementos finitos calibrados com dados experimentais.

Araújo *et al.* (2001) realizou estudos onde se procurou compilar diversos processos de concepção, fabricação e montagem de estruturas tubulares. Buscou-se comparar os diversos processos, bem como os custos envolvidos.

Gerken (2003) apresentou uma visão geral da utilização das estruturas tubulares no contexto da evolução das estruturas metálicas em geral, destacando-se o estudo de obras que mostram o estado da arte da construção tubular no Brasil.

Michillo (2003) apresentou análises de ligações metálicas tubulares de placas de bases para pilares de perfis de seção circular através de modelagem pelo método dos elementos finitos. O estudo foi desenvolvido de forma comparativa entre a modelagem computacional e as expressões analíticas encontradas em normas internacionais.

Santos (2003) apresentou uma análise das ligações em barras tubulares de estruturas metálicas planas, baseada na avaliação do comportamento destas ligações

através da análise das metodologias de cálculo utilizadas por normas e especificações nacionais e internacionais. O dimensionamento das ligações utiliza o Método dos Estados Limites, no qual são verificadas as resistências de cálculo das barras, chapas de ligação e parafusos. As barras envolvidas nestas ligações também sofrem a influência de esforços adicionais provocados por excentricidades. Uma abordagem teórica é apresentada demonstrando o comportamento da distribuição de tensões nas ligações. Como resultado, foi desenvolvido um programa computacional para automatizar o dimensionamento e a verificação das ligações estudadas, visando a racionalização do sistema de cálculo.

Gho *et al.* (2005) desenvolveu um trabalho que consistiu na investigação de concentração de tensão e deformação em ligações com barras tubulares circulares submetidas à combinação de ações. Essa combinação foi composta de força axial e momentos fletores no plano da ligação e fora dele. Este estudo foi realizado por meio de ensaios experimentais seguidos de análises numéricas em elementos finitos.

Carvalho (2005) fez estudos numéricos de ligações entre viga de seção transversal I e colunas de seção transversal circular com chapas simples e anéis externos, ou diafragmas externos. As análises numéricas realizadas via Método dos Elementos Finitos (MEF), consideraram o caso em que a mesa da viga está soldada ao anel e o caso em que não está. Foi comprovado o comportamento rígido da ligação obtido com a ligação das mesas nos anéis.

Lima *et al.* (2005) realizou estudos paramétricos de ligações T com perfis tubulares em aço através de modelo de elementos finitos. Foram comparados os limites de deformação propostos na literatura para avaliar a resistência da ligação e plasticidade de acordo com o Eurocode 3.

Vieira *et al.* (2006) realizou estudos experimentais e numéricos em ligações planas K com elementos circulares do tipo gap, ligação comum em treliças. O trabalho consistiu na comparação de resultados obtidos por formulações analíticas, análise experimental e numérica. A modelagem numérica foi feita via MEF, por meio do software ANSYS.

Mendanha (2006) apresentou um estudo de ligações soldadas dos tipos “K” e “KT” com afastamento, formadas por perfis tubulares de aço estrutural, sem costura, de seção transversal retangular no banzo e circular para as diagonais e montantes. O trabalho envolveu um estudo teórico a partir de prescrições de norma, e a geração, análise e calibração de modelos numéricos em elementos finitos, utilizando o software Ansys 9.0, sendo analisados diversos modelos com elementos de casca, avaliando a influência do raio de dobramento e algumas alternativas de modelagem de solda, para uma boa representação das ligações soldadas já ensaiadas.

Requena & Santos (2007) publicaram no Brasil um trabalho que reúne formulações para o dimensionamento de ligações metálicas planas em barras tubulares circulares. O trabalho teve como objetivo suprir a carência de informações técnicas sobre o dimensionamento desses elementos. A iniciativa deu-se pela crescente utilização de estruturas tubulares no Brasil, além de disseminar ainda mais a prática dessa modalidade da estrutura metálica.

Packer *et al.* (2007) avalia a consistência da hipótese feita quando do cálculo de ligações soldadas, onde o elemento principal é um tubo retangular e o elemento conectado é circular. Tal hipótese é feita considerando que o tubo circular é representado por um retangular, situação na qual existem equações de projeto. Para avaliação desta hipótese, Packer *et al.* (2007) conta com resultados publicados por diversos autores. Verificou ainda que a consideração de um tubo retangular equivalente em substituição ao tubo circular é viável, com nível de segurança adequado, tanto no caso estático como quando sujeito à fadiga.

Freitas, Mendes e Freitas (2008) apresentaram um estudo teórico – experimental de ligações soldadas tipo “T”, formadas por perfis tubulares estruturais de aço, com seções retangulares no banzo e circulares no montante. A análise teórica foi feita de acordo com as prescrições da Eurocode 3 (2005), conforme a configuração da ligação. Pelos ensaios experimentais, analisaram o comportamento da ligação, a carga última e o modo de falha. A análise numérica em elementos finitos envolveu a análise, geração e calibração de modelos numéricos, com a utilização do software ANSYS 11.0, onde

foram desenvolvidos vários modelos com diferentes características, com o objetivo de obter um modelo semelhante ao modelo real.

Mendes (2008) apresentou um estudo em ligações soldadas tipo “K”, “KT” e “T” com afastamento, formadas por perfis tubulares estruturais de aço sem costura, com seção transversal retangular no banzo e circular nos demais membros. Neste estudo, foram desenvolvidas análises teóricas e numéricas dos nós das ligações, ensaios experimentais em protótipos em escala real, e ensaios de tensões residuais no perfil retangular do banzo. As análises teóricas realizadas a partir das prescrições de norma e as análises numéricas em elementos finitos envolveram a geração, análise e calibração, a partir dos resultados obtidos nos ensaios experimentais. Os resultados experimentais indicaram que a relação entre as cargas experimentais e as de projeto, obtida pela Eurocode 3, para ligação tipo “T”, possui boa correlação sendo que o mesmo não foi verificado para as ligações tipo “K” e “KT”. Dos resultados numéricos seguiram as mesmas tendências, com bons resultados para as ligações tipo “T” e o mesmo não ocorrendo para as ligações “K” e “KT”, em comparação com os resultados experimentais.

Freitas (2009) analisou numericamente o comportamento da ligação entre viga de seção transversal I com coluna tubular de seção circular onde foram consideradas configurações usuais de ligações com anéis externos transversais e chapa de alma. A análise numérica foi realizada por meio dos pacotes comerciais TRUEGRID® e ANSYS®, os quais aplicam o Método dos Elementos Finitos. Os estudos comprovaram a eficácia dos anéis externos na distribuição dos esforços oriundos do engastamento parcial da viga, fazendo com que a coluna não seja comprometida.

Mayor (2010) apresentou um estudo de ligações soldadas do tipo “K” e “KT” com afastamento das barras, formadas por perfis tubulares estruturais de aço sem costura, com seção transversal retangular no banzo e circular nos demais membros. Para este estudo foram desenvolvidas análises experimentais, teóricas e numéricas das ligações. Foi realizada também uma análise numérica da influência da altura do perfil do banzo na resistência da ligação. As ligações ensaiadas apresentaram como modo de falha a plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo, junto com as

diagonais ou montantes. Os resultados indicaram que quanto maior a carga no montante menor a resistência da ligação à plastificação da face do banzo. Os resultados obtidos pelos modelos numéricos das ligações tipo “K” apresentam uma boa convergência quando comparados com os resultados experimentais.

ANÁLISE TEÓRICA

2.1 Considerações Iniciais

No projeto de ligações estruturais em aço, assim como na avaliação de seu comportamento, é necessário que se tenha o conhecimento de todos os componentes envolvidos na mesma.

As normatizações mais recentes consideram o comportamento semi-rígido das ligações, o que contribui para o aperfeiçoamento das normas mais tradicionais, onde somente consideravam-se os comportamentos idealizados, como as ligações rígidas e flexíveis.

Quando solicitadas axialmente por ações de compressão, as barras de seções circulares oferecem um melhor desempenho se comparadas a elementos de seção aberta, o que faz com que este elemento seja aplicado cada vez mais na construção de pilares. As formas geométricas mais adequadas em casos de barras sujeitas à flexão são as seções I.

Do ponto de vista arquitetônico, associado às vantagens, encontram-se os aspectos de arrojo e modernidade devido a sua forma arredondada que propiciam diversidades de projetos. Assim, aumenta-se cada vez mais o número de estruturas formadas por colunas tubulares circulares e vigas do tipo I. O que requer um melhor conhecimento da ligação entre os seus elementos e de seus parâmetros como rigidez, resistência e ductilidade.

Para que se possa ter o conhecimento da ligação é necessário que se determinem os parâmetros que caracterizam a relação momento-rotação ($M-\Phi$). O conhecimento

desta relação permite a classificação do comportamento da ligação considerado na fase de análise global da estrutura.

Os parâmetros que caracterizam a relação (M- Φ), dizem respeito às propriedades estruturais da ligação tais como resistência, rigidez e ductilidade. A determinação das propriedades estruturais da ligação pode ser feita através de investigação analítica, experimental ou análise numérica. A seguir tem-se a apresentação das formulações para o dimensionamento das ligações segundo o Eurocode 3 (2005) e o CIDECT (2004).

2.2 Procedimento Segundo o Eurocode 3 (2005)

As formulações de dimensionamento são definidas baseando-se em como a estrutura irá se comportar e quais serão os estados limites últimos que poderão ocorrer. Para que seja feita uma correta análise da ligação é necessário que existam parâmetros que informem anteriormente quais os estados limites últimos que poderão ocorrer.

O comportamento de cada ligação durante o colapso é função da distribuição de tensão na região da ligação, o que é dependente das características geométricas dos elementos ligados.

No caso de ligações envolvendo estruturas tubulares, o Eurocode 3 (2005), normatiza a ação de diversos tipos de ligações soldadas ao elemento tubular e prevê casos que vão desde ligações com chapas em barras tubulares até ligações entre barras tubulares e barras tubulares ligadas a perfis de seção tipo I.

Na análise de uma ligação viga-coluna a escolha dos casos a considerar depende da configuração da mesma. No caso de ligações viga-coluna onde a viga é soldada diretamente à face da coluna, o Eurocode 3 (2005) fornece uma análise direta de sua resistência, sem a necessidade de se decompor o comportamento da ligação em ações localizadas. Em ligações onde há elementos auxiliares esta decomposição torna-se necessária para que se avalie o efeito de cada componente, conhecendo-se o comportamento da ligação.

O Eurocode 3 (2005) prevê os seguintes casos gerais de ligações envolvendo estruturas tubulares:

- Ligações entre perfis tubulares de seção circular;
- Ligações entre perfis tubulares de seção retangular;
- Ligações entre perfis tubulares circulares e chapas;
- Ligações entre perfis tubulares retangulares e chapas;
- Ligações entre perfis tubulares circulares e perfis de seção tipo I ou H;
- Ligações entre perfis tubulares retangulares e perfis I ou H;
- Ligações entre perfis tubulares de seção circular e retangular;

Especificamente, no caso de ligações que transferem momento entre uma coluna tubular circular e uma viga de seção tipo I as tipologias mais comuns são as compostas por anéis ou diafragmas externos que são responsáveis pela transferência de momentos. A ligação com apenas chapa de alma parafusada à viga é utilizada quando se deseja um comportamento similar a uma rótula.

A Figura 2.1 a seguir ilustra a ligação tomada para estudo neste trabalho.

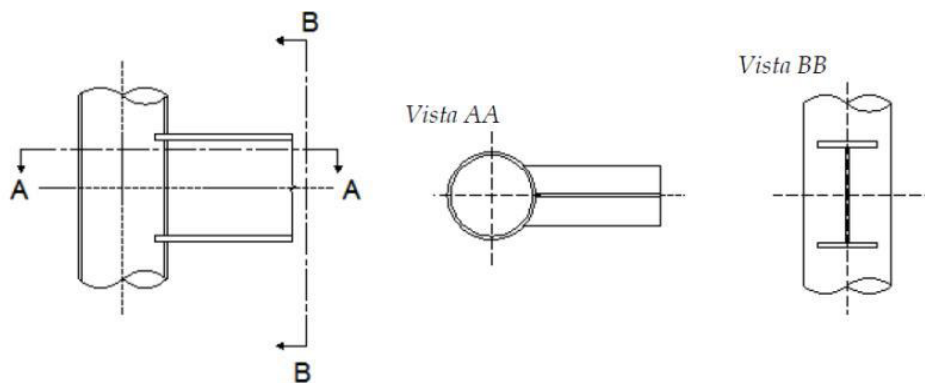


Figura 2.1 - Ligação soldada entre coluna tubular circular e viga de perfil I.

No caso da ligação apresentada na Figura 2.1, o Eurocode 3 (2005) fornece equações para determinação direta da sua resistência sem a necessidade de aplicar métodos como o método das componentes e faz uma compilação de equações de resistência de vários tipos de ações atuantes na ligação.

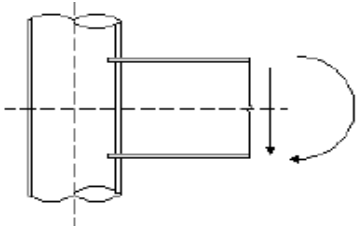
As ligações que envolvem barras de seção tubular circular soldada a vigas tipo I estão resumidas na Tabela 1, onde prevê dois modos de falha: a plastificação da parede da coluna e o cisalhamento da face da coluna.

Tabela 2.1 – Equações de resistência em ligações envolvendo colunas tubulares. (Eurocode 3).

| TIPO DE LIGAÇÃO | EQUAÇÕES |
|---|---|
| | <p>- Plastificação da parede da coluna: $N_{1,Rd} = k_p f_{y0} t_0^2 (4 + 20\beta^2) (1 + 0,25\eta) / \gamma_{M5}$ $M_{ip,1,Rd} = h_i N_{1,Rd} / (1 + 0,25\eta)$ $M_{op,1,Rd} = 0,5 b_1 N_{1,Rd}$</p> <p>- Cisalhamento da face da coluna: $\sigma_{max,t_1} \leq 2 t_0 (f_{y0} / \sqrt{3}) / \gamma_{M5}$</p> |
| | <p>- Plastificação da parede da coluna: $N_{1,Rd} = \left(\frac{5 k_p f_{y0} t_0^2}{1 - 0,81\beta} \right) \frac{(1 - 0,25\eta)}{\gamma_{M5}}$ $M_{ip,1,Rd} = h_i N_{1,Rd} / (1 + 0,25\eta)$ $M_{op,1,Rd} = 0,5 b_1 N_{1,Rd}$</p> <p>- Cisalhamento da face da coluna: $\sigma_{max,t_1} \leq 2 t_0 (f_{y0} / \sqrt{3}) / \gamma_{M5}$</p> |
| <p>Onde:</p> <p>$N_{1,Rd}$ = força normal resistente de cálculo; $M_{ip,1,Rd}$ = momento fletor resistente de cálculo no plano da ligação; $M_{op,1,Rd}$ = momento fletor resistente de cálculo fora do plano da ligação; k_p = coeficiente para consideração do efeito axial da coluna, dado por: $k_p = 1 - 0,3 n_p (1 + n_p) \leq 1,0$, quando a coluna estiver comprimida; $k_p = 1,0$, quando a coluna estiver tracionada, $n_p = \frac{1}{\gamma_{M5}} \left(\frac{\sigma_{p,Ed}}{f_{y0}} \right)$ $\sigma_{p,Ed}$ = tensão axial solicitante na coluna; f_{y0} = tensão de escoamento do aço da coluna $\gamma_{M5} = 1,0$, fator de ponderação da resistência $\beta = b_f / d_c$ $\eta = h_i / d_c$ σ_{max} = máxima tensão solicitante proveniente do elemento conectado, dada por: $\sigma_{max} = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{Ed}}{W}$ N_{Ed} = força normal solicitante proveniente do elemento conectado; M_{Ed} = momento fletor solicitante proveniente do elemento conectado; A = área da seção transversal da coluna; W = módulo elástico; Nota: Em caso da combinação dos esforços normais e momentos fletores solicitantes na ligação: $\frac{N_{i,Ed}}{N_{i,Rd}} + \left(\frac{M_{ip,Ed}}{M_{ip,Rd}} \right)^2 + \frac{M_{op,Ed}}{M_{op,Rd}} \leq 1$ $N_{i,Ed}$ = força normal solicitante proveniente do elemento conectado i, $M_{i,Ed}$ = momento fletor solicitante no plano da ligação, $M_{op,Ed}$ = momento fletor solicitante fora do plano da ligação.</p> | |

A Tabela 2.2 ilustra o procedimento de verificação da resistência da ligação soldada entre coluna tubular circular e viga de seção tipo “I”, estudada neste trabalho.

Tabela 2.2 – Procedimento para verificação da resistência da ligação. (Eurocode 3).

| Tipo de Ligação | Procedimento para Verificação |
|--|---|
| <p style="text-align: center;">Ligação soldada</p>  | <ul style="list-style-type: none"> - Cisalhamento na face da coluna na região tracionada devido à força de tração transversal exercida pela mesa superior da viga; - Plastificação da parede da coluna na região comprimida devido à força de compressão transversal exercida pela mesa inferior da viga; - Compressão da mesa e alma da viga (região comprimida); - Tração da alma da viga (região tracionada); - Soldas. |

2.3 Procedimento Segundo o CIDECT (2004)

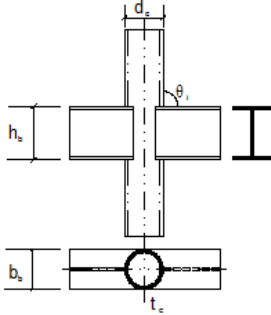
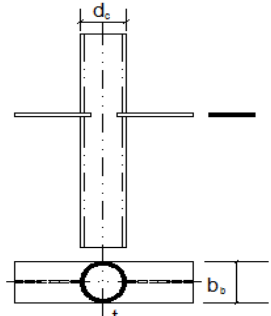
O CIDECT (Comité International pour le Développement et l’Etude de La Construction Tubulaire) que é responsável pela síntese e compilação de grande parte dos estudos em estruturas tubulares desde a década de sessenta, denomina as ligações que são capazes de transmitir momento em estruturas tubulares conforme indicado na Tabela 2.3 a seguir.

Tabela 2.3. Denominação das ligações capazes de transmitir momento com elementos de perfil de seção tubular (CIDECT 2004).

| Coluna | Viga | Nome | Coluna | Viga | Nome | Coluna | Viga | Nome |
|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|
| ○ | ○ | CC | □ | □ | RR | I | ○ | CI |
| | □ | RC | | ○ | CR | | □ | RI |
| | I | IC | | I | IR | | | |

A formulação de resistência de cálculo recomendada pelo CIDECT para a ligação entre viga I e coluna tubular circular, ligação IC, utilizada neste trabalho é mostrada na Tabela 2.4.

Tabela 2. 4. Equações de resistência de cálculo para ligações IC planas (CIDECT2004).

| Resistência de cálculo para ligações XP e TP | | | | | | |
|---|--|----------------|-----------------------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Tipo de ligação | Carregamento axial $N^* = f(\beta) \cdot f(\eta) \cdot f(n') \cdot f_{c,y} \cdot t_c^2$ | | | | Momento no plano $M_{b,ip}$ | Momento fora do plano $M_{b,op}$ |
| | $f(\beta)$ | $f(\eta)$ | $f(n')$ | $f_{c,y} \cdot t_c^2$ | | |
| <p>XP4 / TP4</p>  | $\frac{5.0}{1 - 0,81 \cdot \beta}$ | $1 + 0,25\eta$ | $f(n')$ | $f_{c,y} \cdot t_c^2$ | $h_b \cdot N_{(XP4)}$ | $0,5 \cdot b_b \cdot N_{(XP4)}$ |
| <p>XP-1 / TP-1</p>  | $\frac{5.0}{1 - 0,81 \cdot \beta}$ | 1 | $f(n')$ | $f_{c,y} \cdot t_c^2$ | ----- | $0,5 \cdot b_b \cdot N_{(XP1)}$ |
| Geral | Cisalhamento da face da coluna | | | | | |
| Verificar para: | $f_b \cdot t_{b,f} \leq 1,16 \cdot f_{c,y} \cdot t_c$ | | para XP-1 / TP-1 (geral) | | | |
| $b_b \leq d_c - 2t_c$ | $f_b \cdot t_{b,f} \leq 0,58 f_{c,y} \cdot t_c$ | | para XP-4/ TP-4 (momento n plano) | | | |
| | | | | para outros casos | | |
| Parâmetros e Funções | | | | | Faixa de validade | |
| $\beta = \frac{b_b}{d_c}$ | $f(n') = 1 + 0,3 \cdot n' - 0,3 \cdot n'^2$ para $n' \leq 1,0$ | | | | $\theta_i = 90^\circ$ | |
| $\eta = \frac{h_b}{d_c}$ | $f(n') = 1,0$ para $n' > 1,0$ | | | | $\frac{d_c}{t_c} \leq 40$ | |
| $\gamma = \frac{d_c}{2t_c}$ | $n' = \frac{f_{c,p}}{f_{c,y}}$ | | | | vigas: classe 2 | |

De acordo com o CIDECT, as equações para a capacidade resistente ao momento na ligação da coluna com viga tipo I são baseadas no critério da resistência da ligação com chapas. As ligações com uma chapa conectada em cada face da coluna (indicadas como TP) comportam-se de maneira diferente daquelas com placas de ambos os lados da coluna (indicadas como XP).

Segundo apud Ariyoshi e Makino (2000) foram dadas indicações para a rigidez axial da mesa da viga (ligações TP e XP) e são dadas de forma simplificada pelas Equações 2.1 e 2.2:

Para XP – 1 ligações com duas chapas:

$$K_{XP-1} = 6,8Et_c\beta(2\gamma)^{-1,3} \quad (2.1)$$

Para TP – 1 ligações com uma chapa:

$$K_{TP-1} = 1,9Et_c\beta^{1,3}(2\gamma)^{-0,7} \quad (2.2)$$

onde,

E = módulo de elasticidade do aço;

t_c = espessura da coluna tubular circular;

β = relação entre a largura da mesa da viga ligada à coluna pelo diâmetro da coluna tubular circular;

γ = relação entre o diâmetro do tubo pelo dobro da sua espessura.

Para o comportamento momento-rotação as seguintes equações se aplicam:

$$M_{b,ip} = N_p(h_b - t_{b,f}) = C_{b,ip}\phi = C_{b,ip} \frac{2\delta}{(h_b - t_{b,f})} = C_{b,ip} \frac{2N}{K(h_b - t_{b,f})} \quad (2.3)$$

ou

$$C_{b,ip} = 0,5K(h_b - t_{b,f})^2 \quad (2.4)$$

onde,

$M_{b,ip}$ = momento fletor no plano da ligação;

N_p = carregamento axial de uma chapa;

N = carregamento axial;

h_b = altura da viga;

$t_{b,f}$ = espessura da mesa da viga;

$C_{b,ip}$ = rigidez da ligação;

ϕ = rotação da ligação;

δ = deslocamento da viga;

K = rigidez axial da mesa da viga.

Assim multiplicando a rigidez axial K da mesa da viga da ligação por $0,5K(h_b - t_b)^2$ tem-se uma aproximação da rigidez dada pela equação 2.4, para as ligações capazes de transmitir momento IC. Entretanto o efeito na alma da viga conectada é desprezado.

