

**Avaliação probabilística da resistência à compressão
axial de perfis de aço formados a frio**

Bruno Torres Pichara Sily

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

“Avaliação probabilística da resistência à compressão axial de perfis de aço formados a frio”

Bruno Torres Pichara Sily

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues
DEES – UFMG (Orientador)

Prof.^a Dr.^a Sofia Maria Carrato Diniz
DEES – UFMG (Co-orientadora)

Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas
DEES – UFMG

Prof. Dr. Márcilio Sousa da Rocha Freitas
PROPEC – UFOP

Belo Horizonte, 31 de maio de 2012

DEDICATÓRIA

À Deus,
que iluminou o meu caminho para chegar até aqui.
Aos meus pais,
os maiores professores nesta escola chamada vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por Seu imenso amor e infinita bondade comigo. Aos meus queridos pais, Romeu Pichara Sily e Neuza Torres Pichara Sily, pessoas que muito admiro e nas quais me espelho. À minha irmã, Érika Torres Pichara Sily Fernandes, meu cunhado, Henrique de Andrade Fernandes, e sobrinho, Arthur Sily Fernandes, pela importante torcida.

À minha noiva, Priscilla Gabrielle Mendes Neves, e seus pais, Célio Lima Neves e Maria Ângela Mendes Neves, pelo apoio que recebi.

Ao corpo docente e funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da UFMG, pela oportunidade de realizar este trabalho e pelos ensinamentos adquiridos. Em especial, aos professores Dr. Francisco Carlos Rodrigues e Dr.^a Sofia Maria Carrato Diniz, pela valiosa orientação e por acreditarem em mim.

Aos meus colegas de trabalho da Superintendência de Desenvolvimento da Capital – SUDECAP, pela amizade e atenção prestada.

Aos meus amigos Sandra Pereira da Silva, Eduardo Lourenço Pinto e Wanderley Wanderson José da Silva, pelo agradável convívio familiar e incentivo. Aos colegas do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, pelo companheirismo ao longo desta jornada.

RESUMO

Os perfis de aço formados a frio (PFF) vêm sendo empregados cada vez mais na construção civil. Seu crescente uso se deve, sobretudo, à concepção de estruturas a cada dia mais esbeltas e à grande variabilidade de suas seções transversais disponíveis no mercado. Neste intuito, os PFF podem ser utilizados em distintas condições de solicitações em uma estrutura, podendo-se citar a compressão axial, que será estudada no presente trabalho.

Para o cálculo da força axial de compressão resistente dos PFF, devem ser previstos os modos locais e globais de flambagem, podendo ocorrer também alguma interação entre eles. Dentre os modos locais destacam-se a flambagem local e a distorcional. Para os modos globais tem-se as flambagens por flexão, torção e flexo-torção.

Contudo, a força resistente destes perfis não é um valor determinístico, possuindo, na realidade, uma natureza aleatória. Logo, torna-se importante o levantamento de informações sobre as incertezas inerentes e epistêmicas relacionadas à força axial de compressão resistente dos PFF. As incertezas inerentes são aquelas cuja variabilidade não pode ser alterada a menos que, para o caso dos PFF, se interfira no processo de fabricação destes. Como incertezas desta natureza podem ser citadas aquelas associadas ao material e as dimensões geométricas dos perfis. Já as incertezas epistêmicas são aquelas relacionadas ao grau de conhecimento relativo a um dado problema. Como exemplos desta última podem ser apontados o erro do modelo e o erro amostral.

Assim, o presente trabalho visa obter, via Simulação de Monte Carlo, a distribuição de probabilidade da força axial de compressão resistente dos PFF para três tipos distintos de seções transversais (U, U enrijecido e S enrijecido), levando-se em consideração estas incertezas de natureza inerente e epistêmica.

Palavras-chave: perfis de aço formados a frio; força axial de compressão resistente; incertezas inerentes; incertezas epistêmicas; erro do modelo; Simulação de Monte Carlo.

ABSTRACT

The cold-formed steel profiles (CFP) have been used each time more in civil construction. Its increased use is due, mainly, to the design of structures ever more slender and the great variability of their cross sections available in the market. To this end, the CFP can be used in different conditions of required strength in a structure, it may be mentioned the axial compression, which will be studied in this work.

To calculate the compressive strength of the CFP, it should considerate the modes of local and global buckling, being possible the occurrence of some interaction between them. The local modes include the local and distortional buckling. For global modes there are the flexural, torsional and flexural-torsional buckling.

However, the resistance of these profiles is not a deterministic value, having in fact a random nature. Therefore, it is important to collect information about the inherent and epistemic uncertainties related to the compressive strength of CFP. The inherent uncertainties are those whose variability can not be changed unless, in case of CFP, there is an interference in the process of manufacturing these. As such uncertainties can be mentioned those that are associated with the material and the geometrical dimensions of the profiles. The epistemic uncertainties are those related to the degree of knowledge concerning a given problem. Like examples of this latter, it can be pointed out the model error and the sampling error.

Thus, this work aims to obtain, by Monte Carlo simulation, the probability distribution of the compressive strength of CFP to three distinct types of cross sections (U, stiffened U and stiffened S), taking into account these uncertainties of inherent and epistemic nature.

Keywords: *cold-formed steel profiles; compressive strength; inherent uncertainties; epistemic uncertainties; model error; Monte Carlo Simulation.*

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS	xvii
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Perfis de aço formados a frio	1
1.2 – Natureza do problema	4
1.3 – Objetivos	5
1.4 – Metodologia	5
1.5 – Justificativas	6
1.6 – Apresentação da dissertação	7
2 – CÁLCULO DA FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO RESISTENTE DOS	
 PFF	9
2.1 – Métodos de dimensionamento	9
2.1.1 – O Método da Largura Efetiva (MLE)	10
2.1.2 – O Método da Resistência Direta (MRD)	14
2.1.3 – Curvas de dimensionamento para a flambagem global	20

2.1.3.1 – Curvas de dimensionamento do EUROCODE 3 (ECS, 2005a, b) e da ABNT NBR 14762:2001	20
2.1.3.2 – Curva de dimensionamento do American Iron and Steel Institute (AISI, 2007) e da ABNT NBR 14762:2010	22
2.2 – Principais mudanças na NBR 14762 referentes ao dimensionamento dos PFF submetidos à compressão axial	23
2.3 – Modelos de cálculo	24
2.4 – Resumo do capítulo	27
3 – FUNDAMENTOS DA CONFIABILIDADE ESTRUTURAL	28
3.1 – Introdução	28
3.2 – Níveis dos métodos de confiabilidade	29
3.3 – O problema básico da confiabilidade estrutural	31
3.4 – Confiabilidade de sistemas	38
3.5 – Simulação de Monte Carlo (SMC)	39
3.6 – Resumo do capítulo	43
4 – BANCO DE DADOS	46
4.1 – Apresentação dos trabalhos encontrados na literatura	46
4.2 – Resultados experimentais obtidos para perfis U	48
4.3 – Resultados experimentais obtidos para perfis U enrijecidos	50
4.3.1 – Ensaio de Batista (1988)	50
4.3.2 – Ensaio de Thomasson (1978)	53
4.4 – Resultados experimentais obtidos para perfis S enrijecidos	54
4.4.1 – Ensaio de Campos (1999)	54
4.4.2 – Ensaio de Santana (1999)	55
4.5 – Resumo do capítulo	57
5 – DESCRIÇÃO ESTATÍSTICA DAS VARIÁVEIS ALEATÓRIAS	59
5.1 – Variáveis básicas e funções de variáveis aleatórias	59
5.2 – Fator de material	61

5.3 – Fator de fabricação	61
5.4 – Erro do modelo ou fator profissional	63
5.4.1 – Planilha desenvolvida para a obtenção do erro do modelo	64
5.4.2 – Obtenção do erro do modelo	68
5.4.3 – Estudo do erro do modelo em função do índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global	75
5.4.4 – A influência do coeficiente de flambagem global por flexão sobre o erro do modelo	87
5.5 – Resumo do capítulo	96
6 – DESCRIÇÃO PROBABILÍSTICA DA FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO RESISTENTE DOS PFF	98
6.1 – Simulação da força axial de compressão resistente dos PFF	98
6.2 – Estatística das variáveis básicas	99
6.3 – Resposta do sistema	101
6.4 – Exemplos	103
6.4.1 – Simulação da força axial de compressão resistente de um perfil U	103
6.4.2 – Simulação da força axial de compressão resistente de um perfil U enrijecido	104
6.4.3 – Simulação da força axial de compressão resistente de um perfil S enrijecido	106
6.5 – Resumo do capítulo	108
7 – SUMÁRIO, CONCLUSÕES E SUGESTÕES	109
7.1 – Sumário	109
7.2 – Conclusões	111
7.3 – Sugestões	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
ANEXO A	119
ANEXO B	126

B.1 – Teste Qui-quadrado para a distribuição do erro do modelo 1	127
B.2 – Teste Qui-quadrado para a distribuição do erro do modelo 2	128
B.3 – Teste Qui-quadrado para a distribuição do erro do modelo 3	129
B.4 – Teste Qui-quadrado para a distribuição do erro do modelo 4	130

LISTA DE FIGURAS

1.1 – Seções transversais usuais de perfis formados a frio	1
1.2 – Processos de conformação a frio	2
1.3 – Modos de flambagem do U enrijecido submetido à força axial de compressão ...	3
2.1 – Tipos de elementos componentes da seção transversal dos PFF	12
2.2 – Curvas associadas à flambagem global para barras constituídas por PFF	23
3.1 – Funções densidade de probabilidade de $f_x(x)$ e $f_y(y)$	33
3.2 – FDP da margem de segurança M	34
3.3 – Definição geométrica do índice de confiabilidade	37
3.4 – Relação entre u_i e x_i	41
3.5 – Caracterização da força axial de compressão resistente como um sistema misto	45
4.1 – Dimensões de referência das seções transversais estudadas	48
5.1 – Histograma do fator de fabricação dos perfis estudados	62
5.2 – Gráfico gerado pelo programa CUFMS 3.12	65
5.3 – Interação entre os modos de flambagem ao longo dos comprimentos de meia onda	66
5.4 – Histograma referente ao erro do modelo de cálculo 1	71
5.5 – Histograma referente ao erro do modelo de cálculo 2	72
5.6 – Histograma referente ao erro do modelo de cálculo 3	72
5.7 – Histograma referente ao erro do modelo de cálculo 4	73
5.8 – Relação entre o erro do modelo de cálculo 1 com o índice de esbeltez reduzido da barra	75
5.9 – Relação entre o erro do modelo de cálculo 2 com o índice de esbeltez reduzido da barra	76
5.10 – Relação entre o erro do modelo de cálculo 3 com o índice de esbeltez reduzido da barra	76
5.11 – Relação entre o erro do modelo de cálculo 4 com o índice de esbeltez reduzido da barra	77
5.12 – Regressão obtida para o erro do modelo 1	77
5.13 – Regressão obtida para o erro do modelo 2	78

5.14 – Regressão obtida para o erro do modelo 3	78
5.15 – Regressão obtida para o erro do modelo 4	79
5.16 – Comparação entre as curvas obtidas para o valor médio encontrado para o erro dos modelos	80
5.17 – Histograma da variável aleatória $e_{m,1(a)}$	81
5.18 – Histograma da variável aleatória $e_{m,2(a)}$	81
5.19 – Histograma da variável aleatória $e_{m,3(a)}$	82
5.20 – Histograma da variável aleatória $e_{m,4(a)}$	82
5.21 – Comparação da tendência média do erro do modelo 1 para os valores teórico e recomendado de K_x	84
5.22 - Comparação da tendência média do erro do modelo 2 para os valores teórico e recomendado de K_x	85
5.23 - Comparação da tendência média do erro do modelo 3 para os valores teórico e recomendado de K_x	85
5.24 - Comparação da tendência média do erro do modelo 4 para os valores teórico e recomendado de K_x	86
5.25 – Histograma referente ao erro do modelo de cálculo 1 considerando os novos valores de K_x e K_y	88
5.26 – Histograma referente ao erro do modelo de cálculo 2 considerando os novos valores de K_x e K_y	89
5.27 – Histograma referente ao erro do modelo de cálculo 3 considerando os novos valores de K_x e K_y	89
5.28 – Histograma referente ao erro do modelo de cálculo 4 considerando os novos valores de K_x e K_y	90
5.29 – Nova relação entre o erro do modelo de cálculo 1 com o índice de esbeltez reduzido da barra	90
5.30 – Nova relação entre o erro do modelo de cálculo 2 com o índice de esbeltez reduzido da barra	91
5.31 – Nova relação entre o erro do modelo de cálculo 3 com o índice de esbeltez reduzido da barra	91

5.32 – Nova relação entre o erro do modelo de cálculo 4 com o índice de esbeltez reduzido da barra	92
5.33 – Regressão obtida para o erro do modelo 1 considerando os novos valores de K_x e K_y	92
5.34 – Regressão obtida para o erro do modelo 2 considerando os novos valores de K_x e K_y	93
5.35 – Regressão obtida para o erro do modelo 3 considerando os novos valores de K_x e K_y	93
5.36 – Regressão obtida para o erro do modelo 4 considerando os novos valores de K_x e K_y	94
5.37 – Curvas obtidas para $e_{m,i(d)}$ considerando os novos valores de K_x e K_y	95
6.1 – Distribuição de probabilidade da força axial de compressão resistente obtida via SMC para o perfil U15	104
6.2 – Distribuição de probabilidade da força axial de compressão resistente obtida via SMC para o perfil C47	105
6.3 – Distribuição de probabilidade da força axial de compressão resistente obtida via SMC para o perfil P3	107

LISTA DE TABELAS

2.1 – Valores para os coeficientes de flambagem global por flexão K_x e K_y (ABNT NBR 8800:2008; AISC, 2005b)	17
2.2 – Classificação das seções e de suas respectivas curvas associadas à flambagem por flexão (ABNT, 2001)	21
2.3 – Modelos de cálculo adotados no estudo da força axial de compressão resistente dos PFF e seus respectivos métodos de dimensionamento empregados	25
3.1 – Relação quantitativa entre p_F e β	36
4.1 – Resumo dos ensaios encontrados na literatura	47
4.2 – Dados obtidos dos ensaios de Batista (1988) para perfis U	49
4.3 – Resultados obtidos por Batista (1988) para a resistência ao escoamento do aço	50
4.4 – Dados obtidos dos ensaios de Batista (1988) para perfis U enrijecido	51
4.5 – Dados obtidos dos ensaios de Thomasson (1978) para perfis U enrijecido	53
4.6 – Valores médios obtidos por Thomasson (1978) para a resistência ao escoamento do aço	54
4.7 – Dados obtidos dos ensaios de Campos (1999) para perfis S enrijecido	54
4.8 – Valores médios obtidos por Campos (1999) para a resistência ao escoamento do aço	55
4.9 – Dados obtidos dos ensaios de Santana (1999) para perfis S enrijecido	55
4.10 – Resultados obtidos por Santana (1999) para a resistência ao escoamento do aço	57
5.1 – Descrição estatística do fator de material	61
5.2 – Frequências obtidas para o fator de fabricação dos perfis estudados	61
5.3 – Parâmetros obtidos para o fator de fabricação dos perfis estudados	63
5.4 – Parâmetros obtidos para cada componente da seção transversal dos perfis estudados	63
5.5 – Força axial de compressão resistente calculada segundo os quatro modelos de cálculo	66
5.6 – Erro do modelo obtido para cada perfil ensaio	69
5.7 – Descrição estatística do erro do modelo segundo os quatro modelos de cálculo avaliados	71

5.8 – Descrição estatística do erro do modelo com base na flambagem global, sem a ocorrência da flambagem local no perfil	73
5.9 – Descrição estatística do erro do modelo com base no escoamento da seção transversal, tendo ocorrido previamente a flambagem local no perfil	74
5.10 – Descrição estatística do erro do modelo com base na flambagem global, tendo ocorrido previamente a flambagem local no perfil	74
5.11 – Descrição estatística do erro do modelo com base na flambagem distorcional ..	74
5.12 – Expressões obtidas para o erro dos modelos de cálculo	79
5.13 – Erro padrão da estimativa, $S_{e,i}$, para o erro dos modelos de cálculo	83
5.14 – Comparação da dispersão do erro do modelo considerando os valores teórico e recomendado de K_x	86
5.15 – Descrição estatística do erro do modelo considerando os novos valores de K_x e K_y	88
5.16 – Expressões obtidas para o erro dos modelos de cálculo considerando os novos valores de K_x e K_y	94
5.17 – Erro padrão da estimativa encontrado para o erro dos modelos considerando os novos valores de K_x e K_y	95
5.18 – Parâmetros encontrados para o erro do modelo, ao longo do intervalo $0,08 \leq \lambda_0 \leq 1,85$, considerando os novos valores de K_x e K_y	96
6.1 – Descrição estatística das variáveis associadas com o material	99
6.2 – Relação entre os perfis a serem simulados e os perfis contidos no bando de dados	100
6.3 – Descrição estatística das variáveis associadas com a geometria dos perfis	100
6.4 – Descrição estatística da variável aleatória erro do modelo	101
6.5 – Valores médios de N_{dist} considerados para os perfis a serem simulados	102
6.6 – Descrição estatística da força resistente à compressão axial obtida: (i) via SMC para o perfil U15 e (ii) através dos correspondentes perfis ensaiados por Batista (1988)	104
6.7 – Descrição estatística da força resistente à compressão axial obtida: (i) via SMC para o perfil C47 e (ii) através dos correspondentes perfis ensaiados por Batista (1988)	106

6.8 – Descrição estatística da força resistente à compressão axial obtida: (i) via SMC para o perfil P3 e (ii) através dos correspondentes perfis ensaiados por Santana (1999)	107
A.1 – Propriedades geométricas dos perfis estudados	119
A.2 – Forças axiais de flambagem elástica obtidas para os perfis estudados	123
B.1 – Frequências observada e esperada para o erro do modelo 1	127
B.2 – Frequências observada e esperada para o erro do modelo 2	128
B.3 – Frequências observada e esperada para o erro do modelo 3	129
B.4 – Frequências observada e esperada para o erro do modelo 4	131

LISTA DE SÍMBOLOS

<u>Símbolo</u>	<u>Descrição</u>
A	Área bruta da seção transversal da barra
A_{ef}	Área efetiva da seção transversal da barra
b	Largura do elemento (correspondente à parte plana)
b_{ef}	Largura efetiva do elemento
B_1	Largura da alma
B_{1i}	Largura da alma inferior
B_{1s}	Largura da alma superior
B_{2i}	Largura da mesa inferior
B_{2m}	Largura da mesa intermediária
B_{2s}	Largura da mesa superior
B_{3i}	Largura do enrijecedor inferior
B_{3s}	Largura do enrijecedor superior
c_f	Custo associado ao i -ésimo modo de falha
c_i	Custo inicial
c_{insp}	Custo de inspeção
c_m	Custo de manutenção
c_s	Coefficiente de segurança
C_w	Constante de empenamento da seção
d	Largura do enrijecedor de borda
d_{ef}	Largura efetiva do enrijecedor de borda
d_s	Largura efetiva reduzida do enrijecedor de borda
D	Dimensão nominal do enrijecedor de borda
e_i	Frequência absoluta esperada de uma distribuição de probabilidade adotada
$e_{m,i}$	Erro do modelo
$e_{m,i(a)}$	Dispersão em torno da tendência média do erro do modelo
$e_{m,i(d)}$	Tendência média do erro do modelo
$e_{obs,i}$	Valor do erro do modelo observado

E	Módulo de elasticidade do aço (200.000 MPa)
f	Graus de liberdade
f_y	Resistência ao escoamento do aço
	Função densidade de probabilidade (FDP) da variável Y
$f_{y,m}$	Valor médio obtido para a resistência ao escoamento do aço
F_U	Função de distribuição acumulada da variável U
F_X	Função de distribuição acumulada da variável X
g	Número de parâmetros estimados
$g(\mathbf{X})$	Função de desempenho
G	Módulo de elasticidade transversal do aço (77.000 MPa)
H_0	Hipótese nula
H_a	Hipótese alternativa
I_a	Momento de inércia de referência do enrijecedor de borda
I_s	Momento de inércia da seção bruta do enrijecedor de borda, em torno do seu próprio eixo baricêntrico paralelo ao elemento a ser enrijecido
I_x	Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo principal x
I_y	Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo principal y
J	Constante de torção da seção
k	Coefficiente de flambagem local do elemento
K_x	Coefficiente de flambagem global por flexão em relação ao eixo x
K_y	Coefficiente de flambagem global por flexão em relação ao eixo y
K_z	Coefficiente de flambagem global por torção
$K_x L_x$	Comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo x
$K_y L_y$	Comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo y
$K_z L_z$	Comprimento efetivo de flambagem global por torção
L	Comprimento da barra
L_x	Comprimento da barra destravado na direção y
L_y	Comprimento da barra destravado na direção x
L_z	Comprimento da barra destravado quanto à rotação em torno de seu eixo longitudinal
M	Margem de segurança

n	Total de ensaios Tamanho da amostra Número de valores ou intervalos
N	Expoente empregado no cálculo do coeficiente de flambagem local k Distribuição de probabilidade normal
$N_{c,Exp}$	Força axial de compressão resistente obtida experimentalmente
$N_{c,R}$	Força axial de compressão resistente
$N_{c,Ri}$	Força axial de compressão resistente calculada
$N_{c,Rdist}$	Força axial de compressão resistente associada à flambagem distorcional
$N_{c,Re}$	Força axial de compressão resistente associada à flambagem global
$N_{c,Rl}$	Força axial de compressão resistente associada à flambagem local
N_{dist}	Força axial de flambagem distorcional elástica
N_e	Força axial de flambagem global elástica
N_{ex}	Força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo principal x
N_{ey}	Força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo principal y
N_{ez}	Força axial de flambagem global elástica por torção
N_{exz}	Força axial de flambagem global elástica por flexo-torção
N_l	Força axial de flambagem local elástica
o_i	Frequência absoluta observada
p_F	Probabilidade de falha
p_S	Probabilidade de segurança
P_F	Probabilidade de falha Probabilidade de falha associada ao i -ésimo modo de falha
$P_{F adm}$	Probabilidade de falha admissível
q_c	Valor da distribuição χ_f^2 apropriada na probabilidade acumulada $(1 - \alpha)$
Q	Carregamento
Q_{in}	Valor nominal da i -ésima carga (ou seu efeito)
Q^2	Valor utilizado na comparação com a distribuição Qui-quadrado
r_0	Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção

r_x	Raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal de inércia x
r_y	Raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal de inércia y
R	Resistência (capacidade portante)
R^2	Coefficiente de determinação
R_n	Força resistente nominal
$S_{e,i}$	Erro padrão da estimativa
t	Espessura do elemento
x_0	Distância do centro de torção ao centroide na direção do eixo principal x
X	Oferta (resistência)
\mathbf{X}	Vetor de variáveis básicas
X_f	Valor médio do fator de fabricação
X_i	Variável básica
X'_i	Variável reduzida
X_m	Valor médio do fator de material
y_0	Distância do centro de torção ao centroide na direção do eixo principal y
Y	Demanda (solicitação)
α	Fator de imperfeição inicial
	Nível de significância
β	Parâmetro empregado no cálculo do fator de redução χ
	Índice de confiabilidade
β_{adm}	Índice de confiabilidade admissível
ϕ	Fator de minoração da resistência
Φ	Função de distribuição acumulada da variável normal padrão $N(0,1)$
γ_i	Coefficiente de majoração da i -ésima carga (ou seu efeito)
δ	Coefficiente de variação
δ_f	Coefficiente de variação do fator de fabricação
δ_m	Coefficiente de variação do fator de material
$\varepsilon \%$	Erro percentual da probabilidade de falha
θ	Ângulo entre o plano da mesa e o plano do enrijecedor de borda
λ_0	Índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global
λ_{dist}	Índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional

λ_l	Índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local
λ_p	Índice de esbeltez reduzido do elemento
λ_{p0}	Valor de referência do índice de esbeltez reduzido do elemento
μ_M	Média de M
μ_Q	Média de Q
μ_R	Média de R
χ	Fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global (na ABNT NBR 14762:2001, χ é representado por ρ)
χ_f^2	Distribuição de probabilidade Qui-quadrado
σ	Tensão normal de compressão Tensão obtida pela teoria linear para as cargas máximas que podem ser esperadas durante a vida útil da estrutura
σ_{adm}	Tensão admissível
σ_{lim}	Tensão limite
σ_M	Desvio padrão de M
σ_M^2	Variância de M
σ_Q	Desvio padrão de Q
σ_Q^2	Variância de Q
σ_R	Desvio padrão de R
σ_R^2	Variância de R

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Perfis de aço formados a frio

Os perfis de aço formados a frio (PFF) vêm sendo empregados cada vez mais na construção civil. Seu crescente uso se deve, sobretudo, à concepção de estruturas a cada dia mais esbeltas e à grande variedade de suas seções transversais disponíveis no mercado (ver Figura 1.1).

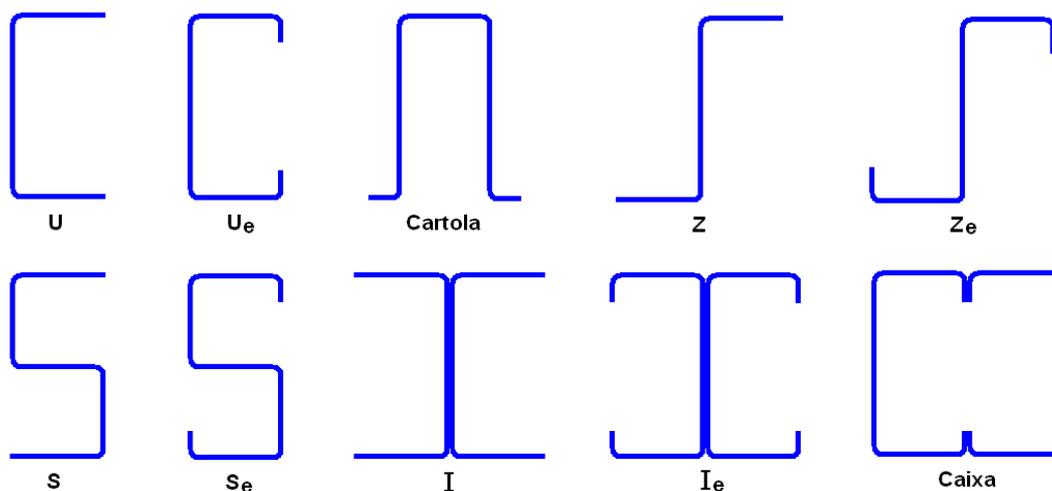
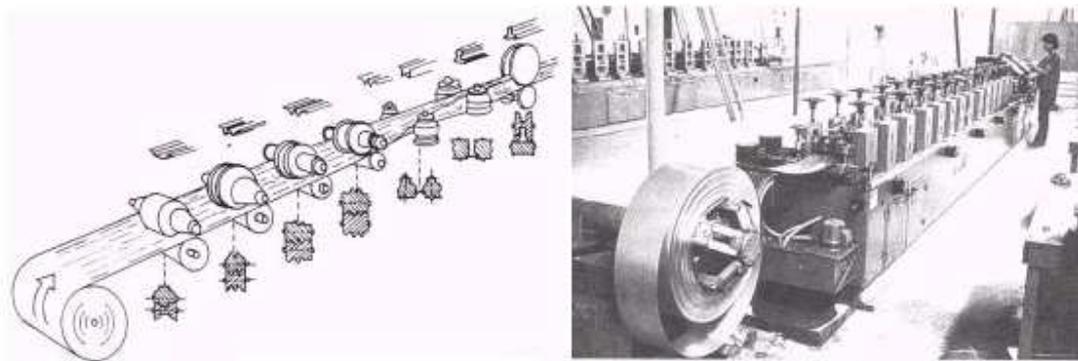


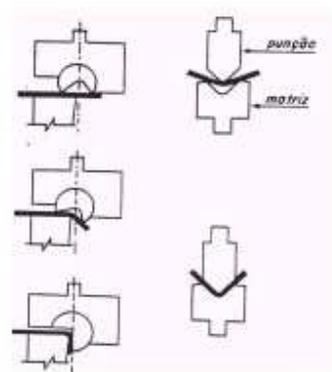
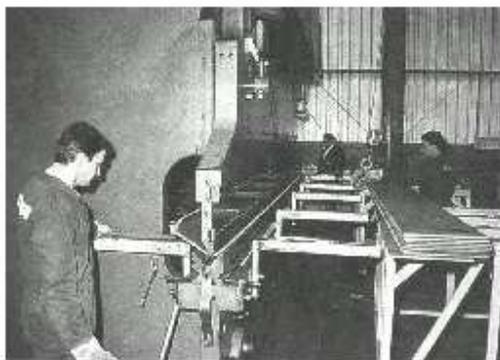
Figura 1.1 – Seções transversais usuais de perfis formados a frio

Outro fator também importante relacionado à intensa utilização desta tecnologia decorre dos menores custos envolvidos na fabricação dos PFF. Estes são obtidos normalmente a partir de equipamentos mais simples se comparados aos necessários à produção de perfis laminados e soldados. Com referência aos processos de fabricação, estes podem ser do tipo descontínuo (dobramento) ou contínuo (conformação contínua). Na produção descontínua,

realizada a partir de uma prensa dobradeira, a fabricação está associada a pequenas quantidades ou a seções com formas especiais. Já a conformação contínua, mais relacionada à produção em série, é realizada a partir do deslocamento longitudinal de uma tira de aço sobre uma mesa contendo uma série de roletes que vão dando a forma do perfil pretendido. A Figura 1.2 ilustra os processos de conformação a frio descritos.



Conformação contínua



Dobramento

Figura 1.2 – Processos de conformação a frio (Rodrigues, 2005)

Os PFF podem ser utilizados como barras em estruturas treliçadas de coberturas, como pilares e vigas de edifícios residenciais, comerciais e industriais, em postos de combustíveis, ginásios, fôrmas para concretagem, escoramentos, estacas-prancha, andaimes, tapamentos laterais de galpões, defensas rodoviárias, equipamentos de suporte ao trabalho agrícola, cercas, porteiros, carrocerias de caminhões, aeronaves, entre outros.

Neste propósito, o projeto de estruturas que utilizam os PFF demanda o cálculo do esforço resistente à compressão axial destes perfis, entre outros esforços resistentes, devendo ser considerados em seu dimensionamento os modos locais e globais de flambagem, podendo ocorrer também alguma interação entre estes. Dentre os modos locais destacam-se a flambagem local e a flambagem distorcional. Para os modos globais tem-se a flambagem por flexão, torção ou flexo-torção. A Figura 1.3 ilustra os possíveis modos de flambagem de um perfil U enrijecido submetido à compressão axial.

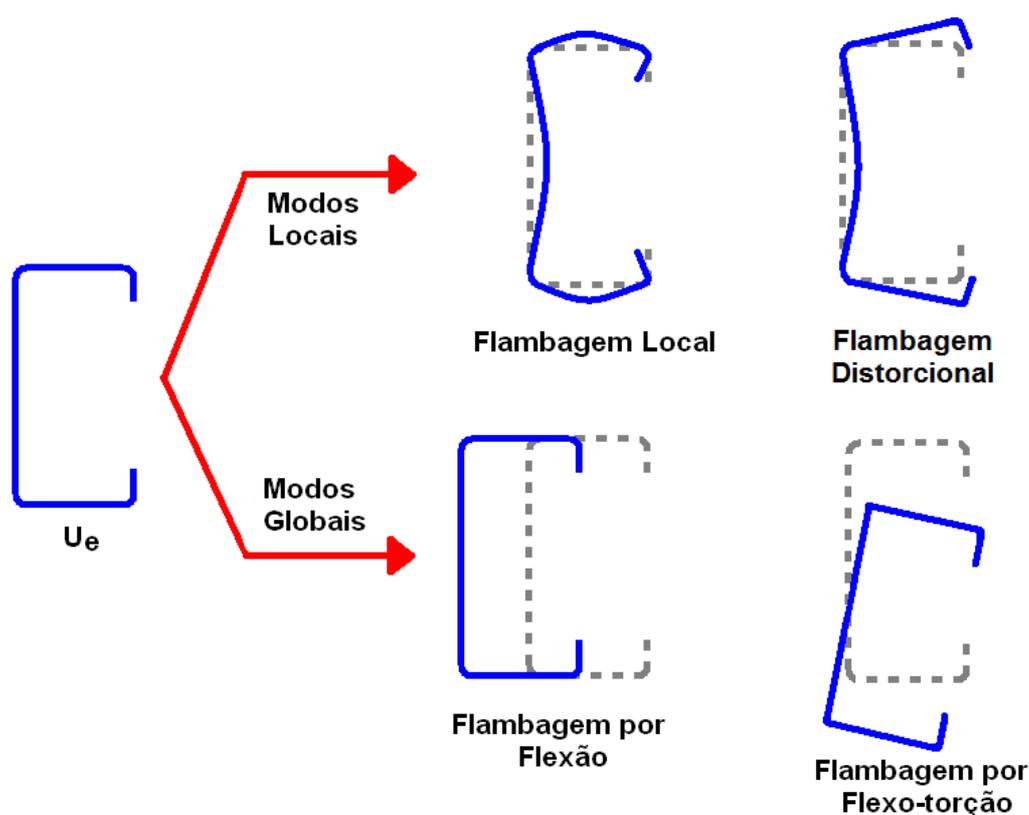


Figura 1.3 – Modos de flambagem do perfil U enrijecido submetido à força axial de compressão

A ocorrência de um ou outro modo de flambagem, com possível interação entre eles, depende da forma da seção transversal, do comprimento da barra, da espessura do perfil, e consequentemente da esbeltez global (λ_0) da barra e da esbeltez local (b/t) dos elementos que compõem a seção transversal, das imperfeições geométricas iniciais, das tensões residuais, das excentricidades de carregamento e das condições de vinculação, entre outros.

No Brasil, o dimensionamento dos PFF é regido pela ABNT NBR 14762:2010 – “Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio”. Sua versão anterior data de novembro do ano de 2001 (ABNT NBR 14762:2001). Esta norma baseia-se em informações técnicas e requisitos apresentados pelas mais conceituadas e difundidas normas estrangeiras sobre o tema, destacando-se as prescrições do American Iron and Steel Institute (AISI S100:2007) e do EUROCODE 3: Part 1-3 (ECS, 2005).

Assim, as normas técnicas têm como principal função estabelecer os critérios de dimensionamento referentes a certos tipos de estrutura e de perfil. Contudo, o esforço resistente associado aos PFF não se trata de um valor determinístico, possuindo na realidade uma natureza aleatória. Ou seja, o esforço resistente de um perfil não está relacionado a um valor determinado, mas apresenta uma melhor abordagem em termos probabilísticos.

1.2 Natureza do problema

Relacionada a este comportamento aleatório, tem-se conseqüentemente a ocorrência de incertezas de natureza inerente e incertezas de natureza epistemológica envolvidas na determinação da força axial de compressão resistente dos PFF.

As incertezas inerentes são aquelas cuja variabilidade não pode ser alterada a menos que, para o caso dos PFF, se interfira no processo de fabricação destes. Como incertezas desse tipo podem ser citadas aquelas associadas à resistência ao escoamento do aço, às dimensões dos perfis, ao módulo de elasticidade do material, entre outras.

Já as incertezas epistemológicas são aquelas relacionadas ao grau de conhecimento relativo a um dado problema, podendo ser reduzidas na medida em que se obtêm informações a respeito deste. Como exemplos citam-se o erro do modelo e os erros amostrais.

Com relação ao erro do modelo, esse pode ser obtido ao se comparar os valores de resultados experimentais com os de formulações teóricas, transcritas normalmente das normas técnicas. Um ponto importante a ser mencionado é que este tipo de erro trata-se na realidade de uma variável aleatória. Já o erro amostral está associado ao tamanho dessa. Quanto maior uma amostra, menor será este erro.

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como principais objetivos:

- O estudo do comportamento dos PFF submetidos à compressão axial por meio de modelos de cálculo baseados nas prescrições normativas da ABNT NBR 14762, em suas edições de 2001 e 2010, do American Iron and Steel Institute (AISI, 2007) e do EUROCODE 3: Part 1-3 (ECS, 2005);
- A descrição probabilística da variável aleatória erro do modelo associado a cada um dos modelos de cálculo em análise;
- A obtenção da distribuição de probabilidade da força axial de compressão resistente dos PFF, levando-se em consideração as incertezas inerentes e epistêmicas.

1.4 Metodologia

No presente trabalho, a descrição probabilística do erro do modelo é obtida pela comparação entre as estimativas obtidas para a força axial de compressão resistente dos PFF, via formulações teóricas, com resultados experimentais. Para tal, foi compilado um banco de dados contemplando um grande número de ensaios disponíveis na literatura, cobrindo os distintos modos de flambagem (global, local e distorcional). Com base neste banco de dados, o erro de cada modelo é descrito por uma tendência central (média) e a dispersão em torno desta estimativa.

Posteriormente, a distribuição probabilística da resistência à compressão axial dos PFF é obtida via Simulação de Monte Carlo, considerando-se as incertezas inerentes (a resistência

ao escoamento do aço, as dimensões dos perfis e o módulo de elasticidade do material) e o erro do modelo.

1.5 Justificativas

Devido a fatores tais como o baixo custo de produção, leveza, simplicidade de manuseio no campo, rapidez na execução, flexibilidade arquitetônica e estrutural, os PFF se apresentam como uma excelente alternativa para as habitações de interesse social (HIS), prédios residenciais e comerciais, envolvendo principalmente uma escala de produção industrializada. Conseqüentemente, a utilização desses perfis pode ser apontada como uma excelente solução no combate ao déficit habitacional existente no Brasil.

Esses perfis podem ser utilizados em distintas condições de solicitações em uma estrutura, podendo-se destacar a compressão axial, que será estudada no presente trabalho. Em decorrência da esbelteza tanto da barra quanto dos elementos de chapa constituintes da seção transversal dos PFF, os fenômenos de flambagem (global, local e distorcional) são de particular interesse no dimensionamento à compressão axial desses perfis.

Considerando-se a complexidade dos fenômenos de flambagem envolvidos, distintas formulações são apresentadas em normas técnicas nacionais e internacionais. No Brasil, o dimensionamento dos PFF é regido pela ABNT NBR 14762:2010 (ABNT, 2010) e internacionalmente podem ser destacadas as prescrições do American Iron and Steel Institute (AISI, 2007) e do EUROCODE 3: Part 1-3 (ECS, 2005).

Assim, a adequada utilização dos PFF deve ser feita de forma racional por meio das normas técnicas, com vistas à satisfação de requisitos de segurança, economia e do bom desempenho da estrutura projetada. Entretanto, várias incertezas se fazem presentes no dimensionamento de uma estrutura como, por exemplo, no caso dos PFF, a resistência ao escoamento do aço, o módulo de elasticidade do material, o comprimento das barras, as dimensões dos componentes da seção transversal dos perfis, os efeitos dos carregamentos impostos sobre a estrutura e o modelo de cálculo utilizado. Conseqüentemente, a segurança

somente pode ser estabelecida em termos probabilísticos. Para tal, os conceitos e métodos da confiabilidade estrutural devem ser empregados. Esta metodologia requer então o conhecimento das distribuições de probabilidade da resistência e dos carregamentos.

Assim, no presente trabalho, a descrição probabilística da resistência dos PFF submetidos à compressão axial será obtida. Tal informação se faz necessária para a obtenção dos níveis de confiabilidade resultantes de estruturas projetadas segundo uma determinada norma técnica e a correspondente calibração dessa. Logo, uma etapa fundamental nos procedimentos de análise de confiabilidade é então a definição do modelo a ser utilizado para o cálculo da resistência e o erro do modelo associado ao mesmo. Neste intuito, para a obtenção da distribuição de probabilidade da capacidade resistente dos PFF, torna-se importante o conhecimento das distribuições de probabilidade de todas as incertezas envolvidas no problema, em especial aquela associada ao erro do modelo de análise.

1.6 Apresentação da dissertação

Esta Dissertação é desenvolvida em sete capítulos, a saber:

- No Capítulo 1, Introdução, os PFF são apresentados quanto ao seu emprego, os processos de fabricação, os modos de flambagem (global, local e distorcional) relacionados à compressão axial desses perfis, as principais normas de dimensionamento e as incertezas relacionadas à natureza do problema. São expostos também os objetivos, a metodologia e as justificativas do presente trabalho;
- No Capítulo 2, Cálculo da Força Axial de Compressão Resistente dos PFF, são abordados os principais métodos de dimensionamentos encontrados nas normas técnicas, associados a cada um dos modos de flambagem, e os quatro modelos de cálculo (obtidos a partir da combinação destes métodos) que serão utilizados no cálculo da força axial de compressão resistente dos PFF;

- No Capítulo 3, Fundamentos da Confiabilidade Estrutural, inicialmente são introduzidos os níveis dos métodos de confiabilidade. Na seqüência, é apresentado o problema básico da confiabilidade das estruturas (confiabilidade de componentes) e a confiabilidade de sistemas. Sob a ótica da confiabilidade de sistemas, são identificados os modos de falha associados à resistência dos PFF submetidos à compressão axial;
- No Capítulo 4, Banco de Dados, é criado um acervo técnico com dados obtidos a partir de resultados experimentais disponíveis na literatura, totalizando 212 ensaios de PFF submetidos à compressão axial, cobrindo os distintos modos de flambagem. Esse banco de dados baseia-se em três tipos diferentes de seções transversais: S enrijecido (S_e), U enrijecido (U_e) e U simples (U). Além dos três tipos de seções consideradas, estes perfis também apresentam uma variação nas dimensões nominais de suas seções transversais e de seus comprimentos, sendo provenientes de distintos trabalhos científicos;
- No Capítulo 5, Descrição Estatística das Variáveis Aleatórias, são apresentadas as variáveis aleatórias básicas associadas à resistência dos PFF submetidos à compressão axial. Neste capítulo, ênfase é dada ao estudo da variável erro do modelo, obtida a partir da razão entre a força axial de compressão resistente obtida experimentalmente, $N_{c,Exp}$ (com base no banco de dados do capítulo 4), e a força axial de compressão resistente calculada, $N_{c,Ri}$, segundo cada um dos modelos de cálculo estudados (capítulo 2);
- No Capítulo 6, Descrição Probabilística da Força Axial de Compressão Resistente dos PFF, será obtida a distribuição de probabilidade da força axial de compressão resistente dos PFF via Simulação de Monte Carlo, para cada um dos tipos de seções transversais estudadas (S_e , U_e e U), a partir das variáveis aleatórias básicas listadas no capítulo 5;
- Finalmente, no Capítulo 7, Sumário, Conclusões e Sugestões, é apresentado o sumário, as conclusões desta dissertação e as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Cálculo da Força Axial de Compressão Resistente dos PFF

A seguir são abordadas as formulações associadas ao cálculo da força axial de compressão resistente dos PFF. São apontadas as principais mudanças ocorridas na revisão da norma brasileira ABNT NBR 14762, edições de 2001 e 2010, e os modelos de cálculo avaliados neste trabalho.

2.1 Métodos de dimensionamento

Para a determinação da força axial de compressão resistente dos PFF, são apresentados alguns dos métodos de dimensionamento encontrados na literatura, normalmente encontrados em normas e especificações técnicas.

Com relação à flambagem local, podem ser utilizados na consideração desta o Método da Largura Efetiva (MLE), o Método da Resistência Direta (MRD) e o Método da Seção Efetiva (MSE). Contudo, esse último não será abordado no presente trabalho uma vez que o mesmo ainda não cobre o caso particular dos perfis S enrijecidos, que também serão estudados nesta dissertação.

Referente à flambagem por distorção, esta será abordada por meio do MRD. Este fenômeno é comum em barras constituídas por PFF com enrijecedores de borda simples quando submetidas à compressão.

Para a flambagem global (flambagem por flexão, torção ou flexo-torção) serão abordadas as curvas de dimensionamento do EUROCODE 3 (ECS, 2005a, b) e do American Iron and Steel Institute (AISI, 2007).

2.1.1 O Método da Largura Efetiva (MLE)

Dentre os procedimentos de cálculo prescritos pela ABNT NBR 14762, em suas edições de 2001 e 2010, merecem destaque os conceitos baseados no MLE. Neste, para se considerar a flambagem local numa barra submetida à compressão axial e/ou a flexão, deve-se determinar a largura efetiva dos elementos que compõem a seção transversal do perfil.

O MLE é um método elementar, uma vez que analisa de maneira isolada cada elemento de chapa que compõe a seção transversal do perfil. Este método foi inicialmente proposto por von Kármán para os elementos de chapa perfeitos, isentos de imperfeições iniciais, sendo posteriormente calibrado por Winter para as chapas reais, através de um grande número de ensaios, considerando-se as imperfeições geométricas e do material (Carvalho et al., 2004).

