



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



CARLA DE AMORIM LANA DIB

**ANÁLISE NUMÉRICA DA FLAMBAGEM DISTORCIONAL
DE PERFIS FORMADOS A FRIO TIPO CARTOLA
SUBMETIDOS À FLEXÃO NÃO-UNIFORME**

Uberlândia, 2023

CARLA DE AMORIM LANA DIB

**ANÁLISE NUMÉRICA DA FLAMBAGEM DISTORCIONAL
DE PERFIS FORMADOS A FRIO TIPO CARTOLA
SUBMETIDOS À FLEXÃO NÃO-UNIFORME**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Gregório Sandro Vieira

Uberlândia, 2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

D543
2023

Dib, Carla de Amorim Lana, 1990-
Análise numérica da flambagem distorcional de perfis
formados a frio tipo cartola submetidos à flexão não-
uniforme [recurso eletrônico] / Carla de Amorim Lana
Dib. - 2023.

Orientador: Gregorio Sandro Vieira.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Civil.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.120>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. I. Vieira, Gregorio Sandro, 1981-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-
graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 288, PPGEC				
Data:	24 de fevereiro de 2023	Hora de início:	9:06 h	Hora de encerramento:	11 : 05 h
Matrícula do Discente:	12112ECV005				
Nome do Discente:	Carla de Amorim Lana Dib				
Título do Trabalho:	Análise numérica da flambagem distorcional de perfis formados a frio tipo cartola submetidos à flexão não-uniforme				
Área de concentração:	Construção Civil, Estruturas e Geotecnia				
Linha de pesquisa:	Estruturas				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Estudo do comportamento de elementos estruturais em aço e mistos aço-concreto				

Reuniu-se, em sessão pública por webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Ariovaldo Fernandes de Almeida - UFG, Felipe Piana Vendramell Ferreira - UFU e Gregório Sandro Vieira orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Gregório Sandro Vieira, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Gregorio Sandro Vieira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 24/02/2023, às 11:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Piana Vendramell Ferreira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 24/02/2023, às 11:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ariovaldo Fernandes de Almeida, Usuário Externo**, em 24/02/2023, às 11:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4238047** e o código CRC **60BC0F1E**.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmã por todo o esforço investido na minha educação, pelo amor, incentivo e suporte incondicional.

Aos meus familiares, amigos e colegas pela amizade e apoio.

Ao meu professor orientador pela atenção e valiosas contribuições durante todo o processo.

À Universidade Federal de Uberlândia e professores pela qualidade do ensino.

À FAPEMIG pelo apoio financeiro.

“The more we learn, the more we discover how much we do not know.”

– Yoda

RESUMO

Os perfis formados a frio (PFF) têm destaque entre as estruturas de aço devido à sua leveza, eficiência estrutural (alta relação resistência/peso) e versatilidade de utilização. Entretanto, em virtude da espessura reduzida de seus elementos, os PFF estão propensos a fenômenos de instabilidade. O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento estrutural de vigas em perfis formados a frio do tipo cartola submetidas à flexão não-uniforme em torno dos eixos de maior e menor inércia, relativamente aos riscos do modo de flambagem distorcional. Através da Teoria Generalizada de Vigas, por meio do programa computacional GBTUL, foram identificadas geometrias onde o modo de flambagem distorcional é predominante, apresentando: participação modal distorcional (P_D) maior que 85% e momento crítico de flambagem distorcional (M_{crD}) significativamente abaixo dos momentos críticos de flambagem local (M_{crL}) e global (M_{crG}). Através do programa computacional ABAQUS, um modelo numérico de casca em elementos finitos foi desenvolvido para realizar as análises de flambagem e pós-flambagem das geometrias selecionadas. Os resultados obtidos com o modelo numérico desenvolvido – que incluem trajetórias de equilíbrio, configurações deformadas, momentos resistentes e mecanismos de colapso – evidenciam que a curva de dimensionamento distorcional do Método da Resistência Direta (MRD) atualmente normatizada é inadequada para estimar a resistência das estruturas com índice de esbeltez moderado a alto. Dessa forma, foram propostos ajustes nos parâmetros da curva, a fim de possibilitar uma melhor estimativa da capacidade resistente dos perfis.

