



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

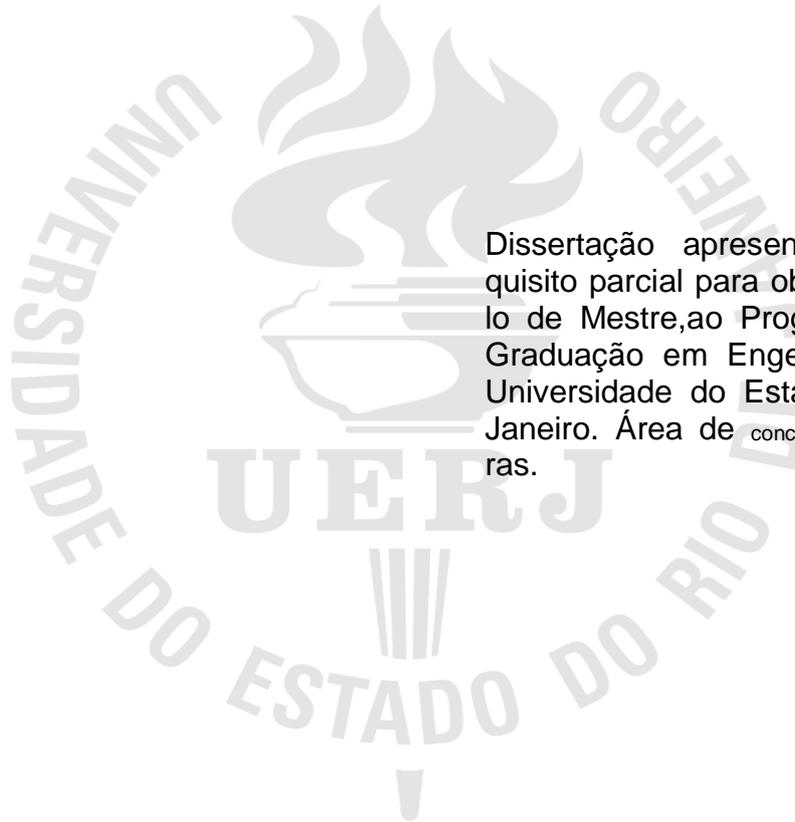
Mário Vitor de Carvalho Soares

**Comportamento Estrutural de Tubos Circulares de Aço Inoxidável
submetidos a Compressão, Flexão e Flexo-Compressão**

Rio de Janeiro
2017

Mário Vitor de Carvalho Soares

**Comportamento Estrutural de Tubos Circulares de Aço Inoxidável submetidos
a Compressão, Flexão e Flexo-Compressão**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientadores: Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima
Prof. Dr. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco
Prof. Dr. André Tenchini da Silva

Rio de Janeiro

2017

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

S676 Soares, Mário Vitor de Carvalho.
Comportamento estrutural de tubos circulares de aço inoxidável submetidos a compressão, flexão e flexo-compressão / Mário Vitor de Carvalho Soares. – 2017.
97f.

Orientadores: Luciano Rodrigues Ornelas de Lima, Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco e André Tenchini da Silva.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Aço inoxidável - Teses. 3. Tubos - Teses. 4. Aço tubular - Estruturas - Teses. I. Lima, Luciano Rodrigues Ornelas de. II. Vellasco, Pedro Colmar Gonçalves da Silva. III. Silva, André Tenchini da. IV. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. V. Título.

CDU 624.014

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Mário Vitor de Carvalho Soares

**Comportamento Estrutural de Tubos Circulares de Aço Inoxidável submetidos
a Compressão, Flexão e Flexo-Compressão**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em:

Banca Examinadora:

Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima – Presidente / Orientador

Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco – Orientador

Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. André TENCHINI da Silva – Orientador

Faculdade de Engenharia – UERJ

Profa. Monique Cordeiro Rodrigues

Faculdade de Engenharia – UERJ

Profa. Arlene Maria Cunha Sarmanho

Faculdade de Engenharia – UFOP

Rio de Janeiro

2017

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Mauro de Oliveira Soares e Rita de Cássia Silva de Carvalho Soares e a todos meus parentes. Sem eles, nada disso seria possível, agradeço eternamente a eles por todos os conselhos e ajudas nos momentos difíceis.

À minha namorada Raquel Haddad Pereira, por antes de tudo a amizade, por toda ajuda e paciência e por ser a mulher mais maravilhosa do mundo.

Às amigas formadas e que foram tão importantes durante todo este processo. Especialmente a Arthur Araujo de Menezes, Bruno Rodrigues Pereira Guimarães e Luiz Paulo Oliveira Lyra de Miranda.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e todos meus familiares que tornaram possível toda a minha formação, desde a minha infância até o mestrado. Graças ao carinho que eles me deram por todos esses anos de evolução da minha vida foram possíveis de serem conquistados.

Aos meus orientadores, Professor Luciano Rodrigues Ornelas de Lima, Professor Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco e Professor André Tenchini da Silva por tudo que têm me ensinado, sempre de maneira muito séria e honesta e pelo esforço que tem dedicado a todos os alunos que tem orientado. A atividade que eles praticam tem toda minha admiração. Agradeço sinceramente por todo esforço a que eles têm se dedicado a pesquisa e por toda a ajuda durante o mestrado.

Ao Prof. Manuel Augusto do Laboratório de Engenharia Mecânica da UERJ, sempre disposto a ajudar todos os alunos em qualquer momento do dia no que fosse preciso para a realização de todos os ensaios, sua ajuda foi essencial para realização deste trabalho.

A Professora Monique Cordeiro Rodrigues por toda ajuda que me forneceu para que eu pudesse realizar meus ensaios.

Aos funcionários do laboratório de Engenharia Civil da UERJ, em especial ao Antônio Inácio e ao Paulo, que sempre estiveram presentes e solícitos quando precisei de ajuda.

A todos os amigos que me ajudaram de maneira decisiva durante o mestrado, de maneira direta ou indireta. Em especial um amigo que conheci ainda no período da graduação: Arthur Araujo de Menezes.

A UERJ, sem ela nada disso seria possível.

Para examinar a verdade, é necessário, uma vez na vida,
colocar todas as coisas em dúvida o máximo possível.

René Descartes

RESUMO

SOARES, Mário Vitor de Carvalho. *Comportamento estrutural de tubos circulares de aço inoxidável submetidos a compressão, flexão e flexo-compressão*. 2017. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

O uso do aço inoxidável com aplicações na engenharia estrutural vem crescendo ao longo dos últimos anos, principalmente devido as suas características de alta resistência a corrosão, durabilidade, manutenção simples, resistência ao fogo e, além disso, alto apelo estético e baixo impacto ambiental. Atualmente, as normas de projeto de engenharia estrutural consideram o comportamento do aço inoxidável de maneira similar ao comportamento do aço carbono. Todavia, sabe-se que quando este tipo de equivalência é feito, não se aproveita o aço inoxidável em sua plenitude já que tal material apresenta quatro curvas de tensão versus deformação não-lineares, sem patamar de escoamento e região de encruamento diretamente definidos. Um dos tópicos que ainda não foi completamente compreendido é o comportamento de colunas, vigas-coluna e vigas de aço inoxidável compostas por seções tubulares circulares (CHS). Desta maneira, a presente dissertação tem como objetivo estudar o comportamento destes elementos estruturais. Desta maneira, neste estudo um programa experimental foi executado e um modelo numérico também foi desenvolvido para tubos circulares de aço inoxidável austenítico de seção CHS 101,6x1,5, contemplando colunas, viga-colunas e vigas. Os modelos numéricos desenvolvidos em elementos finitos foram calibrados com os testes do programa experimental. Finalmente, os resultados de dez diferentes ensaios experimentais foram ainda comparados com métodos de cálculo recomendados pelo Eurocode 3 Parte 1-4 [7] e o Método da Resistência Contínua, método este que ainda não foi integrado na norma europeia até o presente momento. Chegou-se a conclusão que o Eurocode 3 Parte 1-4 [7] é conservador, principalmente quando comparado com o Método da Resistência Contínua [8], para o presente estudo.

Palavras-chave: Aço inoxidável; Tubos circulares; compressão; Flexo-compressão; Flexão; Eurocode; Método da Resistência Contínua.

ABSTRACT

SOARES, Mário Vitor de Carvalho. *Structural behaviour of stainless steel circular tubes subjected to combined axial load and bending*. 2017. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

The use of stainless steel with applications in structural engineering has been growing over the last few years, mainly due to its characteristics of high corrosion resistance, durability, simple maintenance, fire resistance and, in addition, high aesthetic appeal and low impact environmental. Currently, structural engineering design standards consider the behavior of stainless steel in a manner similar to the behavior of carbon steel. However, it is known that when this type of equivalence is made, stainless steel is not used in its fullness since such material presents four non-linear stress versus strain curves, with no yield plateau and strain-hardening region well defined. One of the topics that has not yet been completely understood is the behavior of columns, beams-columns and beams composed of stainless steel circular hollow sections (CHS). In this way, the present dissertation aims to study the behavior of these structural elements. Thus, in this study an experimental program was executed and a numerical model was also developed for austenitic stainless steel tubes of section CHS 101,6x1,5, including columns, beam-columns and beams. The numerical models developed in finite elements were calibrated with the experimental program tests. Finally, the results of ten different experimental tests were further compared with the calculation methods recommended by Eurocode 3 Part 1-4 [7] and the Continuous Resistance Method [8], which has not yet been integrated into the European standard up to the present time. It came to the conclusion that Eurocode 3 Part 1-4 [6] is conservative, especially when compared to the Continuous Resistance Method [7], for the present study.

Keywords: Stainless Steel; Circular hollow sections; Compression; Combined axial load and bending; Bending; Eurocode; Continuous Strength Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ponte de <i>Stonecutters</i> – China [3].....	18
Figura 2 – Plataforma de petróleo da North Sea Oil [4]	19
Figura 3 – Petronas <i>Twin Towers</i> [5].....	19
Figura 4 – Gráfico de produção anual do aço inoxidável em mundo. [6]	20
Figura 5 – Gráfico com a relação de consumo do aço inoxidável em setores [6]	20
Figura 6 – Deformadas das colunas ensaiadas [9].....	25
Figura 7 – Diferentes tipos de flambagem observados nos ensaios [16]	26
Figura 8 – Ensaio Experimental [16]	26
Figura 9 - Resultados dos Ensaios Experimentais [16]	27
Figura 10 – Ensaio Experimental e Respectivo Esquema [18]	28
Figura 11 – Resultados experimental e numéricos [18].....	29
Figura 12 – Ensaio experimental e respectivo esquema estrutural [19].....	30
Figura 13 - Resultados experimental e numérico – Flambagem por flexão [20]	31
Figura 14 - Comparação entre o Resultado Experimental e Numérico [22]	32
Figura 15 – Esquema do ensaio experimental – Equipamento [24].....	33
Figura 16 – Ovalização [24]	33
Figura 17 – Esquema de Flexão em Quatro Pontos [25].....	34
Figura 18 – Esquema do ensaio a flexão [26]	35
Figura 19 –Ensaio real montado [26]	35
Figura 20 - Curva carga <i>versus</i> ovalização [26]	36
Figura 21 - Ensaios realizados [28]	37
Figura 22 – Ovalização: curva momento fletor <i>versus</i> Curvatura [29]	37
Figura 23 - Flambagem da face superior seguida da ovalização da seção transversal [31].....	38
Figura 24 - Comparação entre os dados experimental e os critérios da EC3-1-4 [7]	43
Figura 25 - Dados experimentais e curva base do CSM.para seções transversais circulares (CHS) [32]	44
Figura 26 - Modelo do material considerado no Método da Resistência Continua [7]	45
Figura 27 – Diferença entre a curva de tensão <i>versus</i> deformação a compressão e a tração em aços inoxidáveis [35]	52

Figura 28 - Corpos de prova para ensaio de tração de acordo com a NBR 6152 [33]	53
.....	
Figura 29 - Corpo de prova com as dimensões definidas pela NBR 6152 [33], com medidas em mm.....	54
Figura 30 – Curvas tensão x deformação obtida no ensaio de tração	55
Figura 31 - Corpos de prova rompidos	56
Figura 32 – Máquina de Ensaios da Losenhausenwerk	57
Figura 33 – Placa com chanfro e rolo móvel	58
Figura 34 – Esquema estrutural para ensaios de colunas	59
Figura 35 – Ensaio de viga-coluna e sua representação	59
Figura 36 – Esquema do ensaio experimental à flexão pura, com medidas em mm	60
Figura 37 – Ensaio experimental a flexão pura	61
Figura 38 - Apoio da viga de transferência de carga	61
Figura 39 – Instrumentação das colunas e viga-colunas.....	62
Figura 40 – Seções de instrumentação do ensaio experimental da viga	63
Figura 41 - Seções instrumentadas da viga	64
Figura 42 – Posicionamento dos LVDTs nos ensaios de vigas	64
Figura 43 – Curvas carga x deslocamento de ensaios experimentais – viga-colunas – parte 1.....	65
Figura 44 – Curvas carga x deslocamento de ensaios experimentais – viga-colunas – parte 2.....	66
Figura 45 – Curvas carga x rotação das placas dos ensaios experimentais de vigas-colunas.....	67
Figura 46 – Deformadas da coluna e da viga-coluna com $e=15\text{mm}$	68
Figura 47 - Deformadas e modos de falha das colunas e vigas-colunas	68
Figura 48 – Deformadas e modos de falha das vigas-colunas	69
Figura 49 – Carga axial <i>versus</i> deformação da coluna e de vigas-coluna	70
Figura 50 – Curvas carga x deslocamento de todos os ensaios de vigas-colunas ...	71
Figura 51 – Curvas carga <i>versus</i> deslocamento dos ensaios experimentais – vigas	71
Figura 52 – Curvas carga x rotação dos ensaios experimentais de vigas	72
Figura 53 – Flambagem local e ovalização da seção transversal da viga	72
Figura 54 – Seção transversal original x seção transversal ovalizada.....	73
Figura 55 – Medida da ovalização através de LVDTs	73

Figura 56 – Gráfico de ovalização <i>versus</i> momento fletor dos ensaios experimentais de viga	74
Figura 57– Momento fletor <i>versus</i> deformação do ensaio de viga.....	75
Figura 58 – Pontos para determinação do diagrama de interação M x N.....	76
Figura 59 – Geometria do modelo de colunas e vigas-colunas com o eixo coordenado	78
Figura 60 - Representação das condições de contorno do modelo numérico de viga-colunas.....	78
Figura 61 – Excentricidade simulada por meio de um ponto de massa nulo	78
Figura 62 – Geometria do modelo da viga	79
Figura 63 - Representação das condições de contorno do modelo numérico de vigas	80
Figura 64 – Elemento SHELL181 [35].....	80
Figura 65 - Curva tensão x deformação adotada nos modelos numéricos	82
Figura 66 – Curvas carga x deslocamento - modelos numéricos e ensaios experimentais – colunas e vigas-colunas	85
Figura 67 – Curvas carga x deslocamento vertical - modelos numéricos e ensaios experimentais – vigas.....	85
Figura 68 – Diagrama de interação M x N - Experimental e Numérico.....	86
Figura 69– Típicas deformadas dos modelos numéricos da coluna, viga-colunas e da viga – Parte 1	87
Figura 70 - Típicas deformadas dos modelos numéricos da coluna, viga-colunas e da viga – Parte 2	88
Figura 71 – Curva M x N – comparação entre todos os métodos	89
Figura 72 - Esbeltez da seção transversal <i>versus</i> taxa de deformação – valores dos	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes utilizados para cálculo de vigas-colunas de seções tubulares circulares pelo CSM. [32]	50
Tabela 2 – Dados dos ensaios de coluna e viga-colunas	52
Tabela 3 – Dados dos ensaios de vigas.....	52
Tabela 4 – Principais dados da caracterização mecânica a tração do material	55
Tabela 5 – Carga axial máxima e respectivos momentos fletores de cada ensaio ...	76
Tabela 6 – Tabela de vínculos dos modelos de viga-coluna	79
Tabela 7 - Tabela de Vínculos dos modelos de viga	80
Tabela 8 – Pontos de deformação e tensão utilizados na análise numérica.....	81
Tabela 9 – Calibração do modelo de colunas e vigas-colunas	84
Tabela 10 - Resultados Numéricos da Calibração de Vigas	84
Tabela 11 – Cargas máximas de todos os métodos apresentados	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CSM	Continuous Strength Method – Método da Resistência Contínua
EC3 1-1	Eurocode 3 – Parte 1-1: Design of Steel Structures – General rules and rules for buildings
EC3 1-4	Eurocode 3 – Parte 1-4: Design of Steel Structures – General rules – Supplementary rules for stainless steels
FEN	Faculdade de Engenharia
LEC	Laboratório de Engenharia Civil da UERJ
LVDT	Transdutores de Deslocamento
DSM	Método da Resistência Direta
VHS	Aço de Alta Resistência
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

e	Excentricidade do carregamento aplicado na viga-coluna
f_{csm}	Tensão calculada pelo método da resistência continua
f_u	Tensão última de ruptura
f_y	Tensão de escoamento do aço
k	Curvatura de uma viga
k_{el}	Curvatura referente ao escoamento de uma viga
k_u	Curvatura referente a ruptura de uma viga
n	É a relação entre a carga axial aplicada e a carga axial resistente segundo o método considerado
t	Espessura da seção transversal
A	Área da seção transversal
D	Diâmetro da seção transversal
E	Módulo de elasticidade
E_{sh}	Módulo de elasticidade proposto pelo método da resistência contínua utilizado para considerar o fenômeno de encruamento
L	Comprimento da coluna ou viga-coluna
M_{csm}	Resistência a flexão de vigas segundo o método da resistência contínua
M_{ed}	Momento fletor aplicado
$M_{c,Rd}$	Resistência a flexão da seção transversal
$M_{R,csm}$	Resistência a flexão reduzida de viga-colunas
$N_{c,Rd}$	Resistência a compressão da seção transversal
N_{csm}	Resistência a compressão segundo o método da resistência continua
N_{ed}	Carga Axial Aplicada
W_{el}	Módulo de resistência a flexão elástico
W_{pl}	Módulo de resistência a flexão plástico
γ_{M0}	Coefficiente de segurança parcial
δ_u	Deslocamento axial da coluna
ε_{csm}	Deformação calculada pelo método da resistência continua
ε_u	Deformação referente a tensão última de ruptura
ε_y	Deformação referente ao escoamento
$\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y$	Taxa de deformação segundo o método da resistência contínuas
λ_c	Esbeltez da seção transversal
ν	Coefficiente de Poisson

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	17
1. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	24
1.1. Colunas e Vigas-Colunas.....	24
1.2. Vigas.....	32
2. NORMAS E PROCEDIMENTOS DE DIMENSIONAMENTO	39
2.1. Introdução	39
2.2. Cálculo e Dimensionamento	39
3. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	51
3.1. Considerações Iniciais.....	51
3.2. Séries ensaiadas	51
3.3. Caracterização do material	53
3.4. Configuração do ensaio e condições de apoio	56
3.5. Instrumentação	62
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	65
4.1. Generalidades.....	65
4.2. Cargas máximas e modos de falha	65
4.3. Síntese dos resultados	75
5. ANÁLISE NUMÉRICA.....	77
5.1. Geometria e condições de contorno	77
5.2. Malha e elemento finito utilizado.....	80
5.3. Material.....	81
5.4. Metodologia de análise	82
5.5. Calibração do modelo numérico	83
5.6. Comparação entre os métodos	86
6. CONCLUSÕES	92
6.1. Introdução.....	92
6.2. Principais conclusões.....	93
6.3. Principais contribuições deste trabalho	94
6.4. Sugestões para trabalhos futuros.....	94
ANEXO A	96
REFERÊNCIAS	98

INTRODUÇÃO

Generalidades

O aço é, sem dúvida, um dos materiais primordiais utilizados na construção civil. Trata-se de uma liga metálica composta principalmente por ferro e carbono, e por outros elementos de dois tipos: residuais decorrentes do processo de fabricação (silício, manganês, fósforo e enxofre) e elementos adicionados com o intuito de melhorar características físicas e mecânicas, denominados elementos de liga.

Os aços podem ser classificados de acordo com os seguintes aspectos: quantidade de carbono, composição química, sua constituição micro estrutural e sua aplicação.

Na construção civil, a estrutura em aço carbono costuma ser largamente utilizada devido às inúmeras vantagens, tais como: a rapidez na execução da estrutura; o menor peso e o menor volume da construção, o que alivia as fundações; a garantia de um material resistente e seguro, em função de ser um produto industrializado; e a diminuição do desperdício de material. Já a principal desvantagem é o seu custo inicial.

O aço inoxidável, por sua vez, é um aço de alta-liga com altas dosagens de cromo e níquel, podendo conter também ferro, molibdênio e outros elementos, que apresenta propriedades físico-químicas superiores aos aços comuns, justamente por conta das adições desses elementos, sendo a alta resistência à oxidação atmosférica, a durabilidade e a resistência a altas temperaturas, as suas principais características. Este material é dividido em quatro grandes grupos, a saber: austenítico, ferrítico, martensítico e duplex. O aço estudado nos elementos estruturais avaliados neste trabalho é o aço inoxidável austenítico.

Muitos profissionais buscam estruturas modernas e arrojadas. Em conjunto a esse fator, os conceitos de durabilidade e de sustentabilidade na construção civil ganharam nos últimos tempos muito mais importância. Devido a estas duas demandas, o aço inoxidável vem ganhando importância, pois além de possuir propriedades mecânicas que se adequam em soluções de empreendimentos arrojados, também tem como característica e vantagem, ter no seu processo de reciclagem menor impacto ambiental, contribuindo, desse modo, para a sustentabilidade e responsabilidade social.[2]

Alguns exemplos da aplicação do aço inoxidável na engenharia civil e na arquitetura podem ser descritos e visualizados a seguir.

Um primeiro exemplo a ser citado corresponde a Ponte de *Stonecutters*, localizada em Hong Kong na China - Figura1(a) onde foram gastas aproximadamente 2000 toneladas de aço austenítico S322 em chapa de 20 a 30 mm de espessura e 2880 toneladas do aço austenítico S304 em barras de 50 mm de diâmetro, com previsão de durabilidade (dispensa de manutenção) por um período de 120 anos [3]. Na Figura1(b) observa-se a peça em aço inoxidável que envolve a estrutura de concreto dando-lhe mais rigidez e pode-se ver ainda na Figura1(c) a mesma peça pelo lado interno, mostrando os conectores de cisalhamento que garantirão a união com o concreto armado que será introduzido no seu interior.



(a)



(b)



(c)

Figura1– Ponte de *Stonecutters* – China [3]

A Figura 2 – Plataforma de petróleo da North Sea Oil mostra como exemplo da aplicação estrutural do aço inoxidável, a estrutura da primeira plataforma de extração de petróleo da empresa norueguesa, *North Sea Oil*[4].



Figura 2 – Plataforma de petróleo da North SeaOil[4]

Outra aplicação é exibida na Figura 3 que apresenta, por sua vez, o prédio comercial Petronas *Twin Towers*, construído na Malásia, com 88 andares, foi construído com estrutura em aço inoxidável. Este foi o arranha céu mais alto do mundo entre os anos de 1998 e 2003[5].



Figura 3 – Petronas *Twin Towers*[5]

A produção anual de aço inoxidável cresce em uma taxa média de 5,80% e em 2015 foram produzidas 41,5 milhões de toneladas, como pode ser visto na Figu-

ra 4. Da produção total do ano de 2013, 12,8% do aço inoxidável produzido no mundo foi utilizado em construções, como pode ser visto na Figura 5[6].