Esse método baseia-se em diminuir a largura dos elementos de chapa que compõem o perfil, quando estes são submetidos total ou parcialmente a tensões de compressão, e calcular as novas propriedades geométricas da seção transversal efetiva. Com isso, as novas propriedades geométricas efetivas do perfil são usadas no dimensionamento, levando-se em conta a força resistente pós-flambagem das chapas e a sua interação com os diferentes tipos de colapso a que uma barra pode estar submetida (flambagem global com a ocorrência prévia da flambagem local; escoamento de partes da seção transversal devido à ocorrência prévia da flambagem local).

Assim, com base na ABNT NBR 14762:2010, a largura efetiva, b_{ef} , de um elemento de chapa que compõe a seção transversal de um perfil submetido à compressão axial é dada por:

$$b_{ef} = \begin{cases} b & \text{para } \lambda_p \leq 0,673 \\ \frac{b}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) & \text{para } \lambda_p > 0,673 \end{cases} \quad (2.1)$$

onde:

b = largura do elemento (correspondente à parte plana);

λ_p = índice de esbeltez reduzido do elemento, definido como:

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95 \sqrt{k E / \sigma}} \quad (2.2)$$

sendo:

t = espessura do elemento;

k = coeficiente de flambagem local do elemento;

E = módulo de elasticidade do aço (200.000 MPa);

σ = tensão normal de compressão ($\sigma = \chi f_y$);

χ = fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global, obtido conforme item 2.1.3.

Neste trabalho, os elementos que constituem a seção transversal de um perfil são classificados como:

- elementos com as duas bordas vinculadas (AA);
- elementos com uma borda vinculada e a outra livre (AL);
- elementos com uma borda vinculada e a outra enrijecida (AE).

A Figura 2.1 ilustra essa classificação para os tipos de elementos que constituem a seção transversal dos PFF.

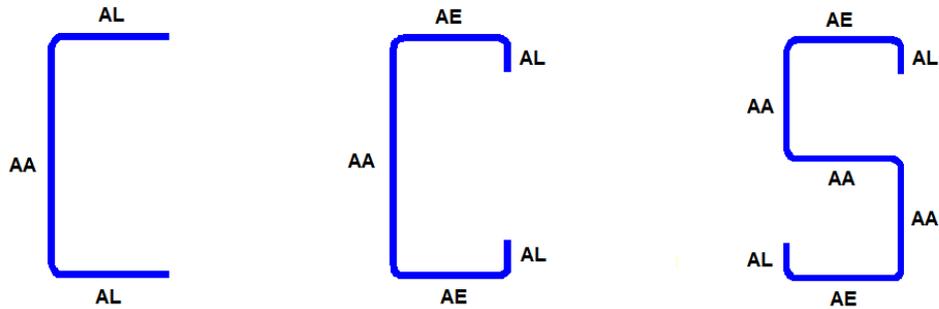


Figura 2.1 – Tipos de elementos componentes da seção transversal dos PFF

Com base nessa classificação, o coeficiente de flambagem local k é dado de forma direta para os elementos AA e AL por:

$$k = \begin{cases} 4,00 & \text{para elementos do tipo AA} \\ 0,43 & \text{para elementos do tipo AL} \end{cases} \quad (2.3)$$

Para o caso dos elementos uniformemente comprimidos com enrijecedor de borda simples (elementos AE), o cálculo do coeficiente de flambagem local k tem como referência o índice de esbeltez reduzido λ_{p0} :

$$\lambda_{p0} = \frac{b/t}{0,623\sqrt{E/\sigma}} \quad (2.4)$$

Sendo que, para $\lambda_{p0} \leq 0,673$:

$$b_{ef} = b \quad (2.5)$$

$$d_s = d_{ef} \quad (2.6)$$

onde:

d_{ef} = largura efetiva do enrijecedor de borda calculada conforme eq. (2.1);

d = largura do enrijecedor de borda (correspondente à parte plana do elemento, b) a ser considerado na eq. (2.1) para o cálculo de d_{ef} ;

d_s = largura efetiva reduzida do enrijecedor a ser adotada no cálculo da seção efetiva.

É importante perceber que para $\lambda_{p0} \leq 0,673$ não ocorre a flambagem local do elemento AE, conforme observado na eq. (2.5), não sendo necessário neste caso o cálculo do coeficiente de flambagem local k para esse elemento.

Para $\lambda_{p0} > 0,673$:

$$I_s = \frac{t d^3}{12} \text{sen}^2 \theta \quad (2.7)$$

$$I_a \leq \begin{cases} 399 t^4 (0,487 \lambda_{p0} - 0,328)^3 \\ t^4 (56 \lambda_{p0} + 5) \end{cases} \quad (2.8)$$

$$I_s / I_a \leq 1 \quad (2.9)$$

$$n \geq \begin{cases} 0,582 - 0,122 \lambda_{p0} \\ 1/3 \end{cases} \quad (2.10)$$

$$k = \begin{cases} 3,57 (I_s / I_a)^n + 0,43 \leq 4 & \text{para } D/b \leq 0,25 \\ (4,82 - 5 D/b) (I_s / I_a)^n + 0,43 \leq 4 & \text{para } 0,25 < D/b \leq 0,8 \end{cases} \quad (2.11)$$

$$d_s = (I_s / I_a) d_{ef} \quad (2.12)$$

onde:

I_s = momento de inércia da seção bruta do enrijecedor de borda, em torno do seu próprio eixo baricêntrico paralelo ao elemento a ser enrijecido (elemento AE);

θ = ângulo formado entre o elemento AE e o enrijecedor de borda (sendo $40^\circ \leq \theta \leq 140^\circ$);

I_a = momento de inércia de referência do enrijecedor de borda;

b = largura do elemento (correspondente à parte plana do elemento AE);

D = dimensão nominal do enrijecedor de borda;

n = expoente empregado no cálculo do coeficiente de flambagem local k .

Assim sendo, a propriedade de interesse no caso das barras submetidas à compressão axial é a área efetiva, A_{ef} , sendo essa obtida por meio do somatório das larguras efetivas dos elementos de chapa que compõem a seção transversal do perfil.

2.1.2 O Método da Resistência Direta (MRD)

Paralelamente ao MLE, o MRD apresenta-se como uma alternativa ao primeiro na determinação da resistência dos PFF submetidos às solicitações de compressão ou flexão (Carvalho et al., 2004). Neste método, a obtenção da força axial de flambagem elástica, correspondente ao modo analisado (global ou local), pode ser feita por meio de métodos analíticos e/ou numéricos (como por exemplo, o Método dos Elementos Finitos ou o Método das Faixas Finitas).

Com base no MRD, o valor da força axial de compressão resistente do perfil, $N_{c,R}$, deve ser tomado como o menor dos três valores $N_{c,Re}$, $N_{c,RI}$ e $N_{c,Rdist}$, definidos a seguir:

1) Flambagem por flexão, por torção ou por flexo-torção

$$N_{c,Re} = \chi A f_y \quad (2.13)$$

onde:

$N_{c,Re}$ = força axial de compressão resistente associado à flambagem global;

A = área bruta da seção transversal da barra;

f_y = resistência ao escoamento do aço;

χ = fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global (obtido conforme item 2.1.3).

Com relação ao fator de redução χ , esse é função da força axial de flambagem global elástica, N_e , tomada como o menor valor entre os modos de instabilidade por flexão, torção ou flexo-torção, dado por:

a) Para perfis com dupla simetria ou simétricos em relação a um ponto

$$N_e \leq \begin{cases} N_{ex} \\ N_{ey} \\ N_{ez} \end{cases} \quad (2.14)$$

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} \quad (2.15)$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} \quad (2.16)$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G J \right] \quad (2.17)$$

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2} \quad (2.18)$$

sendo:

N_{ex} = força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo principal x ;

N_{ey} = força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo principal y ;

N_{ez} = força axial de flambagem global elástica por torção;

I_x = momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo principal x ;
 I_y = momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo principal y ;
 C_w = constante de empenamento da seção;
 J = constante de torção da seção;
 G = módulo de elasticidade transversal do aço (77.000 MPa);
 r_0 = raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção;
 r_x = raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal de inércia x ;
 r_y = raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal de inércia y ;
 x_0 = distância do centro de torção ao centróide na direção do eixo principal x ;
 y_0 = distância do centro de torção ao centróide na direção do eixo principal y ;
 $K_x L_x$ = comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo x ;
 $K_y L_y$ = comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação ao eixo y ;
 $K_z L_z$ = comprimento efetivo de flambagem global por torção;
 K_x = coeficiente de flambagem global por flexão em relação ao eixo x ;
 K_y = coeficiente de flambagem global por flexão em relação ao eixo y ;
 K_z = coeficiente de flambagem global por torção;
 L_x = comprimento da barra destravado na direção y ;
 L_y = comprimento da barra destravado na direção x ;
 L_z = comprimento da barra destravado quanto à rotação em torno de seu eixo longitudinal.

Para o caso de barras isoladas, os valores de K_x e K_y podem ser obtidos da Tabela 2.1. Já os valores de K_z podem ser tomados por:

- 2,0 quando uma das extremidades da barra possui rotação em torno do eixo longitudinal e empenamento livres e, a outra, rotação e empenamento impedidos (ABNT NBR 8800:2008);
- 1,0 quando ambas as extremidades da barra possuem rotação em torno do eixo longitudinal impedida e empenamento livre (ABNT NBR 8800:2008; AISC, 2005b);
- 0,7 quando uma das extremidades da barra possui rotação em torno do eixo longitudinal e empenamento impedidos e, a outra, rotação impedida e empenamento livre (AISC, 2005b);

- 0,5 quando ambas as extremidades da barra possuem rotação em torno do eixo longitudinal e empenamento impedidos (AISC, 2005b).

Tabela 2.1 – Valores para os coeficientes de flambagem global por flexão K_x e K_y
(ABNT NBR 8800:2008; AISC, 2005b)

A forma flambada da barra é mostrada pela linha pontilhada	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Valor teórico de K	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Valor recomendado de K para projeto	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0
Condições de contorno das extremidades	<ul style="list-style-type: none"> Rotação e translação impedidas Rotação livre e translação impedida Rotação impedida e translação livre Rotação e translação livres 					

b) Para perfis monossimétricos (sendo x o eixo de simetria)

$$N_e \leq \begin{cases} N_{ey} \\ N_{exz} \end{cases} \quad (2.19)$$

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_0/r_0)^2]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_0/r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right] \quad (2.20)$$

onde:

N_{exz} = força axial de flambagem global elástica por flexo-torção.

Caso o eixo y seja o eixo de simetria, y deve ser substituído por x e x por y na equação

(2.19). Deve-se também substituir x por y e x_0 por y_0 na equação (2.20).

c) Para perfis assimétricos

A força axial de flambagem global elástica N_e é dada pela menor das raízes positivas da equação cúbica seguinte:

$$r_0^2 (N_e - N_{ex})(N_e - N_{ey})(N_e - N_{ez}) - N_e^2 (N_e - N_{ey})x_0^2 - N_e^2 (N_e - N_{ex})y_0^2 = 0 \quad (2.21)$$

2) Flambagem local da seção

$$N_{c,RI} = \begin{cases} N_{c,Re} & \text{para } \lambda_l \leq 0,776 \\ \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}}\right) \frac{N_{c,Re}}{\lambda_l^{0,8}} & \text{para } \lambda_l > 0,776 \end{cases} \quad (2.22)$$

$$\lambda_l = \sqrt{N_{c,Re}/N_l} \quad (2.23)$$

onde:

$N_{c,RI}$ = força axial de compressão resistente, associado à flambagem local;

$N_{c,Re}$ = força axial de compressão resistente, associado à flambagem global;

N_l = força axial de flambagem local elástica;

λ_l = índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local.

A área efetiva da seção transversal da barra, A_{ef} , pode ser obtida por:

$$A_{ef} = \begin{cases} A & \text{para } \lambda_l \leq 0,776 \\ \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}}\right) \frac{A}{\lambda_l^{0,8}} & \text{para } \lambda_l > 0,776 \end{cases} \quad (2.24)$$

3) Flambagem distorcional da seção

$$N_{c,Rdist} = \begin{cases} A f_y & \text{para } \lambda_{dist} \leq 0,561 \\ \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right) \frac{A f_y}{\lambda_{dist}^{1,2}} & \text{para } \lambda_{dist} > 0,561 \end{cases} \quad (2.25)$$

$$\lambda_{dist} = \sqrt{A f_y / N_{dist}} \quad (2.26)$$

onde:

$N_{c,Rdist}$ = força axial de compressão resistente, associado à flambagem distorcional;

N_{dist} = força axial de flambagem distorcional elástica;

λ_{dist} = índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional.

No presente trabalho, o programa CUFSM 3.12 é utilizado para a obtenção das forças axiais de flambagem local e distorcional elástica (N_l e N_{dist}). Este programa, baseado no Método das Faixas Finitas e Método das Faixas Finitas Restringidas, foi desenvolvido por Benjamin W. Schafer na Johns Hopkins University e encontra-se disponível no site www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm.

Segundo Carvalho et al. (2004), desde 1996, o MRD já vem sendo usado nas normas australiana e neozelandesa para a determinação da resistência à distorção de barras comprimidas e/ou fletidas. Em janeiro de 2004, o American Iron and Steel Institute (AISI) editou o manual *Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members* (AISI, 2004) para o projeto de PFF, utilizando o MRD como uma alternativa ao MLE. Atualmente, o AISI (2007) tem o MRD totalmente incorporado em suas prescrições.

2.1.3 Curvas de dimensionamento para a flambagem global

Os modos de instabilidade globais de uma barra submetida à força axial de compressão (flambagens por flexão, torção ou flexo-torção) são tratados por meio do fator de redução χ . Esse fator pode ser obtido a partir das curvas de dimensionamento apresentadas no EUROCODE 3 (ECS, 2005a,b) e na ABNT NBR 14762:2001, ou no American Iron and Steel Institute (AISI, 2007) e na ABNT NBR 14762:2010 conforme apresentado a seguir.

2.1.3.1 Curvas de dimensionamento do EUROCODE 3 (ECS, 2005a, b) e da ABNT NBR 14762:2001

O fator de redução χ pode ser obtido pela seguinte expressão (ECS, 2005a, b; ABNT, 2001):

$$\chi = \frac{1}{\beta + \sqrt{\beta^2 - \lambda_0^2}} \leq 1,0 \quad (2.27)$$

$$\beta = 0,5 [1 + \alpha(\lambda_0 - 0,2) + \lambda_0^2] \quad (2.28)$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_{ef} f_y}{N_e}} \quad (2.29)$$

onde:

β = parâmetro empregado no cálculo do fator de redução χ (na ABNT NBR 14762:2001, χ é representado por ρ);

λ_0 = índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global;

N_e = força axial de flambagem global elástica, tomada como o menor valor entre os modos de instabilidade por flexão, torção ou flexo-torção (eqs. (2.14) a (2.21));

α = fator de imperfeição inicial.

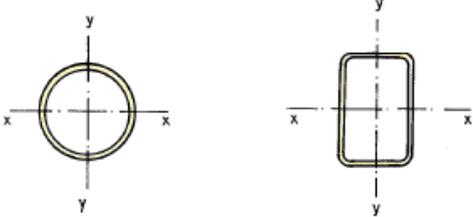
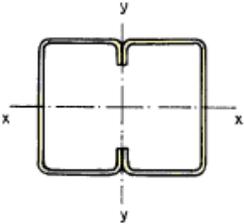
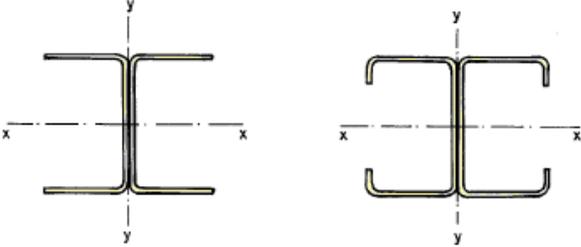
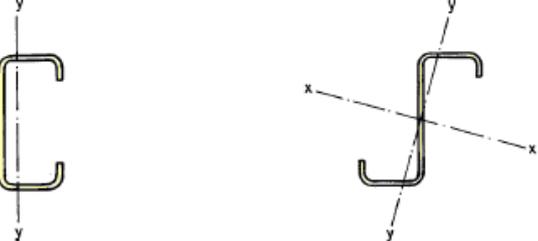
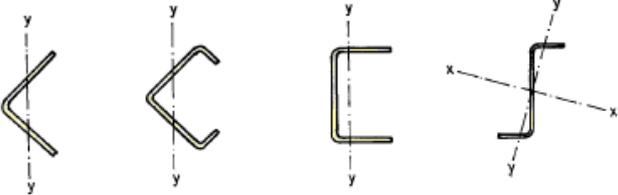
Nos casos de flambagem por flexão, os valores do fator de imperfeição inicial variam de acordo com o tipo de seção e eixo de flambagem, conforme a Tabela 2.2, sendo dados por:

curva a: $\alpha = 0,21$

curva b: $\alpha = 0,34$

curva c: $\alpha = 0,49$

Tabela 2.2 – Classificação das seções e de suas respectivas curvas associadas à flambagem por flexão (ABNT, 2001)

Tipo de seção transversal	Eixos	Curvas
	<p>x-x ou y-y</p>	<p>a</p>
	<p>x-x ou y-y x-x ou y-y</p>	<p>b c</p>
	<p>x-x y-y</p>	<p>a b</p>
	<p>Indicados</p>	<p>b</p>
	<p>Indicados</p>	<p>c</p>
<p>Para demais seções</p>	<p>Aplicáveis</p>	<p>c</p>

Para o caso particular dos perfis S enrijecidos, que também serão abordados no presente trabalho, Santana (1999) obteve a curva de flambagem por flexão destes com o coeficiente de imperfeição α igual a 0,21 (curva a). Este valor será considerado para os perfis deste tipo no presente trabalho.

Com relação aos casos de flambagem por torção ou por flexo-torção, a curva b deverá ser considerada no dimensionamento dos perfis.

Para o cálculo de λ_0 , a área efetiva da seção transversal da barra A_{ef} pode ser tomada igual ao valor da sua área bruta A .

2.1.3.2 Curva de dimensionamento do American Iron and Steel Institute (AISI, 2007) e da ABNT NBR 14762:2010

O fator de redução χ pode ser obtido segundo o American Iron and Steel Institute (AISI, 2007) e a ABNT NBR 14762:2010 pela seguinte expressão:

$$\chi = \begin{cases} 0,658^{\lambda_0^2} & \text{para } \lambda_0 \leq 1,5 \\ \frac{0,877}{\lambda_0^2} & \text{para } \lambda_0 > 1,5 \end{cases} \quad (2.30)$$

$$\lambda_0 = \sqrt{A f_y / N_e} \quad (2.31)$$

onde:

λ_0 = índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global;

A = área bruta da seção transversal da barra;

N_e = força axial de flambagem global elástica, tomada como o menor valor entre os modos de instabilidade por flexão, torção ou flexo-torção (Eqs. (2.14) a (2.21)).

2.2 Principais mudanças na NBR 14762 referentes ao dimensionamento dos PFF submetidos à compressão axial

Dentre as principais alterações ocorridas na revisão da ABNT NBR 14762:2010 em relação a sua versão anterior, de 2001, relacionadas à resistência à compressão dos PFF, destacam-se:

- a incorporação do MRD e do MSE (embora o MSE não seja abordado no presente trabalho) como alternativas ao MLE no tratamento da flambagem local;
- o emprego do MRD no cálculo da resistência à compressão axial quanto à distorção;
- a adoção de uma única curva de dimensionamento, oriunda do AISI (2007), no cálculo dos modos de instabilidade global (flambagem por flexão, torção e flexo-torção) das barras, em substituição às curvas do EUROCODE 3 (ECS, 2005a, b), que variam de acordo com o eixo de flambagem para diferentes seções transversais.

A Fig. 2.2 mostra o comparativo entre as curvas de dimensionamento da ABNT NBR 14762:2001, curvas *a*, *b* e *c* originadas do EUROCODE 3, e a curva única de dimensionamento adotada na ABNT NBR 14762:2010, proveniente do AISI, em função do índice de esbeltez reduzido da barra.

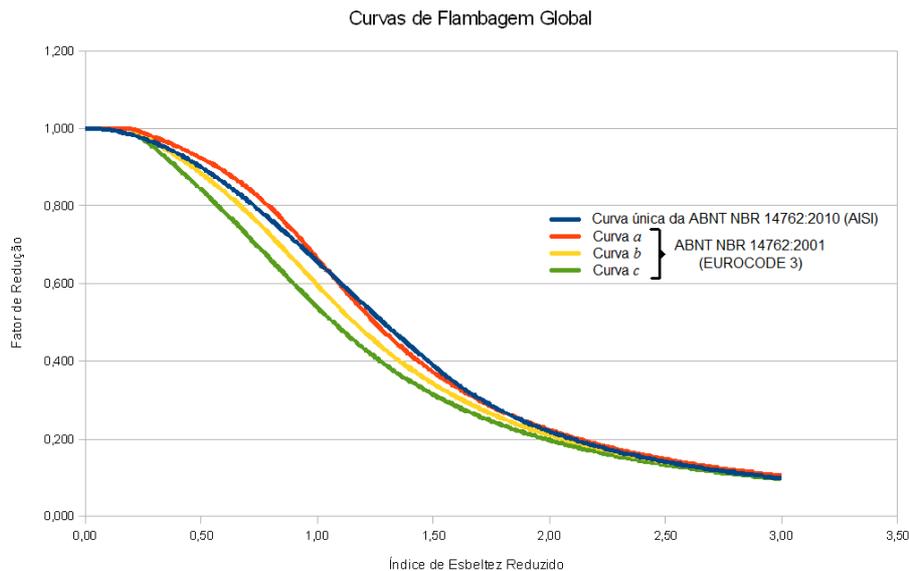


Figura 2.2 – Curvas associadas à flambagem global para barras constituídas por PFF

A partir dos gráficos da Fig. 2.2, observa-se que a curva única de flambagem global apresenta inicialmente um comportamento intermediário entre as curvas *a* e *b*. Posteriormente, a curva única passa a ter um traçado próximo ao da curva *a*. Por fim, à medida que o índice de esbeltez reduzido da barra aumenta, diminuem-se as diferenças entre as curvas de flambagem.

2.3 Modelos de cálculo

No presente trabalho, serão adotados quatro modelos de cálculo baseados nos métodos de dimensionamento apresentados no item 2.1. Esses modelos são empregados no estudo do comportamento estrutural dos PFF submetidos à força axial de compressão. Cada modelo envolve a utilização de um método de cálculo para cada um dos três modos de flambagem considerados, a saber: flambagem local, flambagem distorcional e flambagem global.

Assim, para um dado PFF de interesse, o modelo de cálculo 1 considera no cálculo da força axial de compressão resistente: (i) o MLE para a flambagem local; (ii) as curvas de dimensionamento apresentadas no EUROCODE 3 (ECS, 2005a,b) e na ABNT NBR 14762:2001 para a flambagem global; e (iii) o MRD para a flambagem distorcional.

O modelo de cálculo 2 considera no cálculo da força axial de compressão resistente de um PFF: (i) o MLE para a flambagem local; (ii) a curva de dimensionamento apresentada no American Iron and Steel Institute (AISI, 2007) e na ABNT NBR 14762:2010 para a flambagem global; e (iii) o MRD para a flambagem distorcional.

O modelo de cálculo 3 considera: (i) o MRD para a flambagem local; (ii) as curvas de dimensionamento apresentadas no EUROCODE 3 (ECS, 2005a,b) e na ABNT NBR 14762:2001 para a flambagem global; e (iii) o MRD para a flambagem distorcional.

O modelo de cálculo 4 considera: (i) o MRD para a flambagem local; (ii) a curva de dimensionamento apresentada no American Iron and Steel Institute (AISI, 2007) e na ABNT NBR 14762:2010 para a flambagem global; e (iii) o MRD para a flambagem

distorcional.

A Tabela 2.3 apresenta um resumo dos métodos de dimensionamento empregados em cada modelo de cálculo.

Tabela 2.3: Modelos de cálculo adotados no estudo da força axial de compressão resistente dos PFF e seus respectivos métodos de dimensionamento empregados

MODELO	Flambagem local	Flambagem global	Flambagem Distorcional
1	MLE	Curvas do EUROCODE 3 e da ABNT NBR 14762:2001	MRD
2	MLE	Curva do AISI e da ABNT NBR 14762:2010	MRD
3	MRD	Curvas do EUROCODE 3 e da ABNT NBR 14762:2001	MRD
4	MRD	Curva do AISI e da ABNT NBR 14762:2010	MRD

Para cada modelo considerado, o cálculo da força axial de compressão resistente do perfil, $N_{c,Ri}$ (para $i = 1$ à 4), é dado pela seguinte expressão:

$$N_{c,Ri} \leq \begin{cases} \chi A_{ef} f_y \\ N_{c,Rdist} \end{cases} \quad (\text{para } i = 1, 2, 3 \text{ e } 4) \quad (2.32)$$

onde:

χ = fator de redução da força axial de compressão resistente associado à flambagem global, obtido conforme itens 2.1.3.1 (curvas apresentadas no EUROCODE 3 e na ABNT NBR 14762:2001) ou 2.1.3.2 (curva única apresentada no AISI e na ABNT NBR 14762:2010);

A_{ef} = área efetiva da seção transversal da barra associada à flambagem local do perfil, obtido conforme itens 2.1.1 (MLE) ou 2.1.2 (MRD);

f_y = resistência ao escoamento do aço;

$N_{c,Rdist}$ = força axial de compressão resistente associado à flambagem distorcional, obtido de acordo com o MRD.

A partir da equação 2.32, os correspondentes modos de falha dos PFF submetidos à compressão axial podem se dar por:

- flambagem distorcional ($N_{c,Rdist}$);
- flambagem global da barra ($\chi < 1,00$) com a ocorrência prévia da flambagem local do perfil ($A_{ef} < A$);
- flambagem global da barra ($\chi < 1,00$) sem a ocorrência da flambagem local do perfil ($A_{ef} = A$);
- escoamento da seção transversal ($\chi = 1,00$) com a ocorrência prévia da flambagem local do perfil ($A_{ef} < A$);
- escoamento da seção transversal ($\chi = 1,00$) sem a ocorrência da flambagem local do perfil ($A_{ef} = A$).

Ressalta-se que somente a ocorrência da flambagem local não caracteriza um modo de falha para os PFF, uma vez que estes apresentam uma capacidade resistente pós-flambagem. O que ocorre é uma redução na rigidez dos elementos de chapa que compõem a seção transversal destes perfis.

Assim, com base na Tabela 2.3, a variável aleatória erro do modelo, $e_{m,i}$, é dada pela razão entre a força axial de compressão resistente obtida experimentalmente para um determinado perfil, $N_{c,Exp}$, e a correspondente força axial de compressão resistente calculada, $N_{c,Ri}$ (eq. 2.32), segundo cada um dos modelos utilizados:

$$e_{m,i} = \frac{N_{c,Exp}}{N_{c,Ri}} \quad (\text{para } i = 1, 2, 3 \text{ e } 4) \quad (2.33)$$

No capítulo 4, é criado um banco de dados a partir de resultados experimentais disponíveis na literatura, com valores encontrados para $N_{c,Exp}$ em distintos trabalhos científicos.

2.4 Resumo do capítulo

No presente capítulo foram apresentados os principais métodos de cálculo prescritos pelas normas técnicas brasileira, européia e americana, utilizados para a determinação da força axial de compressão resistente dos PFF. Entre eles, foram vistos o MLE e o MRD associados à flambagem local dos perfis, as curvas de dimensionamento do item 2.1.3 (as curvas apresentadas no EUROCODE 3 e na ABNT NBR 14762:2001; e a curva única apresentada no AISI e na ABNT NBR 14762:2010) para a flambagem global da barra e a aplicação do MRD para o fenômeno da flambagem distorcional.

Em seguida, foram propostos quatro modelos de cálculo (Tabela 2.3), derivados da combinação entre os métodos de dimensionamento apresentados, para a obtenção da força axial de compressão resistente dos PFF, $N_{c,Ri}$ (para $i = 1$ à 4).

Assim, a variável aleatória erro do modelo será obtida, no capítulo 5, a partir da razão entre a força axial de compressão resistente obtida experimentalmente, $N_{c,Exp}$ (encontradas na literatura e agrupadas em um banco de dados no capítulo 4), e a força axial de compressão resistente calculada, $N_{c,Ri}$, segundo cada um dos modelos estudados (equação 2.33).

No próximo capítulo, será visto que os modos de falha correspondentes à força axial de compressão resistente dos PFF são componentes de um sistema, estando a distribuição de probabilidade da resistência destes perfis relacionada a um problema de confiabilidade de sistemas.

Capítulo 3 – Fundamentos da Confiabilidade Estrutural

3.1 Introdução

Um dos principais anseios dos projetos de engenharia é a confiança no desempenho de uma estrutura dentro de um contexto econômico. A realização deste objetivo, contudo, geralmente não é uma tarefa simples. Muitas das decisões que são adotadas durante os processos de planejamento e projeto são tomadas sob condições de incerteza. Portanto, existe sempre uma chance de mau funcionamento ou falha de uma estrutura. Assim, o risco geralmente está implícito em todos os projetos de engenharia.

Sob tais condições, não é possível garantir uma segurança ou performance absoluta em um projeto de engenharia. Para uma estrutura, a sua segurança é claramente uma função do carregamento máximo (ou combinação de carregamentos) que pode ser imposto sobre ela durante seu tempo de vida útil. A segurança estrutural irá depender também dos esforços resistentes (em alguns casos específicos, das tensões resistentes) de seus componentes. Assim sendo, não existe uma garantia absoluta da segurança de uma estrutura. Realisticamente, a segurança somente pode ser trabalhada em termos de probabilidade, na qual é verificada se a capacidade portante de uma estrutura resiste ao maior carregamento imposto sobre ela durante o período de sua vida útil.

Neste processo, as normas técnicas têm evoluído no sentido de oferecer um melhor tratamento de incertezas associadas às variáveis envolvidas em um projeto. Tais normas

vêm passando gradativamente de métodos determinísticos, para métodos semi-probabilísticos e também probabilísticos (Diniz, 2006).

3.2 Níveis dos métodos de confiabilidade

Os métodos de confiabilidade podem ser classificados em seis níveis, de acordo com a quantidade de informação usada e disponível sobre o problema estrutural. Os diversos níveis são citados a seguir (Madsen et al, 1986; Galambos, 1992; Diniz, 2006).

Nível 0 – Métodos que usam o formato das tensões admissíveis. No método das tensões admissíveis todas as cargas são tratadas similarmente e as tensões elásticas são reduzidas por um fator de segurança. Assim, a condição dada pela equação 3.1 deve ser atendida.

$$\sigma \leq \sigma_{adm} \quad ; \quad \sigma_{adm} = \frac{\sigma_{lim}}{cs} \quad (3.1)$$

onde:

σ = tensão obtida pela teoria linear para as cargas máximas que podem ser esperadas durante a vida útil da estrutura;

σ_{adm} = tensão admissível;

σ_{lim} = tensão limite;

cs = coeficiente de segurança.

Nível 1 – Métodos que empregam um valor característico para cada valor “incerto”. Correspondem aos formatos do tipo LRFD (Load and Resistance Factor Design) ou método dos estados limites.

O método dos estados limites também é conhecido como método semi-probabilístico. Em linhas gerais, este método pode ser representado pela equação 3.2.

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i Q_{in} \quad (3.2)$$

onde:

ϕ = fator de minoração da resistência;

R_n = resistência nominal;

γ_i = coeficiente de majoração da i -ésima carga (ou seu efeito);

Q_{in} = valor nominal da i -ésima carga (ou seu efeito).

As normas atuais de projeto de estrutura em PFF seguem o método dos estados limites, ou seja, nível 1. O processo de ajuste dos fatores ϕ e γ_i é conhecido como calibração da norma (Diniz, 2006). Tal procedimento demanda níveis de métodos de confiabilidade mais avançados. Assim, normas e recomendações de projeto desenvolvidas segundo o nível 1 devem ser calibradas a partir de níveis superiores, ou seja, níveis 2, 3, 4 ou 5.

Nível 2 – Métodos do índice de confiabilidade. Estes métodos empregam dois valores para cada parâmetro “incerto” (usualmente a média e variância) e uma medida da correlação entre parâmetros (usualmente covariância). A condição dada pela equação 3.3 deve ser atendida.

$$\beta \geq \beta_{adm} \quad (3.3)$$

onde:

β = índice de confiabilidade (ver item 3.3);

β_{adm} = índice de confiabilidade admissível.

Nível 3 – Métodos que empregam a probabilidade de falha da estrutura ou componente estrutural como medida de sua confiabilidade. A função densidade de probabilidade das variáveis básicas é requerida. A condição dada pela equação 3.4 deve ser respeitada.

$$P_F \leq P_{F adm} \quad (3.4)$$

onde:

P_F = probabilidade de falha;

$P_{F adm}$ = probabilidade de falha admissível.

Nível 4 – Este nível envolve elementos de confiabilidade e otimização (minimizar o custo total ou maximizar o benefício auferido ao longo da vida útil da estrutura). O custo total é dado pela equação 3.5.

$$Custo\ total = c_i + c_{insp} + c_m + \sum P_F c_f \quad (3.5)$$

onde:

c_i = custo inicial;

c_{insp} = custo de inspeção;

c_m = custo de manutenção;

P_F = probabilidade de falha associada ao i -ésimo modo de falha;

c_f = custo associado ao i -ésimo modo de falha.

Nível 5 – Este nível incorpora o conceito do índice de qualidade de vida, conhecido do inglês como “Life Quality Index” (LQI) (Pandeya e Nathwanib, 2004). O índice de qualidade de vida pode ser deduzido rigorosamente a partir de conceitos econômicos e do bem estar humano. Tal índice pode ser utilizado de forma objetiva na determinação de metas nacionais no gerenciamento de riscos e na alocação de recursos escassos na mitigação de riscos (Azevedo, 2011).

3.3 O problema básico da confiabilidade estrutural

O problema básico da confiabilidade estrutural pode ser expresso essencialmente como um problema de oferta versus demanda. Ao se considerar a segurança de uma estrutura, tem-se interesse em assegurar que a sua resistência (oferta) é suficiente para suportar ao máximo carregamento aplicado ao longo de sua vida útil (demanda).

Em confiabilidade, a determinação da oferta, assim como a determinação da demanda máxima, não são tarefas simples. Com o objetivo de representar o significado desta incerteza, a avaliação da oferta e demanda pode ser modelada como variáveis aleatórias:

$$X = \text{oferta (resistência)}$$

$$Y = \text{demanda (solicitação)}$$

O objetivo de uma análise de confiabilidade é assegurar o evento $(X > Y)$ durante o tempo de vida útil, ou algum tempo específico, de um sistema de engenharia. Esta garantia somente é possível em termos de uma probabilidade dada por $P(X > Y)$. Esta probabilidade, portanto, representa uma medida mais realista do sistema. De forma inversa, a probabilidade do evento complementar $(X < Y)$ é a correspondente medida de falha.

Assumindo que as distribuições de probabilidade de X e Y são conhecidas, a probabilidade condicional de falha do sistema pode ser dada por:

$$p_F = P(X < Y) = \sum_{p/\text{todo } y} P(X < Y | Y = y) P(Y = y) \quad (3.6)$$

Para o caso de X e Y serem estatisticamente independentes, tem-se que:

$$P(X < Y | Y = y) = P(X < y) \quad (3.7)$$

$$p_F = \sum_{p/\text{todo } y} P(X < y) P(Y = y) \quad (3.8)$$

Sendo X e Y duas variáveis aleatórias contínuas e estatisticamente independentes, tem-se:

$$p_F = \int_0^{\infty} F_X(y) f_Y(y) dy \quad (3.9)$$

onde:

F_X = função de distribuição acumulada da variável X ;

f_y = função densidade de probabilidade (FDP) da variável Y .

A equação 3.9 é conhecida como convolução em relação a y e pode ser explicada a partir da Figura 3.1. Se $Y = y$, a probabilidade condicional de falha é $F_X(y)$. Entretanto, em termos de variáveis contínuas, a probabilidade de que Y esteja no intervalo y e $y + dy$ é igual à parcela $f_y(y) dy$. Assim, para o cálculo de p_F , a probabilidade condicional $F_X(y)$ deve ser ponderada por $f_y(y) dy$ e integrada para todos os valores de Y .

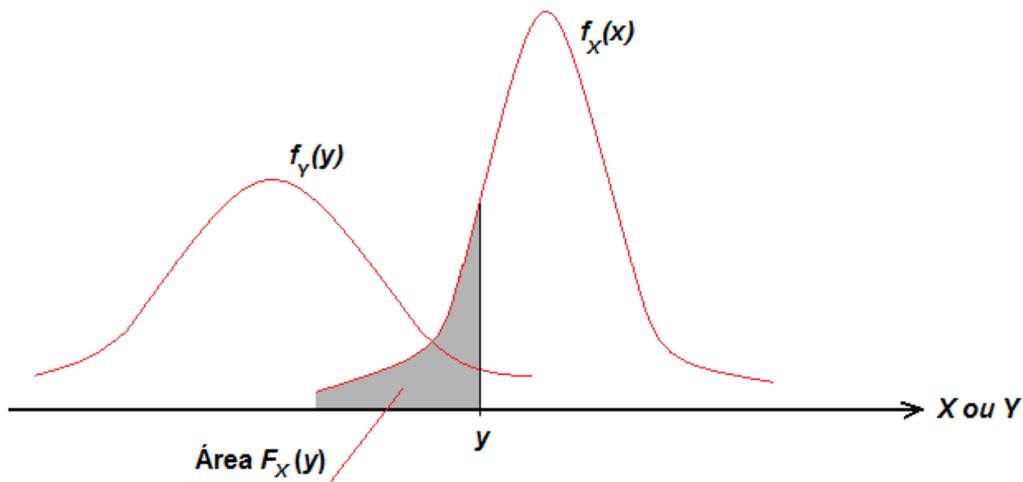


Figura 3.1 – Funções densidade de probabilidade de $f_X(x)$ e $f_Y(y)$

Outra forma de se trabalhar com problemas do tipo oferta-demanda pode ser através da formulação da margem de segurança, $M = X - Y$. Como X e Y são variáveis aleatórias, M também será uma variável aleatória com uma distribuição de probabilidade dada por $f_M(m)$. Neste caso, a falha é dada pela ocorrência do evento ($M < 0$), e a probabilidade de falha é dada por:

$$p_F = \int_{-\infty}^0 f_M(m) dm = F_M(0) \quad (3.10)$$

Graficamente, a probabilidade de falha p_F pode ser representada pela área sombreada ilustrada na Figura 3.2.

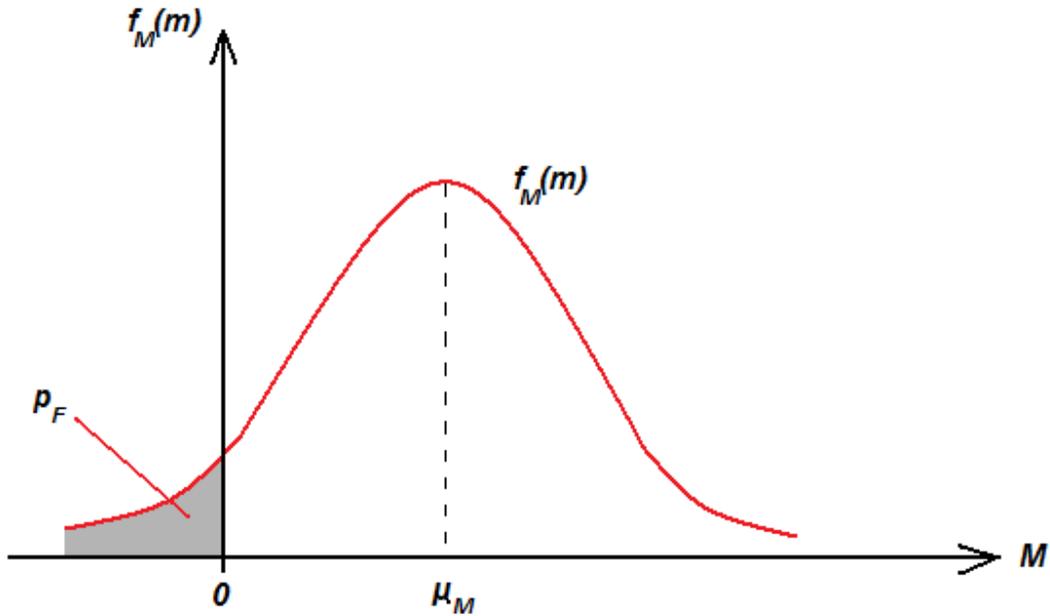


Figura 3.2 – FDP da margem de segurança M

No caso de uma estrutura cuja resistência (capacidade portante), R , e o carregamento, Q , são variáveis aleatórias normais, isto é, respectivamente $N(\mu_R, \sigma_R)$ e $N(\mu_Q, \sigma_Q)$, a distribuição de probabilidade da margem de segurança $M = R - Q$ também será normal $N(\mu_M, \sigma_M)$. Tem-se então que:

$$\mu_M = \mu_R - \mu_Q \quad (3.11)$$

e para R e Q sendo estatisticamente independentes:

$$\sigma_M^2 = \sigma_R^2 + \sigma_Q^2 \quad (3.12)$$

Uma vez que $(M - \mu_M)/\sigma_M$ equivale a $N(0,1)$, obtém-se:

$$p_F = P(M < 0) = \Phi\left(\frac{0 - \mu_M}{\sigma_M}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_M}{\sigma_M}\right) \quad (3.13)$$

$$p_S = 1 - p_F = \Phi\left(\frac{\mu_M}{\sigma_M}\right) \quad (3.14)$$

onde:

Φ = função de distribuição acumulada da variável normal padrão $N(0,1)$.

Pode ser observado que a confiabilidade é uma função da razão μ_M / σ_M , que é também conhecida como índice de confiabilidade ou índice de segurança, denotado por β . Assim sendo, tem-se que:

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} = \frac{\mu_R - \mu_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \quad (3.15)$$

A probabilidade de segurança pode então ser reescrita como:

$$p_S = \Phi(\beta) \quad (3.16)$$

e a correspondente probabilidade de falha é dada por:

$$p_F = 1 - \Phi(\beta) = \Phi(-\beta) \quad (3.17)$$

No caso das variáveis aleatórias normais R e Q , a relação quantitativa entre a probabilidade de falha p_F e o índice de confiabilidade β é dada através da Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Relação quantitativa entre p_F e β

p_F	β
0,50	0
0,25	0,67
0,16	1,00
0,10	1,28
0,05	1,65
0,01	2,33
10^{-3}	3,10
10^{-4}	3,72
10^{-5}	4,25
10^{-6}	4,75

Isto ilustra o fato de que o nível de confiabilidade é uma função tanto da posição relativa de $f_R(r)$ e $f_Q(q)$, por meio do valor médio da margem de segurança, $\mu_M = \mu_R - \mu_Q$, e do grau de dispersão de M , $\sigma_M = (\sigma_R^2 + \sigma_Q^2)^{1/2}$. Assim, uma quantidade que inclui todos estes efeitos é o índice de confiabilidade β .

Neste contexto, se as informações disponíveis sobre as incertezas associadas às variáveis aleatórias se limitarem à média e ao desvio padrão destas variáveis (e do coeficiente de variação, no caso de dependência estatística), o método de análise de confiabilidade de primeira ordem e segundo momento (First Order Second Moment, FOSM) pode ser empregado (Ang e Tang, 1990).

No caso mais geral, resistência e efeito do carregamento são funções de várias variáveis aleatórias, denominadas variáveis básicas de projeto, X_i , e o problema deve ser formulado em termos das variáveis básicas. Para cada conjunto de valores destas variáveis é preciso definir se a estrutura falhou ou não. Para se definir o estado da estrutura, uma função de desempenho é usada:

$$g(\mathbf{X}) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (3.18)$$

onde:

$\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ é o vetor das variáveis básicas.

O desempenho limite pode ser definido como $g(\mathbf{X}) = 0$; segue, portanto, que $[g(\mathbf{X}) > 0]$ é o estado de segurança e $[g(\mathbf{X}) < 0]$ é o estado de falha. Geometricamente, a equação do estado limite, $g(\mathbf{X}) = 0$, é uma superfície n -dimensional denominada “superfície de falha”.

Considerando-se um problema definido por n variáveis básicas estatisticamente independentes, então as variáveis reduzidas são representadas por:

$$X'_i = \frac{X_i - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}} \quad (\text{para } i = 1, 2, \dots, n) \quad (3.19)$$

A Figura 3.3 apresenta o estado de segurança e o estado de falha no espaço das variáveis reduzidas X'_1 e X'_2 (ou seja, $n = 2$).