MODELAGEM COMPUTACIONAL

3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo serão apresentadas as etapas de desenvolvimento dos modelos numéricos em elementos finitos analisados com a utilização do *software* comercial ANSYS (versão 11.0).

De acordo com o objetivo deste trabalho, os modelos numéricos foram desenvolvidos buscando-se a representação mais realista possível das ligações soldadas entre coluna tubular circular e viga de perfil tipo I.

Os modelos utilizados em uma fase inicial não levaram em consideração o cordão de solda e tinham como objetivo a identificação aproximada do nível de rigidez da ligação e, conseqüentemente, sua classificação em rígida, semi-rígida ou flexível. A obtenção da classificação orientou a escolha dos protótipos a serem ensaiados.

Após a realização dos ensaios, o modelo foi aprimorado e o cordão de solda foi considerado sendo que os resultados obtidos foram comparados com os experimentais e teóricos.

Nos itens seguintes tem-se a metodologia de preparação dos modelos numéricos com a consideração da solda, os elementos finitos utilizados para a análise comparativa com os resultados experimental e teórico, que será apresentada no capítulo 6.

Ao final do presente capítulo são apresentados os resultados obtidos para a chamada fase inicial que possibilitou a escolha dos protótipos de ensaio.

3.2 Preparação dos Modelos Numéricos

A montagem dos modelos numéricos foi realizada respeitando-se as seguintes etapas:

- Montagem da geometria do modelo;
- Definição dos tipos de elementos finitos a serem utilizados;
- Definição das características dos materiais envolvidos;
- Construção da malha de elementos finitos;
- Aplicação das condições de contorno do modelo;
- Aplicação do carregamento na viga.

Os modelos numéricos foram definidos a partir de dados coletados de ligação utilizada em edificações de múltiplos andares, onde dados como o perfil da viga e da coluna foram estudados observando parâmetros que pudessem defini-los.

Foram adotados perfis laminados de aço ASTM A 572 padronizados I para as vigas produzidas pela Gerdau Açominas, e perfis tubulares de aço VMB 350 com seção circular produzidos pela VALLOUREC & MANNESMANN do Brasil para as colunas.

Para as simulações numéricas foram adotadas duas seções transversais para as vigas após um detalhado estudo de esbeltez.

3.3 Elementos Finitos Utilizados

Os tipos de elementos finitos utilizados na execução dos modelos foram determinados a partir das necessidades geométricas e das considerações feitas na representação da ligação.

Assim, levando em consideração alguns trabalhos anteriores para a caracterização do modelo, foram escolhidos dois tipos de elementos (Mendanha 2006, Mendes 2008 e Mayor 2010). O primeiro elemento foi o elemento de casca “*Shell 281*” devido à capacidade de adaptação aos contornos dos perfis, o tempo computacional e o refinamento da malha utilizada. O segundo elemento utilizado foi o elemento do tipo sólido “*SOLID 45*”, utilizado somente para facilitar a aplicação de carga na viga.

Para a geração da malha em elementos finitos foi utilizado o elemento de casca “Shell 281” (Ansys 2007), o qual apresenta oito nós por elemento com seis graus de liberdade em cada nó, translação nas direções X, Y e Z e rotações em X, Y e Z (Figura 3.1). Este elemento foi utilizado na modelagem da coluna, da viga e da solda de ligação entre os mesmos.

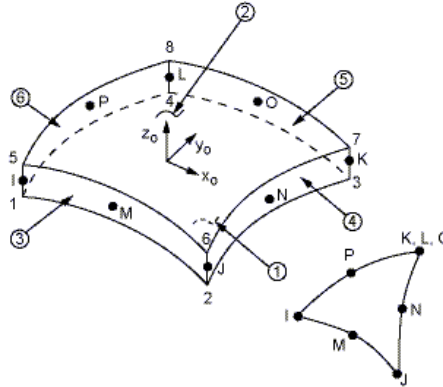


Figura 3.1 - Elemento “Shell 281”. Fonte: Ansys.

A modelagem do cordão de solda foi baseada em trabalhos anteriores onde o modelo com utilização de elementos de casca apresentou-se semelhante ao modelo com elemento sólido, (Mendanha 2006).

Utilizou-se o elemento sólido “SOLID 45” (Figura 3.2) na forma de uma chapa de aço quadrada somente para facilitar a aplicação de carga na viga. O “SOLID 45” é definido por oito nós, cada qual com três graus de liberdade (translações nas direções X, Y e Z)

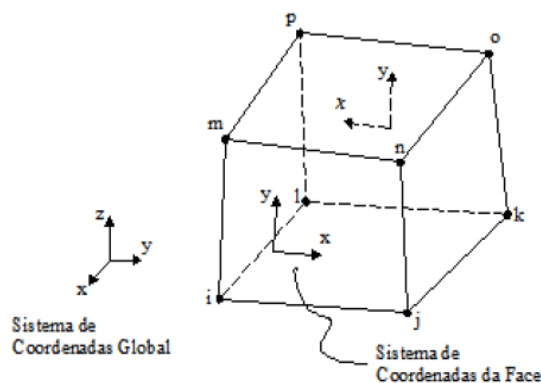


Figura 3.2 - Elemento “SOLID 45”. Fonte: Ansys.

Na Figura 3.3, encontra-se representado um modelo numérico da ligação onde se pode observar o cordão de solda e a malha de elementos finitos gerada com o elemento de casca “*Shell 281*” e o elemento “*SOLID 45*”.

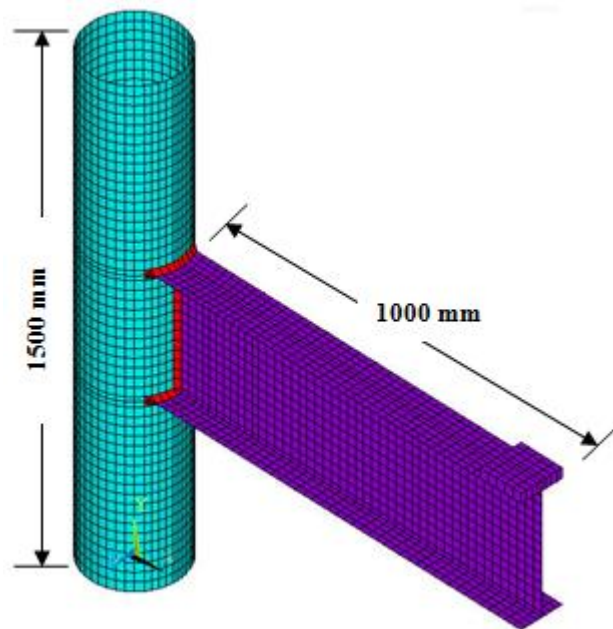


Figura 3.3-Malha em elementos finitos do modelo e dimensões dos elementos.

A Figura 3.4 a seguir ilustra o modelo com a chapa de aço utilizada onde se pode notar que os nós da chapa foram acoplados aos nós da mesa da viga, onde se mantém o contato.

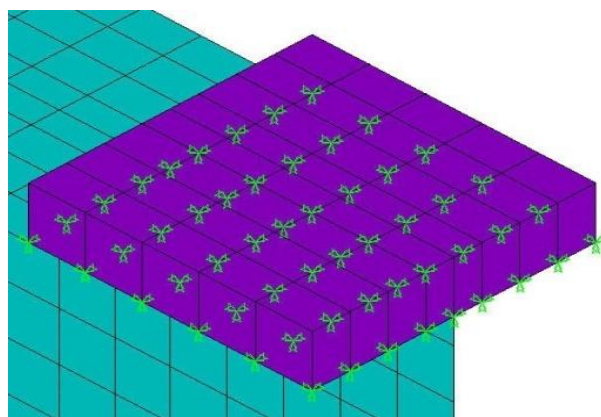


Figura 3.4 - Acoplamento dos nós da chapa com a mesa da viga.

3.4 Parâmetros de Entrada

Em uma primeira análise, as propriedades mecânicas dos aços utilizados foram os dados nominais da tabela dos fabricantes.

Na análise dos modelos foi utilizado material com relação tensão x deformação não linear, inelástica, com diagrama bi-linear. Este diagrama foi elaborado a partir dos dados de análise do aço em laboratório. Na fase elástica foram usados:

- Módulo de elasticidade do aço, $E_{aço} = 205000$ MPa;
- Coeficiente de Poisson, $\nu = 0,3$;
- Limite de escoamento do aço para as vigas, $f_y = 345$ MPa;
- Limite de escoamento do aço para as colunas, $f_y = 345$ MPa;
- Módulo tangente do aço para os modelos de 507 MPa.

A aplicação das condições de contorno e do carregamento são as últimas etapas da construção do modelo numérico. As condições de contorno impostas ao modelo são de forma a restringir os deslocamentos, garantindo desta forma que não haja uma matriz de rigidez não singular.

Restrições de deslocamento nulo foram aplicadas nas duas extremidades da coluna. Todos os nós pertencentes à seção das extremidades superior e inferior da coluna foram impedidos de transladar e rotacionar em qualquer uma das três direções ortogonais. A Figura 3.5 a seguir mostra as condições de contorno impostas ao modelo.

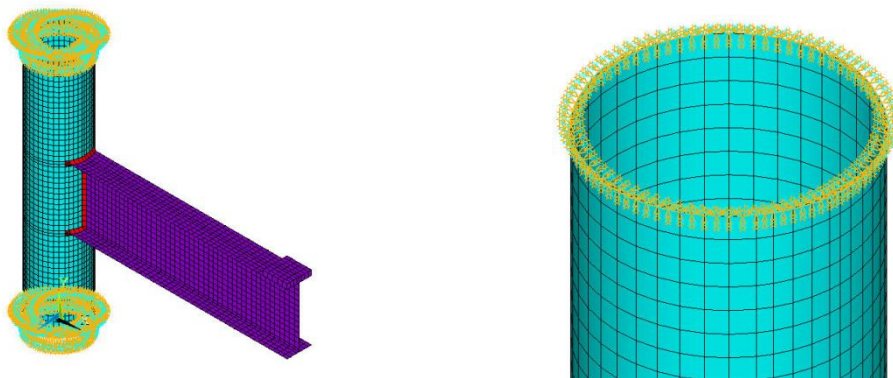


Figura 3.5 - Condições de contorno do modelo.

Para fazer a simulação do comportamento real da ligação foi aplicado um carregamento na viga gerando flexão na mesma, tendo como resultado a rotação da ligação. A solicitação foi feita através de aplicação de força vertical na chapa localizada na extremidade da viga na direção vertical.

A aplicação do carregamento no modelo numérico foi gradual através de passos de carga, sendo o incremento de carga controlado a cada passo de forma automática pelo programa, em função do critério de convergência pelo processo iterativo de Newton-Raphson, onde a matriz de rigidez é atualizada a cada iteração.

Foi adotado o critério de plastificação de von Mises para avaliar a hipótese elástica (previsão).

A Figura 3.6 a seguir ilustra o carregamento aplicado ao modelo.

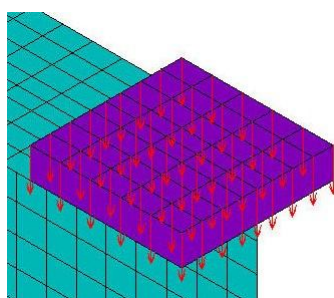


Figura 3.6.- Aplicação do carregamento vertical na viga.

3.5 Modelos Numéricos Iniciais Para a Definição dos Protótipos de Ensaio

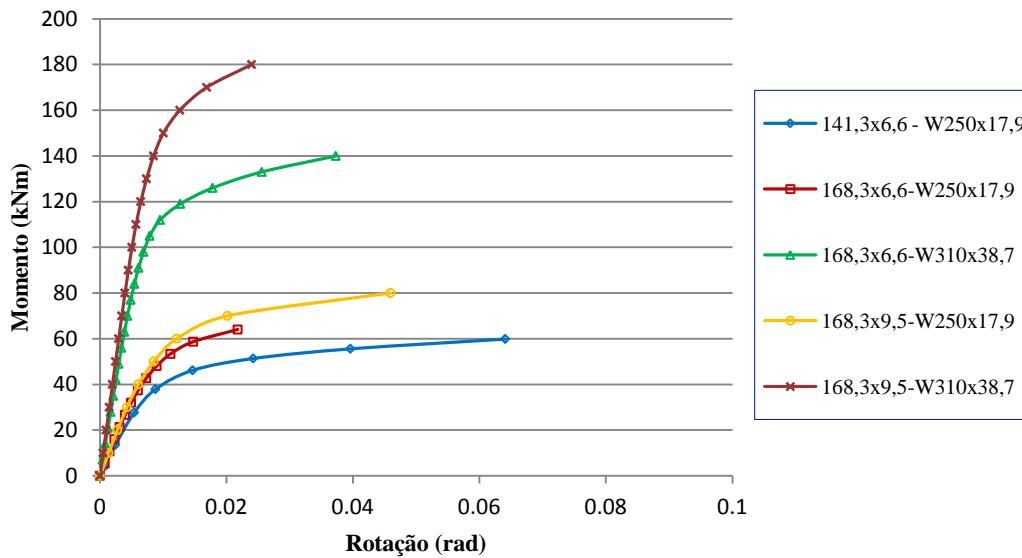
Foram feitas várias modelagens da ligação estudada neste trabalho com o objetivo de definir quais seriam os modelos a serem ensaiados, a verificação da capacidade de rotação da ligação e sua semi-rigidez. Destaca-se que nas modelagens apresentadas nesse item não foi considerado o cordão de solda.

A Tabela 3.1 a seguir apresenta as dimensões nominais dos perfis utilizados na análise numérica para a orientação quanto a escolha dos protótipos de ensaio e quanto a semi-rigidez.

Tabela 3.1 - Dimensões nominais dos perfis utilizados nas modelagens numéricas.

| Coluna | | Viga | | | | |
|---------------------|---------------------|-----------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|
| d _c (mm) | t _c (mm) | Perfil | h (mm) | b _f (mm) | t _f (mm) | t _w (mm) |
| 141,3 | 6,6 | W250x17,9 | 251 | 101 | 5,3 | 4,8 |
| 168,3 | 6,6 | W250x17,9 | 251 | 101 | 5,3 | 4,8 |
| | | W310x38,7 | 310 | 165 | 9,7 | 5,8 |
| 168,3 | 9,5 | W250x17,9 | 251 | 101 | 5,3 | 4,8 |
| | | W310x38,7 | 310 | 165 | 9,7 | 5,8 |
| 219,1 | 8,2 | W250x17,9 | 251 | 101 | 5,3 | 4,8 |
| | | W310x38,7 | 310 | 165 | 9,7 | 5,8 |
| 219,1 | 9,5 | W250x17,9 | 251 | 101 | 5,3 | 4,8 |
| | | W310x38,7 | 310 | 165 | 9,7 | 5,8 |
| 219,1 | 15,1 | W250x17,9 | 251 | 101 | 5,3 | 4,8 |
| | | W310x38,7 | 310 | 165 | 9,7 | 5,8 |

A Figura 3.7 mostra as curvas Momento-Rotação das ligações, feitas a partir de uma análise numérica preliminar dos modelos obedecendo-se o mesmo carregamento para cada tipo de viga.



(a)

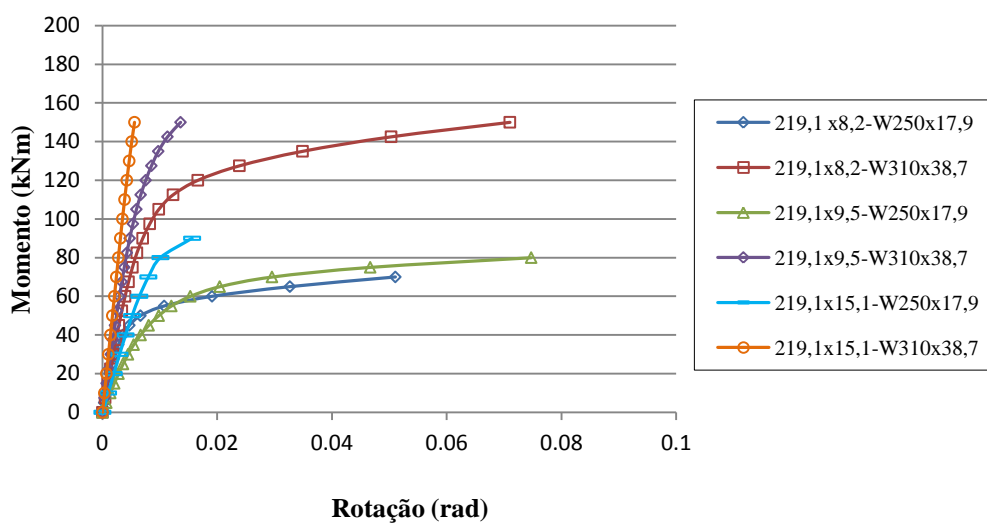


Figura 3.7 - Curva Momento-Rotação das análises numéricas preliminares.

A partir das curvas momento-rotação das análises dos modelos preliminares, juntamente com os resultados teóricos obtidos pelas equações de resistência de cálculo para ligações tipo IC da Tabela 2.4 e pelas Equações 2.2 e 2.4, os protótipos para ensaio foram definidos. A Tabela 3.2, a seguir mostra os resultados teóricos e numéricos das análises dos modelos preliminares.

Tabela 3.2 - Resultados teóricos e numéricos das análises numéricas preliminares.

| Coluna | Viga | Momento Teórico Resistente da Ligação (kN.m) | Rigidez Teórica da Ligação (kN.m/rad) | Rigidez Inicial Numérica da Ligação (kN.m/rad) | Classificação da Ligação |
|------------|-----------|--|---------------------------------------|--|--------------------------|
| 141,3x6,6 | W250x17,9 | 53,63 | 3703,31 | 5120,71 | Rígida |
| 168,3x6,6 | W250x17,9 | 42,26 | 2610,40 | 6839,48 | Semi-Rígida |
| | W310x38,7 | 108,19 | 7381,05 | 11778,22 | Semi-Rígida |
| 168,3x9,5 | W250x17,9 | 87,55 | 4848,55 | 7262,41 | Rígida |
| | W310x38,7 | 224,16 | 13709,56 | 20329,89 | Semi-Rígida |
| 219,1x8,2 | W250x17,9 | 48,04 | 2227,66 | 3141,47 | Semi-Rígida |
| | W310x38,7 | 110,33 | 6298,84 | 11833,70 | Semi-Rígida |
| 219,1x9,5 | W250x17,9 | 64,47 | 2860,85 | 4579,93 | Semi-Rígida |
| | W310x38,7 | 148,09 | 8089,23 | 13878,00 | Semi-Rígida |
| 219,1x15,1 | W250x17,9 | 162,89 | 6289,64 | 13283,47 | Rígida |
| | W310x38,7 | 374,14 | 17784,34 | 28301,39 | Semi-Rígida |

Como um dos objetivos deste trabalho é o estudo da semi-rigidez das ligações, a partir dos resultados teóricos e numéricos apresentados na Tabela 3.2 foram escolhidos os modelos dos protótipos a serem ensaiados. Então, definiu-se que seriam ensaiados os tubos para as colunas de 219,1mm de diâmetro com espessuras de 8,2 mm e 9,5 mm, juntamente com as vigas de seção transversal tipo I W 250 x 17,9 e W 310 x 38,7.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado o programa experimental realizado no Laboratório de Estruturas “Prof. Altamiro Tibiriçá Dias” do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Os protótipos ensaiados foram definidos após estudos de esbeltez e de parâmetros que definem sua rigidez, como visto no capítulo 3.

Os ensaios realizados são de ligações soldadas entre colunas de perfis tubulares circular sem costura, laminados a quente, fabricados pela Vallourec & Mannesmann Tubes do Brasil e vigas laminadas a quente de aço com seção transversal tipo I de abas paralelas fabricadas pela Gerdau Açominas. Foram realizados um total de cinco ensaios. Os protótipos ensaiados e as suas nomenclaturas são os denominados na Tabela 4.1 a seguir.

Tabela 4.1-Definição e nomenclatura dos protótipos ensaiados.

| Protótipo | Quantidade de Ensaios | Nomenclatura dos Ensaios | Coluna | Viga |
|-----------|-----------------------|--------------------------|-------------|--------------|
| P1 | 1 | N1 | 219,1 x 8,2 | W 310 x 38,7 |
| P2 | 2 | N2-1 | 219,1 x 9,5 | W 310 x 38,7 |
| | | N2-2 | 219,1 x 9,5 | W 310 x 38,7 |
| P3 | 2 | N3-1 | 219,1 x 8,2 | W 2150 17,9 |
| | | N3-2 | 219,1 x 8,2 | W 2150 17,9 |

Foi avaliada a resistência última das ligações e durante os ensaios foram observados os mecanismos de colapso, os deslocamentos e deformações, sendo os níveis de carregamento baseados nas modelagens numéricas. As condições de contorno

e as aplicações dos carregamentos foram feitas de maneira a simular uma ligação soldada tipo IC.

A Figura 4.1 apresenta uma vista geral da montagem utilizada no programa experimental. Nos itens seguintes os procedimentos de ensaio e montagem serão abordados.

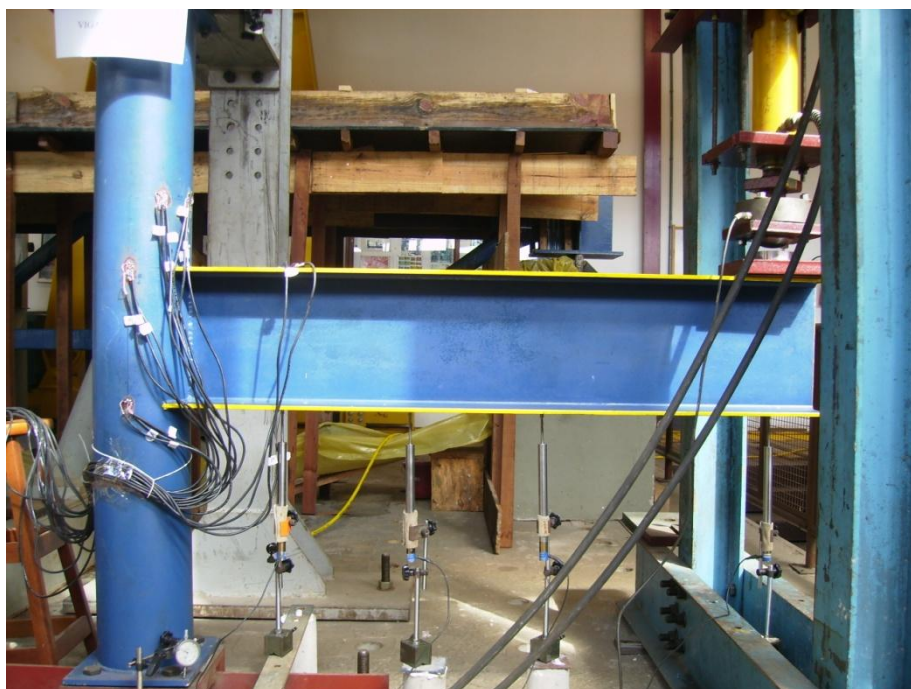


Figura 4.1 - Esquema geral da ligação.

4.2 Características dos Materiais e Dimensões dos Protótipos

As dimensões nominais dos perfis utilizados na composição dos protótipos ensaiados estão apresentadas na Tabela 4.2 e seguem a nomenclatura apresentada na Figura 4.2.

