



Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

**Comportamento de Ligações com Placa de
Extremidade em Estruturas de Aço
Submetidas a Momento Fletor e Força
Axial**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Ciências da Engenharia Civil da PUC-Rio. Concentração: Estruturas.

Orientadores: Sebastião A. L. de Andrade
Pedro C. G. da S. Vellasco
Luís A. P. Simões da Silva

Rio de Janeiro
Julho de 2003



Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

**Comportamento de Ligações com Placa de
Extremidade em Estruturas de Aço
Submetidas a Momento Fletor e Força
Axial**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciências da Engenharia Civil - Estruturas - pelo Programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada

Prof. Sebastião A. L. de Andrade

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Pedro C. G. da S. Vellasco

Co-orientador

Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

Prof. Luís A. P. Simões da Silva

Co-orientador

Departamento de Engenharia Civil – FCTUC - Portugal

Prof. José Luis de França Freire

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Giuseppe Barbosa Guimarães

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. José Guilherme Santos da Silva

Departamento de Engenharia Mecânica – UERJ

Prof. Eduardo de Miranda Batista

COPPE – UFRJ

Prof. Gilson Queiroz

Faculdade de Engenharia - UFMG

Rio de Janeiro, 24 de julho de 2003.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial deste trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

Graduou-se em Engenharia Civil, ênfase em Estruturas, pela UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro em 1996. Obteve o título de Mestre em Ciências pela PUC-Rio – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 1999. Possui vários trabalhos publicados em atas de conferências e revistas internacionais na área de Ligações Estruturais em Aço.

Ficha Catalográfica

Lima, Luciano Rodrigues Ornelas de

Comportamento de ligações com placa de extremidade em estruturas de aço submetidas a momento fletor e força axial / Luciano Rodrigues Ornelas de Lima; orientadores: Sebastião A. L. de Andrade, Pedro C. G. da S. Vellasco, Luis A. P. Simões da Silva. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil 2003.

v, 269 f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas, índice e anexos.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Ligações viga-coluna. 3. Ligações semi-rígidas. 4. Análise experimental. 5. Modelos mecânicos. 6. Método das componentes. 7. Resistência à flexão. 8. Resistência a esforço axial. I. Andrade, Sebastião Arthur Lopes de. II. Vellasco, Pedro Colmar Gonçalves da Silva. III. Silva, Luis A. P. Simões da. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. V. Título.

CDD: 624

A Deus, por ter iluminado meu caminho ao longo de todos estes anos, aos meus pais, Luismar e Sueli, e aos meus irmãos, Daniele e Marcos, pelo carinho e incentivo ao meu trabalho.

Agradecimentos

Aos meus orientadores brasileiros, Prof. Sebastião Andrade e Prof. Pedro Vellasco por toda a ajuda e amizade fortalecida durante a realização deste trabalho e por possibilitarem a minha participação em congressos nacionais e internacionais.

Ao meu orientador português, Prof. Luís Simões da Silva por ter possibilitado a realização de toda a parte experimental da tese no Laboratório de Mecânica Estrutural do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, pela orientação sempre oportuna, pela receptividade desde minha chegada a Portugal e pela ajuda na participação em congressos internacionais.

A Lúcia, pelo amor, pelo carinho e pela compreensão nos momentos em que estive ausente e aos seus pais, Sr. Carlos Rodrigues e D. Lúcia Maria além de seu irmão, Carlos Frederico, pelo incentivo durante todos estes anos.

Aos amigos Luís Costa Neves e Teresa Cordeiro, meus “irmãos portugueses”, pela amizade, pela ajuda e, principalmente, pela ótima companhia. E também aos pais destes amigos pelo acolhimento durante a estadia em Portugal.

Ao Prof. Luís Cruz Simões, coordenador do Laboratório de Estruturas da Universidade de Coimbra pela disponibilidade dos funcionários para a realização dos ensaios.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas, Sr. David, Sr. Paulo e Sr. Olegário e ao funcionário do Laboratório de Mecânica Estrutural, Sr. Luís pelo ótimo convívio e pela ajuda na realização dos ensaios.

Ao estimado amigo, Luís Borges, pela amizade e por ter desenvolvido o programa “NASCon” que em muito facilitou a realização deste trabalho.

Aos amigos portugueses da Universidade de Coimbra, Rui Simões, Sandra Jordão, Fernando T. Gomes, Pedro Simão, Aldina Santiago, Ana Girão, Andreia Pereira, Eduardo Júlio, Paulo Ferndandes, João Catarino e Isabel Cristina por toda a motivação no desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos da Casa da Sagrada Família, Tozé Valério, Sandrine, Odile, Paulo, Tozé, D. Manoela, D. Edite e demais amigos por terem ajudado a superar a saudade de casa.

A todos os demais funcionários da Universidade de Coimbra e aos funcionários da PUC-Rio pela colaboração e pelo ótimo convívio durante a realização deste trabalho.

Aos colegas de curso da PUC-Rio e aos membros do grupo de estudos de Comportamento e Projeto de Estruturas de Aço da mesma instituição.

Ao CNPq pela bolsa no Brasil, à CAPES pela bolsa durante o período passado em Portugal e à PUC-Rio pelo auxílio concedido na elaboração deste trabalho.