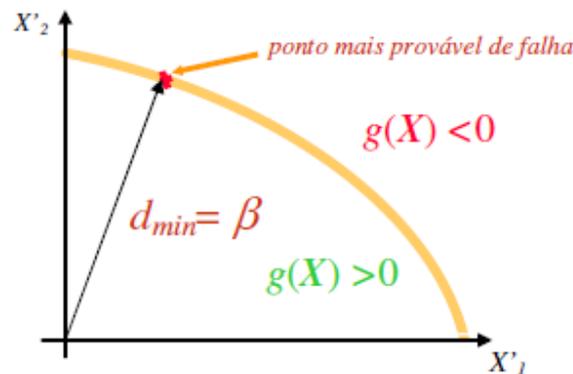


Figura 3.3 – Definição geométrica do índice de confiabilidade

De posse das estatísticas das variáveis básicas e da correspondente função de desempenho, o índice de confiabilidade, β , pode ser calculado. No FOSM, o índice de confiabilidade representa a menor distância do ponto mais provável de falha (ou ponto de projeto) à origem no sistema das variáveis reduzidas (Figura 3.3). No caso mais geral, a definição do ponto mais provável de falha e o cálculo do índice de confiabilidade correspondente demandam a utilização de procedimentos iterativos largamente documentados na literatura pertinente à Confiabilidade Estrutural (Ang e Tang, 1990; Melchers, 1999).

No caso em que as distribuições de probabilidade requeridas são conhecidas, a probabilidade de falha, p_f , pode ser calculada via método de confiabilidade de primeira ordem (First Order Reliability Method, FORM) ou através da Simulação de Monte Carlo. Para variáveis que seguem distribuições normais, a relação entre a probabilidade de falha, p_f , e o índice de confiabilidade, β , é dada pela equação 3.17. Para outros tipos de distribuição, funções normais equivalentes devem ser utilizadas.

3.4 Confiabilidade de sistemas

O problema básico da confiabilidade estrutural apresentado no item anterior está associado ao problema da confiabilidade de componentes, ou seja, um único modo de falha e uma única condição de carregamento são considerados. Problemas de engenharia, contudo, frequentemente envolvem múltiplos modos de falha; isto é, podem existir vários modos de falha, nos quais a ocorrência da falha de um ou mais componentes constituirá a falha do sistema. Por exemplo, um elemento estrutural pode falhar por flexão, ou cisalhamento, ou flambagem, ou uma combinação destes. Para um sistema estrutural multicomponente, falhas de diferentes componentes podem constituir diferentes modos de falha.

Neste intuito, um sistema estrutural pode ser classificado em: sistemas em série, sistemas em paralelo ou um sistema misto, ou seja, uma combinação dos dois primeiros.

Um sistema estrutural em série é composto por componentes nos quais sua falha implica na falha do todo. Cada componente estrutural é relacionado a um modo de falha. Ou seja, um sistema estrutural apresenta vários modos de falha os quais são os componentes deste sistema. Neste intuito, um sistema pode ser composto de vários subsistemas e assim sucessivamente. Assim, a falha em um componente do subsistema menor implicará na falha de todo o sistema maior. Ao contrário do observado anteriormente, num sistema em paralelo a falha em um componente nem sempre significa a falha do sistema devido às redundâncias presentes neste tipo de sistema (Ang e Tang, 1990).

Assim, para um sistema em série, a confiabilidade ou segurança deste requer que nenhum dos componentes falhe. Considere um sistema com k múltiplos modos de falha. Os diferentes modos de falha terão diferentes funções de desempenho. Suponha que as respectivas funções de desempenho podem ser representadas por:

$$g_j(X) = g_j(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad ; \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (3.20)$$

Tal que o evento falha individual será:

$$E_j = [g_j(X) < 0] \quad (3.21)$$

E o complemento de E_j será o evento sobrevivência:

$$\overline{E}_j = [g_j(X) > 0] \quad (3.22)$$

A segurança do sistema será então o evento no qual nenhum dos k múltiplos modos de falha ocorrem:

$$\overline{E} = \overline{E}_1 \cap \overline{E}_2 \cap \dots \cap \overline{E}_k \quad (3.23)$$

Inversamente, o evento de falha do sistema será:

$$E = E_1 \cup E_2 \cup \dots \cup E_k \quad (3.24)$$

3.5 Simulação de Monte Carlo (SMC)

A Simulação de Monte Carlo (SMC) pode ser utilizada tanto para problemas de análise de confiabilidade de componentes quanto para sistemas estruturais. No presente trabalho, a SMC será empregada na obtenção da distribuição de probabilidade da força axial de compressão resistente dos PFF.

Simulação é o processo de reprodução do mundo real baseado em um conjunto de hipóteses e modelos concebidos da realidade. Este processo pode ser realizado de forma teórica ou experimental. Uma simulação teórica é normalmente realizada de forma numérica, tendo esta se tornado uma ferramenta muito mais prática com o desenvolvimento dos computadores. Assim, como acontecem com os métodos experimentais, as simulações numéricas podem ser usadas para a obtenção de dados que representem informações do mundo real (Ang e Tang, 1990).

Para os propósitos de engenharia, uma simulação pode ser aplicada para prever ou estudar o desempenho e a resposta de um sistema. A partir de um conjunto de valores prescritos para os parâmetros deste sistema (ou variáveis de projeto), o processo de simulação produz uma medida específica de desempenho ou resposta para este. Por meio de repetidas simulações, a sensibilidade dos resultados obtidos pode ser examinada ou avaliada por meio da variação dos parâmetros do sistema. Este procedimento pode ser usado para definir alternativas de projeto (Ang e Tang, 1990).

Em problemas envolvendo variáveis aleatórias com distribuições de probabilidade conhecidas (ou presumidas), a SMC apresenta-se como uma alternativa. Esta envolve um processo repetitivo de simulações, usando em cada simulação um conjunto particular de valores para as variáveis aleatórias, que são gerados de acordo com as correspondentes distribuições de probabilidade destas. Repetindo-se o processo, uma amostra de resultados, cada uma correspondendo a um conjunto diferente de valores para as variáveis aleatórias, é obtida. Uma amostra obtida via SMC é similar a uma amostra de observações experimentais. Logo, os resultados da SMC podem ser tratados estatisticamente e apresentados na forma de histogramas, sendo também aplicáveis em métodos de estimativa e inferência estatísticas (Ang e Tang, 1990).

Um procedimento de grande importância na SMC é a geração de números aleatórios correspondentes às distribuições de probabilidade prescritas das variáveis de projeto. O fornecimento automático de números aleatórios segundo uma distribuição de probabilidade

específica pode ser feito a partir de números aleatórios uniformemente distribuídos obtidos entre 0 e 1. Muitos programas computacionais são capazes de gerar estes números aleatórios segundo uma distribuição uniforme de probabilidade a partir de um número arbitrário denominado semente. Para cada valor da semente, é gerado um conjunto de números aleatórios. Dependendo do tamanho do conjunto gerado, os números obtidos podem ser repetidos – por isso são denominados mais apropriadamente de números pseudo-aleatórios. Entretanto, a repetição usualmente inicia-se somente após a geração de uma grande quantidade de números, da ordem de 10^9 , valor bastante superior ao que se necessita na prática.

Na etapa seguinte, os números aleatórios com distribuição uniforme, u_i , são transformados em outros, x_i , segundo uma distribuição de probabilidade especificada. Para tal, a função de distribuição acumulada correspondente a u_i , $F_U(u)$, é equiparada com a função de distribuição acumulada relacionada a x_i , $F_X(x)$. Esta técnica é conhecida como o método da transformação inversa. Assim, se (u_1, u_2, \dots, u_n) é um conjunto de valores de U , o conjunto correspondente de números aleatórios para X é dado por:

$$x_i = F_X^{-1}(u_i) \quad (\text{para } i = 1, 2, \dots, n) \quad (3.25)$$

A Figura 3.4 ilustra de forma didática o método da transformação inversa.

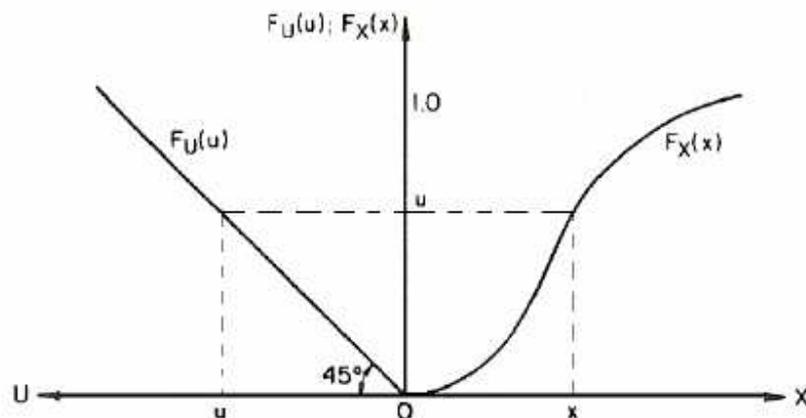


Figura 3.4 – Relação entre u_i e x_i

Atualmente, programas como o Excel e o MatLab, por exemplo, oferecem funções específicas para a geração de números aleatórios segundo diversos tipos de distribuições de probabilidade. A disponibilidade de tais funções facilitam em muito a implementação de procedimentos relativos à SMC. Para maiores detalhes recomenda-se a consulta à documentação pertinente a tais programas.

Para a realização da SMC são necessários:

- a relação determinística que descreve a resposta do sistema de interesse;
- a descrição probabilística de todas as variáveis básicas pertencentes a este sistema.

A utilização da SMC numa avaliação de desempenho estrutural pode ser feita para:

- calcular as estatísticas (média, desvio padrão e tipo de distribuição) da resposta do sistema. Neste caso, inicialmente uma amostra da resposta da estrutura é obtida, e na sequência uma distribuição é ajustada a esta amostra e os parâmetros correspondentes são estimados;
- calcular a probabilidade de desempenho insatisfatório (probabilidade de falha). Neste caso uma função de desempenho é estabelecida e uma amostra dos possíveis cenários (falha ou sobrevivência) é obtida. O número de desempenhos insatisfatórios é contado e a probabilidade de falha é calculada como a taxa de desempenhos insatisfatórios, ou seja, o número de desempenhos insatisfatórios dividido pelo número de simulações.

Geralmente as soluções obtidas através da SMC não são exatas (a menos que o tamanho da amostra seja infinitamente grande). Por se tratar de uma técnica de amostragem, ela está sujeita a erros amostrais. Portanto, para que seus resultados sejam mais precisos e confiáveis é necessária a utilização de amostras com um grande número de elementos. Em contra partida, quando se tem problemas envolvendo tratamentos matemáticos complexos

relacionados às variáveis aleatórias básicas, em que uma solução exata se mostra impraticável por meio dos métodos FOSM e FORM, a SMC se apresenta como uma solução simples e atraente.

Assim, a SMC é frequentemente usada para estimar a probabilidade de falha de um sistema. Logo, torna-se importante conhecer o erro associado ao tamanho da amostra (número de simulações). Para tal, o erro percentual da probabilidade de falha é dado por (Haldar e Mahadevan, 2000):

$$\varepsilon \% = 200\% \sqrt{\frac{1 - p_F}{n p_F}} \quad (3.26)$$

onde:

p_F = probabilidade de falha estimada;

n = tamanho da amostra.

Supondo que em 10.000 simulações foi obtida uma probabilidade de falha igual a 0,01, para esta probabilidade de falha a equação 3.26 fornece um erro percentual de 20%, isto é, a probabilidade de falha está compreendida no intervalo $0,01 \pm 0,002$. Se for desejado um intervalo mais estreito, por exemplo, $0,01 \pm 0,001$, a operação inversa deve ser efetuada resultando em n igual a 39.600 simulações.

3.6 Resumo do capítulo

Neste capítulo, foi visto que muitas das decisões que são adotadas durante a elaboração de um projeto são tomadas sob condições de incerteza; portanto, existe sempre uma chance de falha da estrutura. Em função deste caráter probabilístico, estudos de confiabilidade se fazem necessários.

Logo, o problema básico da confiabilidade estrutural é o de garantir que a resistência R de uma estrutura seja superior ao carregamento S (ou efeito de carregamento) que atua sobre

ela durante o período de sua vida útil. Contudo, devido à natureza aleatória da resistência dos componentes dessa estrutura e do seu carregamento, a confiabilidade somente pode ser estabelecida em termos probabilísticos, ou seja, em termos da probabilidade de sobrevivência $P(R > S)$ ou da probabilidade de falha $P(R < S)$. Neste propósito, o conhecimento das distribuições de probabilidade da resistência dos PFF, um dos principais objetivos do presente trabalho, torna-se necessário para estudos de confiabilidade estrutural e de calibração de normas técnicas. Assim, uma etapa fundamental nos procedimentos de análise de confiabilidade é então a definição do modelo a ser utilizado para o cálculo da resistência e o erro do modelo associado ao mesmo.

Com relação aos métodos de confiabilidade, estes podem ser classificados em seis níveis, de acordo com a quantidade de informação usada e disponível sobre o problema estrutural. Neste processo, as normas técnicas têm evoluído no sentido de oferecer um melhor tratamento de incertezas associadas às variáveis envolvidas em um projeto. Tais normas vêm passando gradativamente de métodos determinísticos (nível 0) para métodos semi-probabilísticos (nível 1), sendo calibradas a partir de métodos probabilísticos (níveis de 2 a 5).

Contudo, problemas de engenharia frequentemente envolvem múltiplos modos de falha; isto é, podem existir vários modos de falha, nos quais a ocorrência de um destes modos constituirá a falha do sistema. Neste intuito, um sistema estrutural pode ser classificado em: sistemas em série, sistemas em paralelo ou um sistema misto, ou seja, uma combinação dos dois primeiros.

Assim, conforme apresentado no capítulo 2, os possíveis modos de falha associados à compressão axial dos PFF são:

- flambagem distorcional;
- flambagem global da barra com a ocorrência prévia da flambagem local do perfil;
- flambagem global da barra sem a ocorrência da flambagem local do perfil;
- escoamento da seção transversal com a ocorrência prévia da flambagem local do perfil;
- escoamento da seção transversal sem a ocorrência da flambagem local do perfil.

Com exceção do primeiro modo de falha apresentado, flambagem por distorção, percebe-se que os demais são uma combinação entre a flambagem local, global e o escoamento da seção transversal do perfil. Logo, a ocorrência de qualquer um destes modos de falha acarreta na falha de todo o sistema (colapso do perfil quando submetido à compressão axial), caracterizando em princípio um sistema estrutural em série. Contudo, em paralelo, somente a ocorrência da flambagem local não representa um modo de falha componente do sistema, uma vez que os elementos de chapa que compõem a seção transversal destes perfis possuem uma capacidade resistente pós-flambagem. Consequentemente, tem-se para o problema da força axial de compressão resistente dos PFF um sistema misto (Figura 3.5).

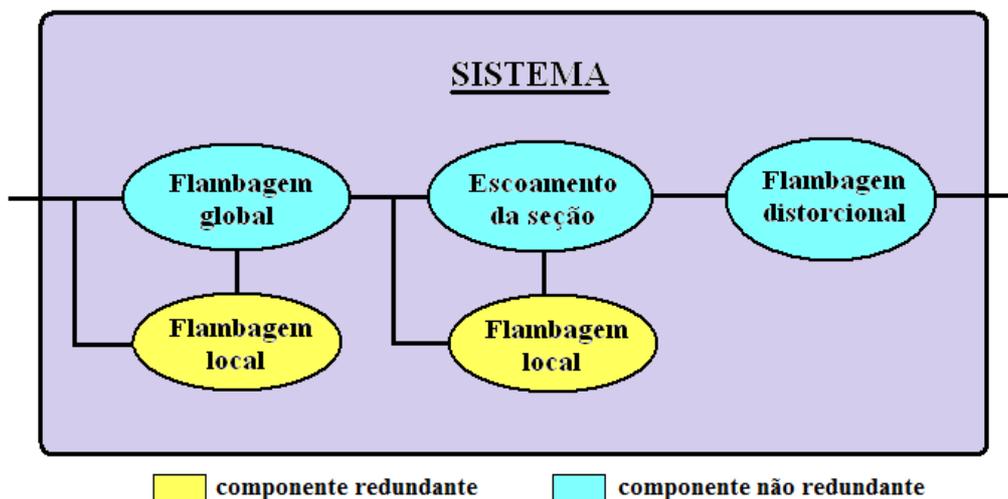


Figura 3.5 – Caracterização da força axial de compressão resistente como um sistema misto

Assim, a variável aleatória erro do modelo será obtida no presente trabalho em função da falha do sistema, ou seja, considerando a interação existente entre os modos de falha relacionados à resistência à compressão axial dos PFF. Em trabalhos futuros, sugere-se a investigação desta variável de forma isolada, para cada modo de falha componente deste sistema.

Capítulo 4 – Banco de Dados

A seguir são apresentados os resultados experimentais de ensaios de PFF submetidos à compressão axial centrada, encontrados na literatura a partir de pesquisas de diferentes autores. São levantadas informações sobre as dimensões da seção transversal desses perfis, comprimento da barra, resistência ao escoamento do aço e a força axial de compressão resistente obtida experimentalmente em cada ensaio.

4.1 Apresentação dos trabalhos encontrados na literatura

A partir dos resultados experimentais encontrados na literatura, o presente estudo sobre a resistência estrutural dos PFF submetidos à compressão axial baseou-se em três tipos de seções transversais distintas: S enrijecido (Se), U enrijecido (Ue) e U simples (U).

Além dos três tipos de perfis considerados, estes também apresentam variação nas dimensões nominais de suas seções transversais e de seus comprimentos, sendo provenientes de distintos trabalhos científicos.

A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos ensaios obtidos na literatura, onde são divulgados os autores de cada experimento, a identificação e a quantidade dos perfis ensaiados.

Tabela 4.1 – Resumo dos ensaios encontrados na literatura

Seção	Autor	Identificação dos perfis estudados	Quantidade
Se	Campos (1999)	M3/P3, M5/P5, M6/P18, M7/P14	4
	Santana (1999)	P1B, P1C, P1D, P1E, P1F, P1G, P1H, P1I, P1J, P2A, P2B, P2C, P2D, P2E, P2F, P2G, P2H, P2I, P2J, P3B, P3C, P3D, P3E, P3F, P3G, P3H, P3I, P3J, P3K, P3L, P3M, P3N, P3O, P4B, P4C, P4D, P4E, P4F, P4G, P4H, P4I, P4J, P4K, P4L, P4M, P4N, P4O, P5B, P5C, P5D, P5E, P5F, P5G, P5H, P5I, P5J, P5L, P5M, P5N, P5O	60
Ue	Thomasson (1978)	A71, A74, A75, A76, A101, A102, A103, A104, A151, A152, A153, A154, A155, A156	14
	Batista (1988)	C4, C6, C10-1, C10-2, C10-3, C24, C29, C34, C37B, C41, C43, C45, C47-1, C47-2, C47-3, C47-4, C47-5, C47-7, C47-8, C49, C53, C57, C64B, C67A, C76, C78, C82, C80-1, C80-2, C80-3, C84B, C86B-3, C86B-4, C88B, C3, C5, C9-1, C9-2, C21, C22, C23, C25, C26, C27, C28, C33, C35, C36, C37, C37A, C40, C42, C44, C48, C46-1, C46-2, C46-4, C46-5, C46-6, C46-7, C50, C51, C52, C54, C55, C63, C64, C64A, C65, C66, C67, C75, C77, C79-1, C79-2, C81, C83, C84, C84A, C85, C86, C86A, C87, C88, C88A	85
U	Batista (1988)	U13, U15-1, U15-2, U15-3, U15-4, U15-5, U15-6, U15-7, U15-8, U18, U22, U24, U26, U29, U33, U35, U37-1, U37-2, U37-3, U40, U44, U12, U16, U14-1, U14-2, U14-3, U14-4, U14-5, U14-6, U14-7, U14-8, U17, U19, U21, U23, U25, U27, U28, U30, U31, U32, U34, U36-1, U36-2, U38, U39, U41, U42, U43	49
Total			212

Nesta pesquisa, procurou-se obter o maior número de experimentos encontrados na literatura a fim de minimizar o erro amostral. Posteriormente, outros resultados de ensaio poderão vir a complementar o banco de dados compilado no presente trabalho, inclusive com outros tipos de seções transversais, no intuito de aumentar o tamanho da atual amostra.

Alternativamente, considerações estatísticas podem ser implementadas no sentido da obtenção dos erros associados à estimativa dos parâmetros descritivos da variável $e_{m,i}$ (Ang e Tang, 1975). Entretanto, o presente trabalho limita-se apenas ao tratamento das incertezas associadas aos modelos de predição da resistência à compressão axial dos PFF.

A Figura 4.1 apresenta as dimensões de referência das seções transversais estudadas (U, U_e e S_e), as quais serão abordadas a seguir.

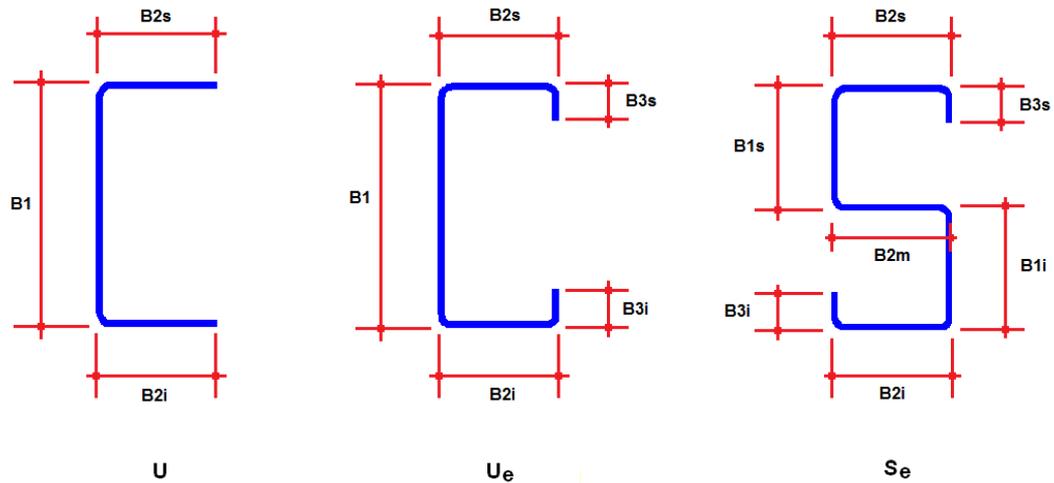


Figura 4.1 – Dimensões de referência das seções transversais estudadas

4.2 Resultados experimentais obtidos para perfis U

Os resultados experimentais encontrados para perfis do tipo U submetidos à compressão axial baseiam-se no trabalho de Batista (1988). Foi obtido um total de 49 ensaios de sua tese de doutorado.

A Tabela 4.2 apresenta as dimensões nominais desses perfis e as dimensões medidas pelo autor (tendo como referência a Fig. 4.1), o comprimento real das barras, L , e a força axial de compressão resistente obtida experimentalmente, $N_{c,Exp}$.

Tabela 4.2 – Dados obtidos dos ensaios de Batista (1988) para perfis U

Perfil	Valores nominais (mm)			Valores medidos (mm)				L (m)	N _{c,Exp} (kN)
	B ₁	B ₂	t	B ₁	B _{2s}	B _{2i}	t		
U13	37	19	2	37,0	19,0	19,0	2,07	0,070	65,0
U15-1	75	38	2	75,0	38,0	38,0	2,04	0,100	111,0
U15-2	75	38	2	75,0	37,0	37,0	2,04	0,098	102,0
U15-3	75	38	2	75,0	38,0	38,0	2,04	0,100	102,0
U15-4	75	38	2	75,0	38,0	38,0	2,02	0,098	109,0
U15-5	75	38	2	75,0	38,0	38,0	2,02	0,100	104,0
U15-6	75	38	2	75,0	38,0	38,0	2,02	0,100	92,0
U15-7	75	38	2	75,0	38,0	38,0	2,02	0,100	90,0
U15-8	75	38	2	75,0	38,0	38,0	2,02	0,100	105,0
U18	93	47	2	94,0	47,0	47,0	2,04	0,250	100,0
U22	112	56	2	113,0	55,0	55,0	2,05	0,298	107,0
U24	50	40	4	52,0	39,0	39,0	3,97	0,152	209,0
U26	50	40	2	50,0	40,0	40,0	2,02	0,274	81,0
U29	65	50	2	63,0	51,0	51,0	2,08	0,240	102,0
U33	75	60	2	76,0	60,0	60,0	2,06	0,399	109,0
U35	41	41	4	42,0	40,0	40,0	3,99	0,153	190,0
U37-1	41	41	2	41,0	41,0	41,0	2,06	0,173	88,0
U37-2	41	41	2	41,0	41,0	41,0	2,04	0,173	80,0
U37-3	41	41	2	42,0	41,0	41,0	2,02	0,173	76,0
U40	51	51	2	51,0	51,0	51,0	2,04	0,224	93,0
U44	62	62	2	64,0	62,0	62,0	2,05	0,413	97,0
U12	37	19	2	37,0	19,0	19,0	2,07	0,352	51,0
U14-1	75	38	2	75,0	38,0	38,0	2,03	0,813	98,0
U14-2	75	38	2	75,0	38,0	38,0	2,03	0,813	97,0
U14-3	75	38	2	75,0	38,0	38,0	2,03	0,813	89,0
U14-4	75	38	2	75,0	38,0	38,0	2,03	0,813	98,0
U14-5	75	38	2	75,0	38,0	38,0	2,03	0,813	87,0
U14-6	75	38	2	75,0	38,0	38,0	2,03	0,813	90,0
U14-7	75	38	2	75,0	38,0	38,0	2,03	0,813	93,0
U14-8	75	38	2	75,0	38,0	38,0	2,03	0,813	92,0
U16	93	47	2	94,0	47,0	47,0	2,04	1,002	97,0
U17	93	47	2	94,0	47,0	47,0	2,04	1,252	87,0
U19	112	56	2	113,0	55,0	55,0	2,05	1,209	87,0
U21	112	56	2	113,0	55,0	55,0	2,05	1,814	81,0
U23	50	40	4	52,0	39,0	39,0	3,97	0,752	133,0
U25	50	40	2	50,0	40,0	40,0	2,02	0,854	68,0
U27	65	50	2	63,0	51,0	51,0	2,08	1,092	84,0
U28	65	50	2	63,0	51,0	51,0	2,08	1,366	71,0
U30	75	60	2	76,0	60,0	60,0	2,06	1,333	75,0
U31	75	60	2	76,0	60,0	60,0	2,06	1,664	68,0
U32	75	60	2	76,0	60,0	60,0	2,06	1,999	63,0
U34	41	41	4	42,0	40,0	40,0	3,99	0,759	129,0
U36-1	41	41	2	41,0	41,0	41,0	2,04	0,873	60,0
U36-2	41	41	2	41,0	41,0	41,0	2,04	0,873	56,0
U38	51	51	2	51,0	51,0	51,0	2,04	1,113	69,0
U39	51	51	2	51,0	51,0	51,0	2,04	1,391	53,0
U41	62	62	2	62,0	62,0	62,0	2,05	1,377	65,0
U42	62	62	2	62,0	62,0	62,0	2,05	1,722	58,0
U43	62	62	2	62,0	62,0	62,0	2,05	2,065	48,0

Para os coeficientes de flambagem global considerou-se os valores:

$$K_x = 0,65$$

$$K_y = 1,00$$

$$K_z = 0,50$$

Com referência ao aço utilizado nestes perfis, sua resistência ao escoamento, f_y , possui valor característico de 360 MPa. Na Tabela 4.3 são apresentados os valores médios obtidos por Batista (1988) para a resistência ao escoamento do aço, $f_{y,m}$, e o seu respectivo coeficiente de variação, δ .

Tabela 4.3 – Resultados obtidos por Batista (1988) para a resistência ao escoamento do aço

Espessura nominal do perfil (mm)	$f_{y,m}$ (MPa)	δ
1,5	376	0,022
2,0	397	0,014
3,0	360	0,013
4,0	390	0,014

4.3 Resultados experimentais obtidos para perfis U enrijecidos

Os resultados experimentais encontrados para perfis do tipo U enrijecido submetidos à compressão axial baseiam-se nos trabalhos de Batista (1988) e Thomasson (1978). Foi obtido um total de 99 ensaios dos trabalhos destes dois autores.

4.3.1 Ensaios de Batista (1988)

Com base no trabalho de Batista (1988), a Tabela 4.4 apresenta as dimensões nominais dos perfis e as dimensões medidas pelo autor (tendo como referência a Fig. 4.1), o comprimento real das barras, L , e a força axial de compressão resistente obtida experimentalmente, $N_{c,Exp}$.

Tabela 4.4 – Dados obtidos dos ensaios de Batista (1988) para perfis U enrijecido

Perfil	Valores nominais (mm)				Valores medidos (mm)						L (m)	N _{c,Exp} (kN)
	B ₁	B ₂	B ₃	t	B ₁	B _{2s}	B _{2i}	B _{3s}	B _{3i}	t		
C4	103	36	21	4,0	106,0	35,0	35,0	19,0	19,0	4,03	0,356	314,0
C6	103	36	31	4,0	107,0	35,0	35,0	28,0	28,0	3,98	0,351	340,0
C10-1	103	36	21	2,0	106,0	35,0	35,0	21,0	21,0	2,04	0,241	140,0
C10-2	103	36	21	2,0	106,0	35,0	35,0	21,0	21,0	2,02	0,241	138,0
C10-3	103	36	21	2,0	106,0	35,0	35,0	21,0	21,0	2,03	0,242	141,0
C24	155	54	47	2,0	155,0	54,0	54,0	48,0	48,0	2,04	0,351	192,0
C29	155	54	16	1,5	154,0	54,0	54,0	16,0	16,0	1,50	0,353	90,0
C34	155	54	31	1,5	156,0	54,0	54,0	30,0	30,0	1,44	0,352	108,0
C37B	155	54	47	1,5	156,0	53,0	53,0	46,0	46,0	1,50	0,342	121,0
C41	102	51	20	4,0	103,0	49,0	49,0	19,0	19,0	3,99	0,415	365,0
C43	102	51	31	4,0	105,0	50,0	50,0	29,0	29,0	4,01	0,415	396,0
C45	102	51	10	2,0	102,0	51,0	51,0	10,0	10,0	2,02	0,244	128,0
C47-1	102	51	20	2,0	102,0	51,0	51,0	20,0	20,0	2,02	0,244	153,0
C47-2	102	51	20	2,0	102,0	51,0	51,0	21,0	21,0	2,01	0,247	157,0
C47-3	102	51	20	2,0	102,0	51,0	51,0	21,0	21,0	2,01	0,244	156,0
C47-4	102	51	20	2,0	102,0	51,0	51,0	21,0	21,0	2,01	0,244	162,0
C47-5	102	51	20	2,0	102,0	51,0	51,0	21,0	21,0	2,01	0,244	157,0
C47-7	102	51	20	2,0	102,0	51,0	51,0	21,0	21,0	2,01	0,245	149,0
C47-8	102	51	20	2,0	102,0	51,0	51,0	21,0	21,0	2,04	0,244	153,0
C49	102	51	31	2,0	103,0	50,0	50,0	31,0	31,0	2,01	0,246	152,0
C53	153	77	15	2,0	154,0	77,0	77,0	16,0	16,0	2,04	0,364	167,0
C57	153	77	31	2,0	155,0	77,0	77,0	31,0	31,0	2,01	0,364	202,0
C64B	153	77	15	1,5	152,0	77,0	77,0	15,0	15,0	1,47	0,366	88,0
C67A	153	77	31	1,5	153,0	77,0	77,0	30,0	30,0	1,48	0,485	111,0
C76	89	89	27	4,0	88,0	89,0	89,0	26,0	26,0	4,00	0,289	501,0
C78	89	89	9	2,0	88,0	89,0	89,0	10,0	10,0	2,07	0,355	137,0
C80-1	89	89	18	2,0	91,0	88,0	88,0	18,0	18,0	2,07	0,354	185,0
C80-2	89	89	18	2,0	91,0	88,0	88,0	18,0	18,0	2,03	0,354	188,0
C80-3	89	89	18	2,0	91,0	88,0	88,0	18,0	18,0	2,03	0,354	180,0
C82	89	89	27	2,0	91,0	89,0	89,0	27,0	27,0	2,07	0,353	190,0
C84B	100	100	10	1,5	98,0	99,0	99,0	12,0	12,0	1,48	0,343	80,0
C86B-3	100	100	20	1,5	100,0	100,0	100,0	20,0	20,0	1,49	0,299	101,0
C86B-4	100	100	20	1,5	99,0	100,0	100,0	20,0	20,0	1,44	0,397	96,0
C88B	100	100	30	1,5	102,0	100,0	100,0	30,0	30,0	1,49	0,297	106,0
C3	103	36	21	4,0	106,0	35,0	35,0	19,0	19,0	4,03	0,904	210,0
C5	103	36	31	4,0	107,0	35,0	35,0	28,0	28,0	3,98	0,962	252,0
C9-1	103	36	21	2,0	106,0	35,0	35,0	21,0	21,0	2,03	1,204	120,0
C9-2	103	36	21	2,0	106,0	35,0	35,0	21,0	21,0	2,03	1,204	130,0
C21	155	54	47	2,0	155,0	54,0	54,0	48,0	48,0	2,04	1,738	137,0
C22	155	54	47	2,0	155,0	54,0	54,0	48,0	48,0	2,04	2,175	121,0
C23	155	54	47	2,0	155,0	54,0	54,0	48,0	48,0	2,04	2,608	100,0
C25	155	54	16	1,5	154,0	54,0	54,0	16,0	16,0	1,50	1,499	80,0
C26	155	54	16	1,5	154,0	54,0	54,0	16,0	16,0	1,50	1,875	67,0
C27	155	54	16	1,5	154,0	54,0	54,0	16,0	16,0	1,50	2,254	70,0
C28	155	54	16	1,5	154,0	54,0	54,0	16,0	16,0	1,50	2,999	53,0
C33	155	54	31	1,5	156,0	54,0	54,0	30,0	30,0	1,49	3,272	53,0
C35	155	54	47	1,5	156,0	53,0	53,0	46,0	46,0	1,50	1,708	86,0
C36	155	54	47	1,5	156,0	53,0	53,0	46,0	46,0	1,50	2,138	74,0
C37	155	54	47	1,5	156,0	53,0	53,0	46,0	46,0	1,50	2,563	71,0

Tabela 4.4 – Dados obtidos dos ensaios de Batista (1988) para perfis U enrijecido (continuação)

Perfil	Valores nominais (mm)				Valores medidos (mm)						L (m)	N _{c,Exp} (kN)
	B ₁	B ₂	B ₃	t	B ₁	B _{2s}	B _{2i}	B _{3s}	B _{3i}	t		
C37A	155	54	47	1,5	156,0	53,0	53,0	46,0	46,0	1,50	3,419	56,0
C40	102	51	20	4,0	103,0	49,0	49,0	19,0	19,0	3,99	1,294	200,0
C42	102	51	31	4,0	105,0	50,0	50,0	29,0	29,0	4,01	1,388	217,0
C44	102	51	10	2,0	102,0	51,0	51,0	10,0	10,0	2,02	1,484	109,0
C46-1	102	51	20	2,0	102,0	51,0	51,0	21,0	21,0	2,01	1,574	118,0
C46-2	102	51	20	2,0	102,0	51,0	51,0	21,0	21,0	2,01	1,574	114,0
C46-4	102	51	20	2,0	102,0	51,0	51,0	21,0	21,0	2,01	1,574	148,0
C46-5	102	51	20	2,0	102,0	51,0	51,0	21,0	21,0	2,01	1,574	151,0
C46-6	102	51	20	2,0	102,0	51,0	51,0	21,0	21,0	2,01	1,574	148,0
C46-7	102	51	20	2,0	102,0	51,0	51,0	21,0	21,0	2,01	1,574	133,0
C48	102	51	31	2,0	103,0	50,0	50,0	31,0	31,0	2,01	1,635	129,0
C50	153	77	15	2,0	154,0	77,0	77,0	16,0	16,0	2,04	2,114	122,0
C51	153	77	15	2,0	154,0	77,0	77,0	16,0	16,0	2,04	2,643	110,0
C52	153	77	15	2,0	154,0	77,0	77,0	16,0	16,0	2,04	3,170	89,0
C54	153	77	31	2,0	155,0	77,0	77,0	31,0	31,0	2,01	2,279	138,0
C55	153	77	31	2,0	155,0	77,0	77,0	31,0	31,0	2,01	2,848	132,0
C63	153	77	15	1,5	152,0	77,0	77,0	15,0	15,0	1,47	2,600	77,0
C64	153	77	15	1,5	152,0	77,0	77,0	15,0	15,0	1,47	3,120	77,0
C64A	153	77	15	1,5	152,0	77,0	77,0	15,0	15,0	1,47	4,160	62,0
C65	153	77	31	1,5	153,0	77,0	77,0	30,0	30,0	1,48	2,249	80,0
C66	153	77	31	1,5	153,0	77,0	77,0	30,0	30,0	1,48	2,812	82,0
C67	153	77	31	1,5	153,0	77,0	77,0	30,0	30,0	1,48	3,374	80,0
C75	89	89	27	4,0	89,0	89,0	89,0	26,0	26,0	4,00	2,405	218,0
C77	89	89	9	2,0	89,0	89,0	89,0	10,0	10,0	2,07	2,362	75,0
C79-1	89	89	18	2,0	91,0	88,0	88,0	18,0	18,0	2,04	2,481	98,0
C79-2	89	89	18	2,0	91,0	88,0	88,0	18,0	18,0	2,04	2,481	110,0
C81	89	89	27	2,0	91,0	89,0	89,0	27,0	27,0	2,07	2,562	123,0
C83	100	100	10	1,5	98,0	99,0	99,0	12,0	12,0	1,48	2,598	63,0
C84	100	100	10	1,5	98,0	99,0	99,0	12,0	12,0	1,48	3,247	58,0
C84A	100	100	10	1,5	98,0	99,0	99,0	12,0	12,0	1,48	3,897	45,0
C85	100	100	20	1,5	100,0	100,0	100,0	20,0	20,0	1,49	2,743	80,0
C86	100	100	20	1,5	100,0	100,0	100,0	20,0	20,0	1,49	3,417	67,0
C86A	100	100	20	1,5	100,0	100,0	100,0	20,0	20,0	1,49	4,102	50,0
C87	100	100	30	1,5	102,0	100,0	100,0	30,0	30,0	1,49	2,827	89,0
C88	100	100	30	1,5	102,0	100,0	100,0	30,0	30,0	1,49	3,534	73,0
C88A	100	100	30	1,5	102,0	100,0	100,0	30,0	30,0	1,49	4,241	54,0

Para os coeficientes de flambagem global considerou-se os valores:

$$K_x = 0,65$$

$$K_y = 1,00$$

$$K_z = 0,50$$

Referente ao aço utilizado nestes perfis, sua resistência ao escoamento, f_y , possui valor característico de 360 MPa. Na Tabela 4.3, apresentada anteriormente para o caso dos

perfis U, são indicados os valores médios da resistência ao escoamento do aço, $f_{y,m}$, e o seu respectivo coeficiente de variação, δ . Estes valores foram obtidos por Batista (1988) tanto para os perfis U como para os perfis U enrijecido.

4.3.2 Ensaios de Thomasson (1978)

Com base no trabalho de Thomasson (1978), a Tabela 4.5 apresenta as dimensões nominais destes perfis e as dimensões medidas pelo autor (tendo como referência a Fig. 4.1), o comprimento real das barras, L , e a força axial de compressão resistente obtida experimentalmente, $N_{c,Exp}$.

Tabela 4.5 – Dados obtidos dos ensaios de Thomasson (1978) para perfis U enrijecido

Perfil	Valores nominais (mm)				Valores medidos (mm)						L (m)	N _{c,Exp} (kN)
	B ₁	B ₂	B ₃	t	B ₁	B _{2s}	B _{2i}	B _{3s}	B _{3i}	t		
A 71	300	100	20	0,7	299,8	100,8	101,0	19,6	20,2	0,63	2,690	16,0
A 74	300	100	20	0,7	300,3	101,3	101,3	20,9	20,9	0,64	2,690	16,2
A 75	300	100	20	0,7	299,8	100,6	101,7	21,0	19,6	0,64	2,690	15,5
A 76	300	100	20	0,7	300,7	100,9	100,9	20,5	20,5	0,65	2,690	14,5
A 101	300	100	20	1,0	300,7	102,0	100,7	20,8	20,6	0,94	2,690	36,9
A 102	300	100	20	1,0	300,6	101,4	101,4	20,5	20,5	0,94	2,690	35,0
A 103	300	100	20	1,0	300,2	102,1	100,9	18,8	21,4	0,94	2,690	37,1
A 104	300	100	20	1,0	299,3	102,1	99,0	19,7	20,3	0,96	2,690	34,5
A 151	300	100	20	1,5	300,8	100,5	102,5	22,1	19,9	1,45	2,690	76,6
A 152	300	100	20	1,5	300,8	100,4	102,4	21,3	20,4	1,43	2,690	70,0
A 153	300	100	20	1,5	301,2	101,2	101,2	21,5	21,5	1,38	2,690	71,3
A 154	300	100	20	1,5	302,0	101,8	101,8	24,1	24,1	1,39	2,690	73,0
A 155	300	100	20	1,5	300,6	102,2	102,2	24,3	24,3	1,40	2,690	57,0
A 156	300	100	20	1,5	300,8	101,2	101,2	21,8	21,8	1,39	2,690	69,0

Para os coeficientes de flambagem global considerou-se os valores:

$$K_x = 0,65$$

$$K_y = 1,00$$

$$K_z = 0,50$$

Referente ao aço utilizado nestes perfis, sua resistência ao escoamento, f_y , possui valor característico de 350 MPa. Na Tabela 4.6 são apresentados os valores médios obtidos por Thomasson para a resistência ao escoamento do aço, $f_{y,m}$.

Tabela 4.6 – Valores médios obtidos por Thomasson (1978) para a resistência ao escoamento do aço

Perfis	$f_{y,m}$ (MPa)
A 71	391
A 74	395
A 75	398
A 76	288
A 101	464
A 102	460
A 103	460
A 104	475
A 151	382
A 152	379
A 153	395
A 154	393
A 155	380
A 156	381

4.4 Resultados experimentais obtidos para perfis S enrijecidos

Os resultados experimentais encontrados para perfis do tipo S enrijecido submetidos à compressão axial baseiam-se nos trabalhos de Campos (1999) e de Santana (1999). Foi obtido um total de 64 ensaios destes dois autores.

4.4.1 Ensaios de Campos (1999)

Com base no trabalho de Campos (1999), a Tabela 4.7 apresenta as dimensões nominais dos perfis e as dimensões medidas pelo autor (tendo como referência a Fig. 4.1), o comprimento real das barras, L , e a força axial de compressão resistente obtida experimentalmente, $N_{c,Exp}$.

Tabela 4.7 – Dados obtidos dos ensaios de Campos (1999) para perfis S enrijecido

Perfis	Valores nominais (mm)				Valores medidos (mm)								L (m)	$N_{c,Exp}$ (kN)
	B_1	B_2	B_3	t	B_{1s}	B_{1i}	B_{2s}	B_{2m}	B_{2i}	B_{3s}	B_{3i}	t		
M3/ P13	45	45	11,25	0,850	45,883	46,250	45,950	45,500	45,867	11,833	11,833	0,85	1,800	41,696
M5/ P25	45	45	11,25	1,650	45,533	45,483	44,400	45,500	45,600	11,717	11,883	1,65	0,723	83,830
M6/ P18	45	45	11,25	1,650	44,783	44,983	44,702	46,175	44,717	11,700	12,017	1,60	1,800	73,620
M7/ P14	45	45	11,25	0,850	45,967	46,033	46,017	45,975	46,017	11,733	11,867	0,850	0,225	57,949

Para os coeficientes de flambagem global considerou-se os valores:

$$K_x = 1,00$$

$$K_y = 1,00$$

$$K_z = 0,50$$

Quanto ao aço utilizado nesses perfis, a Tabela 4.8 apresenta os valores médios obtidos por Campos para a resistência ao escoamento do aço, $f_{y,m}$.

Tabela 4.8 – Valores médios obtidos por Campos (1999) para a resistência ao escoamento do aço

Perfis	$f_{y,m}$ (MPa)
M3/P13	624
M5/P25	302
M6/P18	302
M7/P14	624

4.4.2 Ensaios de Santana (1999)

Com base no trabalho de Santana (1999), a Tabela 4.9 apresenta as dimensões nominais dos perfis e as dimensões medidas pelo autor (tendo como referência a Fig. 4.1), o comprimento real das barras, L , e a força axial de compressão resistente obtida experimentalmente, $N_{c,Exp}$.