Tabela 4.2 - Dimensões nominais dos perfis utilizados na composição dos protótipos.

| Nomenclatura | Coluna | Viga | | | | |
|--------------|-------------|-----------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Perfil | Perfil | h (mm) | b _f (mm) | t _f (mm) | t _w (mm) |
| P1 | 219,1 x 8,2 | W310x38,7 | 310 | 165 | 9,7 | 5,8 |
| P2 | 219,1 x 9,5 | W310x38,7 | 310 | 165 | 9,7 | 5,8 |
| P3 | 219,1 x 8,2 | W250x17,9 | 251 | 101 | 5,3 | 4,8 |

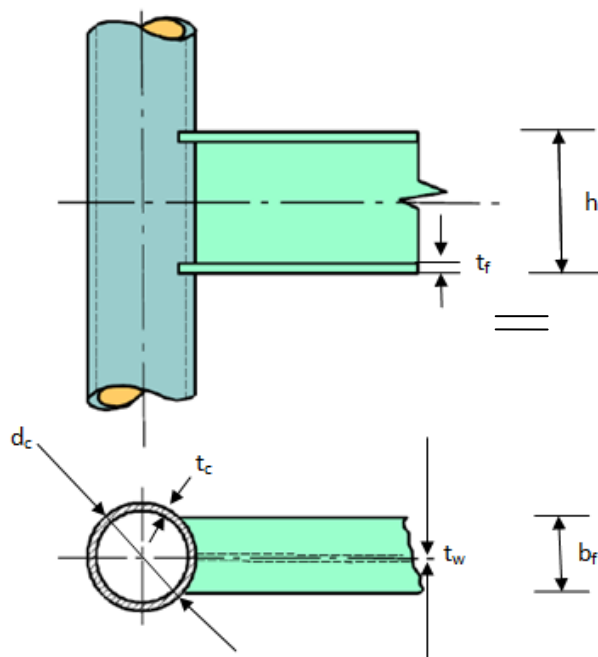


Figura 4.2-Nomenclatura utilizada para as dimensões dos protótipos ensaiados.

Os protótipos foram fabricados com placas soldadas na extremidade para fixação no pórtico de reação do ensaio. A viga foi soldada na coluna através de solda de entalhe.

Para identificar as características do material, os resultados da caracterização do aço para as colunas utilizadas nos ensaios foram disponibilizados pelo fabricante (V & M do Brasil). Na Tabela 4.3 são apresentadas as propriedades mecânicas dos perfis das colunas utilizados nos protótipos ensaiados.

Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas do aço dos perfis das colunas dos protótipos.

| Perfis | Limite de Escoamento f_y (MPa) | Limite de Ruptura f_u (MPa) | Alongamento (%) |
|-------------|----------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| 219,1 x 8,2 | 385 | 582 | 33 |
| 219,1 x 9,5 | 374 | 571 | 34 |

O aço dos perfis das colunas é o aço VMB 350.

4.3 Esquema de Montagem dos Ensaios

Inicialmente foram instalados, paralelamente, dois pórticos de reação, PR1 e PR2, com uma distância entre seus eixos de 1,0 m. Em seguida, foram instalados dois acessórios de montagem dos testes placa de base e placa de fixação da coluna no pórtico de reação PR1, Figura 4.3. O primeiro foi instalado na laje de reação, enquanto o segundo foi parafusado no pórtico de reação PR1. Estes acessórios têm como objetivo, tornar a coluna rigidamente ligada em suas extremidades. A conexão entre a coluna e os acessórios foi feita através de chapas soldadas nas extremidades da coluna e parafusadas nesses acessórios. Na Figura 4.4 tem-se uma vista do pórtico PR1 e dos acessórios de montagem.

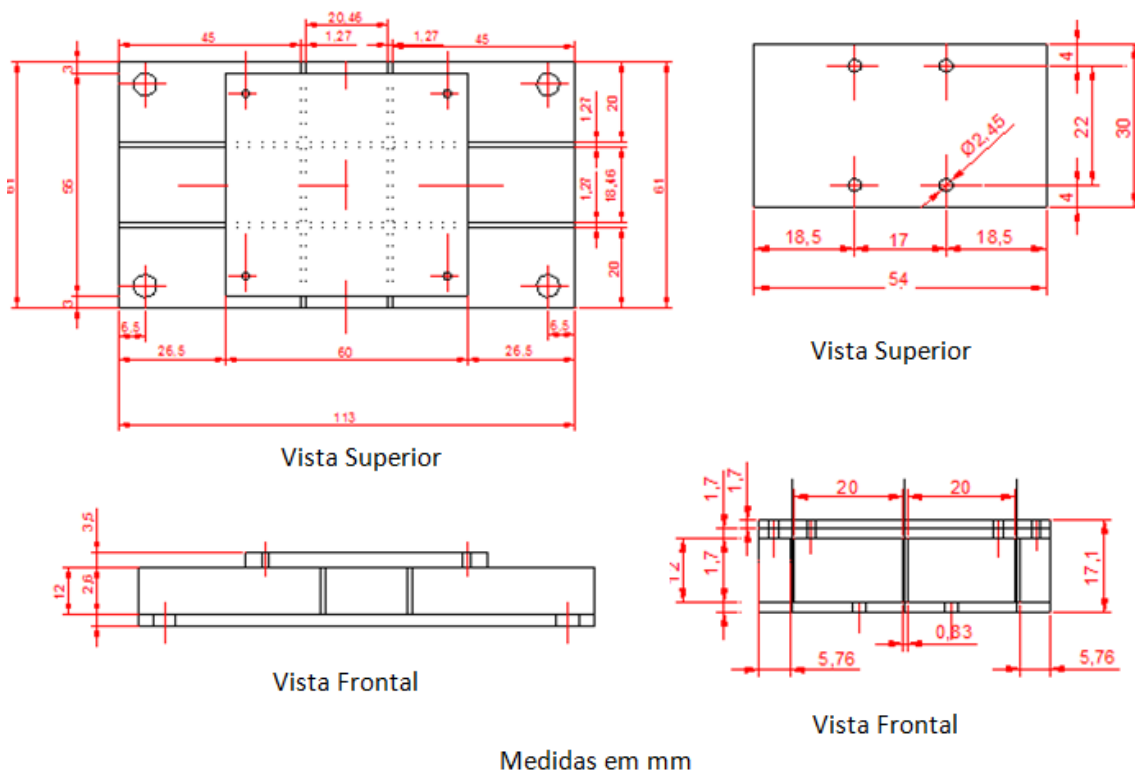


Figura 4.3 – Placa de base e placa de fixação do pilar no pórtico de reação.

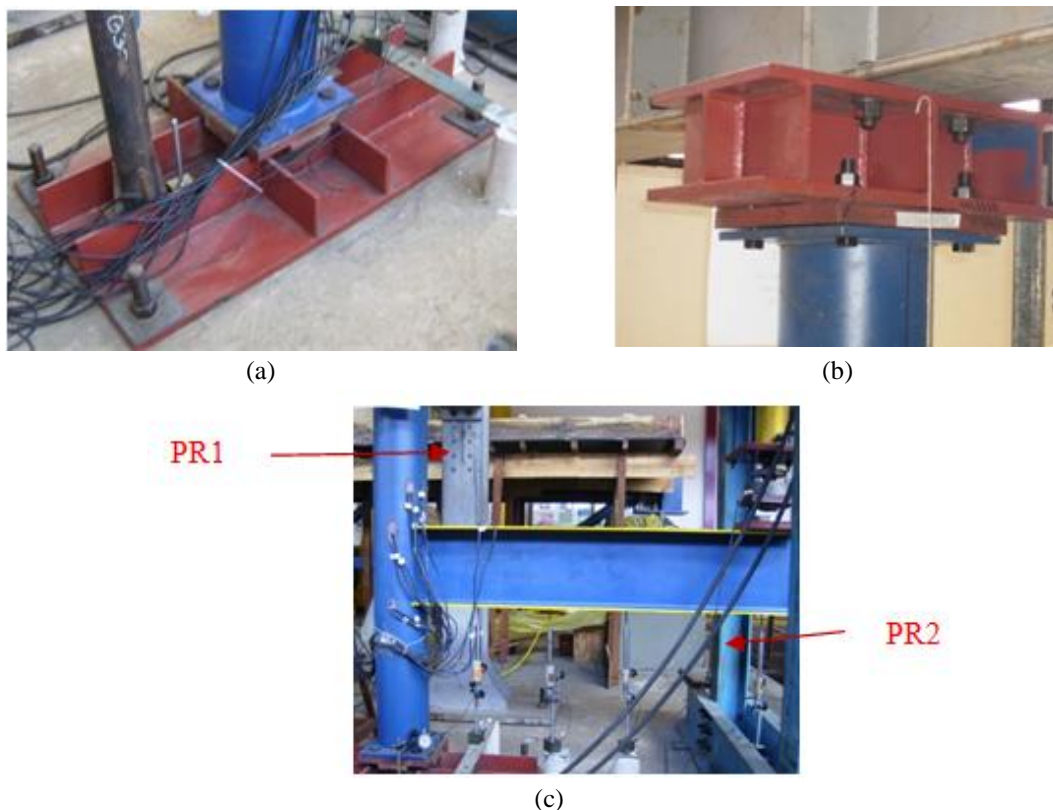


Figura 4.4 - Peças de fixação inferior (a), superior (b) e pórticos de reação (c).

No pórtico de reação PR2 foi instalado o sistema de aplicação de carga, que será descrito no item a seguir.

4.4 Sistema de Aplicação do Carregamento

O sistema de aplicação de carga foi instalado no pórtico de reação PR2, composto por um atuador hidráulico, uma célula de carga, uma rótula de carga e acessórios. Dentre esses acessórios utilizou-se, uma placa chamada Placa de Carga, que foi instalada entre a viga e o sistema de aplicação de carga, para distribuir o carregamento em uma área maior da mesa da viga diminuindo o nível de concentração de tensões.

O carregamento foi aplicado através do atuador hidráulico de 300 kN fabricado pela ENERPAC, e foi registrado pela célula de carga LT 50130-06-0128 de 300 kN fabricada pela GUNT HAMBURG. A Figura 4.5 mostra o sistema de aplicação de

carga, onde na sua extremidade foi instalada uma rótula de carga que proporciona a verticalização de carregamento.

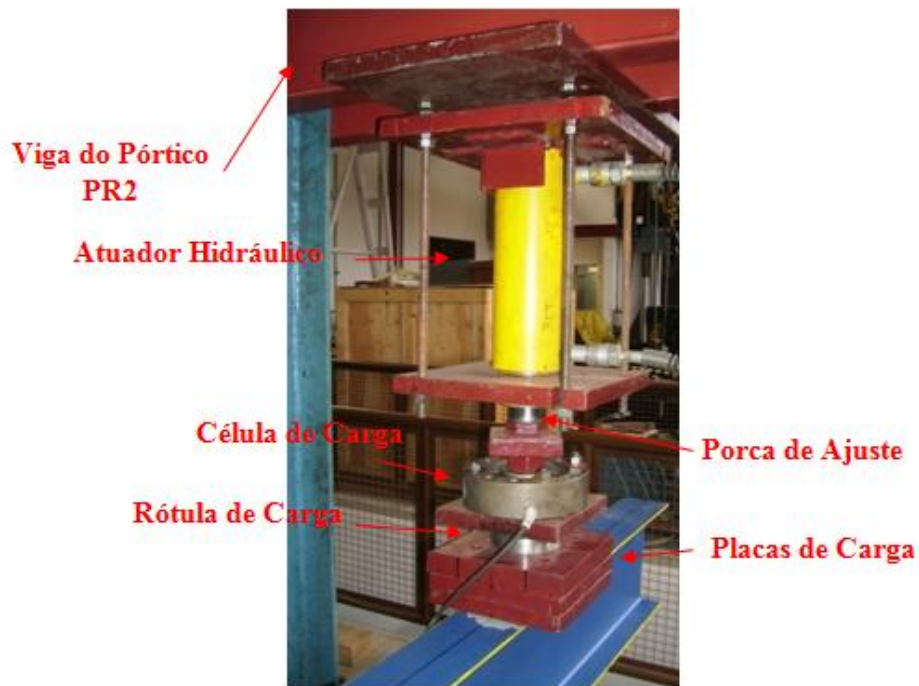


Figura 4.5 - Sistema de aplicação de cargas.

4.5-Instrumentação e Sistema de Aquisição de Dados

A instrumentação usada no ensaio experimental visou o monitoramento de deformações e deslocamentos assim como o controle dos carregamentos aplicados. A leitura de deslocamentos ocorridos na viga durante o ensaio foi feita a partir de LVDT's (Linear Variable Displacement Transducers), Figura 4.6, em que as leituras dos deslocamentos são medidas e armazenadas por meio de um sistema de aquisição de dados. Utilizou-se os defletores de haste (Figura 4.7), que foram posicionados na coluna para a monitoração de seu deslocamento.



Figura 4.6-LVDT.



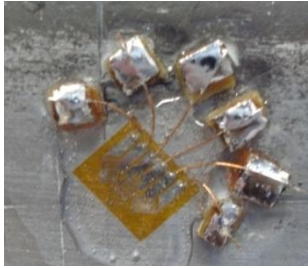
Figura 4.7-Deflectômetro de haste com mostrador analógico.

Os LVDT's foram posicionados abaixo da viga no total de três em cada ensaio (L1, L2 e L3), sendo o L3 a 29 cm da face da coluna, o L2 e o L1 a uma distância de 29 cm entre eles, sendo que o L1 ficou posicionado abaixo do sistema de aplicação de carga, Figura 4.8.

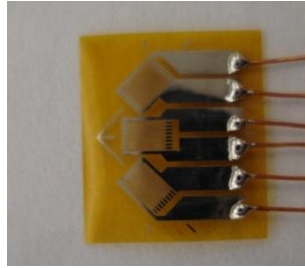


Figura 4.8 - Posicionamento dos LVDT's.

No caso das leituras das deformações para a instrumentação, foram utilizados os extensômetros elétricos de resistência unidirecionais e também do tipo roseta 45° para o aço, das marcas KYOWA e EXCEL SENSORES, Figura 4.9.



(a) Extensômetro.



(b) Roseta.



(c) Roseta colada no protótipo.

Figura 4.9 - Extensômetro e roseta.

Nas ligações foram coladas quatro rosetas e quatro extensômetros na viga, dois no flange superior e dois no flange inferior a uma distância de 20cm do tubo.

Para a aquisição dos dados obtidos a partir dos LVDT's, dos extensômetros e das rosetas foi utilizado um sistema automático controlado por computador dotado de um sistema de controle e monitoramento de aquisição. Esse sistema é constituído de 3 módulos de 8 canais "Spider8" (Figura 4.10) fabricado pela HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik, 2003) com aquisição de dados efetuada pelo programa "Catman 4.5 e armazenada no computador.



Figura 4.10-Sistema automático de aquisição de dados "Spider 8".

A Figura 4.11 a seguir, apresenta a vista geral do sistema automático de aquisição de dados.



Figura 4.11-Sistema de aquisição de dados.

4.6 Metodologia do Ensaio

Inicialmente, com a finalidade de ajustar as possíveis folgas existentes, verificar o sistema de aplicação de carga e o sistema de aquisição de dados, foi realizado um pré-ensaio a partir de aplicação de passos de carga para melhor ajuste dos parafusos de ligação em estudo e dos perfis que fazem parte do protótipo. Este teste foi realizado dentro da fase elástica do material.

A aplicação do carregamento na viga foi feita manualmente por meio de atuadores hidráulicos, sendo esta aplicação dividida em vários passos de carga, de acordo com o nível de carregamento aplicado a cada ligação. Ao final de cada passo de carga foi realizada a leitura manual de todos os deflectômetros, aquisição dos dados dos LVDT's e célula de carga pelo software "Catman 4.5".

Para se ter um controle da movimentação da coluna, foram posicionados dois deflectômetros de haste com mostrador analógico na coluna, um a uma distância de 29 cm da base inferior da coluna e outro a 29 cm do topo da coluna, como na Figura 4.12. Para ter um controle visual desta movimentação, foi colocado um cordão preso ao pórtico de reação até o aparelho de apoio inferior preso à laje de reação.

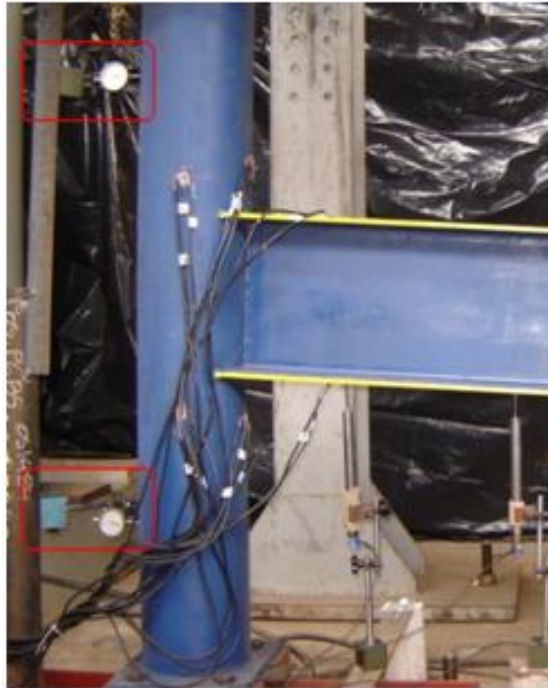


Figura 4.12 - Deflectômetros posicionados na coluna.

O término dos ensaios foi estabelecido de acordo com o modo de falha obtido através das modelagens numéricas que foi o critério de plastificação de von Mises.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, será apresentado inicialmente o método para a determinação da rigidez de uma ligação com a utilização de ensaios experimentais, assim como os resultados dos ensaios realizados com as resistências obtidas experimentalmente.

O nível de carregamento aplicado foi previamente estabelecido pela modelagem numérica. Sendo esta carga dividida em passos de carga durante o ensaio, e ao se aproximar da carga de plastificação obtida numericamente através do software ANSYS, estes passos de carga foram diminuindo para melhor visualização do modo de falha e comparação dos resultados.

A apresentação foi organizada a partir dos protótipos testados neste trabalho. Para cada etapa de carga de cada ensaio de protótipo foram medidas as deformações e os deslocamentos, e a partir destes resultados foi possível determinar a curva momento-rotação e logo, a rigidez da ligação do protótipo em questão.

5.2 Determinação da Rigidez de uma Ligação com a Utilização de Ensaio Experimentais

A determinação da rigidez se baseia na obtenção da curva momento-rotação característica da ligação em estudo, através de ensaios experimentais, como mostrada na Figura 5.1, e na utilização de um estudo de determinação dessa rigidez.

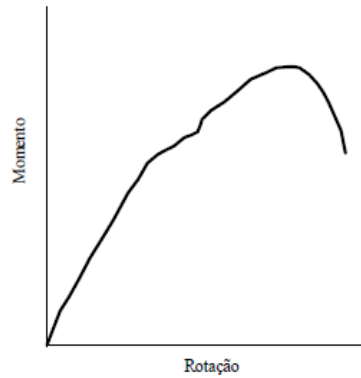


Figura 5.1 - Exemplo de curva momento-rotação obtida de ensaio experimental

Existem vários métodos para determinação da rigidez experimental. Um destes métodos, denominado Método da Inclinação Inicial, que é utilizado no presente trabalho, consiste em traçar uma reta passando pela origem e interceptando a curva no seu trecho inicial. A inclinação dessa reta tangente é a rigidez da ligação. A Figura 5.2 ilustra esse método, que é utilizado para determinar a rigidez de uma ligação na sua fase elástica, linear. Entretanto, esse método pode levar à determinação de valores de rigidez superestimados para o caso em que a ligação em estudo trabalhe na parte não-linear de sua curva momento-rotação.

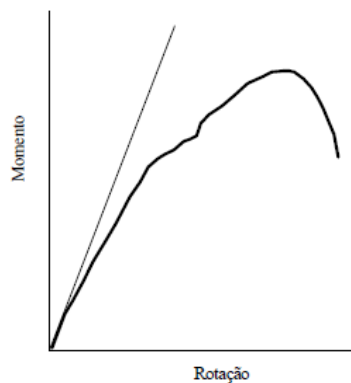


Figura 5.2 - Método da Inclinação Inicial.

Dessa forma, como será visto posteriormente, em curvas momento-rotação de um mesmo protótipo, as partes destes referentes à fase linear foram similares. Por esta razão esse método é utilizado no presente trabalho.

Outra razão pela qual foi definido este método para a determinação das rigidezes das ligações é que, de acordo com Radziminski (1988), em certos estágios não há necessidade de uma completa definição da curva momento-rotação, sendo suficiente uma estimativa da rigidez inicial da ligação.

5.3 Apresentação dos Resultados dos Ensaios Experimentais

5.3.1 Ensaio do Protótipo P1 (coluna 219,1 x 8,2 e viga W 310 x 38,7)

Os resultados do protótipo P1 serão desprezados devido à flambagem lateral por torção na viga, influenciado pela deformação geométrica da mesa da viga. Deformação esta, de 8 mm de inclinação, Figura 5.3. Este mecanismo de flambagem foi induzido por imperfeições no protótipo tanto na viga quanto na fabricação do mesmo. Em ambos havia uma rotação inicial da viga em relação ao eixo da coluna o que precipitou a flambagem lateral da mesma.

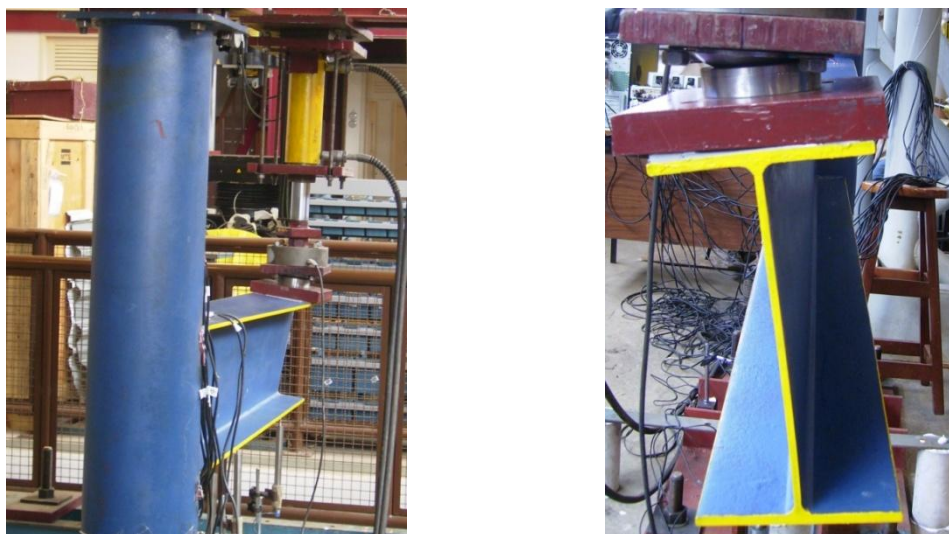


Figura 5.3-Vista do protótipo P1, flambagem lateral por torção da viga.