E finalmente, a cidade de Coimbra, que com todo seu encanto, marca para sempre, a vida daqueles que por lá passam.

Resumo

Lima, Luciano Rodrigues Ornelas de; Andrade, Sebastião Arthur Lopes de (Orientador). **Comportamento de Ligações com Placa de Extremidade em Estruturas de Aço Submetidas a Momento Fletor e Força Axial**. Rio de Janeiro, 2003. 269p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Tradicionalmente, o projeto de pórticos em estruturas de aço assume que as ligações viga-coluna são rígidas ou flexíveis. As ligações rígidas, onde não ocorre nenhuma rotação entre os membros conectados, transferem não só momento fletor, mas também força cortante e força normal. Por outro lado, as ligações flexíveis são caracterizadas pela liberdade de rotação entre os membros conectados impedindo a transmissão de momento fletor.

Desconsiderando-se estes fatos, sabe-se que a grande maioria das ligações não possuem este comportamento idealizado. De fato, a maioria das ligações transfere algum momento fletor com um nível de rotação associado. Estas ligações são chamadas semi-rígidas e seu dimensionamento deve ser executado de acordo com este comportamento estrutural real.

Porém, algumas ligações viga-coluna estão sujeitas a uma combinação de momento fletor e esforço axial. O nível de esforço axial pode ser significativo, principalmente em ligações de pórticos metálicos com vigas inclinadas, em pórticos não-contraventados ou em pórticos com pavimentos incompletos. As normas atuais de dimensionamento de ligações estruturais em aço não consideram a presença de esforço axial (tração e/ou compressão) nas ligações. Uma limitação empírica de 5% da resistência plástica da viga é a única condição imposta no Eurocode 3. O objetivo deste trabalho é descrever alguns resultados experimentais e numéricos para estender a filosofia do método das componentes para ligações com ações combinadas de momento fletor e esforço axial. Para se cumprir este objetivo, quinze ensaios foram realizados e um modelo mecânico é apresentado para ser usado na avaliação das propriedades da ligação: resistência à flexão, rigidez inicial e capacidade de rotação.

Palavras-chave

Ligações Viga-Coluna; Ligações Semi-Rígidas; Análise Experimental; Modelos Mecânicos; Método das Componentes; Normas Europeias; Resistência à Flexão; Resistência a Esforço Axial.

Abstract

Lima, Luciano Rodrigues Ornelas de; Andrade, Sebastião Arthur Lopes de (Advisor). **Behaviour of Structural Steel Endplate Joints Subjected to Bending Moment and Axial Force**. Rio de Janeiro, 2003. 269p. DSc. Thesis – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Traditionally, the steel portal frame design assumes that beam-to-column joints are rigid or pinned. Rigid joints, where no relative rotations occur between the connected members, transfer not only substantial bending moments, but also shear and axial forces. On the other extreme, pinned joints, are characterised by almost free rotation movement between the connected elements that prevents the transmission of bending moments.

Despite these facts, it is largely recognised that the great majority of joints does not exhibit such idealised behaviour. In fact, many joints transfer some bending moments associated with rotations. These joints are called semi-rigid, and their design should be performed according to their real structural behaviour.

However, some steel beam-to-column joints are often subjected to a combination of bending and axial forces. The level of axial forces in the joint may be significant, typical of pitched-roof portal frames, sway frames or frames with incomplete floors. Current standard for steel joints do not take into account the presence of axial forces (tension and/or compression) in the joints. A single empirical limitation of 5% of the beam's plastic axial capacity is the only enforced provision in Annex J of Eurocode 3. The objective of the present work is to describe some experimental and numerical results to extend the philosophy of the component method to deal with the combined action of bending and axial forces. To fulfil this objective a set of sixteen specimens were performed and a mechanical model was developed to be used in the evaluation of the joint properties: bending moment resistance, initial stiffness and rotation capacity.

Key-words

Beam-to-Column Joints; Semi-Rigid Joints; Experimental Analysis; Mechanical Models; Component Method; European Codes; Bending Resistance; Axial Force Resistance.

Sumário

Lista de Figuras	13
Lista de Tabelas.....	19
Lista de Símbolos.....	20
Lista de Abreviaturas.....	23
1 Introdução	25
1.1 Motivação	25
1.2 Evolução Histórica das Ligações Semi-Rígidas	29
1.3 Objetivos e Metodologia.....	31
1.4 Escopo.....	31
2 Ligações Viga x Coluna	33
2.1 Introdução.....	33
2.2 Descrição do Método das Componentes.....	36
2.2.1 Resistência à Flexão de uma Ligação	39
2.2.2 Rigidez Inicial de uma Ligação	39
2.3 Dimensionamento das Componentes	41
2.3.1 Componente 1 – Alma da coluna ao corte.....	41
2.3.2 Componente 2 – Alma da coluna à compressão	43
2.3.3 Componente 3 – Alma da coluna à tração.....	45
2.3.4 Componente 4 – Mesa da coluna à flexão.....	46
2.3.5 Componente 5 – Placa de extremidade à flexão	49
2.3.6 Componente 7 – Mesa da viga à compressão.....	52
2.3.7 Componente 8 – Alma da viga à tração.....	52
2.3.8 Componente 10 – Parafusos à tração	53
2.4 Combinação entre Esforço Axial e Momento Fletor.....	53
2.4.1 Pesquisas de Laurent Finet [10]	54
2.4.2 Pesquisas de J. P. Jaspert [6].....	55
2.4.3 Pesquisas de Frederic Cerfontaine [11].....	55
2.4.3.1 Diagrama de Interação.....	55
2.4.4 Pesquisas de Luís Silva e Ana Coelho [12]	59
2.4.5 Pesquisas de Frantisek Wald [14,15].....	61