Tabela 4.9 – Dados obtidos dos ensaios de Santana (1999) para perfis S enrijecido

Perfis	Valores nominais (mm)				Valores medidos (mm)								L (m)	$N_{c,Exp}$ (kN)
	B_1	B_2	B_3	t	B_{1s}	B_{1i}	B_{2s}	B_{2m}	B_{2i}	B_{3s}	B_{3i}	t		
P1B	45	45	15	2	45,97	45,96	45,10	44,79	45,07	13,435	13,345	2,07	0,300	149,8
P1C	45	45	15	2	45,90	45,64	45,13	44,76	45,12	13,355	13,425	2,05	0,300	151,8
P1D	45	45	15	2	47,35	45,94	45,01	44,56	44,66	13,460	13,440	2,00	0,300	147,9
P1E	45	45	15	2	46,46	45,00	45,39	44,12	44,58	14,600	14,650	2,02	0,301	148,0
P1F	45	45	15	2	47,55	45,69	45,07	44,72	45,18	13,300	13,010	2,00	0,301	150,1
P1G	45	45	15	2	47,10	45,88	45,07	44,64	45,09	13,405	13,255	1,99	0,300	147,3
P1H	45	45	15	2	46,70	45,94	45,16	44,46	45,12	13,470	13,420	2,00	0,301	151,2
P1I	45	45	15	2	46,70	45,96	45,04	44,70	45,09	13,360	13,370	2,00	0,301	148,2
P1J	45	45	15	2	47,05	45,93	45,12	44,72	45,12	13,425	13,435	2,09	0,300	152,5
P21	45	45	15	2	46,13	47,13	45,06	44,92	45,06	13,365	13,335	1,99	0,900	150,3
P2B	45	45	15	2	46,92	45,95	45,01	44,95	44,94	13,360	13,280	1,94	0,900	148,5
P2C	45	45	15	2	46,22	45,99	45,02	45,13	44,97	13,200	13,320	2,02	0,899	147,1
P2D	45	45	15	2	46,02	46,69	45,05	44,96	45,08	13,410	13,230	2,10	0,899	146,3
P2E	45	45	15	2	47,21	45,94	45,08	44,72	45,04	13,065	13,245	2,05	0,899	143,5
P2F	45	45	15	2	47,46	45,91	45,11	44,60	44,94	13,340	13,290	2,10	0,899	143,8
P2G	45	45	15	2	47,14	45,94	44,96	45,08	44,96	13,060	13,370	2,00	0,899	135,9

Tabela 4.9 – Dados obtidos dos ensaios de Santana (1999) para perfis S enrijecido (continuação)

Perfis	Valores nominais (mm)				Valores medidos (mm)								L (m)	N _{c,Exp} (kN)
	B ₁	B ₂	B ₃	t	B _{1s}	B _{1i}	B _{2s}	B _{2m}	B _{2i}	B _{3s}	B _{3i}	t		
P2H	45	45	15	2	46,05	45,96	45,12	44,96	45,09	13,090	13,280	2,02	0,899	133,6
P2I	45	45	15	2	47,11	45,95	44,85	44,78	45,08	13,365	13,375	2,09	0,899	151,0
P2J	45	45	15	2	46,35	46,00	44,96	44,78	45,33	13,340	13,140	2,06	0,899	147,2
P3B	45	45	15	2	48,44	46,04	44,83	44,97	45,02	13,165	13,115	2,05	1,500	134,0
P3C	45	45	15	2	46,58	48,12	45,05	44,76	44,64	12,820	13,350	2,02	1,500	128,3
P3D	45	45	15	2	47,42	45,89	44,88	44,93	44,86	13,720	13,520	2,06	1,500	134,8
P3E	45	45	15	2	47,07	45,73	44,80	44,76	44,73	13,310	13,420	2,02	1,500	126,8
P3F	45	45	15	2	46,08	46,53	44,83	44,67	44,79	13,240	13,150	2,04	1,500	120,8
P3G	45	45	15	2	47,03	46,18	44,95	45,04	44,91	13,210	13,340	2,04	1,500	137,8
P3H	45	45	15	2	45,97	47,30	44,59	44,85	44,81	13,200	13,260	2,04	1,500	127,2
P3I	45	45	15	2	46,43	46,09	45,15	44,92	44,89	13,165	13,285	2,03	1,500	124,3
P3J	45	45	15	2	46,03	47,07	44,88	44,90	44,80	13,190	13,360	2,06	1,500	129,9
P3K	45	45	15	2	45,21	45,07	45,23	46,26	45,35	13,565	14,145	2,05	1,502	117,3
P3L	45	45	15	2	45,60	45,19	44,97	45,17	45,27	15,480	13,290	2,08	1,502	101,0
P3M	45	45	15	2	45,58	46,61	45,41	44,31	44,40	13,905	15,235	2,07	1,500	94,0
P3N	45	45	15	2	45,14	45,20	45,37	45,21	45,29	13,280	15,480	2,08	1,500	135,1
P3O	45	45	15	2	45,84	45,20	44,78	43,96	45,26	15,755	14,665	2,13	1,501	98,7
P4B	45	45	15	2	46,10	46,54	44,67	44,55	44,74	13,720	13,740	2,10	2,100	110,5
P4C	45	45	15	2	45,97	47,03	44,81	44,62	44,69	13,665	13,495	2,11	2,101	110,5
P4D	45	45	15	2	46,12	47,19	44,77	44,57	44,65	13,340	13,880	2,12	2,101	107,8
P4E	45	45	15	2	46,18	46,23	44,87	44,68	44,79	13,705	23,440	2,13	2,101	96,6
P4F	45	45	15	2	45,71	47,73	44,63	44,59	44,74	13,575	13,545	2,03	2,101	116,4
P4G	45	45	15	2	46,66	45,72	44,70	45,36	44,86	13,515	13,555	2,09	2,101	108,1
P4H	45	45	15	2	46,79	46,10	44,86	44,45	44,80	13,410	13,570	2,06	2,100	111,5
P4I	45	45	15	2	46,06	45,91	44,72	44,66	44,79	13,880	13,720	2,04	2,100	116,9
P4J	45	45	15	2	46,41	46,22	45,45	44,76	44,77	13,505	13,695	2,05	2,100	108,4
P4K	45	45	15	2	46,10	45,90	44,85	44,21	44,99	15,710	14,390	2,12	2,100	86,2
P4L	45	45	15	2	45,70	45,76	45,06	44,59	45,13	15,610	14,980	2,08	2,100	84,4
P4M	45	45	15	2	46,03	47,20	45,27	43,92	44,24	16,035	14,845	2,09	2,100	70,4
P4N	45	45	15	2	45,28	46,25	44,98	45,16	44,86	14,045	15,355	2,09	2,100	119,0
P4O	45	45	15	2	46,24	45,89	44,72	45,50	45,29	14,585	14,215	2,09	2,100	117,3
P5B	45	45	15	2	45,75	44,04	44,93	45,64	45,03	13,645	13,965	2,09	2,700	74,4
P5C	45	45	15	2	45,41	45,82	44,91	45,77	45,36	13,740	14,000	2,10	2,700	94,8
P5D	45	45	15	2	45,66	46,42	44,87	45,07	44,93	13,635	13,935	2,07	2,700	86,4
P5E	45	45	15	2	46,97	45,10	44,86	44,86	44,97	14,055	15,155	2,09	2,700	83,1
P5F	45	45	15	2	46,41	45,71	44,73	44,75	44,86	13,920	14,200	2,04	2,700	79,5
P5G	45	45	15	2	46,56	45,65	44,80	44,58	44,60	14,090	14,170	2,08	2,700	62,9
P5H	45	45	15	2	45,85	46,74	44,87	44,79	44,96	14,050	13,970	2,08	2,700	89,4
P5I	45	45	15	2	45,69	46,05	44,91	44,65	44,71	13,735	14,165	2,05	2,700	68,6
P5J	45	45	15	2	46,59	46,78	45,06	44,53	44,89	13,975	14,555	2,07	2,700	69,0
P5L	45	45	15	2	45,74	45,84	44,13	44,97	44,10	13,110	13,380	2,14	2,700	58,6
P5M	45	45	15	2	44,94	46,21	45,54	44,52	45,60	14,580	14,100	2,08	2,700	40,7
P5N	45	45	15	2	44,95	46,44	45,46	46,08	45,86	15,050	12,110	2,12	2,700	85,1
P5O	45	45	15	2	45,14	45,41	45,36	45,45	45,53	14,235	14,395	2,13	2,700	48,9

Para os coeficientes de flambagem global considerou-se os valores:

$$K_x = 1,00$$

$$K_y = 1,00$$

$$K_z = 0,50$$

Quanto ao aço utilizado nesses perfis, sua resistência ao escoamento, f_y , possui valor característico de 300 MPa. Em sua pesquisa, Santana dividiu os experimentos em duas séries de ensaios, sendo essas realizadas em momentos diferentes. Na Tabela 4.10 são apresentados os valores médios obtidos pelo autor para a resistência ao escoamento do aço, $f_{y,m}$, e o seu respectivo coeficiente de variação, δ .

Tabela 4.10 – Resultados obtidos por Santana (1999) para a resistência ao escoamento do aço

Série	Perfis	$f_{y,m}$ (MPa)	δ
1	P1B, P1C, P1D, P1E, P1F, P1G, P1H, P1I, P1J, P2A, P2B, P2C, P2D, P2E, P2F, P2G, P2H, P2I, P2J, P3B, P3C, P3D, P3E, P3F, P3G, P3H, P3I, P3J, P4B, P4C, P4D, P4E, P4F, P4G, P4H, P4I, P4J, P5B, P5C, P5D, P5E, P5F, P5G, P5H, P5I, P5J	320	0,0444
2	P3K, P3L, P3M, P3N, P3O, P4K, P4L, P4M, P4N, P4O, P5L, P5M, P5N, P5O	267	0,0435

4.5 Resumo do capítulo

No capítulo 4 são apresentados alguns dos resultados experimentais encontrados na literatura, a partir de diferentes autores, de PFF submetidos à compressão axial centrada. Foram obtidos um total de 212 ensaios, cobrindo os distintos modos de flambagem. O banco de dados criado baseou-se em três tipos de seções transversais distintas: S enrijecido (Se), U enrijecido (Ue) e U simples (U). Além dos três tipos de perfis considerados, estes também apresentam variação nas dimensões nominais de suas seções transversais e de seus comprimentos.

Neste intuito, procurou-se obter o maior número possível de experimentos disponíveis na literatura a fim de minimizar o erro amostral. Posteriormente, outros resultados de ensaio poderão vir a complementar o banco de dados compilado no presente trabalho, inclusive com outros tipos de seções transversais, no intuito de aumentar o tamanho da atual amostra.

Por fim, as informações disponíveis no presente banco de dados, referentes às dimensões

dos componentes das seções transversais e das forças de resistência à compressão axial obtidas experimentalmente ($N_{c,Exp}$), serão utilizadas no capítulo 5 para a descrição estatística do fator de fabricação e a obtenção da variável aleatória erro do modelo.

Capítulo 5 – Descrição Estatística das Variáveis Aleatórias

A seguir, apresenta-se a descrição estatística das variáveis aleatórias associadas à força axial de compressão resistente dos PFF. Neste capítulo, ênfase é dada ao estudo da variável erro do modelo.

5.1 Variáveis básicas e funções de variáveis aleatórias

Relacionadas à resistência à compressão axial dos PFF, tem-se associadas a esta as incertezas de natureza inerente e incertezas de natureza epistemológica. As incertezas inerentes são aquelas cuja variabilidade não pode ser alterada a menos que, para o caso dos PFF, se interfira no processo de fabricação destes. Já as incertezas epistemológicas, ou epistêmicas, são aquelas relacionadas ao grau de conhecimento relativo a um dado problema, podendo ser reduzidas na medida em que se obtêm informações a respeito do mesmo.

Dentre as incertezas inerentes consideradas neste estudo, tem-se aquelas associadas com:

- o tipo de material (aço), descritas estatisticamente pelo fator de material;
- a geometria, descritas estatisticamente pelo fator de fabricação.

Como variáveis aleatórias básicas, associadas ao tipo de material, tem-se a resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade do aço. Já com relação à geometria, tem-se como variáveis aleatórias básicas as dimensões dos componentes da seção transversal dos PFF e o comprimento das barras.

No presente trabalho, as variáveis aleatórias básicas associadas às incertezas inerentes são consideradas como estatisticamente independentes.

Com relação às incertezas epistêmicas, podem ser citados o erro do modelo de cálculo e o erro amostral. Neste estudo, o erro amostral não será abordado, sendo o erro do modelo (ou fator profissional) a variável aleatória epistêmica considerada.

Com relação aos PFF, deve-se observar ainda que vários parâmetros utilizados no cálculo da força axial de compressão resistente (propriedades geométricas, índice de esbeltez, etc.) são funções de variáveis aleatórias. Ou seja, problemas de engenharia frequentemente envolvem a avaliação de relações funcionais entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis básicas (independentes). Se qualquer uma das variáveis básicas for aleatória, a variável dependente será de mesma maneira aleatória. Tem-se ainda que uma função de variáveis aleatórias pode ser dependente de outras funções de variáveis aleatórias.

Como alguns exemplos de funções de variáveis aleatórias relacionadas à força axial de compressão resistente dos PFF, podem ser citados:

- as propriedades geométricas dos perfis (área, momentos de inércia principais, raios de giração, constante de empenamento, constante de torção, etc.), tendo como variáveis básicas as dimensões dos componentes da seção transversal;
- a força axial de flambagem global elástica (N_e), tendo como variáveis: as propriedades geométricas do perfil (momentos de inércia principais, constantes de empenamento e de torção da seção, raios de giração, entre outras), o comprimento da barra e o módulo de elasticidade do aço;
- o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global (λ_θ), tendo como variáveis: a área da seção transversal, a tensão de escoamento do aço e a força axial de flambagem global elástica (N_e).

Por fim, a própria força axial de compressão resistente calculada para os PFF, $N_{e,R}$, trata-se de uma função de variáveis aleatórias, tendo como uma de suas variáveis básicas o erro do modelo (ou fator profissional).

5.2 Fator de material

O fator de material trata-se da razão entre a propriedade física de interesse do material, determinada por ensaio, e o seu correspondente valor nominal (ou característico). Assim, as propriedades físicas de interesse neste trabalho são a resistência ao escoamento, f_y , e o módulo de elasticidade, E , do aço.

Tomando por referência o trabalho de Castanheira (2004), a Tabela 5.1 apresenta o valor médio, X_m , o seu respectivo coeficiente de variação, δ_m , e a função de distribuição probabilística para o fator de material das variáveis aleatórias básicas consideradas.

Tabela 5.1 – Descrição estatística do fator de material

Variável aleatória básica	X_m	δ_m	Distribuição probabilística
f_y	1,10	0,11	Lognormal
E	1,00	0,06	Lognormal

5.3 Fator de fabricação

O fator de fabricação trata-se da razão entre as dimensões de interesse medidas nos protótipos e os seus correspondentes valores nominais. Neste intuito, tomando-se como referência todas as dimensões medidas dos componentes da seção transversal dos perfis estudados (ver banco de dados no capítulo 4), obtém-se para o fator de fabricação as seguintes frequências indicadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Frequências obtidas para o fator de fabricação dos perfis estudados

Intervalo	Frequência absoluta	Frequência absoluta acumulada	Frequência relativa
--- 0,800	0	0	0,000
0,800 --- 0,825	1	1	0,001
0,825 --- 0,850	0	1	0,000
0,850 --- 0,875	7	8	0,007
0,875 --- 0,900	53	61	0,055
0,900 --- 0,925	30	91	0,031

Tabela 5.2 – Frequências obtidas para o fator de fabricação dos perfis estudados (continuação)

Intervalo	Frequência absoluta	Frequência absoluta acumulada	Frequência relativa
0,925 --- 0,950	32	123	0,033
0,950 --- 0,975	64	187	0,066
0,975 --- 1,000	240	427	0,248
1,000 --- 1,025	345	772	0,357
1,025 --- 1,050	138	910	0,143
1,050 --- 1,075	35	945	0,036
1,075 --- 1,100	3	948	0,003
1,100 --- 1,125	5	953	0,005
1,125 --- 1,150	0	953	0,000
1,150 --- 1,175	0	953	0,000
1,175 --- 1,200	8	961	0,008
1,200 --- 1,225	4	965	0,004
1,225 ---	1	966	0,001

A Figura 5.1 representa o histograma gerado para o fator de fabricação dos perfis estudados.

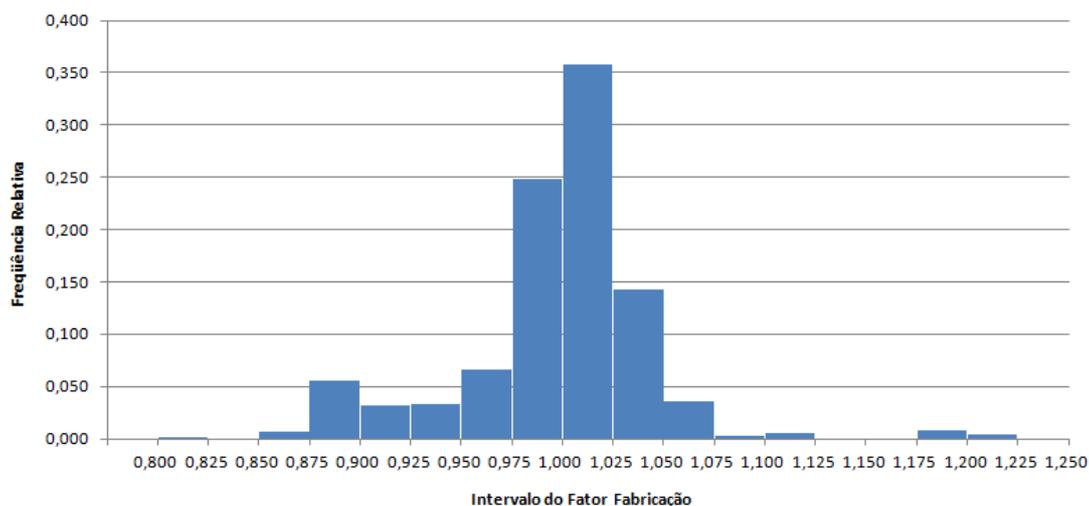


Figura 5.1 – Histograma do fator de fabricação dos perfis estudados

Os parâmetros obtidos para o fator de fabricação são apresentados na Tabela 5.3. Observa-se que o valor médio do fator de fabricação, X_f , e o seu respectivo coeficiente de variação, δ_f , são idênticos aos valores da norma brasileira ABNT NBR 14762 (ABNT, 2001 e 2010).

Tabela 5.3 – Parâmetros obtidos para o fator de fabricação dos perfis estudados

X_f	δ_f	Valor máximo	Valor mínimo
1,00	0,05	1,56	0,81

Analisando separadamente cada componente da seção transversal destes perfis, obtêm-se os parâmetros da Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Parâmetros obtidos para cada componente da seção transversal dos perfis estudados

Elemento	X_f	δ_f	Valor máximo	Valor mínimo	Total de medidas
Alma	1,02	0,02	1,08	0,97	218
Mesa	1,00	0,01	1,03	0,96	304
Enrijecedor	0,98	0,09	1,56	0,81	250
Espessura	1,01	0,03	1,07	0,90	194

Com relação ao comprimento das barras, devido à carência de dados desta variável aleatória básica, será assumido para este os mesmos parâmetros prescritos pela ABNT NBR 14762 (ABNT, 2001 e 2010) para o fator de fabricação, ou seja, $X_f = 1,00$ e $\delta_f = 0,05$.

De acordo com Pimenta (2008), tanto a função de distribuição de probabilidade normal, como também a distribuição lognormal, são comumente adotadas para descrever as variáveis aleatórias geométricas de um perfil. Por simplicidade, para todas as variáveis aleatórias básicas abordadas neste item 5.3, será considerada a função de distribuição de probabilidade normal.

5.4 Erro do modelo ou fator profissional

Neste item 5.4, é apresentado o estudo realizado para o comportamento estatístico da variável erro do modelo, ou fator profissional. O conhecimento desta variável é de extrema importância para a obtenção da distribuição de probabilidade da força axial de compressão resistente dos PFF.

5.4.1 Planilha desenvolvida para a obtenção do erro do modelo

Para a descrição estatística do erro do modelo, foi desenvolvida uma planilha eletrônica no software Excel. Esta planilha tem como dados de entrada: (i) as dimensões medidas dos componentes da seção transversal de cada perfil ensaiado; (ii) o comprimento da barra; (iii) os coeficientes de flambagem global, K_x , K_y e K_z ; (iv) o valor médio da resistência ao escoamento do aço, $f_{y,m}$; (v) a força axial de flambagem local elástica, N_l ; e (vi) a força axial de flambagem distorcional elástica, N_{dist} . A planilha em questão tem por finalidade a obtenção da força axial de compressão resistente dos PFF para o 4 modelos de cálculo estudados, bem como o erro destes.

Numa primeira etapa, são calculadas as propriedades geométricas dos perfis considerando-se as dimensões medidas para cada componente de sua seção transversal. Destaca-se, que a planilha desenvolvida leva em consideração a assimetria provocada pela variação que ocorre naturalmente nas medidas dos elementos que compõem a seção dos perfis U, U enrijecido e S enrijecido. Assim, por exemplo, propriedades como os momentos de inércia são calculados em função da posição de seus eixos principais. A Tabela A.1 do anexo A apresenta algumas das propriedades geométricas calculadas (área da seção, A ; momentos de inércia principais, I_x e I_y ; raios de giração principais, r_x e r_y ; raio de giração polar, r_0 ; constante de torção, J ; e constante de empenamento, C_w) para cada perfil estudado.

Para a força axial de flambagem local elástica, N_l , e a força axial de flambagem distorcional elástica, N_{dist} , os valores inseridos na planilha foram gerados pelo software CUFSM 3.12. Esse programa, baseado no Método das Faixas Finitas e Método das Faixas Finitas Restringidas, foi desenvolvido por Benjamim W. Schafer na Johns Hopkins University, disponível no site www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm. Durante o processo de obtenção destas cargas elásticas, foram consideradas também as dimensões medidas dos componentes da seção transversal de cada perfil.

A Figura 5.2 ilustra o gráfico “fator de força x comprimento de meia onda” gerado pelo programa CUFSM 3.12, do qual são obtidas a força axial de flambagem local elástica ($N_l =$

39,32 kN) e a força axial de flambagem distorcional elástica ($N_{dist} = 78,27$ kN), correspondentes aos pontos de mínimo, para o perfil Ue – 155x54x16x1,5 (perfil C25) ensaiado por Batista (1988). É importante ressaltar que a força normal de referência adotada para a geração do gráfico possui valor unitário, prática esta recomendada na utilização do programa, obtendo-se assim para o fator de força o valor direto da força axial de flambagem elástica associada ao seu correspondente comprimento de meia onda.

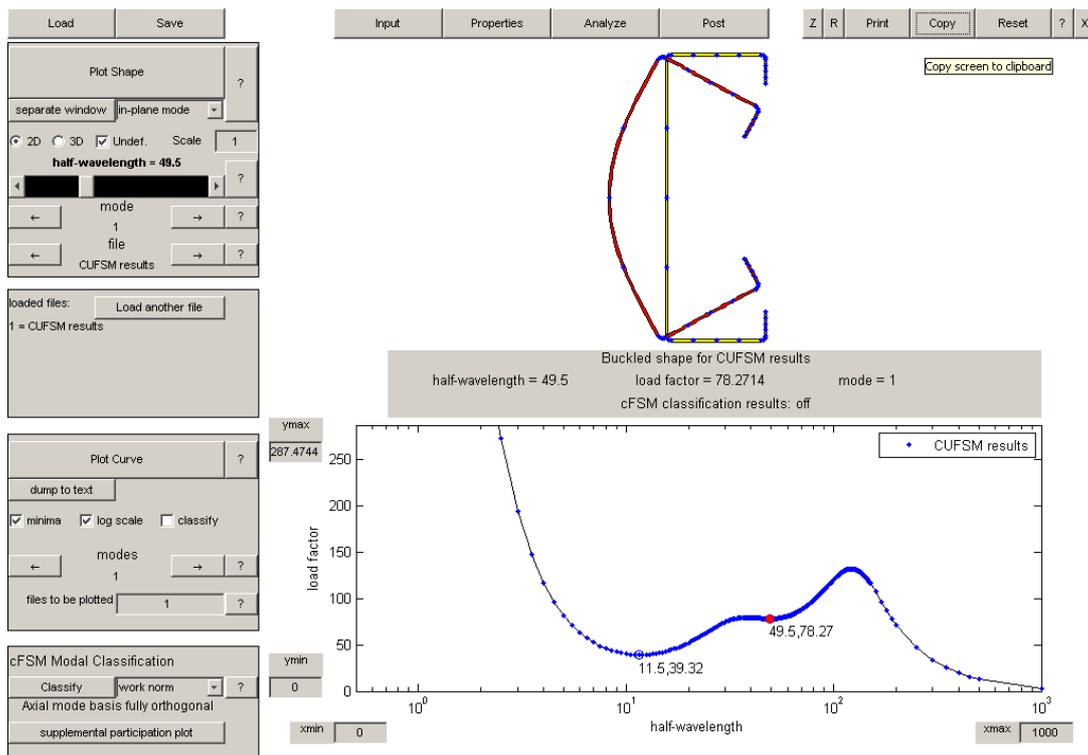


Figura 5.2 – Gráfico gerado pelo programa CUFSM 3.12 (comprimento de meia onda em cm)

O programa desenvolvido por Schafer permite ainda, com base no Método das Faixas Finitas Restringidas, verificar a interação existente entre os modos de flambagem e a sua participação ao longo dos comprimentos de meia onda (Figura 5.3).

Referente à força axial de flambagem global elástica, N_e , esta foi gerada pela planilha eletrônica de acordo com as eqs. (2.14) à (2.21). Destaca-se novamente, que esta planilha leva em consideração a assimetria provocada pela variação que ocorre nas medidas dos elementos que compõem a seção transversal dos perfis U, U enrijecido e S enrijecido.

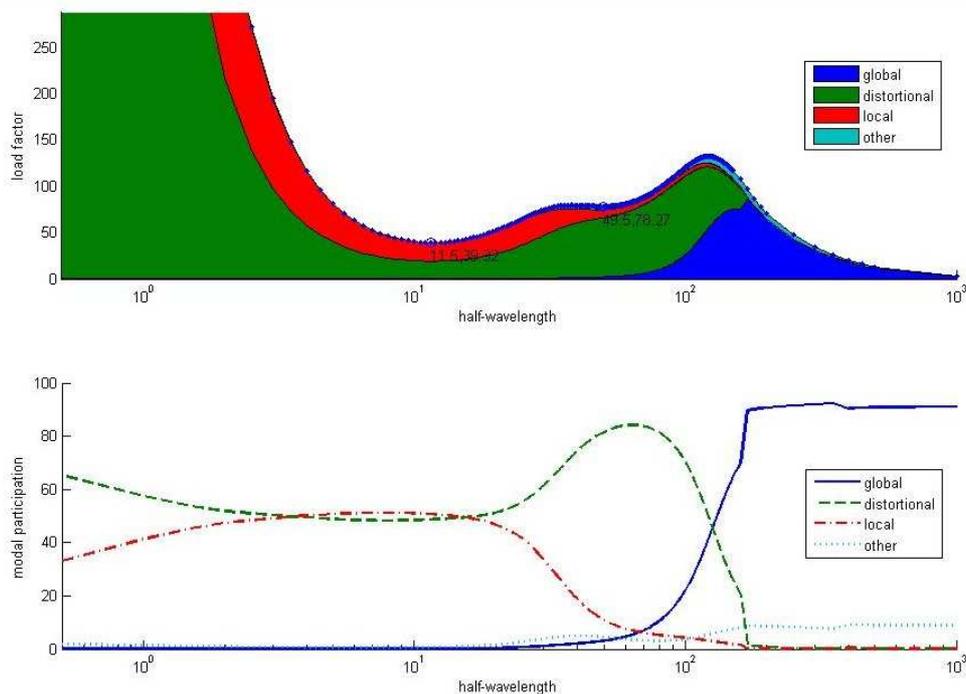


Figura 5.3 – Interação entre os modos de flambagem ao longo dos comprimentos de meia onda

Na Tabela A.2 do anexo A são apresentadas as forças axiais de flambagem elástica consideradas para os modos de flambagem local, distorcional e global.

Com base em todos estes dados, a Tabela 5.5 exibe a força axial de compressão resistente calculada pela planilha, $N_{c,Ri}$ (para $i = 1$ a 4), segundo cada um dos modelos de cálculo apresentados no item 2.3.

Tabela 5.5 – Força axial de compressão resistente calculada segundo os quatro modelos de cálculo

Perfil	$N_{c,R1}$ (kN)	$N_{c,R2}$ (kN)	$N_{c,R3}$ (kN)	$N_{c,R4}$ (kN)	Perfil	$N_{c,R1}$ (kN)	$N_{c,R2}$ (kN)	$N_{c,R3}$ (kN)	$N_{c,R4}$ (kN)
U13	55,05	54,39	55,05	54,39	U29	92,28	91,15	94,93	93,99
U15-1	92,96	92,59	97,46	97,08	U33	95,13	95,85	96,55	97,26
U15-2	92,72	92,34	97,32	96,93	U35	167,82	165,06	167,82	165,06
U15-3	92,96	92,59	97,46	97,08	U37-1	71,42	70,72	80,62	79,95
U15-4	91,42	91,06	95,88	95,52	U37-2	70,42	69,73	79,34	78,68
U15-5	91,42	91,05	95,88	95,51	U37-3	70,31	69,57	78,72	78,02
U15-6	91,42	91,05	95,88	95,51	U40	79,73	79,02	85,56	84,93
U15-7	91,42	91,05	95,88	95,51	U44	88,81	89,05	90,56	90,76
U15-8	91,42	91,05	95,88	95,51	U12	34,60	40,58	34,60	40,58
U18	97,64	97,38	104,02	103,74	U14-1	59,15	69,47	64,24	74,38
U22	102,11	101,94	111,06	110,87	U14-2	59,15	69,47	64,24	74,38
U24	179,40	177,15	179,40	177,15	U14-3	59,15	69,47	64,24	74,38
U26	73,61	74,48	80,60	81,39	U14-4	59,15	69,47	64,24	74,38

Tabela 5.5 – Força axial de compressão resistente calculada segundo os quatro modelos de cálculo (continuação)

Perfil	$N_{c,R1}$ (kN)	$N_{c,R2}$ (kN)	$N_{c,R3}$ (kN)	$N_{c,R4}$ (kN)	Perfil	$N_{c,R1}$ (kN)	$N_{c,R2}$ (kN)	$N_{c,R3}$ (kN)	$N_{c,R4}$ (kN)
U14-5	59,15	69,47	64,24	74,38	C49	161,09	159,73	165,16	164,07
U14-6	59,15	69,47	64,24	74,38	C53	154,29	154,29	154,29	154,29
U14-7	59,15	69,47	64,24	74,38	C57	193,68	192,15	176,61	175,22
U14-8	59,15	69,47	64,24	74,38	C64B	86,98	86,98	86,98	86,98
U16	67,73	76,91	72,17	81,81	C67A	107,20	106,33	99,71	98,88
U17	56,23	66,45	60,50	70,84	C76	431,30	430,01	431,30	431,30
U19	70,58	80,07	75,96	86,38	C78	114,85	114,85	114,85	114,85
U21	49,12	57,21	53,02	61,56	C80-1	155,25	155,25	155,25	155,25
U23	112,09	131,67	112,09	131,67	C80-2	151,06	151,06	151,06	151,06
U25	49,29	57,11	56,26	65,16	C80-3	151,06	151,06	151,06	151,06
U27	59,47	68,82	66,17	74,71	C82	185,98	185,98	185,98	185,98
U28	48,47	58,30	55,70	65,08	C83	50,58	55,07	64,13	70,40
U30	63,90	74,54	68,06	77,12	C84	41,05	44,24	51,15	55,44
U31	51,71	62,45	57,15	66,79	C84A	33,76	35,24	40,66	43,37
U32	41,87	50,23	47,88	55,79	C84B	71,52	71,52	71,52	71,52
U34	106,36	124,45	106,36	124,45	C85	65,75	71,37	71,08	77,77
U36-1	45,20	49,25	52,34	58,30	C86	53,70	58,40	57,16	62,50
U36-2	45,20	49,25	52,34	58,30	C86A	44,06	46,36	46,28	49,02
U38	49,48	54,25	57,18	61,87	C86B-3	96,43	96,43	96,43	96,43
U39	40,12	44,96	47,66	52,63	C86B-4	91,53	91,53	91,53	91,53
U41	54,36	59,87	60,67	65,79	C87	76,40	82,48	80,94	87,57
U42	43,43	48,64	50,11	55,21	C88	62,37	68,64	65,89	72,57
U43	35,57	38,64	42,16	45,30	C88A	51,11	54,70	54,12	57,84
A 71	14,70	14,86	12,83	13,71	C88B	113,44	113,04	118,25	118,25
A 74	15,35	15,59	13,43	14,34	C3	169,98	188,35	169,98	188,35
A 75	15,32	15,59	13,37	14,30	C5	186,62	206,45	186,62	206,45
A 76	14,05	14,05	12,47	13,05	C9-1	70,52	79,58	73,15	84,20
A 101	34,98	34,98	28,97	31,31	C9-2	70,52	79,58	73,15	84,20
A 102	34,81	34,81	28,89	31,21	C21	83,16	89,50	119,32	128,76
A 103	34,70	34,70	28,83	31,15	C22	68,16	74,90	97,19	107,10
A 104	34,75	34,75	29,84	32,34	C23	56,18	60,17	79,79	85,55
A 151	68,11	68,11	61,25	65,45	C25	65,87	70,77	57,22	61,34
A 152	65,82	65,82	59,53	63,58	C26	51,33	57,97	47,21	51,88
A 153	62,33	62,33	56,58	60,58	C27	40,29	44,28	39,03	42,05
A 154	68,64	68,64	58,76	62,71	C28	26,66	27,48	28,00	28,70
A 155	73,42	73,42	59,37	63,17	C33	29,65	30,61	30,60	31,38
A 156	66,58	66,58	56,93	60,79	C35	56,70	60,52	68,74	73,70
C4	270,10	272,85	270,10	272,85	C36	47,31	51,68	56,67	62,27
C6	298,24	300,34	298,24	300,34	C37	39,63	42,55	46,99	50,64
C10-1	135,84	135,84	135,52	134,78	C37A	28,76	29,44	33,62	34,45
C10-2	134,07	134,07	133,37	132,64	C40	190,37	211,07	190,37	211,07
C10-3	134,92	134,92	134,41	133,69	C42	215,40	238,22	215,40	238,22
C24	121,32	120,31	176,60	175,07	C44	77,50	85,42	81,82	93,31
C29	86,21	86,21	81,40	80,94	C46-1	90,87	101,35	94,55	107,03
C34	91,78	91,06	83,59	82,93	C46-2	90,87	101,35	94,55	107,03
C37B	79,50	78,79	98,66	97,72	C46-4	90,87	101,35	94,55	107,03
C41	312,76	313,54	312,76	313,54	C46-5	90,87	101,35	94,55	107,03
C43	353,10	352,87	353,10	352,87	C46-6	90,87	101,35	94,55	107,03
C45	120,72	120,72	120,72	120,72	C46-7	90,87	101,35	94,55	107,03
C47-1	152,36	152,36	152,36	152,36	C48	96,79	107,40	100,98	114,35
C47-2	153,37	153,37	153,37	152,55	C50	109,85	117,02	112,16	120,92
C47-3	153,37	153,37	153,37	152,58	C51	89,38	99,70	91,59	100,92
C47-4	153,37	153,37	153,37	152,58	C52	72,44	78,52	75,26	80,80
C47-5	153,37	153,37	153,37	152,58	C54	130,12	140,68	120,17	129,39
C47-7	153,37	153,37	153,37	152,57	C55	101,89	115,62	98,37	108,37
C47-8	156,48	156,48	156,48	156,33	C63	53,45	58,42	53,17	58,36

Tabela 5.5 – Força axial de compressão resistente calculada segundo os quatro modelos de cálculo (continuação)

Perfil	$N_{c,R1}$ (kN)	$N_{c,R2}$ (kN)	$N_{c,R3}$ (kN)	$N_{c,R4}$ (kN)	Perfil	$N_{c,R1}$ (kN)	$N_{c,R2}$ (kN)	$N_{c,R3}$ (kN)	$N_{c,R4}$ (kN)
C64	45,01	48,24	44,18	47,85	P3F	84,42	86,25	84,42	86,25
C64A	31,49	32,61	31,74	32,62	P3G	85,46	87,21	85,46	87,21
C65	76,83	81,99	70,98	75,79	P3H	84,67	86,50	84,67	86,50
C66	63,74	70,01	58,94	64,68	P3I	84,83	86,56	84,83	86,56
C67	52,69	57,31	49,00	53,13	P3J	85,75	87,57	85,75	87,57
C75	241,04	271,62	241,04	271,62	P3K	81,21	80,84	81,21	80,84
C77	78,35	87,21	96,01	110,78	P3L	81,79	81,53	81,79	81,53
C79-1	95,43	104,12	106,50	122,34	P3M	81,21	81,03	81,21	81,03
C79-2	95,43	104,12	106,50	122,34	P3N	82,18	81,84	82,18	81,84
C81	124,58	136,19	125,99	143,22	P3O	83,36	83,19	83,36	83,19
M3/P13	30,12	30,09	30,22	30,19	P4B	50,95	52,32	50,95	52,32
M5/P25	99,59	99,59	99,59	99,59	P4C	51,20	52,58	51,20	52,58
M6/P18	51,63	54,23	51,63	54,23	P4D	51,41	52,77	51,41	52,77
M7/P14	51,52	51,52	51,52	51,52	P4E	55,57	57,33	55,57	57,33
P1B	137,17	137,17	137,17	137,17	P4F	49,58	50,93	49,58	50,93
P1C	135,24	135,24	135,24	135,24	P4G	51,17	52,59	51,17	52,59
P1D	132,14	132,14	132,14	132,14	P4H	50,17	51,53	50,17	51,53
P1E	133,56	133,56	133,56	133,56	P4I	49,80	51,17	49,80	51,17
P1F	131,97	131,97	131,97	131,97	P4J	50,70	52,17	50,70	52,17
P1G	131,05	131,05	131,05	131,05	P4K	51,13	53,75	51,13	53,75
P1H	131,73	131,73	131,73	131,73	P4L	50,95	53,59	50,95	53,59
P1I	131,72	131,72	131,72	131,72	P4M	50,73	53,33	50,73	53,33
P1J	139,66	139,66	139,66	139,66	P4N	50,74	53,37	50,74	53,37
P2A	125,96	121,11	125,96	121,11	P4O	51,04	53,69	51,04	53,69
P2B	122,71	117,99	122,71	117,99	P5B	32,54	31,89	32,54	31,89
P2C	127,07	122,17	127,07	122,17	P5C	33,23	32,59	33,23	32,59
P2D	132,00	126,91	132,00	126,91	P5D	32,36	31,70	32,36	31,70
P2E	128,98	124,00	128,98	124,00	P5E	33,00	32,34	33,00	32,34
P2F	132,01	126,92	132,01	126,92	P5F	31,87	31,23	31,87	31,23
P2G	126,26	121,40	126,26	121,40	P5G	32,25	31,58	32,25	31,58
P2H	126,91	122,02	126,91	122,02	P5H	32,60	31,94	32,60	31,94
P2I	131,37	126,30	131,37	126,30	P5I	31,84	31,19	31,84	31,19
P2J	129,39	124,41	129,39	124,41	P5J	32,71	32,06	32,71	32,06
P3B	86,12	87,90	86,12	87,90	P5L	31,39	31,11	31,39	31,11
P3C	84,67	86,45	84,67	86,45	P5M	32,69	32,55	32,69	32,55
P3D	86,42	88,19	86,42	88,19	P5N	33,59	33,47	33,59	33,47
P3E	84,01	85,80	84,01	85,80	P5O	33,48	33,34	33,48	33,34

5.4.2 Obtenção do erro do modelo

Com base nos valores calculados para a força axial de compressão resistente dos PFF e os resultados experimentais apresentados no capítulo 4, obtém-se na Tabela 5.6 o erro do modelo, $e_{m,i}$ (para $i = 1$ a 4), dado pela eq. 2.33.