5.3.2-Ensaio do Protótipo P2 (coluna 219,1 x 9,5 e viga W 310 x 38,7)

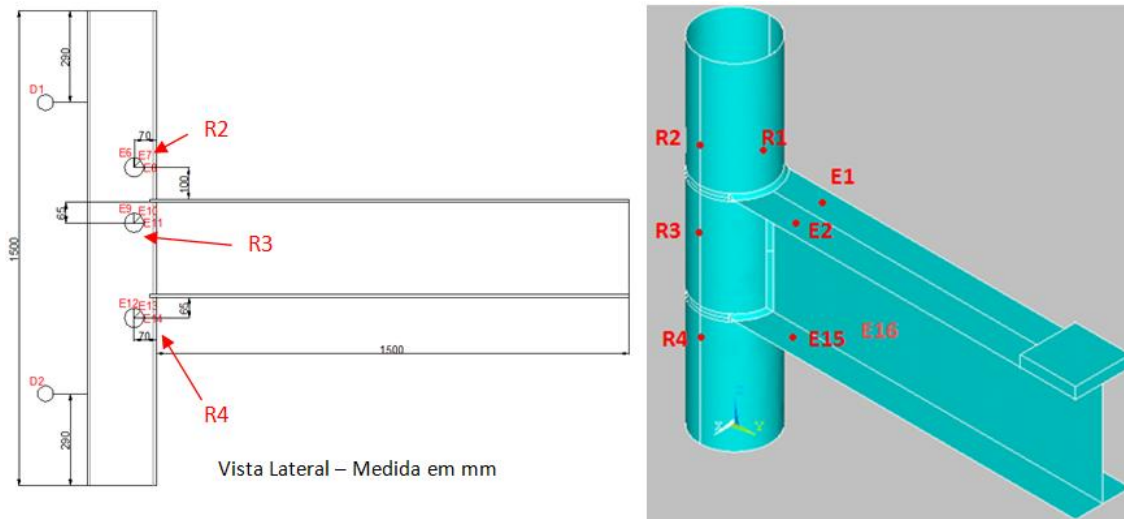
Foram ensaiados dois modelos do protótipo P2, coluna de 219,1 mm de diâmetro e espessura 9,5mm e viga em perfil W 310 x 38,7, os quais foram designados de N2-1 e N2-2 no capítulo 4. Antes da realização dos ensaios foram medidas as imperfeições de cada protótipo (N2-1 e N2-2). As imperfeições não foram significantes, portanto,

considerou-se os valores nominais fornecidos pelo fabricante. A seguir são apresentados os resultados dos ensaios N2-1 e N2-2.

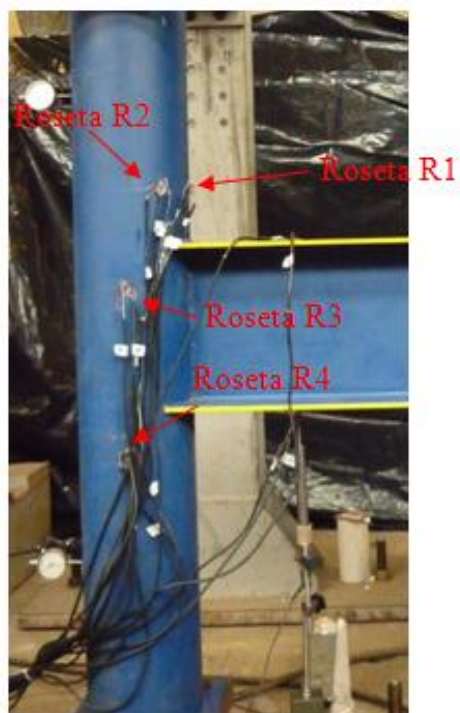
5.3.2.1 Ensaio N2-1

Para este ensaio, as rosetas e extensômetros foram distribuídos como na Figura 5.4 a seguir. Onde R1, R2, R3 e R4 são as rosetas localizadas na face da coluna e os extensômetros E1 e E2 estão localizados na mesa superior da viga e os extensômetros E15 e E16, na mesa inferior da mesma.

A carga última de ensaio foi de 187,03 kN, sendo que com 140,90 kN foi detectada a plastificação da parede da coluna na roseta R1.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.4-Localização da extensometria do ensaio N2-1

Verificou-se que para a viga do protótipo foram obtidos valores de deformação específicas de tração nas mesas superiores, pois as leituras dos extensômetros E1 e E2 foram positivas. Em contrapartida, deformações de compressão foram verificadas nas mesas inferiores da mesma, por apresentar valores de leitura negativos nos extensômetros E15 e E16. Os valores máximos de deformação específica ocorridos na viga foram determinados para a carga de 187,03 kN, atingindo valores de 1185,6 μ strain (tração) e -1078,8 μ strain (compressão). As Figuras 5.5 e 5.6, mostram as deformações específicas e os deslocamentos da viga respectivamente. Para este nível de deformação não há escoamento do aço da viga. Observa-se também a linearidade das deformações.

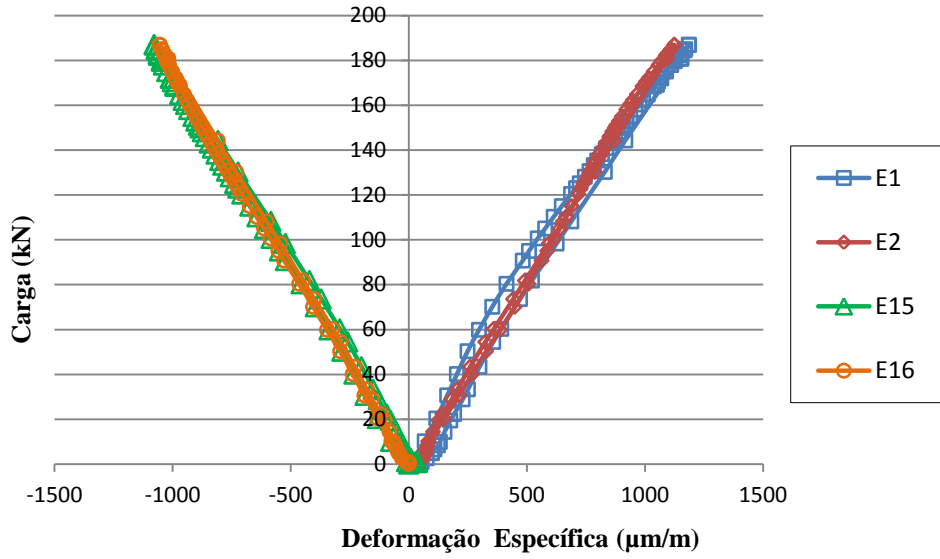


Figura 5.5 - Carga x deformação específica da viga. E1, E2, E15 e E16.

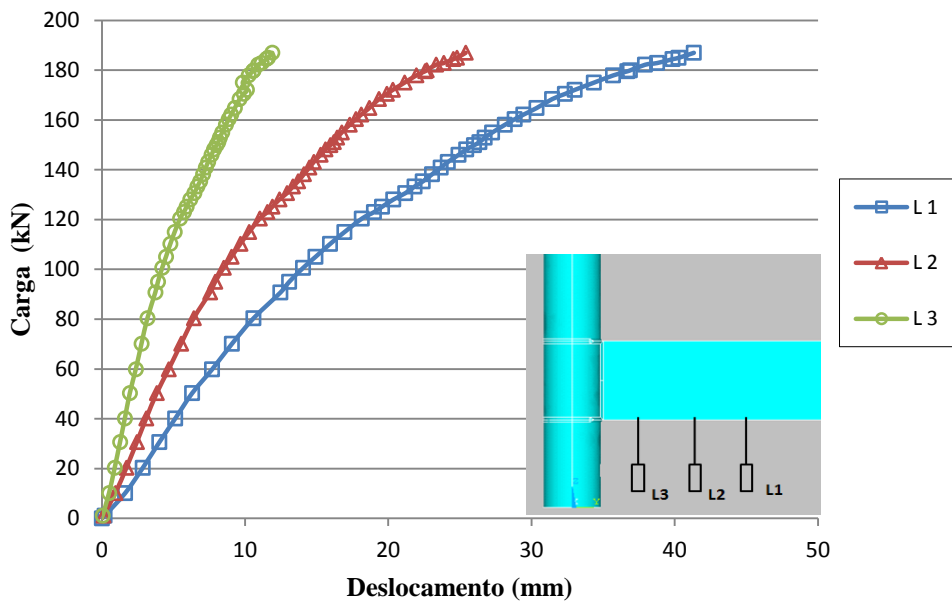


Figura 5.6 - Carga x Deslocamento da viga do ensaio N2-1.

Já para a coluna, o escoamento do material ocorreu primeiro na roseta R1, com uma carga aplicada na viga de 140,90 kN. Na roseta R3, o escoamento ocorreu quando se atingiu o valor de 175,04 kN e a roseta R4 com 151,11 kN. A roseta R2 manteve-se na fase elástica. A Figura 5.7 mostra a distribuição das tensões de von Mises obtidas a

partir das deformações e representação das tensões de escoamento obtida experimentalmente pelo ensaio de caracterização dos materiais.

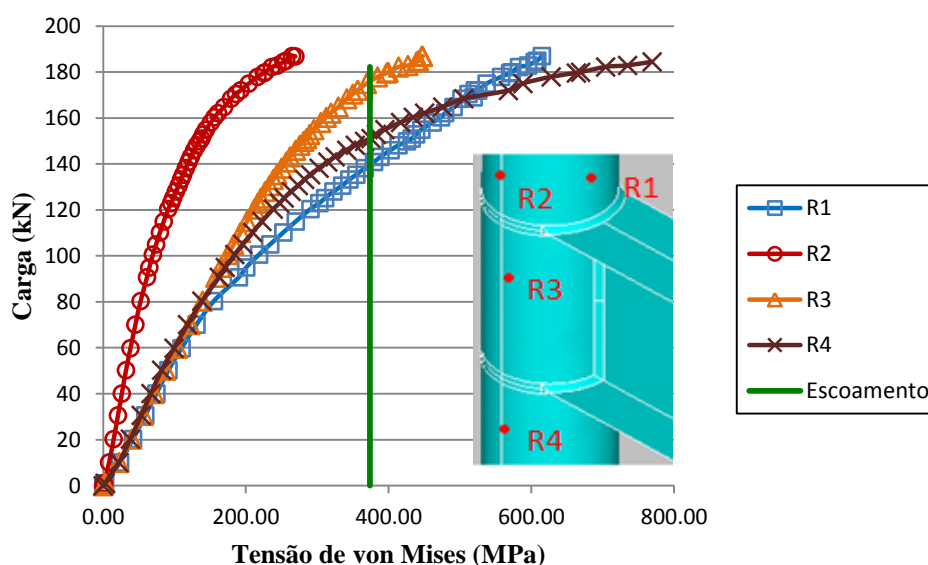


Figura 5.7-Carga x Tensão de von Mises para as rosetas do ensaio N2-1.

Ao chegar a carga de 187,03 kN o ensaio foi finalizado, ocorrendo o modo de falha da plastificação da face da coluna onde foi posicionada a viga.

Para se determinar a curva momento-rotação, é necessário que se conheça o comportamento da viga durante todo o teste. Como ilustração desta deformada a Figura 5.8 apresenta a deformada para a carga de 140,90 kN. Essa deformada é obtida pelos deslocamentos dos LVDT's L1, L2 e L3. Os valores de deslocamento obtidos para a carga máxima de 187,03 kN foram de 11,90 mm para L3, 25,41 mm para L2 e 41,33 mm para o LVDT L1.

Com a obtenção dos campos de deslocamentos da viga é determinada a rotação da ligação. A sua rotação foi determinada traçando-se uma reta tangente à sua deformada após a aplicação de cada carga. A inclinação dessa tangente em relação ao eixo reto inicial da viga resulta na rotação da ligação.

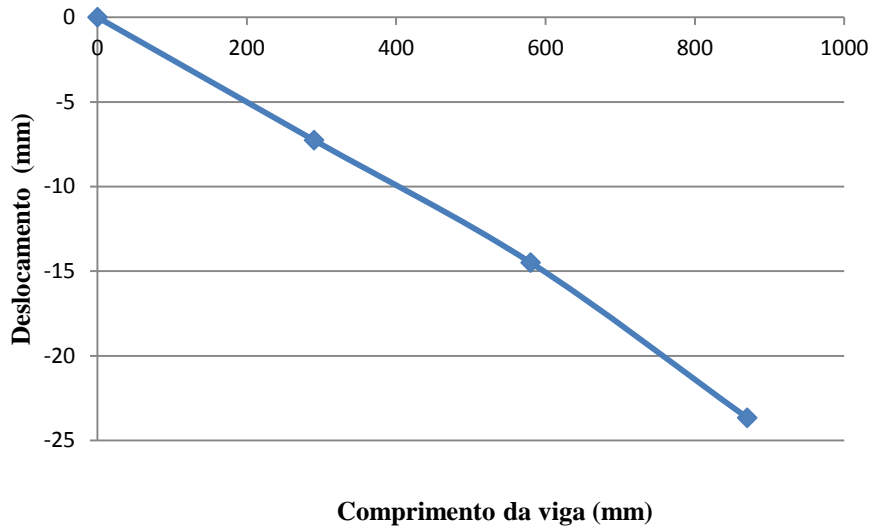


Figura 5.8-Deformada da viga para a carga de 140,90 kN.

Diante disto, para se obter a curva momento-rotação da ligação em estudo, calcula-se o momento fletor para cada aplicação de carga, cujo braço é a distância da aplicação de carga até a face da coluna. A rotação obtida é a rotação da ligação. Os valores máximos de momento fletor e de rotação para este ensaio foram respectivamente de 162,72 kNm e 0,075 rad, como mostra a Figura 5.9.

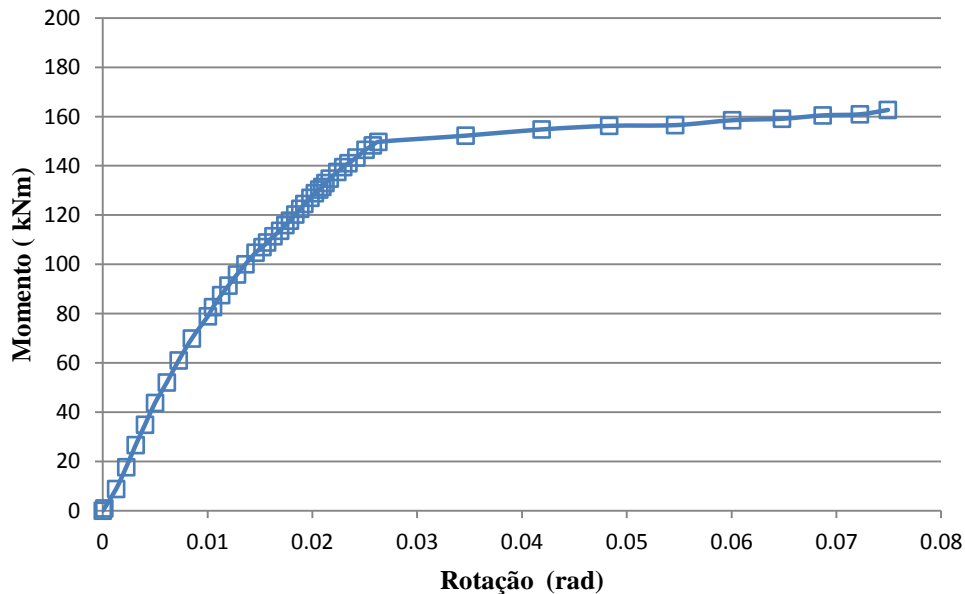


Figura 5.9 – Curva Momento-Rotação da ligação do ensaio N2-1 do protótipo P2 (coluna 219,1 x 9,5 e viga W310 x 38,7).

Para o cálculo da rigidez foi utilizado o Método da Inclinação Inicial, chegando a uma rigidez igual a 8681,11 kNm/rad.

O mecanismo de colapso deu-se pela plastificação da face da coluna. Vale salientar que na carga de 170,50 kN, foi observado o rompimento da solda na mesa superior da viga, como pode ser visto na Figura 5.10 a seguir, sendo caracterizada pela mudança brusca da inclinação da curva da Figura 5.9.



Figura 5.10 - Rompimento da solda no flange superior da viga.

5.3.2.2 Ensaio N2-2

O protótipo do ensaio N2-2 é constituído pelos perfis de seção transversal circular de diâmetro 219,1 mm e espessura de 9,5 mm e seção transversal tipo I W 310 x 38,7.

Neste ensaio, as posições das rosetas foram modificadas para que houvesse uma melhor avaliação dos esforços de tração e compressão na face da coluna. Os extensômetros continuaram nas mesmas posições do ensaio anterior e estão representados juntamente com as rosetas na Figura 5.11.

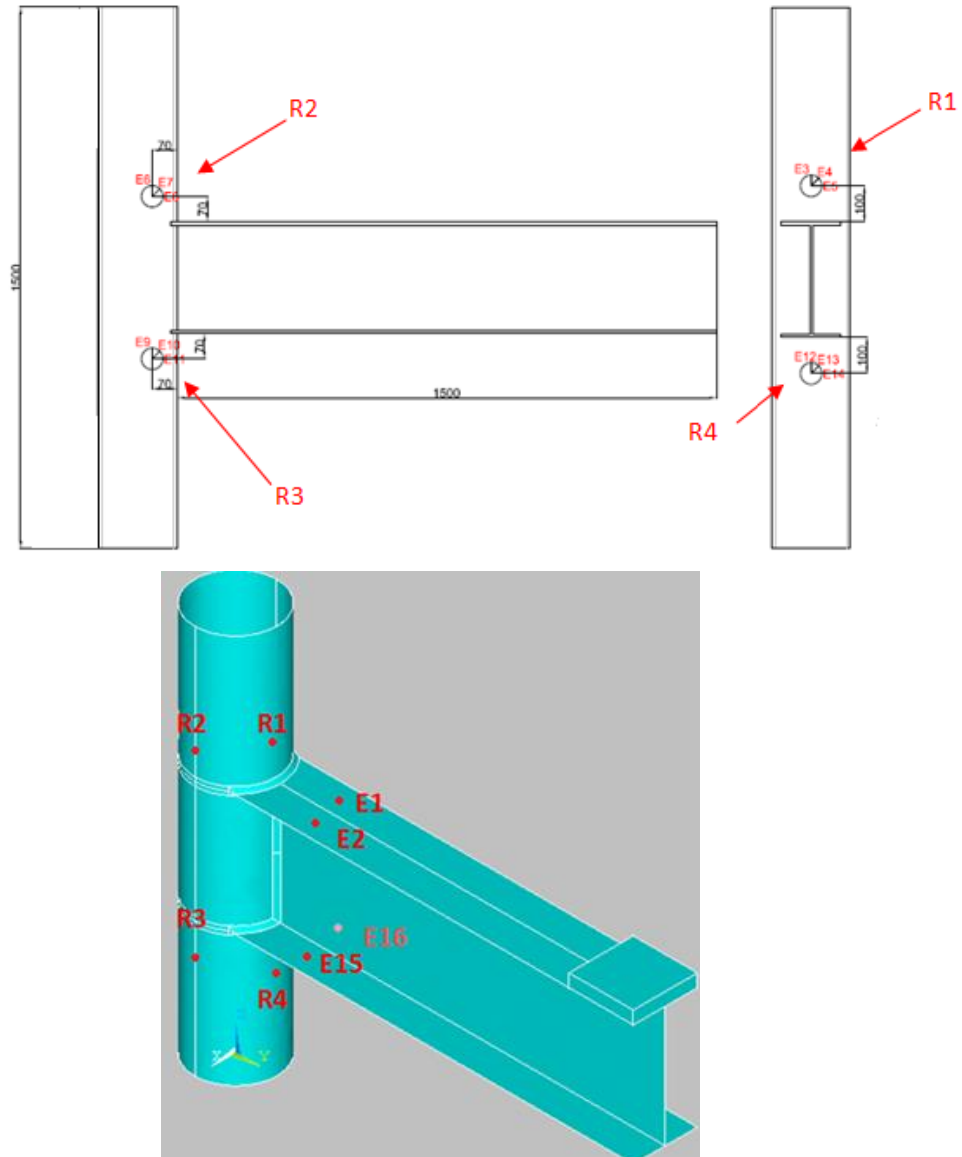


Figura 5.11 - Posição das rosetas e extensômetros no protótipo.

O nível de carregamento aplicado foi baseado na modelagem numérica com previsão de carga de 200 kN, mas como houve o rompimento da solda, o ensaio foi finalizado com a aplicação de carga de 186,69 kN.

Os carregamentos foram divididos em passos de carga durante o ensaio e, ao se aproximar da carga de plastificação pela modelagem numérica, estes passos de carga foram diminuídos para melhor visualização do modo de falha.

Os valores máximos de deformação específica para a viga, foram os valores determinados para a carga de 186,69 kN, atingindo valores de 1188,48 μ strain (tração)

na mesa superior e $-1084,56 \mu$ strain (compressão) na mesa inferior da viga. A Figura 5.12 mostra a deformação específica da viga para o carregamento de 189,69 kN.

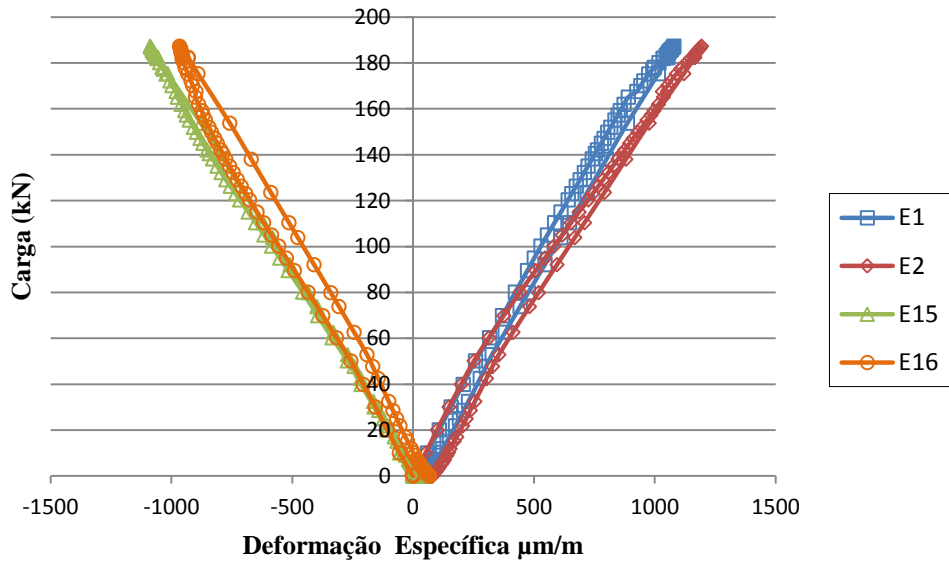


Figura 5.12 - Carga x Deformação específica da viga para os E1, E2, E15 e E16.

Para a viga foram mensurados os deslocamentos através das leituras dos LVDT's. A Figura 5.13 apresenta esses deslocamentos ocorridos na mesma.