2.4.5.1 Modelo de Cálculo Proposto	62
--	----

3 Descrição dos Ensaios Experimentais..... 67

3.1 Introdução..... 67

3.2 Justificativa dos Ensaios Experimentais..... 67

3.3 Cálculo das Ligações..... 70

3.4 Caracterização dos Ensaios..... 72

3.4.1 Preparação dos Ensaios e dos Sistemas de Aplicação de Carga..... 72

3.4.1.1 Sistema para aplicação de esforço axial de compressão..... 75

3.4.1.2 Sistema para aplicação de esforço axial de tração 78

3.4.2 Instrumentação, Aquisição de Dados e Planos de Carga dos Ensaios..... 80

3.4.3 Propriedades Mecânicas e Geométricas 84

4 Avaliação dos Resultados Experimentais – Ensaios de Ligações com Placa de Extremidade Ajustada (FE) 87

4.1 Introdução..... 87

4.2 Verificações Preliminares..... 87

4.3 Análise de Resultados 89

4.3.1 Avaliação das Curvas Momento *versus* Rotação 89

4.3.2 Comportamento da alma da coluna em cisalhamento (1) 94

4.3.3 Comportamento da alma da coluna à compressão (2)..... 97

4.3.4 Comportamento da alma da coluna à tração (3) 100

4.3.5 Comportamento da mesa da coluna à flexão (4)..... 103

4.3.6 Comportamento da placa de extremidade à flexão (5)..... 105

4.3.7 Comportamento da mesa da viga à compressão (7)..... 109

4.3.8 Comportamento da alma da viga à tração (8)..... 113

4.3.9 Comportamento dos parafusos à tração (10) 115

4.3.10 Comportamento da mesa da viga à tração 120

4.3.11 Considerações Finais Sobre os Ensaios FE..... 122

5 Avaliação dos Resultados Experimentais – Ensaios de Ligações com Placa de Extremidade Estendida (EE) 125

5.1 Introdução..... 125

5.2 Análise de Resultados 125

5.2.1 Avaliação das Curvas Momento *versus* Rotação 125

5.2.2 Comportamento da alma da coluna em cisalhamento (1) 130

5.2.3 Comportamento da alma da coluna à compressão (2).....	133
5.2.4 Comportamento da alma da coluna à tração (3)	135
5.2.5 Comportamento da mesa da coluna à flexão (4).....	138
5.2.6 Comportamento da placa de extremidade à flexão (5).....	140
5.2.7 Comportamento da mesa da viga à compressão (7).....	148
5.2.8 Comportamento da alma da viga à tração (8).....	152
5.2.9 Comportamento dos parafusos à tração (10)	155
5.2.10 Considerações Finais dos Ensaio EE	160
6 Modelo Mecânico Proposto	162
6.1 Introdução	162
6.2 Caracterização do Modelo de Molas	164
6.3 Descrição dos “Softwares” Avaliados	168
6.4 Análise de Resultados – Ligação com Placa de Extremidade Ajustada	170
6.4.1 Componentes com comportamento elasto-plástico perfeito.....	170
6.4.2 Comportamento elasto-plástico com rigidez pós-limite	174
6.5 Análise dos Resultados – Ligação com Placa de Extremidade Estendida.....	176
6.5.1 Comportamento elasto-plástico perfeito para as componentes.....	176
6.5.2 Comportamento elasto-plástico com rigidez pós-limite	184
6.6 Comparação com o Modelo Proposto por Cerfontaine [11]	185
7 Considerações Finais.....	188
7.1 Introdução	188
7.2 Conclusões	190
7.3 Sugestões para Trabalhos Futuros	194
Referências Bibliográficas.....	196
Anexo A Modelo Proposto por Cerfontaine [11].....	204
A.1 Caracterização do diagrama de interação	204
A.2 Comportamento elástico da ligação	212
A.3 Estado de deslocamentos na ruína dúctil.....	217
A.4 Curvas de comportamento da ligação – $M \times \phi$ e $N \times \Delta$	218
A.5 Pannel de alma da coluna sujeito ao corte	220