PALAVRAS-CHAVE: análise numérica; perfis formados a frio; flambagem distorcional; flexão não-uniforme.

ABSTRACT

Cold-formed steel (CFS) members stand out among steel structures notably due to their lightness, structural efficiency (high strength-to-weight ratio) and versatility. However, given their thin-walled geometry, CFS are highly susceptible to instability phenomena. The objective of this research is to analyze the structural behavior of cold-formed steel hat-section beams under non-uniform bending about the major and minor-axis, regarding the risks of distortional buckling. Through the Generalized Beam Theory (GBT), using the computational program GBTUL, the geometries where the distortional failure is predominant were selected, presenting: distortional modal participation (P_D) greater than 85% and distortional critical buckling moments (M_{crD}) significantly below their local (M_{crD}) and global (M_{crG}) counterparts. Through the computational program ABAQUS, a shell finite element model was developed to perform buckling and post-buckling analysis on the selected beams. The results obtained from the developed model – which include equilibrium paths, deformed configurations, failure moments and collapse mechanisms – show that the currently codified Direct Strength Method (DSM) distortional design curve is inadequate to estimate failure moments in the moderate-to-high slenderness range. Thus, modifications in the design curves were proposed, in order to improve the predictions of the beams' resistant capacity.

KEYWORDS: numerical analysis; cold-formed steel; distortional buckling; non-uniform bending.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura e cobertura em perfis formados a frio.....	12
Figura 2 – Processo de fabricação de PFF: (a) perfilação e (b) prensa dobradeira.....	13
Figura 3 – Seções transversais de PFF: (a) U, (b) U enrijecido, (c) Z enrijecido e (d) cartola.....	13
Figura 4 – Modos de flambagem em PFF: (a) local, (b) distorcional e (c) global.....	16
Figura 5 – Curva de assinatura ($N_{cr} \times L$).....	17
Figura 6 – Estrutura em PFF discretizada com diferentes refinamentos de malha.....	18
Figura 7 – Modos de flambagem: (1 - 4) global, (5 - 6) distorcional e (7 - 17) local.....	23
Figura 8 – Hipóteses de carregamento.....	24
Figura 9 – Curvas de assinatura ($M_{cr} \times L$).....	25
Figura 10 – Seção transversal do perfil tipo cartola.....	26
Figura 11 – Curvas de assinatura ($M_{crD} \times L$) para os gradientes de momento (ψ) – H _M 2.....	29
Figura 12 – Curvas de assinatura ($M_{crD} \times L$) para os gradientes de momento (ψ) – H _m 2.....	30
Figura 13 – Elementos de casca S4 e S4R.....	31
Figura 14 – Restrições de deslocamento e rotação.....	34
Figura 15 – Carregamentos: momentos aplicados sobre as placas rígidas.....	34
Figura 16 – $M_u/M_{u,2,5}$ para diferentes dimensões dos elementos.....	36
Figura 17 – Modo de flambagem distorcional: configuração deformada.....	40
Figura 18 – Trajetórias de equilíbrio obtidas (a) via modelo e (b) via Depolli (2018).....	42
Figura 19 – Trajetórias de equilíbrio: abertura e fechamento do conjunto mesa-enrijecedor...	43
Figura 20 – Trajetórias de equilíbrio de pós-flambagem e mecanismos de colapso – H5.....	45
Figura 21 – Nuvens de pontos $M_u/M_{crD} \times \lambda_{dist}$	47
Figura 22 – Nuvens de pontos $M_u/M_y \times \lambda_{dist}$	48
Figura 23 – Comparativo: curvas de dimensionamento e momentos resistentes obtidos.....	50
Figura 24 – Comparativo: curvas de dimensionamento normativa e propostas.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros geométricos das vigas selecionadas.....	26
Tabela 2 – Comprimentos críticos, M_{crD} e suas relações e participação modal – $\psi = 1$	27
Tabela 3 – Comprimentos críticos, M_{crD} e suas relações e participação modal – $\psi = 0,5$	27
Tabela 4 – Comprimentos críticos, M_{crD} e suas relações e participação modal – $\psi = 0$	28
Tabela 5 – Comprimentos críticos, M_{crD} e suas relações e participação modal – $\psi = -0,5$	28
Tabela 6 – Comprimentos críticos, M_{crD} e suas relações e participação modal – $\psi = -1$	29
Tabela 7 – Momentos críticos de flambagem para S4 e S4R.....	32
Tabela 8 – Momentos críticos de flambagem normalizados para S4 e S4R.....	32
Tabela 9 – Índices de esbeltez distorcional adotados.....	33
Tabela 10 – Momentos resistentes para diferentes refinamentos de malha.....	35
Tabela 11 – Momentos críticos de flambagem M_{ABQ} e relação com M_{GBTUL} – $\psi = 1$	37
Tabela 12 – Momentos críticos de flambagem M_{ABQ} e relação com M_{GBTUL} – $\psi = 0,5$	38
Tabela 13 – Momentos críticos de flambagem M_{ABQ} e relação com M_{GBTUL} – $\psi = 0$	38
Tabela 14 – Momentos críticos de flambagem M_{ABQ} e relação com M_{GBTUL} – $\psi = -0,5$	39
Tabela 15 – Momentos críticos de flambagem M_{ABQ} e relação com M_{GBTUL} – $\psi = -1$	39
Tabela 16 – Momentos últimos obtidos e reportados por Depolli (2018) – viga C02.....	41