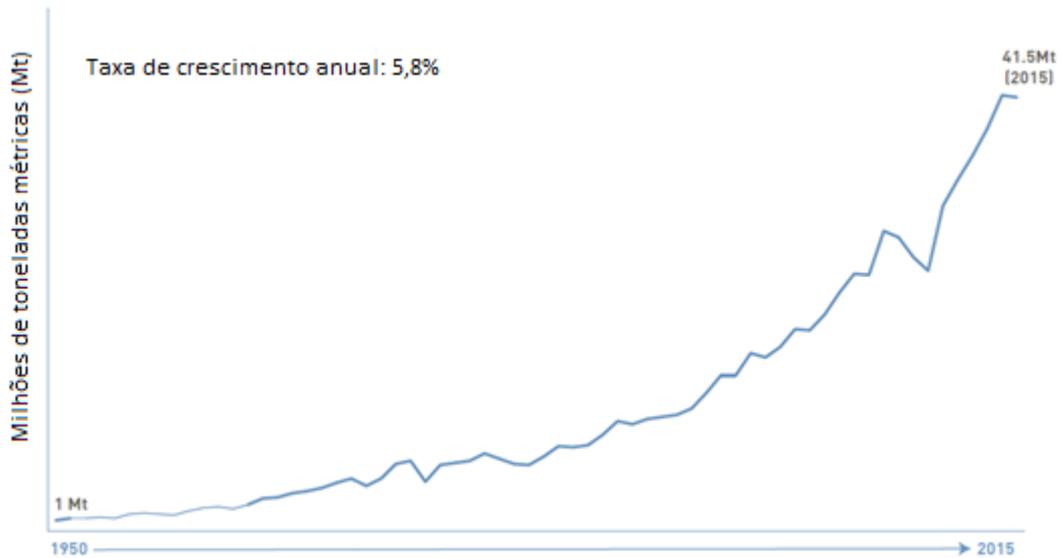


Figura 4 – Gráfico de produção anual do aço inoxidável em mundo. [6]

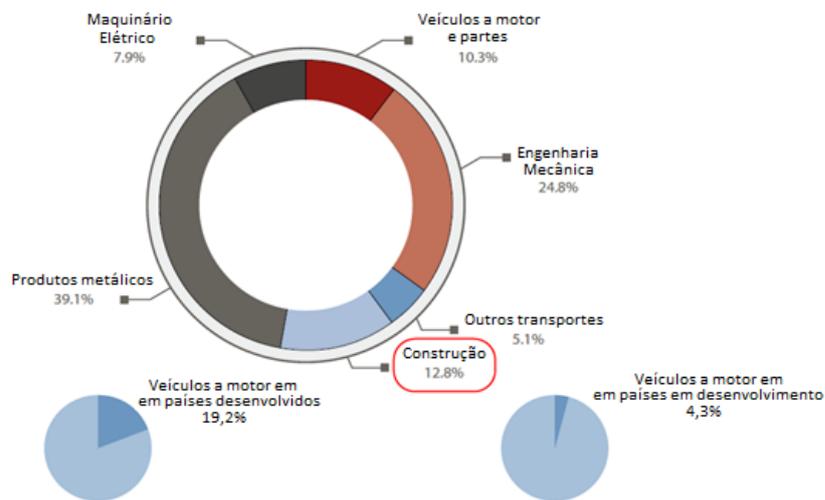


Figura 5 – Gráfico com a relação de consumo do aço inoxidável em setores [6]

No presente trabalho serão realizados estudos sobre elementos curtos submetidos a compressão pura e composta e elementos sob flexão.

Elementos estruturais curtos solicitados a compressão apresentam ruína por escoamento ou por instabilidade local. Neste caso, as colunas curtas possuem esbelteza global muito baixa e, por isso, são pouco afetadas pelo fenômeno de flam-

bagem global. Nesses casos, a capacidade compressiva dos elementos é regida basicamente pela resistência a compressão da seção transversal.

Elementos estruturais curtos solicitados a compressão axial e flexão são conhecidos como vigas-colunas. Além dos modos de falha observados em colunas submetidas a compressão pura, nestes elementos também é observado a flambagem lateral com torção, não observado neste estudo, por se tratar de elementos tubulares com alta rigidez a torção.

Elementos submetidos a flexão, ou simplesmente vigas, quando compostos de aço, são projetados de maneira a prover resistência e rigidez adequadas em relação a flexão no plano. Isso leva a seções suscetíveis ao fenômeno conhecido como flambagem lateral com torção, que não é verificado neste estudo por conta do tipo de seção transversal utilizada. Neste caso, a capacidade desses elementos é avaliada em termos da resistência a flexão da seção transversal.

Motivação

O aço inoxidável possui diversos benefícios em seu uso, como a alta resistência a corrosão, alta resistência mecânica, maior ductilidade, menor perda de resistência quando submetido a altas temperaturas e maior capacidade de reaproveitamento de elementos estruturais existentes, tornando-o um material mais sustentável ecologicamente que o aço carbono comum.

Os instrumentos normativos internacionais existentes de estruturas de aço inoxidável baseiam-se em analogias e proposições do comportamento estrutural do aço carbono para o dimensionamento de elementos estruturais formados de aço inoxidável, tornando o projeto deste tipo de estrutura conservador e econômica/tecnicamente desvantajoso.

Na contemporaneidade, a quantidade de estudos de elementos submetidos a compressão, flexão e flexo-compressão em aço inoxidável e em especial, de seções tubulares circulares é consideravelmente pequena e serviu de motivação para este trabalho que visa aumentar o conjunto de estudos sobre o tema que foi proposto.

Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é realizar ensaios experimentais de uma série de colunas, viga-colunas e vigas constituídas de seções tubulares circulares em aço inoxidável austenítico 304 A554. Posteriormente, para que os dados dos ensaios realizados sejam avaliados, estes serão comparados com as recomendações normativas do Eurocode 3 Parte 1-4[7], com o Método das Resistências Contínuas [8] e com resultados obtidos através de modelos numéricos desenvolvidos com base no método dos elementos finitos.

Estrutura da dissertação

A presente dissertação será dividida em sete capítulos. Inicialmente, é apresentada uma pequena introdução com alguns exemplos do uso do material aço inoxidável em algumas estruturas existentes, objetivando situar a mesma dentro de um cenário internacional. Ainda neste capítulo inicial são apresentados a motivação, os objetivos e a descrição dos capítulos da presente dissertação.

O capítulo um, após a introdução, é destinado à revisão bibliográfica. Neste, serão apresentados alguns estudos baseados em estruturas tubulares submetidas a compressão pura, flexão composta e flexão pura. Ainda haverá referências relacionadas a alguns fenômenos que ocorrem em tais ensaios como, por exemplo, a ovalização de seções tubulares.

O segundo capítulo apresenta os procedimentos teóricos usados para o dimensionamento de elementos estruturais tais como colunas, vigas e vigas-colunas considerando-se as premissas do Eurocode 3 Parte 1-4 [7] e do Método da Resistência Contínua [8].

O capítulo três apresenta a descrição dos ensaios experimentais realizados. Após a breve descrição da escolha dos materiais, mostra-se a sequência de execução dos ensaios, relatando de maneira detalhada quais foram os procedimentos adotados para se realizar os mesmos.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados em termos de curvas carga *versus* deslocamento, momento *versus* rotação e carga *versus* deformações.

No capítulo cinco será apresentada a modelagem numérica desenvolvida na presente dissertação com base no método dos elementos finitos, detalhando como foram considerados cada um de seus atributos geométricos, físicos e as demais características pertinentes à análise numérica desenvolvida. Depois disso, apresenta-se a calibração do modelo numérico com base nos resultados obtidos através dos ensaios experimentais e ainda é feito um estudo paramétrico com extrapolações para as excentricidades. Ainda no capítulo 5 será feita a comparação dos resultados obtidos através dos modelos numéricos com os resultados experimentais e a comparação destes com os critérios de dimensionamento do Eurocode 3 Parte 1-4 [7] e o Método da Resistência Contínua [8].

O sexto capítulo apresenta as conclusões da presente dissertação e algumas sugestões para futuros sobre o assunto aqui abordado seguido das referências bibliográficas utilizadas.

1. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Nos tópicos seguintes serão apresentadas algumas referências bibliográficas envolvendo colunas, vigas-colunas e vigas de aço (inoxidável ou carbono) e, ainda, trabalhos que consideram tensões residuais desenvolvidos nos últimos anos por diversos pesquisadores, com o objetivo de compreender o assunto, mostrar de que forma houve a evolução das pesquisas e a que conclusões chegaram cada um dos pesquisadores.

1.1. Colunas e Vigas-Colunas

Yuan et al.[9]elaboraram um estudo que consistia em vinte oito testes experimentais feitos em colunas de aço inoxidável (austenítico e duplex) de seções transversais de três tipos:perfis I, tubulares quadradas (SHS) e tubulares retangulares (RHS).Os resultados dos testes experimentais (mostrados na Figura 6) apresentaram em sua maioria, falhas por flambagem local, já que parte considerável dos espécimes testados foi classificada como classe 4.Os testes foram posteriormente comparados com a norma Europeia EN 1993-1-4 [7], com o Método da Resistência Contínua (CSM) [8]e com o Método da Resistência Direta (DSM)[10]. O DSM foi adotado por cobrir uma faixa de esbeltezas com valores maiores diferentemente do considerado no CSM [8].Na conclusão do estudo, fica claro que a norma europeia mostrou-se conservadora quando foram comparados os resultados experimentais com as suas especificações. Já os métodos utilizados (CSM e DSM) apresentaram resultados mais próximos dos experimentais, sendo, deste modo, considerados mais adequados.



Figura 6 – Deformadas das colunas ensaiadas [9]

Young et al. [11]elaboraram um estudo de colunas biengastadas com seções tubulares circulares compostas de aço inoxidável. Três diferentes seções foram utilizadas com diferentes comprimentos para cada uma delas, para que fossem observados todos possíveis modos de falha. Os modos de falhas dos ensaios(apresentados na Figura 7) foram basicamente flambagem local, flambagem por flexão ou uma combinação dos dois modos de falha anteriores.Os resultados foram comparados com o EN 1993-1-4 (EC3) [7], a norma americana SEI/ASCE-8 [12] a norma australiana/neozelandesa AS/NZS 4673 [13] e por duas metodologias elaboradas por Rasmussen e Hancock [14] e Rasmussen e Rondal[15]. Além disso, um teste de confiabilidade foi feito, demonstrando que as duas últimas metodologias são conservadoras quando comparadas às normas.

Lui et al.[16] realizaram um estudo partindo de uma série de ensaios experimentais de vigas-colunas constituídas de seções quadradas tubulares (SHS) compostas de aço inoxidável duplex. Ao todo foram realizados 20 ensaios onde dois tipos diferentes de seção transversal foram usadas (SHS40x40x2 e SHS50x50x1,5) com comprimentos dos elementos de 550mm e 1100mm com excentricidades variando de 0 a 60mm. Os resultados dos ensaios foram comparados com as normas AS/NZS 4673 [13] e SEI/ASCE-8 [12].Chegou-se a conclusão de que tais normas são muito conservadoras.Os testes foram feitos de maneira a simular, idealmente, uma condição rotulada em ambas as extremidades das vigas-colunas (como pode ser visto na Figura 8).As configurações deformadas desses ensaios podem ser vistas na Figura 9. Nas seções compactas (SHS 40x40x2 – S1L1 e S1L2) observou-se

a ruptura devido a flambagem por flexão. Já as seções de classe 3, isto é, consideradas não compactas (SHS 50x50x1,5 – S2L1 e S2L2) mostraram alguma interação entre a flambagem por flexão e a flambagem local.

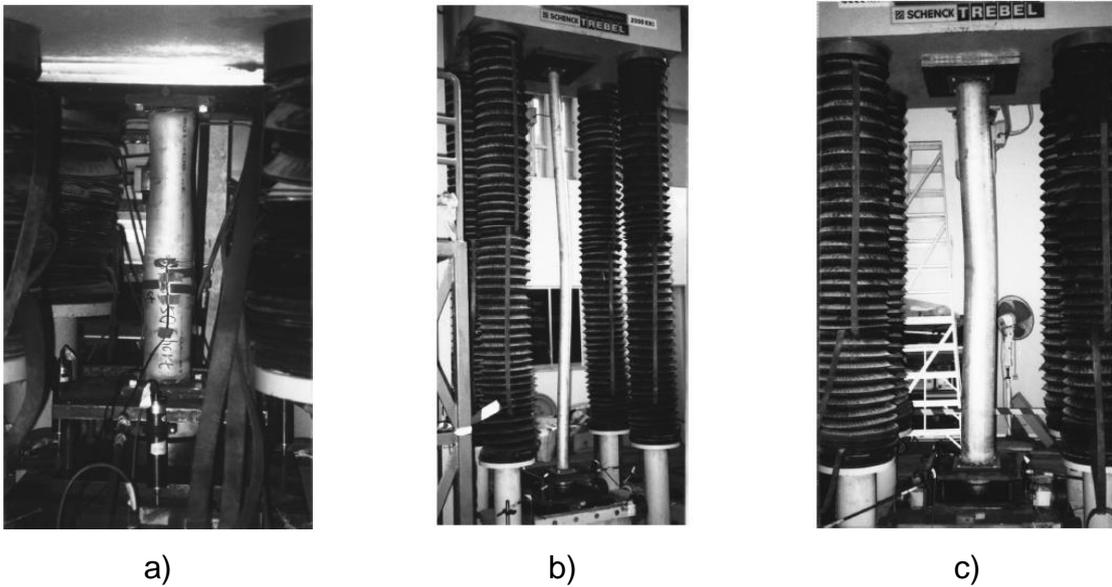


Figura 7– Diferentes tipos de flambagem observados nos ensaios [16]

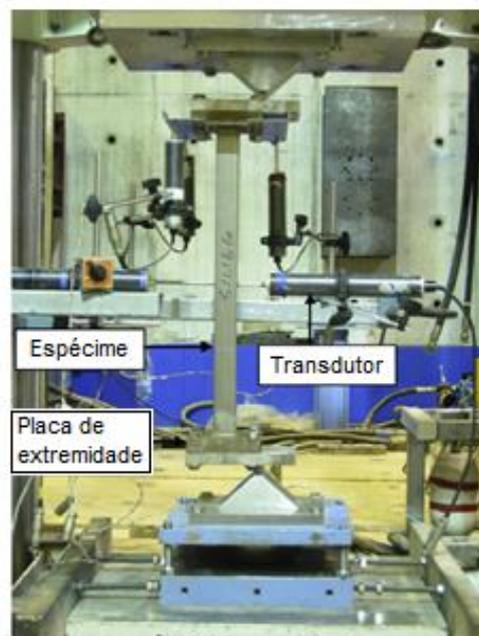


Figura 8 – Ensaio Experimental [16]



Figura 9 - Resultados dos Ensaaios Experimentais[16]

Zheng et al.[17] realizaram dez ensaios experimentais com vigas-colunas de duas seções diferentes, seções tubulares quadradas (SHS) e seções H soldadas, ambas compostas de aço inoxidável austenítico. Os resultados dos testes experimentais foram comparados com as normas SEI/ASCE-8 [12] e Eurocode 3 – Parte 1-4[7], utilizando-se ainda o Método da Resistência Contínua [8]. Chegou-se à conclusão que, apesar de ambas serem em geral conservadoras, a SEI/ASCE-8 [9] mostrou-se mais adequada para elementos desse tipo.

Zhao et al.[18] realizaram testes com vigas e vigas-colunas de perfis tubulares quadrados SHS 60x60x3 e retangulares RHS 100x40x2 ambos compostos de aço inoxidável ferrítico. Foram testadas ao todo, duas vigas, duas colunas e dez vigas-colunas. As vigas-colunas tiveram as mais variadas excentricidades de maneira a se cobrir todo o campo das mais diferentes relações entre momento fletor e compressão.

Os ensaios das colunas e viga-colunas foram montados de maneira a se obter, idealmente, extremidades rotuladas, como mostrado na Figura 10 que mostra o ensaio e o seu respectivo esquema estrutural. Um modelo em elementos finitos foi utilizado para realizar uma comparação com o teste experimental. Os resultados dos ensaios e do modelo de elementos finitos foram bastante próximos e alguns deles são exibidos na Figura 11. As seções SHS, mais robustas, apresentaram como modo de falha a flambagem por flexão, enquanto as seções RHS, mais esbeltas, apresentaram como modo de falha, a flambagem local combinada com a flambagem por flexão. Ambos os resultados, experimentais e numéricos foram comparados com as recomendações normativas Eurocode 3 – Parte 1-4[7], SEI/ASCE-8 [12] e AS/NZS 4673 [13]. Chegou-se à conclusão que, apesar de todas as normas serem consideradas conservadoras e ser possível aplicar algumas melhorias, a norma que apresentou melhores resultados foi a Australiana/Neozelandesa.

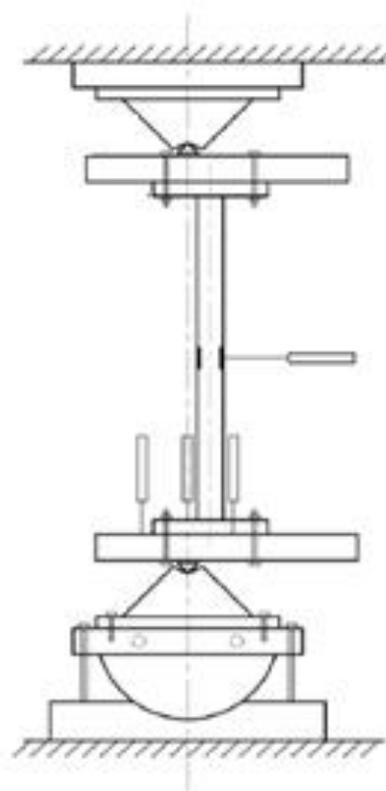
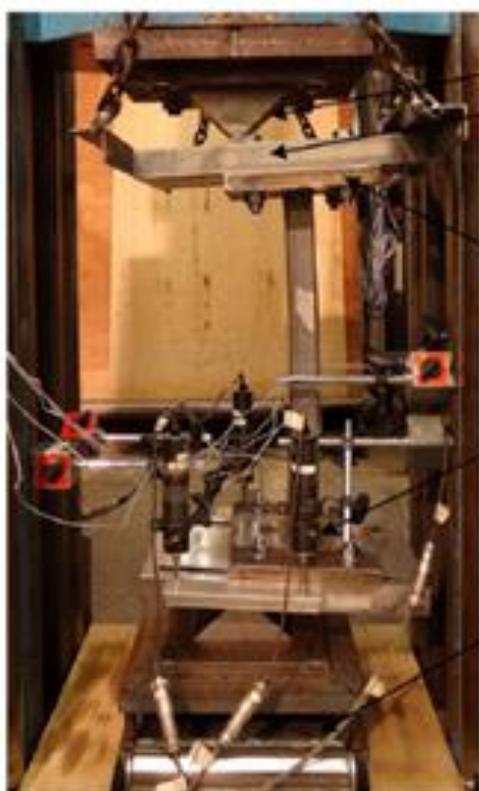


Figura 10 – Ensaio Experimental e Respectivo Esquema [18]



a) SHS 60x60x3

b) RHS 100x40x2

Figura 11– Resultados experimental e numéricos [18]

Huang et al.[19]fizeram diversos testes em vigas-colunas de elementos tubulares quadrados (SHS) e retangulares (RHS) compostos de aço inoxidável duplex. Diferentes valores para excentricidade foram adotados de maneira a se obter uma curva de interação entre momento fletor e esforço normal. Foram adotadas quatro diferentes seções (SHS50x50x1,5; SHS50x50x2,5; RHS100x50x2,5 e RHS150x50x1,5) com dois diferentes comprimentos (550mm e 1550mm). Ao todo, variando as excentricidades, foram feitos 37 testes experimentais. Os testes foram realizados de maneira a se idealizar as extremidades como rótulas. Uma imagem e a visão esquemática desse teste pode ser vista na Figura 12.Os resultados dos ensaios experimentais foram comparados com as recomendações das normas Europeia[7], Americana[12] e Australiana/Neozelandesa[13]. Chegou-se à conclusão que, a Norma Europeia[7], quando comparada com a Americana[12] e a Australiana/Neozelandesa [13]é mais conservadora.

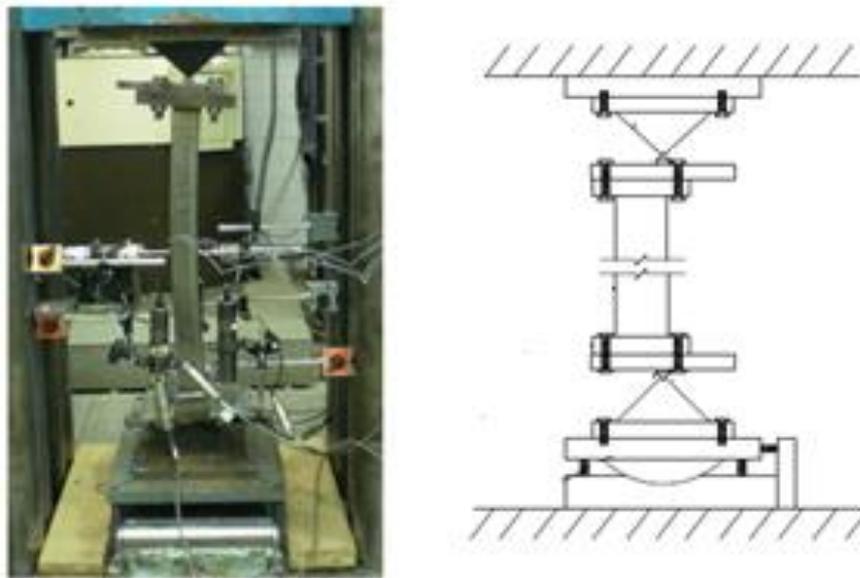


Figura 12 – Ensaio experimental e respectivo esquema estrutural [19]

Zhao et al. [20] elaborou um trabalho de teste experimental e modelagem numérica de vigas-colunas compostas de aço inoxidável austenítico de seções transversais tubulares circulares (CHS). As seções transversais adotadas foram CHS 60,5x2.8 e CHS 76,3x3, ou seja, ambas da classe 1. Ao todo, foram realizados doze testes, um de coluna e cinco de viga-coluna para cada uma das seções transversais. Os ensaios foram feitos com diferentes excentricidades, para cobrir um campo considerável relativo a curva de interação entre carga axial e momento fletor. O comprimento de todos os ensaios foi de 1450mm. Em ambas as extremidades foi simulada uma ligação rotulada idealizada. A validação entre os testes experimentais e os modelos numéricos foram compatibilizadas com o que era esperado de seções compactas de classe 1 submetidas a combinação de esforços axiais e de flexão. O modo de falha foi a flambagem por flexão, mostrado na Figura 13. Após a validação do modelo numérico, que foi feita comparando-se os resultados experimentais com os obtidos via método dos elementos finitos, foi feito um estudo paramétrico com 285 modelos, de modo a se obter elementos do mesmo tipo, mas com as mais variadas relações entre diâmetros, espessuras e comprimentos, para que fosse gerado um maior espectro de dados, cobrindo da classe 1 a classe 3. Além disso, os resultados apresentados foram comparados com quatro especificações diferentes: a Norma Europeia EN 1993-1-4 [7], a especificação Americana SEI/ASCE-8 [12], a norma Australiana/Neozelandesa AS/NZS 4673[13] e a proposta de Greiner e Kettler[21].

Entre as conclusões, as especificações normativas utilizadas são de alguma forma conservadoras e são necessárias algumas correções, assim como mais pesquisas nesta área.



Figura 13 - Resultados experimental e numérico – Flambagem por flexão [20]

Zhao et al. [22],[23] foram também responsáveis por dois extensos trabalhos envolvendo vigas-colunas. No primeiro artigo [22], os autores descrevem como foram feitos os ensaios com quatro diferentes perfis tubulares circulares (CHS 60,5x2,8; CHS76,3x3; CHS114,3x3 e 139,4x3) compostos de aço inoxidável austenítico e os respectivos modelos numéricos. Para cada seção transversal, foram adotados cinco diferentes valores para a excentricidade, sendo feitos, portanto, 20 ensaios diferentes. Os resultados dos modelos numéricos foram coerentes com os resultados dos ensaios experimentais, viabilizando, portanto, o estudo paramétrico a ser feito no segundo artigo. A comparação do modelo experimental com o modelo numérico pode ser vista na Figura 14. No segundo artigo [23], são descritos os estudos paramétricos realizados, modificando os parâmetros dos ensaios experimentais, pretendendo estender para outros casos diversos, com outros aços inoxidáveis (austenítico, duplex e ferrítico) e diferentes esbeltezas da seção transversal e as mais variadas excentricidades. Foram feitas comparações dos ensaios experimentais, modelos numéricos e dos estudos paramétricos com a norma europeia Euroco-

de3 –parte 1-4 [7]. a norma Americana SEI/ASCE-8[12], a norma Australiana/Neozelandesa AS/NZS 4673[13] e com o Método da Resistência Contínua [8] e ainda, uma análise de confiabilidade, fazendo a comparação entre o CSM – já que se trata de um método específico utilizado para considerar o fenômeno de encruamento, presente nas estruturas compostas de aço inoxidável – com as três especificações normativas. Os autores chegaram à conclusão que as normas são consideradas conservadoras e que isso se deve principalmente, a adoção de curvas de interação lineares e também devido ao fenômeno benéfico de encruamento não ser considerado em pontos extremos da curva de interação (flexão pura ou compressão pura).



Figura 14 - Comparação entre o Resultado Experimental e Numérico[22]

1.2. Vigas

Elchalakani et al. [24] realizaram um trabalho que tinha como objetivo determinar valores mais precisos para os limites de esbeltezas de seções tubulares circulares (CHS) compostas de aço carbono submetidas a flexão, comparando seus resultados com as mais diversas normas e outros resultados experimentais. No estudo, foram feitos 12 diferentes ensaios a flexão, com diferentes tamanhos e diferentes razões entre o diâmetro e a espessura (d/t) da seção. Uma ilustração do ensaio é

mostrada na Figura 15. No estudo, os autores fizeram recomendações finais dos diversos valores limites das esbeltezas para diferentes classificações. Os autores chegaram à conclusão que para as seções compactas e esbeltas, o momento de plastificação não foi atingido nos testes experimentais. Isso deve-se, principalmente, ao fenômeno da ovalização (chamado também de efeito Brazier) mostrado em um dos ensaios feitos na Figura 16. Os autores sugerem uma equação para que seja considerado um momento de ovalização, considerando-se uma ovalização (mudança de forma da seção transversal) de 10%.