A.6 Resistência do painel de alma.....	221
A.7 Comportamento elástico do painel de alma da coluna em cisalhamento.....	223
A.8 Curvas da Ligação.....	224
Anexo B Exemplo de Aplicação do Modelo de Cerfontaine.....	226
B.1 Propriedades Mecânicas e Geométricas da Ligação.....	226
B.2 Resistência Individual das Componentes.....	226
B.2.1. Alma da coluna ao corte	226
B.2.2. Demais componentes	227
B.2.3. Cálculo de F_i^{Rd+} e F_i^{Rd-}	227
B.2.4. Obtenção do diagrama de interação	229
B.2.5. Determinação de um ponto específico do diagrama	232
B.2.6. Supondo uma excentricidade conhecida ($e = 1000$ mm)	232
B.2.7. Comportamento elástico da ligação	233
B.2.8. Cálculo da rigidez inicial para o ponto em estudo ($e = 1000$ mm)	236
B.2.9. Cálculo dos esforços elásticos na ligação	238
B.2.10. Deslocamentos na ruína dúctil	239
B.2.11. Cálculo de $\varphi_{i,k}$ ($\Delta_1 = \Delta_1^{Rd+}$).....	239
B.2.12. Cálculo de $\Delta_{i,k}$	240
B.2.13. Cálculo de Δ_i ($\Delta_i = \Delta + h_i \cdot \varphi$).....	240
B.2.14. Cálculo das variáveis adicionais para a obtenção das curvas $M \times \phi$ e $N \times \Delta$	241
B.3 Avaliação do painel de alma da coluna ao cisalhamento	242
B.3.1. Resistência do Painel de Alma ao cisalhamento.....	242
B.3.2. Comportamento elástico do painel de alma	243
B.3.3. Curva do painel de alma ao corte.....	243
B.3.4. Curva final da ligação	245
Anexo C Detalhamento das Peças Utilizadas no Programa Experimental	246
Anexo D Dimensionamento da Ligação com Placa de Extremidade Estendida.....	253
D.1 Informações Gerais	253
D.2 Cálculo das Componentes.....	255
D.2.1. Alma da coluna ao corte.....	255
D.2.2. Alma da coluna à compressão	255
D.2.3. Mesa da coluna à flexão.....	256

D.2.4. Alma da coluna à tração	258
D.2.5. Placa de extremidade à flexão	259
D.2.6. Parafusos à tração.....	262
D.2.7. Mesa da viga à compressão.....	262
D.2.8. Alma da viga à tração	262
D.3 Associação das componentes (molas) em série e em paralelo	262
D.3.1. Resistência	262
D.3.2. Rigidez Inicial.....	263
D.4 Curva Momento Versus Rotação	264
Anexo E Controle Dimensional dos Ensaios	265
E.1 Apresentação das Dimensões Utilizadas.....	265
E.2 Valores Medidos	266

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Classificação das ligações de acordo com sua rigidez	26
Figura 1.2 – Distribuição elástica de momentos fletores num pórtico simples	27
Figura 1.3 – Ligação de um pórtico de galpões com vigas inclinadas.....	28
Figura 2.1 – Propriedades para dimensionamento de uma ligação [8,9]	34
Figura 2.2 – Classificação das ligações de acordo com a rigidez inicial [8,9]	35
Figura 2.3 – Componentes de uma ligação com placa de extremidade, [38].....	38
Figura 2.4 – Modelo mecânico - ligação com placa de extremidade estendida	38
Figura 2.5 – Procedimento para cálculo da rigidez rotacional	39
Figura 2.6 – Centro de compressão e braço de alavanca z	41
Figura 2.7 – Tensões normais e cisalhantes na zona comprimida da alma da coluna	43
Figura 2.8 – Propriedades geométricas da componente alma da coluna em compressão	43
Figura 2.9 – Modos de ruptura de um T-stub aparafusado	46
Figura 2.10 – Definição de parâmetros geométricos – componente 4	47
Figura 2.11 – Modelos de linhas de ruptura para grupos de linhas de parafusos.....	47
Figura 2.12 – Definição de parâmetros geométricos – componente 5	50
Figura 2.13 – Curvas para obtenção do coeficiente α (Eurocode 3).....	51
Figura 2.14 – Modelo mecânico proposto por Finet [10]	54
Figura 2.15 – Diagrama de interação de uma ligação com placa de extremidade estendida	56
Figura 2.16 – Interação entre três linhas de parafusos e definição de F_j^{Rd}	58
Figura 2.17 – Ligação viga-coluna soldada com respectivo modelo de molas [12]	59
Figura 2.18 – Caracterização do comportamento das componentes [12]	60
Figura 2.19 – Curva momento <i>versus</i> rotação – modelo e experimental	60
Figura 2.20 – Curvas momento <i>versus</i> rotação com esforço axial de compressão	60
Figura 2.21 – Ensaio realizados por Wald [14]	61
Figura 2.22 – Configuração dos ensaios realizados por Wald [14]	61
Figura 2.23 – Curva de comparação entre tipos de carregamentos.....	62
Figura 2.24 – Consideração sobre a área efetiva das mesas comprimidas, Wald [14]....	63
Figura 2.25 – Modelo mecânico da placa de extremidade, Wald [14].....	64
Figura 2.26 – Curvas momento <i>versus</i> rotação – ensaios SN, Wald [14]	66
Figura 3.1 – Dimensões dos perfis laminados IPE240, HEB240 e HEB200	68
Figura 3.2 – Detalhe do parafuso M20 cl. 10.9.....	68
Figura 3.3 – Detalhe das ligações utilizadas nos ensaios	69
Figura 3.4 – Ligações com placa de extremidade (ambas as séries).....	70
Figura 3.5 – Pórtico de aplicação de carga.....	73
Figura 3.6 – Reforços introduzidos no pórtico de reação	74