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS ROMANAS

b_f	Comprimento da mesa
b_l	Comprimento do enrijecedor
b_w	Comprimento da alma
C_{yd}	Fator de deformação devido à compressão
E	Módulo de elasticidade do aço
f_y	Tensão de escoamento do aço
H	Viga cartola / <i>hat</i>
H_m	Viga cartola submetida à flexão em torno do eixo de menor inércia
H_M	Viga cartola submetida à flexão em torno do eixo de maior inércia
L	Comprimento
L_D	Comprimento crítico de flambagem distorcional
M	Momento fletor
M_{ABQ}	Momento de flambagem elástico obtido pelo ABAQUS
M_{cr}	Momento crítico de flambagem
M_{crD}	Momento crítico de flambagem distorcional
M_{crG}	Momento crítico de flambagem global
M_{crL}	Momento crítico de flambagem local
M_{dist}	Momento fletor elástico associado à flambagem distorcional
M_{GBTUL}	Momento de flambagem elástico obtido pelo GBTUL
M_{Rdist}	Momento fletor resistente associado à flambagem distorcional
M_u	Momento último
M_p	Momento fletor de plastificação
M_y	Momento fletor de escoamento
$M_1; M_2$	Momentos de extremidade
P_D	Participação modal distorcional
t	Espessura
W	Módulo de resistência elástico
Z	Módulo de resistência plástico

LETRAS GREGAS

ν	Coefficiente de Poisson do aço
δ	Deslocamento vertical
ψ	Gradiente de momento
λ_{dist}	Índice de esbeltez distorcional
σ_{vM}	Tensão de von Mises

SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
AS/NZS	Australian / New Zealand Standards
GBT	Teoria Generalizada de Vigas / <i>Generalized Beam Theory</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
MFF	Método das Faixas Finitas
MLE	Método da Largura Efetiva
MRD	Método da Resistência Direta
MSE	Método da Seção Efetiva
PFF	Perfil Formado a Frio
SQR	Soma dos Quadrados dos Resíduos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	MOTIVAÇÃO.....	14
1.2	OBJETIVOS.....	15
1.3	METODOLOGIA.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	MODOS DE FLAMBAGEM.....	16
2.2	TEORIA GENERALIZADA DE VIGAS.....	17
2.3	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	18
2.4	MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA.....	19
2.5	ESTUDOS SOBRE O MODO DE FALHA DISTORCIONAL EM VIGAS.....	20
3	ANÁLISE DE FLAMBAGEM.....	23
3.1	SELEÇÃO DA GEOMETRIA DAS VIGAS.....	23
4	ANÁLISES DE PÓS-FLAMBAGEM.....	31
4.1	MODELO NUMÉRICO EM ELEMENTOS FINITOS.....	31
4.1.1	<i>Estudo de convergência de malha.....</i>	<i>35</i>
4.1.2	<i>Validação do modelo numérico.....</i>	<i>36</i>
4.2	PÓS-FLAMBAGEM ELÁSTICA.....	43
4.3	PÓS-FLAMBAGEM ELÁSTO-PLÁSTICA.....	44
5	MOMENTO RESISTENTE.....	46
5.1	MOMENTO RESISTENTE VIA MODELO NUMÉRICO.....	46
5.2	MOMENTO RESISTENTE VIA MRD.....	49
5.3	AJUSTES NAS CURVAS DE DIMENSIONAMENTO.....	51
6	CONCLUSÕES.....	54
	REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