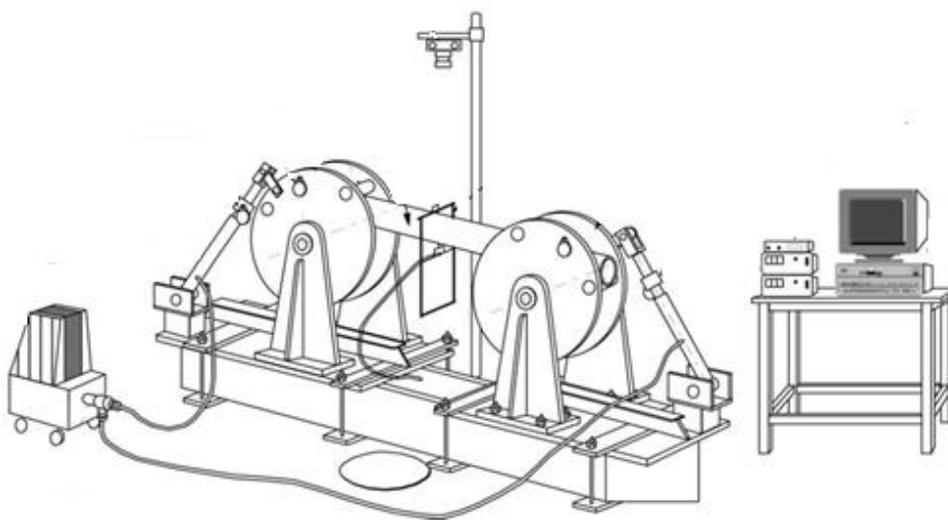


Figura 15 – Esquema do ensaio experimental – Equipamento [24]

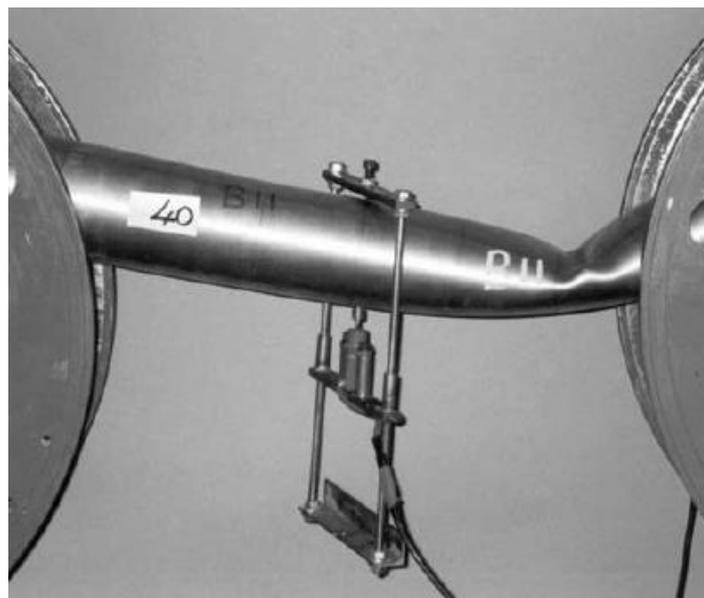


Figura 16 – Ovalização[24]

Burgan et al. [25] realizaram estudos com colunas, vigas-colunas e vigas em aço inoxidável de diversos tipos, chegando à conclusão que, em geral, as normas a época eram conservadoras. Os testes experimentais em flexão que foram realizados em tubos circulares (CHS) indicaram que os limites de esbelteza da razão diâmetro-espessura (d/t) podem ser consideravelmente aumentados. Foram realizados um total de 11 testes de flexão com quatro pontos, no esquema mostrado na Figura 17, com variação da esbelteza e com diferentes aços inoxidáveis para determinar as diferentes resistências e os diferentes comportamentos da seção transversal. O autor concluiu que para as seções transversais estudadas, o Eurocode 3 Parte 1-4 [7] mostrou-se consideravelmente conservador.

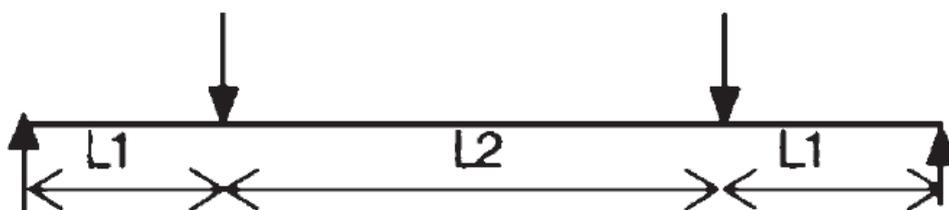


Figura 17 – Esquema de Flexão em Quatro Pontos [25]

Kiyamaz[26] executou estudos experimentais com vigas de tubos circulares (CHS) compostos de aço inoxidável austenítico e aço inoxidável duplex. Foram realizados oito testes, com diferentes esbeltezas, sendo quatro testes para cada tipo de aço inoxidável. Os resultados foram comparados com as normas Americana [12], Australiana[13] e Europeia[7]. O esquema do ensaio está mostrado na Figura 18 enquanto que um dos testes experimentais montados é visto na Figura 19. O autor também comenta sobre o fenômeno de ovalização (Efeito Brazier), que ocorre em tubos circulares. Ele optou por restringir a ovalização sobre os pontos de aplicação de carga e sobre os apoios, por serem consideravelmente mais suscetíveis a tal fenômeno. As dimensões dos colares que restringiam a ovalização foram escolhidas de forma que fossem reduzidas as concentrações de tensão nesses pontos. A Figura 20 exibe uma curva de ovalização de um dos ensaios, em que a ovalização foi medida no meio do vão, por um transdutor de ovalização.

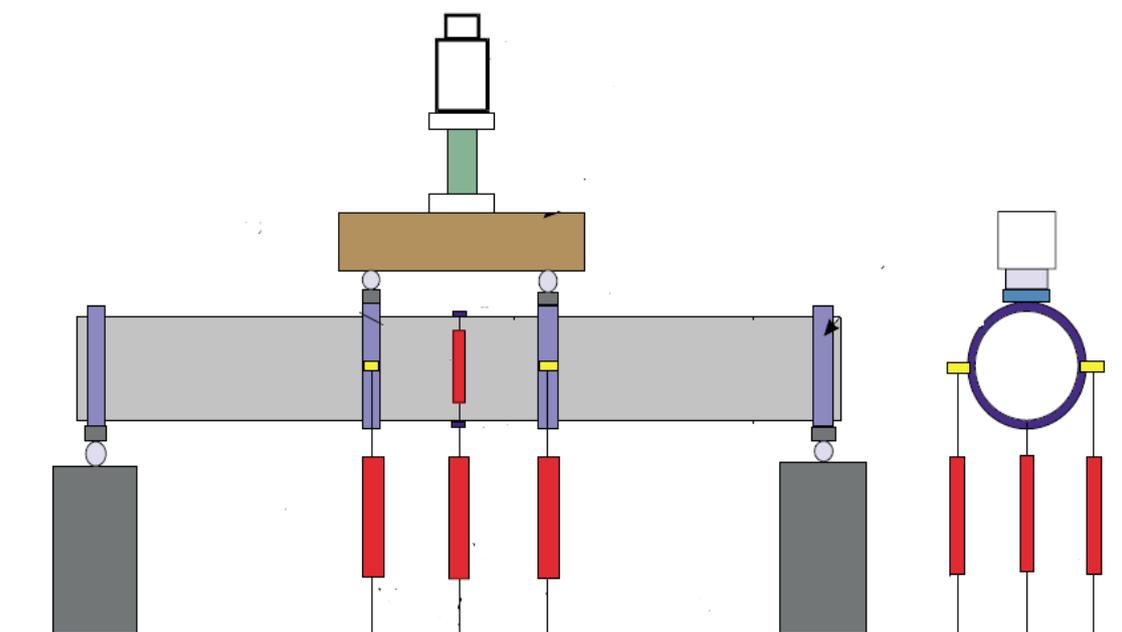


Figura 18 – Esquema do ensaio a flexão [26]

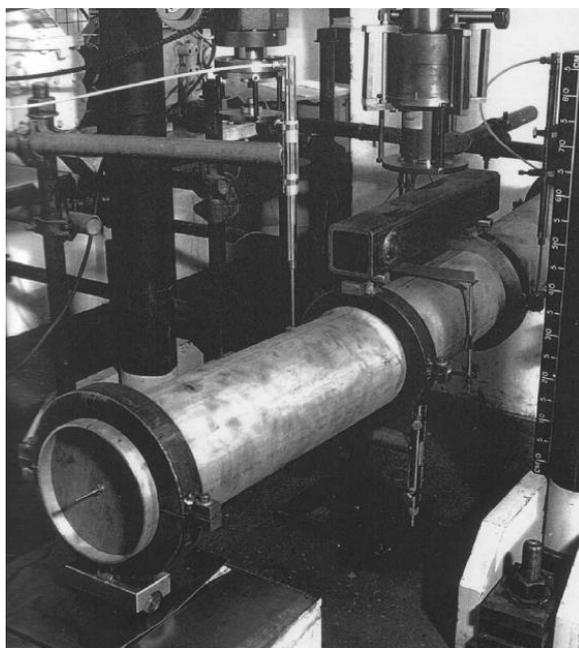


Figura 19 –Ensaio real montado [26]

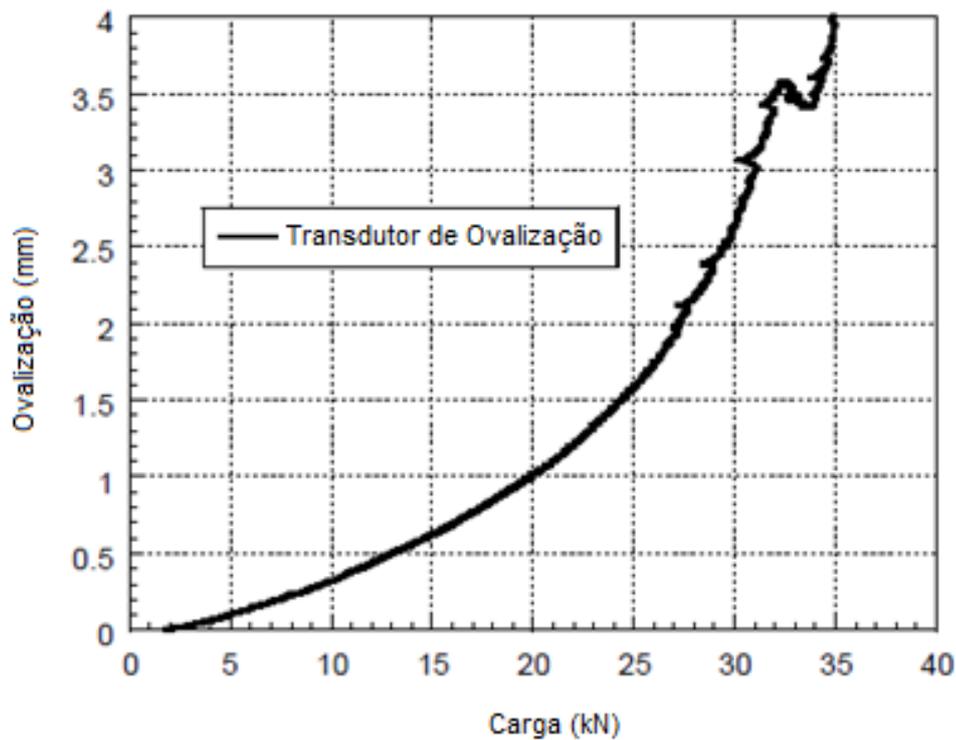
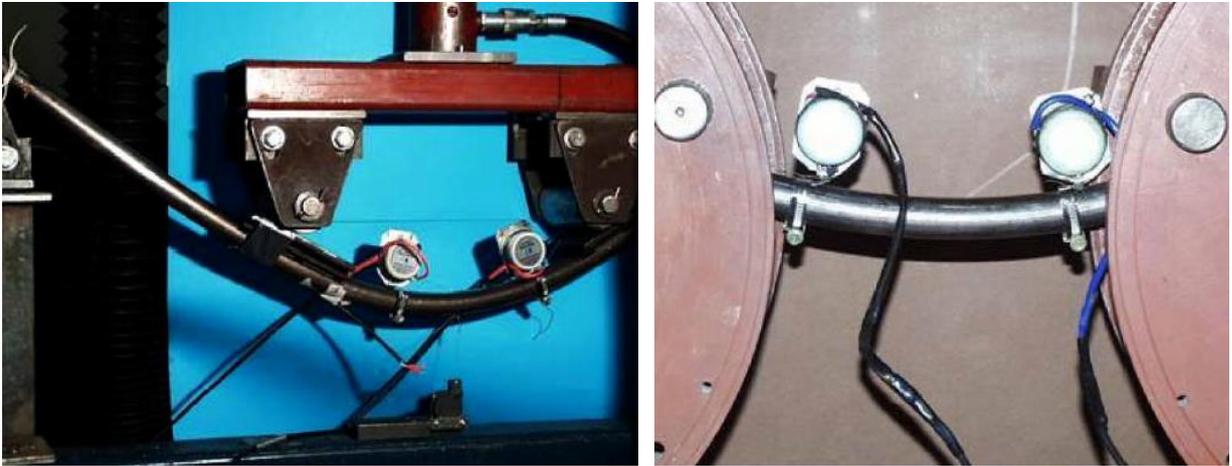


Figura 20 - Curva carga *versus* ovalização[26]

Rasmussen et al. [27] realizaram experimentos em vigas tubulares quadradas e circulares compostas de aço inoxidável austenítico. O objetivo do trabalho foi descrever, de acordo com os testes que foram feitos, um método não interativo para calcular deflexões em vigas tubulares de aço inoxidável. Utilizando algumas relações básicas entre momento e curvatura, os autores chegaram a uma equação aproximada para determinar deflexões em vigas tubulares quadradas e circulares compostas de aço inoxidável.

Jiao et al. [28] investigaram o comportamento a flexão de tubos circulares constituídos de aço de alta resistência (Very High Strength – VHS), por meio de doze ensaios de flexão, com variações nas dimensões do diâmetro e da espessura. Os tubos ensaiados tinham tensão de escoamento de aproximadamente 1350 MPa e tensão última de aproximadamente 1500 MPa. Foram feitas comparações com as mais diversas normas, de maneira a melhor entender o real comportamento do material estudado. Foram feitos dois tipos diferentes de ensaios: ensaios de flexão em quatro pontos, isto é, com duas cargas aplicadas na viga de maneira simétrica (mostrado na Figura 21-a) e ensaio de flexão pura (mostrado na Figura 21-b). Ao final do

trabalho são propostos novos limites de esbelteza de maneira que se considerasse esse material em tubos circulares submetidos a flexão.



a) Ensaio de quatro pontos

b) Ensaio de flexão pura

Figura 21 - Ensaios realizados [28]

Brazier[29] foi o primeiro pesquisador (em 1927) a descrever o fenômeno da ovalização em cascas cilíndricas finas submetidas a esforços de flexão. Segundo o pesquisador, o problema não poderia ser tratado como um problema clássico de elasticidade, utilizando a solução de Saint-Venant (que é obtida quando são satisfeitas as equações de equilíbrio de um material elástico e isotrópico). A solução apresentada foi a de tratar o problema como um problema de estabilidade e, assim, considerar efeitos de ordem superior, principalmente nos casos em que uma das dimensões da seção transversal (espessura) for consideravelmente inferior as outras. A Figura 22 exemplifica de maneira gráfica essa relação.

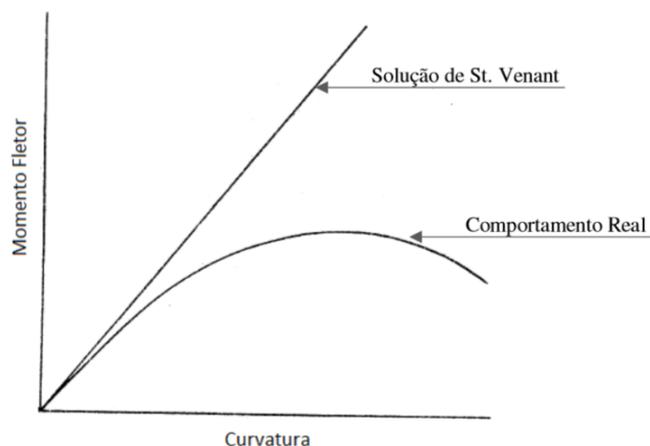


Figura 22 – Ovalização: curva momento fletor versus Curvatura[29]

Zhang e Yu[30] fizeram uma profunda investigação a respeito da ovalização (efeito Brazier). Além de analisar os próprios estudos feitos por Brazier[29], os pesquisadores investigam uma série de outras contribuições nessa área, inclusive alguns estudos experimentais. Utilizando todas essas referências, os autores chegam a uma equação para o momento fletor do problema, utilizando métodos energéticos. Os autores comparam as referências com a metodologia elaborada por eles e chegam a conclusão que tal método é eficaz e está em conformidade com os estudos experimentais. Relatam ao final do artigo que a investigação é preliminar e mais estudos deveriam ser feitos para investigar esse fenômeno.

Karamanos et al.[31] investigaram a resposta estrutural e a flambagem de tubos longos circulares com pequena espessura submetidos a flexão. Segundo o autor, a resposta é caracterizada pela ovalização da seção transversal seguida da flambagem da face comprimida. Um modelo foi elaborado utilizando o Método dos Elementos Finitos, e os resultados deste modelo mostraram que o momento fletor resistente da seção transversal é afetado de forma considerável pela ovalização da seção transversal. Além disso, o autor comparou os resultados encontrados nos modelos numéricos com a solução analítica proposta por Brazier[29], que foram encontradas usando simples equilíbrios energéticos, apresentado bons resultados.

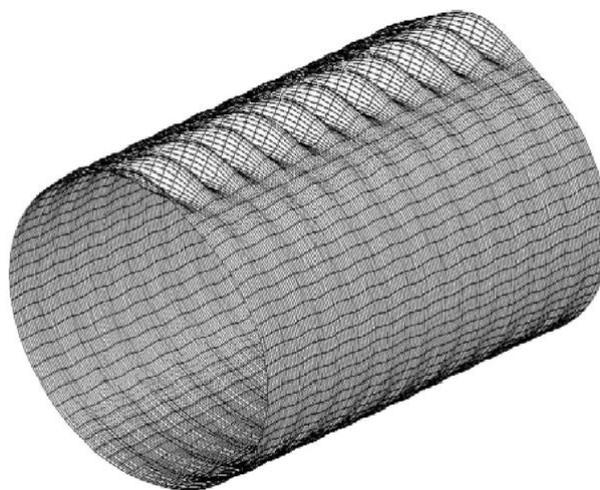


Figura 23 - Flambagem da face superior seguida da ovalização da seção transversal

2. NORMAS E PROCEDIMENTOS DE DIMENSIONAMENTO

2.1. Introdução

Na atualidade já existe uma série de normas e procedimentos de dimensionamento para colunas, vigas-colunas e vigas de aço. Algumas delas foram citadas no capítulo anterior, como por exemplo, as normas Americana [12] Australiana/Neozelandesa [13], Europeia [7], dentre outras para poderem ter alguma base de comparação com os resultados experimentais.

Atualmente, os projetos de estruturas constituídas de aço inoxidável são majoritariamente realizados supondo o material com comportamento elástico e perfeitamente plástico, tais como as normas acima citadas preconizam. Tal comportamento descreve bem o aço carbono. Entretanto, assumir tal comportamento para aços inoxidáveis pode gerar resultados consideravelmente conservadores – que foram observados na revisão bibliográfica - significando que as propriedades do material não foram aproveitadas da forma mais econômica possível. Nesse contexto, foi desenvolvido o Método da Resistência Contínua [8] que avalia de maneira mais precisa o real comportamento de tais materiais.

No presente capítulo, será apresentada a metodologia de cálculo, para cada um dos elementos avaliados na presente dissertação, de maneira a se descrever os fenômenos físicos envolvidos e avaliar de que forma se dá o comportamento de cada um dos elementos. Os perfis serão dimensionados de acordo com a norma europeia Eurocode 3 – Parte 1-4 [7] e pela recente proposta conhecida como Método da Resistência Contínuas (CSM) [8].

2.2. Dimensionamento

A norma europeia, Eurocode 3 – Parte 1-4 [7] estabelece que a segurança dos elementos estruturais no estado limite último é garantida pela aplicação de coeficientes de segurança parciais (γ_M).

O cálculo da resistência das seções transversais depende diretamente de sua classe. Sendo assim, seções transversais que pertencem a classe 1 e 2 atingem sua capacidade plástica de maneira completa; as seções transversais pertencentes a classe 3 tem como resistência o valor correspondente ao escoamento da sua fibra mais distante da linha neutra e as seções transversais pertencentes a classe 4 não atingem resistência ao escoamento devido a flambagem local e devem ser tratadas com suas seções efetivas.

2.2.1. Eurocode 3 – Parte 1-4 [7]

Colunas

A resistência da seção transversal de elementos axialmente comprimidos é verificada através da equação

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (1)$$

onde,

N_{Ed} é a carga axial aplicada;

$N_{c,Rd}$ é a resistência a compressão da seção transversal, calculada da seguinte forma:

Classe 1, 2 e 3:

$$N_{c,Rd} = A f_y / \gamma_{M0} \quad (2)$$

Classe 4:

$$N_{c,Rd} = A_{eff} f_y / \gamma_{M0} \quad (3)$$

onde,

A é a área da seção transversal

A_{eff} é a área efetiva de seções transversais de classe 4

f_y é a tensão de escoamento do aço

γ_{M0} é o coeficiente de segurança parcial, assumindo valor de 1,1

Vigas

A resistência de uma viga de aço a flexão depende basicamente da resistência da seção transversal ou da possível ocorrência de instabilidade lateral. Esta última não ocorre em seções transversais tubulares, pois elas possuem elevada rigidez a torção.

A resistência a flexão de uma seção transversal à flexão pode ser obtida a partir de sua resistência plástica (seção transversal pertencente a classe 1 ou 2), resistência elástica (seção transversal pertencente a classe 3) ou tratadas com suas propriedades efetivas (seção transversal pertencente a classe 4).

Na flexão pura (ausência de esforços cisalhantes) o valor do momento fletor de projeto deve obedecer a seguinte equação:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (4)$$

onde,

M_{Ed} é o momento fletor aplicado;

$M_{c,Rd}$ é a resistência a flexão da seção transversal, calculada da seguinte forma:

Classe 1 ou 2

$$M_{c,Rd} = W_{pl} f_y / \gamma_{M0} \quad (5)$$

Classe 3

$$M_{c,Rd} = W_{el,min} f_y / \gamma_{M0} \quad (6)$$

Classe 4

$$M_{c,Rd} = W_{eff,min} f_y / \gamma_{M0} \quad (7)$$

onde,

W_{pl} é o módulo de resistência a flexão plástico;

$W_{el,min}$ é o módulo de resistência a flexão mínimo elástico;

$W_{eff,min}$ é o módulo de resistência a flexão mínimo elástico efetivo.

Vigas-Colunas

De acordo com a norma europeia, os membros submetidos a combinação de flexão e esforço axial devem satisfazer a equação:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{c,Rd})_{min}} + k_y \left(\frac{M_{Ed} + N_{Ed}e}{\beta_w W_{pl} f_y / \gamma_{m1}} \right) \leq 1 \quad (8)$$

onde:

$(N_{c,Rd})_{min}$ é o menor valor de resistência a compressão axial, considerando todos os possíveis modos de ruína;

e é a excentricidade do carregamento;

W_{pl} é o módulo resistente plástico;

β_w assume diferentes valores dependendo da classificação da seção transversal: $\beta_w = 1$ – classe 1 e 2; $\beta_w = W_{el} / W_{pl}$ – classe 3 e $\beta_w = W_{eff} / W_{pl}$ – classe 4.

2.2.2. Método da Resistência Contínua - CSM[8]

De maneira a se obter critérios para um dimensionamento mais eficiente de elementos estruturais constituídos de aços inoxidáveis, Afshan e Gardner [8] propuseram um novo tipo de análise. O estudo demonstrou que principalmente os perfis compactos de aço inoxidável tem sua capacidade de resistência avaliada de forma consideravelmente conservadora quando comparada com o Eurocode 3 Parte 1-4

[7]. Essa diferença dá-se principalmente por esses critérios apresentarem parâmetros de dimensionamento similares aos do aço carbono, como considerar o material com comportamento elástico e perfeitamente plástico.