Figura 3.7 – Preparação e concretagem da sapata de reação.....	74
Figura 3.8 – Sistema de aplicação de esforço axial de compressão.....	76
Figura 3.9 – Macacos hidráulicos e célula de carga central.....	76
Figura 3.10 – Variação da carga aplicada em cada um dos cabos de protensão.....	77
Figura 3.11 – Correção da carga aplicada em cada um dos cabos de protensão.....	78
Figura 3.12 – Sistema de aplicação de esforço axial de tração.....	79
Figura 3.13 – Componentes para os ensaios com esforço axial de tração.....	79
Figura 3.14 – Peça para aplicação do esforço axial [57].....	80
Figura 3.15 – Instrumentação dos parafusos.....	81
Figura 3.16 – Posicionamento de extensômetros e rosetas – Ensaios FE.....	82
Figura 3.17 – Posicionamento de extensômetros e rosetas – Ensaios EE.....	82
Figura 3.18 – Aplicação da protensão nos parafusos.....	82
Figura 3.19 – Transdutores de deslocamentos e sistema de aquisição de dados.....	83
Figura 3.20 – Ciclos de carga utilizados nos ensaios.....	83
Figura 3.21 – Ensaios de tração de corpos-de-prova dos perfis e parafusos.....	84
Figura 3.22 – Posição dos corpos-de-prova das placas de extremidade.....	86
Figura 3.23 – Medição de espessuras.....	86
Figura 4.1 – Verificação da aplicação de esforço axial de compressão.....	88
Figura 4.2 – Curvas momento <i>versus</i> rotação.....	89
Figura 4.3 – Deformações ocorridas nos ensaios FE.....	90
Figura 4.4 – Curvas momento <i>versus</i> rotação com respectivas descargas.....	91
Figura 4.5 – Curva de interação M <i>versus</i> N.....	92
Figura 4.6 – Controle do esforço axial aplicado nos ensaios.....	93
Figura 4.7 – Curvas momento <i>versus</i> rotação – ensaios FE5 e FE7.....	94
Figura 4.8 – Curvas M x ϵ (roseta B – canal 8).....	94
Figura 4.9 – Direção principal ϕ_1 (roseta B).....	95
Figura 4.10 – Tensões principais σ_1 e σ_2 (roseta B).....	96
Figura 4.11 – Tensões de <i>Von Mises</i> σ_{VM} (roseta B).....	96
Figura 4.12 – Curvas M x ϵ (extensômetro 11).....	97
Figura 4.13 – Curvas M x ϵ da alma da coluna à compressão (roseta C - canal 14).....	98
Figura 4.14 - Direção principal ϕ_1 (roseta C).....	98
Figura 4.15 – Tensões principais σ_1 e σ_2 (roseta C).....	99
Figura 4.16 - Tensão de <i>Von Mises</i> σ_{VM} (roseta C).....	99
Figura 4.17 – Curvas M x ϵ (roseta A - canal 5).....	100
Figura 4.18 – Curvas M x ϵ (extensômetro 6).....	101
Figura 4.19 - Direção principal ϕ_1 (roseta A).....	101
Figura 4.20 – Tensões principais σ_1 e σ_2 (roseta A).....	102
Figura 4.21 - Tensão de <i>Von Mises</i> σ_{VM} (roseta A).....	102
Figura 4.22 – Deformação da mesa da coluna submetida à flexão.....	103

Figura 4.23 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 10).....	104
Figura 4.24 – Curvas $M \times \delta$ (transdutor 45)	104
Figura 4.25 – Deformações da placa de extremidade à flexão – Ensaio FE.....	106
Figura 4.26 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 23).....	107
Figura 4.27 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 24).....	108
Figura 4.28 – Curvas $M \times \delta$ (transdutor 44)	108
Figura 4.29 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 29).....	109
Figura 4.30 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 30).....	110
Figura 4.31 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 31).....	110
Figura 4.32 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 32).....	111
Figura 4.33 – Curvas $M \times \varepsilon$ (média dos extensômetros 29 a 32)	111
Figura 4.34 – Comparação de deformações – mesa da viga à compressão	112
Figura 4.35 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 22).....	113
Figura 4.36 – Curvas $M \times \varepsilon$ (roseta E - canal 27).....	114
Figura 4.37 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 28).....	114
Figura 4.38 – Curvas $M \times \varepsilon$ (roseta E - canal 25).....	115
Figura 4.39 – Considerações sobre o efeito de alavanca.....	116
Figura 4.40 – Curvas $M \times \varepsilon$ e $M \times \sigma$ - Ensaio FE1	116
Figura 4.41 – Curvas $M \times \phi$ e $F \times \phi$ - Ensaio FE1	117
Figura 4.42 – Curvas $M \times \varepsilon$ e $M \times \sigma$ - Ensaio FE3	117
Figura 4.43 – Curvas $M \times \phi$ e $F \times \delta$ - Ensaio FE3	118
Figura 4.44 – Curvas $M \times \varepsilon$ e $M \times \sigma$ - Ensaio FE9	118
Figura 4.45 – Curvas $M \times \phi$ e $F \times \delta$ - Ensaio FE9	119
Figura 4.46 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetros 35 e 36 – ensaios FE1, FE3 e FE9).....	119
Figura 4.47 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 20).....	120
Figura 4.48 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 21).....	121
Figura 4.49 – Curvas $M \times \varepsilon$ (média dos extensômetros 20 e 21)	121
Figura 4.50 – Seqüências de escoamento das componentes para cada ensaio	123
Figura 4.51 – Método para identificação do escoamento das componentes	124
Figura 5.1 – Curvas momento <i>versus</i> rotação	126
Figura 5.2 – Deformações ocorridas nos ensaios FE.....	126
Figura 5.3 – Curvas momento <i>versus</i> rotação com respectivas descargas	128
Figura 5.4 – Curva de interação M <i>versus</i> N	129
Figura 5.5 – Controle do esforço axial aplicado nos ensaios	129
Figura 5.6 – Curvas $M \times \varepsilon$ (roseta B – canal 8).....	131
Figura 5.7 – Direção principal ϕ_1 (roseta B)	131
Figura 5.8 – Tensões principais σ_1 e σ_2 (roseta B)	132
Figura 5.9 – Tensões de <i>Von Mises</i> σ_{VM} (roseta B).....	132
Figura 5.10 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 11).....	133