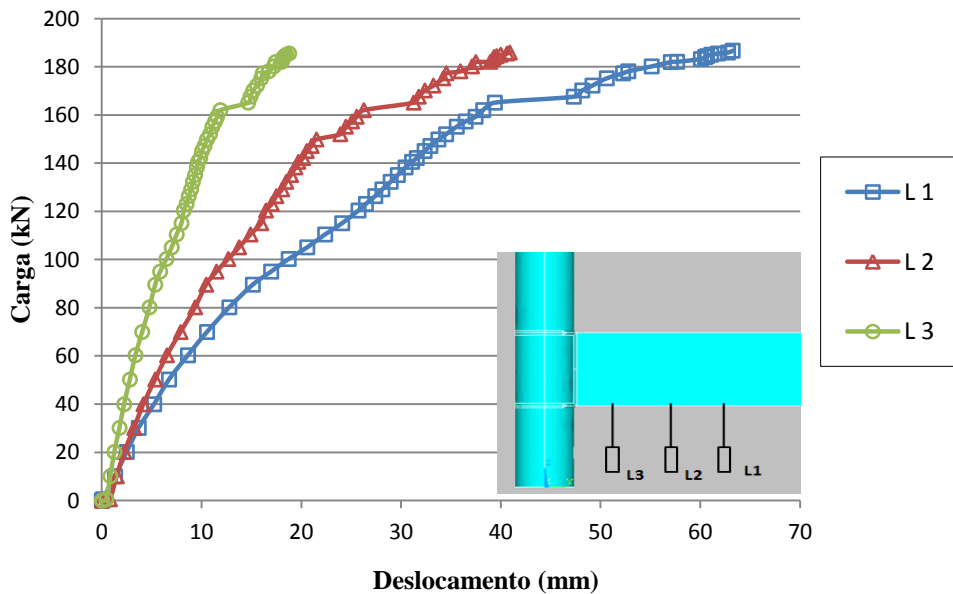


Figura 5.13 - Carga x Deslocamento da viga.

Para este ensaio N2-2, o escoamento ocorreu primeiro na roseta R4 com uma carga de 135,08 kN, logo em seguida a roseta R3 escoou com 138,23 kN, a roseta R1 com 159,26 e a roseta R2 teve o escoamento com 175,23 kN.

Na Figura 5.14 a seguir, estão apresentados os resultados das tensões de von Mises obtidas a partir das deformações das quatro rosetas coladas na face da coluna e a tensão de escoamento obtida experimentalmente através do ensaio de caracterização.

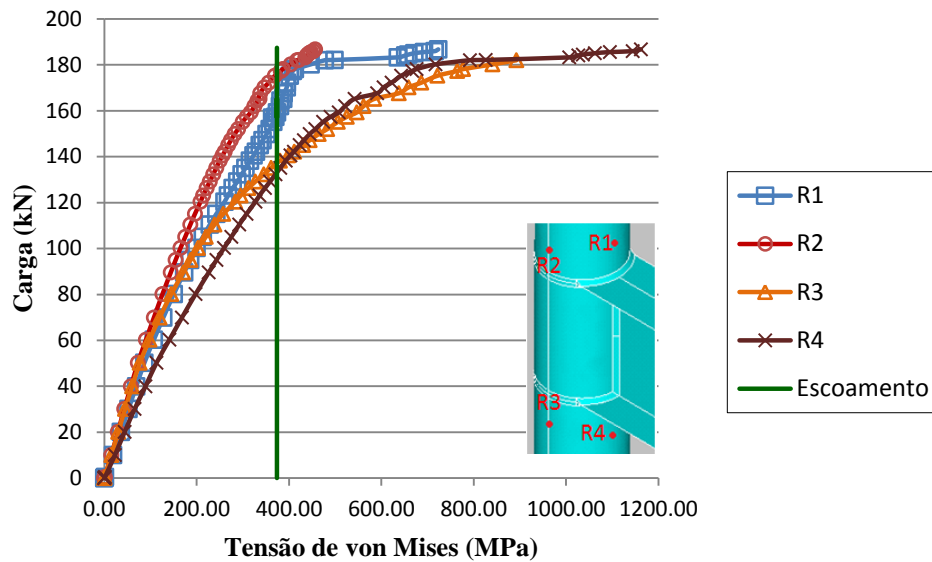


Figura 5.14 - Carga x Tensão de von Mises para as rosetas do ensaio N2-2.

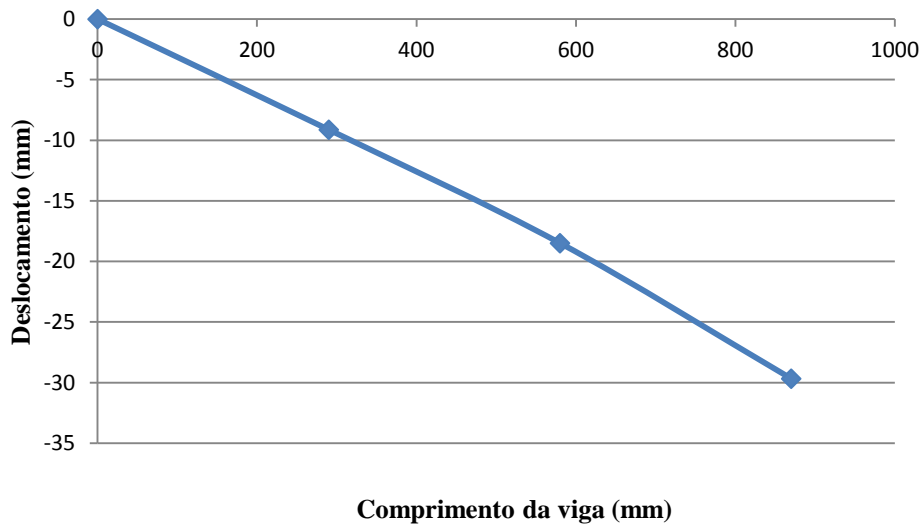


Figura 5.15 - Deformada da viga para uma carga de 135,08 kN.

Para exemplificar o comportamento da viga durante todo o ensaio, é apresentada ilustrativamente pela Figura 5.15 a sua deformada para a carga de 135,08 kN. Essa deformada é obtida pela leitura dos LVDT's.

A partir da mesma metodologia do ensaio N2-1, descrito no item anterior, encontram-se os valores máximos de momento fletor e rotação respectivamente de 143,66 kNm e 0,0737 rad. A Figura 4.16 mostra a curva momento-rotação da ligação para o protótipo do ensaio N2-2.

Para o cálculo da rigidez foi utilizado o Método da Inclinação Inicial, chegando a uma rigidez igual a 9004,27 kNm/rad.

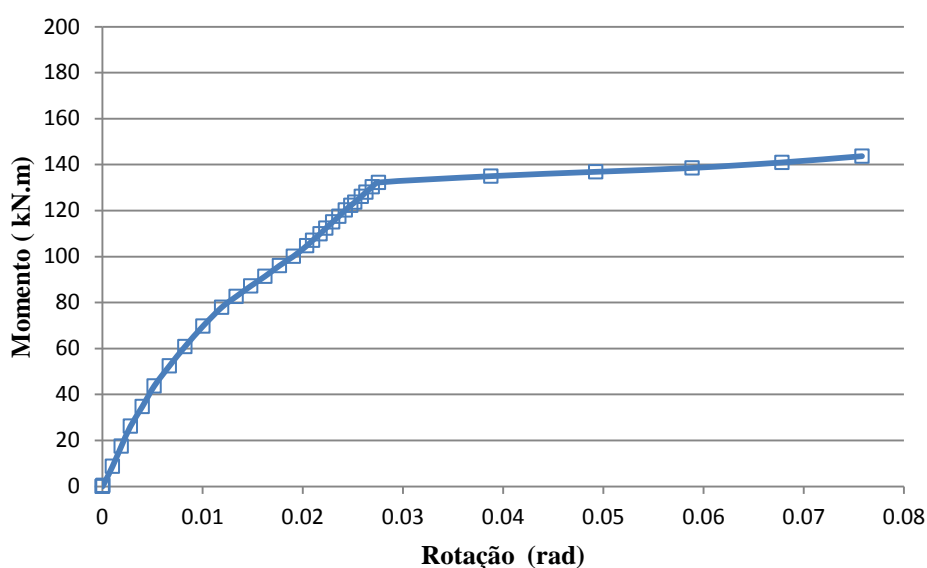


Figura 5.16 - Curva Momento-Rotação da ligação para o protótipo do ensaio N2-2.

O mecanismo de colapso deu-se pela plastificação da face da coluna. Vale salientar que foi visualmente observado o rompimento da solda durante a aplicação de carga de 151,99 kN. A Figura 5.17 a seguir mostra o rompimento da solda na mesa superior da viga e a Figura 5.6 mostra a inclinação da curva Momento-Rotação caracterizando uma perda brusca de rigidez.



Figura 5.17 - Rompimento da solda no flange superior da viga W 310 x 8,7, coluna 219,1 x 9,5.

5.3.3 Ensaio do Protótipo P3 (coluna 219,1 x 8,2 e Viga W 250 x 17,9)

Foram feitos dois ensaios do protótipo P3 que foram denominados de N3-1 e N3-2, como foi mostrado na Tabela 4.1. O protótipo P3, em estudo, é constituído por coluna tubular de seção transversal circular de diâmetro externo de 219,1 mm e 8,2 mm de espessura e viga de seção transversal tipo I de perfil W 250 x 17,9. Antes da realização dos ensaios foram medidas as imperfeições de cada protótipo (N3-1 e N3-2). As imperfeições não foram significativas, portanto nas análises foram considerados os valores nominais fornecidos pelos fabricantes.

As localizações das rosetas na coluna e dos extensômetros lineares na viga para os protótipos dos ensaios N3-1 e N3-2, seguem a mesma posição da instrumentação do ensaio N2-2 do protótipo P2, Figura 5.9.

Como a viga dos protótipos tem uma altura pequena, foi necessária a colocação de mais duas chapas de aço de ½” de espessura para que o atuador hidráulico tivesse altura suficiente para aplicar o carregamento na viga. O que pode ser visto na Figura 5.18 a seguir.

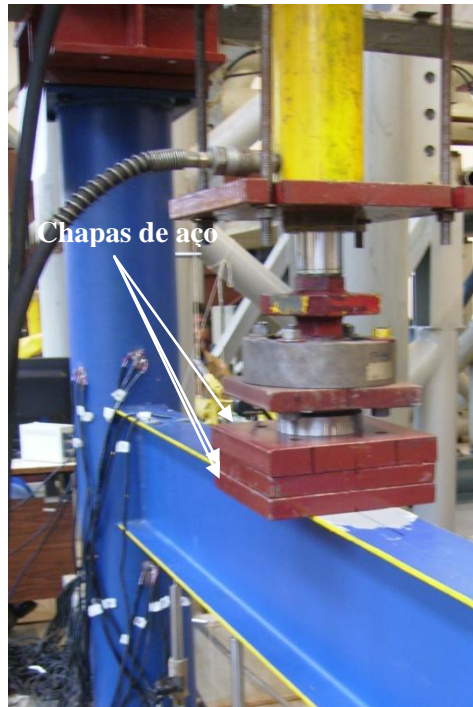


Figura 5.18 - Atuador hidráulico com chapas de aço para aplicação de carga.

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios N3-1 e N3-2.

5.3.3.1 Ensaio N3-1

O nível de carregamento aplicado foi baseado na modelagem numérica com previsão de carga de 100 kN, mas como houve o rompimento da solda, o ensaio foi finalizado com a aplicação de carga de 83,35 kN.

Os carregamentos foram divididos em passos de carga durante o ensaio e, ao se aproximar da carga de colapso pela modelagem numérica, estes passos foram diminuídos para melhor visualização do modo de falha.

Para o ensaio N3-1, o escoamento ocorreu primeiro na roseta R4 com uma carga de 71,73 kN, logo em seguida a roseta R3 escoou com 74,12 kN, a roseta R1 com 78,25 e a roseta R2 teve o escoamento com 81,71 kN.

Na Figura 5.19 a seguir estão apresentados os resultados das tensões de von Mises das quatro rosetas coladas na face da coluna.

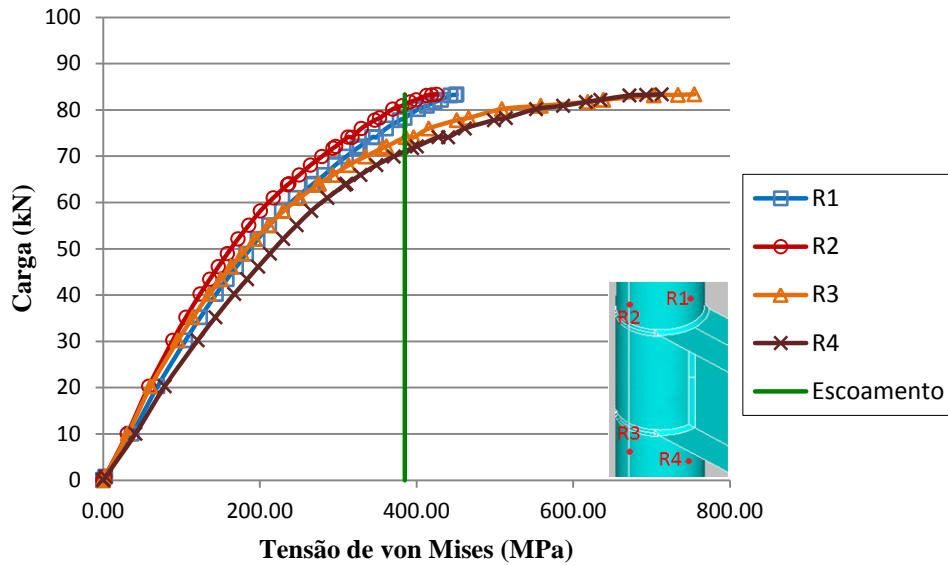


Figura 5.19 -Carga x Tensão de von Mises para as rosetas do ensaio N3-1.

Os valores máximos de deformação específica para a viga, foram os valores determinados para a carga de 83,35 kN, atingindo valores de 1532,16 μ strain (tração) na mesa superior e -1348,08 μ strain (compressão) na mesa inferior da viga Assim, como a deformação específica de escoamento da viga é de 1682 μ strain, obtida através da divisão da tensão de escoamento nominal do aço da viga considerado de 345 MPa pelo módulo de elasticidade considerado 205000 MPa, a viga permaneceu na fase elástica.

A Figura 5.20 a seguir mostra a deformação específica da viga para o carregamento de 83,35 kN.

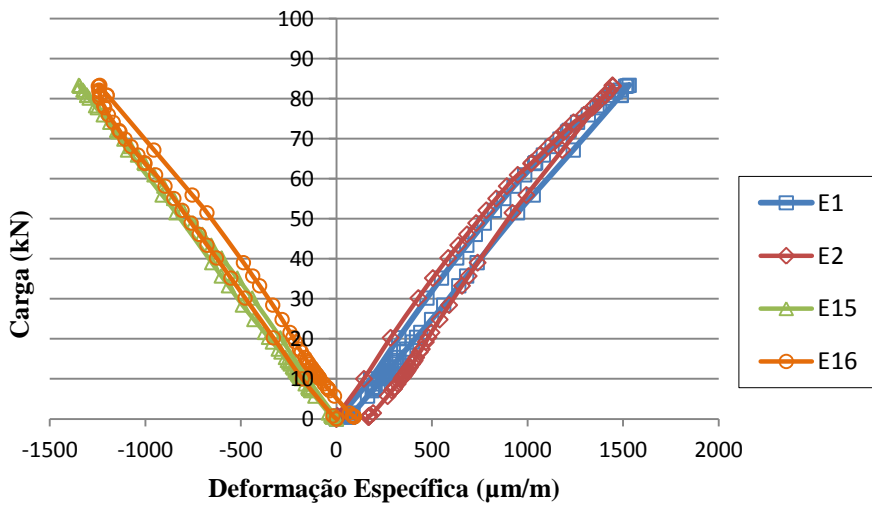


Figura 5.20 - Carga x Deformação específica da viga para o ensaio N3-1.

Para a viga foram mensurados os deslocamentos através das leituras dos LVDT's. A Figura 5.21 apresenta esses deslocamentos ocorridos na mesma.

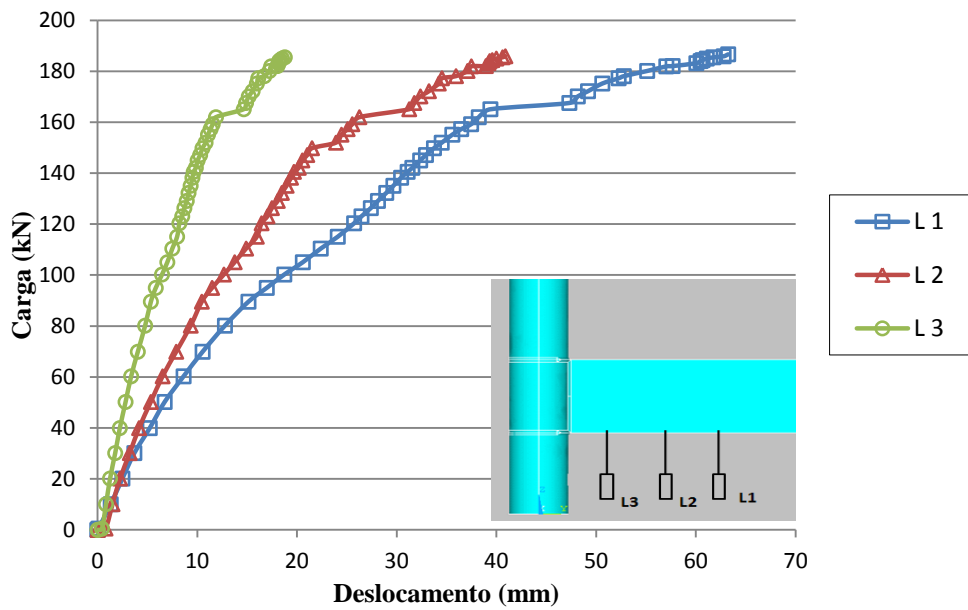


Figura 5.21 - Carga x Deslocamentos da viga do ensaio N3-1.

O comportamento da viga foi monitorado durante todo o ensaio, que pela leitura dos LVDT's obteve-se a sua deformada para a carga de 71,73 kN, Figura 5.22.

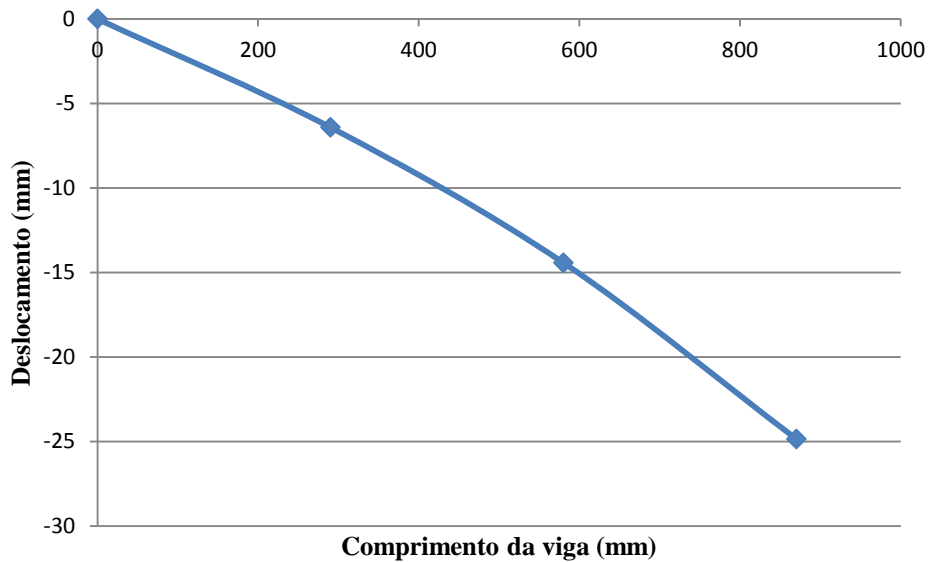


Figura 5.22 - Deformada da viga para a carga de 71,73 kN.

Os valores para o deslocamento da coluna foram pequenos, sendo considerados desprezíveis.

Conforme a metodologia dos ensaios anteriores, pôde-se determinar os valores máximos de momento fletor e de rotação para este ensaio que foram respectivamente de 72,516 kNm e 0,0586 rad. A Figura 5.23 mostra a curva momento-rotação do ensaio N3-1 através da qual a rigidez da ligação foi obtida utilizando o Método da Inclinação Inicial, chegando a uma rigidez igual a 4759,71 kNm/rad.

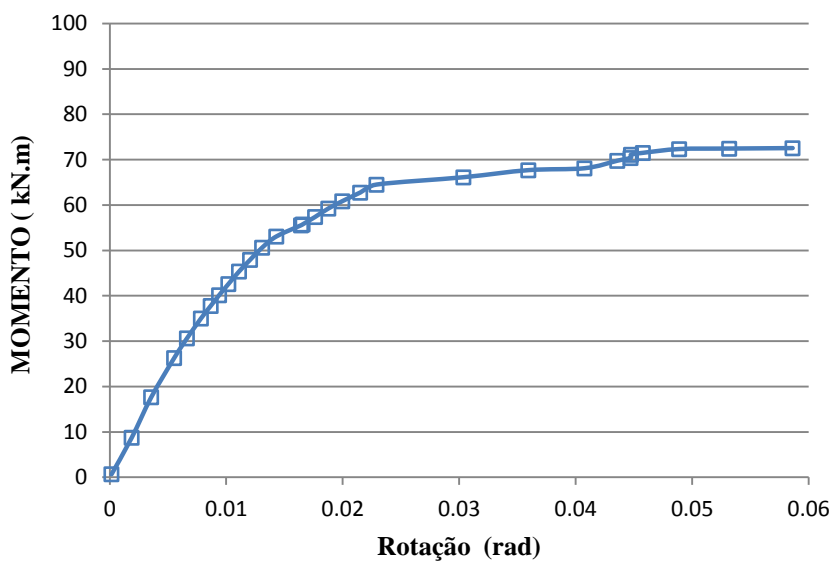


Figura 5.23 - Curva Momento-Rotação da ligação do ensaio N3-1.

O mecanismo de colapso deu-se pela plastificação da face da coluna. Vale salientar que foi visualmente observado o rompimento da solda durante a aplicação de carga de 80,16 kN. A Figura 5.24 a seguir mostra o rompimento da solda na mesa superior da viga.



Figura 5.24 - Detalhe do rompimento da solda no flange superior da viga.

5.3.3.2 Ensaio N3-2

O nível de carregamento aplicado foi baseado na modelagem numérica com previsão de carga de 100 kN como no ensaio N3-1, descrito no item anterior, mas como houve o rompimento da solda, o ensaio foi finalizado com a aplicação de carga de 82,214 kN.

Os carregamentos foram divididos em passos de carga durante o ensaio e, ao se aproximar da carga de colapso pela modelagem numérica, estes passos foram diminuídos para melhor visualização do modo de falha.

Para este ensaio N3-2, o escoamento ocorreu primeiro na roseta R3 com uma carga de 66,15 kN, logo em seguida a roseta R4 escoou com 67,83 kN, a roseta R1 com 71,97 kN e a roseta R2 teve o escoamento com 77,68 kN.

Na Figura 5.25 a seguir estão apresentados os resultados das tensões de von Mises das quatro rosetas coladas na face da coluna.