O CSM substitui o conceito de classificação da seção transversal pelo conceito de capacidade de deformação da seção transversal. Além disso, as propriedades do material, tais como encruamento, são consideradas de maneira adequada. Como exemplo, mostra-se na Figura 24, a comparação entre os dados experimentais e o Eurocode 3 Parte 1-4.[7]

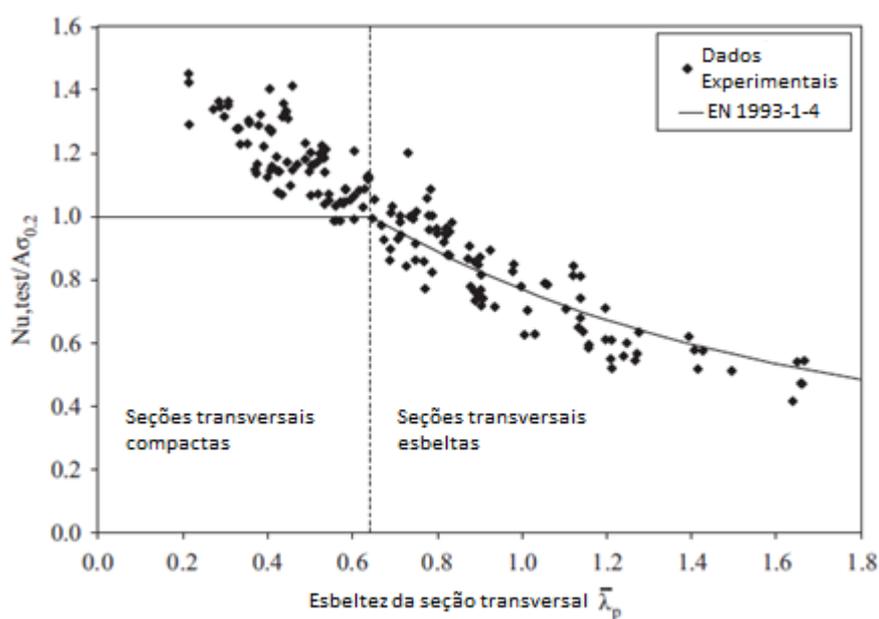


Figura 24 - Comparação entre os dados experimental e os critérios da EC3-1-4 [7]

Os autores propuseram uma formulação para qualquer tipo de seção transversal. Entretanto, Buchanan et al. [32] realizaram estudos utilizando o CSM[8] especificamente em seções circulares tubulares, para seções em compressão pura e flexão pura. Já Liew et. al [33] fizeram o estudo do CSM considerando a combinação entre os esforços de compressão e flexão, isto é, estudou as vigas colunas através do método Buchanan et al. [32] montou a curva base para seções transversais circulares submetidas a compressão e flexão pura e comparou com testes experimentais em que foram utilizados diversos materiais. O resultado é exibido na Figura 25 - . Observa-se que para as seções de aço inoxidável os valores obser-

vados entre as esbeltezas de 0,2 e 0,3 são expressivamente superiores aos observados na curva-base.

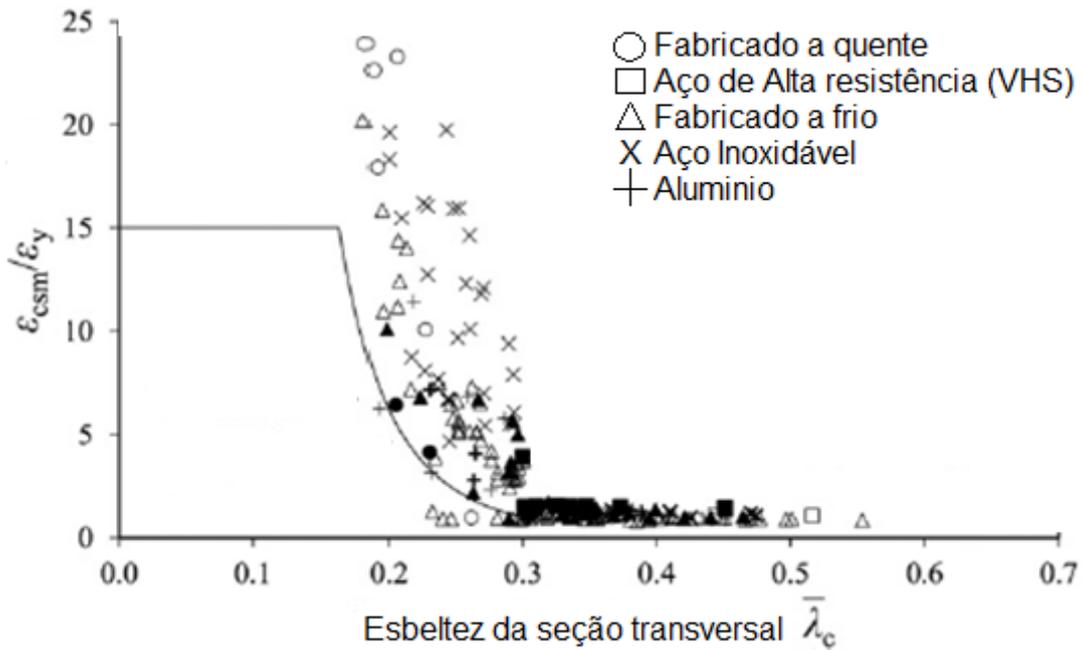


Figura 25 - Dados experimentais e curva base do CSM para seções transversais circulares (CHS)[32]

A esbelteza da seção transversal é calculada de maneira similar para todos os casos:

$$\lambda_c = \sqrt{f_y / \sigma_{cr}} \quad (9)$$

onde,

σ_{cr} é tensão crítica de flambagem elástica, dada pela equação (10).

$$\sigma_{cr} = \frac{E}{\sqrt{3(1 - \nu^2)}} \frac{2t}{D} \quad (10)$$

No CSM, como já dito anteriormente, a classificação da seção transversal é substituída pela capacidade de deformação. Essa capacidade de deformação é também chamada de taxa de deformação ($\epsilon_{csm}/\epsilon_y$), em que ϵ_y é a deformação referente ao escoamento e ϵ_{csm} é a deformação considerada na carga última. Em Buchanan et al. [32], a taxa de deformação foi determinada para compressão pura e

para flexão pura. Já no estudo de Liew et. al.[33], a metodologia foi extrapolada para o caso em que a compressão e a flexão atuam de forma combinada nos elementos.

O modelo de material citado no estudo é considerado como elástico, linear e considerando o encruamento do material, conforme a curva mostrada na Figura 26.

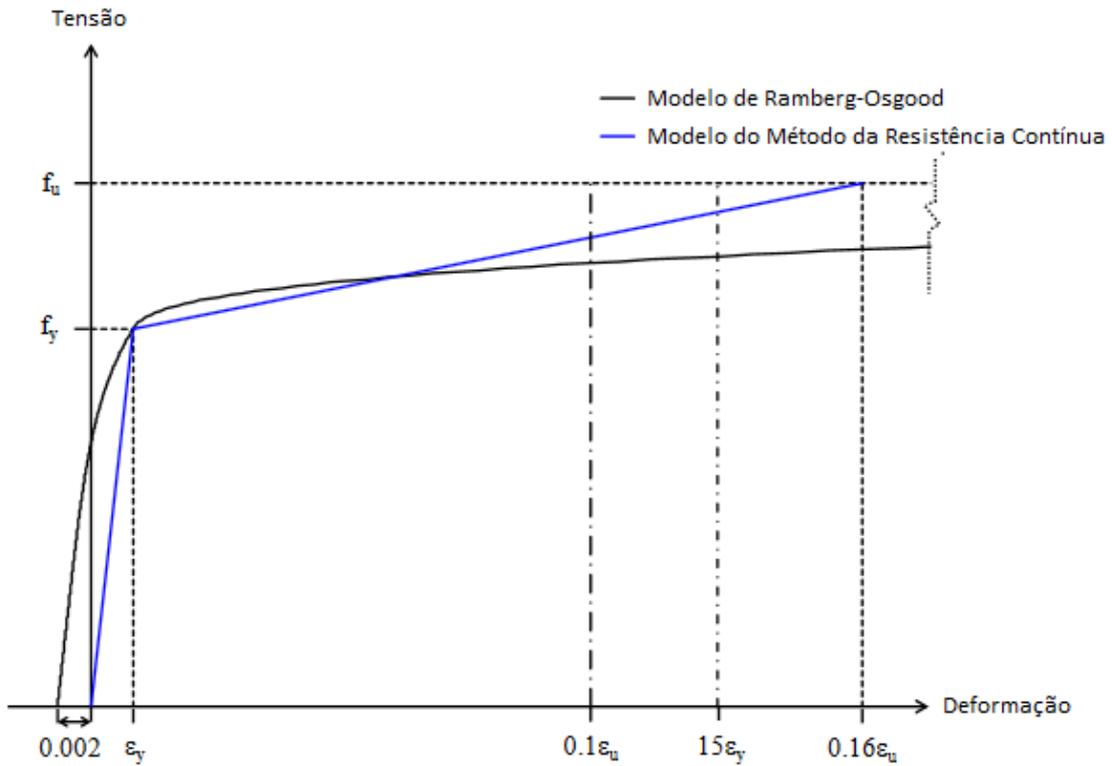


Figura 26 - Modelo do material considerado no Método da Resistência Contínua[8]

Dessa forma, depois de calculadas as deformações (de acordo com o que será mostrado posteriormente), os parâmetros de materiais para o aço inoxidável austenítico, são calculados com as expressões a seguir:

$$f_{csm} = E \varepsilon_{csm} \text{ para } \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} < 1 \quad (11)$$

$$f_{csm} = f_y + E_{sh} \varepsilon_y \left(\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1 \right) \text{ para } \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} \geq 1 \quad (12)$$

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0,16\varepsilon_u - \varepsilon_y} \quad (13)$$

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u} \quad (14)$$

$$f_u = \frac{f_y}{0,2 + 185f_y/E} \quad (15)$$

Colunas

As expressões de capacidade de deformação (isto é, taxa de deformação) são diferentes e dependem fundamentalmente da esbeltez da seção transversal comparada com a rigidez limite de escoamento e da carga última comparada com a carga de escoamento. As expressões paracada um dos casos são mostradas abaixo:

Para $\lambda_c \leq 0,3$ e $N_u \geq N_y$, tem-se:

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{\varepsilon_{lb} - 0,002}{\varepsilon_y} = \frac{\delta_u/L - 0,002}{\varepsilon_y} \quad (16)$$

(sem patamar de escoamento)

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{\varepsilon_{lb}}{\varepsilon_y} = \frac{\delta_u/L}{\varepsilon_y} \quad (17)$$

(patamar de escoamento bem definido)

Para $\lambda_c \geq 0,3$ ou $N_u < N_y$, tem-se:

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{N_u}{N_y} \quad (18)$$

onde,

N_u é a carga resistente da coluna;

N_y é a carga de escoamento da seção ou a de 0,2% de deformação;

δ_u é o deslocamento último axial da coluna;

L é o comprimento da coluna;

ε_{csm} é a deformação de flambagem local proposta pela metodologia;

ε_y é a deformação referente a tensão de escoamento.

ε_{lb} é a deformação última.

A curva base define a relação entre a capacidade de deformação (taxa de deformação) e a esbeltez local da seção transversal. As curvas para seções transversais específicas são adaptadas a partir de curvas genéricas, provenientes de estudos experimentais, com diferentes coeficientes relacionando os termos. Para seções circulares tubulares (CHS), as formas abaixo são utilizadas.

Para $\lambda_c \leq 0,3$, tem-se:

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{4,44 \times 10^{-3}}{\lambda_c^{4,5}} \text{ mas } \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} \leq \min \left(15, \frac{C_1 \varepsilon_u}{\varepsilon_y} \right) \quad (19)$$

Para $0,3 \leq \lambda_c \leq 0,6$, tem-se:

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \left(1 - \frac{0,224}{\lambda_c^{0,342}} \right) \frac{1}{\lambda_c^{0,342}} \quad (20)$$

Os limites superiores da esbeltez da seção transversal (λ_c) não foram considerados, pois valores além de 0,6 não mostram resultados adequados, isto é, não são aplicáveis utilizando este método.

A resistência da seção transversal a compressão, por sua vez, é calculada de maneira diferente dependendo da esbeltez da seção transversal da coluna, conforme mostrado nas equações (21) e (22), mostradas a seguir:

$$N_{csm} = Af_{csm} \text{ para } \lambda_c \leq 0,3 \quad (21)$$

$$N_{csm} = \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} Af_y \text{ para } 0,3 < \lambda_c < 0,6 \quad (22)$$

Vigas

A flexão pura em vigas é usualmente obtida através de ensaios de flexão em quatro pontos, que são os ensaios mais utilizados para se chegar a esse tipo de esforço, por minimizar os efeitos das tensões de contato e expor maior região ao momento fletor máximo.

Em ensaios com quatro pontos a deformação é obtida pelo produto da curvatura (κ) pela distância de um ponto genérico da seção transversal em relação a linha neutra (y).

$$\varepsilon = \kappa y \quad (23)$$

A curvatura referente ao momento de escoamento (κ_{el}) pode ser obtida através da equação:

$$\kappa_{el} = \frac{M_{el}}{EI} \quad (24)$$

As expressões da capacidade de deformação para vigas são parecidas com as que foram utilizadas para colunas, e são mostradas abaixo:

Para $\lambda_c \leq 0,3$ e $M_u \geq M_{el}$, temos:

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{\varepsilon_{lb} - 0,002}{\varepsilon_y} = \frac{k_u y_{max} - 0,002}{k_{el} y_{max}} \quad (25)$$

(sem patamar de escoamento)

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{\varepsilon_{lb}}{\varepsilon_y} = \frac{k_u y_{max}}{k_{el} y_{max}} \quad (26)$$

(patamar de escoamento bem definido)

Para $\lambda_c > 0,3$ ou $M_u < M_{el}$ temos:

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{M_u}{M_{el}} \quad (27)$$

As equações referentes às curvas de base relacionam a capacidade de deformação com a esbeltez local da seção transversal, sendo, portanto, as mesmas utilizadas nas colunas - Equações (19)e(20).

A resistência da seção transversal a flexão, por sua vez, é calculada de maneiras diferentes e dependem da esbeltez da seção transversal da coluna.

$$M_{csm} = M_{pl} \left[1 + \frac{E_{sh}}{E} \frac{W_{el}}{W_{pl}} \left(\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1 \right) - \left(1 - \frac{W_{el}}{W_{pl}} \right) / \left(\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} \right)^2 \right] \quad (28)$$

para $\lambda_c \leq 0,3$

$$M_{csm} = \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} W_{el} f_y \quad (29)$$

para $0,3 < \lambda_c < 0,6$

Viga-Colunas

Solicitações simultâneas de flexão e compressão provocam efeitos diferentes dos casos básicos de flexão pura e compressão pura por se tratar de um caso em que a distribuição de deformações e tensões vai depender dos dois eixos da seção transversal. O método proposto para o dimensionamento de casos com solicitações simultâneas de compressão e flexão utilizando o Método da Resistência Contínua [8] foi desenvolvido por Liew et. al. [33].

A equação de interação utilizada no estudo é mostrada a seguir:

$$\left(\frac{M_y}{M_{R,csm,y}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_z}{M_{R,csm,z}}\right)^\beta \leq 1 \quad (30)$$

Os momentos fletores resistentes reduzidos considerando-se a influência do esforço normal, são dados pelas equações (31) e (32).

$$M_{R,csm,y} = M_{csm,y}(1 - n^{a_y})^{1/b_y} \quad (31)$$

$$M_{R,csm,z} = M_{csm,z}(1 - n^{a_z})^{1/b_z} \quad (32)$$

* $M_{csm,y}$ e $M_{csm,z}$ são calculados de acordo com a equação (28) ou (29).

onde,

M_y é o momento aplicado em torno do eixo y;

M_z é o momento aplicado em torno do eixo z;

$M_{R,csm,y}$ é o momento reduzido resistente em torno do eixo y;

$M_{R,csm,z}$ é o momento reduzido resistente em torno do eixo z;

$n = N/N_{csm}$ é a relação entre o momento atuante e o momento resistente segundo o método;

$\alpha, \beta, a_y, b_y, a_z$ e b_z são calculados conforme Tabela 1, sendo todos estes valores iguais a unidade quando $\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} \leq 3$.

Tabela 1 – Coeficientes utilizados para cálculo de vigas-colunas de seções tubulares circulares pelo CSM. [33]

a_y	$a + 1,2$
b_y	0,8
a_z	$a + 1,2$
b_z	0,8
α	$1,75 + W_r(2n^2 - 0,15) \leq 1,7 + W_r$
β	$1,6 + (3,5 - 1,5W_r)n^2 \leq 3,7 - W_r$
Desde que $3 \leq \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} \leq 15$	

3. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. Considerações Iniciais

O programa experimental desenvolvido na presente dissertação foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), com o objetivo de melhor compreender o comportamento estrutural de tubos circulares de aço inoxidável sujeitos a compressão, flexão pura e flexo-compressão.

3.2. Séries ensaiadas

A seção transversal escolhida para os ensaios foi a seção circular tubular CHS 101,6x1,5 constituída de aço inoxidável austenítico ASTM A554 304. Esta seção transversal é classificada como Classe 3 ($D/t = 67,73$), segundo o Eurocode 3 – Parte 1-4 [7], alcançando a tensão de escoamento.

Ao todo foram feitos dois ensaios de coluna, dois de viga e seis de viga-coluna. As colunas e vigas-colunas foram feitas, em geral, com comprimento de 300mm, exceção se faz ao primeiro ensaio, que foi feito com comprimento de 370mm e sem o sistema de placas chanfradas e rolo metálicos, que será mostrado posteriormente. As vigas-colunas tinham excentricidade que variavam de 15mm a 45mm. As vigas ensaiadas têm o comprimento de 1500mm. A Tabela 2 e a Tabela 3 mostram os dados de todos os ensaios.

Conforme citado anteriormente, os aços inoxidáveis possuem, de maneira geral, quatro curvas tensão *versus* deformação distintas - Figura 27. A favor da segurança, optou-se por adotar a curva de tração paralela à direção de laminação.

A curva tensão x deformação de compressão do aço inoxidável apresenta menor rigidez inicial, menor tensão correspondente a deformação de 0,002 e, em deformações maiores, tensões maiores quando comparada a curva característica de tração [35].

Tabela 2 – Dados dos ensaios de coluna e viga-colunas

Ensaio	L(mm)	e (mm)
CHS101.6x1.5-AUS-370-e0-1-25.01	370	0
CHS101.6x1.5-AUS-300-e0-2-02.05	300	0
CHS101.6x1.5-AUS-300-e15-1-22.05	300	15
CHS101.6x1.5-AUS-300-e15-2-22.05	300	15
CHS101.6x1.5-AUS-300-e30-1-27.04	300	30
CHS101.6x1.5-AUS-300-e30-2-27.04	300	30
CHS101.6x1.5-AUS-300-e45-1-18.05	300	45
CHS101.6x1.5-AUS-300-e45-2-18.05	300	45

Tabela 3 – Dados dos ensaios de vigas

Ensaio	L(mm)
CHS101.6x1.5-AUS-1500-viga-1-12.06	1500
CHS101.6x1.5-AUS-1500-viga-2-19.06	1500

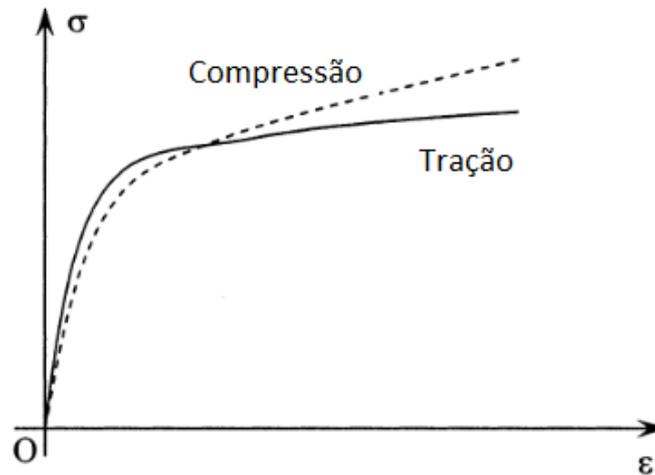


Figura 27 – Diferença entre a curva de tensão *versus* deformação a compressão e a tração em aços inoxidáveis [35]

3.3. Caracterização do material

A caracterização mecânica a tração dos perfis tubulares de aço inoxidável austenítico foi realizada através do ensaio de tração de acordo com a ISO 6892[34], na máquina INSTRON localizada no LEC. Em um ensaio de tração, o corpo de prova é submetido a um esforço de tração que tem a tendência de alongá-lo, até que seja observada a sua ruptura. O corpo de prova é fixado no equipamento que é também responsável por aplicar a carga na direção axial sendo medidas as deformações e tensões correspondentes ao carregamento. A curva tensão *versus* deformação do material é gerada e permite que sejam extraídos outros dados que caracterizem mecanicamente o material, tais como: tensão/deformação de escoamento, tensão/deformação de ruptura, módulo de Elasticidade ou módulo de Young (E) dentre outros. A Figura 28 é uma ilustração do corpo de prova antes do ensaio de tração e após o ensaio de tração, com alongamento de seu comprimento.

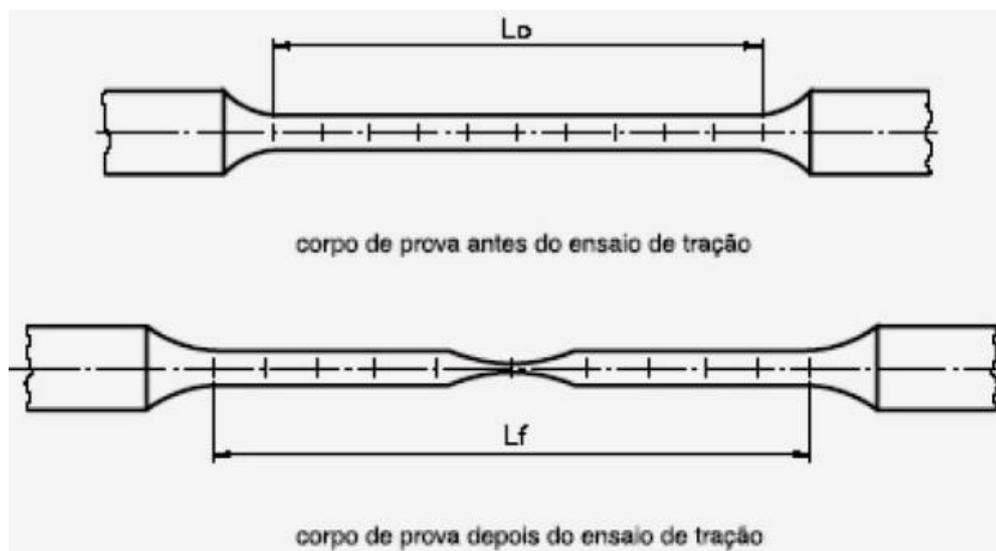


Figura 28 - Corpos de prova para ensaio de tração de acordo com a NBR 6152

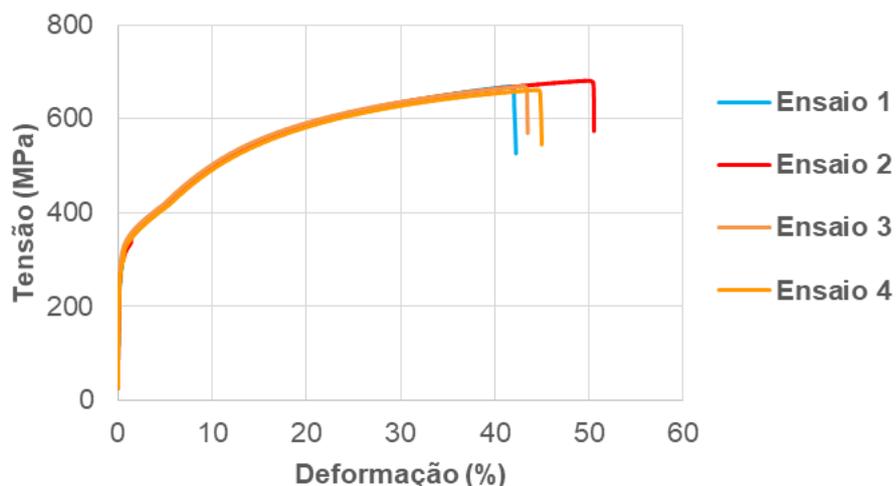


Figura 30 – Curvas tensão x deformação obtida no ensaio de tração

Tabela 4 – Principais dados da caracterização mecânica a tração do material

Ensaio	E (GPa)	ϵ_y (%)	f_y (MPa)	ϵ_u (%)	f_u (MPa)
1	169,61	0,365	279,86	42,60	668,99
2	171,79	0,367	286,89	50,54	681,11
3	204,28	0,348	302,34	43,77	668,79
4	204,76	0,337	280,52	45,28	661,49
Média	187,61	0,35	287,40	45,55	670,10
Eurocode	-	-	230,00	-	540,00
Desvio Padrão	19,55	0,01	10,45	3,50	8,13
Coeficiente de Variação	10,42%	4,04%	3,64%	7,69%	1,21%

Na Figura 31 pode-se ver os corpos de prova depois de se atingir a ruptura. Como pode ser visto, o corpo de prova 1 apresentou ruptura fora da região esperada. Além disso, conforme vemos na Figura 30 este corpo de prova apresentou comportamento consideravelmente distintos dos demais.