Figura 5.11 – Curvas $M \times \varepsilon$ da alma da coluna à compressão (roseta C - canal 14).....	134
Figura 5.12 – Tensões principais σ_1 e σ_2 (roseta C).....	134
Figura 5.13 - Tensão de <i>Von Mises</i> σ_{VM} (roseta C).....	135
Figura 5.14 – Curvas $M \times \varepsilon$ (roseta A - canal 2).....	135
Figura 5.15 – Curvas $M \times \varepsilon$ (roseta A - canal 5).....	136
Figura 5.16 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 6).....	136
Figura 5.17 - Direção principal ϕ_1 (roseta A).....	137
Figura 5.18 – Tensões principais σ_1 e σ_2 (roseta A).....	137
Figura 5.19 - Tensão de <i>Von Mises</i> σ_{VM} (roseta A).....	138
Figura 5.20 – Deformação da mesa da coluna submetida à flexão.....	139
Figura 5.21 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 10).....	139
Figura 5.22 – Curvas $M \times \delta$ (transdutor 45).....	140
Figura 5.23 – Deformações da placa de extremidade à flexão – Ensaios EE.....	142
Figura 5.24 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 23).....	142
Figura 5.25 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 24).....	143
Figura 5.26 – Curvas $M \times \varepsilon$ (roseta D - canal 15).....	144
Figura 5.27 – Curvas $M \times \varepsilon$ (roseta D - canal 17).....	145
Figura 5.28 – Tensões principais σ_1 (roseta D).....	145
Figura 5.29 – Tensões principais σ_2 (roseta A).....	146
Figura 5.30 - Direção principal ϕ_1 (roseta A) – Ensaio EE1.....	146
Figura 5.31 - Tensão de <i>Von Mises</i> σ_{VM} (roseta A).....	147
Figura 5.32 – Curvas $M \times \delta$ (transdutor 44).....	147
Figura 5.33 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 29).....	148
Figura 5.34 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 30).....	149
Figura 5.35 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 31).....	149
Figura 5.36 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 32).....	150
Figura 5.37 – Curvas $M \times \varepsilon$ (média extensômetros 29 a 32).....	150
Figura 5.38 – Comparação de deformações – mesa da viga à compressão.....	151
Figura 5.39 – Instabilidade ocorrida na alma da viga – Ensaios EE3 e EE4.....	152
Figura 5.40 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 22).....	153
Figura 5.41 – Curvas $M \times \varepsilon$ (roseta E - canal 25).....	153
Figura 5.42 – Curvas $M \times \varepsilon$ (roseta E - canal 27).....	154
Figura 5.43 – Curvas $M \times \varepsilon$ (extensômetro 28).....	154
Figura 5.44 – Curvas $M \times \varepsilon$ e $M \times \sigma$ - Ensaio EE1.....	155
Figura 5.45 – Curvas $M \times \phi$ e $F \times \phi$ - Ensaio EE1.....	156
Figura 5.46 – Verificação do efeito de alavanca – Ensaio EE1.....	156
Figura 5.47 – Efeito do esforço de alavanca – Ensaios EE4 e EE7.....	157
Figura 5.48 – Curvas $M \times \varepsilon$ e $M \times \sigma$ - Ensaio EE4.....	158