Tabela 5.6 – Erro do modelo obtido para cada perfil ensaiado

Perfil	$e_{m,1}$	$e_{m,2}$	$e_{m,3}$	$e_{m,4}$	Perfil	$e_{m,1}$	$e_{m,2}$	$e_{m,3}$	$e_{m,4}$
M3/P13	1,38	1,39	1,38	1,38	P5G	1,95	1,99	1,95	1,99
M5/P25	0,84	0,84	0,84	0,84	P5H	2,74	2,80	2,74	2,80
M6/P18	1,43	1,36	1,43	1,36	P5I	2,15	2,20	2,15	2,20
M7/P14	1,12	1,12	1,12	1,12	P5J	2,11	2,15	2,11	2,15
P1B	1,09	1,09	1,09	1,09	P5L	1,87	1,88	1,87	1,88
P1C	1,12	1,12	1,12	1,12	P5M	1,24	1,25	1,24	1,25
P1D	1,12	1,12	1,12	1,12	P5N	2,53	2,54	2,53	2,54
P1E	1,11	1,11	1,11	1,11	P5O	1,46	1,47	1,46	1,47
P1F	1,14	1,14	1,14	1,14	A 71	1,09	1,08	1,25	1,17
P1G	1,12	1,12	1,12	1,12	A 74	1,06	1,04	1,21	1,13
P1H	1,15	1,15	1,15	1,15	A 75	1,01	0,99	1,16	1,08
P1I	1,13	1,13	1,13	1,13	A 76	1,03	1,03	1,16	1,11
P1J	1,09	1,09	1,09	1,09	A 101	1,05	1,05	1,27	1,18
P2A	1,19	1,24	1,19	1,24	A 102	1,01	1,01	1,21	1,12
P2B	1,21	1,26	1,21	1,26	A 103	1,07	1,07	1,29	1,19
P2C	1,16	1,20	1,16	1,20	A 104	0,99	0,99	1,16	1,07
P2D	1,11	1,15	1,11	1,15	A 151	1,12	1,12	1,25	1,17
P2E	1,11	1,16	1,11	1,16	A 152	1,06	1,06	1,18	1,10
P2F	1,09	1,13	1,09	1,13	A 153	1,14	1,14	1,26	1,18
P2G	1,08	1,12	1,08	1,12	A 154	1,06	1,06	1,24	1,16
P2H	1,05	1,09	1,05	1,09	A 155	0,78	0,78	0,96	0,90
P2I	1,15	1,20	1,15	1,20	A 156	1,04	1,04	1,21	1,14
P2J	1,14	1,18	1,14	1,18	C4	1,16	1,15	1,16	1,15
P3B	1,56	1,52	1,56	1,52	C6	1,14	1,13	1,14	1,13
P3C	1,52	1,48	1,52	1,48	C10-1	1,03	1,03	1,03	1,04
P3D	1,56	1,53	1,56	1,53	C10-2	1,03	1,03	1,03	1,04
P3E	1,51	1,48	1,51	1,48	C10-3	1,05	1,05	1,05	1,05
P3F	1,43	1,40	1,43	1,40	C24	1,58	1,60	1,09	1,10
P3G	1,61	1,58	1,61	1,58	C29	1,04	1,04	1,11	1,11
P3H	1,50	1,47	1,50	1,47	C34	1,18	1,19	1,29	1,30
P3I	1,47	1,44	1,47	1,44	C37B	1,52	1,54	1,23	1,24
P3J	1,51	1,48	1,51	1,48	C41	1,17	1,16	1,17	1,16
P3K	1,44	1,45	1,44	1,45	C43	1,12	1,12	1,12	1,12
P3L	1,23	1,24	1,23	1,24	C45	1,06	1,06	1,06	1,06
P3M	1,16	1,16	1,16	1,16	C47-1	1,00	1,00	1,00	1,00
P3N	1,64	1,65	1,64	1,65	C47-2	1,02	1,02	1,02	1,03
P3O	1,18	1,19	1,18	1,19	C47-3	1,02	1,02	1,02	1,02
P4B	2,17	2,11	2,17	2,11	C47-4	1,06	1,06	1,06	1,06
P4C	2,16	2,10	2,16	2,10	C47-5	1,02	1,02	1,02	1,03
P4D	2,10	2,04	2,10	2,04	C47-7	0,97	0,97	0,97	0,98
P4E	1,74	1,68	1,74	1,68	C47-8	0,98	0,98	0,98	0,98
P4F	2,35	2,29	2,35	2,29	C49	0,94	0,95	0,92	0,93
P4G	2,11	2,06	2,11	2,06	C53	1,08	1,08	1,08	1,08
P4H	2,22	2,16	2,22	2,16	C57	1,04	1,05	1,14	1,15
P4I	2,35	2,28	2,35	2,28	C64B	1,01	1,01	1,01	1,01
P4J	2,14	2,08	2,14	2,08	C67A	1,04	1,04	1,11	1,12
P4K	1,69	1,60	1,69	1,60	C76	1,16	1,17	1,16	1,16
P4L	1,66	1,57	1,66	1,57	C78	1,19	1,19	1,19	1,19
P4M	1,39	1,32	1,39	1,32	C80-1	1,19	1,19	1,19	1,19
P4N	2,35	2,23	2,35	2,23	C80-2	1,24	1,24	1,24	1,24
P4O	2,30	2,18	2,30	2,18	C80-3	1,19	1,19	1,19	1,19
P5B	2,29	2,33	2,29	2,33	C82	1,02	1,02	1,02	1,02
P5C	2,85	2,91	2,85	2,91	C84B	1,12	1,12	1,12	1,12
P5D	2,67	2,73	2,67	2,73	C86B-3	1,05	1,05	1,05	1,05
P5E	2,52	2,57	2,52	2,57	C86B-4	1,05	1,05	1,05	1,05
P5F	2,49	2,55	2,49	2,55	C88B	0,93	0,94	0,90	0,90

Tabela 5.6 – Erro do modelo obtido para cada perfil ensaiado (continuação)

Perfil	$e_{m,1}$	$e_{m,2}$	$e_{m,3}$	$e_{m,4}$	Perfil	$e_{m,1}$	$e_{m,2}$	$e_{m,3}$	$e_{m,4}$
C3	1,24	1,11	1,24	1,11	U13	1,18	1,20	1,18	1,20
C5	1,35	1,22	1,35	1,22	U15-1	1,19	1,20	1,14	1,14
C9-1	1,70	1,51	1,64	1,43	U15-2	1,10	1,10	1,05	1,05
C9-2	1,84	1,63	1,78	1,54	U15-3	1,10	1,10	1,05	1,05
C21	1,65	1,53	1,15	1,06	U15-4	1,19	1,20	1,14	1,14
C22	1,78	1,62	1,25	1,13	U15-5	1,14	1,14	1,08	1,09
C23	1,78	1,66	1,25	1,17	U15-6	1,01	1,01	0,96	0,96
C25	1,21	1,13	1,40	1,30	U15-7	0,98	0,99	0,94	0,94
C26	1,31	1,16	1,42	1,29	U15-8	1,15	1,15	1,10	1,10
C27	1,74	1,58	1,79	1,66	C46-1	1,30	1,16	1,25	1,10
C28	1,99	1,93	1,89	1,85	U18	1,02	1,03	0,96	0,96
C33	1,79	1,73	1,73	1,69	U22	1,05	1,05	0,96	0,97
C35	1,52	1,42	1,25	1,17	U24	1,16	1,18	1,16	1,18
C36	1,56	1,43	1,31	1,19	U26	1,10	1,09	1,00	1,00
C37	1,79	1,67	1,51	1,40	U29	1,11	1,12	1,07	1,09
C37A	1,95	1,90	1,67	1,63	U33	1,15	1,14	1,13	1,12
C40	1,05	0,95	1,05	0,95	U35	1,13	1,15	1,13	1,15
C42	1,01	0,91	1,01	0,91	U37-1	1,23	1,24	1,09	1,10
C44	1,41	1,28	1,33	1,17	U37-2	1,14	1,15	1,01	1,02
C46-2	1,25	1,12	1,21	1,07	U37-3	1,08	1,09	0,97	0,97
C46-4	1,63	1,46	1,57	1,38	U40	1,17	1,18	1,09	1,09
C46-5	1,66	1,49	1,60	1,41	U44	1,09	1,09	1,07	1,07
C46-6	1,63	1,46	1,57	1,38	U12	1,47	1,26	1,47	1,26
C46-7	1,46	1,31	1,41	1,24	U14-1	1,66	1,41	1,53	1,32
C48	1,33	1,20	1,28	1,13	U14-2	1,64	1,40	1,51	1,30
C50	1,11	1,04	1,09	1,01	U14-3	1,50	1,28	1,39	1,20
C51	1,23	1,10	1,20	1,09	U14-4	1,66	1,41	1,53	1,32
C52	1,23	1,13	1,18	1,10	U14-5	1,47	1,25	1,35	1,17
C54	1,06	0,98	1,15	1,07	U14-6	1,52	1,30	1,40	1,21
C55	1,30	1,14	1,34	1,22	U14-7	1,57	1,34	1,45	1,25
C63	1,44	1,32	1,45	1,32	U14-8	1,56	1,32	1,43	1,24
C64	1,71	1,60	1,74	1,61	U16	1,43	1,26	1,34	1,19
C64A	1,97	1,90	1,95	1,90	U17	1,55	1,31	1,44	1,23
C65	1,04	0,98	1,13	1,06	U19	1,23	1,09	1,15	1,01
C66	1,29	1,17	1,39	1,27	U21	1,65	1,42	1,53	1,32
C67	1,52	1,40	1,63	1,51	U23	1,19	1,01	1,19	1,01
C75	0,90	0,80	0,90	0,80	U25	1,38	1,19	1,21	1,04
C77	0,96	0,86	0,78	0,68	U27	1,41	1,22	1,27	1,12
C79-1	1,03	0,94	0,92	0,80	U28	1,46	1,22	1,27	1,09
C79-2	1,15	1,06	1,03	0,90	U30	1,17	1,01	1,10	0,97
C81	0,99	0,90	0,98	0,86	U31	1,31	1,09	1,19	1,02
C83	1,25	1,14	0,98	0,89	U32	1,50	1,25	1,32	1,13
C84	1,41	1,31	1,13	1,05	U34	1,21	1,04	1,21	1,04
C84A	1,33	1,28	1,11	1,04	U36-1	1,33	1,22	1,15	1,03
C85	1,22	1,12	1,13	1,03	U36-2	1,24	1,14	1,07	0,96
C86	1,25	1,15	1,17	1,07	U38	1,39	1,27	1,21	1,12
C86A	1,13	1,08	1,08	1,02	U39	1,32	1,18	1,11	1,01
C87	1,16	1,08	1,10	1,02	U41	1,20	1,09	1,07	0,99
C88	1,17	1,06	1,11	1,01	U42	1,34	1,19	1,16	1,05
C88A	1,06	0,99	1,00	0,93	U43	1,35	1,24	1,14	1,06

A Tabela 5.7 apresenta a descrição estatística do erro do modelo, obtida através da planilha desenvolvida, para cada um dos quatro modelos de cálculo considerados no capítulo 2.

Tabela 5.7 – Descrição estatística do erro do modelo segundo os quatro modelos de cálculo avaliados

Parâmetro	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Média	1,37	1,31	1,33	1,28
Desvio Padrão	0,40	0,39	0,39	0,39
Coefficiente de Variação (COV)	0,29	0,30	0,29	0,31
Valor Máximo	2,85	2,91	2,85	2,91
Valor Mínimo	0,78	0,78	0,78	0,68

Nas Figuras (5.4) à (5.7) são apresentados os histogramas correspondentes à variável $e_{m,i}$ (para $i = 1$ a 4) referente a cada um dos quatro modelos estudados. A partir destes histogramas, pode-se observar uma certa assimetria acentuada, dando indícios de que a adoção de um valor médio constante na descrição de tal variável pode não ser o mais adequado, e que o erro do modelo deve ser função de alguma variável associada ao fenômeno em análise.

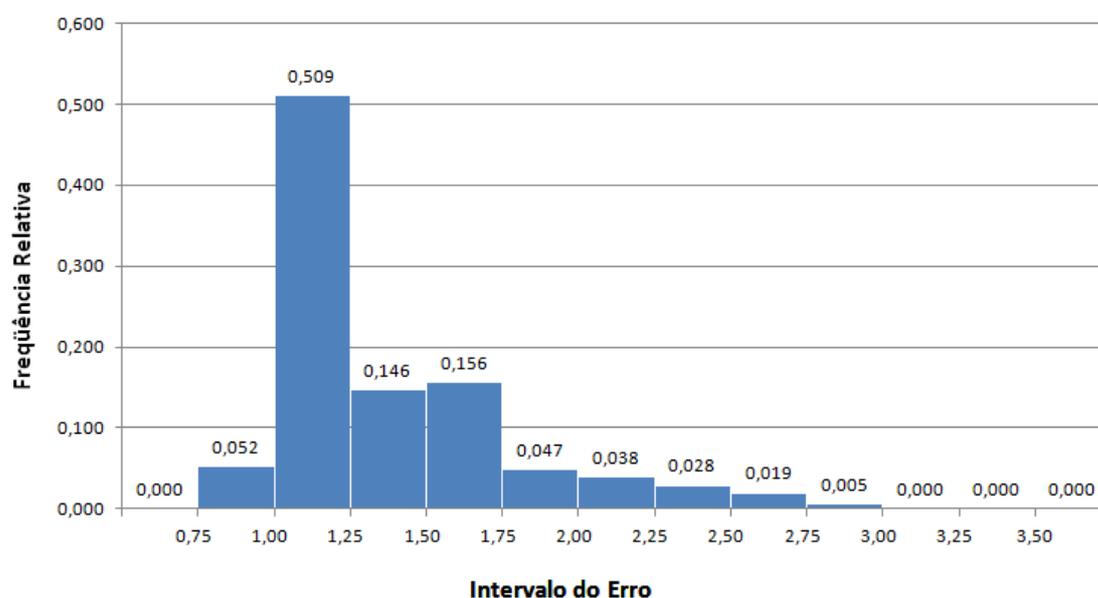


Figura 5.4 – Histograma referente ao erro do modelo de cálculo 1

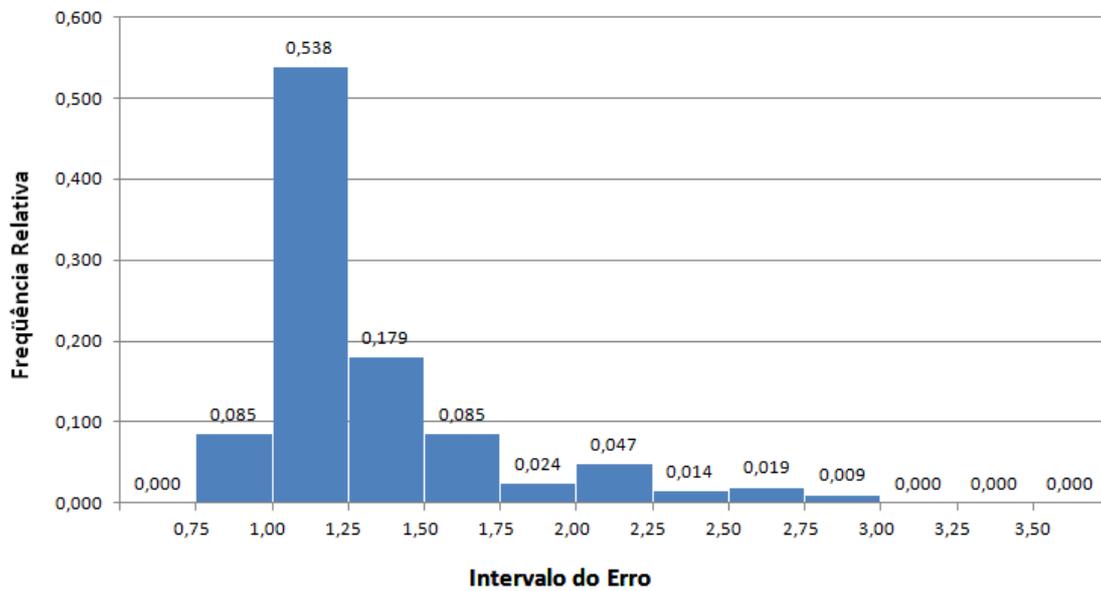


Figura 5.5 – Histograma referente ao erro do modelo de cálculo 2

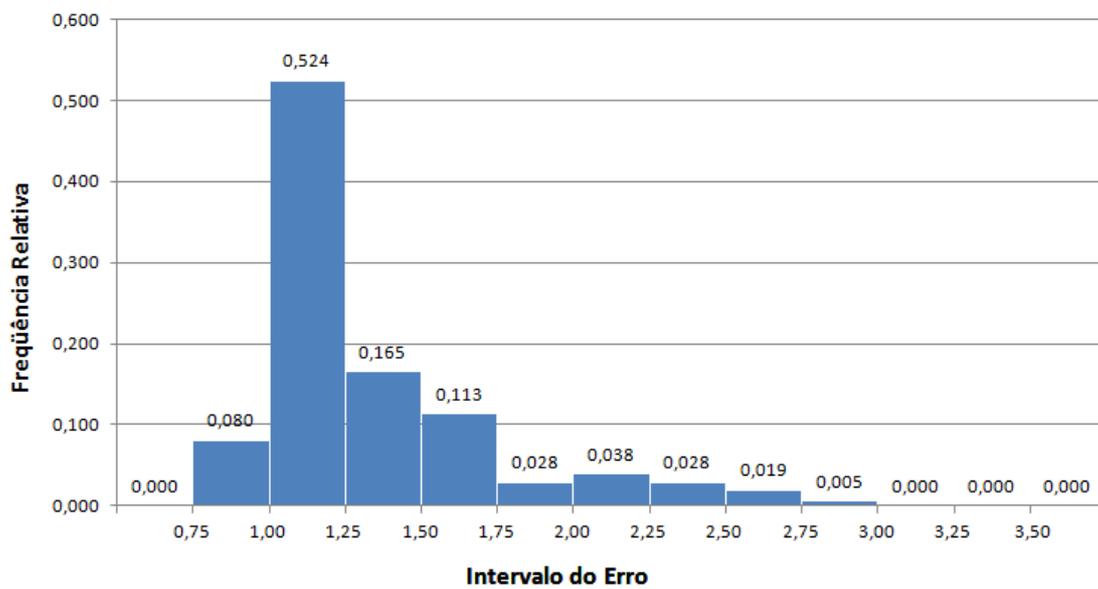


Figura 5.6 – Histograma referente ao erro do modelo de cálculo 3

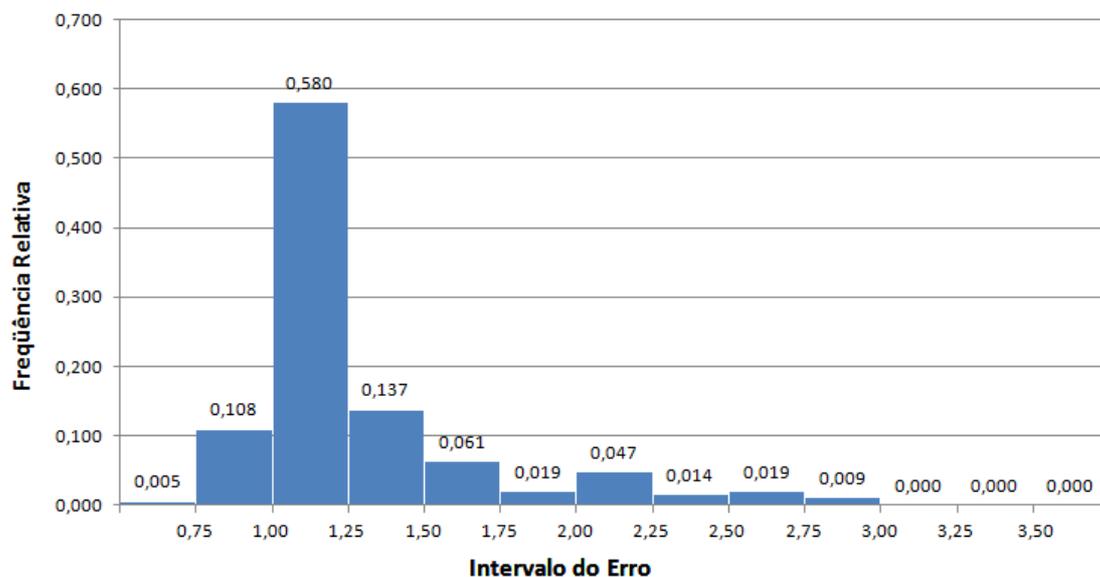


Figura 5.7 – Histograma referente ao erro do modelo de cálculo 4

Assim, analisando separadamente os modos de falha conforme a previsão dos modelos de cálculo, tem-se nas Tabelas (5.8) à (5.11) a descrição estatística encontrada para o erro do modelo. Observa-se que os perfis que flambaram globalmente obtiveram os maiores valores encontrados para a média e a dispersão da variável $e_{m,i}$ (para $i = 1$ a 4). Com base nesta constatação, no item 5.4.3 será investigada a relação existente entre o erro do modelo e o índice de esbelteza reduzido da barra, λ_0 .

Tabela 5.8 - Descrição estatística do erro do modelo com base na flambagem global, sem a ocorrência da flambagem local no perfil

Parâmetro	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Média	1,63	1,59	1,54	1,51
Desvio Padrão	0,52	0,53	0,48	0,52
Coefficiente de Variação (COV)	0,32	0,33	0,31	0,35
Valor Máximo	2,85	2,91	2,85	2,91
Valor Mínimo	0,90	0,80	0,78	0,68
Total Observado	65	67	92	81

Tabela 5.9 - Descrição estatística do erro do modelo com base no escoamento da seção transversal, tendo ocorrido previamente a flambagem local no perfil

Parâmetro	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Média	1,07	-	1,07	-
Desvio Padrão	0,09	-	0,08	-
Coefficiente de Variação (COV)	0,09	-	0,07	-
Valor Máximo	1,19	-	1,14	-
Valor Mínimo	0,93	-	0,94	-
Total Observado	11	0	9	0

Tabela 5.10 - Descrição estatística do erro do modelo com base na flambagem global, tendo ocorrido previamente a flambagem local no perfil

Parâmetro	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Média	1,37	1,25	1,24	1,14
Desvio Padrão	0,25	0,22	0,22	0,18
Coefficiente de Variação (COV)	0,19	0,18	0,17	0,16
Valor Máximo	1,99	1,93	1,95	1,90
Valor Mínimo	0,96	0,86	0,96	0,89
Total Observado	89	98	77	106

Tabela 5.11 - Descrição estatística do erro do modelo com base na flambagem distorcional

Parâmetro	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Média	1,07	1,06	1,07	1,09
Desvio Padrão	0,08	0,08	0,09	0,09
Coefficiente de Variação (COV)	0,08	0,08	0,08	0,08
Valor Máximo	1,24	1,24	1,24	1,24
Valor Mínimo	0,78	0,78	0,84	0,84
Total Observado	45	47	32	25

Referente à Tabela 5.9, os modelos de cálculo 2 e 4 (baseados na curva única de flambagem global apresentada no AISI e na ABNT NBR 14762:2010) não apresentaram o escoamento da seção transversal uma vez que χ possui valor unitário somente para o índice de esbeltez reduzido da barra, λ_0 , igual a zero (ver eq. 2.30).

Por fim, com base nas Tabelas (5.8) à (5.11), destaca-se que os perfis U13 e U24, ensaiados por Batista (1988), apresentaram o escoamento da seção transversal sem a ocorrência da flambagem local para os modelos de cálculo 1 e 3.

5.4.3 Estudo do erro do modelo em função do índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global

No intuito de compreender o aumento observado na média e dispersão do fator profissional nos perfis mais esbeltos, será investigada a relação existente entre a variável aleatória erro do modelo e o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global, λ_0 . As Figuras (5.8) à (5.11) apresentam os resultados gráficos desta investigação obtidos para os perfis estudados.

Para a obtenção da tendência média do erro do modelo, distintos modelos de regressão foram considerados (linear e não-lineares), sendo selecionado para o ajuste dos gráficos um polinômio de terceiro grau (Figuras (5.12) à (5.15)). A Tabela 5.12 apresenta a expressão obtida para cada modelo de cálculo analisado (eqs. (5.1) à (5.4)) e o seu respectivo coeficiente de determinação, R^2 .

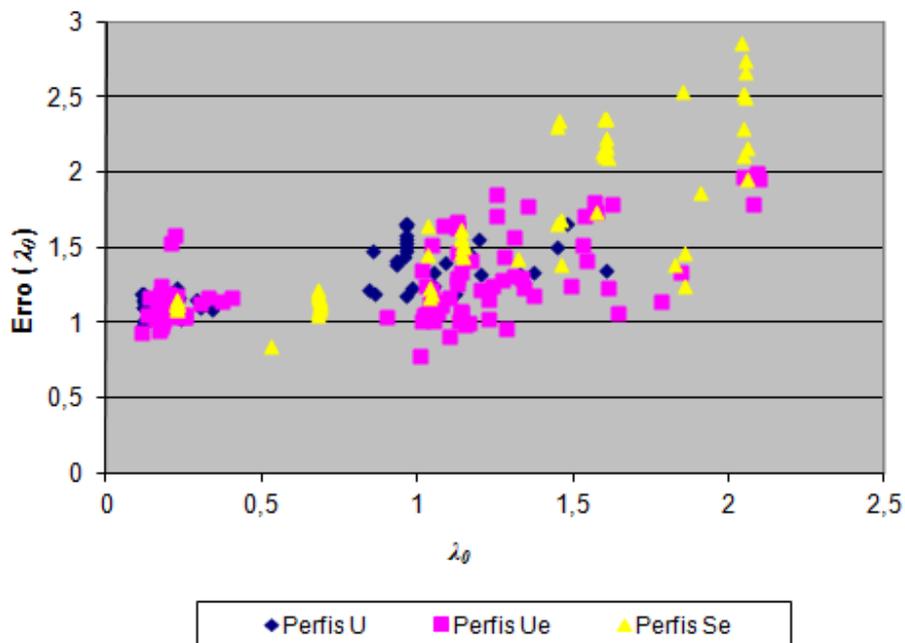


Figura 5.8 – Relação entre o erro do modelo de cálculo 1 com o índice de esbeltez reduzido da barra

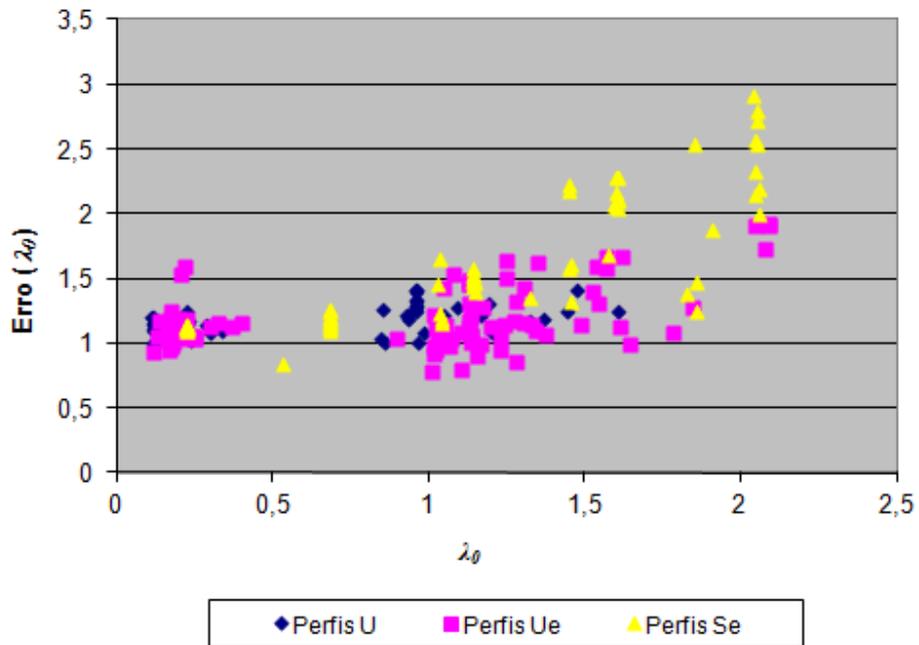


Figura 5.9 – Relação entre o erro do modelo de cálculo 2 com o índice de esbeltez reduzido da barra

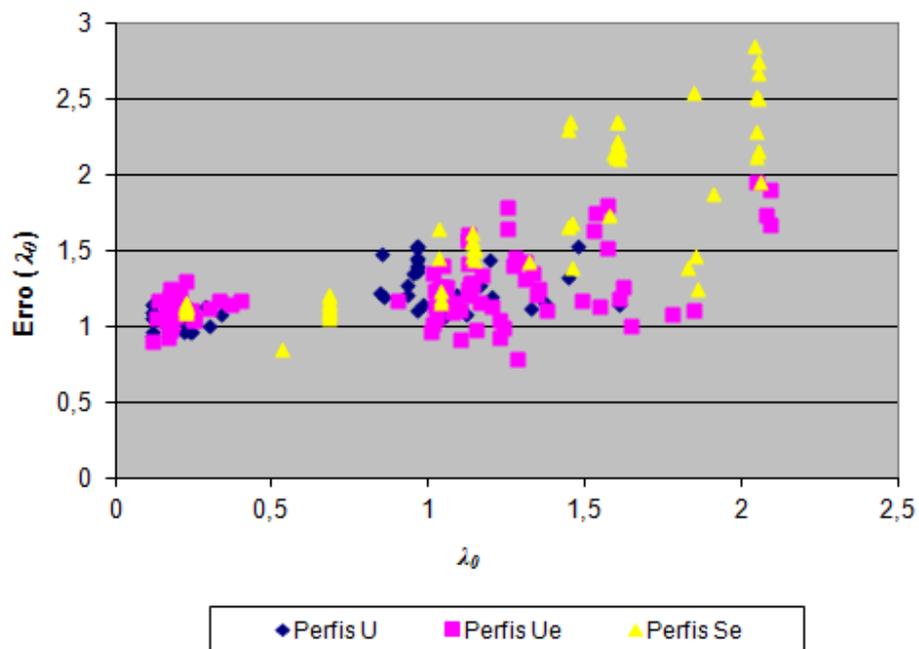


Figura 5.10 – Relação entre o erro do modelo de cálculo 3 com o índice de esbeltez reduzido da barra

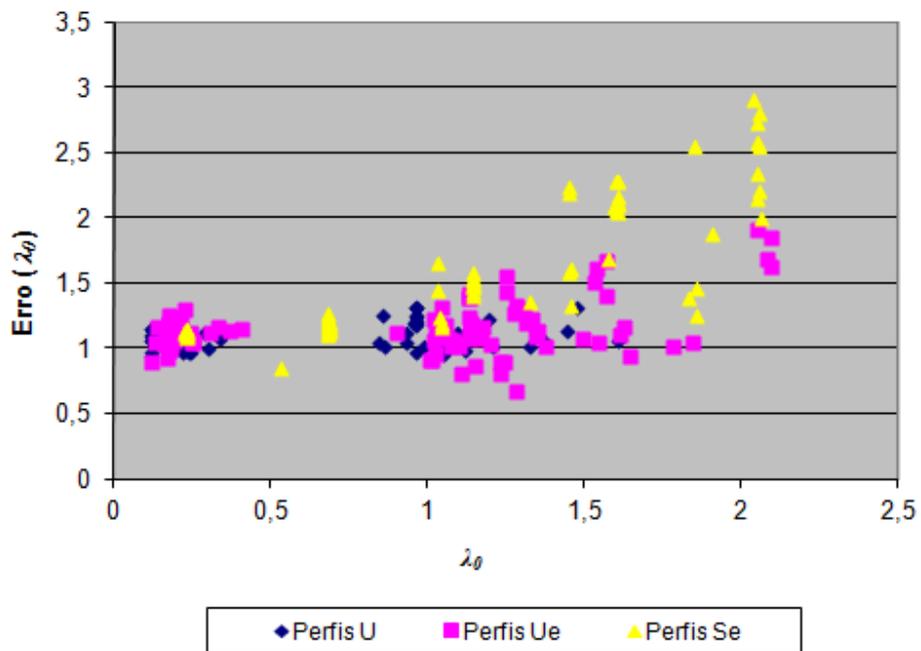


Figura 5.11 – Relação entre o erro do modelo de cálculo 4 com o índice de esbeltez reduzido da barra

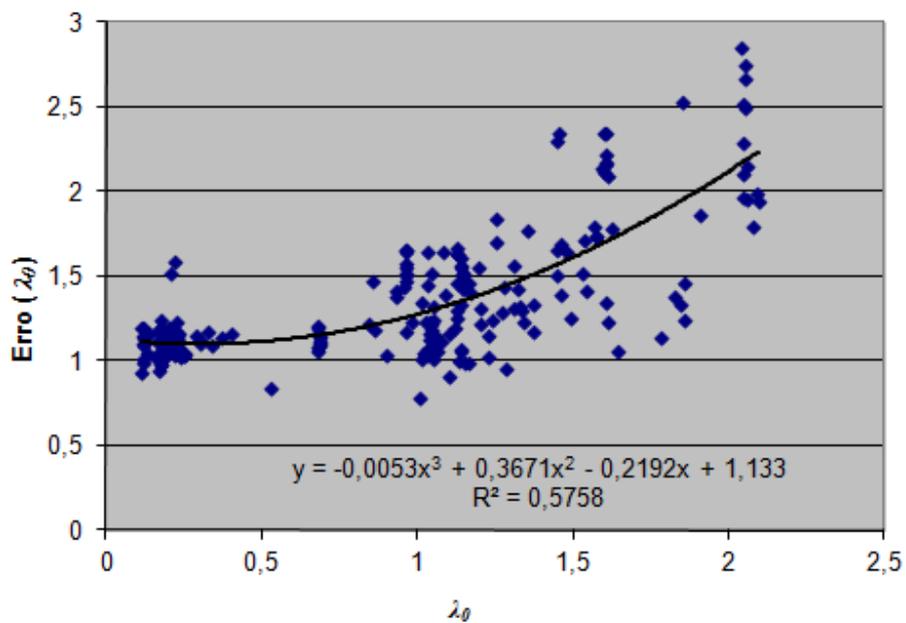


Figura 5.12 – Regressão obtida para o erro do modelo 1

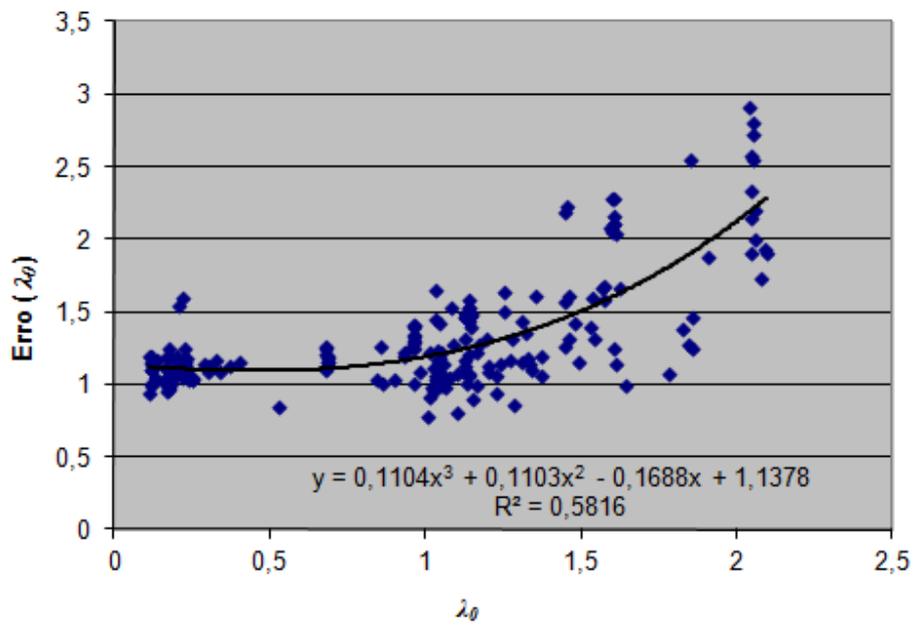


Figura 5.13 – Regressão obtida para o erro do modelo 2

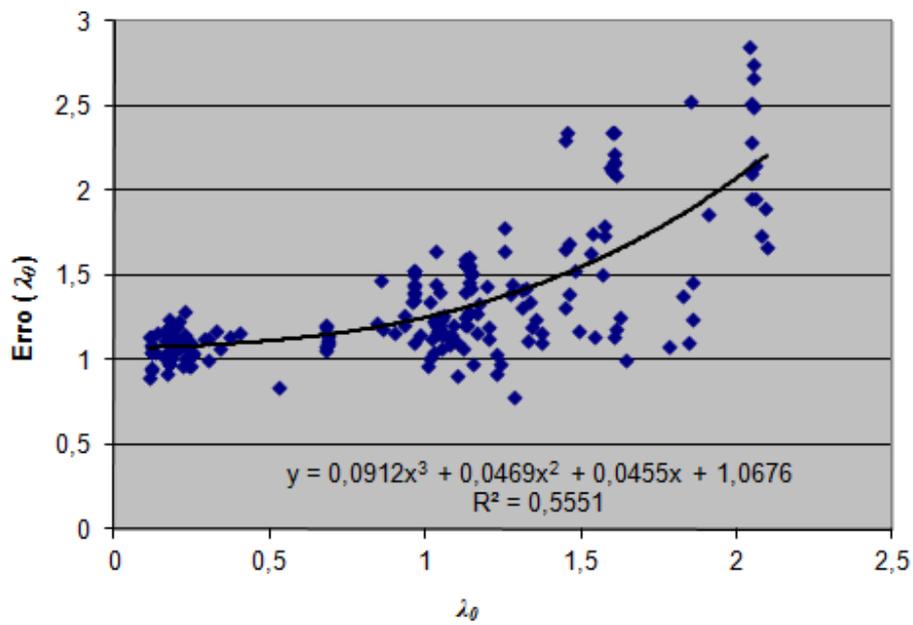


Figura 5.14 – Regressão obtida para o erro do modelo 3

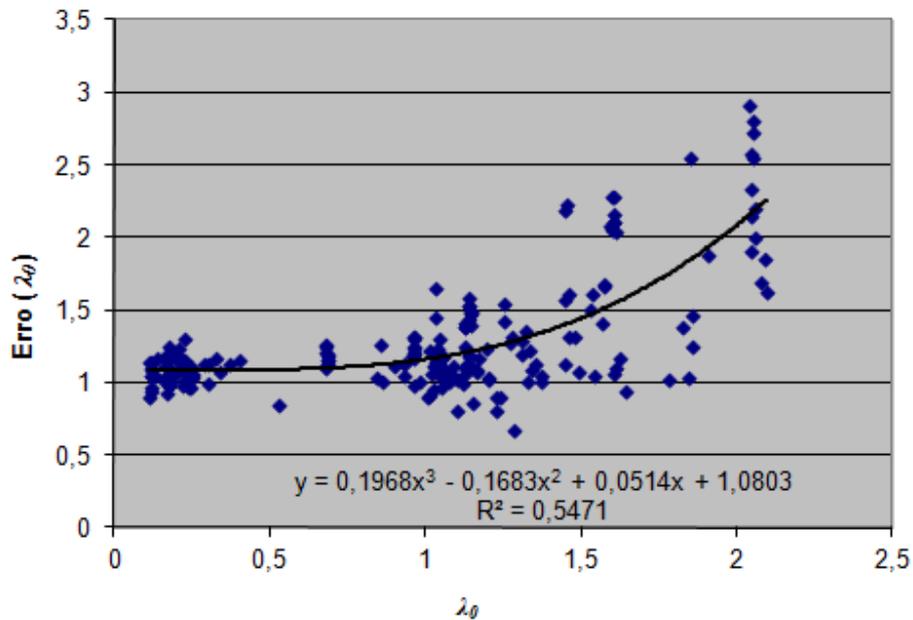


Figura 5.15 – Regressão obtida para o erro do modelo 4

Tabela 5.12 – Expressões obtidas para o erro dos modelos de cálculo

Modelo	$e_{m,i(d)}$ (para $i = 1$ a 4)	R^2
1	$e_{m,1(d)} = -0,0053 \lambda_0^3 + 0,3671 \lambda_0^2 - 0,2192 \lambda_0 + 1,1330$ (5.1)	0,5758
2	$e_{m,2(d)} = 0,1104 \lambda_0^3 + 0,1103 \lambda_0^2 - 0,1688 \lambda_0 + 1,1378$ (5.2)	0,5816
3	$e_{m,3(d)} = 0,0912 \lambda_0^3 + 0,0469 \lambda_0^2 + 0,0455 \lambda_0 + 1,0676$ (5.3)	0,5551
4	$e_{m,4(d)} = 0,1968 \lambda_0^3 - 0,1683 \lambda_0^2 + 0,0514 \lambda_0 + 1,0803$ (5.4)	0,5471

Com base nas Figuras (5.12) à (5.15), pode-se observar uma tendência de crescimento do erro do modelo com o aumento do índice de esbelteza reduzido da barra, λ_0 , nos perfis estudados.

Analisando simultaneamente esta tendência média do erro associado aos quatro modelos de cálculo, eqs. (5.1) à (5.4), obtém-se as curvas representadas na Figura 5.16. Observa-se nesses gráficos um comportamento muito similar entre eles, havendo uma maior proximidade entre os modelos de cálculo 1 e 3 e dos modelos 2 e 4. Ou seja, o MLE e o MRD descrevem de forma quase semelhante o fenômeno da flambagem local nos perfis estudados; ao passo que as curvas de dimensionamento da flambagem global apresentadas na ABNT NBR 14762:2001 (originadas do EUROCODE 3) e a curva única de

dimensionamento apresentada na ABNT NBR 14762:2010 (baseada no AISI) demonstram uma ligeira diferenciação entre elas.

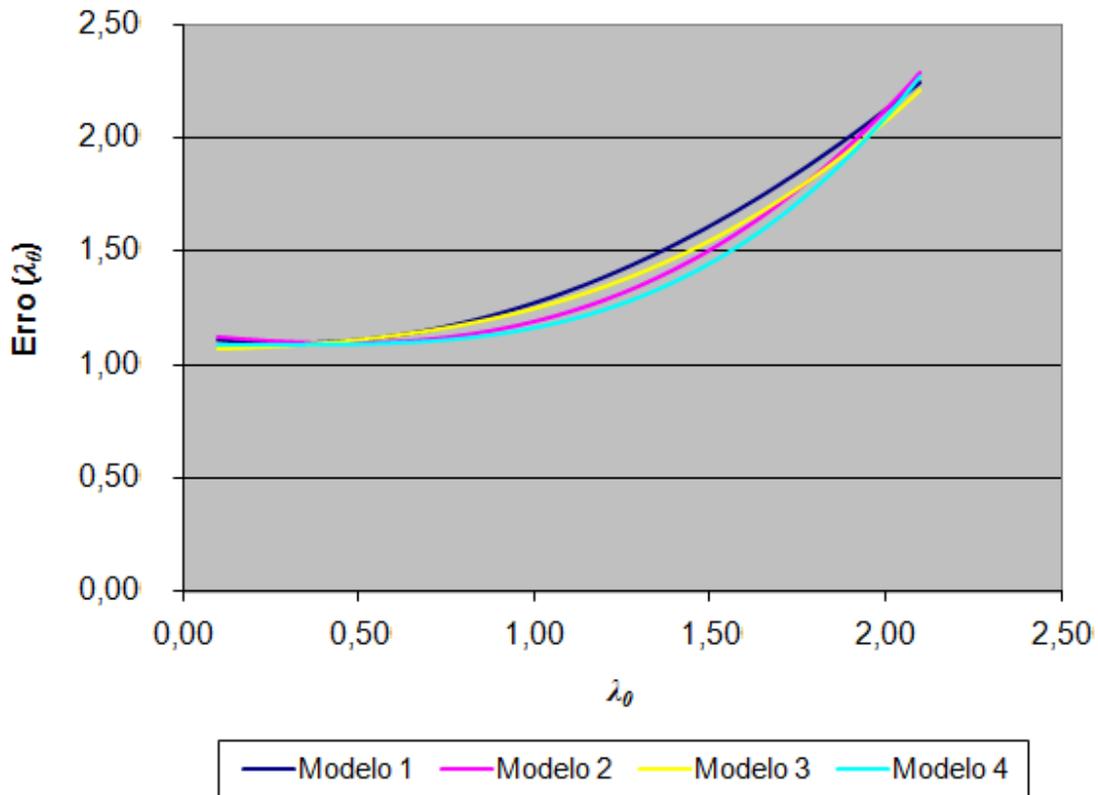


Figura 5.16 – Comparação entre as curvas obtidas para o valor médio encontrado para o erro dos modelos

Assim, a variável aleatória erro do modelo, $e_{m,i}$, pode ser representada por uma tendência central e a dispersão (resíduo) em torno desta estimativa. Esta tendência central, $e_{m,i(d)}$, é representada de forma determinística pelas eqs. (5.1) à (5.4); já a dispersão, $e_{m,i(a)}$, deve ser representada por uma variável aleatória. Ou seja, o erro do modelo pode ser expresso como:

$$e_{m,i} = e_{m,i(d)} + e_{m,i(a)} \quad (\text{para } i = 1, 2, 3 \text{ e } 4) \quad (5.5)$$

Com relação à variável aleatória $e_{m,i(a)}$, a sua descrição probabilística demanda o conhecimento da distribuição de probabilidade a ela associada e os respectivos parâmetros desta distribuição. As Figuras (5.17) a (5.20) apresentam os histogramas correspondentes a

esta variável, obtido a partir de seu resíduo (diferença entre o erro do modelo observado e o correspondente valor de $e_{m,i(d)}$).