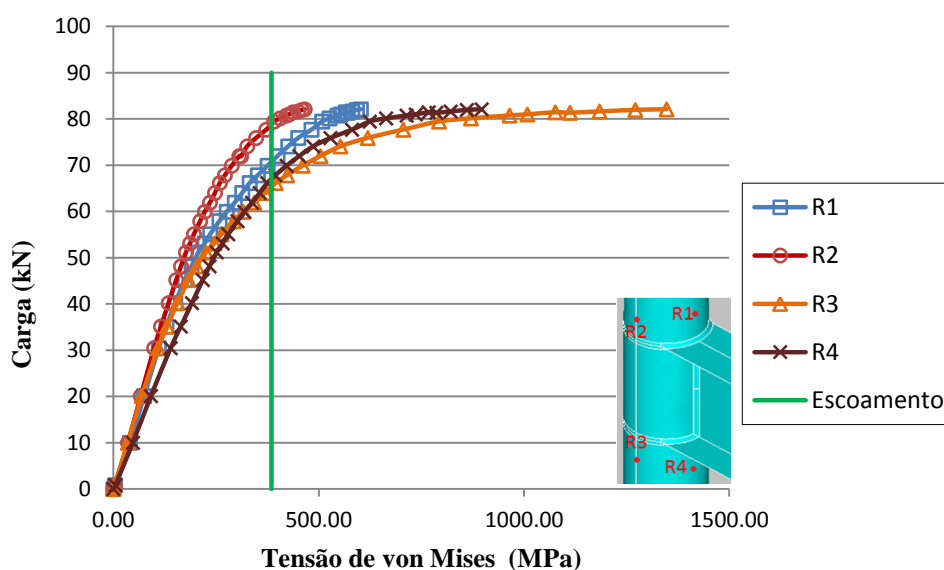


Figura 5.25 - Carga x Tensão de von Mises das rosetas do ensaio N3-2.

Os valores máximos de deformação específica para a viga, foram os valores determinados para a carga de 82,21 kN, atingindo valores de 1562,16 μ strain (tração) na mesa superior no E1 e -1406,88 μ strain (compressão) na mesa inferior da viga no E15. Assim, como a deformação específica de escoamento da viga é de 1682 μ strain,

obtida através da divisão da tensão de escoamento nominal do aço da viga considerado de 345 MPa pelo módulo de elasticidade considerado 205000 MPa, a viga permaneceu na fase elástica.

As Figuras 5.26 e 5.27 a seguir mostram a deformação específica da viga para o carregamento de 82,21 kN e os deslocamentos através das leituras dos LVDT's respectivamente.

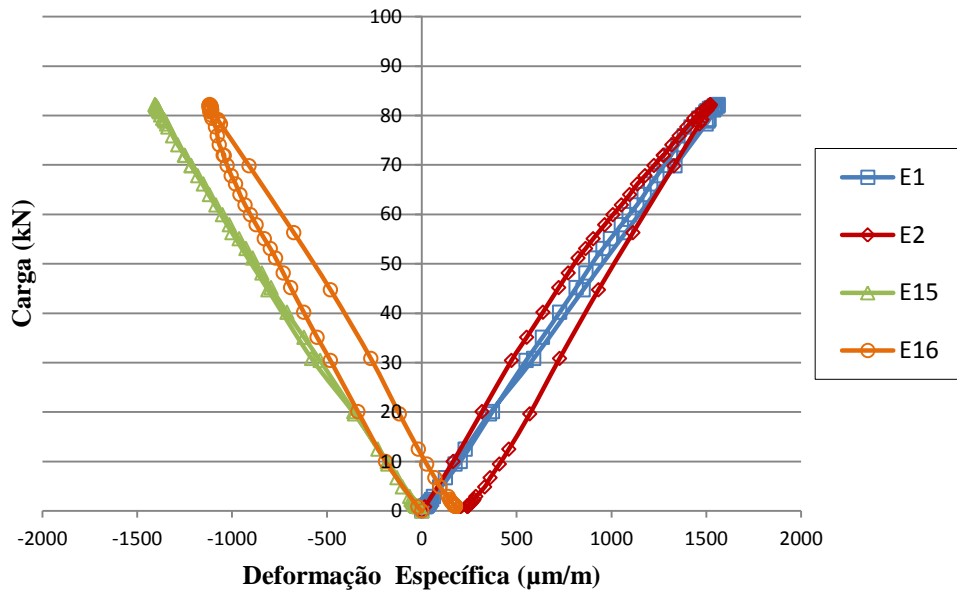


Figura 5.26 - Carga x Deformação Específica ($\mu\text{m/m}$) da viga no ensaio N3-2.

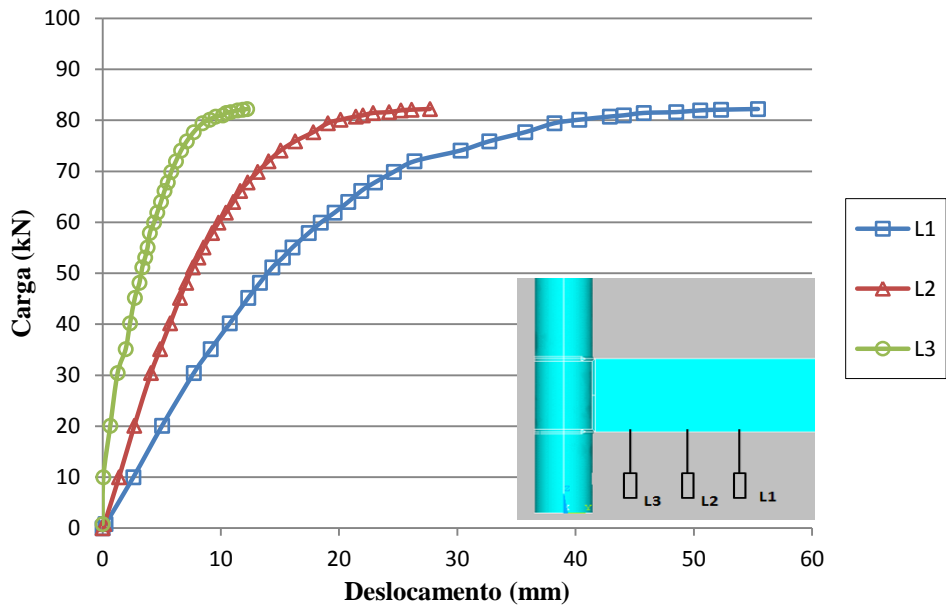


Figura 5.27 - Carga x Deslocamentos da viga do ensaio N3-2.

O comportamento da viga foi monitorado durante todo o ensaio, que pela leitura dos LVDT's obteve-se a sua deformada para a carga de 66,15 kN, Figura 5.28.

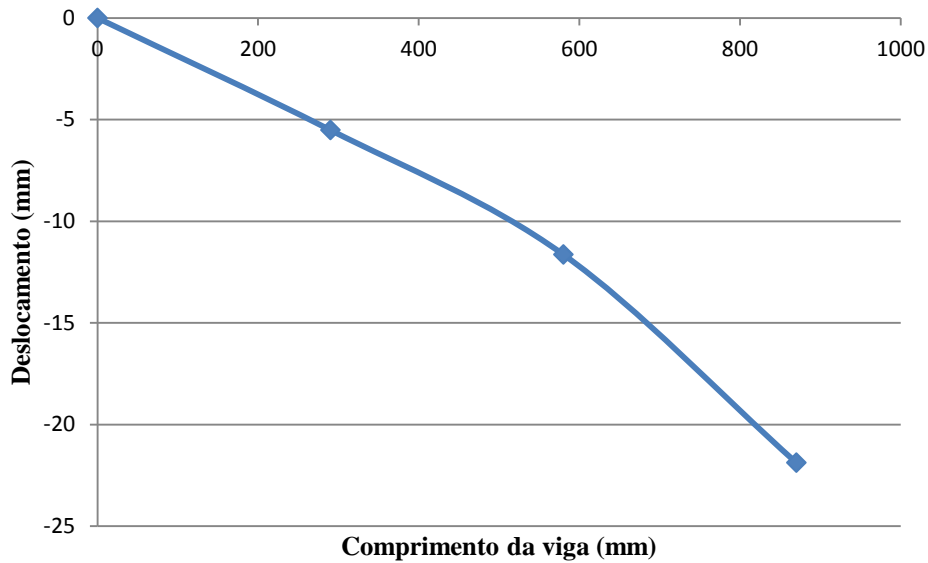


Figura 5.28 - Deformada da viga para a carga de 66,15 kN.

Os valores para o deslocamento da coluna foram pequenos, sendo considerados desprezíveis.

Utilizando a mesma metodologia dos ensaios anteriores, obteve-se os valores máximos de momento fletor e da rotação para este ensaio de 71,53 kN m e 0,0489 rad respectivamente, os quais estão representados na Figura 5.29.

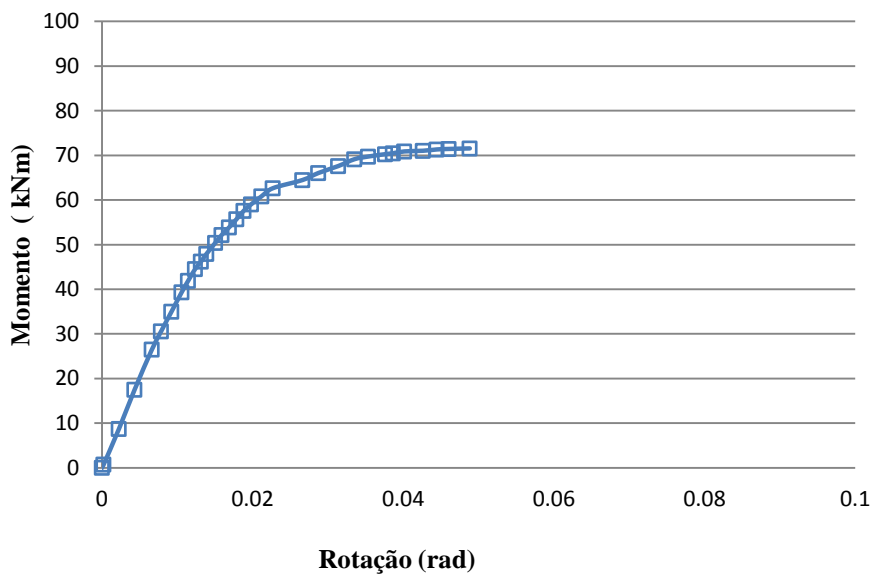


Figura 5.29 - Curva Momento-Rotação. da ligação do ensaio N3-2;

Utilizando o Método da Rigidez Inicial, como nos ensaios anteriores, chegou-se a uma rigidez igual a 4045,91 kNm/rad.

O mecanismo de colapso deu-se pela plastificação da face da coluna. Vale salientar que houve o rompimento da solda durante a aplicação de carga de 80,11 kN. A Figura 5.30 a seguir mostra o esmagamento da coluna pela viga, onde se percebe um leve enrugamento da mesa inferior da mesma.

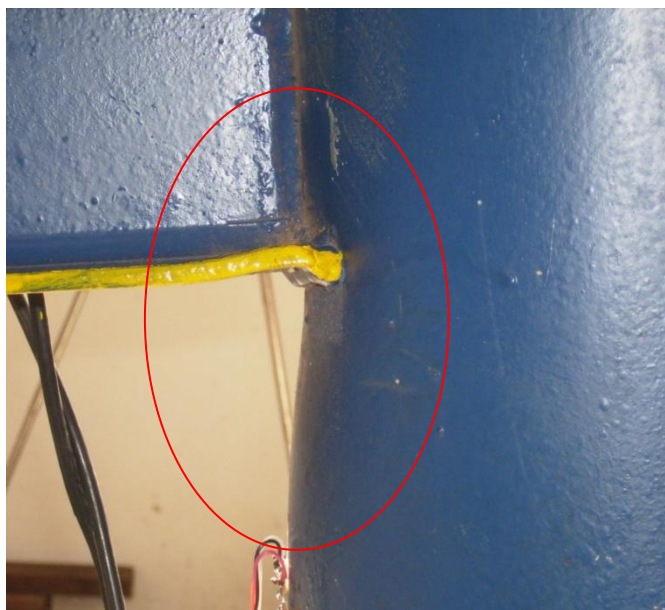


Figura 5.30 - Esmagamento da coluna pelo flange da viga por forças de compressão.

A Tabela 5.1 a seguir mostra uma compilação dos resultados obtidos nos ensaios

Tabela 5.1 - Resultados obtidos nos ensaios experimentais.

| Protótipo | Ensaio | Cargas Experimentais (kN) | | Momento Fletor Máximo (kNm) | Rotação Maxima (rad) | Rigidez (kNm/rad) |
|-----------|--------|---------------------------|------------|-----------------------------|----------------------|-------------------|
| | | P_y | $P_{max.}$ | | | |
| P2 | N2-1 | 140,90 | 187,03 | 162,72 | 0,0749 | 8681,11 |
| | N2-2 | 135,08 | 186,69 | 162,42 | 0,0737 | 9004,27 |
| P3 | N3-1 | 71,73 | 83,35 | 72,51 | 0,059 | 4759,71 |
| | N3-2 | 66,15 | 82,21 | 71,53 | 0,050 | 4045,91 |

Apesar do rompimento da solda dos protótipos ensaiados, as análises não foram prejudicadas, pois foram feitas na fase elástica do material.

APRESENTAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS, EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS

6.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados a comparação dos resultados obtidos nos estudos realizados neste trabalho. Será apresentado o resultado da modelagem numérica seguindo a metodologia apresentada no capítulo 3, considerando os protótipos ensaiados e cujos resultados experimentais foram apresentados no capítulo 5. Os resultados teóricos apresentados foram obtidos a partir de prescrições apresentadas no capítulo 2. A exposição e discussão dos resultados é feita de modo a se estabelecer um comparativo entre os resultados numéricos, experimentais e teóricos obtidos a partir do Eurocode 3 (2005) e CIDECT (2004).

6.2 Comparação Entre os Modelos Numéricos e Experimentais

Inicialmente serão apresentados os resultados da tensão de von Mises das modelagens numéricas das rosetas localizadas na face da coluna. Em seguida serão discutidas as regiões de plastificação na face da coluna tubular. As regiões de plastificação são identificadas por meio da apresentação das tensões de von Mises, uma vez que é o critério de plastificação adotado. Por fim, é apresentada a comparação entre as curvas momento-rotação dos modelos numéricos e ensaios experimentais.

Os modelos numéricos serão denominados da seguinte forma para comparação com os ensaios experimentais, como na Tabela 6.1.

Tabela 6.1-Nomenclatura dos modelos numéricos.

| Protótipo | Ensaio | Modelo Numérico | Coluna | | Viga | | | | |
|-----------|--------|-----------------|------------------------|------------------------|--------------|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | | d _c (mm) | t _c (mm) | Perfil | h (mm) | b _f (mm) | t _f (mm) | t _w (mm) |
| P2 | N2-1 | MN2 | 219,1 | 9,5 | W 310 x 38,7 | 310 | 165 | 9,7 | 5,8 |
| | N2-2 | | | | | | | | |
| P3 | N3-1 | MN3 | 219,1 | 8,2 | W 250 x 17,9 | 251 | 101 | 5,3 | 4,8 |
| | N3-2 | | | | | | | | |

6.2.1 Comparação Entre os Resultados do Modelo Numérico MN2 e Ensaio Experimentais N2-1 e N2-2

Para o modelo numérico e experimental da ligação do protótipo P2, cujas dimensões estão definidas na Tabela 6.1, o carregamento aplicado foi de 200 kN. Como foi visto no capítulo 5, a posição da instrumentação com extensometria foi diferente para os ensaios N2-1 e N2-2. Dessa forma, a apresentação e a comparação entre os resultados numéricos e experimentais para cada ensaio será feita separadamente.

6.2.1.1 Comparação Entre os Resultados do Modelo MN2 e os Resultados do Ensaio N2-1

O escoamento do material da coluna ocorreu primeiro na roseta R1 do ensaio N2-1, o que foi obtido boa correlação com o modelo MN2, pois o escoamento também ocorreu primeiro na roseta R1 com 140 kN, ocorrendo o modo de falha da plastificação da face da coluna. Na Figura 6.1 tem-se o gráfico da carga aplicada *versus* a tensão de von Mises, comparativo entre os modelos numéricos e os experimentais para cada roseta posicionada na face da coluna.

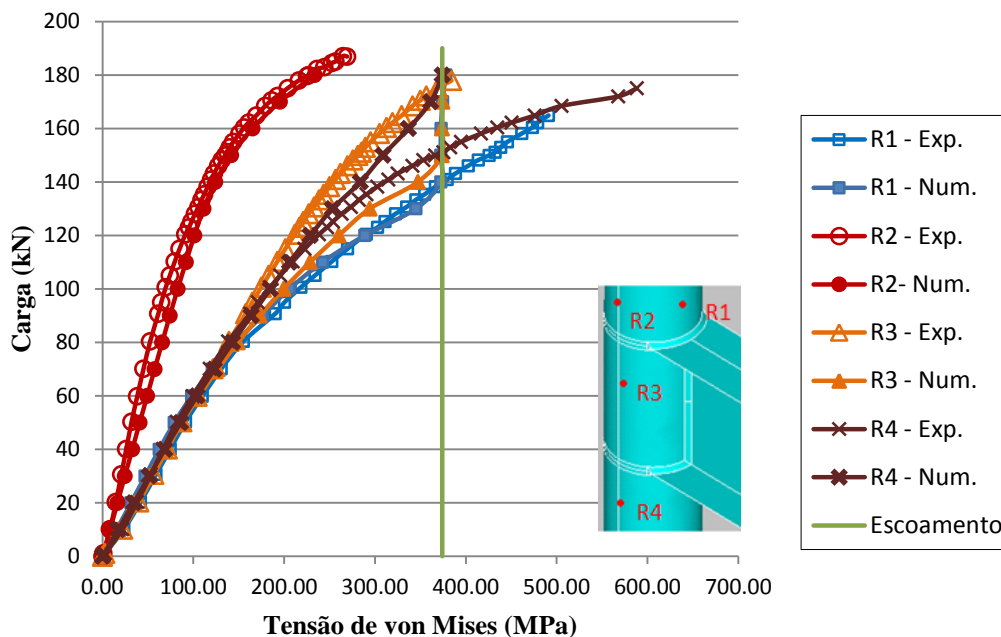


Figura 6.1 - Comparação experimental e numérica para Carga x Tensão de von Mises do protótipo P2, ensaio N2-1 e do modelo numérico MN2.

Observa-se pela análise numérica, que as rosetas R2 e R4 apresentam uma boa correlação com a análise experimental. Porém, na roseta R4 do modelo numérico a curva de tensão inicia-se bem próxima a curva experimental, mas modifica-se a partir da carga de 120 kN, chegando a plastificação com uma carga aplicada na extremidade da viga de 180 kN. No caso da roseta R3 observa-se uma maior divergência devido ao seu posicionamento estar muito próximo a área afetada pelas cargas de tração e compressão transmitidas pela viga, podendo nesse local ter ocorrido o abaulamento da superfície.

Na Figura 6.2, tem-se a distribuição das tensões de von Mises para a ligação do modelo MN2 com fator de escala igual a três dos protótipos P2 dos ensaios N2-1 e N2-2. Lembrando que a tensão de escoamento do perfil da coluna é 374 MPa e da viga foi considerado 345MPa.

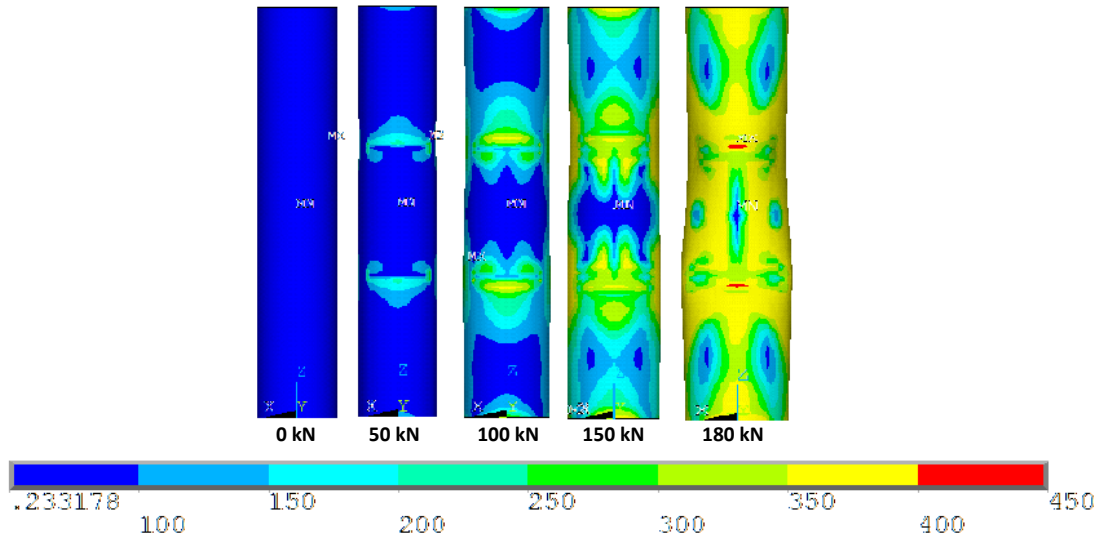


Figura 6.2 - Distribuição das tensões de von Mises para o modelo MN2.

A curva de momento-rotação da ligação do modelo MN2 foi obtida conforme o procedimento dos ensaios experimentais, sendo que os valores máximos de momento fletor e rotação foram 156,60 kNm e 0,0613 rad, respectivamente. A Figura 6.3 mostra as curvas momento-rotação do modelo numérico MN2 e do ensaio experimental N2-1.

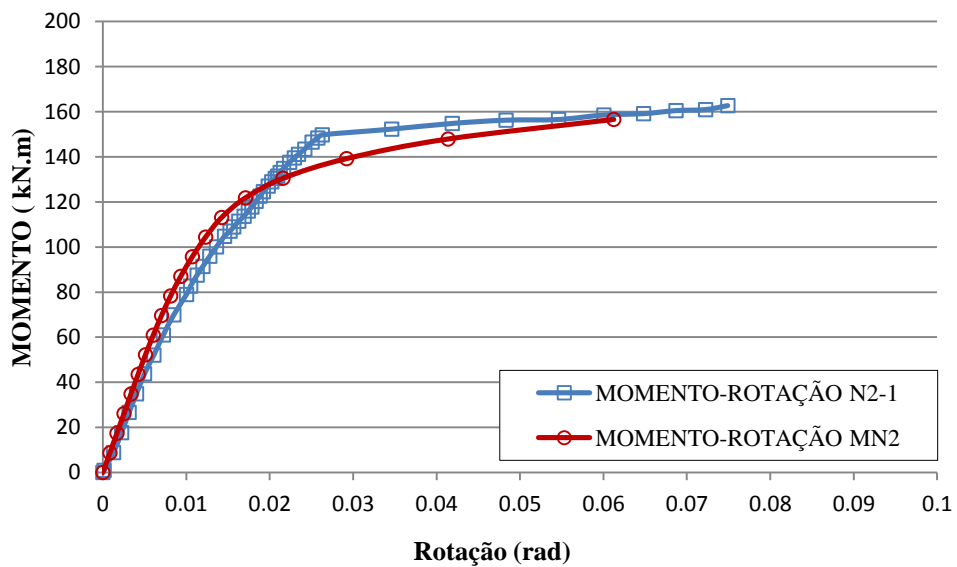


Figura 6.3 - Curvas Momento-Rotação experimental e numérica para o ensaio N2-1 e do modelo numérico MN2.

Para o cálculo da rigidez do modelo MN2 foi utilizado o Método da Rigidez Inicial, descrito no capítulo 5, sendo obtido o valor de 10103,22 kNm/rad.