Figura 5.49 – Curvas $M \times \phi$ e $F \times \delta$ - Ensaio EE4	159
Figura 5.50 – Curvas $M \times \varepsilon$ e $M \times \sigma$ - Ensaio EE7	159
Figura 5.51 – Curvas $M \times \phi$ e $F \times \delta$ - Ensaio EE7	160
Figura 5.52 – Seqüências de escoamento das componentes para cada ensaio	161
Figura 6.1 – Diferentes leis constitutivas de componentes.....	163
Figura 6.2 – Modelo de molas para ligações com placa de extremidade ajustada	164
Figura 6.3 – Modelo de molas para ligações com placa de extremidade estendida	165
Figura 6.4 – Leis constitutivas para molas em tração e compressão	166
Figura 6.5 – Rigidez inicial a ser usada na análise global elástica [8,9].....	167
Figura 6.6 – Aproximação bi-linear da curva momento <i>versus</i> rotação [8,9]	167
Figura 6.7 – Tela de resultados - NASCon [58-60].....	169
Figura 6.8 – Pré-processador - NASCon [58-60].....	169
Figura 6.9 – Comparação entre LUSAS [57] e NASCON [58-60].....	169
Figura 6.10 – Curvas momento fletor <i>versus</i> rotação – Ensaio FE	170
Figura 6.11 – Comparação de curvas momento <i>versus</i> rotação ($k_p=0$) – Ensaio FE... 171	
Figura 6.12 – Curva de interação momento fletor <i>versus</i> esforço axial.....	174
Figura 6.13 – Comparação de curvas momento <i>versus</i> rotação – $k_p \neq 0$	175
Figura 6.14 – Curva momento fletor <i>versus</i> rotação adotada.....	177
Figura 6.15 – Curvas momento fletor <i>versus</i> rotação – Ensaio EE	177
Figura 6.16 – Comparação de curvas momento <i>versus</i> rotação ($k_p=0$) – Ensaio EE... 178	
Figura 6.17 – Transmissão do esforço de compressão na ligação	179
Figura 6.18 – Comparações de curvas momento <i>versus</i> rotação – Ensaio EE	180
Figura 6.19 – Seqüência de escoamento de componentes ($k_p=0$) – Ensaio EE	181
Figura 6.20 – Obtenção de $M_{j,Rd}$ a partir da curva momento <i>versus</i> rotação	183
Figura 6.21 – Curva de interação momento fletor <i>versus</i> esforço axial.....	183
Figura 6.22 – Comparação de curvas momento <i>versus</i> rotação – $k_p \neq 0$	185
Figura 6.23 – Comparação de curvas momento <i>versus</i> – série FE.....	186
Figura 6.24 – Comparação de curvas momento <i>versus</i> – série EE	186
Figura A.1 – Diagrama de interação - ligação com placa de extremidade estendida	205
Figura A.2 - Interação entre três linhas de parafusos e definição de F_j^{Rd}	207
Figura A.3 – Considerações sobre efeitos de grupos entre linhas de parafusos	215
Figura A.4 – Curvas de comportamento da ligação ($M \times \phi$ e $N \times \Delta$).....	219
Figura A.5 – Variação do esforço de cisalhamento no painel de alma da coluna	221
Figura C.1 – Viga para suporte do atuador hidráulico	246
Figura C.2 – Viga de travamento da sapata de reação	247
Figura C.3 – Peça de ligação da viga do atuador hidráulico com o pórtico de reação... 248	
Figura C.4 – Peça de ligação da viga do atuador hidráulico com o pórtico de reação... 248	
Figura C.5 – Peça de ligação da rótula inferior com a placa de base das colunas	249
Figura C.6 – Peça de ligação do pórtico de reação com a rótula superior.....	249

Figura C.7 – Peça de ligação da placa de topo da coluna com a rótula superior	250
Figura C.8 – Detalhe do desviador dos cabos de protensão	250
Figura C.9 – Peça para aplicação do esforço axial de compressão - I.....	251
Figura C.10 – Peça para aplicação do esforço axial de compressão - II.....	251
Figura C.11 – Guia dos cabos de protensão	252
Figura C.12 – Detalhe da coluna e da viga dos ensaios	252
Figura E.1 - Dimensões utilizadas para a caracterização geométrica dos perfis	265

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Coeficiente de modificação de rigidez η [8,9]	34
Tabela 2.2 – Valores aproximados para o parâmetro de transformação β	42
Tabela 2.3 – Parâmetro de redução ω	45
Tabela 2.4 – Comprimentos efetivos de um T-stub, componente 4	48
Tabela 2.5 – Comprimentos efetivos de um T-stub, componente 5	50
Tabela 3.1 – Dimensionamento das componentes – Ensaios FE	71
Tabela 3.2 – Dimensionamento das componentes – Ensaios EE	71
Tabela 3.3 – Descrição dos carregamentos aplicados nos ensaios.....	72
Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas dos materiais	85
Tabela 4.1 – Verificação da aplicação de esforço axial de tração.....	88
Tabela 4.2 – Valores experimentais para $M_{j,Rd}$ e $S_{j,ini}$	90
Tabela 4.3 – Tensões principais - roseta A para $M = 50kN.m$ (em MPa).....	102
Tabela 4.4 – Deslocamentos da placa de extremidade (em mm)	109
Tabela 5.1 – Valores experimentais para $M_{j,Rd}$ e $S_{j,ini}$	127
Tabela 5.2 – Comparação de deformações – canais 11 e 14 (em $\mu\epsilon$)	133
Tabela 5.3 – Comparação de deslocamentos – canal 44 (em mm)	148
Tabela 6.1 – Coeficientes de rigidez das componentes dos ensaios da série FE	172
Tabela 6.2 – Comparação entre $M_{j,Rd}$ e $S_{j,ini}$ – numérico e experimental.....	172
Tabela 6.3 – Valores calibrados para rigidez pós-limite k_p	176
Tabela 6.4 – Coeficientes de rigidez das componentes dos ensaios da série EE	181
Tabela 6.5 – Comparação entre $M_{j,Rd}$ e $S_{j,ini}$ – numérico e experimental.....	182
Tabela 6.6 – Valores calibrados para rigidez pós-limite k_p	184
Tabela A.1 - Comportamento das componentes	213
Tabela E.1 – Propriedades geométricas – placa de extremidade e viga (Ensaios FE)..	266
Tabela E.2 – Propriedades geométricas – coluna (Ensaios FE)	267
Tabela E.3 – Propriedades geométricas – placa de extremidade e viga (Ensaios EE) .	268
Tabela E.4 – Propriedades geométricas – coluna (Ensaios EE)	269