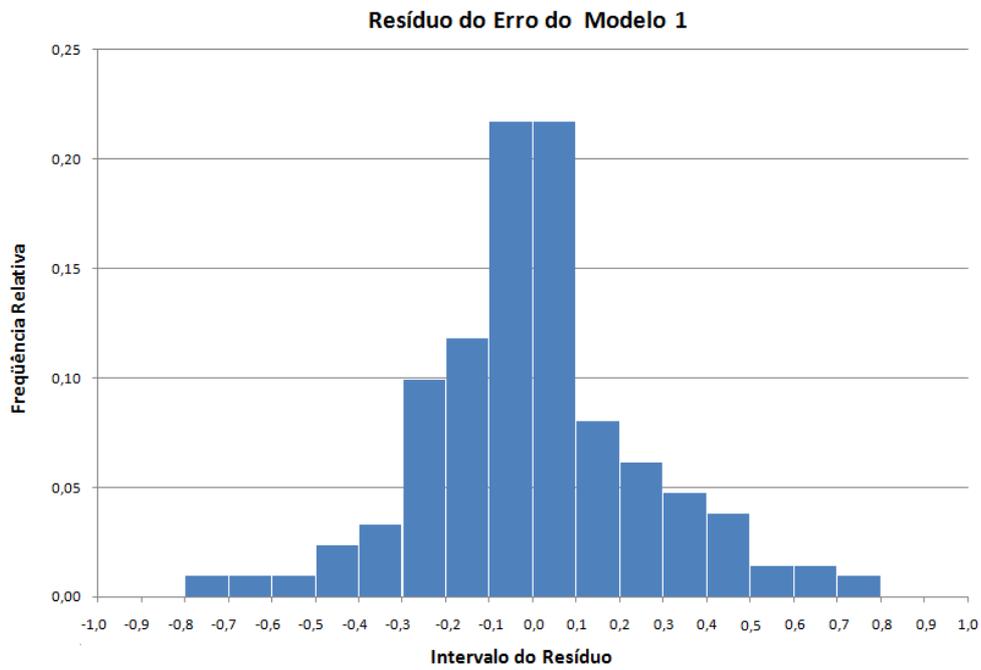


Figura 5.17 – Histograma da variável aleatória $e_{m,1(a)}$

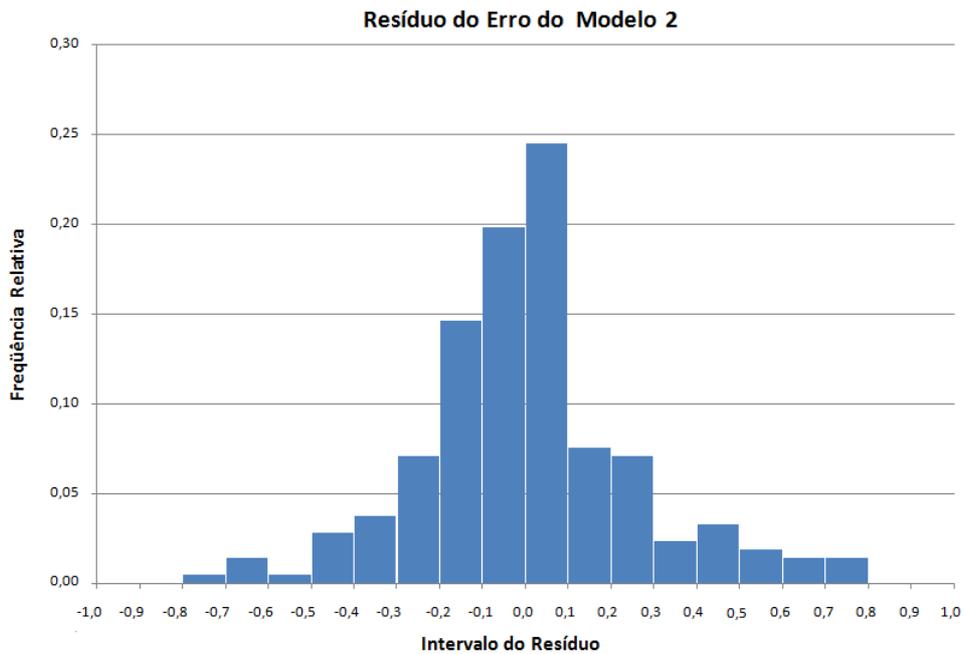


Figura 5.18 – Histograma da variável aleatória $e_{m,2(a)}$

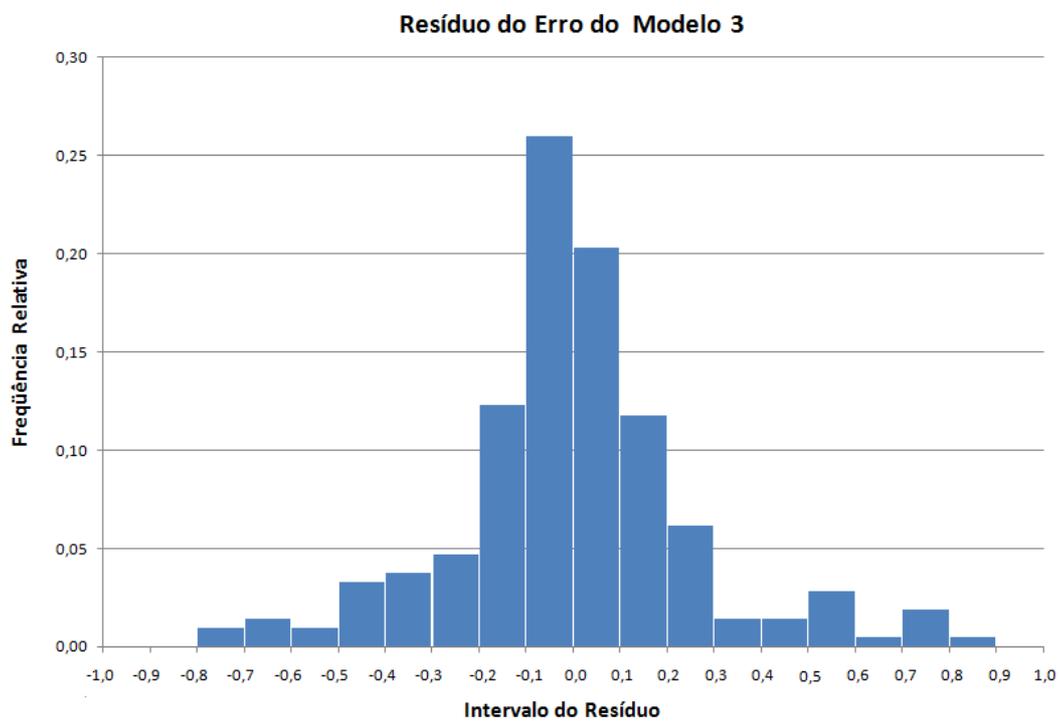


Figura 5.19 – Histograma da variável aleatória $e_{m,3}(a)$

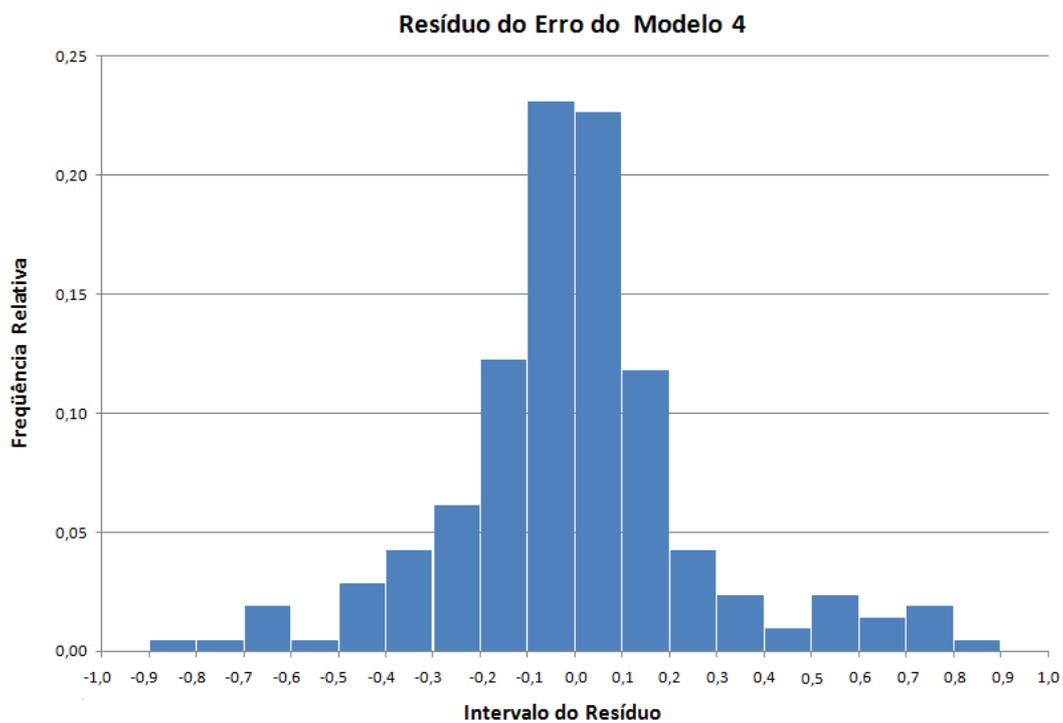


Figura 5.20 – Histograma da variável aleatória $e_{m,4}(a)$

Pode-se observar através destes histogramas que os resíduos obtidos apresentam certa simetria em sua distribuição. Assim, a distribuição de probabilidade normal será considerada neste trabalho para descrever a variável $e_{m,i(a)}$, para os quatro modelos de cálculo investigados. Esta distribuição tem média zero e desvio padrão dado pelo erro padrão da estimativa, $S_{e,i}$, (eq. 5.6).

$$S_{e,i} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (e_{obs,i} - e_{m,i(d)})^2}{n-2}} \quad (\text{para } i = 1, 2, 3 \text{ e } 4) \quad (5.6)$$

onde:

n = total de ensaios;

$e_{obs,i}$ = valor do erro do modelo observado (para $i = 1$ a 4).

Com base nos gráficos das Figuras (5.12) a (5.15), observa-se que a menor dispersão do erro do modelo ocorre para pequenos valores do índice de esbeltez da barra, λ_0 . Portanto, pode-se esperar que o erro padrão da estimativa (desvio padrão de $e_{m,i(a)}$), $S_{e,i}$, também seja dependente de λ_0 . Para tal, três regiões foram definidas para o cálculo de $S_{e,i}$ e os resultados são apresentados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Erro padrão da estimativa, $S_{e,i}$, para o erro dos modelos de cálculo

$S_{e,i}$	$0,10 \leq \lambda_0 \leq 0,70$	$0,70 < \lambda_0 \leq 1,40$	$1,40 < \lambda_0 \leq 2,10$
$i = 1$	0,11	0,24	0,43
$i = 2$	0,11	0,21	0,45
$i = 3$	0,08	0,21	0,48
$i = 4$	0,09	0,20	0,49
Total de perfis	76	90	46

A partir desta tabela pode-se observar que uma menor dispersão é apresentada no intervalo $0,10 \leq \lambda_0 \leq 0,70$, com um total de 76 perfis. Observa-se que os modelos 1 e 2 apresentaram valores idênticos (0,11), e que os modelos 3 e 4 obtiveram valores praticamente semelhantes (0,08 e 0,09, respectivamente). No segundo trecho ($0,70 < \lambda_0 \leq 1,40$), com 90 perfis analisados, a dispersão aumenta. Neste intervalo os modelos apresentam uma

variação de 0,20 (modelo 4) a 0,24 (modelo 1). Já no terceiro trecho ($1,40 < \lambda_0 \leq 2,10$), com 46 perfis, o erro padrão da estimativa, $S_{e,i}$, fica no intervalo de 0,43 (modelo 1) a 0,49 (modelo 4).

Até o momento, os resultados obtidos consideraram o valor recomendado para o coeficiente de flambagem global por flexão no caso das barras bi engastadas ($K_x = 0,65$ para os perfis U e Ue). Este valor considera o fato de que não existem ligações com engastamento perfeito numa estrutura. Assim, as Figuras (5.21) a (5.24) apresentam uma comparação da tendência média do erro do modelo considerando o valor teórico e o recomendado, correspondentes ao caso de uma barra bi engastada, para o coeficiente de flambagem global por flexão em torno do eixo principal x . Nestes gráficos, K_y é adotado igual a 1,00 em todos os perfis estudados, retratando a condição das barras bi rotuladas.

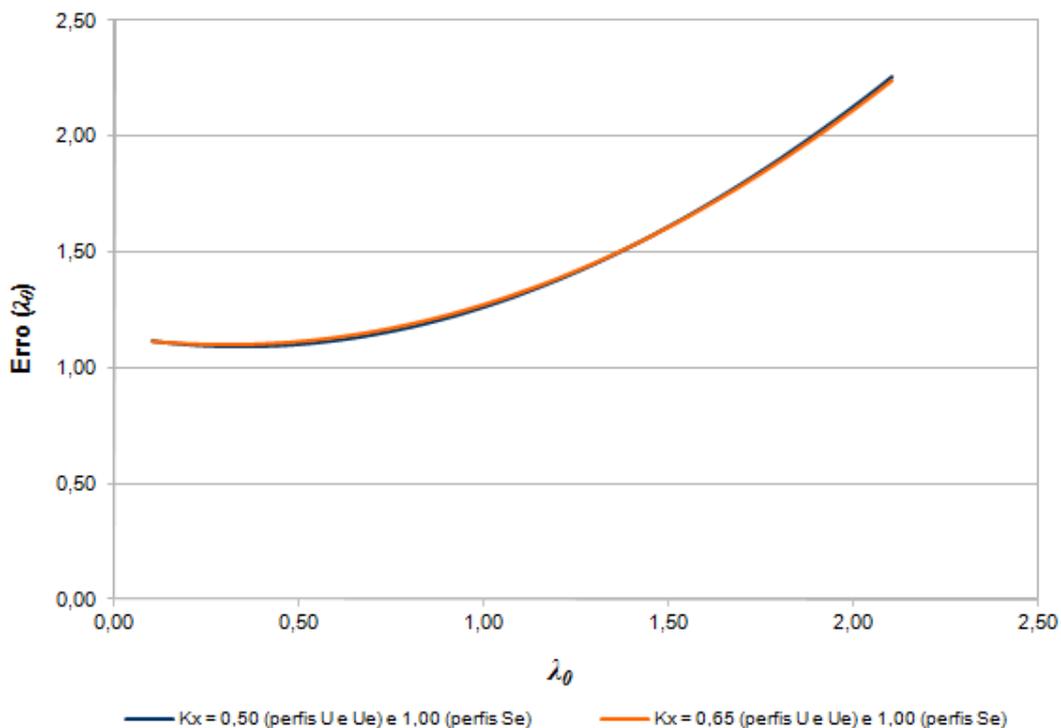


Figura 5.21 – Comparação da tendência média do erro do modelo 1 para os valores teórico e recomendado de K_x

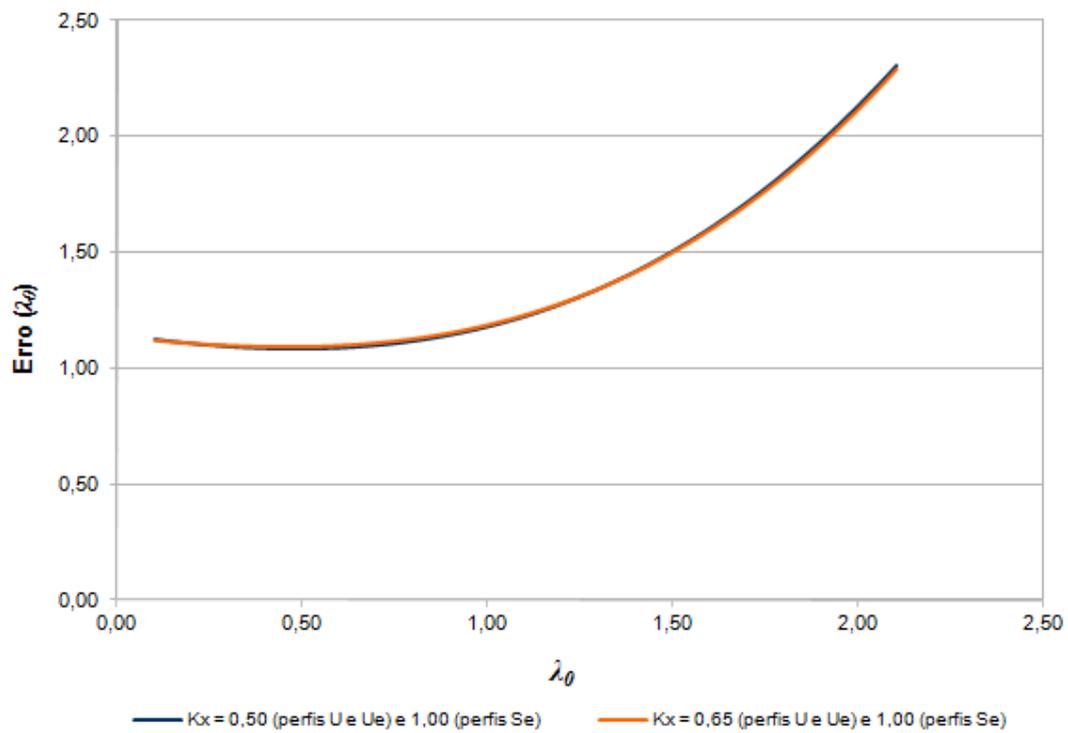


Figura 5.22 – Comparação da tendência média do erro do modelo 2 para os valores teórico e recomendado de K_x

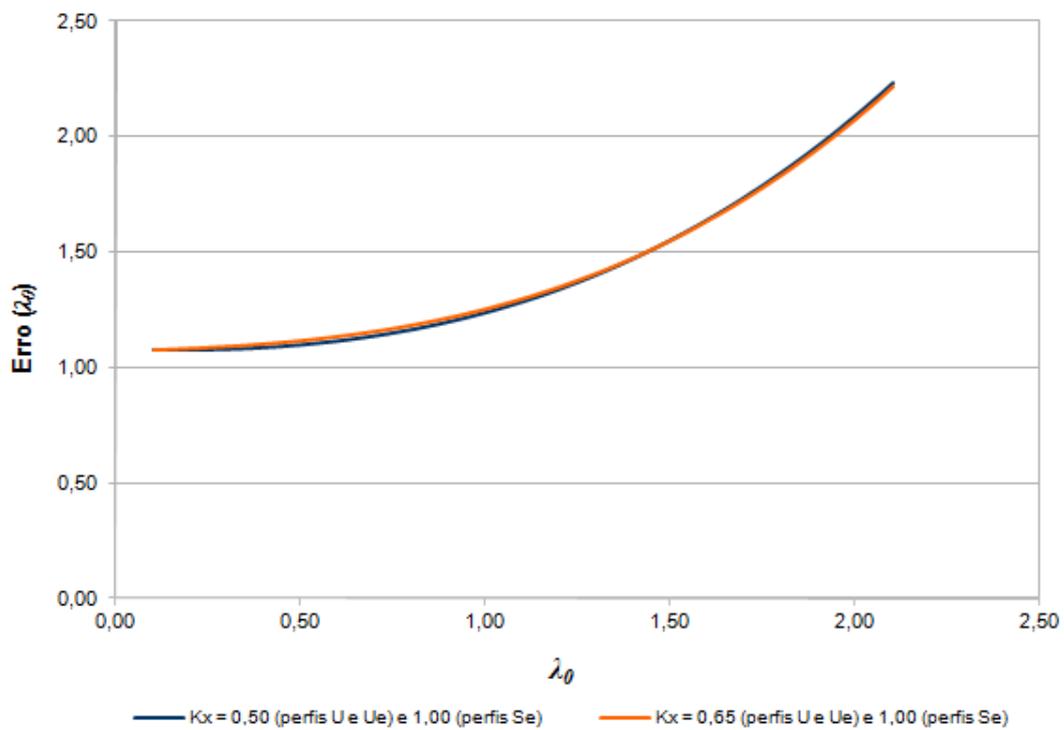


Figura 5.23 – Comparação da tendência média do erro do modelo 3 para os valores teórico e recomendado de K_x

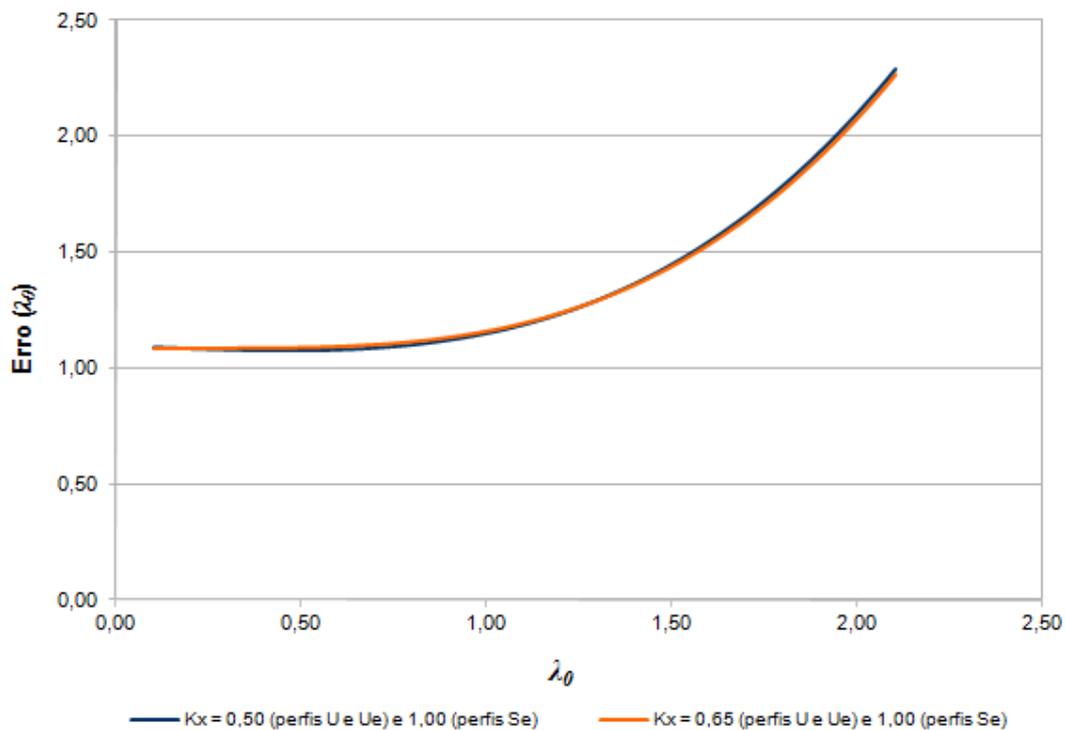


Figura 5.24 – Comparação da tendência média do erro do modelo 4 para os valores teórico e recomendado de K_x

De maneira complementar, a Tabela 5.14 apresenta uma comparação da dispersão do erro do modelo considerando o valor teórico e o recomendado para o coeficiente de flambagem global por flexão em torno do eixo principal x .

Tabela 5.14 – Comparação da dispersão do erro do modelo considerando os valores teórico e recomendado de K_x

Modelo	$0,10 \leq \lambda_0 \leq 0,70$		$0,70 < \lambda_0 \leq 1,40$		$1,40 < \lambda_0 \leq 2,10$	
	K_x teórico	K_x recomendado	K_x teórico	K_x recomendado	K_x teórico	K_x recomendado
1	0,106	0,107	0,238	0,236	0,433	0,434
2	0,111	0,110	0,207	0,207	0,447	0,449
3	0,083	0,083	0,210	0,206	0,476	0,478
4	0,089	0,087	0,204	0,202	0,490	0,494

K_x teórico = 0,50 (perfis U e Ue) e 1,00 (perfis Se)

K_x recomendado = 0,65 (perfis U e Ue) e 1,00 (perfis Se)

Com base nas Figuras (5.21) a (5.24) e na Tabela 5.14, não foi observado nenhuma alteração significativa ao se comparar os resultados obtidos com o valor teórico e o recomendado de K_x para os perfis U e Ue. Isto ocorre porque o eixo principal x dos perfis estudados é aquele de maior momento de inércia da seção, tendo os perfis que flambaram globalmente apresentado instabilidade predominantemente por flexão em torno do eixo principal y .

Assim, uma possível causa para o crescimento do erro do modelo com o aumento do índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global, observado nos perfis estudados, são as reais condições de restrições nas rótulas das extremidades das barras ensaiadas. Uma vez que não existem rótulas perfeitas, a resistência à rotação destas contribuem para aumentar a capacidade de carga de uma coluna, fato este não considerado no cálculo das forças axiais de flambagem global elástica (ver Tabela 2.1). Segundo Pimenta (1997), tem-se ainda que quanto maior for o comprimento de uma coluna, mais significantes tornam-se os efeitos devido às restrições à rotação nas suas extremidades.

Neste intuito, no item 5.4.4, será investigada a influência das condições de restrição das rótulas de extremidades das barras, por meio dos coeficientes de flambagem global por flexão K_x e K_y , no comportamento do erro do modelo.

5.4.4 A influência do coeficiente de flambagem global por flexão sobre o erro do modelo

Com o propósito de sondar a influência das condições de restrição nas rótulas de extremidades das barras sobre o comportamento do erro do modelo, foi atribuído ao coeficiente de flambagem global por flexão um valor diferente ao mostrado na Tabela 2.1 para o caso das barras bi rotuladas (K_x e K_y iguais a 1,00). Assim, adotou-se para esse coeficiente, correspondente às barras bi rotuladas, um valor inferior ao unitário, sendo K_x e K_y considerados como 0,70 para os perfis estudados na presente pesquisa.

A partir dos novos valores calculados para a força axial de compressão resistente dos PFF (adotando: $K_x = K_y = 0,70$ para os perfis Se; $K_x = 0,65$ e $K_y = 0,70$ para os perfis U e Ue) e dos resultados experimentais apresentados no capítulo 4, tem-se na Tabela 5.15 a descrição estatística do erro do modelo obtida, através da planilha desenvolvida, para cada um dos quatro modelos de cálculo considerados no capítulo 2.

Tabela 5.15 – Descrição estatística do erro do modelo considerando os novos valores de K_x e K_y

Parâmetro	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Média	1,12	1,09	1,08	1,05
Desvio Padrão	0,15	0,14	0,13	0,13
Coefficiente de Variação (COV)	0,13	0,13	0,12	0,12
Valor Máximo	1,58	1,59	1,52	1,44
Valor Mínimo	0,68	0,64	0,68	0,64

Nas Figuras (5.25) a (5.28) são apresentados os histogramas correspondentes à variável erro do modelo, referente a cada um dos quatro modelos estudados. A partir destes gráficos, pode-se observar certa simetria em sua distribuição, dando indícios de que a adoção de uma distribuição de probabilidade normal pode ser adequada para a descrição do fenômeno em análise. No itens B.1 a B.4 do anexo B, é realizado um teste de aderência (do tipo Qui-quadrado) dando suporte a esta hipótese com um nível de significância variando entre 22,10% a 43,31%.

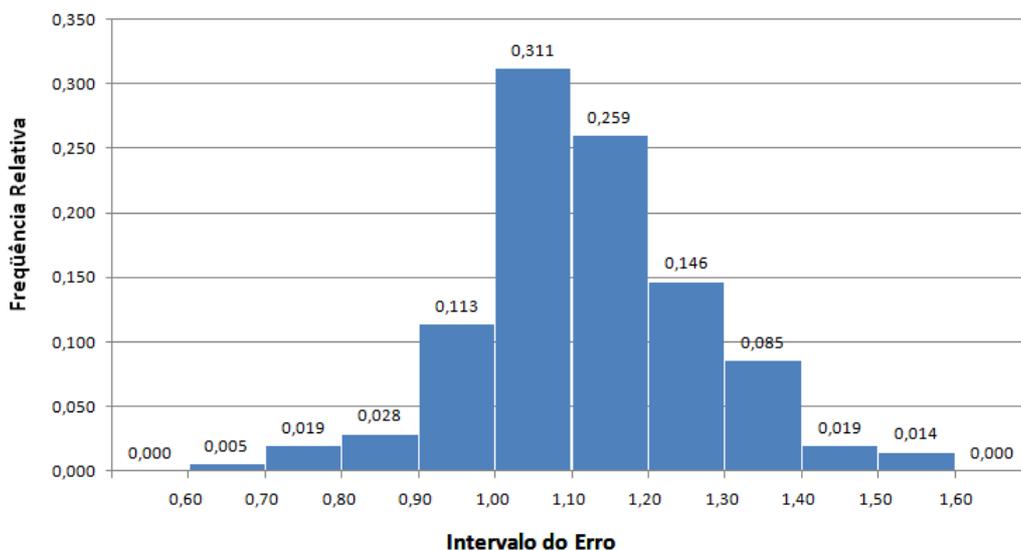


Figura 5.25 – Histograma referente ao erro do modelo de cálculo 1 considerando os novos valores de K_x e K_y

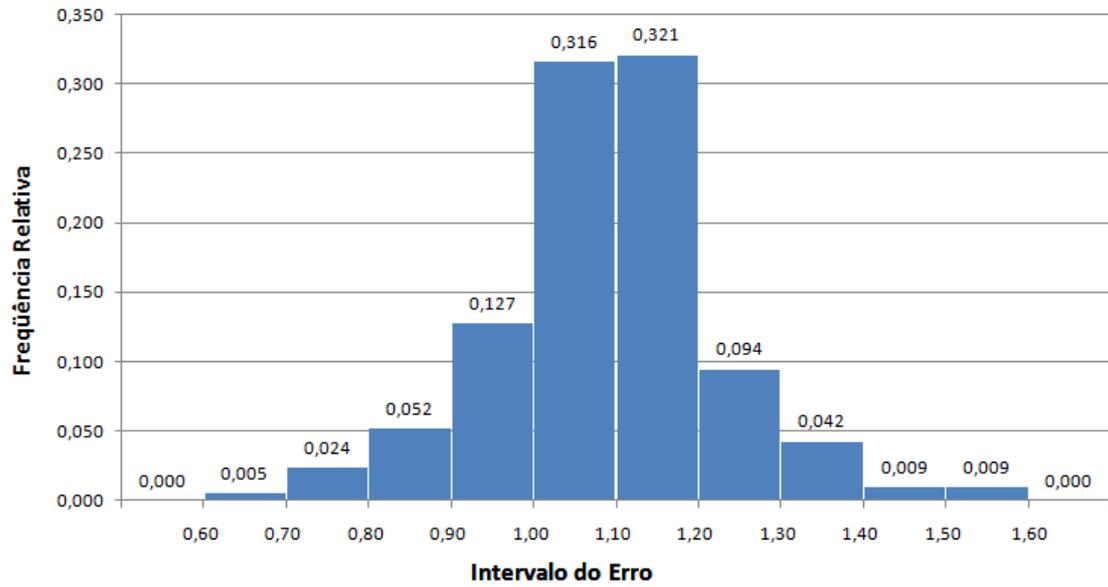


Figura 5.26 – Histograma referente ao erro do modelo de cálculo 2 considerando os novos valores de K_x e K_y

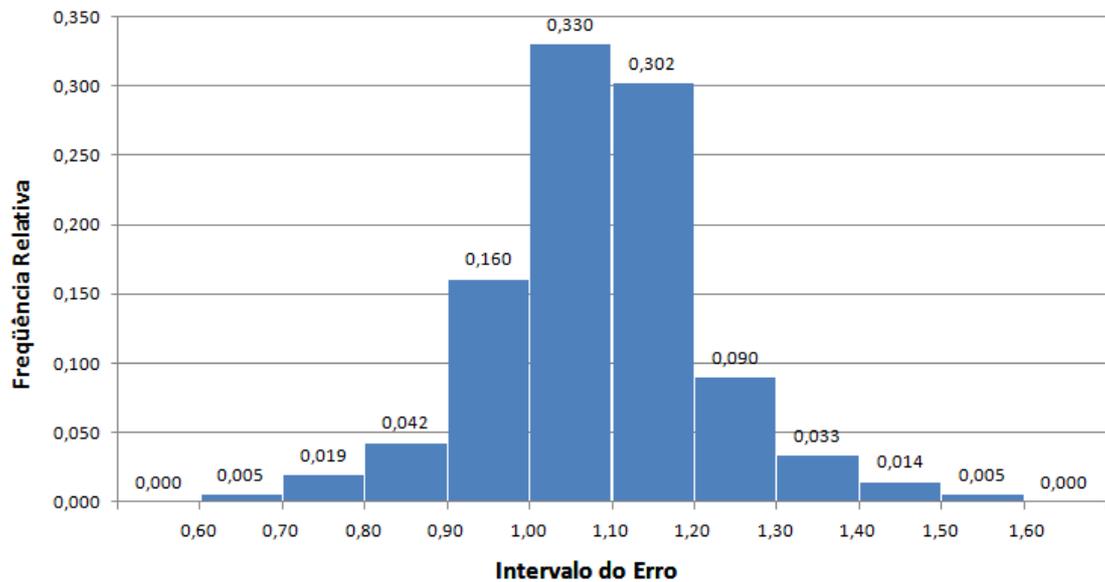


Figura 5.27 – Histograma referente ao erro do modelo de cálculo 3 considerando os novos valores de K_x e K_y

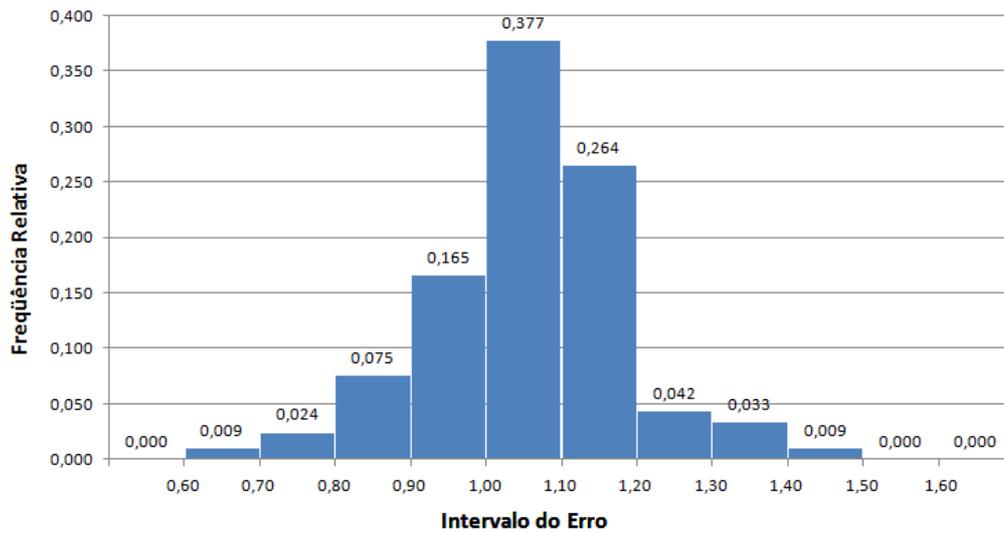


Figura 5.28 – Histograma referente ao erro do modelo de cálculo 4 considerando os novos valores de K_x e K_y

No intuito de observar o comportamento da média e da dispersão do fator profissional nos perfis estudados, foi investigada a nova relação existente entre a variável aleatória erro do modelo (considerando: $K_x = K_y = 0,70$ para os perfis Se; $K_x = 0,65$ e $K_y = 0,70$ para os perfis U e Ue) e o índice de esbeltez reduzido da barra, λ_0 . As Figuras (5.29) a (5.32) apresentam os resultados gráficos desta investigação.

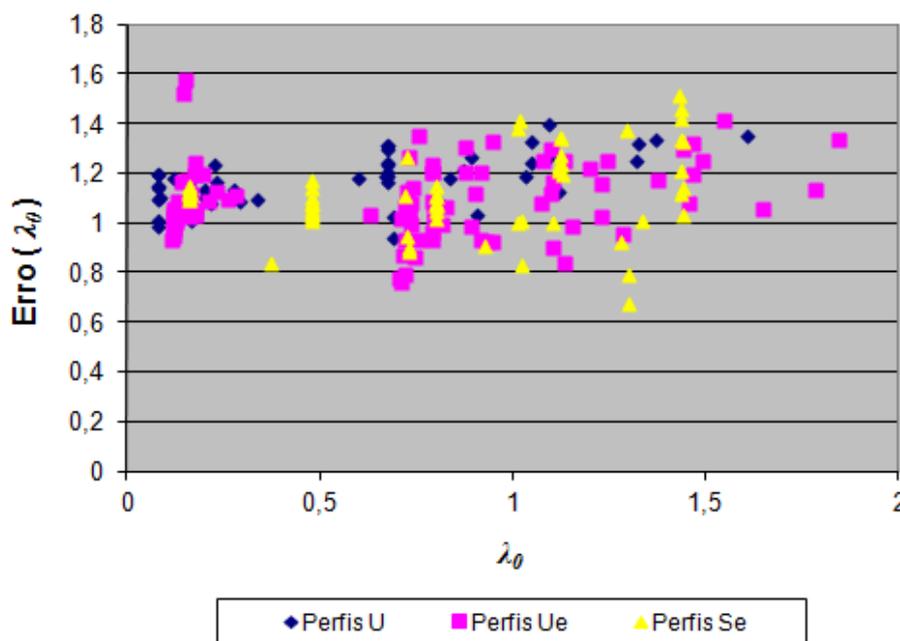


Figura 5.29 – Nova relação entre o erro do modelo de cálculo 1 com o índice de esbeltez reduzido da barra

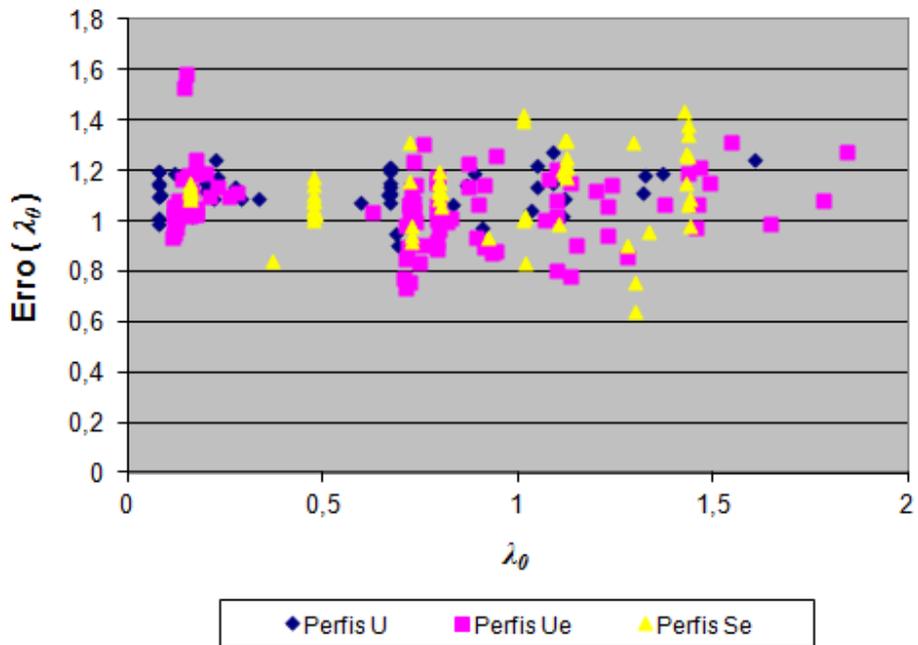


Figura 5.30 – Nova relação entre o erro do modelo de cálculo 2 com o índice de esbeltez reduzido da barra

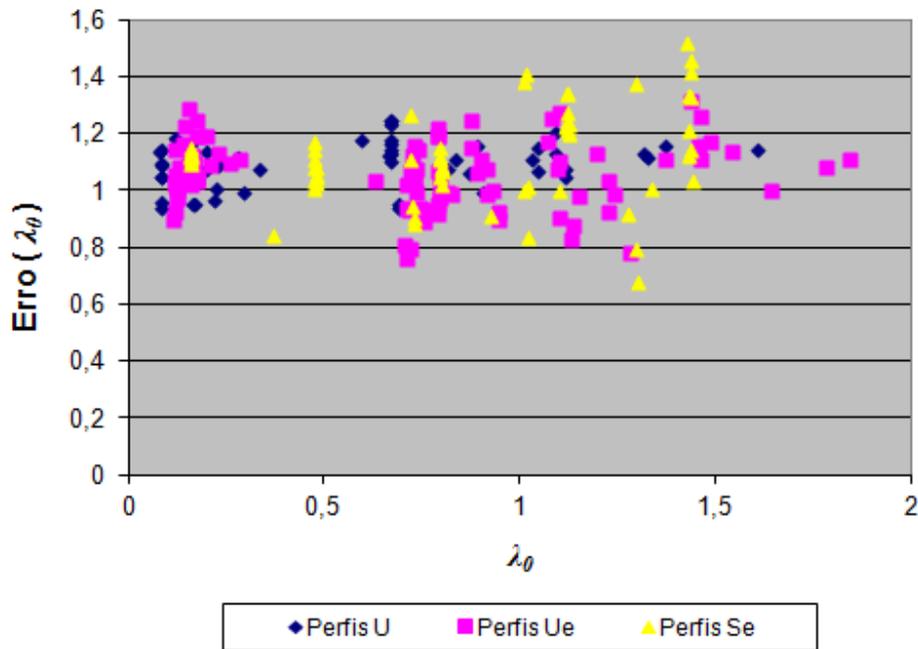


Figura 5.31 – Nova relação entre o erro do modelo de cálculo 3 com o índice de esbeltez reduzido da barra

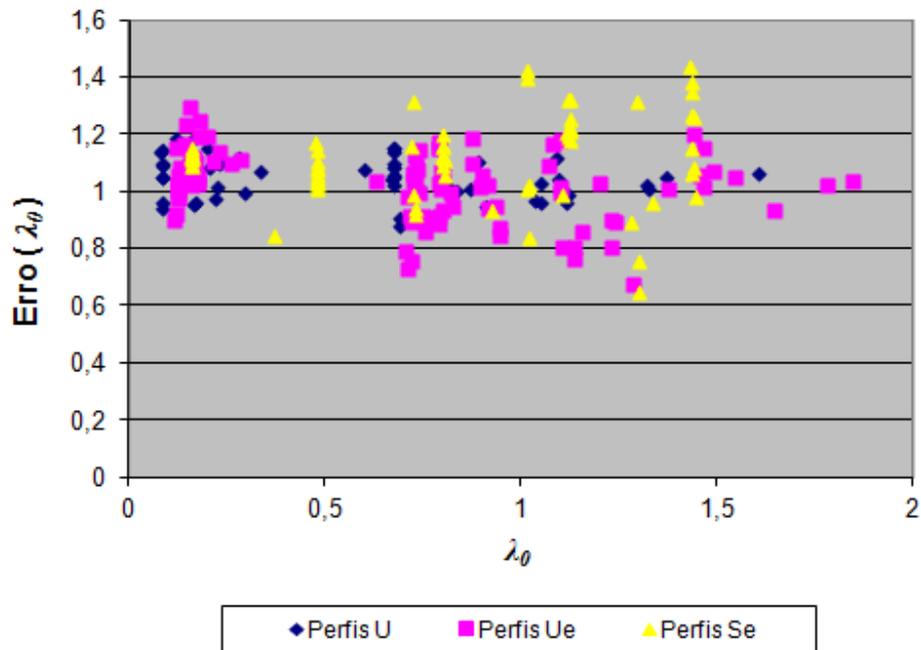


Figura 5.32 – Nova relação entre o erro do modelo de cálculo 4 com o índice de esbeltez reduzido da barra

Com base nestes dados, pode-se observar nos gráficos das Figuras (5.33) a (5.36) que o erro do modelo permanece praticamente constante com o aumento do índice de esbeltez reduzido da barra, λ_0 .