Os perfis formados a frio (PFF) têm destaque entre as estruturas de aço devido à sua leveza, eficiência estrutural (alta relação resistência/peso), facilidade de fabricação, manuseio, transporte e montagem, além de enorme versatilidade de utilização. São amplamente empregados em vários segmentos da construção civil devido à enorme variedade de geometrias que podem ser obtidas no seu processo de fabricação, conforme exemplificado na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura e cobertura em perfis formados a frio

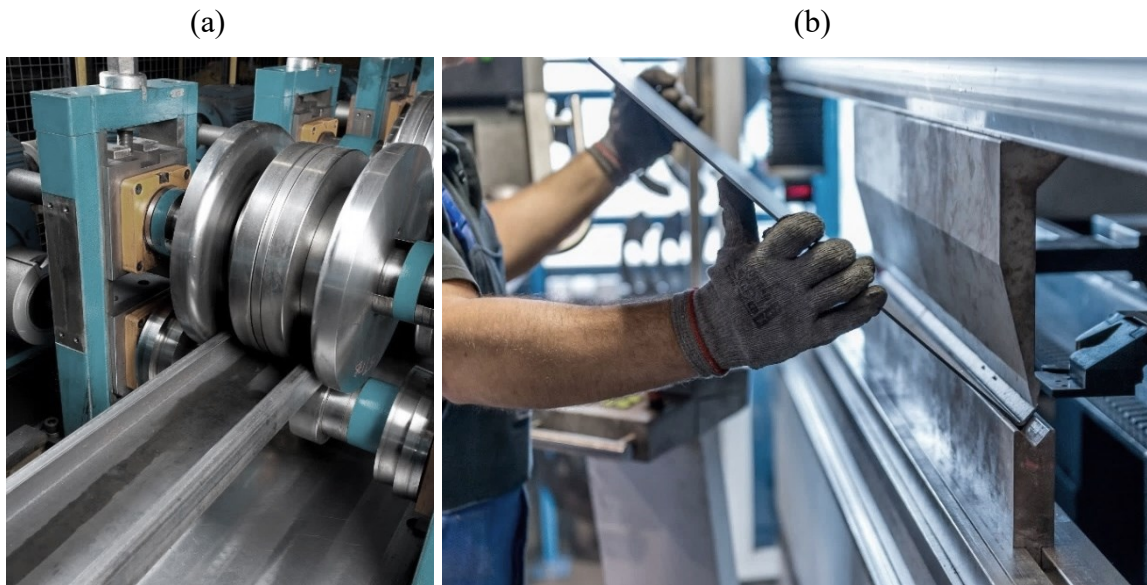


Fonte: Welcomia¹.

Os perfis formados a frio são fabricados a partir da conformação a frio de chapas finas de aço (as espessuras variam entre 0,4 mm e 8 mm), por meio de um processo contínuo – realizado a partir do deslocamento longitudinal de uma chapa de aço sobre os roletes de uma linha de perfilação, que conferem forma à chapa gradativamente – ou descontínuo – realizado por meio da utilização de uma prensa dobradeira, com comprimento do perfil limitado à largura da prensa. Os equipamentos utilizados na fabricação dos perfis são mostrados na Figura 2.