Lista de Símbolos

A	área total da seção transversal do perfil da coluna
A_0	área do parafuso
A_{vc}	área de corte da alma da coluna
$b_{eff,c,wc}$	largura efetiva da alma da coluna à compressão
$b_{eff,t,wb}$	largura efetiva da alma da coluna à tração
b_{tf}	largura da mesa da coluna
$B_{t,Rd}$	resistência de um parafuso à tração
E	módulo de elasticidade
f_{ub}	tensão última do parafuso
f_y	tensão de escoamento do material
$f_{y,wc}$	tensão de escoamento da alma da coluna
$f_{y,fc}$	tensão de escoamento da mesa da coluna
$F_{T,1,Rd}$	resistência do t-stub à flexão – modo 1
$F_{T,2,Rd}$	resistência do t-stub à flexão – modo 2
$F_{T,3,Rd}$	resistência do t-stub à flexão – modo 3
$F_{i,Rd}$	resistência de cada linha de parafusos em tração
$F_{c,wc,Rd}$	resistência da alma da coluna à compressão
$F_{t,wc,Rd}$	resistência da alma da coluna à tração
$F_{c,fb,Rd}$	resistência da mesa da viga à compressão
$F_{t,wb,Rd}$	resistência da alma da viga à tração
$F_{t,Rd}$	resistência de um parafuso à tração
h_i	distância da linha de parafusos ao centro de compressão
h_r	distância entre a linha de parafusos i ao centro de compressão
k_1	coeficiente de rigidez da alma da coluna ao corte – componente 1
k_2	coeficiente de rigidez da alma da coluna à compressão – componente 2
k_3	coeficiente de rigidez da alma da coluna à tração – componente 3
k_4	coeficiente de rigidez da alma da coluna à flexão – componente 4
k_5	coeficiente de rigidez da placa de extremidade à flexão – componente 5
k_7	coeficiente de rigidez da mesa da viga à compressão – componente 7
k_8	coeficiente de rigidez da alma da viga à tração – componente 8

k_{10}	coeficiente de rigidez de um parafuso à tração
k_{eq}	rigidez equivalente das molas associadas em paralelo
$k_{eff,r}$	rigidez efetiva das molas associadas em série
$k_{i,r}$	valor de rigidez de cada uma das componentes
k_{wc}	fator de correção
$l_{eff,1}$	largura efetiva do t-stub – modo 1
$l_{eff,cp}$	formas circulares
$l_{eff,nc}$	formas não-circulares
$l_{eff,2}$	largura efetiva do t-stub – modo 2
L_b	espessura de material a ser apertada pelos parafusos
$M_{j,Rd}$	momento resistente
$M_{pl,1,Rd}$	momento resistente do t-stub à flexão – modo 1
$M_{pl,2,Rd}$	momento resistente do t-stub à flexão – modo 2
$M_{c,Rd}$	momento resistente da seção transversal
n_b	número de linhas de parafusos em tração
n_c	número de componentes ativas em cada linha de parafusos
r	raio de concordância
$S_{j,ini}$	rigidez inicial rotacional
s_p	comprimento obtido pela dispersão à 45° através da placa de extremidade
t_{fc}	espessura da mesa da coluna
t_{fb}	espessura da mesa da viga
t_f	espessura da mesa do t-stub
t_p	espessura da placa de extremidade
t_w	espessura da alma da viga
t_{wc}	espessura da alma da coluna
$V_{wp,Rd}$	resistência da alma da coluna ao corte
W_{pl}	módulo plástico da seção transversal
Z_{eq}	braço de alavanca
β	parâmetro de transformação
ϕ_{Cd}	capacidade de rotação
γ_{M0}	coeficiente de resistência
γ_{M1}	coeficiente de segurança

γ_{M2}	coeficiente de resistência
λ_1 e λ_2	coeficientes
$\bar{\lambda}_p$	esbeltez da placa de extremidade
η	coeficiente de modificação de rigidez
ρ	o fator de redução devido à flambagem da placa
$\sigma_{com,Ed}$	máxima tensão longitudinal de compressão
ω	fator de redução

Lista de Abreviaturas

PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Eurocode	European Committee for Standardisation
ECCS	European Convention for Constructional Steelwork
DEC	Departamento de Engenharia Civil
FCTUC	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

“Contemple o mundo com novo frescor, com os olhos de um principiante. Saber que você não sabe e estar disposto a admitir isso sem desculpas nem acanhamento é ser fonte de verdade e preparar o terreno para aprender e progredir em qualquer atividade.”

Epicteto, *A Arte de Viver*