6.2.1.2 Comparação Entre os Resultados do Modelo MN2 e os Resultados do Ensaio N2-2

Como descrito anteriormente, foi aplicada uma carga máxima de 200 kN no modelo numérico MN2 e a mesma foi prevista para o protótipo P2 do ensaio N2-2. No modelo numérico houve o escoamento da face da coluna primeiramente pela roseta R4 com uma carga aproximada de 140 kN, o que mostrou uma boa correlação com o ensaio experimental ocorrendo o modo de falha da plastificação da face da coluna. Na Figura 6.4 tem-se o gráfico da carga aplicada versus a tensão de von Mises caracterizando a comparação entre os resultados experimentais e os numéricos para as rosetas posicionadas na face da coluna. Pode-se observar pela análise numérica que para a roseta R3, a sua curva de tensão inicia-se bem próxima a curva experimental, mas se modifica a partir da carga de 120 kN, chegando a plastificação com uma carga aplicada próxima de 170 kN. No caso da roseta R2, observa-se uma maior divergência devido ao seu posicionamento estar muito próximo a área afetada por forças de tração e compressão transmitidas pela viga, podendo nesse local ter ocorrido o abaulamento da superfície.

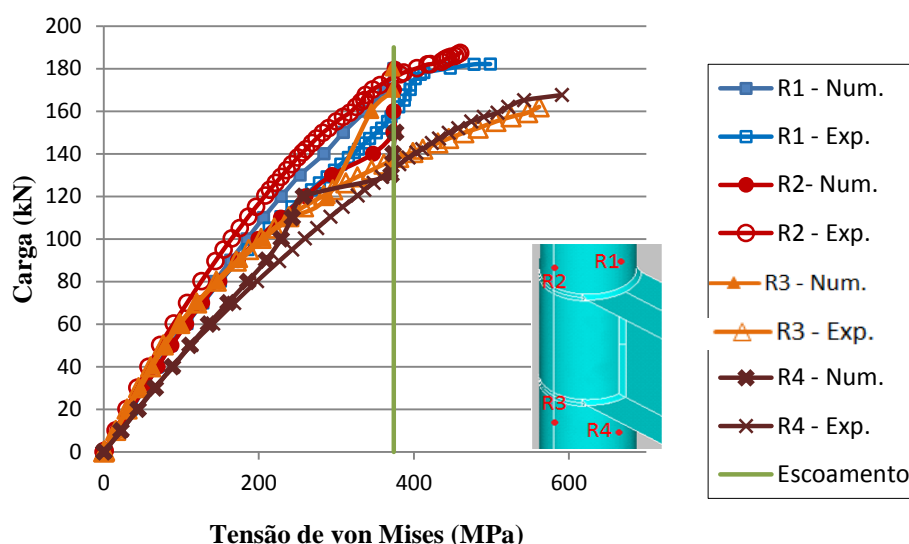


Figura 6.4 - Comparação experimental e numérica para Carga x Tensão de von Mises do protótipo P2, ensaio N2-2 e modelo numérico MN2.

Na Figura 6.5, tem-se a distribuição das tensões de von Mises para a ligação do modelo MN2 com fator de escala igual a três dos protótipos P2 dos ensaios N2-1 e N2-2. Lembrando que a tensão de escoamento do perfil da coluna é 374 MPa e da viga foi considerado 345MPa. Pode-se perceber nitidamente na figura, as regiões de tração e compressão na coluna pelas mesas da viga, o que caracteriza uma ovalização do tubo.

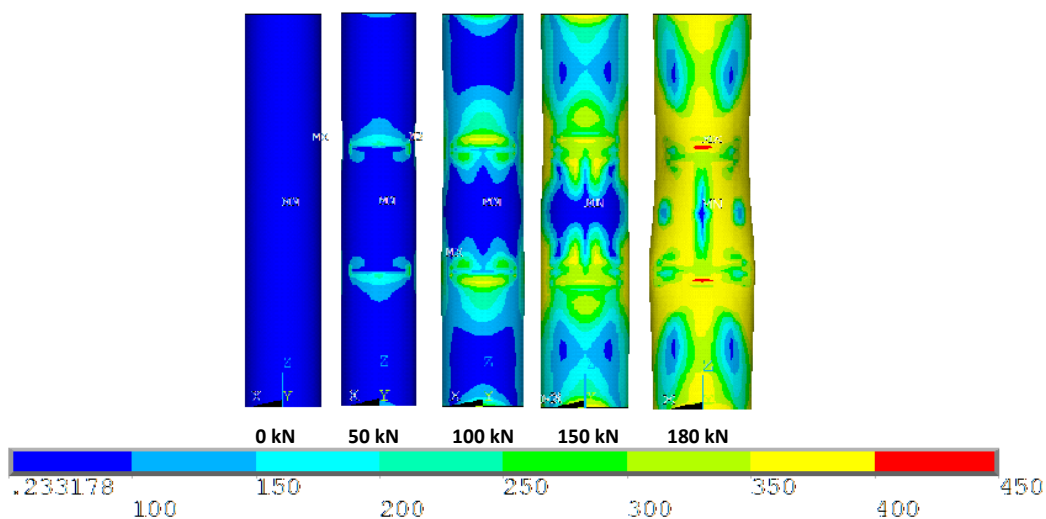


Figura 6.5 - Distribuição das tensões de von Mises para o modelo MN2.

Como descrito no item anterior, os valores máximos de momento fletor e rotação para o modelo MN2 foram 156,60 kNm e 0,0613 rad, respectivamente. A Figura 6.6 mostra as curvas momento-rotação do modelo numérico MN2 e do ensaio experimental N2-2. Para o cálculo da rigidez do modelo MN2, foi obtido o valor de 10103,22 kNm/rad.

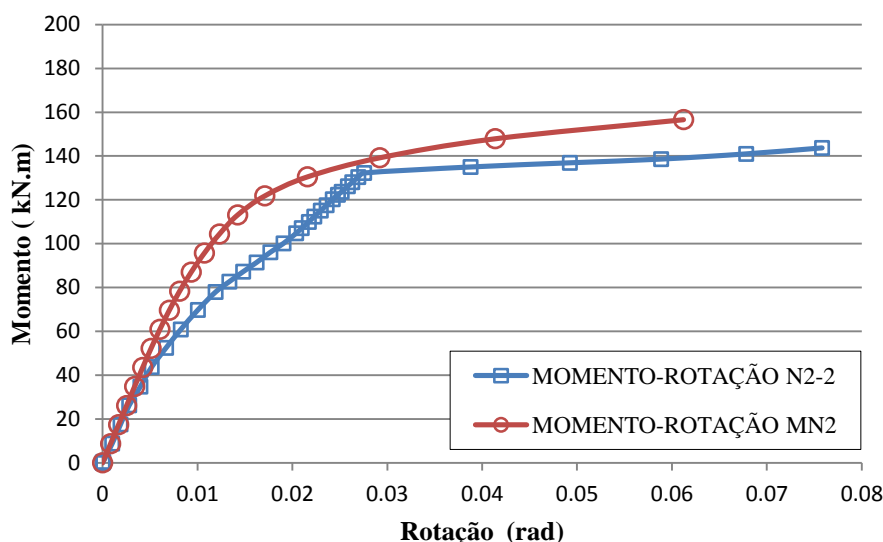


Figura 6.6 - Curvas Momento-Rotação experimental e numérica para o ensaio N2-2 e modelo numérico MN2.

6.3.- Comparação Entre os Resultados do Modelo Numérico MN3 e Ensaio Experimentais N3-1 e N3-2 do Protótipo P3

Como descrito anteriormente, foi aplicada uma carga máxima de 100 kN no modelo numérico MN3 e prevista a mesma no protótipo P3 dos ensaios N3-1 e N3-2, cujas dimensões estão detalhadas na Tabela 6.1. No modelo numérico houve o escoamento do material da face da coluna primeiramente pela roseta R4 com uma carga aproximada de 70 kN, o que mostrou uma boa correlação com o ensaio experimental N3-1 ocorrendo o modo de falha da plastificação da face da coluna. Já para o ensaio N3-2 o escoamento experimental ocorreu aproximadamente para uma carga de 66,152 kN para a roseta R3. Nas Figuras 6.7 e 6.8 têm-se os gráficos da carga aplicada versus a tensão de von Mises comparativos entre os resultados experimentais e os numéricos para as rosetas posicionadas na face da coluna para os ensaios N3-1 e N3-2 respectivamente.

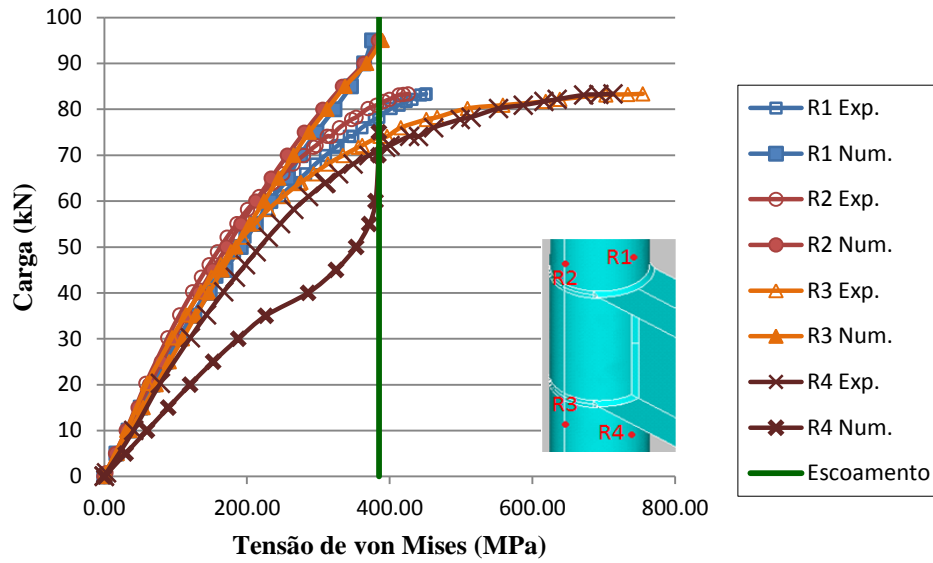


Figura 6.7 - Comparação experimental e numérica para Carga x Tensão de von Mises do protótipo P3, ensaio N3-1 e modelo numérico MN3.

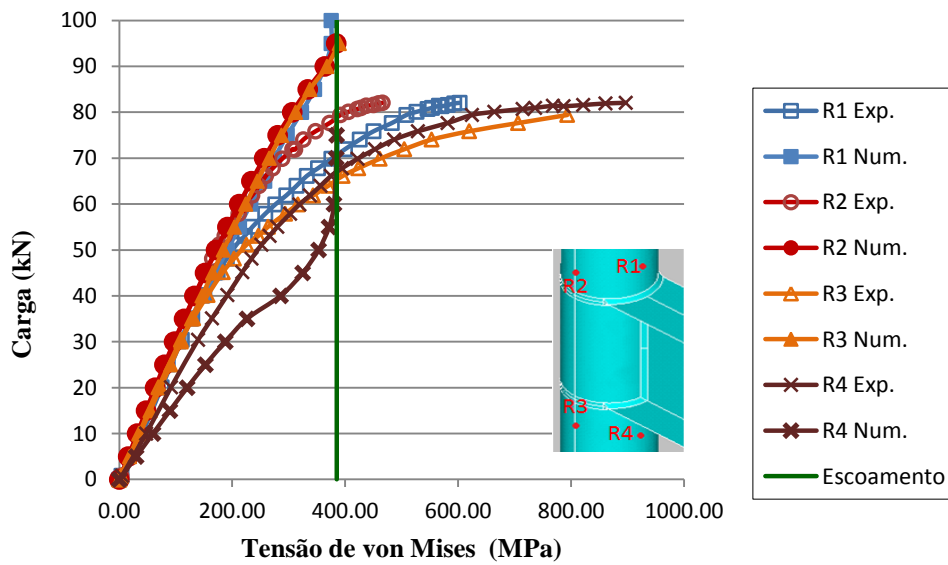


Figura 6.8 - Comparação experimental e numérica para Carga x Tensão de von Mises do protótipo P3, ensaio N3-2 e modelo numérico MN3.

Os resultados das tensões das rosetas R2 e R3 no modelo MN3 mostraram uma boa correlação, pois estão em posições simétricas na coluna, R2 e R3 que sofrem influência das forças de tração e compressão transmitidas pela viga.

Na Figura 6.9, tem-se a distribuição das tensões de von Mises para a ligação do modelo MN3 com fator de escala igual a três dos protótipos P3 dos ensaios N3-1 e N3-2. Lembrando que a tensão de escoamento do perfil da coluna é 385 MPa e da viga foi considerado 345MPa, pode-se perceber nitidamente na figura, as regiões de tração e compressão provocadas pelas mesas da viga, o que caracteriza uma ovalização do tubo.

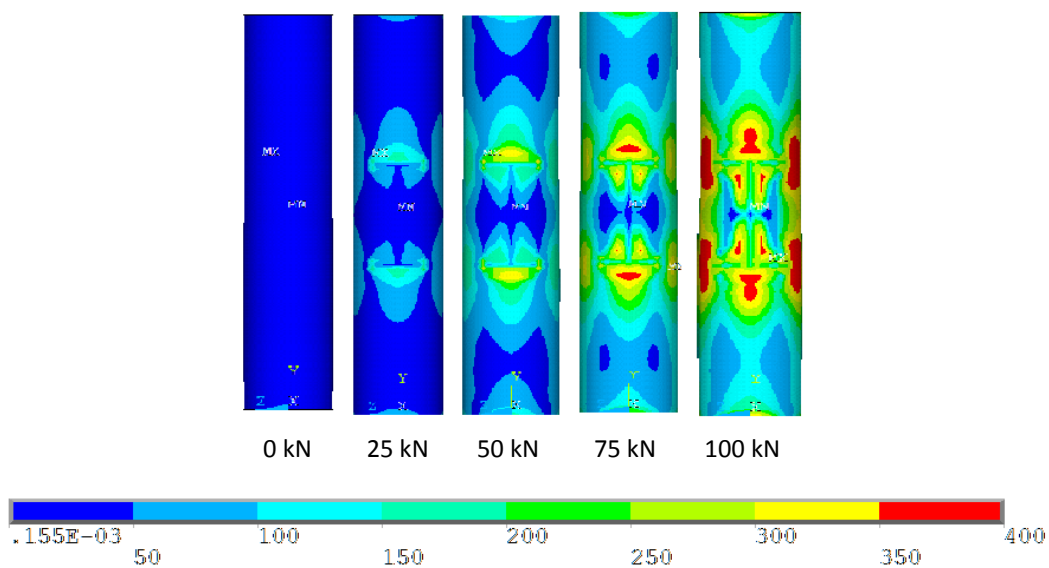
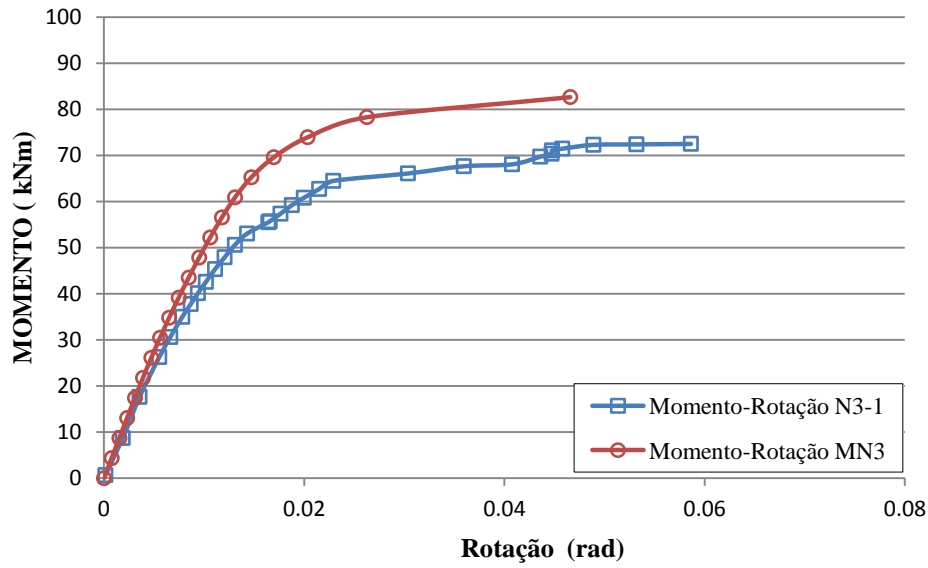


Figura 6.9 - Distribuição da tensão de von Mises para o modelo MN3.

Os valores máximos de momento fletor e rotação para o modelo MN3 foram 82,65 kNm e 0,0466 rad, respectivamente. As Figuras 6.10 e 6.11 mostram as curvas momento-rotação comparativas do modelo numérico MN3 e dos ensaios experimentais N3-1 e N3-2. Para o cálculo da rigidez do modelo MN3, foi obtido o valor de 5165,63 kNm/rad.



Figur 6.10 - Curvas momento-rotaco do modelo MN3 e do ensaio N3-1.

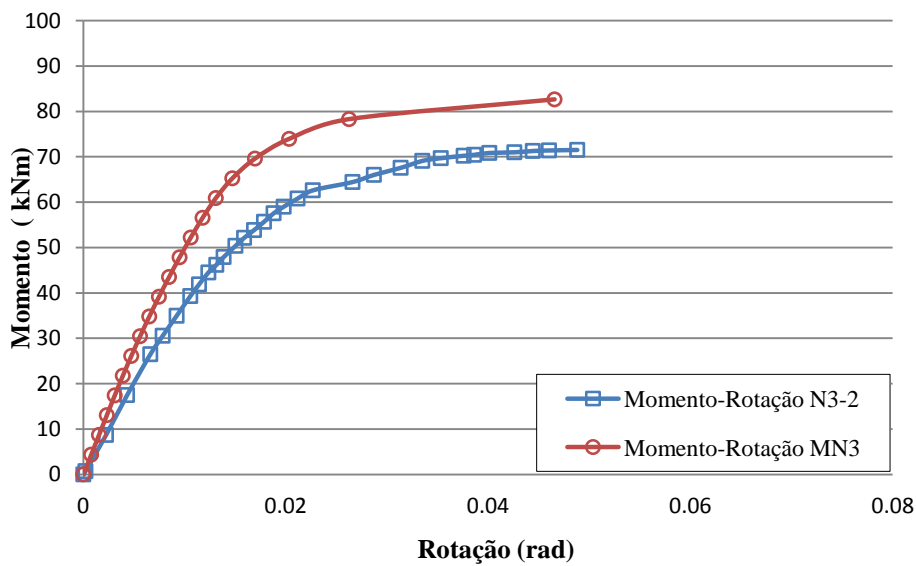


Figura 6.11 - Curvas momento-rotaco do modelo MN3 e do ensaio N3-2.

A Tabela 6.2 a seguir apresenta uma compilao dos parâmetros obtidos nas análises experimentais, numéricas e teóricas, onde estão listados os resultados experimentais, numéricos e teóricos do Momento Resistente ($M_{R,d}$) de acordo com a Tabela 2.1, Momento máximo de cada ligao ensaiada (M_{max}), a rotaco máxima (θ_{max}) e a rigidez de cada ligao.

Tabela 6.2 - Comparação entre os resultados experimentais e numéricos das ligações estudadas.

| Ensaio | $M_{R,d}$ (kN.m) | $M_{max.}$ (kN.m) | | $\theta_{max.}$ (rad) | | Rigidez (kN.m/rad) | | $\frac{Rig_{exp.}}{Rig_{num.}}$ |
|--------|---------------------|-------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|----------|---------------------------------|
| | | Exp. | Num. | Exp. | Num. | Exp. | Num. | |
| N2-1 | 160,54 | 162,72 | 156,60 | 0,0749 | 0,0613 | 8681,11 | 10103,22 | 0,86 |
| N2-2 | 160,54 | 143,66 | 156,60 | 0,0737 | 0,0613 | 9004,27 | 10103,22 | 0,89 |
| N3-1 | 53,60 | 72,52 | 82,65 | 0,0586 | 0,0466 | 4759,71 | 5165,63 | 0,92 |
| N3-2 | 53,60 | 71,56 | 82,65 | 0,0500 | 0,0466 | 4045,91 | 5165,63 | 0,78 |

Na Tabela 6.3 são apresentadas as cargas últimas de cada ligação estudada.

Tabela 6.3 – Cargas últimas das ligações.

| Coluna | Viga | Ensaio | Carga Experimental (kN) | | Carga Numérica (kN) | $\frac{P_{y,exp.}}{P_{y,num.}}$ |
|-----------|-----------|--------|----------------------------|-----------|------------------------|---------------------------------|
| | | | $P_{y,exp}$ | P_{max} | $P_{y,num}$ | |
| 219,1x9,5 | W310x38,7 | N2-1 | 140,90 | 187,03 | 140,00 | 1,006 |
| 219,1x9,5 | W310x38,7 | N2-2 | 135,08 | 186,69 | 140,00 | 0,965 |
| 219,1x8,2 | W250x17,9 | N3-1 | 71,73 | 83,35 | 70,00 | 1,025 |
| 219,1x8,2 | W250x17,9 | N3-2 | 66,15 | 82,21 | 70,00 | 0,945 |

Pode-se observar pela Tabela 6.3 que houve uma boa correlação entre os resultados experimentais e numéricos com relação à carga de escoamento. O modo de falha foi o mesmo, a plastificação da face da coluna, para os resultados experimentais e numéricos.

6.4 Comparação Entre os Resultados Experimentais e Teóricos

A Tabela 6.4 mostra a comparação entre os resultados experimentais e teóricos de cada ligação estudada, onde observa-se que houve uma boa correlação entre os valores da rigidez experimental e teórica principalmente para os ensaios do protótipo P2, ensaios N2-1 e N2-2.

Tabela 6.4 - Comparação entre os resultados teóricos e experimentais.

| Ensaio | Teórico | | Experimental | | $\frac{Rig_{teo.}}{Rig_{exp.}}$ |
|--------|---------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------------|
| | $M_{R,d}$ (kN.m) | Rigidez (kN.m/rad) | $M_{max.}$ (kN.m) | Rigidez (kN.m/rad) | |
| N2-1 | 160,54 | 8089,23 | 162,72 | 8681,11 | 0,93 |
| N2-2 | 160,54 | 8089,23 | 143,66 | 9004,27 | 0,89 |
| N3-1 | 53,60 | 2227,66 | 72,52 | 4759,71 | 0,47 |
| N3-2 | 53,60 | 2227,66 | 71,56 | 4045,91 | 0,56 |

Na Figura 6.12 tem-se a representação da rigidez teórica ($C_{b,ip}$), obtida segundo a Equação 2.4 para diversas esbeltezes da coluna tubular representado pelo parâmetro 2γ . Este parâmetro representa a relação entre o diâmetro e a espessura da coluna. Observa-se também que no mesmo gráfico está representada a curva de rigidez para os valores de β de cada viga analisada. Para a viga W 250 x 17,9 tem-se $\beta = 0,46$ e para a viga W 310 x 38,7 $\beta = 0,75$. Destaca-se que β é a relação entre a largura do flange da viga pelo diâmetro da coluna.