¹ Acessado em 16 de janeiro de 2023 (https://welcomia.com/file/20258/building_steel_skeleton_frame)

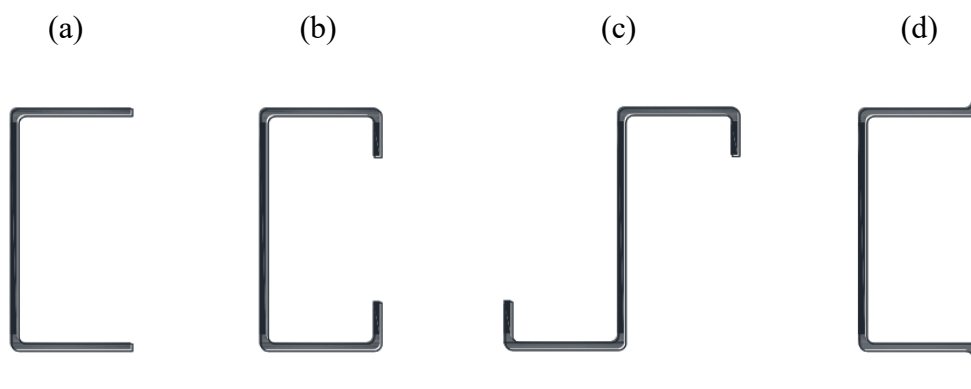
Figura 2 – Processo de fabricação de PFF: (a) perfilação e (b) prensa dobradeira



Fonte: (a) Stelcon² e (b) Heilig Fabrication³.

A ABNT NBR 6355:2012 regulamenta a utilização dos perfis formados a frio e trata da sua padronização. Na Figura 3 são apresentadas as seções transversais usualmente empregadas em estruturas de PFF e sua nomenclatura, conforme norma.

Figura 3 – Seções transversais de PFF: (a) U, (b) U enrijecido, (c) Z enrijecido e (d) cartola



Fonte: Adaptado de Souza et al., 2020.

Em virtude da espessura reduzida de seus elementos, os perfis formados a frio estão propensos a fenômenos de instabilidade, que podem causar o colapso da estrutura antes que a capacidade

² Acessado em 16 de janeiro de 2023 (<https://www.stelcongroup.com/>)

³ Acessado em 16 de janeiro de 2023 (<https://www.heiligfabrication.com/en/services/cnc-press-brake/>)

resistente do material seja atingida. Conforme evidenciado por Martins et al. (2017a), essa perda de estabilidade pode se desenvolver por meio de modos de flambagem local (L), distorcional (D) ou global (G), ou suas interações local-distorcional (LD), local-global (LG), distorcional-global (DG) e local-distorcional-global (LDG) – que ocorrem quando as forças críticas de flambagem correspondentes a diferentes modos apresentam valores próximos.

O desempenho do elemento estrutural está estreitamente relacionado com a sua geometria, condições de apoio e carregamentos – dependendo da configuração do sistema, qualquer modo de flambagem pode ser o modo crítico (ou seja, aquele que corresponde à menor força de flambagem). Entre os métodos numéricos mais utilizados para calcular a força crítica de flambagem e determinar o modo de flambagem correspondente, estão o Método das Faixas Finitas (MFF), o Método dos Elementos Finitos (MEF) e a Teoria Generalizada de Vigas (*Generalized Beam Theory* – GBT). Uma vez determinada a força crítica de flambagem, para a determinação dos esforços resistentes a norma brasileira ABNT NBR 14762:2010 e as normas internacionais, como a AISI S100-16 e AS/NZS 4600:2018 – que tratam do dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – preveem três métodos: o Método da Largura Efetiva (MLE), o Método da Seção Efetiva (MSE) e o Método da Resistência Direta (MRD).

1.1 MOTIVAÇÃO

É fundamental que o comportamento relacionado aos fenômenos de instabilidade seja levado em consideração para o dimensionamento e a verificação da segurança estrutural de perfis formados a frio. Para o caso específico do modo de flambagem distorcional em perfis formados a frio tipo cartola submetidos à flexão não-uniforme é possível observar uma lacuna de conhecimento e carência de apontamentos normativos – as normas técnicas vigentes não apresentam formulações e disposições adequadas e existem poucos estudos que tratam do tema: os estudos sobre o modo de flambagem distorcional focam quase exclusivamente em colunas (componentes uniformemente comprimidos) – como o estudo desenvolvido por Santos, Landesmann e Camotim (2020) – e, em menor proporção, vigas sob flexão uniforme, em torno do eixo de maior inércia, na maioria dos casos – como os estudos de Prola e Camotim (2002), Landesmann e Camotim (2016) e Barichello, Landesmann e Camotim (2017); a flexão em torno do eixo de menor inércia constitui um problema significativamente menos estudado – como o

estudo desenvolvido por Martins et al. (2017b) – mesmo que seja muito utilizada em aplicações práticas.