Figura 31 - Corpos de prova rompidos

3.4. Configuração do ensaio e condições de apoio

Conforme citado anteriormente, os ensaios tiveram como objetivo solicitar as colunas à compressão pura, as viga-colunas a flexo-compressão e as vigas à flexão pura, visando, desta maneira, obter ao final deste estudo, a curva de interação experimental momento fletor *versus* esforço normal.

A prensa utilizada nos ensaios foi fabricada na Alemanha Oriental na década de 70 pela marca Losenhausenwerk, mostrada na Figura 32. Sua geometria permite ensaios com peças de até 1,80m. Atualmente, ela está configurada para trabalhar em 2 escalas de carga: de 600 kN e 3.000 kN. A prensa foi adaptada e possui um sistema de controle de deslocamentos automático.



Figura 32– Máquina de Ensaios da Losenhausenwerk

Depois de instrumentado o ensaio, testavam-se as peças aplicando carga por meio do prato inferior da prensa com uma velocidade de deslocamento compatível com as condições da estrutura a ser testada, ajustada para que não houvesse qualquer efeito dinâmico e sendo alterada conforme a necessidade. Após atingir o pico de carga, o ensaio prosseguia até se atingir 50% da carga máxima, quando ele era interrompido.

3.4.1. Colunas e Vigas-Colunas

No presente estudo, optou-se por realizar ensaios em colunas e viga-colunas curtas, com diferentes excentricidades de forma a se obter as cargas últimas dos ensaios desconsiderando-se, por exemplo, problemas de flambagem global por flexão.

Para criar uma situação similar ao caso da coluna bi-rotulada ($k=1$), foram usadas placas com chanfros (Figura 33) de forma que os rolos cilíndricos fossem aplicados entre as mesmas, o que simularia uma rótula. Ressalta-se que esse siste-

ma é apenas uma idealização, que deveria apresentar atrito nulo durante os ensaios, de maneira ideal.

Cabe esclarecer que para em um dos dois ensaios de colunas, não foram utilizadas estas placas chanfradas com rolo conforme pode ser visualizado na Figura 34. O ensaio de colunas realizado sem o sistema de rótulas foi o primeiro a ser executado, para que fosse obtida de forma aproximada o comportamento do material.

Um esquema do ensaio de uma viga-coluna é mostrado na Figura 35, onde pode-se visualizar de que maneira funcionam esses elementos.



Figura 33 – Placa com chanfro e rolo móvel

De modo a se obter maior precisão nos resultados dos ensaios, utilizou-se gabaritos feitos nas próprias placas, para que houvesse precisão nas medidas de excentricidade e foram feitos cortes precisos perpendiculares ao eixo da coluna, para que não houvesse qualquer tipo de excentricidade adicional além da prevista.



Figura 34 – Esquema estrutural para ensaios de colunas

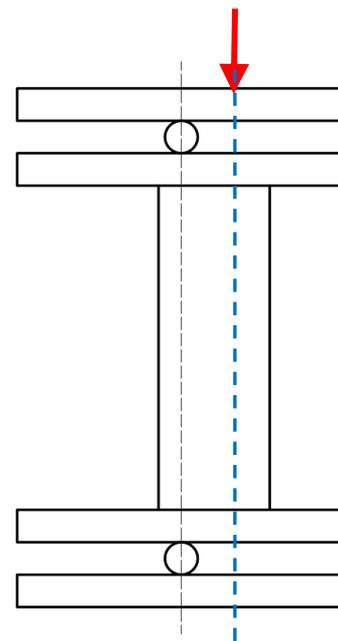


Figura 35 – Ensaio de viga-coluna e sua representação

3.4.2. Vigas

Na Figura 36 e na Figura 37 pode-se observar um esquema geral adotado nos ensaios de vigas, com as respectivas medidas, acompanhado da imagem do teste da viga montada. Conforme mencionado anteriormente, o objetivo dos ensaios realizados em vigas é obter a resistência a flexão da seção transversal. Deve-se, portanto, trabalhar com uma configuração em que haja flexão pura. Optou-se por usar a configuração biapoiada com duas cargas concentradas simétricas, isto é, o ensaio a flexão de quatro pontos.

Cilindros tubulares com pequena espessura são sensíveis ao fenômeno denominado ovalização (efeito Brazier). Por isso, optou-se por preencher com concreto a região da viga sobre os apoios e na região onde é aplicada a carga, justamente para que nestas regiões, que são mais suscetíveis a esse fenômeno, a seção transversal permanecesse inalterada durante o ensaio.

Já na região central, que está submetida a flexão pura, para que fosse garantida que essa área estivesse livre a flexão, optou-se por inserir um cilindro circular de isopor, com diâmetro compatível para evitar um possível deslizamento dos cilindros de concreto. Entende-se que esse cilindro de isopor não interfira de maneira significativa nos resultados.

O carregamento foi aplicado em dois pontos (com uma distância de 700mm entre si) dispostos simetricamente sobre a viga analisada através de uma viga de distribuição formada por quatro tubos quadrados soldados entre si (60x60x6,3mm). A viga de distribuição, por sua vez, foi apoiada na viga analisada através de apoios que se encaixavam adequadamente na viga analisada, mostrados na Figura 36.

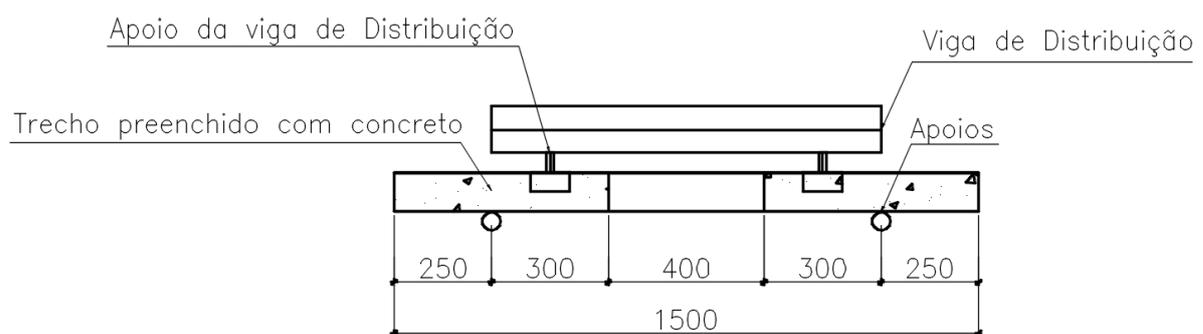


Figura 36 – Esquema do ensaio experimental à flexão pura, com medidas em mm



Figura 37 – Ensaio experimental a flexão pura



Figura 38 - Apoio da viga de transferência de carga

3.5. Instrumentação

A instrumentação utilizada nos ensaios visou medir deslocamentos por meio de transdutores de deslocamentos lineares (LVDTs) e deformações através de extensômetros elétricos. Os LVDTs foram utilizados nos ensaios de colunas, vigas-colunas e vigas em diferentes posições.

Nas colunas e vigas-colunas, dois LVDTs foram posicionados na mesa do equipamento com o objetivo de medir os deslocamentos axiais do elemento estrutural. Também foram posicionados LVDTs nas placas inferiores e superiores que formavam as rótulas, com o objetivo de medir não só os deslocamentos, mas também a rotação nas mesmas. Finalmente, foram posicionados dois LVDTs na horizontal à meia altura das colunas e vigas-colunas com o objetivo de obter a deformada da estrutura. Além disso, quatro extensômetros foram aplicados à meia altura das colunas e vigas-colunas. As instrumentações das colunas e vigas-colunas são mostradas na Figura 39.

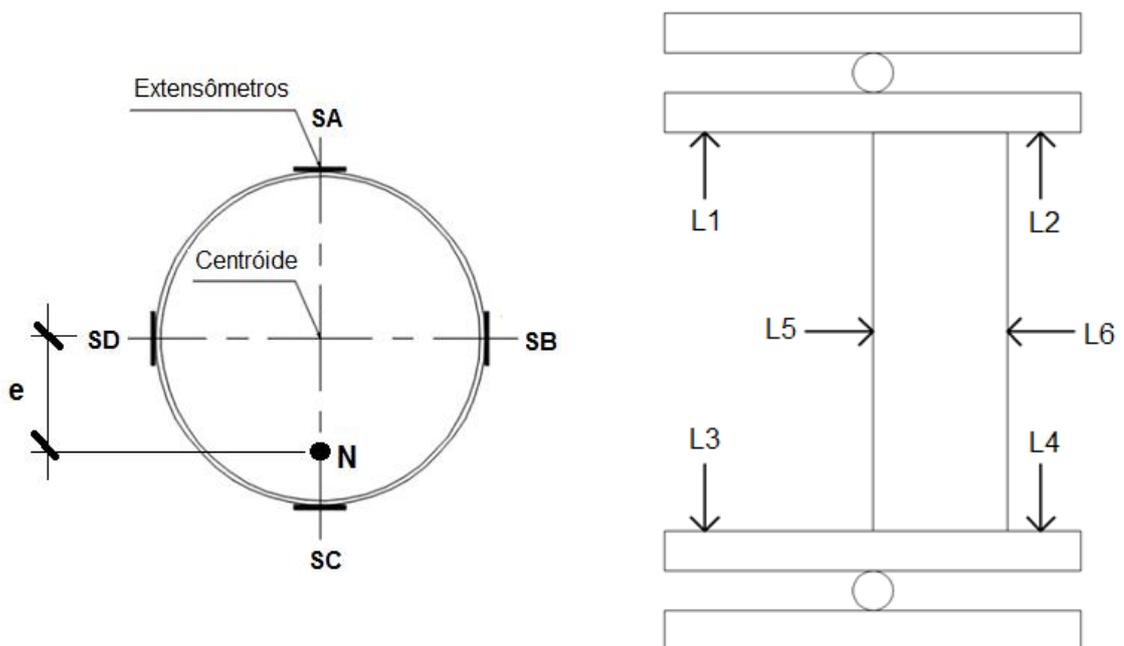


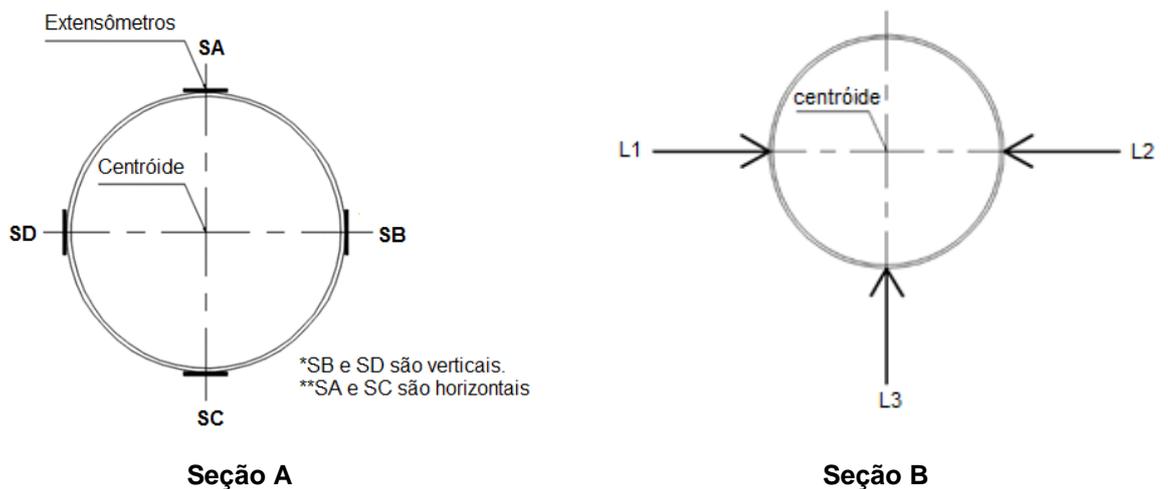
Figura 39 – Instrumentação das colunas e viga-colunas

Nas vigas, um LVDT foi utilizado na prensa mecânica para medir o deslocamento do sistema de suporte, analogamente aos ensaios de colunas e vigas-colunas. O restante da instrumentação da viga foi feito em três seções transversais diferentes, conforme mostrado na Figura 40 e na Figura 41. A seção A, a 50mm do meio do vão, com 4 extensômetros; a seção B, do meio do vão, com LVDTs para obter as medidas de ovalização e da flecha da viga (Figura 42), respectivamente e a seção C, a 50mm do meio do vão, com 8 extensômetros lineares medindo deformações nas direções longitudinais e perpendiculares ao eixo da viga.

Optou-se por instrumentar uma das seções com oito extensômetros (seção C) para que fosse mapeado de maneira mais relevante a distribuição de tensões normais da seção transversal, conforme discutiremos posteriormente.



Figura 40 – Seções de instrumentação do ensaio experimental da viga



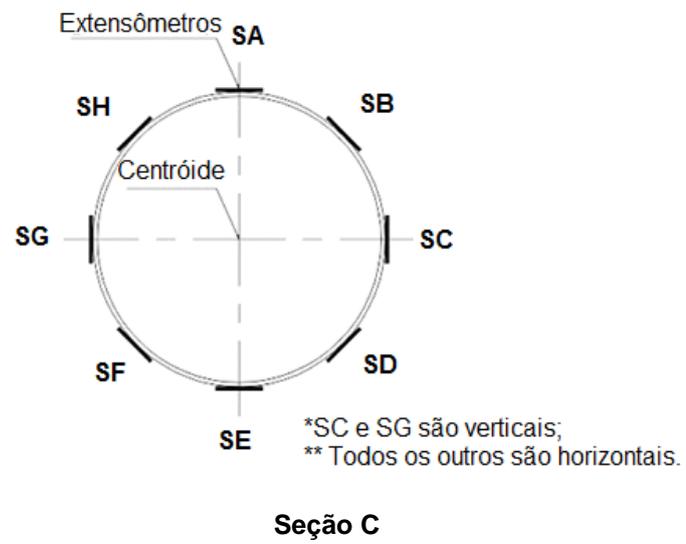


Figura 41 - Seções instrumentadas da viga



Figura 42—Posicionamento dos LVDTs nos ensaios de vigas

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1. Generalidades

No presente capítulo serão apresentados os resultados obtidos para os ensaios das colunas, vigas-colunas e vigas, que foram anteriormente descritos.

4.2. Cargas máximas e modos de falha

4.2.1. Colunas e Vigas-Colunas

Os ensaios de vigas-colunas tiveram comportamentos similares entre as séries de elementos estudados. A Figura 43 e a Figura 44 apresentam os gráficos de carga x deslocamento para cada par de ensaios de colunas e vigas-colunas realizados.

Como pode ser notado, o comportamento dos ensaios de colunas e vigas-colunas foram bastante próximos para cada par de resultados.

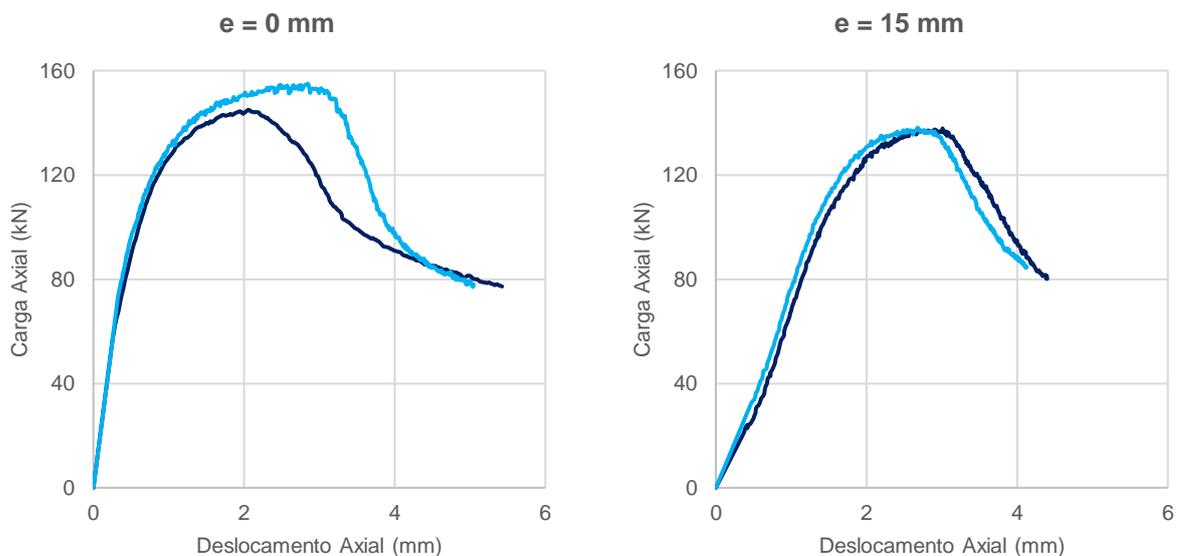


Figura 43 – Curvas carga x deslocamento de ensaios experimentais – viga-colunas – parte 1

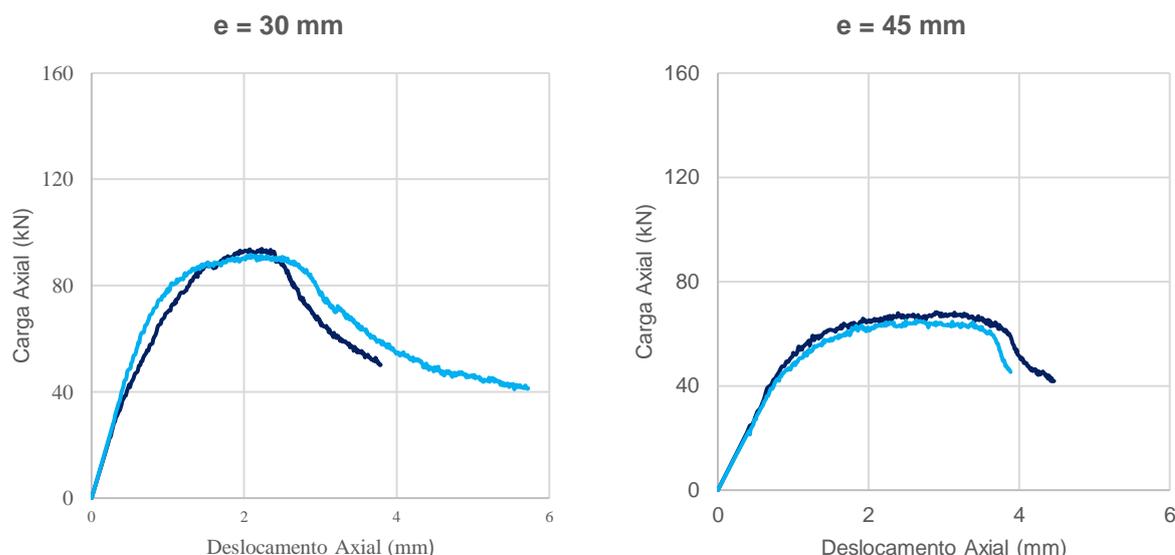


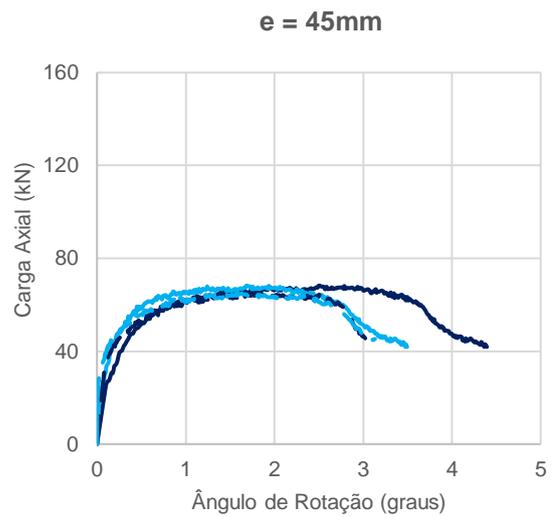
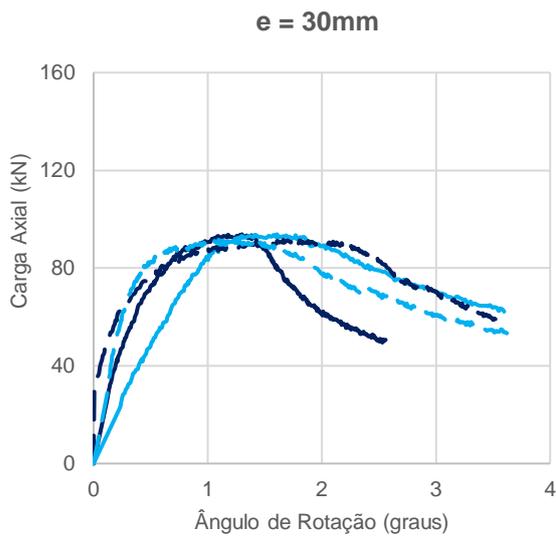
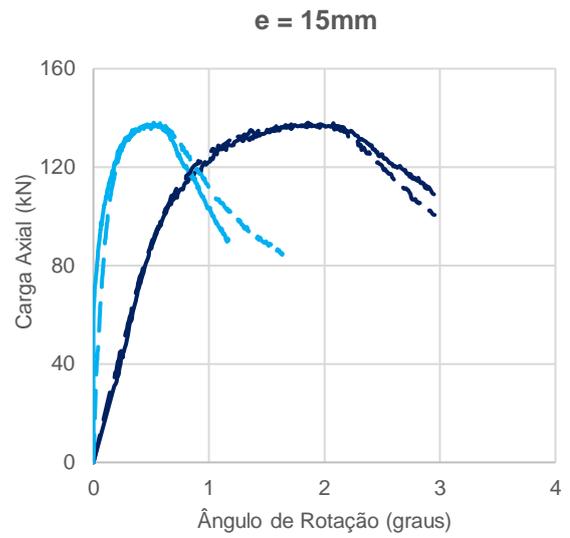
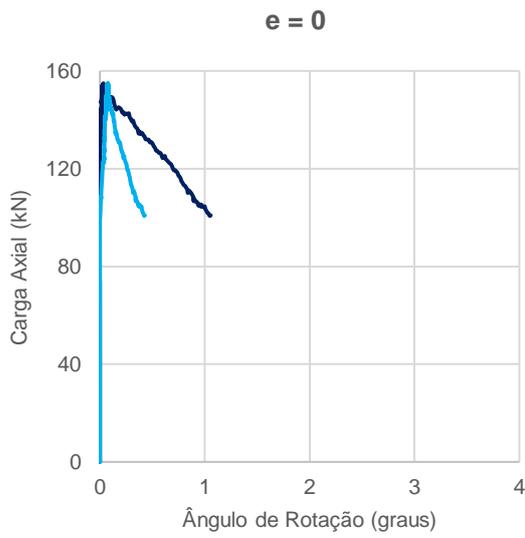
Figura 44 – Curvas carga x deslocamento de ensaios experimentais – viga-colunas – parte 2

A Figura 45 apresenta os gráficos carga \times rotação das placas inferior e superior das colunas e vigas-colunas.

É interessante notar que para $e=0$, além de não se ter utilizado o sistema de placa e rolos metálicos para simular uma estrutura birrotulada, a rotação apresentada refere-se ao prato superior da máquina de ensaios que é rotulado e que não apresentou rotações consideráveis até o instante em que a carga máxima foi atingida. Após este estágio de carregamento, as colunas apresentaram flambagem local próxima a região onde foi aplicada o carregamento.

Para a excentricidade de 15mm, a placa inferior teve uma amplitude de rotação expressivamente menor do que a placa superior. Isso é comprovado pelas deformadas apresentadas na Figura 46 Este comportamento pode ser entendido como o atrito do sistema formado pelas placas e pelo rolo metálico, para o valor de momento fletor que se apresenta consideravelmente pequeno para esse ensaio.

Nos ensaios experimentais realizados com excentricidades superiores, as rotações das placas superior e inferior mostraram-se compatíveis com o esperado, isto é, para o mesmo valor de carga axial, foram observadas rotações das placas inferior e superior com amplitudes similares.



Legenda:

— Ensaio 1 – Placa superior

— Ensaio 1 – Placa inferior

— Ensaio 2 – Placa superior

— Ensaio 2 – Placa inferior

Figura 45 – Curvas carga x rotação das placas dos ensaios experimentais de vigas-colunas



$e = 0 \text{ mm}$



$e = 15 \text{ mm}$

Figura 46 – Deformadas da coluna e da viga-coluna com $e=15\text{mm}$

Os ensaios de colunas e vigas-colunas apresentaram como principal modo de falha, a flambagem local. É importante notar, entretanto, que as vigas-colunas, de maneira geral, apresentaram esse modo de falha em diferentes regiões ao longo do comprimento, como pode ser visto na Figura 47 e na Figura 48.