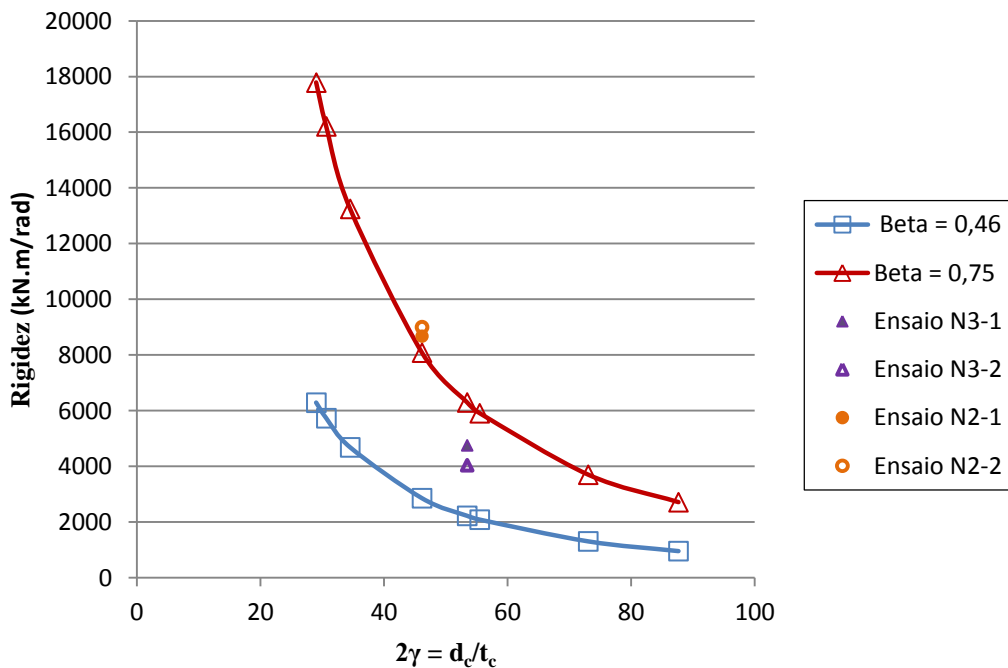


Figura 6.12 - Curvas rigidez versus 2γ experimental e teórico.

Para os ensaios N2-1 e N2-2, há boa correlação entre os resultados teóricos e experimentais, sendo o valor de β (relação entre mesa da viga pelo diâmetro da coluna) igual a 0,75. Ao passo que para os ensaios N3-1 e N3-2, cujo valor de β é de 0,46 houve uma dispersão maior dos valores teóricos, sendo mais conservadores.

Pode-se sugerir um ajuste do valor da rigidez da Equação 2.2 transcrita a seguir, a fim de considerar a real influência da mesa da viga na rigidez da ligação.

$$K_{TP-1} = 1,9Et_c\beta^{1,3}(2\gamma)^{-0,7} \quad \text{para } 0,7 \leq \beta < 1,0 \quad (6.1)$$

Ajustando-se a Equação 2.2 para,

$$K_{TP-1} = 3,0Et_c\beta^{1,3}(2\gamma)^{-0,7} \quad \text{para } 0,4 \leq \beta < 0,7 \quad (6.2)$$

Dessa forma, obtém-se o valor de rigidez $C_{b,ip}$ igual a 3517,36 kN.m/rad que se aproxima do resultado experimental que é igual a 4045,91 kN.m/rad.

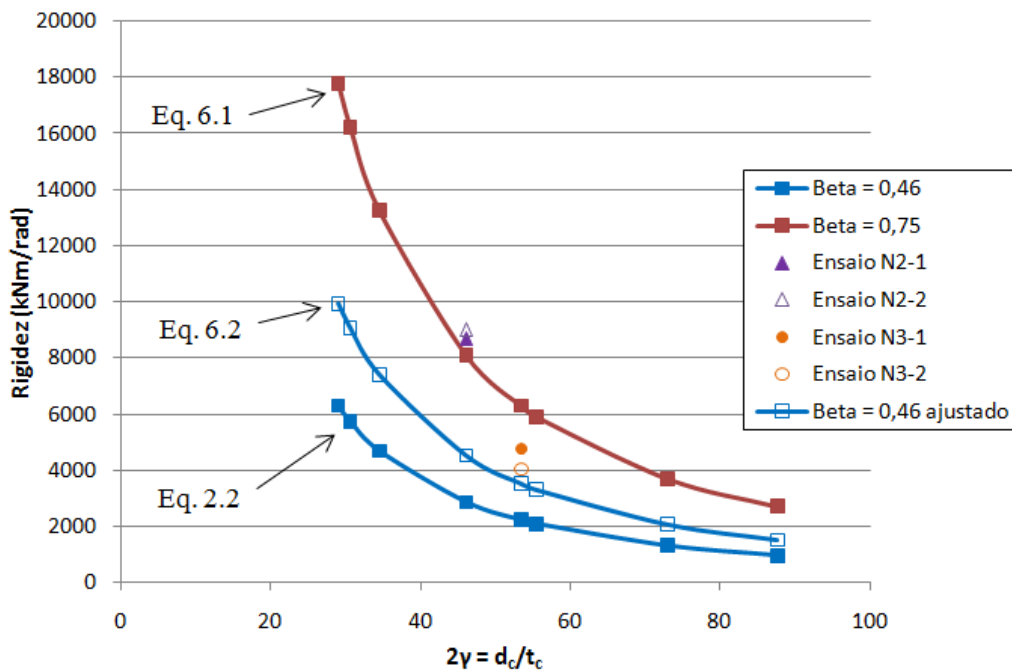


Figura 6.13 - Ajuste da curva Teórica.

6.5 Classificação das Ligações Analisadas Experimentalmente e Numericamente

Com os resultados obtidos experimentalmente e numericamente é possível classificar as ligações analisadas. É indispensável tal classificação, pois permite que seja feita a escolha da configuração da ligação pretendida na fase de projeto de uma estrutura.

Para a classificação das ligações segundo a rigidez, o procedimento adotado é do Eurocode 3 (2005), onde foram descritos seus limites no capítulo 1. Tal classificação é exibida na Tabela 6.5 a seguir, onde as ligações em estudo foram classificadas como semi-rígidas.

Tabela 6.5 - Classificação segundo a rigidez das ligações, pelo Eurocode 3 (2005).

| Protótipo | | Ensaio | Rigidez da Ligação (kN.m) | | Classificação da Ligação |
|-------------|--------------|--------|---------------------------|----------|--------------------------|
| Coluna | Viga | | Exp. | Num. | |
| 219,1 x 9,5 | W 310 x 38,7 | N2-1 | 8641,11 | 10103,22 | Semi-Rígida |
| 219,1 x 9,5 | W 310 x 38,7 | N2-2 | 9004,27 | 10103,22 | Semi-Rígida |
| 219,1 x 8,2 | W 250 x 17,9 | N3-1 | 4759,71 | 5165,63 | Semi-Rígida |
| 219,1 x 8,2 | W 250 x 17,9 | N3-2 | 4045,91 | 5165,63 | Semi-Rígida |

A Tabela 6.6 mostra os valores dos resultados experimentais, numéricos e teóricos sendo estes ajustados conforme proposição apresentada pelas Equações .6.1 e 6.2.

Tabela 6.6 - Comparação entre os resultados experimentais, numéricos e teóricos.

| Ensaio | $M_{R,d}$ (kN.m) | $M_{max.}$ (kN.m) | | $\theta_{max.}$ (rad) | | Rigidez (kN.m/rad) | | |
|--------|------------------|-------------------|--------|-----------------------|--------|--------------------|----------|---------|
| | | Exp. | Num. | Exp. | Num. | Exp. | Num. | Teo. |
| N2-1 | 160,54 | 162,72 | 156,60 | 0,0749 | 0,0613 | 8681,11 | 10103,22 | 8089,23 |
| N2-2 | 160,54 | 143,66 | 156,60 | 0,0737 | 0,0613 | 9004,27 | 10103,22 | 8089,23 |
| N3-1 | 53,60 | 72,52 | 82,65 | 0,0586 | 0,0466 | 4759,71 | 5165,63 | 3517,36 |
| N3-2 | 53,60 | 71,56 | 82,65 | 0,0500 | 0,0466 | 4045,91 | 5165,63 | 3517,36 |

Pode-se observar uma boa correlação entre os resultados da rigidez numérica e teórica para os ensaios da ligação estudada tendo-se uma boa precisão da capacidade de rotação e rigidez da ligação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme o crescimento da utilização do aço na construção civil como elemento estrutural, diversas pesquisas nacionais e internacionais estão sendo realizadas para o desenvolvimento e aprimoramento de novas técnicas e métodos construtivos nesta área.

Tornou-se mais frequente o uso de perfis estruturais tubulares no Brasil, sendo necessário o desenvolvimento de pesquisas em relação à utilização do mesmo, como por exemplo, a utilização de colunas em perfis de aço sem costura com seção transversal circular ligado através de solda por uma viga de seção transversal tipo I. Sendo muito importante a sua devida classificação em termos de rigidez para que se possa permitir a escolha da ligação a ser pretendida na fase de projeto da estrutura.

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo principal, a análise experimental de modo a analisar as prescrições de norma e aferir o modelo numérico representativo da ligação quanto a sua rigidez. O que contribui para o desenvolvimento da linha de pesquisa sobre ligações de estruturas metálicas tubulares.

A seguir tem-se as principais conclusões obtidas.

Com relação ao programa experimental, a realização dos ensaios na vertical mostrou-se eficiente com economia de equipamentos e sistemas de montagem e carregamento, devido ao uso e adaptações de peças já existentes. A instrumentação dos protótipos através dos extensômetros elétricos, LVDT's e deflectômetros foi adequada para a análise realizada. A aplicação dos carregamentos foi bem coordenada como se pôde verificar pela sequência de passos de carga a partir dos dados adquiridos pelo sistema automático de aquisição de dados. Os resultados experimentais obtidos proporcionaram a determinação da rigidez da ligação, distribuição de tensões na região da coluna e da viga, o mecanismo de colapso desenvolvido e a carga última aplicada.

A partir das prescrições normativas do Eurocode 3 (2005) e do CIDECT (2004), foram feitas as avaliações quanto a esbeltez, resistência e rigidez de ligações IC. Essas avaliações foram feitas para β (b_f/d_c) igual a 0,46 e 0,75.

Observou-se que a largura da mesa da viga influencia o comportamento da ligação quanto a rigidez. No entanto, a redução da mesa para níveis como da viga de perfil W 250 x 17,9 ($\beta = 0,46$) leva a resultados conservadores em relação aos experimentais. Isso é justificado pela própria formulação do modelo utilizado nas prescrições. Essa formulação é desenvolvida a partir da influência da chapa (mesa) na coluna tubular circular. Neste sentido propõe-se ajuste na equação da determinação da rigidez segundo limites de relação entre a largura do flange e o diâmetro da coluna tubular circular, β (equações 6.1 e 6.2).

O modelo numérico seguiu as mesmas diretrizes utilizadas em trabalhos anteriores, (Mendanha (2006), Mendes (2008) e Mayor (2010)), ou seja, a utilização de elemento de casca (“Shell 281”). A modelagem do perfil circular da coluna e a modelagem do cordão de solda juntamente com o encontro da viga, foi bastante eficaz nos modelos numéricos e foi satisfatório quando comparado com os resultados experimentais obtidos neste trabalho. Com relação à distribuição de tensões observou-se uma maior dispersão na região de concentração da carga de tração onde estavam posicionadas as rosetas R4 nos protótipos ensaiados e nos modelos numéricos analisados. Essa dispersão foi visualizada quando foram comparados os resultados das tensões de von Mises para os modelos numéricos e ensaios experimentais correspondentes. Neste caso, o modelo MN3, que tem uma viga com altura menor, tem uma região maior de influência das forças transmitidas pela viga para a coluna. Observou-se uma boa correlação entre as cargas de plastificação da coluna e entre as curvas momento-rotação da ligação mostrando pouca dispersão da rigidez experimental e numérica.

Quanto à classificação da rigidez, todos os protótipos experimentais e numéricos apresentaram um comportamento semi-rígido, o mesmo obtido pelo Eurocode 3.

Os modos de falha experimentais, numéricos e teóricos foram os mesmos sendo caracterizados pela plastificação da face da coluna.

Verificou-se que o aumento da altura da seção transversal da viga e, ou o aumento da espessura da coluna tubular circular acarreta o acréscimo de resistência da ligação.

Com relação a trabalhos futuros pode-se sugerir:

- Avaliação da influência da alma da viga na rigidez da ligação, uma vez que essa influência não é considerada nas prescrições normativas.
- Fazer novas avaliações de modelos experimentais com faixas de β entre 0,45 a 0,70 com γ variável para essas faixas, para que se possa obter um limite de tendência, uma vez que para valores mais baixos de β as prescrições normativas são bem conservadoras como observou-se no presente trabalho.
- Avaliar outros métodos de determinação da rigidez da ligação.
- Avaliar experimentalmente um modelo de coluna tubular de seção circular ligado a uma viga de seção transversal tipo I em cada lado, sob a influência de carga vertical e sob o efeito de cargas de compressão na coluna.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Institute of Steel Construction Inc - AISC, 2005. Load and resistance factor design specification for steel hollow structural sections.

Ansys, Inc. theory reference (version 11.0), 2007.

ARAÚJO, A. H. M., Requena, J. A. V., Minchillo, D. G. V., Thomaz, S. A. M., 2001. Projeto, fabricação e montagem de estruturas com perfis tubulares. I CICOM, IV. Seminário Internacional do uso de estruturas metálicas na construção civil. São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800 (2008). Projeto e execução de estruturas de aço e de estruturas mistas aço concreto de edifícios. Rio de Janeiro.

BRANCO, R. H. F.; SANTOS, R. M.; REQUENA, J. A. V.; ARAÚJO, A. H. M. (2002). Automação do Projeto de Pórticos Metálicos Planos Constituídos de Barras Tubulares. II Congresso Internacional da Construção Metálica – II CICOM. São Paulo, SP – Brasil.

BRANCO, R. H. F.; SOUZA, M. G. Q.; REQUENA, J. A. V. (2004). Automação do Projeto de Estruturas Metálicas Planas Utilizando Perfis Tubulares. XXXI Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural. Mendoza, Argentina.

BRANCO, R. H. F.; REQUENA, J. A. V. (2005). Análise Computacional Comparativa Entre Estruturas Metálicas Tubulares Com Barras Rotuladas e Com Barras Aporticadas. Proceedings of the XXVI Iberoian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering - CILAMCE 2005. Guarapari, ES – Brasil.

CARVALHO, P.H. (2005). Avaliação Numérica do Comportamento Estrutural de Ligação Entre Pilar de Seção Tubular Circular e Viga de Seção “T”. 94p. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

CIDECT, (1996). Design Guide for Circular Hollow Section (CHS) Joints Under Predominantly Static Loading. Köln:Verl. TÜV Rheinland.

CIDECT, (2004). Design Guide for Structural Hollow Section Column Connectios. Köln:Verl. TÜV Rheinland.

Davies, G., Crockett, P., (1996). The strength of welded T-DT joints in rectangular and circular hollow section under variable axial loads. Journal of Constructional Steel Research, vol. 37, n. 1. p. 1-31,

European Commitee for Standardisation, Eurocode 3, 2005: Design of steel structures: ENV 1993 – 1-1: General rules and rules for buildings.

Eurocode 3, 2005. Design of steel structures – part 1.8: Design of joints, CEN, European Committee for Standardisation, Brussels. prEN 1993-1.8

FIRMO, C. S., 2005 Arquitetura com perfis tubulares: uma nova linguagem. Trabalho apresentado à III Feira Internacional de Tubos, Válvulas, Conexões e Componentes, Tubotech, São Paulo.

Freitas A. M. S., Mendes F. C., Freitas M.S.R. 2008, Finite Elements Analyses of welded T joints. Eurosteel 2008

FREITAS, P. C. B. (2009). Análise Numérica de Ligações Metálicas Viga-Coluna com Coluna Tubular Circular. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

GERKEN, F. S., 2003. Perfis Tubulares: Aspectos arquitetônicos e estruturais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.

GHO, W.M.; GAO, F.; YANG, Y. (2005). Load Combination Effects on Stress and Strain Concentration on Completely Overlapped Tubular K(N)- Joints. Thin-Walled Structures. Vol. 43, p. 1234-1263.

KISHI, N.; CHEN, W. F. (1990). Moment-Rotations Relations of Semirigid Connections with Angles. Journal of Structural Engineering. v. 116, n. 07, p. 1813-1834.

LEE, M. M. K., & Wilmshurst, S. R., 1995. Numerical modelling of CHS Joints with multiplanar double-K configuration. Journal of Constructional Steel Research, vol. 32. p. 281-30.

LIMA, L. R. O., Neves, L. F. C., Silva, J. G. S., Vellasco, P. C. G. S., 2005. Análise Paramétrica de Ligações “T” com Perfis Tubulares em Aço através de um Modelo de Elementos Finitos. CILAMCE 2005, Guarapari, Espírito Santo.

MAGGI, Y.I.(2004). Análise do Comportamento Estrutural de Ligações Parafusadas Viga-Pilar com Chapa de Topo Estendida. São Carlos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Manual Vallourec & Mannesmann Tubes. Catálogos com informações técnicas. Tubos estruturais de seção circular (MSH). Dimensões, Propriedades geométricas e materiais.

Manual Vallourec & Mannesmann Tubes. Tubos Estruturais, Seção Circular, Quadrada e Retangular.

MATOS, R. M. M. P. de ; NEVES, L. F. da C. ; LIMA, Luciano Rodrigues Ornelas de . Influence of chord axial loading on the stiffness and resistance of welded T joints of SHS members. In: SDSS'Rio 2010 - International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, 2010, Rio de Janeiro. Proceedings of the SDSS'Rio 2010 - International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures. Rio de Janeiro : Editora UERJ/UFRJ, 2010. v. 1. p. 247-254.

MATOS, R. M. M. P. de ; NEVES, L. F. da C. ; LIMA, Luciano Rodrigues Ornelas de ; VELLASCO, P. C. G. da S. ; SILVA, J. G. S. da . Evaluation of the Resistance of RHS T Joints Under Axial Loading A Parametric Study. In: CC2009 - The Twelfth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, 2009, Ilha da Madeira. Proceedings of the CC2009 - The Twelfth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing. Edimburgo : Civil Comp Press, 2009. v. 1. p. 1-20.

MAYOR, I. M. S. (2010). Análise Teórica-Experimental de Ligações Tipo “K” e “KT” Compostas por Perfis Tubulares de Seção Retangular e Circular. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

MENDANHA, F. O. (2006). Análise de ligações de perfis tubulares em aço do tipo K e KT. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.

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

Michillo, D. G. V., 2003. Estudo de comportamento de ligações de placa de base para estruturas metálicas tubulares. Dissertação de mestrado. Unicamp, Campinas.

PACKER, J. A. (1979). A Computer Program for the Structural Analysis of Welded Tubular Joints with RHS Chords. *Advances in Engineering Software*, v. 01, n. 04, p. 153-164.

PACKER, J.A.; HENDERSON, J.A. (1996). *Design Guide for Hollow Structural Section Connections*. 6.ed. Ont: Canadian Institute of Steel Construction.

PACKER, J.A.; MASHIRI, F.R.; ZHAO, X.L.; WILLIBALD, S. (2007). Static and Fatigue Design of CHS-to-RHS Welded Connections Using a Branch Conversion Method. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 63, p. 82-95.

RAO, D.V.P.; KUMAR, S.R.S. (2006). RHS Beam-to-Column Connection with Web Opening – Parametric Study and Design Guidelines. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 62, p. 747-756.

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*. Ed. 1. Campinas, SP – Brasil.

SAMARRA, F. A.; DARIO, M.; REQUENA, J. A. V. (2005). Análise Comparativa Entre o Método das Tensões Admissíveis e o Método dos Estados Limites Para Estruturas Metálicas Treliçadas de Perfis Tubulares. *Proceedings of the XXVI Ibreian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering - CILAMCE 2005*. Guarapari, ES – Brasil.

SANTOS, A. L. E. F.; REQUENA, J. A. V.; FREITAS, A. M. S. (2002). Ligações de Estruturas Metálicas Tubulares Planas: Abordagem Teórica. *II Congresso Internacional da Construção Metálica – II CICOM*. São Paulo, SP – Brasil.

SANTOS, A. L. E. F.; REQUENA, J. A. V. (2003). Análise de Ligações Soldadas Entre Barras Tubulares de Treliça do Tipo K. *Proceedings of the XXIV Ibreian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering - CILAMCE 2005*. Ouro Preto, MG – Brasil.

SHANMUGAM, N.E.; FELLOW; TING, L.C. (1995). Welded Interior Box-Column to I-Beam Connections. *Journal of Structural Engineering*. Vol. 121, No 5, p. 824-830.

SOUZA, M. G. Q.; REQUENA, J. A. V. (2005). Um Sistema CAD/CAE no Projeto de Estruturas Metálicas Planas, Formados por Perfis Tubulares. *Proceedings of the XXVI Ibreian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering - CILAMCE 2005*. Guarapari, ES – Brasil.

SZLENDAK, J. (1991). Beam-Column Welded RHS Connections. *Thin Walled Structures*, n. 12, p. 63-80.

TRISTÃO, G. A. (2006). Análise Teórica e Experimental de Ligações Viga Mista-Pilar de Extremidade com Cantoneiras de Assento e Alma. São Carlos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

VEGTE, G.J. Van der, Makino, Y., 2006. The ultimate strength of axially loaded CHS uniplanar T-joints subjected to axial chord load. Anais do 11º ISTS, International Symposium on Tubular Structures, Québec, Canada.

VIEIRA, R. F.; REQUENA, J. A. V.; FREITAS, A. M. S.; MINCHILLO, D. G. V. (2006). Análise Experimental de Ligações Soldadas de Barras Tubulares de Aço, Utilizadas em Treliças Planas. III Congresso Internacional da Construção Metálica – III CICOM. São Paulo – Brasil.

VIEIRA, R. F.; REQUENA, J. A. V.; FREITAS, A. M. S.; MINCHILLO, D. G. V. (2006). Uma investigação Experimental de Ligações Soldadas de Barras Tubulares de Aço, Do Tipo K, Utilizadas em Treliças Planas. Anais das XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural. Campinas, SP – Brasil.

WARDENIER, J., 2000. Hollow Sections in Structural Applications. Delft University Technology of Netherlands.

WINKEL, G.D.DE.; RINK, H.D.; WARDENIER, J.; PUTHLI, R.S. (1993). Behaviour and static strength of unstiffened I-beam to circular column connections under multiplanar in-plane bending moments. Proceedings of the Third International Offshore and Polar Engineering Conference. p 167-174.

WINGERDE, A. M.; PACKER, J. A.; WARDENIER, J. (1995) Criteria for the Fatigue Assessment of Hollow Structural Section Connections. J. Construct Steel Research, v. 35, p. 71-115.

WINGERDE, A. M. V., Packer, J. A., Wardenier, J., 2001. Simplified SCF Formulae and Graphs for CHS and RHS K and KK Connections. Journal of Constructional Steel Research, vol. 53.

WINKEL, G.D.; RINK, H.D.; WARDENIER, J. (1994). The Static Strength of Uniplanar and Multiplanar I-beam to Tubular Column Connections Loaded with In-Plane Bending Moments. Proceedings of the Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference. p 65-72.