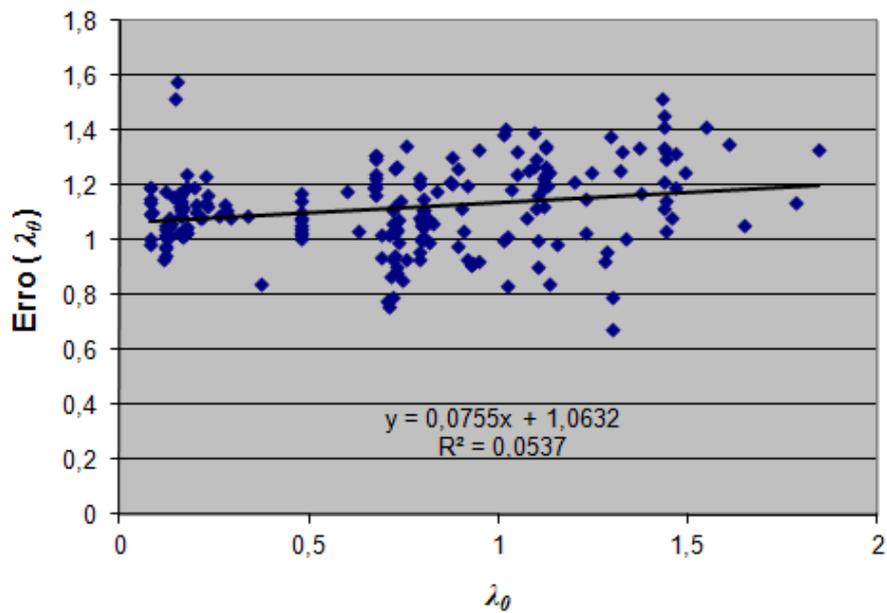


Figura 5.33 – Regressão obtida para o erro do modelo 1 considerando os novos valores de K_x e K_y

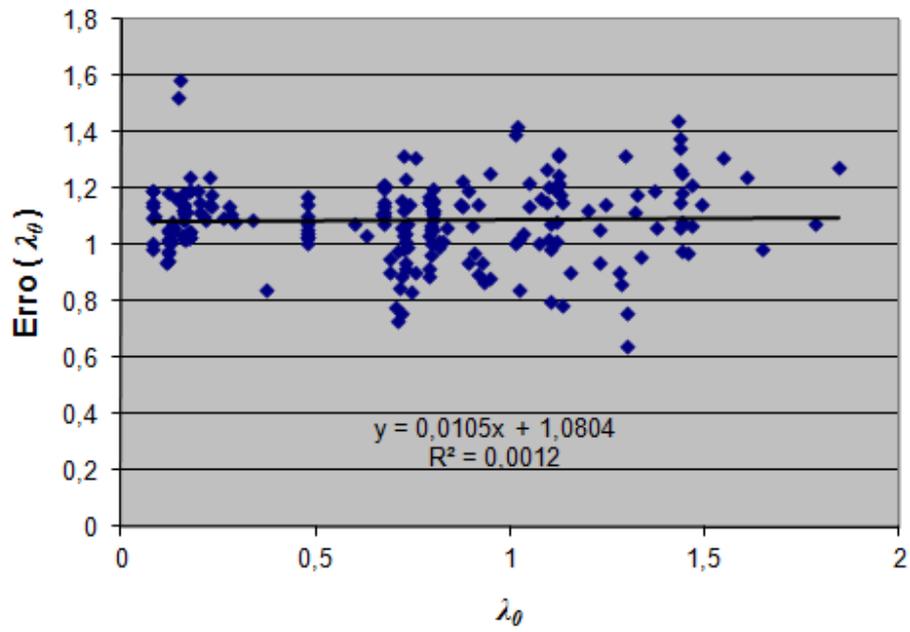


Figura 5.34 – Regressão obtida para o erro do modelo 2 considerando os novos valores de K_x e K_y

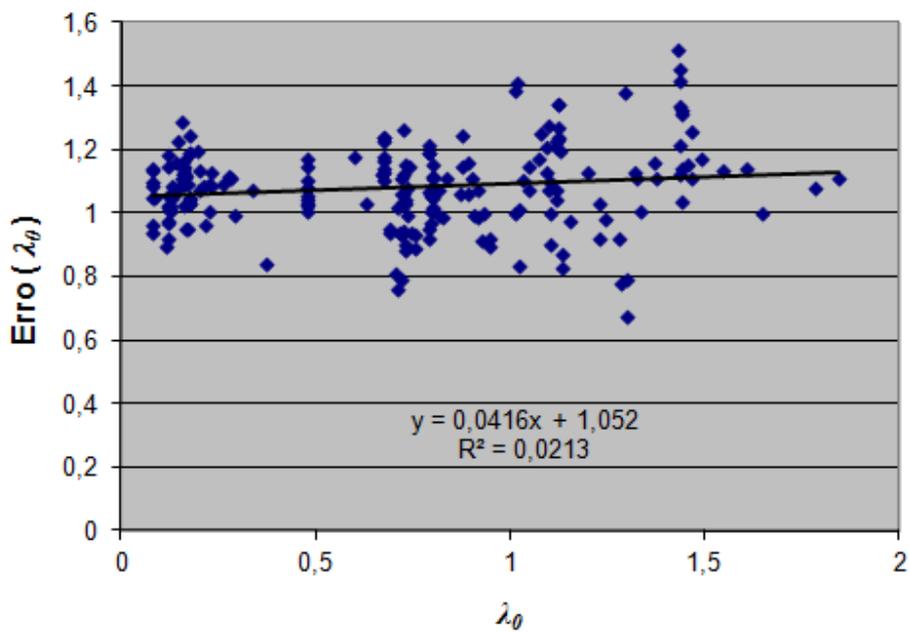


Figura 5.35 – Regressão obtida para o erro do modelo 3 considerando os novos valores de K_x e K_y

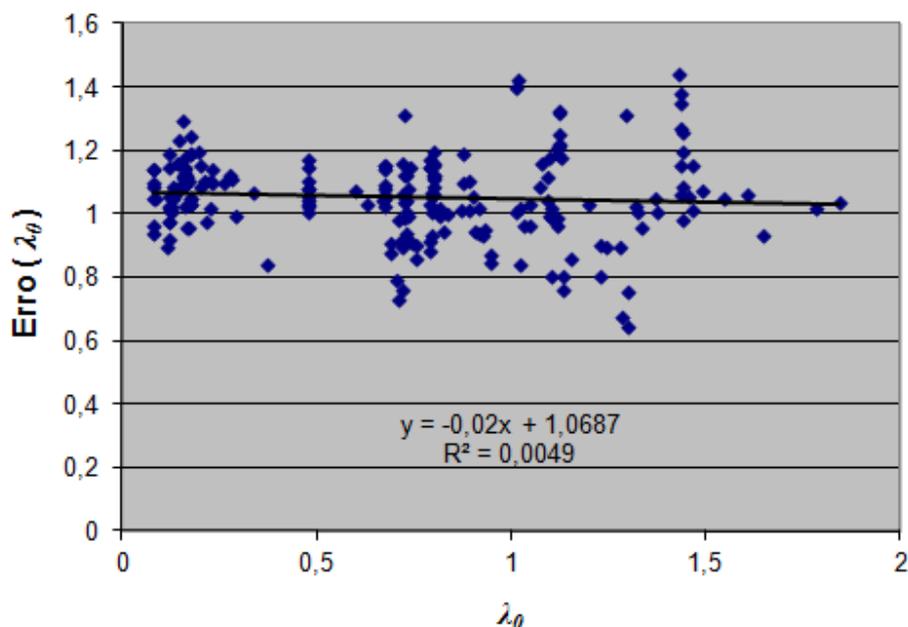


Figura 5.36 – Regressão obtida para o erro do modelo 4 considerando os novos valores de K_x e K_y

A Tabela 5.16 apresenta a expressão obtida, via regressão linear, para a tendência média do erro de cada modelo de cálculo analisado, eqs. (5.7) a (5.10), e o seu respectivo coeficiente de determinação, R^2 . Ressalta-se que quanto mais próximo de zero o valor de R^2 , mais uma reta tende a uma inclinação horizontal.

Tabela 5.16 – Expressões obtidas para o erro dos modelos de cálculo considerando os novos valores de K_x e K_y

Modelo	$e_{m,i(d)}$ (para $i = 1$ a 4)	R^2
1	$e_{m,1(d)} = 0,0755 \lambda_0 + 1,0632$ (5.7)	0,0537
2	$e_{m,2(d)} = 0,0105 \lambda_0 + 1,0804$ (5.8)	0,0012
3	$e_{m,3(d)} = 0,0416 \lambda_0 + 1,0520$ (5.9)	0,0213
4	$e_{m,4(d)} = -0,0200 \lambda_0 + 1,0687$ (5.10)	0,0049

Analisando simultaneamente a tendência média do erro associado aos quatro modelos de cálculo, eqs. (5.7) a (5.10), obtém-se as curvas representadas na Figura 5.37. Por comparação, observa-se que o modelo de cálculo 2 apresenta um valor quase constante para a tendência média do fator profissional ao longo do índice de esbeltez reduzido da barra, λ_0 .

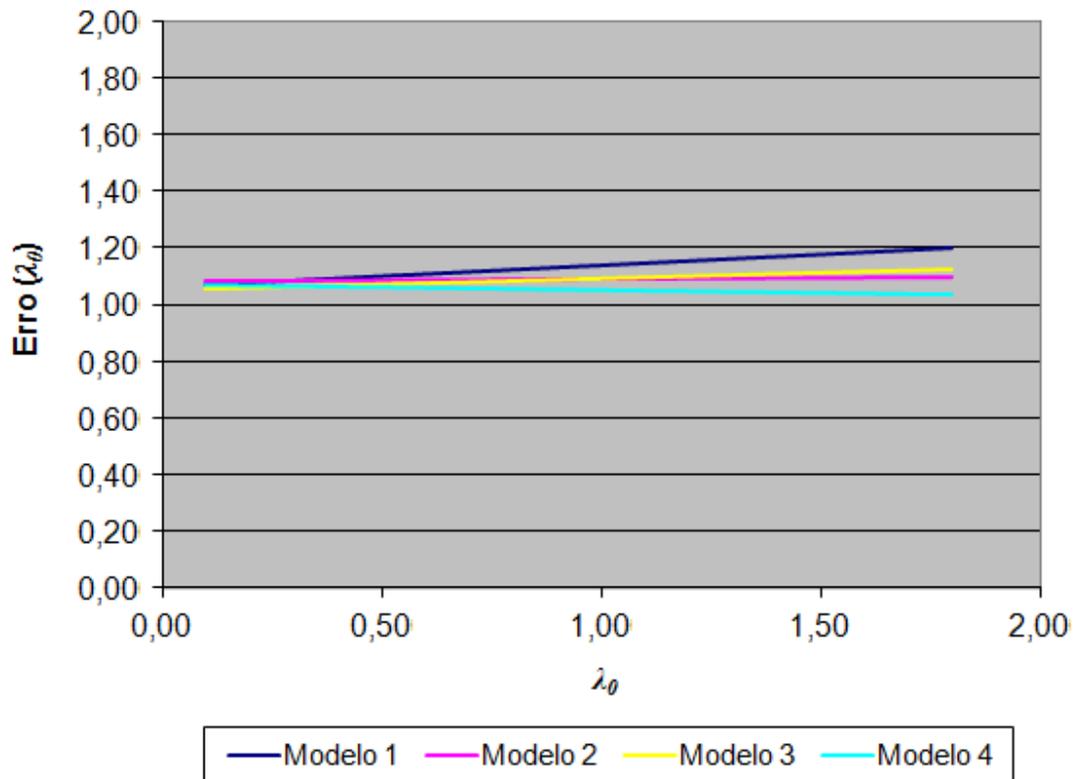


Figura 5.37 – Curvas obtidas para $e_{m,i(d)}$ considerando os novos valores de K_x e K_y

Referente ao comportamento do erro padrão da estimativa (desvio padrão de $e_{m,i(a)}$), a Tabela 5.17 apresenta os novos valores encontrados para $S_{e,i}$ ao longo do índice de esbelteza reduzido da barra, λ_0 .

Tabela 5.17 – Erro padrão da estimativa encontrado para o erro dos modelos considerando os novos valores de K_x e K_y

$S_{e,i}$	$0,08 \leq \lambda_0 \leq 0,50$	$0,50 < \lambda_0 \leq 1,00$	$1,00 < \lambda_0 \leq 1,85$
$i = 1$	0,11	0,15	0,18
$i = 2$	0,11	0,13	0,17
$i = 3$	0,08	0,12	0,18
$i = 4$	0,08	0,12	0,18
Total de perfis	76	73	63

Ao se confrontar os valores da Tabela 5.17 com os da Tabela 5.13, observa-se uma redução significativa na dispersão e na variação de $S_{e,i}$.

Por fim, a Tabela 5.18 apresenta de forma simplificada (retratando um comportamento constante ao longo de todo o intervalo de λ_0) os parâmetros encontrados para a descrição estatística da variável $e_{m,i}$, referentes aos perfis estudados.

Tabela 5.18 – Parâmetros encontrados para o erro do modelo, ao longo do intervalo $0,08 \leq \lambda_0 \leq 1,85$, considerando os novos valores de K_x e K_y

Modelo	Média	Desvio Padrão	COV	Distribuição
1	1,12	0,15	0,13	Normal
2	1,09	0,14	0,13	Normal
3	1,08	0,13	0,12	Normal
4	1,05	0,13	0,12	Normal

Assim, com base nos resultados encontrados neste item 5.4.4, pode-se verificar que as condições de restrição das rótulas de extremidades de uma barra, por meio dos coeficientes de flambagem global por flexão K_x e K_y , influenciam de forma significativa a variável aleatória erro do modelo.

5.5 Resumo do capítulo

Neste capítulo foi apresentada a descrição estatística das variáveis aleatórias básicas relacionadas com a força axial de compressão resistente dos PFF. Para tal, foram apresentados os fatores de material, de fabricação e profissional (erro do modelo) correspondentes a estas variáveis.

Para a resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade do aço, foram apresentados os fatores de material derivados do trabalho de Castanheira (2004). Referente às dimensões dos componentes da seção transversal dos PFF e o comprimento das barras, o fator de fabricação de cada uma destas variáveis foi gerado a partir do banco de dados do capítulo 4. Já o erro do modelo (fator profissional), $e_{m,i}$, resultou da razão entre a força axial de compressão resistente obtida experimentalmente para cada perfil, $N_{c,Exp}$ (também disponibilizada no banco de dados do capítulo 4), e a sua correspondente força axial de compressão resistente calculada, $N_{c,Ri}$ (eq. 2.32), segundo cada um dos modelos estudados.

No caso em particular do erro do modelo, observou-se nos perfis estudados uma relação existente entre esta variável aleatória e o índice de esbeltez reduzido da barra, λ_0 . À medida em que o valor de λ_0 cresce, aumentam também a tendência média e a dispersão de $e_{m,i}$. Uma justificativa encontrada e verificada para a ocorrência deste comportamento se deve às condições de restrições nas extremidades da barra. Uma vez que não existem rótulas perfeitas, a resistência à rotação destas contribuem para aumentar a capacidade de carga de uma coluna. Segundo Pimenta (1997), tem-se ainda que quanto maior for o comprimento de uma coluna, mais significantes tornam-se os efeitos devido às restrições à rotação nas suas extremidades.

Por fim, a descrição estatística encontrada para as variáveis aleatórias básicas aqui estudadas será utilizada no capítulo 6 para a obtenção da distribuição de probabilidade da força axial de compressão resistente dos PFF.

Capítulo 6 – Descrição Probabilística da Força Axial de Compressão Resistente dos PFF

A seguir será apresentada a descrição probabilística da força axial de compressão resistente dos PFF, obtida via Simulação de Monte Carlo (SMC) para cada um dos tipos de seções transversais estudadas (U, Ue e Se), levando-se em consideração as incertezas inerentes e a variável aleatória erro do modelo.

6.1 Simulação da força axial de compressão resistente dos PFF

Conforme abordado no capítulo 3, o cálculo da força axial de compressão resistente dos PFF está associado ao problema de um sistema estrutural misto, envolvendo múltiplos modos de falha, onde a falha de um componente não-redundante acarreta na falha de todo o sistema (colapso do perfil). Neste contexto, a descrição probabilística da força axial de compressão resistente dos PFF será obtida no presente trabalho via SMC.

A SMC é normalmente empregada em problemas envolvendo variáveis aleatórias com distribuições de probabilidade conhecidas (ou presumidas). Esta envolve um processo repetitivo de simulações, usando em cada simulação um conjunto particular de valores para as variáveis aleatórias, que são gerados de acordo com as correspondentes distribuições de probabilidade destas. Repetindo-se o processo, uma amostra de resultados, cada uma correspondendo a um conjunto diferente de valores para as variáveis aleatórias, é obtida.

Assim, para a realização da SMC são necessários a descrição probabilística de todas as variáveis básicas pertencentes ao sistema de interesse e a relação determinística que descreve a resposta deste sistema. Estas serão abordadas nos itens seguintes para o caso da força axial de compressão resistente dos PFF.

6.2 Estatística das variáveis básicas

Conforme visto anteriormente, referente à força axial de compressão resistente dos PFF, tem-se associadas a esta as incertezas de natureza inerente e epistêmica. Dentre as incertezas inerentes consideradas neste estudo, tem-se aquelas associadas com o tipo de material (resistência ao escoamento, f_y , e módulo de elasticidade do aço, E) e a geometria (dimensões dos componentes da seção transversal do perfil, ver Figura 4.1, e comprimento da barra, L). Com relação às incertezas epistêmicas, será abordada na SMC a variável aleatória erro no modelo, $e_{m,i}$.

As Tabelas (6.1), (6.3) e (6.4) apresentam a descrição estatística, obtida anteriormente nos capítulos 4 e 5, para cada variável aleatória básica relacionada com a força axial de compressão resistente dos PFF.

Tabela 6.1 – Descrição estatística das variáveis associadas com o material

Variável básica		Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	COV	Distribuição
f_y	Perfil U15	397	5,558	0,014	Lognormal
	Perfil C47	397	5,558	0,014	
	Perfil P3	320	14,208	0,044	
E		200000	12000	0,060	Lognormal

Para a média e o coeficiente de variação (COV) de f_y , foram considerados os valores do banco de dados do capítulo 4, com base nos ensaios de Batista (1988) e Santana (1999). A Tabela 6.2 apresenta a relação existente entre os perfis que serão simulados no item 6.4 (U15, C47 e P3) e os correspondentes perfis ensaiados.

Tabela 6.2 – Relação entre os perfis a serem simulados e os perfis contidos no banco de dados

Perfil a ser simulado	Banco de dados	
	Perfis correspondentes	Autor
Perfil U15 (item 6.4.1)	U15-1, U15-2, U15-3, U15-4, U15-5, U15-6, U15-7, U15-8	Batista (1988)
Perfil C47 (item 6.4.2)	C47-1, C47-2, C47-3, C47-4, C47-5, C47-7, C47-8	Batista (1988)
Perfil P3 (item 6.4.3)	P3B, P3C, P3D, P3E, P3F, P3G, P3H, P3I, P3J	Santana (1999)

Tabela 6.3 - Descrição estatística das variáveis associadas com a geometria dos perfis

Variável básica	X_f	δ_f	Distribuição
Alma (B_1, B_{1s}, B_{1i})	1,02	0,02	Normal
Mesa (B_{2s}, B_{2m}, B_{2i})	1,00	0,01	Normal
Enrijecedor (B_{3s}, B_{3i})	0,98	0,09	Normal
Espessura ($t_1, t_{1s}, t_{1i}, t_{2s}, t_{2m}, t_{2i}, t_{3s}, t_{3i}$)	1,01	0,03	Normal
Comprimento da barra	1,00	0,05	Normal

onde:

X_f = valor médio do fator de fabricação;

δ_f = coeficiente de variação do fator de fabricação.

Assim, com base na Tabela 6.3 e de acordo com o tipo de seção estudada (U, Ue e Se), cada uma das dimensões indicadas anteriormente na Figura 4.1 e o comprimento da barra correspondem a uma variável aleatória básica distinta: $B_1, B_{1s}, B_{1i}, B_{2s}, B_{2m}, B_{2i}, B_{3s}, B_{3i}, t_1, t_{1s}, t_{1i}, t_{2s}, t_{2m}, t_{2i}, t_{3s}, t_{3i}$ e L .

Tabela 6.4 – Descrição estatística da variável aleatória erro do modelo

Variável básica	Média	Desvio Padrão	COV	Distribuição
$e_{m,2}$	1,09	0,14	0,13	Normal

Na Tabela 6.4, a descrição estatística da variável aleatória erro do modelo corresponde àquela obtida para o modelo de cálculo 2, considerando as condições de restrições nas extremidades das barras ($K_x = K_y = 0,70$ para os perfis Se; $K_x = 0,65$ e $K_y = 0,70$ para os perfis U e Ue), conforme item 5.4.4.

Na presente pesquisa, as variáveis aleatórias básicas apresentadas nas Tabelas (6.1), (6.3) e (6.4) são consideradas estatisticamente independentes.

6.3 Resposta do sistema

Para a descrição da relação determinística do sistema, será utilizado neste trabalho o modelo de cálculo 2, considerando as condições de restrições nas extremidades das barras bi rotuladas. Assim, a força axial de compressão resistente de um PFF será obtida em cada simulação pela expressão:

$$N_{c,R2} \leq \begin{cases} e_{m,2} \chi A_{ef} f_y \\ e_{m,2} N_{c,Rdist} \end{cases} \quad (6.1)$$

onde:

$e_{m,2}$ = erro do modelo correspondente ao modelo de cálculo 2;

χ = fator de redução da força axial de compressão resistente associado à flambagem global, obtido conforme item 2.1.3.2 (curva única do AISI e da ABNT NBR 14762:2010);

A_{ef} = área efetiva da seção transversal da barra associada à flambagem local do perfil, obtido conforme item 2.1.1 (MLE);

$N_{c,Rdist}$ = força axial de compressão resistente associado à flambagem distorcional, obtido de acordo com o MRD (expressões 2.25 e 2.26);

f_y = resistência ao escoamento do aço.

Contudo, para o cálculo de $N_{c,Rdist}$, é necessário fornecer o valor da força axial de flambagem distorcional elástica, N_{dist} . Como visto nos capítulos 2 e 5, esta força elástica foi obtida na presente pesquisa por meio do programa CUFSM 3.12, estando os valores encontrados para cada perfil estudado (perfis Ue e Se do banco de dados) disponíveis na Tabela A.2 do anexo. Uma vez que para a SMC é impraticável a obtenção de N_{dist} em cada simulação, principalmente quando se tem um grande número de repetições envolvidas, neste trabalho, de forma simplificada, será adotado em cada simulação do item 6.4 o valor médio desta força, obtida a partir dos correspondentes perfis do banco de dados, conforme indicado na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Valores médios de N_{dist} considerados para os perfis a serem simulados

Perfil a ser simulado	N_{dist} médio (kN)	Banco de dados	
		Perfis correspondentes	Autor
Perfil U15 (item 6.4.1)	Não ocorre a flambagem distorcional	U15-1, U15-2, U15-3, U15-4, U15-5, U15-6, U15-7, U15-8	Batista (1988)
Perfil C47 (item 6.4.2)	248,6	C47-1, C47-2, C47-3, C47-4, C47-5, C47-7, C47-8	Batista (1988)
Perfil P3 (item 6.4.3)	254,9	P3B, P3C, P3D, P3E, P3F, P3G, P3H, P3I, P3J	Santana (1999)

A partir da equação 6.1, os correspondentes modos de falha dos PFF submetidos à compressão axial podem se dar, em cada simulação, por:

- flambagem distorcional ($N_{c,Rdist}$);
- flambagem global da barra ($\chi < 1,00$) com a ocorrência prévia da flambagem local do perfil ($A_{ef} < A$);
- flambagem global da barra ($\chi < 1,00$) sem a ocorrência da flambagem local do perfil ($A_{ef} = A$);
- escoamento da seção transversal ($\chi = 1,00$) com a ocorrência prévia da flambagem local do perfil ($A_{ef} < A$);
- escoamento da seção transversal ($\chi = 1,00$) sem a ocorrência da flambagem local do perfil ($A_{ef} = A$).

6.4 Exemplos

Com base na mesma planilha desenvolvida para a obtenção da variável aleatória erro do modelo, apresentada no capítulo 5, será realizada nos itens seguintes a SMC para a obtenção da distribuição de probabilidade da força axial de compressão resistente de três tipos de seções transversais distintas (U, Ue e Se), considerando para cada uma delas um número de 30.000 simulações.

6.4.1 Simulação da força axial de compressão resistente de um perfil U

Com base nos perfis U15-1, U15-2, U15-3, U15-4, U15-5, U15-6, U15-7 e U15-8, ensaiados por Batista (1988), foi realizada a SMC para um perfil U correspondente, identificado por U15. Esse perfil possui resistência ao escoamento, f_y , de 360 MPa (valor característico) e as seguintes dimensões nominais (ver Figura 4.1):

$$B_1 = 75 \text{ mm} \quad B_2 = 38 \text{ mm} \quad t = 2 \text{ mm} \quad L = 0,100 \text{ m}$$

Com base nestes dados, a Figura 6.1 apresenta a distribuição de probabilidade da força axial de compressão resistente obtida via SMC para o perfil U15. Observa-se que o histograma gerado para a força resistente do perfil estudado apresenta uma certa simetria, com um coeficiente de assimetria igual a 0,0685. Quanto mais este valor se aproxima de zero, mais a distribuição de probabilidade tende a ser simétrica.

A Tabela 6.6 apresenta a descrição estatística da força resistente à compressão axial obtida: (i) via SMC para o perfil U15 e (ii) através dos correspondentes perfis ensaiados por Batista (1988).

Para a SMC da força axial de compressão resistente do perfil U15, o modo de falha se deu na totalidade pela flambagem global da barra com a ocorrência prévia da flambagem local do perfil.

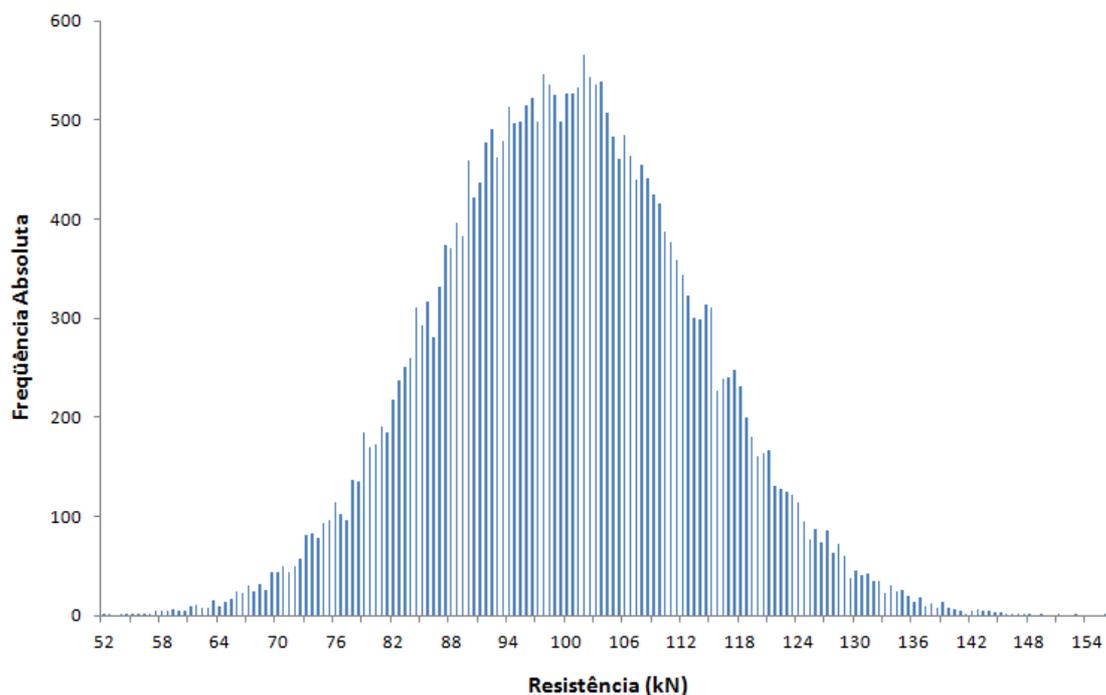


Figura 6.1 – Distribuição de probabilidade da força axial de compressão resistente obtida via SMC para o perfil U15

Tabela 6.6 – Descrição estatística da força resistente à compressão axial obtida: (i) via SMC para o perfil U15 e (ii) através dos correspondentes perfis ensaiados por Batista (1988)

Perfil	Média (kN)	Desvio Padrão (kN)	COV
U15 (simulado)	99,90	13,42	0,13
U15-1, U15-2, U15-3, U15-4, U15-5, U15-6, U15-7, U15-8 (Batista, 1988)	101,88	7,43	0,07

6.4.2 Simulação da força axial de compressão resistente de um perfil U enrijecido

Com base nos perfis C47-1, C47-2, C47-3, C47-4, C47-5, C47-7, C47-8, ensaiados por Batista (1988), foi realizada a SMC para um perfil U enrijecido correspondente, identificado por C47. Esse perfil possui resistência ao escoamento, f_y , de 360 MPa (valor característico) e as seguintes dimensões nominais (ver Figura 4.1):

$$B_1 = 102 \text{ mm} \quad B_2 = 51 \text{ mm} \quad B_3 = 20 \text{ mm} \quad t = 2 \text{ mm} \quad L = 0,245 \text{ m}$$

Com base nestes dados, a Figura 6.2 apresenta a distribuição de probabilidade da força axial de compressão resistente obtida via SMC para o perfil C47. Observa-se que o histograma gerado para a força resistente do perfil estudado novamente apresenta uma certa simetria, com um coeficiente de assimetria igual a 0,0347.

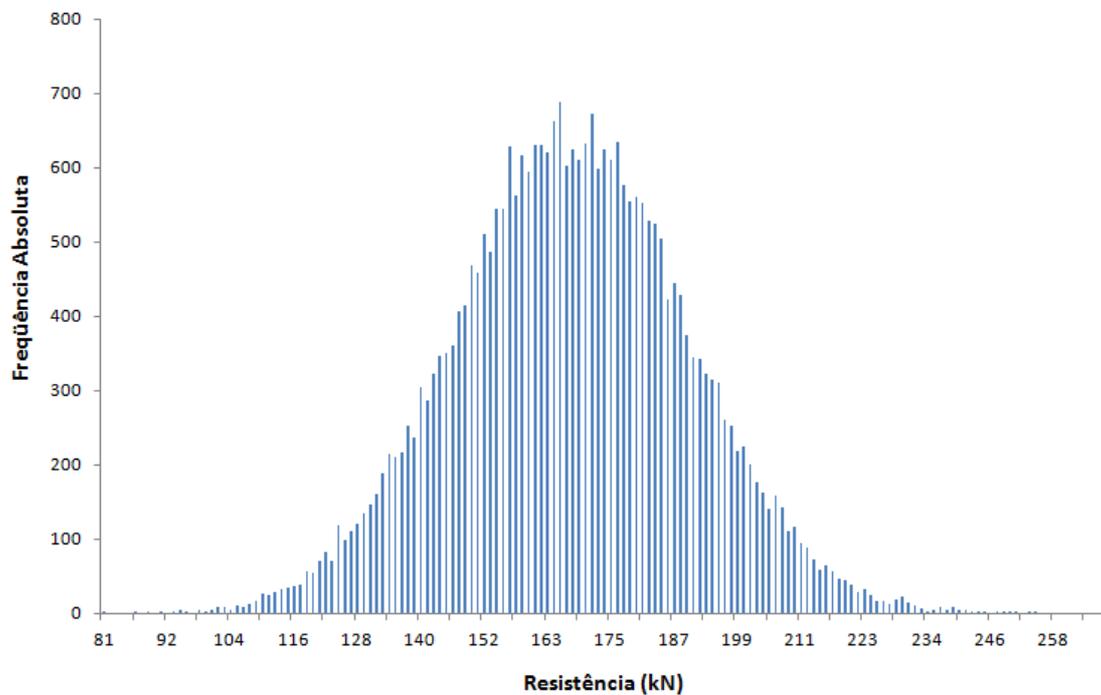


Figura 6.2 – Distribuição de probabilidade da força axial de compressão resistente obtida via SMC para o perfil C47

A Tabela 6.7 apresenta a descrição estatística da força resistente à compressão axial obtida: (i) via SMC para o perfil C47 e (ii) através dos correspondentes perfis ensaiados por Batista (1988).

Tabela 6.7 – Descrição estatística da força resistente à compressão axial obtida: (i) via SMC para o perfil C47 e (ii) através dos correspondentes perfis ensaiados por Batista (1988)

Perfil	Média (kN)	Desvio Padrão (kN)	COV
C47 (simulado)	167,27	21,92	0,13
C47-1, C47-2, C47-3, C47-4, C47-5, C47-7, C47-8 (Batista, 1988)	155,29	4,11	0,03

Para a SMC da força axial de compressão resistente do perfil C47, o modo de falha predominante se deu por flambagem distorcional.

6.4.3 Simulação da força axial de compressão resistente de um perfil S enrijecido

Com base nos perfis P3B, P3C, P3D, P3E, P3F, P3G, P3H, P3I, P3J, ensaiados por Santana (1999), foi realizada a SMC para um perfil S enrijecido correspondente, identificado por P3. Esse perfil possui resistência ao escoamento, f_y , de 300 MPa (valor característico) e as seguintes dimensões nominais (ver Figura 4.1):

$$B_1 = 45 \text{ mm} \quad B_2 = 45 \text{ mm} \quad B_3 = 15 \text{ mm} \quad t = 2 \text{ mm} \quad L = 1,500 \text{ m}$$

Com base nestes dados, a Figura 6.3 apresenta a distribuição de probabilidade da força axial de compressão resistente obtida via SMC para o perfil P3. Observa-se que o histograma gerado para a força resistente do perfil estudado mais uma vez apresenta uma certa simetria, com um coeficiente de assimetria igual a 0,0774.

A Tabela 6.8 apresenta a descrição estatística da força resistente à compressão axial obtida: (i) via SMC para o perfil P3 e (ii) através dos correspondentes perfis ensaiados por Santana (1999).

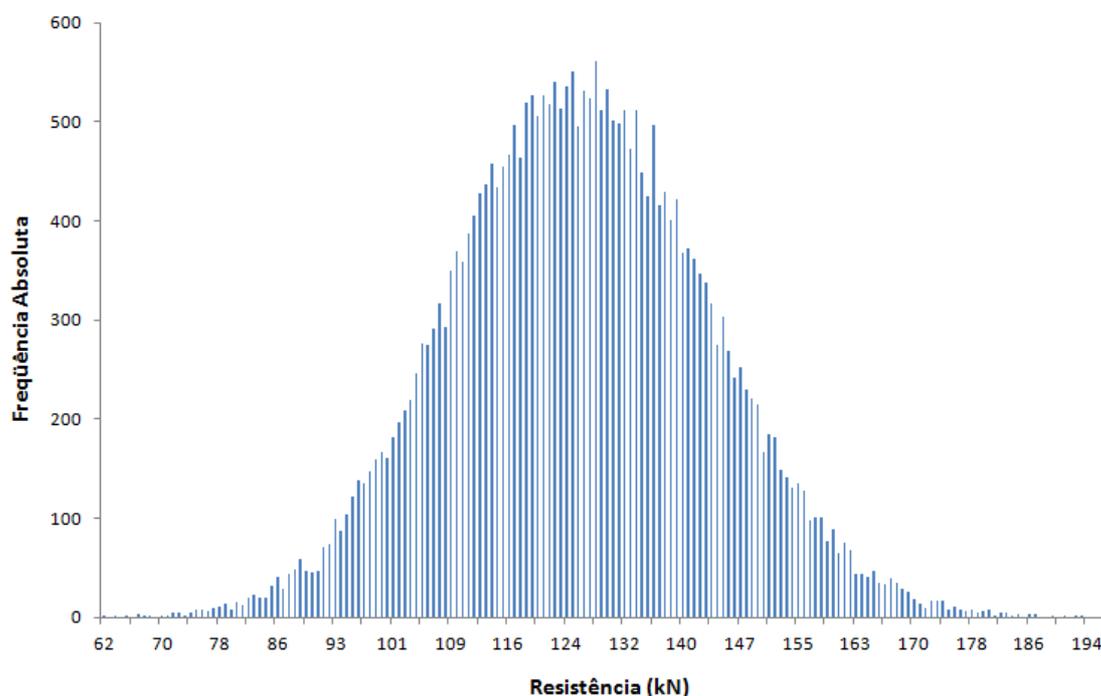


Figura 6.3 – Distribuição de probabilidade da força axial de compressão resistente obtida via SMC para o perfil P3

Tabela 6.8 – Descrição estatística da força resistente à compressão axial obtida: (i) via SMC para o perfil P3 e (ii) através dos correspondentes perfis ensaiados por Santana (1999)

Perfil	Média (kN)	Desvio Padrão (kN)	COV
P3 (simulado)	125,44	17,15	0,14
P3B, P3C, P3D, P3E, P3F, P3G, P3H, P3I, P3J (Santana, 1999)	129,32	5,41	0,04

Para a SMC da força axial de compressão resistente do perfil P3, o modo de falha predominante se deu por flambagem global da barra sem a ocorrência da flambagem local do perfil.

6.5 Resumo do capítulo

Neste capítulo, foi apresentada a descrição probabilística da força axial de compressão resistente dos PFF, obtida via SMC para três tipos diferentes de seções transversais (U, Ue e Se). Para tal, levou-se em consideração as incertezas inerentes relacionadas ao problema (resistência ao escoamento do aço, módulo de elasticidade do material, dimensões dos componentes da seção transversal do perfil e comprimento da barra) e a variável aleatória erro do modelo.

Ao se comparar os dados gerados pela SMC com os dos correspondentes PFF ensaiados, encontrados na literatura, obteve-se resultados coerentes para a descrição probabilística da força axial de compressão resistente dos perfis simulados. A partir das tabelas (6.6) a (6.8), observou-se certa proximidade nos valores médios obtidos para a força resistente à compressão axial dos perfis simulados e ensaiados. Com relação à diferença encontrada entre a dispersão da força axial de compressão resistente obtida pela SMC e via resultados experimentais, pode-se apontar como possíveis causas para esta:

- o fato de ter-se obtido o erro do modelo considerando o correspondente valor médio de f_y e o valor nominal de E em cada análise, uma vez que não foram encontradas informações sobre o valor real destas variáveis para cada um dos perfis estudados;
- durante a SMC, além do uso da dispersão encontrada para o erro do modelo, foi atribuída também uma dispersão para as variáveis básicas f_y e E (ver Tabela 6.1).

Por fim, considerando-se a influência das condições de restrição nas extremidades das barras (adotando: $K_x = K_y = 0,70$ para os perfis Se; $K_x = 0,65$ e $K_y = 0,70$ para os perfis U e Ue), observou-se que os histogramas obtidos via SMC para a força resistente dos perfis estudados apresentaram uma certa simetria. Caso seja de interesse, a adequação de distintas distribuições de probabilidade (normal, lognormal, etc.) podem ser avaliadas através de testes de aderência (Ang e Tang, 1975). Contudo, para o cálculo da probabilidade de falha utilizando a SMC, não há a necessidade do ajuste de uma distribuição de probabilidade para a força axial de compressão resistente dos PFF, bastando apenas que se conheça a distribuição de probabilidade de cada uma das variáveis básicas pertencentes ao problema.

Capítulo 7 – Sumário, Conclusões e Sugestões

A seguir é apresentado o sumário, as conclusões e as sugestões referentes à pesquisa desenvolvida no presente trabalho.

7.1 Sumário

O crescente uso dos PFF na construção civil e a obtenção de estruturas cada vez mais esbeltas demandam a consideração dos modos de flambagem global, flambagem local e flambagem distorcional no cálculo da força axial de compressão resistente desses perfis. No presente trabalho, quatro modelos de cálculo foram adotados em função dos métodos de dimensionamento abordados nas prescrições normativas da ABNT NBR 14762 (ABNT, 2001 e 2010), do American Iron and Steel Institute (AISI, 2007) e do EUROCODE 3 (ECS, 2005 a, b).

Com relação aos métodos de dimensionamento, foram utilizados o MLE e o MRD na consideração da flambagem local. Quanto à flambagem por distorção, esta foi tratada por meio do MRD. Para a flambagem global (flambagem por flexão, torção ou flexo-torção) foram abordadas: as curvas de flambagem apresentadas no EUROCODE 3 (ECS, 2005a, b) e na ABNT NBR 14762:2001; e a curva única de dimensionamento apresentada no American Iron and Steel Institute (AISI, 2007) e na ABNT NBR 14762:2010.

Neste intuito, a adequada utilização dos PFF deve ser feita de forma racional por meio das normas técnicas, com vistas à satisfação de requisitos de segurança, economia e do bom

desempenho da estrutura projetada. Entretanto, várias incertezas se fazem presentes no dimensionamento de uma estrutura como, no caso dos PFF, a resistência ao escoamento do aço, o módulo de elasticidade do material, o comprimento das barras, as dimensões dos componentes da seção transversal dos perfis, os efeitos dos carregamentos impostos sobre a estrutura e o modelo de cálculo utilizado. Conseqüentemente, a segurança somente pode ser estabelecida em termos probabilísticos. Para tal, os conceitos e métodos da confiabilidade estrutural devem ser empregados. Assim, uma etapa fundamental nos procedimentos de análise de confiabilidade é a definição do modelo a ser utilizado para o cálculo da resistência e o erro associado ao mesmo.

Uma vez que a força axial de compressão resistente dos PFF está associada a múltiplos modos de falha, esta trata-se de um problema de confiabilidade de sistemas. Os possíveis modos de falha são então:

- a flambagem distorcional;
- a flambagem global da barra com a ocorrência prévia da flambagem local do perfil;
- a flambagem global da barra sem a ocorrência da flambagem local do perfil;
- o escoamento da seção transversal com a ocorrência prévia da flambagem local do perfil;
- o escoamento da seção transversal sem a ocorrência da flambagem local do perfil.

Com exceção do primeiro modo de falha apresentado, flambagem por distorção, percebe-se que os demais são uma combinação entre a flambagem local, global e o escoamento da seção transversal do perfil. Logo, a ocorrência de qualquer um destes modos de falha acarreta na falha de todo o sistema (colapso do perfil quando submetido à compressão axial), caracterizando em princípio um sistema estrutural em série. Contudo, em paralelo, somente a ocorrência da flambagem local não representa um modo de falha componente do sistema, uma vez que os elementos de chapa que compõem a seção transversal destes perfis possuem uma capacidade resistente pós-flambagem. Conseqüentemente, tem-se para o problema da força axial de compressão resistente dos PFF um sistema misto (ver Figura 3.5). Assim, a variável aleatória erro do modelo é obtida no presente trabalho em função da

falha do sistema como um todo, ou seja, considerando a interação existente entre os modos de falha componentes deste sistema misto.

Logo, a descrição probabilística da força axial de compressão resistente dos PFF somente é possível a partir do conhecimento das distribuições de probabilidade relativas às variáveis aleatórias representativas das incertezas inerentes (a resistência ao escoamento do aço, o módulo de elasticidade do material, o comprimento das barras e as dimensões dos componentes da seção transversal dos perfis) e das incertezas epistêmicas (abordada nesta dissertação por meio do erro do modelo).

7.2 Conclusões

O conhecimento estatístico do erro do modelo é fundamental para a descrição probabilística da resistência à compressão axial dos PFF. Esta variável aleatória é dada pela razão entre a força axial de compressão resistente obtida experimentalmente para um dado perfil e a sua correspondente força axial de compressão resistente calculada, via formulações teóricas. Para tal, um banco de dados foi criado a partir de um grande número de experimentos encontrados na literatura, num total de 212 ensaios provenientes de diferentes trabalhos científicos, cobrindo os distintos modos de flambagem dos PFF (flambagem local, distorcional e global), três tipos de seções transversais (U, Ue e Se), distintas medidas para os componentes destas seções transversais (ver Figura 4.1) e o comprimento das barras.

A partir deste banco de dados, observou-se para os perfis estudados que:

- Os modelos de cálculo analisados apresentaram um comportamento muito similar entre eles, havendo inicialmente uma maior proximidade entre os modelos 1 e 3 e os modelos 2 e 4 (Figura 5.16). Ou seja, o MLE e o MRD descrevem de forma quase semelhante o fenômeno da flambagem local, ao passo que as curvas de dimensionamento da flambagem global apresentadas na ABNT NBR 14762:2001, originadas do EUROCODE 3 (ECS, 2005), e a curva única de dimensionamento adotada em sua revisão (ABNT, 2010), proveniente do AISI (2007), apresentam uma ligeira diferenciação entre elas.

- O erro do modelo, $e_{m,i}$, pode ser descrito por uma tendência central (média), $e_{m,i(d)}$, e pela dispersão (resíduos), $e_{m,i(a)}$, em torno desta estimativa, como uma função do índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global, λ_0 . Assim, constatou-se nos perfis estudados um aumento de $e_{m,i(d)}$ e $e_{m,i(a)}$ com o crescimento de λ_0 . Conseqüentemente, esta relação deve ser considerada na obtenção da distribuição da probabilidade da força axial de compressão resistente dos PFF.
- O comportamento anteriormente descrito, aumento do valor médio e da dispersão do erro do modelo com o crescimento de λ_0 , se deve às condições de restrições nas extremidades das barras. Uma vez que não existem rótulas perfeitas, a resistência à rotação destas contribuem para aumentar a força resistente à compressão de uma barra. Segundo Pimenta (1997), tem-se que quanto maior for o comprimento de uma coluna, mais significativos tornam-se os efeitos devido às restrições à rotação nas suas extremidades.
- Ao se considerar as restrições das rótulas nas extremidades das barras bi rotuladas, adotando-se para os coeficientes de flambagem global por flexão um valor inferior ao unitário ($K_x = K_y = 0,70$ para os perfis Se; e $K_x = 0,65$ e $K_y = 0,70$ para os perfis U e Ue), o erro do modelo apresentou-se praticamente constante com o aumento de λ_0 . Este procedimento mostra-se também como uma alternativa para a consideração da variável $e_{m,i}$ na obtenção da força axial de compressão resistente dos PFF.

Por fim, considerando o modelo de cálculo 2 e as condições de restrições nas extremidades das barras ($K_x = K_y = 0,70$ para os perfis Se; $K_x = 0,65$ e $K_y = 0,70$ para os perfis U e Ue), obteve-se via SMC a distribuição e os parâmetros da força axial de compressão resistente para três perfis com seções diferentes (U, Ue e Se), referente a três modos de falha distintos (flambagem global da barra com a ocorrência prévia da flambagem local do perfil, flambagem distorcional e flambagem global da barra sem a ocorrência da flambagem local do perfil).

Com base nestes resultados apresentados, conseguiu-se assim alcançar os objetivos traçados no início desta dissertação.

7.3 Sugestões

O presente trabalho limitou-se ao estudo probabilístico da força axial de compressão resistente dos PFF, considerando a falha deste sistema misto como um todo. Como alternativas de trabalhos futuros para a continuação desta pesquisa, sugerem-se:

1. A avaliação dos níveis de confiabilidade implícitos nos projetos de PFF sujeitos à compressão axial projetados segundo as normas de dimensionamento nacional e internacionais.
2. A ampliação do banco de dados com a identificação clara dos modos de falha obtidos experimentalmente, inclusive com outros tipos de seções transversais.
3. A obtenção do erro do modelo para cada modo de falha associado à força axial de compressão resistente dos PFF.
4. A utilização de um número maior de simulações (1.000.000) para a força axial de compressão resistente dos PFF em estudos de confiabilidade de sistemas, o que pode ser feito facilmente via softwares como, por exemplo, o MatLab.
5. A expansão da pesquisa desenvolvida referente à compressão axial para trabalhos envolvendo a flexão, flexo-compressão, tração, cisalhamento, e outros esforços relacionados ao dimensionamento dos PFF.
6. A extensão do trabalho desenvolvido referente aos PFF para pesquisas relacionadas com os perfis de aço laminados e soldados.

Referências Bibliográficas

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. *Specification for Structural Steel Buildings*. AISC, Chicago, United States of America, 2005a.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. *Commentary on the Specification for Structural Steel Buildings*. AISC, Chicago, United States of America, 2005b.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. *American Iron and Steel Design Manual: Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*. AISI, Washington, United States of America, 2004.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. *AISI S100: North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*. 2007;

Ang, A. H-S. e Tang, W. H. *Probability Concepts in Engineering Planning and Design – Basic Principles*. Vol. I, John Wiley & Sons, New York, USA, 1975.