$e = 0 \text{ mm}$



$e = 15 \text{ mm}$

Figura 47 - Deformadas e modos de falha das colunas e vigas-colunas



$e = 30\text{mm}$



$e = 45\text{ mm}$

Figura 48 – Deformadas e modos de falha das vigas-colunas

A seguir, na Figura 49 mostra-se também, alguns resultados da leitura dos extensômetros para colunas e a viga-coluna com excentricidade de 15 mm.

No caso da coluna nota-se que as faces laterais (extensômetros SB e SD) têm deformações similares, conforme era esperado. Entretanto, as faces referentes aos extensômetros SA e SC apresentam uma ligeira diferença, o que não era esperado, pois se trata de uma coluna. Desta forma, entende-se que pode ter ocorrido alguma pequena excentricidade ao se montar o ensaio ou até mesmo, na colagem dos próprios extensômetros.

No caso da viga-coluna com excentricidade de 15 mm, nota-se novamente que as faces laterais (SB e SD) tem comportamento bastante similar até a carga máxima. Já para a face referente ao extensômetro SC verifica-se uma alta deformação de compressão (negativa) e a face referente ao extensômetro SA apresenta baixas deformações até a carga máxima, quando apresenta deformações de tração, o que era esperado para um ensaio com excentricidade.

Entretanto, para a viga-coluna com excentricidade de 30 mm, nota-se que as faces laterais tem comportamento similar ao início do ensaio, ainda na fase elástica, mas houve uma falha e o extensômetro SB foi perdido. A face referente ao extensômetro SC mostra uma deformação de compressão muito superior aos outros extensômetros, principalmente quando comparado com o ensaio com excentricidade de 15mm.

Isso se deve ao maior momento fletor da viga-coluna e, conseqüentemente, maiores deformações de compressão. Da mesma maneira, a face referente ao ex-

tensômetro SA exibe deformações de tração (positiva) consideravelmente superiores às vistas no ensaio da viga coluna com excentricidade de 15mm.

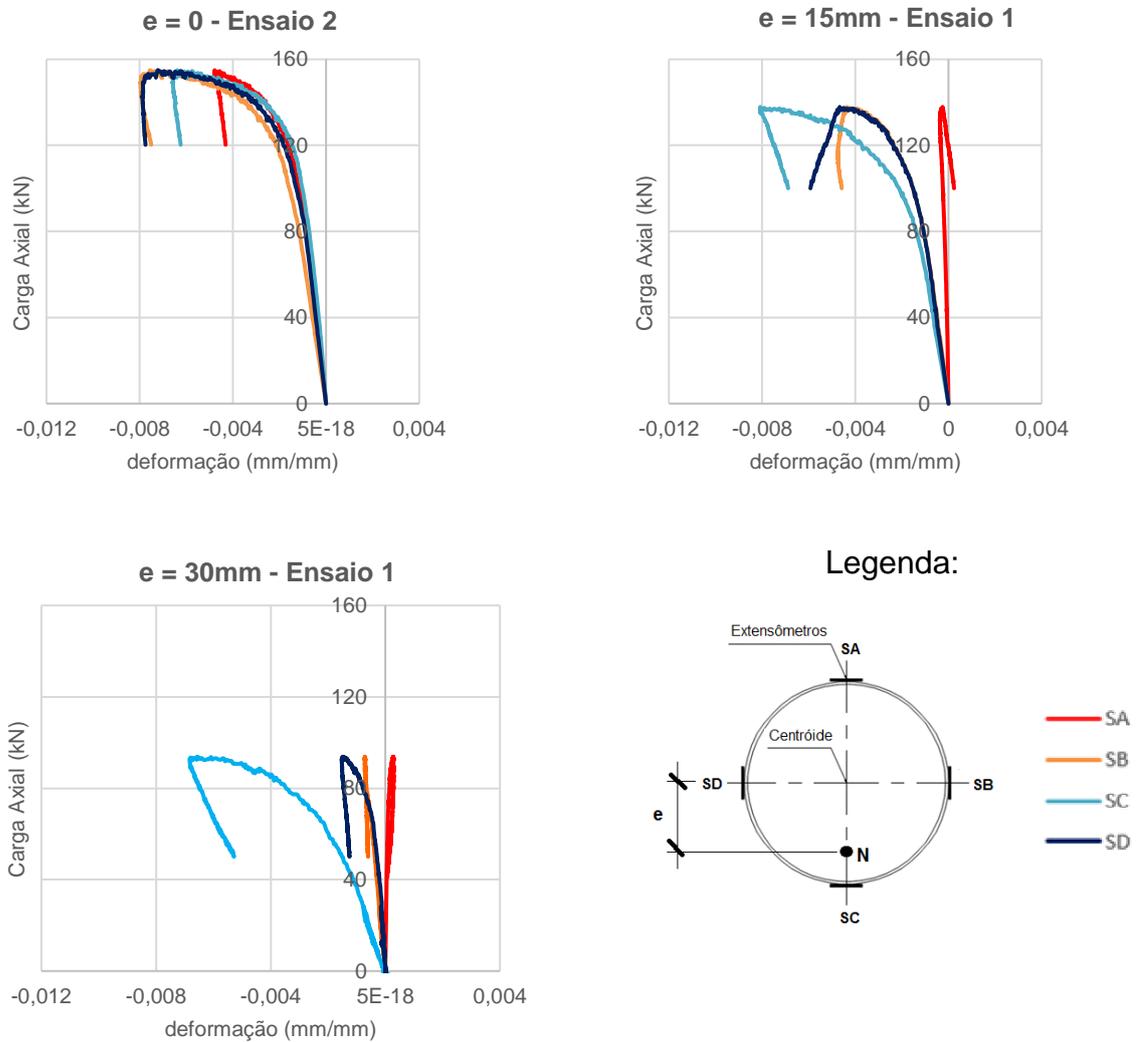


Figura 49 – Carga axial versus deformação da coluna e de vigas-coluna

De forma a apresentar uma síntese dos resultados obtidos, a Figura 50 apresenta todas as curvas carga x deslocamento dos ensaios realizados.

Os valores das cargas foram coerentes com o esperado, já que os seus valores foram tão menores quanto maior era a excentricidade.

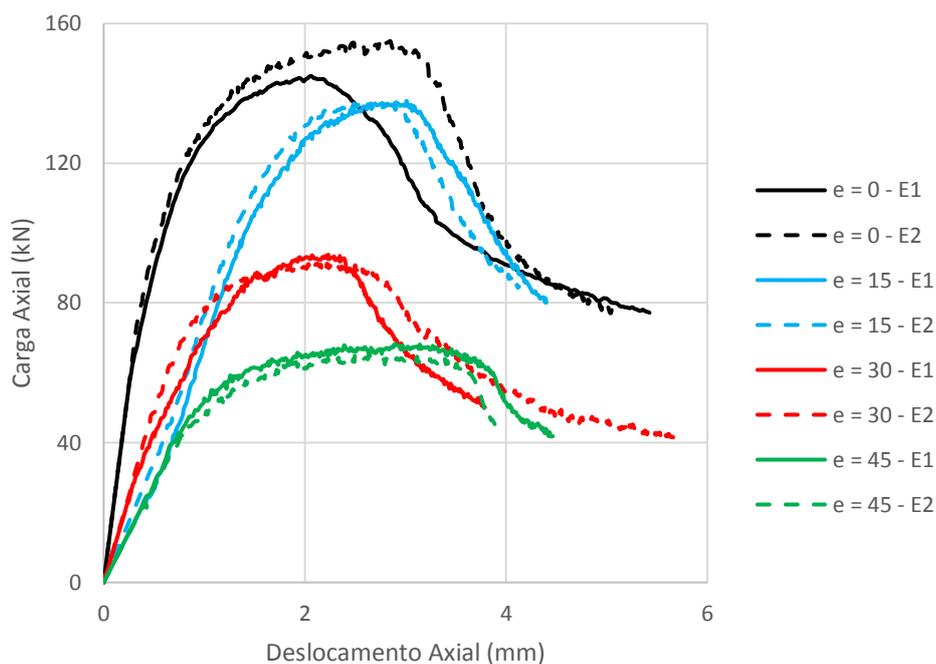


Figura 50–Curvas carga x deslocamento de todos os ensaios de vigas-colunas

4.2.1. Vigas

As curvas relativas às vigas são mostradas com momento fletor x deslocamento na Figura 51. Os dois ensaios experimentais foram bastante parecidos entre si, mostrando coerência, apresentando as cargas últimas similares para o mesmo nível de deslocamento da seção do meio do vão.

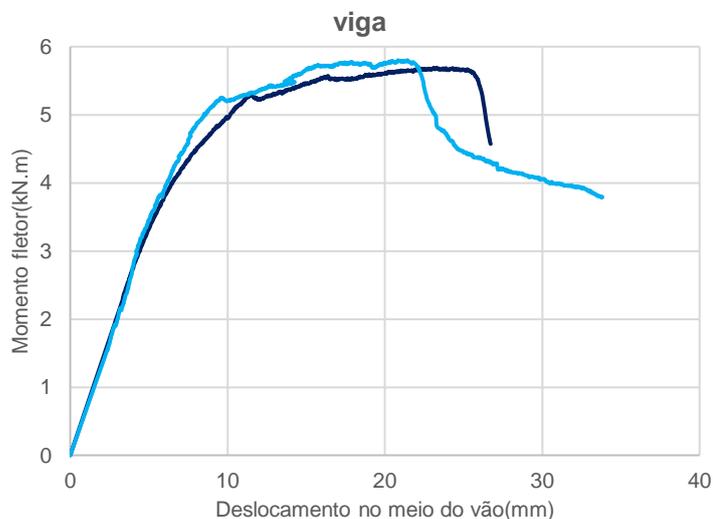


Figura 51–Curvas carga versus deslocamento dos ensaios experimentais – vigas

A curva de momento fletor *versus* rotação da viga é exibida na Figura 52. Novamente, os ensaios mostraram-se compatíveis entre si. As rotações observadas e as respectivas cargas últimas foram similares.

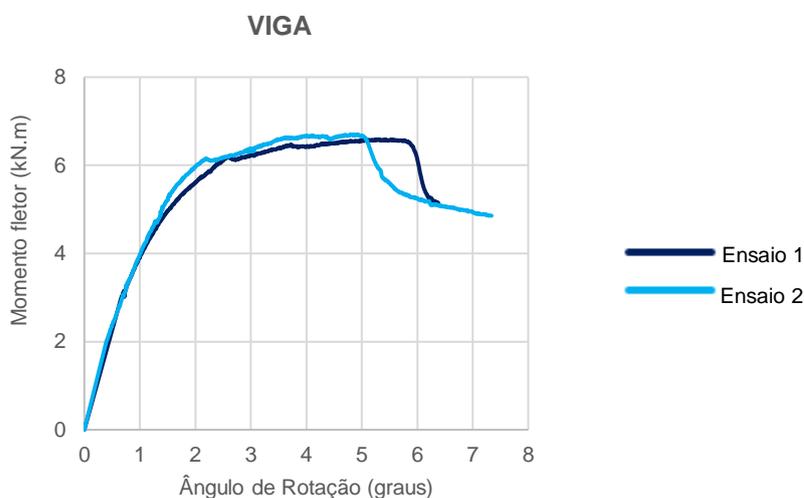


Figura 52 – Curvas carga x rotação dos ensaios experimentais de vigas

As vigas, nos dois ensaios, apresentaram a flambagem local como modo de falha depois de sofrer a ovalização da seção transversal, como era de se esperar, nesse caso. As deformadas das vigas mostrando esse modo de falha podem ser visualizadas na Figura 53.



Figura 53 – Flambagem local e ovalização da seção transversal da viga

A ovalização caracterizada na Figura 54 foi apresentada em termos percentuais da mudança de forma da seção transversal, de acordo com a equação abaixo:

$$Oval (\%) = 100 \times \frac{D(P) - D_o}{D_o} \quad (33)$$

onde,

$D(P)$ é o diâmetro da seção ovalizada, para um determinado valor da carga P ;
 D_o é o diâmetro original da seção transversal

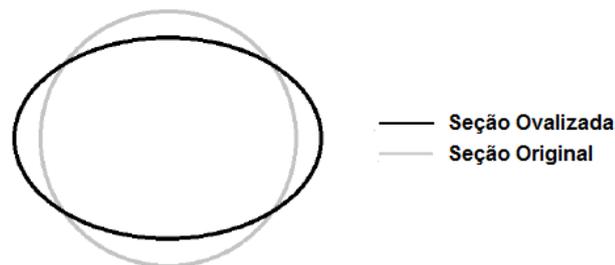


Figura 54 – Seção transversal original x seção transversal ovalizada

No ensaio, a ovalização foi medida com auxílio de LVDTs horizontais dos dois lados da viga, no meio do vão. A dificuldade seria ler os deslocamentos laterais no ensaio, já que a estrutura desloca-se verticalmente e o LVDT horizontal não acompanharia, a princípio, tal deslocamento. Para que fosse feita a leitura adequada destes deslocamentos, mantendo-se o LVDT em sua posição original, utilizaram-se placas de espessura reduzida que fizeram com que os deslocamentos fossem lidos adequadamente, independente da condição deformada da estrutura.

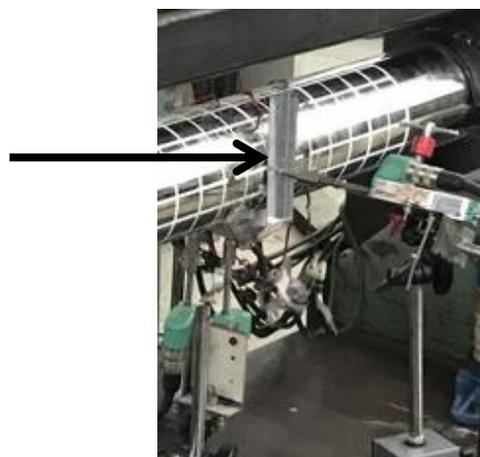


Figura 55 – Medida da ovalização através de LVDTs

Apresenta-se na Figura 56 como ocorre a ovalização durante o ensaio. Percebe-se que a mudança de forma significativa da seção transversal só ocorreu para níveis de momento fletor próximos da carga máxima, isto é, pouco antes da flambagem local. A ovalização correspondente a carga máxima foi próxima dos 2%, o que representa aproximadamente 2 mm de mudança da seção transversal. Além disso, ocorreu uma leitura negativa da ovalização que não era esperada no primeiro ensaio, evidenciando que as placas utilizadas para fazer a leitura do fenômeno estavam ligeiramente inclinadas, neste caso.

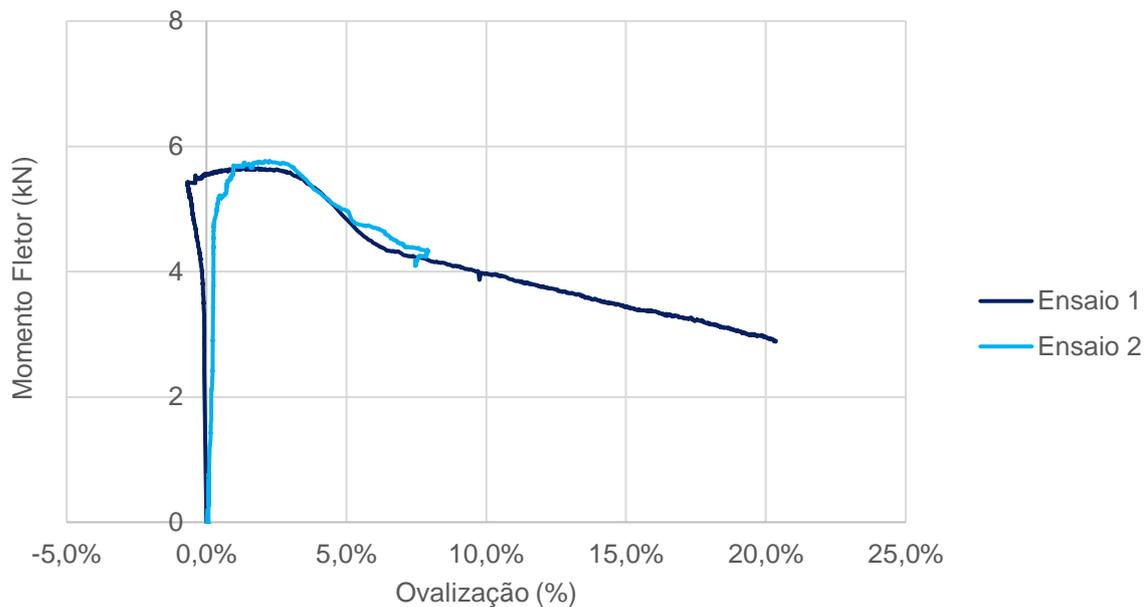


Figura 56 – Gráfico de ovalização *versus* momento fletor dos ensaios experimentais de viga

Durante o carregamento, a ovalização atingiu valores maiores, chegando a 20% no primeiro ensaio. O que ocorre na prática é que a seção transversal deforma-se cada vez mais devido a sua perda de resistência decorrente da diminuição do módulo resistente. No início do ensaio tem-se uma circunferência e depois que se tem a ovalização, passa-se a observar uma elipse, com resistência muito inferior a de uma seção circular.

Na Figura 57 mostra-se o gráfico de momento fletor *versus* deformação para a seção transversal da viga. Trata-se de uma viga submetida a flexão pura na seção estudada. Dessa maneira, espera-se que as tensões cisalhantes, representadas pelos extensômetros verticais SC e SG sejam desprezíveis ao longo do ensaio. De fato, as deformações nesse caso, apresentam valores próximos de zero até a carga

máxima. Também conforme o esperado, devido a configuração do ensaio, os extensômetros horizontais referentes as fibras superiores (SA, SB e SH) devem ter deformações negativas (compressão) e os extensômetros horizontais referentes às fibras inferiores (SD, SE e SF) devem ter deformações positivas (tração). Além disso, os extensômetros posicionados mais distantes da linha neutra (SA e SE) devem apresentar deformações significativamente superiores em relação aos outros, o que ocorreu experimentalmente, demonstrando, por isso, a consistência destes resultados.

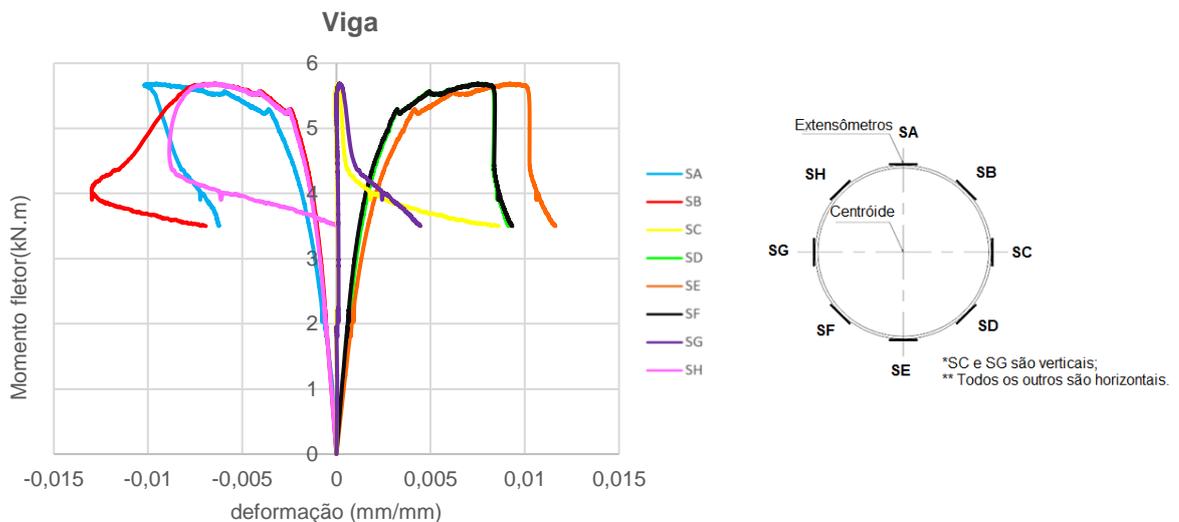


Figura 57– Momento fletor versus deformação do ensaio de viga

4.3. Síntese dos resultados

Finalmente, a Tabela 5 exibe o valor dos pares de esforço axial (N) e de momento fletor (M) de todo o programa experimental.

A Figura 58 exibe a curva com cada um dos pontos (N,M) de todo o programa experimental realizado. Percebe-se, novamente, coerência entre os resultados (quanto maior a excentricidade, maior é o momento fletor e menor é o esforço normal) e claramente, uma tendência para os pontos exibidos.

Tabela 5–Carga axial máxima e respectivos momentos fletores de cada ensaio

Ensaio	N (kN)	M (kN.m)
CHS101.6x1.5-AUS-370-e0-1-25.01	144,9	0,0
CHS101.6x1.5-AUS-300-e0-2-02.05	154,9	0,0
CHS101.6x1.5-AUS-300-e15-1-22.05	137,9	2,1
CHS101.6x1.5-AUS-300-e15-2-22.05	138,1	2,1
CHS101.6x1.5-AUS-300-e30-1-27.04	93,8	2,8
CHS101.6x1.5-AUS-300-e30-2-27.04	91,6	2,7
CHS101.6x1.5-AUS-300-e45-1-18.05	68,2	3,1
CHS101.6x1.5-AUS-300-e45-2-18.05	65,2	2,9
CHS101.6x1.5-AUS-1500-viga-1-12.06	0,0	5,7
CHS101.6x1.5-AUS-1500-viga-2-19.06	0,0	5,8

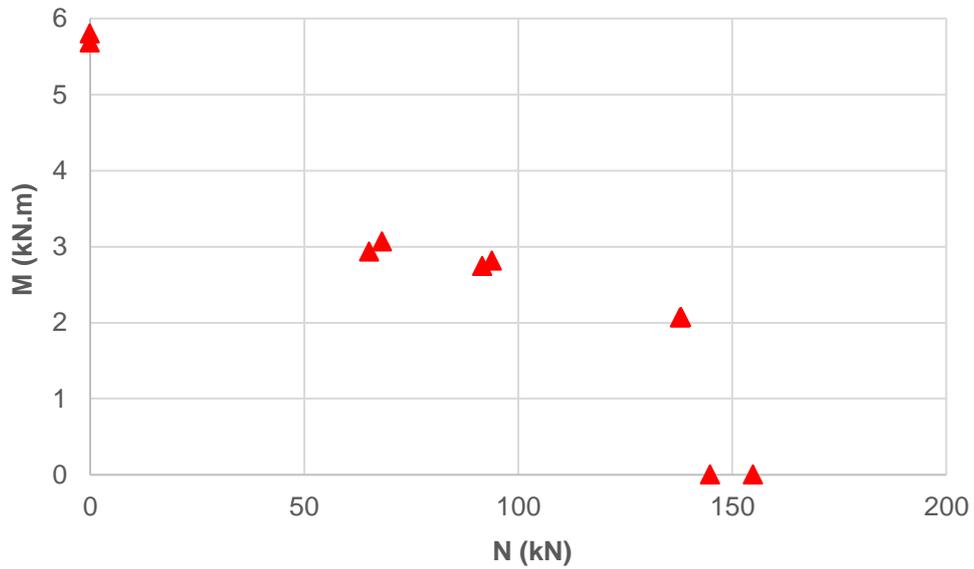


Figura 58–Pontos para determinação do diagrama de interação M × N.

5. ANÁLISE NUMÉRICA

Este capítulo tem como principal objetivo descrever a análise numérica realizada neste estudo. A modelagem foi feita com intuito de ampliar o domínio desta dissertação, considerando os ensaios experimentais realizados.

Os modelos deste estudo foram feitos através do programa de elementos finitos ANSYS [36]. Os resultados obtidos nessa análise numérica foram posteriormente comparados com os resultados dos ensaios experimentais.

5.1. Geometria e condições de contorno

5.1.1. Colunas e vigas-colunas

Os modelos das colunas e vigas-colunas são formados pela seção transversal do tubo circular CHS 101,6 x 1,5. Os comprimentos dos modelos são os mesmos utilizados no dimensionamento e nos ensaios experimentais realizados apresentados anteriormente.

As extremidades dos modelos numéricos foram consideradas rotuladas, para simular adequadamente o que foi reproduzido nos ensaios experimentais. Além disso, foi utilizada uma chapa com espessura adequada sobre o tubo para que a carga fosse transferida de maneira uniforme através da seção transversal. Para reproduzir a excentricidade das vigas-colunas, foi criado um ponto excêntrico em um dos eixos coordenados (eixo x) em ambas as extremidades com vínculos rígidos formados através de um ponto de massa nulo. A representação dos modelos pode ser vista da Figura 59 até a Figura 61. No caso das colunas e vigas-colunas, para que o comportamento do modelo fosse o mais próximo do que ocorreu no programa experimental, optou-se por restringir deslocamentos e rotações nos pontos onde foi aplicada a carga. A Tabela 6 mostra quais os vínculos foram assumidos nos modelos.

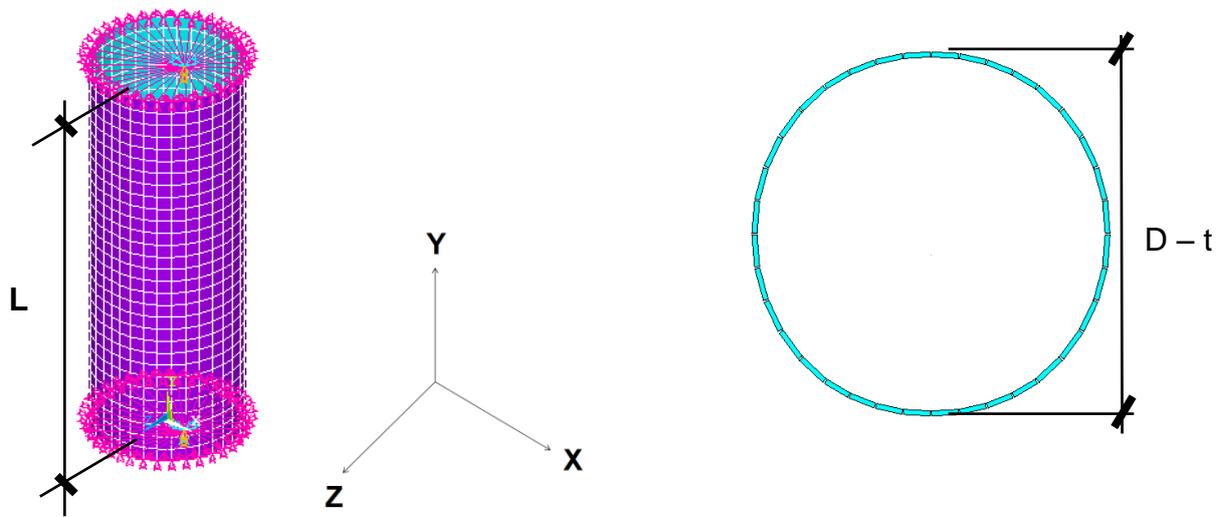


Figura 59 – Geometria do modelo de colunas e vigas-colunas com o eixo coordenado

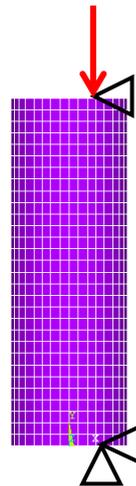


Figura 60 - Representação das condições de contorno do modelo numérico de viga-colunas

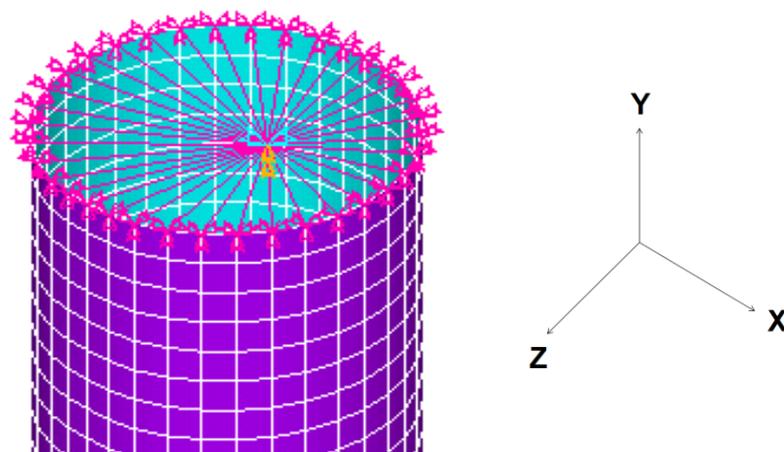


Figura 61 – Excentricidade simulada por meio de um ponto de massa nulo

Tabela 6 – Tabela de vínculos dos modelos de viga-coluna

	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ
Topo	Restringido	Livre	Restringido	Livre	Restringido	Livre
Base	Restringido	Restringido	Restringido	Livre	Restringido	Livre

5.1.2. Vigas

Os modelos das vigas são também formados pela seção transversal do tubo circular CHS 101,6 x 1,5. Os comprimentos dos modelos são os mesmos utilizados no dimensionamento e nos ensaios experimentais realizados.

Os apoios dos modelos numéricos foram considerados rotulados, para simular adequadamente o que foi reproduzido nos ensaios experimentais e as restrições que foram feitas são exibidas na Tabela 7. Os apoios aplicados em dois pontos da viga foram restringidos a translação em todas as direções (x, y e z) no primeiro apoio e a translação nos eixos y e z no segundo. Os trechos que foram preenchidos com concreto no ensaio experimental foram reproduzidos através da utilização de espessuras significativamente superiores ao tubo CHS 101,6 x 1,5 que proporcionavam maior rigidez a esses trechos, para que o fenômeno de ovalização não fosse observado nessas regiões em que as cargas são aplicadas.

A representação da modelagem da viga pode ser vista nas Figura 62 e Figura 63.

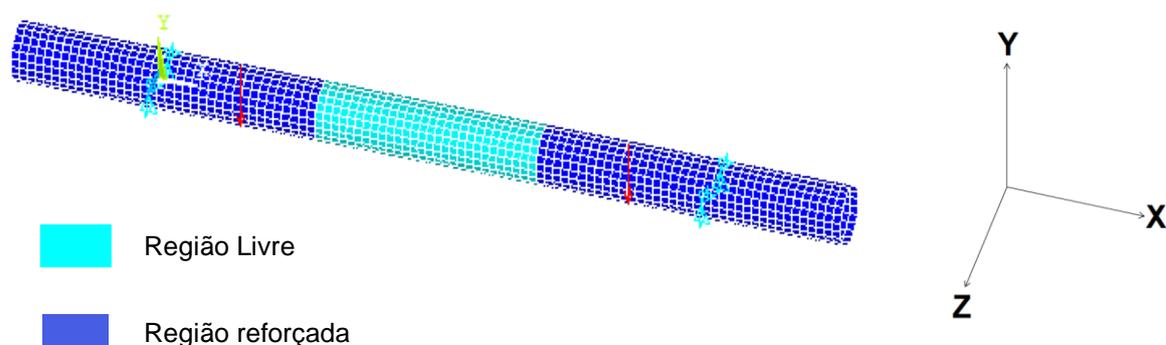


Figura 62 – Geometria do modelo da viga

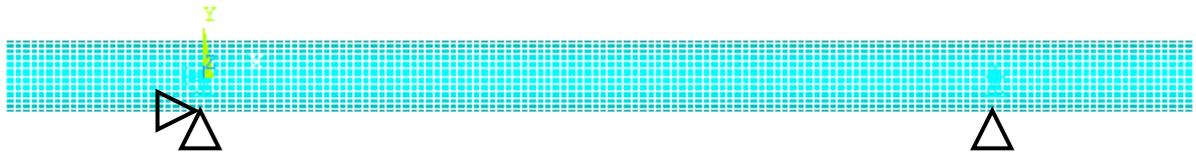


Figura 63 - Representação das condições de contorno do modelo numérico de vigas

Tabela 7 - Tabela de Vínculos dos modelos de viga

	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ
Apoio 1	Restringido	Restringido	Restringido	Livre	Livre	Livre
Apoio 2	Livre	Restringido	Restringido	Livre	Livre	Livre

5.2. Malha e elemento finito utilizado

Os modelos numéricos de vigas, colunas e vigas-colunas foram feitos utilizando o elemento de casca SHELL181 presente na biblioteca de elementos finitos do programa ANSYS[36]. Este elemento é utilizado de maneira conveniente em estruturas que sejam compostas por cascas que apresentem espessuras finas ou médias. O elemento SHELL181 é formado por quatro nós com seis graus de liberdade por nó: translações na direção dos eixos X, Y e Z e rotações relativas aos eixos X, Y e Z, respectivamente, conforme apresentado na Figura 64.

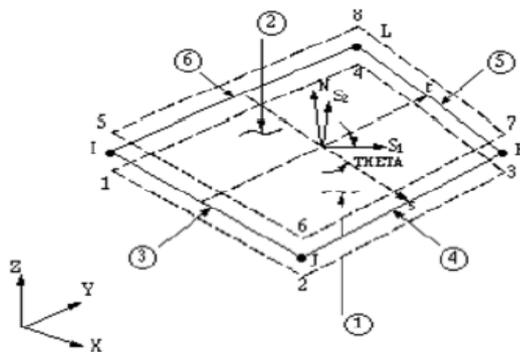


Figura 64 – Elemento SHELL181 [36]

O elemento SHELL181 é também adequado para a modelagem de problemas estruturais que envolvam análise linear e não-linear, física e/ou geométrica, como é o caso do presente estudo. As malhas de elementos finitos foram adotadas de maneira que a densidade de elementos representasse de maneira adequada os efeitos provenientes dos carregamentos e das condições de contorno empregadas.

Neste trabalho, a construção de malha visou manter uma relação de forma entre lados dos elementos próximo da unidade.

5.3. Material

A curva tensão x deformação utilizada no modelo foi elaborada a partir da caracterização do material feita anteriormente neste trabalho. A Figura 65 mostra a curva adotada no modelo e a Tabela 8 resume os pontos usados no modelo numérico. Os pontos foram adotados correspondente a uma média dos ensaios a tração exibidos no capítulo 3.

Tabela 8 – Pontos de deformação e tensão utilizados na análise numérica

Deformação (%)	Tensão (MPa)
0,00	0,00
0,10	205,00
0,20	255,00
0,30	275,00
0,34	280,52
0,40	290,00
0,50	300,00
0,70	320,00
1,00	335,00
5,00	412,00
10,00	493,00
20,00	582,00
30,00	627,00
40,00	655,00
45,28	661,49

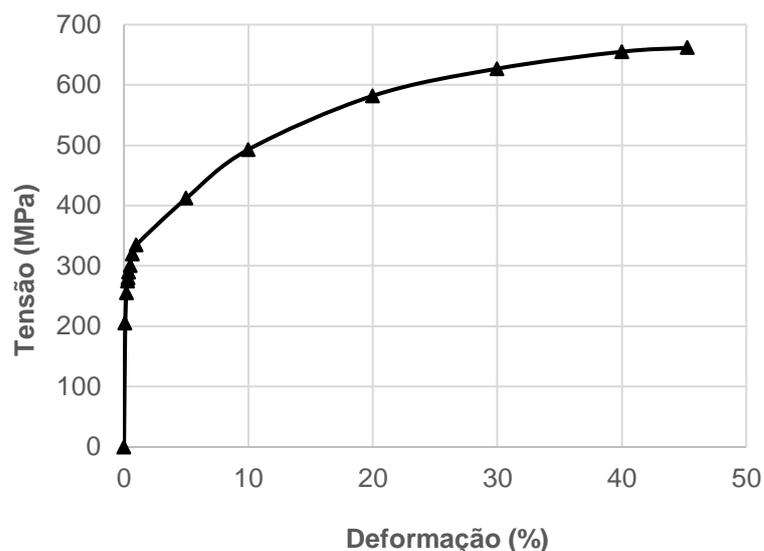


Figura 65 - Curva tensão x deformação adotada nos modelos numéricos

5.4. Metodologia de análise

A análise numérica tem como objetivo fazer um complemento da avaliação dos fenômenos que são observados nos tubos circulares submetidos a flexão pura, flexão composta ou simplesmente compressão.

O procedimento de modelagem no programa ANSYS[36] é dividido em três etapas principais: pré-processamento, solução e pós-processamento. Nas duas primeiras etapas são realizadas a modelagem geométrica da estrutura, a definição do tipo de elemento, a definição das características do material utilizado, demarcação da malha de elementos finitos, adição das forças e deslocamentos atuantes, atribuição das condições de contorno, aplicação da imperfeição inicial, e a definição do tipo de análise escolhido. Na etapa de pós-processamento são obtidos os resultados referentes a modelagem.

A aplicação da imperfeição inicial é realizada seguindo o resultado de uma avaliação de instabilidade elástica (autovalores e autovetores) e se tem como configuração deformada, o primeiro modo de flambagem da estrutura em questão. Cabe ressaltar que para os modelos avaliados na presente dissertação, o primeiro modo de flambagem, que indicou uma flambagem local da estrutura, conforme os ensaios

experimentais apresentaram, é suficiente para gerar as imperfeições iniciais na geometria da estrutura.

Para todos os elementos, foi suposto que esta amplitude depende diretamente da espessura da seção transversal. Esses valores foram modificados posteriormente, quando foi realizada a calibração do modelo numérico.

Após a inserção das imperfeições iniciais geométricas, o modelo era novamente processado através de uma análise não linear elasto-plástica com a introdução de deslocamento prescrito até que fosse observada a perda da capacidade resistente do elemento em questão e, dessa forma, era obtida a carga máxima resistente de forma que os resultados numéricos possam ser comparados com os resultados experimentais.

5.5. Calibração do modelo numérico

A calibração consiste em avaliar a precisão dos modelos numéricos desenvolvidos com base no método dos elementos finitos comparando-se os resultados de cargas máximas, curvas carga x deslocamento e modos de flambagem com os testes experimentais.

Neste estudo, a calibração foi feita comparando-se as cargas máximas encontradas nos ensaios experimentais com as obtidas nos modelos numéricos, para uma série de valores diferentes de imperfeição inicial.

Por se tratar de modelos diferentes, os modelos de vigas-colunas foram calibrados separadamente do modelo das vigas. Ambos os modelos tiveram as imperfeições representadas por frações da espessura. Depois de extrair os resultados, procedeu-se para a escolha do valor ótimo para a amplitude da imperfeição inicial, calculando a média da relação do valor da carga máxima numérica (N_{num}) com a carga máxima experimental (N_{exp}) e o respectivo coeficiente de variação. A imperfeição inicial escolhida seria a que apresentasse, simultaneamente, o valor da relação N_{num}/N_{exp} mais próximo da unidade e o coeficiente de variação mais próximo de zero (indicando baixa variabilidade dos dados obtidos).

Para as excentricidades de 15mm e para as vigas, os valores do modelo numérico foram expressivamente inferiores aos observados no ensaio experimental.

Desse modo, a amplitude da imperfeição inicial adotada para as colunas e vigas-colunas foi de $t/100$ e a para as vigas foi de $t/1000$. Conforme pode ser visto nas tabelas a seguir.

Usou-se valores menores para as amplitudes do modelo de vigas por terem sido feitas análises prévias de sensibilidades deste modelo que demonstraram que para altos valores de amplitude de imperfeição inicial, os valores mostravam-se consideravelmente inferiores aos valores encontrados no programa experimental

Tabela 9 – Calibração do modelo de colunas e vigas-colunas

Cargas Últimas (kN)						
excentricidade (mm)	Resultados Experimentais		Resultados Numéricos			
	Ensaio 1	Ensaio 2	t/10	t/20	t/50	t/100
0	144,90	154,90	148,30	153,33	157,31	157,69
15	137,90	138,10	105,32	108,64	111,52	112,96
30	93,8	91,6	83,65	86,29	88,49	89,63
45	68,2	65,2	69,55	71,35	72,83	73,6
Média (N _{num} /N _{exp})	-	-	0,91	0,94	0,96	0,97
Coeficiente de Variação	-	-	7,94%	8,13%	8,30%	8,12%

Tabela 10 - Resultados Numéricos da Calibração de Vigas

Momentos Fletores Máximos (kN.m)					
	Resultados Experimentais		Resultados Numéricos		
	Ensaio 1	Ensaio 2	t/100	t/500	t/1000
	5,69	5,81	4,65	4,68	4,69
Média (N _{num} /N _{exp})	-	-	0,81	0,81	0,82
Coeficiente de Variação	-	-	0,80%	0,81%	0,81%

As curvas carga x deslocamento dos modelos numéricos bem como as experimentais são mostradas na Figura 66 e na Figura 67 de forma a evidenciar a calibração dos modelos numéricos desenvolvidos.

Com os resultados já calibrados, ou seja, comparados com os ensaios experimentais, pode-se extrapolar os resultados obtidos com os modelos numéricos para

excentricidades superiores às utilizadas no programa experimental e expandir a curva de interação M x N, conforme apresentado na Figura 68.

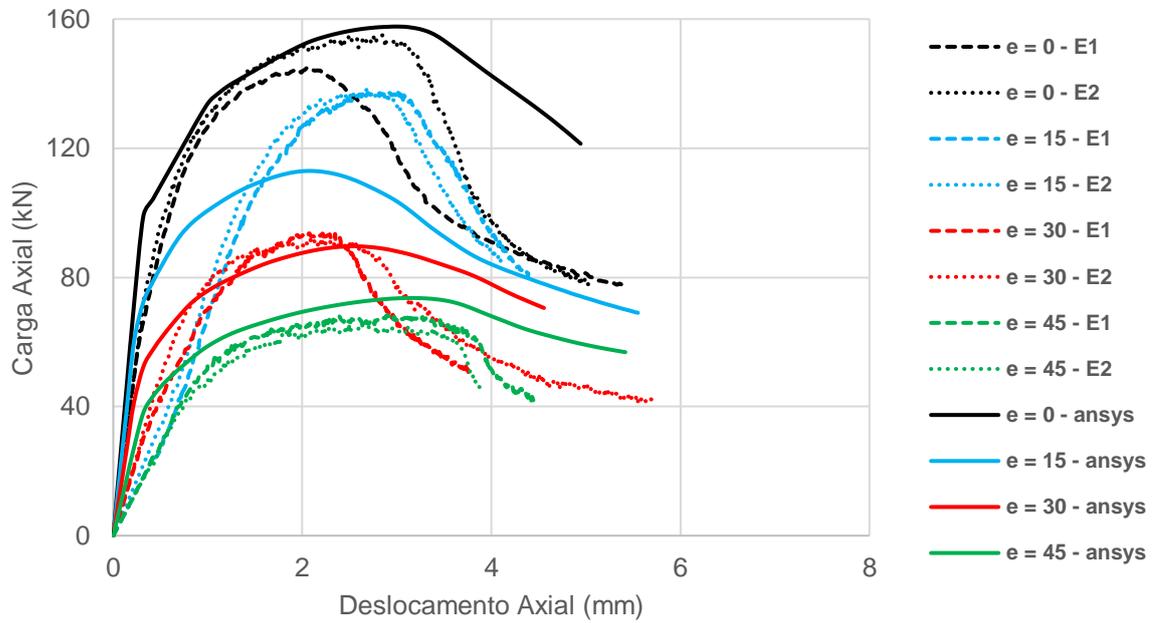


Figura 66—Curvas carga x deslocamento - modelos numéricos e ensaios experimentais – colunas e vigas-colunas

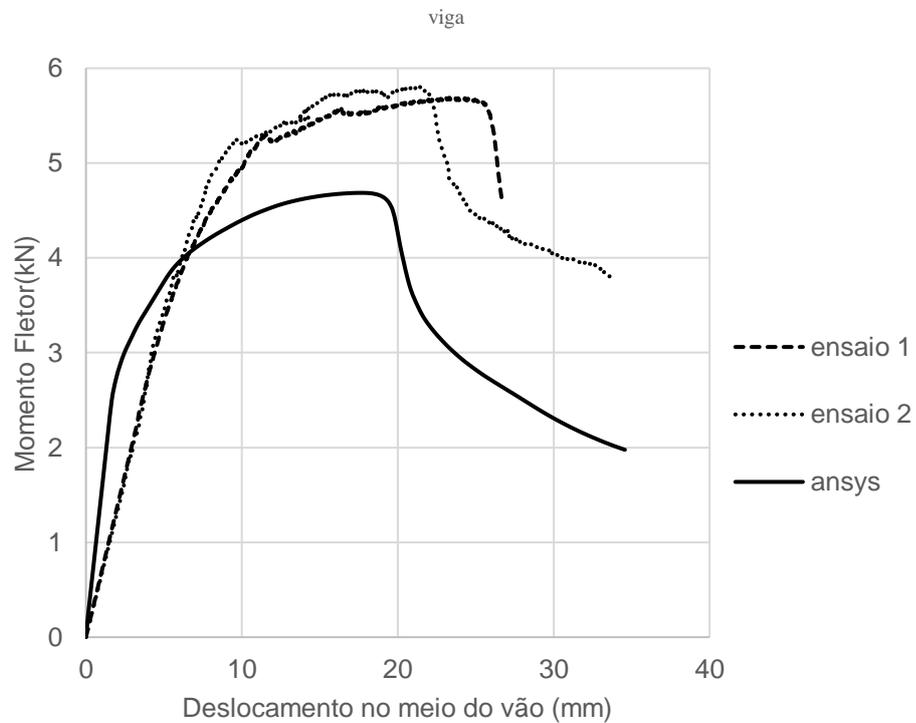


Figura 67—Curvas carga x deslocamento vertical- modelos numéricos e ensaios experimentais – vigas

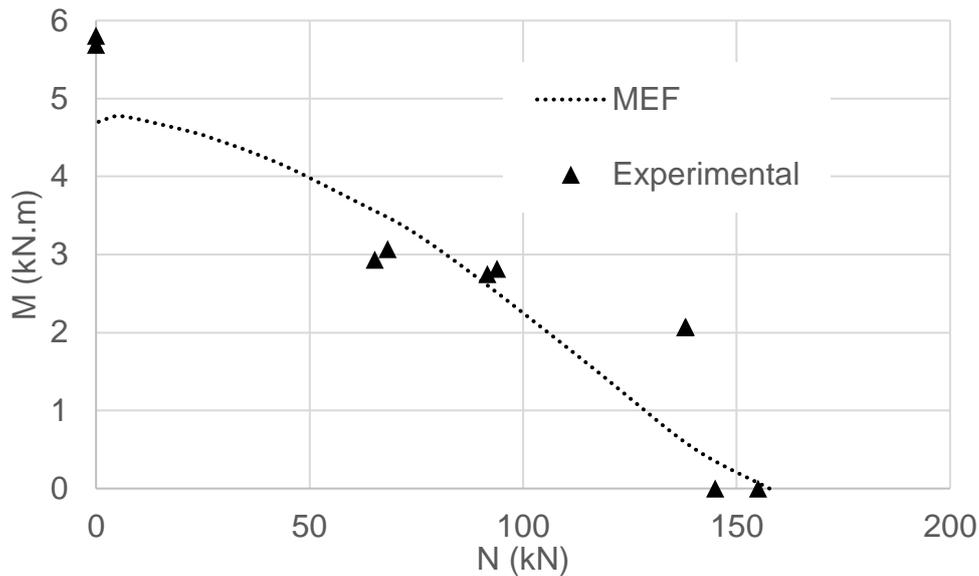
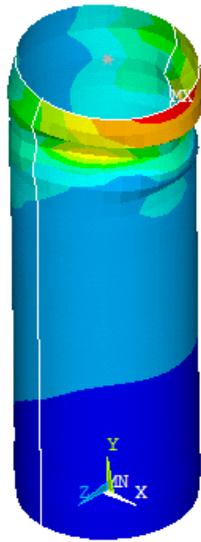


Figura 68 – Diagrama de interação M x N - Experimental e Numérico

5.6. Comparação entre os métodos

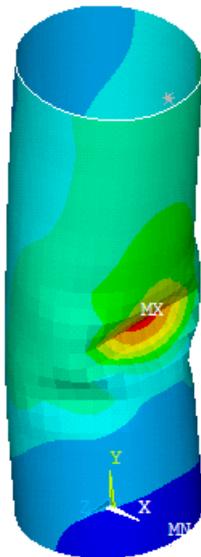
O modelo numérico calibrado permite que seja feita a avaliação da resistência dos elementos constituídos de tubos circulares de aço inoxidável austenítico em um maior espectro de excentricidades, como foi mostrado ao fim do quinto capítulo deste estudo.

Na Figura 69 e na Figura 70 são exibidas as deformadas de alguns ensaios experimentais e seus respectivos modelos numéricos. Percebe-se que para a coluna, a flambagem local ocorre próxima à região onde foi aplicado o carregamento, em ambos os casos. Na viga-coluna com excentricidade de 45mm, a falha ocorreu nas adjacências da região a meia altura comprimida, em conformidade com o ensaio. A viga ensaiada, por sua vez, exibiu deformada também em conformidade com o seu respectivo modelo numérico.