Ang, A. H-S. e Tang, W. H. *Probability Concepts in Engineering Planning and Design – Basic Principles*. Vol. II, John Wiley & Sons, New York, USA, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. ABNT, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14762: *Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio*. ABNT, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14762: *Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio*. ABNT, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

Azevedo, C. P. B. *Avaliação da Confiabilidade de Fundações de Torres Estaiadas em Linhas de Transmissão*. Dissertação de Mestrado, DEES, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2007.

Azevedo, C. P. B. *Projeto de Fundações de Linhas de Transmissão Baseado em Confiabilidade*. Tese de Doutorado, DEES, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2011.

Batista, E. M. *Etude de la Stabilité des Profils a Parois Minces et Section Ouverte de Types U et C*. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, 1988.

Brandão, A. L. R. *Segurança de Estruturas em Perfis Formados a Frio*. Dissertação de Mestrado, PROPEC, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, 2007.

Brandão, A. L. R.; Freitas, A. M. S. e Freitas, M. S. R. *Calibração de Coeficiente de Ponderação da Resistência de Colunas de Perfis Formados a Frio*. XXXII CILAMCE, Ouro Preto, Brasil, 13 a 16 de novembro de 2011.

Campos, F. F. *Estabilidade e resistência última de perfis “S” formados a frio*. Dissertação de Mestrado, PROPEC, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, 1999.

Carvalho, P. R. M.; Grigoletti, G.; Tamagna, A. e Iturrioz, I. *Curso Básico de Perfis de Aço Formados a Frio*. Porto Alegre, Brasil, 2004.

Castanheira, A. M. *Avaliação da Confiabilidade de Vigas Metálicas Dimensionadas pela NBR 8800*. Dissertação de Mestrado, PROPEC, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, 2004.

Diniz, S. M. C. *A Confiabilidade Estrutural e a Evolução das Normas Técnicas*. VI Simpósio EPUSP Sobre Estruturas de Concreto, São Paulo, Brasil, 8 a 11 de abril de 2006.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EUROCODE 3. Design of Steel Structures, Part 1-1: *General Rules and rules Buildings*. Brussels, ECS, 2005a.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EUROCODE 3. Design of Steel Structures, Part 1-3: *General Rules, Supplementary rules for cold formed thin gauge members and sheeting*. Brussels, ECS, 2005b.

Galambos, T. V. *Design Codes, Engineering Safety*. McGraw-Hill, p. 47 – 71, 1992.

Haldar, A. e Mahadevan, S. *Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design*. John Wiley & Sons, New York, USA, 2000.

Lapponi, J. C. *Estatística Usando Excel*. Elsevier, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

Madsen, H. O.; Krenk, S. e Lind, N. C. *Methods of Structural Safety*. Prentice-Hall, New Jersey, USA, 1986.

Melchers, R. E. *Structural Reliability Analysis and Prediction*. John Wiley & Sons, 1999.

Nogueira, H. A. T. *Avaliação da Confiabilidade de Pilares Curtos em Concreto Armado Projetados Segundo a NBR 6118:2003*. Dissertação de Mestrado, DEES, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2006.

Pandeya, M. D. e Nathwanib, J. S. *Life Quality Index for the Estimation of Societal Willingness-to-pay for Safety*. Journal Structural Safety 26, p. 181 – 199, 2004.

Pimenta, R. J. *Proposição de uma Curva de Flambagem para Perfis I Soldados Formados por Chapas Cortadas a Maçarico*. Dissertação de Mestrado, DEES, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 1997.

Pimenta, R. J. *Perfis de Alma Senoidal: Proposição de Métodos de Cálculo e Análise de Confiabilidade Estrutural*. Tese de Doutorado, DEES, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2008.

Ribeiro, S. E. C. *Análise da Confiabilidade de Vigas de Concreto Armado com Plástico Reforçado por Fibras*. Tese de Doutorado, DEES, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2009.

Rodrigues, F. C. *Manual de Construção em aço: Steel Framing, Engenharia*. IBS, CBCA, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

Rodrigues, F. C. *Perfis estruturais formados a frio: comportamento e dimensionamento*. DEES, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2005.

Rondal, J. *Contribution à l'étude de la stabilité des profils creux à parois minces*. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, 1984.

Santana, P. C. S. C. *Curva de Flambagem para Perfis "S" Enrijecidos Formados a Frio*. Dissertação de Mestrado, DEES, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 1999.

Schafer, B. W. e Ádány, S. *Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods*. Eighteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Orlando, FL, United States of America, October 2006.

Sily, B. T. P.; Rodrigues, F. C. e Diniz, S. M. C. *Assessment of Epistemic Uncertainties in the Compressive Strength of Cold Formed Steel*. XXXII CILAMCE, Ouro Preto, Brasil, 13 a 16 de novembro de 2011.

Thomasson, O. *Thin-walled C-shaped Panels in Axial Compression*. Swedish Council for Building Research to the Department of Steel Construction, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1978.

Anexo A

A seguir são apresentadas na Tabela A.1, para cada perfil estudado, algumas das propriedades geométricas (área da seção, A ; momentos de inércia principais, I_x e I_y ; raios de giração principais, r_x e r_y ; raio de giração polar, r_0 ; constante de torção, J ; e constante de empenamento, C_w) calculadas pela planilha eletrônica desenvolvida na presente pesquisa.

Tabela A.1 – Propriedades geométricas dos perfis estudados

Perfil	A (cm ²)	I_x (cm ⁴)	I_y (cm ⁴)	r_x (cm)	r_y (cm)	r_0 (cm)	J (cm ⁴)	C_w (cm ⁶)
U13	1,39	2,78	0,47	1,42	0,58	1,94	0,0191	1,0455
U15-1	2,89	25,49	4,15	2,97	1,20	3,99	0,0387	39,1794
U15-2	2,85	24,96	3,86	2,96	1,16	3,92	0,0382	36,4057
U15-3	2,89	25,49	4,15	2,97	1,20	3,99	0,0387	39,1794
U15-4	2,86	25,26	4,12	2,97	1,20	3,99	0,0376	38,8398
U15-5	2,86	25,26	4,12	2,97	1,20	3,99	0,0376	38,8398
U15-6	2,86	25,26	4,12	2,97	1,20	3,99	0,0376	38,8398
U15-7	2,86	25,26	4,12	2,97	1,20	3,99	0,0376	38,8398
U15-8	2,86	25,26	4,12	2,97	1,20	3,99	0,0376	38,8398
U18	3,63	50,81	8,04	3,74	1,49	4,98	0,0486	120,1235
U22	4,36	88,16	13,20	4,50	1,74	5,90	0,0589	286,7381
U24	4,60	19,21	6,95	2,04	1,23	3,67	0,2373	29,6940
U26	2,45	10,42	4,12	2,06	1,30	3,79	0,0321	17,0590
U29	3,23	22,28	8,93	2,63	1,66	4,83	0,0450	59,4194
U33	3,83	38,69	14,72	3,18	1,96	5,71	0,0523	143,6072
U35	4,30	11,89	6,85	1,66	1,26	3,71	0,2243	18,8911
U37-1	2,35	6,92	4,16	1,72	1,33	3,82	0,0321	11,6070
U37-2	2,33	6,86	4,13	1,72	1,33	3,82	0,0312	11,5128
U37-3	2,33	7,18	4,13	1,76	1,33	3,82	0,0305	12,0890
U40	2,93	13,64	8,12	2,16	1,66	4,76	0,0392	35,5392
U44	3,65	27,03	15,06	2,72	2,03	5,80	0,0494	104,7646
U12	1,39	2,78	0,47	1,42	0,58	1,94	0,0191	1,0455
U14-1	2,88	25,38	4,13	2,97	1,20	3,99	0,0381	39,0097
U14-2	2,88	25,38	4,13	2,97	1,20	3,99	0,0381	39,0097
U14-3	2,88	25,38	4,13	2,97	1,20	3,99	0,0381	39,0097
U14-4	2,88	25,38	4,13	2,97	1,20	3,99	0,0381	39,0097
U14-5	2,88	25,38	4,13	2,97	1,20	3,99	0,0381	39,0097
U14-6	2,88	25,38	4,13	2,97	1,20	3,99	0,0381	39,0097
U14-7	2,88	25,38	4,13	2,97	1,20	3,99	0,0381	39,0097
U14-8	2,88	25,38	4,13	2,97	1,20	3,99	0,0381	39,0097
U16	3,63	50,81	8,04	3,74	1,49	4,98	0,0486	120,1235
U17	3,63	50,81	8,04	3,74	1,49	4,98	0,0486	120,1235

Tabela A.1 – Propriedades geométricas dos perfis estudados (continuação)

Perfil	A (cm ²)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	r _x (cm)	r _y (cm)	r ₀ (cm)	J (cm ⁴)	C _w (cm ⁶)
U19	4,36	88,16	13,20	4,50	1,74	5,90	0,0589	286,7381
U21	4,36	88,16	13,20	4,50	1,74	5,90	0,0589	286,7381
U23	4,60	19,21	6,95	2,04	1,23	3,67	0,2373	29,6940
U25	2,45	10,42	4,12	2,06	1,30	3,79	0,0321	17,0590
U27	3,23	22,28	8,93	2,63	1,66	4,83	0,0450	59,4194
U28	3,23	22,28	8,93	2,63	1,66	4,83	0,0450	59,4194
U30	3,83	38,69	14,72	3,18	1,96	5,71	0,0523	143,6072
U31	3,83	38,69	14,72	3,18	1,96	5,71	0,0523	143,6072
U32	3,83	38,69	14,72	3,18	1,96	5,71	0,0523	143,6072
U34	4,30	11,89	6,85	1,66	1,26	3,71	0,2243	18,8911
U36-1	2,33	6,86	4,13	1,72	1,33	3,82	0,0312	11,5128
U36-2	2,33	6,86	4,13	1,72	1,33	3,82	0,0312	11,5128
U38	2,93	13,64	8,12	2,16	1,66	4,76	0,0392	35,5392
U39	2,93	13,64	8,12	2,16	1,66	4,76	0,0392	35,5392
U41	3,61	25,20	14,89	2,64	2,03	5,80	0,0488	97,2879
U42	3,61	25,20	14,89	2,64	2,03	5,80	0,0488	97,2879
U43	3,61	25,20	14,89	2,64	2,03	5,80	0,0488	97,2879
A 71	3,06	424,80	39,82	11,78	3,61	14,06	0,0033	6856,5500
A 74	3,14	436,89	41,57	11,80	3,64	14,14	0,0035	7225,9497
A 75	3,12	433,65	41,01	11,78	3,62	14,09	0,0035	7079,9243
A 76	3,18	443,30	41,53	11,81	3,61	14,10	0,0037	7218,1240
A 101	4,74	659,67	62,10	11,80	3,62	14,11	0,0122	10812,7140
A 102	4,74	658,77	61,97	11,79	3,62	14,10	0,0122	10771,4560
A 103	4,73	655,90	61,69	11,78	3,61	14,08	0,0122	10669,0240
A 104	4,81	661,06	61,37	11,73	3,57	14,00	0,0130	10538,6820
A 151	7,45	1031,48	96,55	11,76	3,60	14,07	0,0480	16884,1070
A 152	7,34	1016,93	94,99	11,77	3,60	14,06	0,0459	16596,4150
A 153	7,09	984,93	92,11	11,78	3,60	14,09	0,0412	16196,3280
A 154	7,24	1013,44	98,00	11,83	3,68	14,25	0,0427	17613,7880
A 155	7,29	1013,25	99,82	11,79	3,70	14,25	0,0437	17804,1310
A 156	7,15	990,57	93,20	11,77	3,61	14,09	0,0422	16378,6000
C4	7,49	113,28	11,58	3,89	1,24	4,99	0,3982	342,2277
C6	8,16	121,36	14,46	3,86	1,33	5,25	0,4230	558,6389
C10-1	4,10	65,96	7,64	4,01	1,37	5,23	0,0549	234,3619
C10-2	4,06	65,38	7,58	4,01	1,37	5,23	0,0533	232,5032
C10-3	4,08	65,67	7,61	4,01	1,37	5,23	0,0541	233,4336
C24	6,93	231,72	36,00	5,78	2,28	8,42	0,0927	3468,6718
C29	4,16	150,45	16,31	6,01	1,98	7,47	0,0297	804,6158
C34	4,42	161,07	20,86	6,04	2,17	8,01	0,0290	1359,6651
C37B	5,04	173,39	25,58	5,87	2,25	8,36	0,0360	2376,2087
C41	8,41	131,86	26,49	3,96	1,77	6,01	0,4384	720,5281
C43	9,40	147,18	34,77	3,96	1,92	6,56	0,4950	1322,5344
C45	4,18	69,88	13,48	4,09	1,80	5,88	0,0549	282,5077
C47-1	4,58	75,06	17,68	4,05	1,97	6,40	0,0601	484,8273
C47-2	4,60	75,09	17,98	4,04	1,98	6,45	0,0597	509,1675
C47-3	4,60	75,09	17,98	4,04	1,98	6,45	0,0597	509,1675
C47-4	4,60	75,09	17,98	4,04	1,98	6,45	0,0597	509,1675
C47-5	4,60	75,09	17,98	4,04	1,98	6,45	0,0597	509,1675
C47-7	4,60	75,09	17,98	4,04	1,98	6,45	0,0597	509,1675
C47-8	4,66	76,11	18,21	4,04	1,98	6,45	0,0624	515,5979
C49	4,97	78,43	20,57	3,97	2,03	6,79	0,0646	829,2377
C53	6,54	254,18	50,94	6,23	2,79	9,04	0,0876	2455,0753
C57	7,06	271,80	64,81	6,20	3,03	9,82	0,0917	4177,1935
C64B	4,68	179,44	36,80	6,19	2,80	9,01	0,0321	1705,2062
C67A	5,16	196,05	47,83	6,16	3,04	9,80	0,0359	2971,2966

Tabela A.1 – Propriedades geométricas dos perfis estudados (continuação)

Perfil	A (cm ²)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	r _x (cm)	r _y (cm)	r ₀ (cm)	J (cm ⁴)	C _w (cm ⁶)
C76	11,56	149,06	124,25	3,59	3,28	10,07	0,6056	3276,2795
C78	5,54	79,43	53,56	3,79	3,11	9,01	0,0764	839,1311
C80-1	5,89	87,96	61,67	3,87	3,24	9,56	0,0812	1293,2843
C80-2	5,78	86,40	60,60	3,87	3,24	9,57	0,0765	1271,3937
C80-3	5,78	86,40	60,60	3,87	3,24	9,57	0,0765	1271,3937
C82	6,29	90,73	72,61	3,80	3,40	10,30	0,0868	2116,6059
C84B	4,48	81,07	55,80	4,25	3,53	10,18	0,0311	1112,7128
C86B-3	4,80	88,69	66,28	4,30	3,72	10,92	0,0338	1703,3908
C86B-4	4,63	83,93	63,93	4,26	3,72	10,92	0,0304	1620,3446
C88B	5,12	94,64	76,12	4,30	3,86	11,62	0,0361	2792,2992
C3	7,49	113,28	11,58	3,89	1,24	4,99	0,3982	342,2277
C5	8,16	121,36	14,46	3,86	1,33	5,25	0,4230	558,6389
C9-1	4,08	65,67	7,61	4,01	1,37	5,23	0,0541	233,4336
C9-2	4,08	65,67	7,61	4,01	1,37	5,23	0,0541	233,4336
C21	6,93	231,72	36,00	5,78	2,28	8,42	0,0927	3468,6718
C22	6,93	231,72	36,00	5,78	2,28	8,42	0,0927	3468,6718
C23	6,93	231,72	36,00	5,78	2,28	8,42	0,0927	3468,6718
C25	4,16	150,45	16,31	6,01	1,98	7,47	0,0297	804,6158
C26	4,16	150,45	16,31	6,01	1,98	7,47	0,0297	804,6158
C27	4,16	150,45	16,31	6,01	1,98	7,47	0,0297	804,6158
C28	4,16	150,45	16,31	6,01	1,98	7,47	0,0297	804,6158
C33	4,57	166,46	21,53	6,04	2,17	8,00	0,0322	1403,2279
C35	5,04	173,39	25,58	5,87	2,25	8,36	0,0360	2376,2087
C36	5,04	173,39	25,58	5,87	2,25	8,36	0,0360	2376,2087
C37	5,04	173,39	25,58	5,87	2,25	8,36	0,0360	2376,2087
C37A	5,04	173,39	25,58	5,87	2,25	8,36	0,0360	2376,2087
C40	8,41	131,86	26,49	3,96	1,77	6,01	0,4384	720,5281
C42	9,40	147,18	34,77	3,96	1,92	6,56	0,4950	1322,5344
C44	4,18	69,88	13,48	4,09	1,80	5,88	0,0549	282,5077
C46-1	4,60	75,09	17,98	4,04	1,98	6,45	0,0597	509,1675
C46-2	4,60	75,09	17,98	4,04	1,98	6,45	0,0597	509,1675
C46-4	4,60	75,09	17,98	4,04	1,98	6,45	0,0597	509,1675
C46-5	4,60	75,09	17,98	4,04	1,98	6,45	0,0597	509,1675
C46-6	4,60	75,09	17,98	4,04	1,98	6,45	0,0597	509,1675
C46-7	4,60	75,09	17,98	4,04	1,98	6,45	0,0597	509,1675
C48	4,97	78,43	20,57	3,97	2,03	6,79	0,0646	829,2377
C50	6,54	254,18	50,94	6,23	2,79	9,04	0,0876	2455,0753
C51	6,54	254,18	50,94	6,23	2,79	9,04	0,0876	2455,0753
C52	6,54	254,18	50,94	6,23	2,79	9,04	0,0876	2455,0753
C54	7,06	271,80	64,81	6,20	3,03	9,82	0,0917	4177,1935
C55	7,06	271,80	64,81	6,20	3,03	9,82	0,0917	4177,1935
C63	4,68	179,44	36,80	6,19	2,80	9,01	0,0321	1705,2062
C64	4,68	179,44	36,80	6,19	2,80	9,01	0,0321	1705,2062
C64A	4,68	179,44	36,80	6,19	2,80	9,01	0,0321	1705,2062
C65	5,16	196,05	47,83	6,16	3,04	9,80	0,0359	2971,2966
C66	5,16	196,05	47,83	6,16	3,04	9,80	0,0359	2971,2966
C67	5,16	196,05	47,83	6,16	3,04	9,80	0,0359	2971,2966
C75	11,60	153,01	124,80	3,63	3,28	10,07	0,6077	3333,4559
C77	5,56	81,43	53,77	3,83	3,11	9,01	0,0767	859,6768
C79-1	5,80	86,79	60,86	3,87	3,24	9,56	0,0777	1276,8786
C79-2	5,80	86,79	60,86	3,87	3,24	9,56	0,0777	1276,8786
C81	6,29	90,73	72,61	3,80	3,40	10,30	0,0868	2116,6059
C83	4,48	81,07	55,80	4,25	3,53	10,18	0,0311	1112,7128
C84	4,48	81,07	55,80	4,25	3,53	10,18	0,0311	1112,7128
C84A	4,48	81,07	55,80	4,25	3,53	10,18	0,0311	1112,7128

Tabela A.1 – Propriedades geométricas dos perfis estudados (continuação)

Perfil	A (cm ²)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	r _x (cm)	r _y (cm)	r ₀ (cm)	J (cm ⁴)	C _w (cm ⁶)
C85	4,80	88,69	66,28	4,30	3,72	10,92	0,0338	1703,3908
C86	4,80	88,69	66,28	4,30	3,72	10,92	0,0338	1703,3908
C86A	4,80	88,69	66,28	4,30	3,72	10,92	0,0338	1703,3908
C87	5,12	94,64	76,12	4,30	3,86	11,62	0,0361	2792,2992
C88	5,12	94,64	76,12	4,30	3,86	11,62	0,0361	2792,2992
C88A	5,12	94,64	76,12	4,30	3,86	11,62	0,0361	2792,2992
M3/P13	1,99	22,81	6,10	3,38	1,75	3,81	0,0044	242,4321
M5/P25	3,86	41,37	10,94	3,27	1,68	3,69	0,0350	405,4370
M6/P18	3,73	38,99	10,58	3,23	1,68	3,65	0,0319	372,2900
M7/P14	2,00	22,79	6,16	3,38	1,76	3,81	0,0044	223,2945
P1B	4,70	50,75	13,28	3,27	1,67	3,67	0,0654	459,6935
P1C	4,70	49,85	13,16	3,26	1,67	3,66	0,0635	439,6618
P1D	4,61	50,89	12,86	3,32	1,67	3,72	0,0593	434,3223
P1E	4,66	49,37	13,11	3,25	1,68	3,66	0,0611	422,8049
P1F	4,61	50,94	12,96	3,32	1,68	3,72	0,0593	416,8768
P1G	4,59	50,41	12,90	3,31	1,68	3,71	0,0584	405,5568
P1H	4,61	50,23	12,95	3,30	1,68	3,70	0,0592	397,9107
P1I	4,61	50,22	12,94	3,30	1,68	3,70	0,0592	391,6396
P1J	4,81	52,58	13,48	3,31	1,67	3,71	0,0677	405,7213
P2A	4,60	50,81	12,97	3,32	1,68	3,73	0,0585	388,5445
P2B	4,48	49,18	12,63	3,31	1,68	3,71	0,0541	375,5199
P2C	4,64	50,04	13,03	3,28	1,68	3,69	0,0609	379,3615
P2D	4,82	52,39	13,50	3,30	1,67	3,70	0,0685	395,6821
P2E	4,71	51,84	13,18	3,32	1,67	3,71	0,0637	392,5611
P2F	4,83	53,20	13,46	3,32	1,67	3,72	0,0686	406,6251
P2G	4,61	50,70	12,95	3,32	1,68	3,72	0,0593	391,4752
P2H	4,64	49,80	13,02	3,28	1,68	3,68	0,0608	389,2031
P2I	4,80	52,57	13,40	3,31	1,67	3,71	0,0676	415,3829
P2J	4,73	51,08	13,25	3,29	1,67	3,69	0,0646	411,0277
P3B	4,74	53,57	13,26	3,36	1,67	3,75	0,0641	439,3627
P3C	4,67	53,09	13,03	3,37	1,67	3,77	0,0613	435,6571
P3D	4,75	52,33	13,31	3,32	1,67	3,72	0,0649	454,3644
P3E	4,64	50,63	12,91	3,30	1,67	3,70	0,0609	449,0708
P3F	4,67	50,76	12,96	3,30	1,67	3,69	0,0626	458,3078
P3G	4,70	51,71	13,16	3,32	1,67	3,72	0,0629	484,8415
P3H	4,69	51,59	13,00	3,32	1,67	3,72	0,0627	487,8792
P3I	4,66	50,62	13,07	3,29	1,67	3,70	0,0618	508,6432
P3J	4,73	51,90	13,19	3,31	1,67	3,71	0,0647	529,2497
P3K	4,73	48,71	13,56	3,21	1,69	3,63	0,0639	539,0064
P3L	4,79	49,83	13,58	3,22	1,68	3,64	0,0667	577,7524
P3M	4,78	51,29	13,40	3,28	1,67	3,68	0,0659	591,0203
P3N	4,79	49,38	13,66	3,21	1,69	3,63	0,0667	599,8288
P3O	4,91	51,20	13,77	3,23	1,67	3,64	0,0718	650,9512
P4B	4,82	52,13	13,33	3,29	1,66	3,69	0,0684	667,9262
P4C	4,84	52,81	13,41	3,30	1,66	3,70	0,0694	699,7719
P4D	4,87	53,42	13,46	3,31	1,66	3,71	0,0705	728,4654
P4E	5,09	53,71	14,66	3,25	1,70	3,73	0,0743	733,4941
P4F	4,68	51,67	12,99	3,32	1,67	3,73	0,0620	753,1527
P4G	4,80	51,69	13,41	3,28	1,67	3,68	0,0675	819,8323
P4H	4,73	51,62	13,13	3,30	1,67	3,70	0,0646	838,7898
P4I	4,68	50,09	13,04	3,27	1,67	3,67	0,0627	854,9881
P4J	4,72	51,34	13,29	3,30	1,68	3,70	0,0639	907,4952
P4K	4,90	52,21	13,75	3,26	1,67	3,67	0,0710	964,2834
P4L	4,83	50,92	13,73	3,25	1,69	3,66	0,0673	978,0515
P4M	4,87	53,24	13,65	3,31	1,67	3,71	0,0684	1037,4383

Tabela A.1 – Propriedades geométricas dos perfis estudados (continuação)

Perfil	A (cm ²)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	r _x (cm)	r _y (cm)	r ₀ (cm)	J (cm ⁴)	C _w (cm ⁶)
P4N	4,83	50,99	13,67	3,25	1,68	3,66	0,0680	1043,7725
P4O	4,84	51,81	13,76	3,27	1,69	3,68	0,0681	1107,7689
P5B	4,77	48,56	13,43	3,19	1,68	3,60	0,0671	1143,4178
P5C	4,84	50,77	13,73	3,24	1,68	3,66	0,0687	1181,0694
P5D	4,76	51,00	13,35	3,27	1,67	3,68	0,0657	1210,0778
P5E	4,83	51,64	13,62	3,27	1,68	3,67	0,0680	1285,9077
P5F	4,70	50,41	13,15	3,28	1,67	3,68	0,0629	1294,5613
P5G	4,78	51,28	13,30	3,27	1,67	3,68	0,0666	1373,4651
P5H	4,80	51,93	13,45	3,29	1,67	3,69	0,0668	1404,3841
P5I	4,71	50,08	13,13	3,26	1,67	3,67	0,0636	1430,0137
P5J	4,80	52,85	13,50	3,32	1,68	3,72	0,0662	1509,5331
P5L	4,84	51,02	13,10	3,25	1,64	3,64	0,0715	1600,9313
P5M	4,80	50,52	13,71	3,24	1,69	3,66	0,0669	1587,7671
P5N	4,90	51,65	14,10	3,25	1,70	3,67	0,0709	1712,0984
P5O	4,91	50,74	14,04	3,21	1,69	3,63	0,0718	1749,0192

A Tabela A.2 apresenta as forças axiais de flambagem elástica consideradas para os modos de flambagem local, distorcional e global. A força axial de flambagem local elástica e a força axial de flambagem distorcional elástica, respectivamente N_l e N_{dist} , foram obtidas pelo programa CUFISM 3.12, sendo a força axial de flambagem global elástica, N_e , calculada pela planilha eletrônica desenvolvida neste trabalho.

Tabela A.2 – Forças axiais de flambagem elástica obtidas para os perfis estudados

Perfil	N_l (kN)	N_{dist} (kN)	N_e (kN)	Perfil	N_l (kN)	N_{dist} (kN)	N_e (kN)
U13	245,82	-	1909,63	U19	79,26	-	178,23
U15-1	114,41	-	8198,95	U21	79,26	-	79,17
U15-2	117,21	-	7928,72	U23	829,93	-	242,74
U15-3	114,41	-	8198,95	U25	100,40	-	107,45
U15-4	111,02	-	8459,67	U27	85,26	-	136,37
U15-5	111,02	-	8124,66	U28	85,26	-	89,94
U15-6	111,02	-	8124,66	U30	70,54	-	156,56
U15-7	111,02	-	8124,66	U31	70,54	-	102,84
U15-8	111,02	-	8124,66	U32	70,54	-	72,71
U37-3	94,29	-	2086,28	U34	780,71	-	193,91
U40	77,22	-	2355,88	U36-1	96,76	-	90,77
U44	64,80	-	1378,31	U36-2	96,76	-	90,77
U12	245,82	-	75,52	U38	77,22	-	104,74
U14-1	112,71	-	123,48	U39	77,20	-	71,49
U14-2	112,71	-	123,48	U41	64,43	-	125,18
U14-3	112,71	-	123,48	U42	64,43	-	81,67
U14-4	112,71	-	123,48	U43	64,43	-	59,95
U14-5	112,71	-	123,48	U18	91,98	-	2538,71
U14-6	112,71	-	123,48	U22	79,26	-	2933,56
U14-7	112,71	-	123,48	U24	829,93	-	5816,49
U14-8	112,71	-	123,48	U26	100,40	-	1027,87
U16	91,98	-	158,04	U29	85,26	-	2906,87
U17	91,98	-	101,22	U33	70,54	-	1678,24

Tabela A.2 – Forças axiais de flambagem elástica obtidas para os perfis estudados (continuação)

Perfil	N_l (kN)	N_{dist} (kN)	N_e (kN)	Perfil	N_l (kN)	N_{dist} (kN)	N_e (kN)
U35	780,71	-	4525,65	C22	122,45	219,71	150,19
U37-1	99,68	-	2008,53	C23	122,45	219,71	104,46
U37-2	96,76	-	1991,58	C25	39,32	78,27	143,19
A 71	1,14	3,90	108,63	C26	39,32	78,27	91,52
A 74	1,20	4,14	113,39	C27	39,32	78,27	63,33
A 75	1,20	4,12	111,87	C28	39,32	78,27	35,77
A 76	1,26	4,31	113,29	C33	41,71	112,42	39,68
A 101	4,19	11,02	169,37	C35	46,63	115,72	173,07
A 102	4,19	11,00	169,05	C36	46,63	115,72	110,45
A 103	4,19	10,96	168,28	C37	46,63	115,72	76,86
A 104	4,49	10,60	167,33	C37A	46,63	115,72	43,19
A 151	16,49	29,30	263,35	C40	1342,72	1049,00	311,27
A 152	15,78	28,06	259,11	C42	1472,94	1124,80	355,72
A 153	14,12	25,33	251,23	C44	161,88	153,91	120,61
A 154	14,56	29,71	267,29	C46-1	178,31	247,85	143,19
A 155	15,02	34,26	272,25	C46-2	178,31	247,85	143,19
A 156	14,48	29,13	254,19	C46-4	178,31	247,85	143,19
C4	1291,95	913,30	1796,15	C46-5	178,31	247,85	143,19
C6	1246,01	870,32	2312,70	C46-6	178,31	247,85	143,19
C10-1	158,61	216,45	2596,09	C46-7	178,31	247,85	143,19
C10-2	153,99	212,17	2575,55	C48	189,28	264,66	151,85
C10-3	156,27	214,14	2564,51	C50	112,41	152,15	224,78
C24	122,45	219,71	5767,07	C51	112,41	152,15	143,81
C29	39,32	78,27	2582,07	C52	112,41	152,15	99,97
C34	37,56	104,63	3321,91	C54	116,71	236,68	246,22
C37B	46,63	115,72	4316,58	C55	116,71	236,68	157,66
C41	1342,72	1049,00	3024,85	C63	41,85	70,52	107,40
C43	1472,94	1124,80	3978,70	C64	41,85	70,52	74,59
C45	161,88	153,91	4460,74	C64A	41,85	70,52	41,96
C47-1	179,43	244,90	5857,54	C65	46,36	122,90	186,62
C47-2	178,31	247,85	5814,63	C66	46,36	122,90	119,37
C47-3	178,31	247,85	5958,49	C67	46,36	122,90	82,92
C47-4	178,31	247,85	5958,49	C75	1854,20	968,24	383,30
C47-5	178,31	247,85	5958,49	C77	272,30	98,48	145,34
C47-7	178,31	247,85	5909,95	C79-1	228,59	170,48	171,67
C47-8	186,47	255,73	6034,56	C79-2	228,59	170,48	171,67
C49	189,28	264,66	6707,64	C81	251,02	245,22	196,51
C53	112,41	152,15	7581,62	C83	72,80	50,06	118,26
C57	116,71	236,68	9651,59	C84	72,80	50,06	76,48
C64B	41,85	70,52	5420,02	C84A	72,80	50,06	53,75
C67A	46,36	122,90	4012,77	C85	78,51	84,68	140,78
C76	1863,27	969,02	27161,92	C86	78,51	84,68	91,44
C78	215,68	98,49	6192,56	C86A	78,51	84,68	64,07
C80-1	239,02	175,22	8250,86	C87	81,74	121,23	169,21
C80-2	225,22	168,67	8104,37	C88	81,74	121,23	108,28
C80-3	225,20	168,70	8104,37	C88A	81,74	121,23	75,19
C82	251,02	245,22	10638,86	M3/P13	42,50	35,35	37,16
C84B	72,80	50,06	6880,14	M5/P25	412,47	166,23	412,90
C86B-3	78,51	84,68	11679,57	M6/P18	377,47	155,21	64,47
C86B-4	71,01	79,12	6296,26	M7/P14	42,36	35,20	2400,79
C88B	81,74	121,23	15756,40	PIB	783,48	259,23	2912,28
C3	1291,95	913,30	278,65	P1C	762,31	253,24	2886,21
C5	1246,01	609,08	307,91	P1D	697,66	244,59	2821,35
C9-1	156,27	214,14	103,61	P1E	734,12	247,05	2855,06
C9-2	156,27	214,14	103,61	P1F	694,34	243,27	2833,34
C21	122,45	219,71	235,22	P1G	688,61	240,44	2828,32

Tabela A.2 – Forças axiais de flambagem elástica obtidas para os perfis estudados (continuação)

Perfil	N_l (kN)	N_{dist} (kN)	N_e (kN)	Perfil	N_l (kN)	N_{dist} (kN)	N_e (kN)
P1H	702,38	242,38	2829,81	P4B	819,73	270,64	59,66
P1I	701,45	242,45	2818,58	P4C	827,07	273,85	59,95
P1J	800,55	266,80	2955,88	P4D	837,19	277,28	60,18
P2A	686,72	240,87	315,97	P4E	690,58	287,41	65,37
P2B	637,91	228,14	308,13	P4F	729,07	253,33	58,07
P2C	723,91	246,91	318,26	P4G	803,51	266,95	59,97
P2D	812,70	268,91	329,69	P4H	769,18	259,68	58,76
P2E	751,44	256,48	321,96	P4I	753,83	253,07	58,35
P2F	807,87	270,46	328,62	P4J	757,78	255,59	59,49
P2G	696,65	243,40	316,38	P4K	855,13	275,29	61,56
P2H	724,67	246,13	317,95	P4L	808,62	262,65	61,47
P2I	799,88	267,32	327,26	P4M	814,13	270,04	61,07
P2J	769,08	257,23	323,59	P4N	815,37	265,57	61,17
P3B	739,63	259,34	116,34	P4O	809,25	265,96	61,57
P3C	710,41	252,36	114,26	P5B	813,64	260,63	36,36
P3D	763,88	260,43	116,77	P5C	819,53	265,57	37,16
P3E	722,27	249,43	113,29	P5D	783,83	260,65	36,15
P3F	745,84	253,55	113,73	P5E	810,35	266,41	36,88
P3G	741,23	254,19	115,49	P5F	753,72	253,39	35,60
P3H	740,23	255,32	114,07	P5G	799,80	264,94	36,01
P3I	733,75	249,86	114,66	P5H	795,01	264,28	36,42
P3J	764,81	260,02	115,67	P5I	766,89	255,28	35,56
P3K	762,32	249,90	118,62	P5J	783,11	263,18	36,56
P3L	803,79	260,50	118,82	P5L	871,79	281,93	35,47
P3M	791,47	261,78	117,56	P5M	799,91	259,24	37,12
P3N	803,93	258,52	119,82	P5N	832,91	269,23	38,17
P3O	873,50	276,01	120,64	P5O	862,78	271,76	38,02

Anexo B

Nos itens B.1 à B.4, é realizado um teste de aderência (do tipo Qui-quadrado) para a verificação da distribuição de probabilidade do erro do modelo estudado no item 5.4.4, considerando as condições de restrição nas extremidades das barras ($K_x = K_y = 0,70$ para os perfis Se; $K_x = 0,65$ e $K_y = 0,70$ para os perfis U e Ue).

O teste Qui-quadrado compara as frequências absolutas observadas o_1, o_2, \dots, o_n de n valores (ou em n intervalos) da variável com a correspondente frequência absoluta esperada e_1, e_2, \dots, e_n de uma distribuição de probabilidade adotada. A base para a avaliação da qualidade dessa comparação é o valor:

$$Q^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i} \quad (\text{A.1})$$

que se aproxima da distribuição Qui-quadrado, χ_f^2 , com f graus de liberdades, sendo:

$$f = n - 1 - g \quad (\text{A.2})$$

onde g é o número de parâmetros estimados.

Desse modo, se uma distribuição de probabilidades adotada fornecer:

$$Q^2 < q_c \quad (\text{A.3})$$

onde q_c é o valor da distribuição χ_f^2 apropriada na probabilidade acumulada $(1 - \alpha)$, a distribuição teórica adotada é um modelo aceitável, no nível de significância α . Caso contrário, a distribuição adotada não é apropriada para os dados no nível de significância α .

Para garantir a qualidade do ajuste da distribuição de probabilidade, deve-se adotar no teste Qui-quadrado um mínimo de 5 intervalos e o valor mínimo de 5 para todas as frequências absolutas esperadas. Procurou-se também trabalhar com $\alpha \geq 5\%$.

B.1 Teste Qui-quadrado para a distribuição do erro do modelo 1

Parâmetros estimados a partir da amostra:

$$\text{média} = 1,12 \qquad \text{desvio padrão} = 0,15 \qquad g = 2$$

Teste de hipóteses:

H_0 : erro do modelo 1 $\sim N(1,12 ; 0,15)$ [hipótese nula]

H_a : erro do modelo 1 tem outra distribuição [hipótese alternativa]

Tabela B.1 – Frequências observada e esperada para o erro do modelo 1

Intervalo	Erro do modelo	o_i	e_i	$(o_i - e_i)^2/e_i$
1	--- 0,900	11	14,68	0,92
2	0,900 --- 0,925	5	5,45	0,04
3	0,925 --- 0,950	9	6,81	0,70
4	0,950 --- 0,975	3	8,27	3,36
5	0,975 --- 1,000	7	9,75	0,78
6	1,000 --- 1,025	18	11,17	4,17
7	1,025 --- 1,050	19	12,43	3,47
8	1,050 --- 1,075	12	13,44	0,15
9	1,075 --- 1,100	17	14,11	0,59
10	1,100 --- 1,125	18	14,40	0,90
11	1,125 --- 1,150	13	14,27	0,11
12	1,150 --- 1,175	10	13,73	1,02
13	1,175 --- 1,200	14	12,84	0,10
14	1,200 --- 1,225	9	11,67	0,61

Tabela B.1 – Frequências observada e esperada para o erro do modelo 1 (continuação)

Intervalo	Erro do modelo	o_i	e_i	$(o_i - e_i)^2/e_i$
15	1,225 --- 1,250	11	10,29	0,05
16	1,250 --- 1,275	8	8,82	0,08
17	1,275 --- 1,300	3	7,35	2,57
18	1,300 --- 1,325	6	5,94	0,00
19	1,325 ---	19	16,57	0,36

$f = 19 - 1 - 2 = 16$ graus de liberdade

$$Q^2 = 19,98$$

Para $q_c = Q^2$, a hipótese H_0 é aceitável com $\alpha = 22,10\%$

B.2 Teste Qui-quadrado para a distribuição do erro do modelo 2

Parâmetros estimados a partir da amostra:

$$\text{média} = 1,09 \quad \text{desvio padrão} = 0,14 \quad g = 2$$

Teste de hipóteses:

H_0 : erro do modelo 2 $\sim N(1,09 ; 0,14)$ [hipótese nula]

H_a : erro do modelo 2 tem outra distribuição [hipótese alternativa]

Tabela B.2 – Frequências observada e esperada para o erro do modelo 2

Intervalo	Erro do modelo	o_i	e_i	$(o_i - e_i)^2/e_i$
1	--- 0,875	13	12,66	0,01
2	0,875 --- 0,900	4	5,29	0,32
3	0,900 --- 0,925	6	6,80	0,09
4	0,925 --- 0,950	6	8,45	0,71
5	0,950 --- 0,975	6	10,15	1,70
6	0,975 --- 1,000	9	11,80	0,67
7	1,000 --- 1,025	19	13,27	2,47
8	1,025 --- 1,050	16	14,43	0,17

Tabela B.2 – Frequências observada e esperada para o erro do modelo 2 (continuação)

Intervalo	Erro do modelo	o_i	e_i	$(o_i - e_i)^2/e_i$
9	1,050 --- 1,075	14	15,18	0,09
10	1,075 --- 1,100	18	15,44	0,42
11	1,100 --- 1,125	21	15,20	2,22
12	1,125 --- 1,150	16	14,46	0,16
13	1,150 --- 1,175	15	13,31	0,21
14	1,175 --- 1,200	16	11,85	1,45
15	1,200 --- 1,225	9	10,21	0,14
16	1,225 --- 1,250	6	8,50	0,74
17	1,250 --- 1,275	4	6,85	1,18
18	1,275 --- 1,300	1	5,34	3,52
19	1,300 ---	13	12,81	0,00

$f = 19 - 1 - 2 = 16$ graus de liberdade

$$Q^2 = 16,29$$

Para $q_c = Q^2$, a hipótese H_0 é aceitável com $\alpha = 43,31\%$

B.3 Teste Qui-quadrado para a distribuição do erro do modelo 3

Parâmetros estimados a partir da amostra:

$$\text{média} = 1,08 \quad \text{desvio padrão} = 0,13 \quad g = 2$$

Teste de hipóteses:

H_0 : erro do modelo 3 $\sim N(1,08 ; 0,13)$ [hipótese nula]

H_a : erro do modelo 3 tem outra distribuição [hipótese alternativa]

Tabela B.3 – Frequências observada e esperada para o erro do modelo 3

Intervalo	Erro do modelo	o_i	e_i	$(o_i - e_i)^2/e_i$
1	--- 0,875	10	11,30	0,15
2	0,875 --- 0,900	4	5,24	0,29

Tabela B.3 – Frequências observada e esperada para o erro do modelo 3 (continuação)

Intervalo	Erro do modelo	o_i	e_i	$(o_i - e_i)^2/e_i$
3	0,900 --- 0,925	8	6,91	0,17
4	0,925 --- 0,950	11	8,77	0,57
5	0,950 --- 0,975	4	10,71	4,20
6	0,975 --- 1,000	11	12,59	0,20
7	1,000 --- 1,025	16	14,25	0,21
8	1,025 --- 1,050	17	15,54	0,14
9	1,050 --- 1,075	19	16,30	0,45
10	1,075 --- 1,100	18	16,47	0,14
11	1,100 --- 1,125	24	16,01	3,98
12	1,125 --- 1,150	20	14,99	1,67
13	1,150 --- 1,175	11	13,51	0,47
14	1,175 --- 1,200	9	11,73	0,63
15	1,200 --- 1,225	5	9,80	2,35
16	1,225 --- 1,250	8	7,88	0,00
17	1,250 --- 1,275	5	6,10	0,20
18	1,275 ---	12	13,90	0,26

$f = 18 - 1 - 2 = 15$ graus de liberdade

$$Q^2 = 16,10$$

Para $q_c = Q^2$, a hipótese H_0 é aceitável com $\alpha = 37,57\%$

B.4 Teste Qui-quadrado para a distribuição do erro do modelo 4

Parâmetros estimados a partir da amostra:

$$\text{média} = 1,05 \quad \text{desvio padrão} = 0,13 \quad g = 2$$

Teste de hipóteses:

H_0 : erro do modelo 4 $\sim N(1,05 ; 0,13)$ [hipótese nula]

H_a : erro do modelo 4 tem outra distribuição [hipótese alternativa]

Tabela B.4 – Frequências observada e esperada para o erro do modelo 4

Intervalo	Erro do modelo	o_i	e_i	$(o_i - e_i)^2/e_i$
1	--- 0,850	13	11,96	0,09
2	0,850 --- 0,875	3	5,43	1,09
3	0,875 --- 0,900	7	7,10	0,00
4	0,900 --- 0,925	7	8,95	0,43
5	0,925 --- 0,950	9	10,87	0,32
6	0,950 --- 0,975	9	12,71	1,08
7	0,975 --- 1,000	10	14,32	1,30
8	1,000 --- 1,025	25	15,54	5,76
9	1,025 --- 1,050	19	16,24	0,47
10	1,050 --- 1,075	17	16,34	0,03
11	1,075 --- 1,100	19	15,85	0,63
12	1,100 --- 1,125	21	14,80	2,60
13	1,125 --- 1,150	12	13,31	0,13
14	1,150 --- 1,175	12	11,53	0,02
15	1,175 --- 1,200	11	9,62	0,20
16	1,200 --- 1,225	3	7,74	2,90
17	1,225 --- 1,250	3	5,99	1,49
18	1,250 ---	12	13,69	0,21

$f = 18 - 1 - 2 = 15$ graus de liberdade

$$Q^2 = 18,75$$

Para $q_c = Q^2$, a hipótese H_0 é aceitável com $\alpha = 22,55\%$