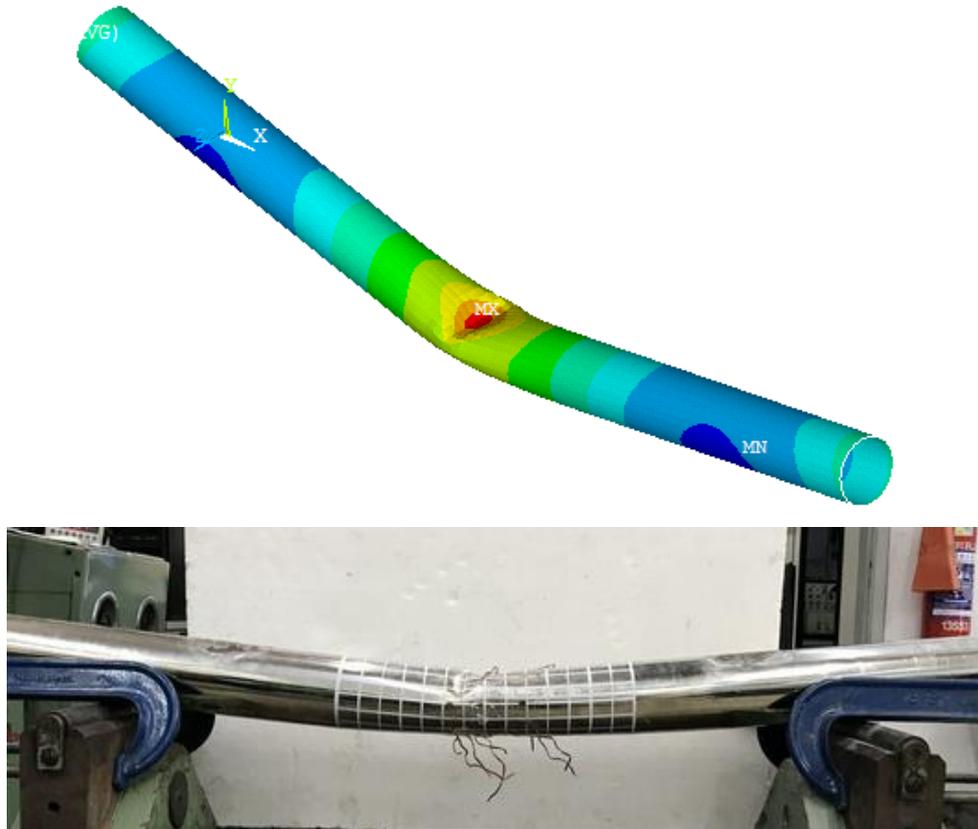


e = 0 mm

Figura 69– Típicas deformadas dos modelos numéricos da coluna, viga-colunas e da viga – Parte 1



e = 45 mm



Viga

Figura 70 - Típicas deformadas dos modelos numéricos da coluna, viga-colunas e da viga – Parte 2

A Tabela 11, por sua vez, resume e compara as cargas máximas para todos os elementos ensaiados, comparando os métodos apresentados com os valores encontrados com o modelo de elementos finitos e com a média dos testes experimentais.

O modelo numérico foi comparado com as duas normas e a que mais se aproximou do modelo numérico foi o Método da Resistência Contínua. Entretanto, ambos mostraram resultados conservadores.

As médias dos resultados dos testes experimentais foram também comparadas com o Eurocode 3 Parte 1-4 [7], com o Método da Resistência Contínua [8] e com os modelos numéricos. Novamente, os métodos analíticos mostraram-se conservadores, sendo os resultados mais distantes dos encontrados nos testes experimentais aqueles calculados pelo Eurocode 3 Parte 1-4 [7]. A comparação entre modelo numérico e o programa experimental mostrou maiores semelhanças. A exceção faz-se aos ensaios de viga-coluna com excentricidade de 15mm e do ensaio de vigas.

Tabela 11 – Cargas máximas de todos os métodos apresentados

	CHS 101,6 x 1,5				
	Coluna (kN)	Viga-coluna (kN)			Viga (kN.m)
		excentricidade (mm)			
		15	30	45	
Ensaio 1	144,91	137,87	93,83	68,21	5,69
Ensaio 2	154,94	138,08	91,62	65,2	5,80
Modelo (MEF)	157,69	112,94	89,63	73,6	4,69
EC3	135,57	84,30	61,16	47,99	3,34
CSM	151,39	92,28	66,36	51,81	3,54
<u>Eurocode</u> MEF	0,86	0,75	0,68	0,65	0,71
<u>CSM</u> MEF	0,96	0,82	0,74	0,70	0,75
<u>MEF</u> Teste	1,05	0,82	0,97	1,10	0,82
<u>Eurocode</u> Teste	0,90	0,61	0,66	0,72	0,58
<u>CSM</u> Teste	1,01	0,67	0,72	0,78	0,62

A Figura 71 mostra graficamente a comparação entre o estudo paramétrico realizado com a modelagem em elementos finitos, os modelos teóricos (EC3 e CSM) e os resultados obtidos no programa experimental.

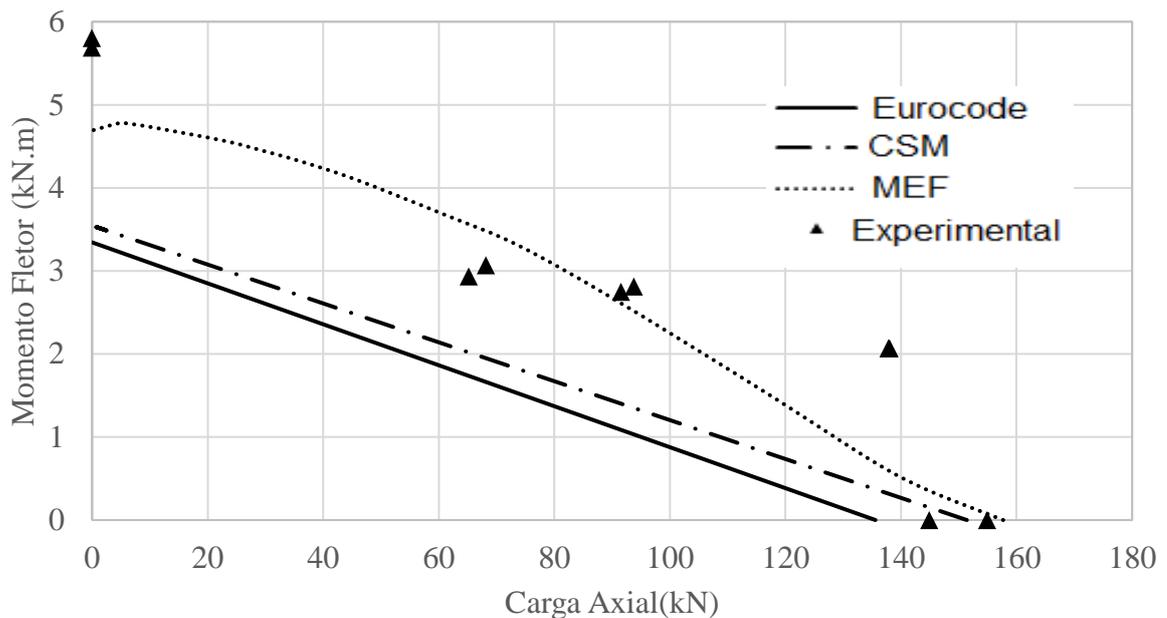


Figura 71 – Curva M x N – comparação entre todos os métodos

Como pode ser observado pela comparação entre os métodos, o Eurocode 3 1-4 [7] mostrou ser conservador, em todos os casos, principalmente quando comparado com o CSM[8]. Mas apesar disso, os resultados experimentais, assim como os resultados extraídos da modelagem numérica, mostraram-se consideravelmente superiores aos observados quando usados os dois métodos analíticos. Isso mostra que, para o presente estudo, tanto o EC3 quanto o CSM mostram-se conservadores.

O resultado conservador do Método da Resistência Contínua[8] e próximo do Eurocode 3 Parte 1-4 [7] deve-se principalmente a alta esbelteza da seção transversal, que leva a uma capacidade de deformação próxima a 1 e que conduz a valores próximos de tensão entre os dois métodos e, conseqüentemente, pouca diferença entre eles. Alguns cálculos relativos ao CSM são mostrados no Anexo A. Além disso, no trabalho realizado por Buchanan et al. [32], conforme foi discutido no segundo capítulo, seções transversais compostas de aço inoxidável que apresentavam esbelteza entre os valores de 0,2 e 0,3 tinham uma taxa de deformação $\left(\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y}\right)$ real consideravelmente superior a taxa de deformação calculada pela curva base proposta. Como maior taxa de deformação implica em maiores resistências, as seções com esbeltezas neste intervalo apresentaram resultados que eram expressivamente superiores ao esperados pelo método.

É importante mencionar que a tensão de cálculo do Método da Resistência Contínua [8], f_{csm} , tem relação 1,12 maior que a tensão de escoamento f_y assumida pelo Eurocode 3 Parte 1-4 [7]. Fica claro que a aplicação do Método da Resistência Contínua apresentou ser bem menos conservadora do que o Eurocode 3 Parte 1-4 para o caso de tubos circulares submetidos a flexo-compressão compostos de aço inoxidável. Entretanto, os resultados do CSM não foram próximos aos apresentados experimentalmente. Esse fator tem a ver com as dimensões da seção transversal que se traduzem em uma alta taxa de deformação $\left(\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y}\right)$.

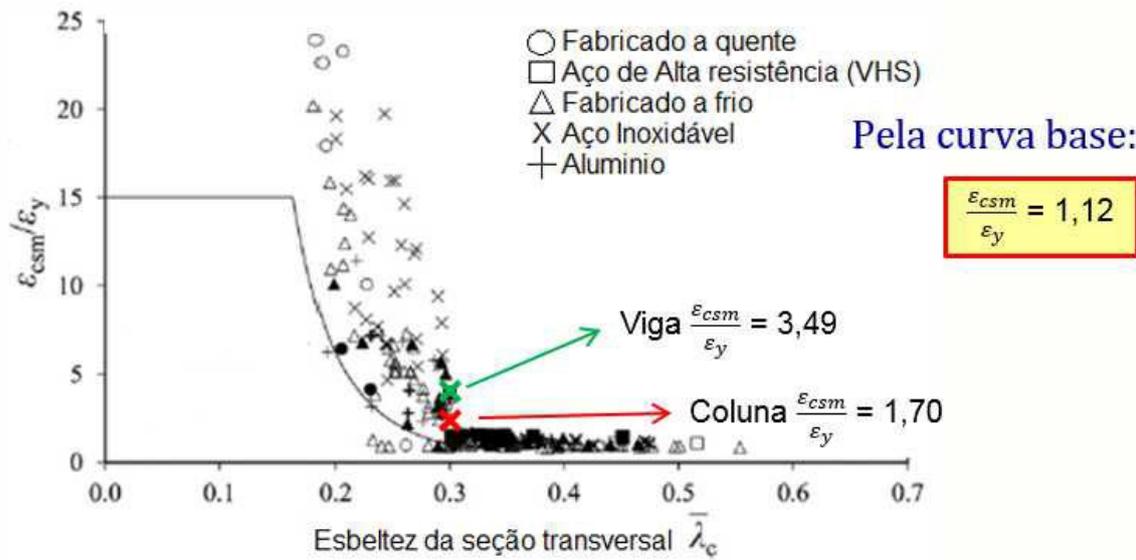


Figura 72 - Esbeltez da seção transversal *versus* taxa de deformação – valores dos ensaios

6. CONCLUSÕES

6.1. Introdução

A aplicação de elementos estruturais constituídos de aço inoxidável tem desenvolvido cada vez mais. O aço inoxidável não é, entretanto, um material que possui custo inicial baixo. Todavia, este tipo de material pode ter sua viabilidade justificada economicamente devido a sua alta durabilidade e a seus baixos custos de manutenção, devido a sua resistência a corrosão. Além desses fatores, existe também o seu bom comportamento em temperaturas elevadas, ductilidade, é facilmente reciclável e não perde suas características significativamente durante o processo e, além disso, possui alto apelo visual.

Esta dissertação realizou uma investigação em torno do comportamento estrutural de colunas, viga-colunas e vigas constituídas de aço inoxidável austenítico. Todos elementos eram compostos por seções tubulares de seção transversal CHS 101,6×1,5. Ao longo do estudo foram reproduzidos e apresentados modelos experimentais, numéricos e teóricos.

O programa experimental consistiu nos ensaios de dois colunas, seis viga-colunas com diferentes excentricidades e duas vigas, totalizando dez elementos estudados. Além disso, quatro corpos de prova foram utilizados para caracterizar o material, através do ensaio de tração.

A análise numérica, feita utilizando o software ANSYS [36] foi elaborada com a geometria, o material, e as condições de contorno similares às dos modelos da análise experimental. As não-linearidades físicas e geométricas foram consideradas nos modelos numéricos. Depois da calibração do modelo, fase em que a confiabilidade do modelo foi obtida, a análise numérica proporcionou o estudo de resultados em faixas de excentricidade não ensaiadas.

Finalmente, os resultados obtidos foram comparados com os critérios de cálculo preconizados pelo Eurocode3 Parte 1-4 [7] e o Método da Resistência Contínua [8].

6.2. Principais conclusões

Os modelos experimentais formulados neste estudo foram realizados com colunas, viga-colunas (com três diferentes excentricidades) e vigas. Dessa maneira, viabilizou-se a análise do comportamento e a resistência de uma seção transversal CHS 101,6 x 1,5 para diferentes pares de esforço normal e momento fletor, isto é, estudar uma gama considerável de valores que caracterizasse a curva $M \times N$ de tal seção. Concluiu-se que a condição de apoio dos ensaios foi birrotulada, garantida por um sistema de placas metálicas chanfradas e um rolo metálico. As deformações e deslocamentos das colunas foram medidos através de extensômetros de resistência elétrica e transdutores de deslocamento (LVDT).

A caracterização do material indicou que a tensão de escoamento do aço inoxidável austenítico utilizado tem valor médio de 287,40 MPa obtida a 0,2% de deformação e módulo de elasticidade de 187,61 GPa.

O modo de ruína apresentado pelos elementos estruturais foi de flambagem local para as colunas e viga-colunas e para as vigas, ovalização seguida de flambagem local.

A análise numérica foi efetuada e a aplicação das imperfeições iniciais foram efetuadas por análise de autovalores e autovetores com um intervalo de valores para amplitudes das imperfeições iniciais, considerados como frações da espessura de seção transversal. Este intervalo de valores foi aplicado para que a sensibilidade do MEF fosse avaliada e, ainda, para que fosse feita a escolha do modelo numérico com a imperfeição inicial que mais se aproxima do comportamento dos testes experimentais, isto é, realizar a calibração do modelo numérico.

Durante a comparação entre o programa experimental e o modelo numérico ficou evidente que a análise numérica além de apresentar resultados similares de resistência, apresenta também resultados de deslocamentos semelhantes obtidos no ensaio experimental.

Verificou-se que o Eurocode 3 Parte 1-4 [7] é conservador, principalmente quando comparado com o Método da Resistência Contínua [8], quando se trata de tubos circulares compostos de aço inoxidável submetidos a flexo-compressão, entretanto, os dois métodos mostraram-se conservadores. Isso se deve principalmente às dimensões da seção transversal que se traduzem em uma alta esbelteza.

6.3. Principais contribuições deste trabalho

A presente dissertação teve, para o meio acadêmico, as seguintes contribuições:

- Este estudo reúne artigos e publicações que abordam o assunto de tubos circulares submetidos a compressão pura, flexo-compressão e a flexão pura em aço carbono e aço inoxidáveis, comportamento estrutural do aço inoxidável, critérios de cálculo do Eurocode 3 Parte 1-4 [7] e o Método da Resistência Contínua [8] proposto com Arshaf e Gardner;
- Aumento do número de dados experimentais realizados com tubos circulares de aço inoxidável austenítico solicitados à compressão, flexo-compressão e flexão;
- Caracterização do material com corpo de prova à tração, onde se comprova, através dos resultados da análise numérica, a sua legitimidade;
- Análise numérica do problema proposto e verificação de condições de geometria, condições de contorno e aplicação de imperfeições geométricas iniciais necessárias para a geração de resultados válidos;
- Comparação de resultados numéricos e experimentais com as recomendações de cálculo preconizadas no Eurocode 3 Parte 1-4 [7] verificando de maneira geral, que a norma mostrou-se conservadora.
- Verificação que o Método da Resistência Contínua [8] que apesar de ser menos conservador do que o Eurocode, não mostrou resultados próximos aos encontrados no programa experimental. Isso se deve, principalmente, a esbeltez elevada da seção transversal.

6.4. Sugestões para trabalhos futuros

Fundamentado nas conclusões obtidas durante a confecção deste trabalho, sugestões para trabalhos futuros podem ser apresentadas, como por exemplo:

- Efetuar ensaios experimentais em colunas e viga-colunas e vigas de aço inoxidável com a mesma seção utilizada neste estudo, porém com comprimentos e excentricidades ainda não ensaiados, para que desta forma possa ser dada continuidade à investigação aqui iniciada, considerando a influência da flambagem global;
- Produzir uma série de ensaios com outras seções de tubos circulares para maior compreensão e avaliação da resistência final para diferentes valores de relação (D/t) em perfis de aço inoxidável;
- Realizar ensaios semelhantes aos deste trabalho com diferentes tipos de aço inoxidável para avaliar as suas diferenças de comportamento.

ANEXO A

Este anexo apresenta a memória de cálculo dos parâmetros utilizados no Método da Resistência Contínua [8]

Deformação no escoamento:

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E} = \frac{287,40}{187610,00} = 0,0015$$

Tensão Última:

$$f_u = \frac{f_y}{0,2 + 185 \frac{f_y}{E}} = \frac{287,40}{0,2 + 185 \times \frac{287,40}{187610,00}} = 594,53 \text{ MPa}$$

Deformação última:

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u} = 1 - \frac{287,40}{594,53} = 0,52$$

Módulo de Elasticidade após a tensão f_y :

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0,16\varepsilon_u - \varepsilon_y} = \frac{594,53 - 287,40}{0,16 \times 0,52 - 0,0015} = 3352,76 \text{ MPa}$$

Tensão crítica de flambagem local:

$$\sigma_{cr} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{2t}{D} = \frac{187610,00}{\sqrt{3 \times (1-0,3^2)}} \times \frac{2 \times 1,5}{101,6} = 3352,76 \text{ MPa}$$

Esbeltez dos elementos da seção transversal:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{287,40}{3352,76}} = 0,293$$

Relação entre a deformação do Método da Resistência Contínua e a de escoamento (Taxa de deformação):

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{4,44 \times 10^{-3}}{\bar{\lambda}_p^{4,5}} = \frac{4,44 \times 10^{-3}}{0,293^{4,5}} = 1,12$$

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} \leq \min\left(15, \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y}\right) = \min\left(15, \frac{0,53}{0,0015}\right) = \min(15, 353) \rightarrow \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = 1,12$$

Tensão resistente do Método da Resistência Contínua:

$$f_{csm} = f_y + E_{sh} \varepsilon_y \left(\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1 \right) = 287,40 + 3786,02 \times 0,0015 \times (1,12 - 1) = 288,08 \text{ MPa}$$

REFERÊNCIAS

- [1] PFEIL,W, Estruturas de Aço – Dimensionamento de Acordo com a NBR8800 - 8ª. Edição – Grupo Editorial Nacional - Rio de Janeiro 2012
- [2] Applications for the protection of the environment and human health <http://www.worldstainless.org/applications/applications_protection_environment_and_human_health>Acesso em 16 out 2017.
- [3] Nickel Institute-Case Study 01 – Stonecutters Bridge Towers. Disponível em: <<https://www.nickelinstitute.org/en/NickelMagazine/MagazineHome/AllArchives/2014/Volume29-1/CaseStudyStonecuttersBridgeTowers.aspx>> Acesso em 15ago 2017.
- [4] Offshore Energy Today. Disponível em: <<http://www.offshoreenergytoday.com/statoil-finds-gas-near-ekofisk-field-in-north-sea/>>. Acesso em 15 nov 2017.
- [5] 123 Hotels.com. Disponível em: <<http://blog.123hotels.com/experience-the-magic-of-the-majestic-petronas-towers-in-malaysia/>>. Acesso em 15 nov 2017
- [6] The International Stainless Steel Forum – Stainless Steel Figures in 2016. Disponível em:15 ago 2017.
- [7] EUROCODE 3, EN 1993-1-4: 2006. Design of steel structures: Part 1-4: General rules – Supplementary rules for stainless steels. CEN, European Committee for Standardization, Brussels.
- [8] Ashraf, M., Gardner, L., 2013. The continuous strength method for structural stainless steel design. Thin-Walled Structures, vol. 68, p. 42–49.
- [9] Yuan, H.X., Wang, Y.Q., Shi, Y.J., Gardner, L., 2014.Stub column tests on stainless steel built-up sections. Thin-Walled Structures, vol. 83, p. 103-114.
- [10] Schafer BW, 2008.Review: The Direct Strength Method ofcold-formedsteelmembersdesign. Journal of Constructional Steel Research, vol 64, p. 766-778.
- [11] Young, B., Hartono, W., 2002. Compression Tests of Stainless Steel Tubular Members. Journal of Structural Engineering, vol. 128, p.754-761

- [12] ASCE Standart - Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members. American Society of Civil Engineers,ANSI/ASCE-8-90, New York.
- [13] AS/NZS, 2001. Cold-formed stainless steel structures. AS/NZS4-673:2001, Australian/New Zealand Standart, Standards Australia, Sydney, Australia.
- [14] Rasmussen, K.J.R., Hancock, G.J., 1993. Design of Cold-Formed Stainless Steel Tubular Members - I: Columns. Journal of Structural Engineering, vol. 119
- [15] Rasmussen, K. J. R., Rondal, J., 1997. Strength Curves for Metal Columns. Journal of Structural Engineering, vol. 123
- [16] Lui, W. M, Ashraf, M., Young, B., 2014. Tests of cold-formed duplex stainless steel SHS beam–columns. Engineering Structures, vol. 74, p. 111-121
- [17] Zheng, B., Hua, X., Shu, G., 2015. Tests of cold-formed and welded stainless steel beam-columns. Journal of Constructional Steel Research, vol. 111, p.1-10
- [18] Zhao, O., Gardner, L., Young, B., 2016. Buckling of ferritic stainless steel members under combined axial compression and bending. Journal of Constructional Steel Research, vol. 117, p. 35-48
- [19] Huang, Y., Young, B., 2014. Experimental investigation of cold-formed lean duplex stainless steel beam-columns. Thin-Walled Structures, vol. 76, p. 105-117
- [20] Zhao, O., Gardner, L., Young, B., 2016. Testing and numerical modelling of austenitic stainless steel CHS beam–columns. Engineering Structures, vol. 111, p. 263-274.
- [21] Greiner, R., Kettler, M., 2008. Interaction of bending and axial compression of stainless steel members. Journal of Constructional Steel Research, vol 64, p. 1217-1224
- [22] Zhao, O., Gardner, L., Young, B., 2016. Structural performance of stainless steel circular hollow sections under combined axial load and bending – Part 1: Experiments and numerical modelling. Thin-Walled Structures, vol. 101, p.231-239
- [23] Zhao, O., Gardner, L., Young, B., 2016. Structural performance of stainless steel circular hollow sections under combined axial load and bending – Part 2: Parametric studies and design. Thin-Walled Structures, vol. 101, p.231-239
- [24] Elchalakani, M., Zhao, X.L., Grzebieta, R., 2002. Bending tests to determine slenderness limits for cold-formed circular hollow sections. Journal of Constructional Steel Research, vol 58, p.1407-1430

- [25] Burgan, B.A., Baddoo, N.R., Gilsenan, K.A., 2000. Structural design of stainless steel members — comparison between Eurocode 3, Part 1.4 and test results. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 54, p. 51-73
- [26] Kiyamaz, G., 2005. Strength and stability criteria for thin-walled stainless steel circular hollow section members under bending. *Thin-Walled Structures*, vol. 43, p. 1534-1549
- [27] Rasmussen, K.J.R, Hancock, G.J., 1993. Design of Cold-Formed Stainless Steel Tubular Members II: Beams. *Journal of Structural Engineering*, vol.119, p. 2368-2386
- [28] Jiao, H., Zhao, O., 2004. Section slenderness limits of very high strength circular steel tubes in bending. *Thin-Walled Structures*, vol 42, p. 1257-1271
- [29] Brazier, L.G., 1927. On Flexure of thin cylindrical shells and other thin sections. *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 116, p. 104-114
- [30] Zhang, L.C., Yu, T.X., 1987. An investigation of the brazier effect of a cylindrical tube under pure elastic-plastic bending. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 30, p. 77-86
- [31] Karamanos, S.A, Houliara, S., 2011. Buckling of Thin-Walled Long Steel Cylinders Subjected to Bending. *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol.133
- [32] Buchanan, C., Gardner, L., Liew, A., 2016. The continuous strength method for the design of circular hollow sections. *Journal of Constructional Steel Research*, vol.118, p.207-216
- [33] Liew, A., Gardner, L., 2015. Ultimate capacity of structural steel cross-sections under compression, bending and combined loading. *Structures*, vol.1, p.2-11
- [34] ISO 6892-1:2016, Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature
- [35] Gardner, L., Nethercot, D.A., 2004. Experiments on stainless steel hollow sections—Part 1: Material and cross-sectional behavior, *Journal of constructional steel research*, vol. 60, p. 1291-1318.
- [36] ANSYS, Inc. User Manual Reference, 2003.