Dessa forma, observa-se a necessidade de desenvolver estudos e aprofundar os conhecimentos sobre o desempenho estrutural dos elementos afetados pelo modo de flambagem distorcional, a fim de desenvolver, calibrar ou validar metodologias e normatizações capazes de lidar com tais cenários.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento estrutural de vigas em perfis formados a frio do tipo cartola, submetidas à flexão não-uniforme em torno dos eixos de maior e menor inércia, relativamente aos riscos do modo de flambagem distorcional. Diante disso, os objetivos específicos são:

- Analisar o comportamento de flambagem e pós-flambagem (em regime elástico e regime elasto-plástico) dos elementos, para diferentes hipóteses de carregamento e índices de esbeltez distorcional;
- Verificar a aplicabilidade do Método da Resistência Direta na estimativa dos esforços resistentes e propor ajustes, caso necessário.

1.3 METODOLOGIA

Inicialmente, através da Teoria Generalizada de Vigas, serão realizadas análises de estabilidade de forma a selecionar as geometrias onde o modo de flambagem distorcional é predominante. Para isso, será utilizado o programa computacional GBTUL. Na sequência, através do Método dos Elementos Finitos, um modelo numérico será desenvolvido por meio do programa computacional ABAQUS, para realização de análises de flambagem e pós-flambagem (em regime elástico e elasto-plástico) dos elementos selecionados. Por fim, será verificada a eficiência do Método da Resistência Direta no dimensionamento dos perfis formados a frio analisados nesse estudo, através da comparação dos valores de resistência última obtidas com o modelo desenvolvido e previstas pelo método. Serão propostos ajustes caso o método não atenda as condições de segurança para os casos considerados.

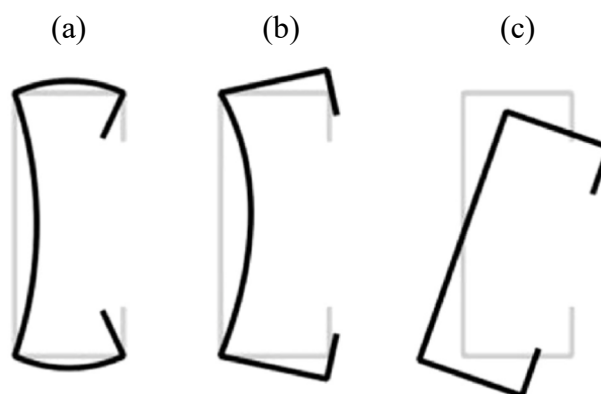
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma breve revisão bibliográfica foi desenvolvida com o intuito de identificar o estado atual de conhecimento acerca do problema da flambagem distorcional em perfis formados a frio. Para isso, serão apresentados os principais aspectos relativos aos modos de flambagem, aos métodos de análise de estabilidade e dimensionamento empregados, e os estudos mais relevantes desenvolvidos sobre o tema.

2.1 MODOS DE FLAMBAGEM

Conforme evidenciado por Martins et al. (2017a), a perda de estabilidade nos perfis formados a frio pode se desenvolver por meio de modos de flambagem local (L), distorcional (D) ou global (G), ou suas interações (dependendo da configuração do sistema – como parâmetros geométricos, parâmetros do material, condições de apoio e carregamentos – qualquer modo de instabilidade pode ser o modo crítico, ou seja, aquele que causa a falha do elemento estrutural. O tipo de deformação apresentada pelo elemento estrutural após a flambagem indica o modo de instabilidade ocorrido: o modo de flambagem local corresponde à deformação dos elementos da seção transversal (alma, mesa ou enrijecedor), o modo distorcional envolve a deformação dos elementos da seção transversal associado ao deslocamento das arestas e o modo de flambagem global se caracteriza pela deformação do perfil sem alteração do formato da seção, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Modos de flambagem em PFF: (a) local, (b) distorcional e (c) global

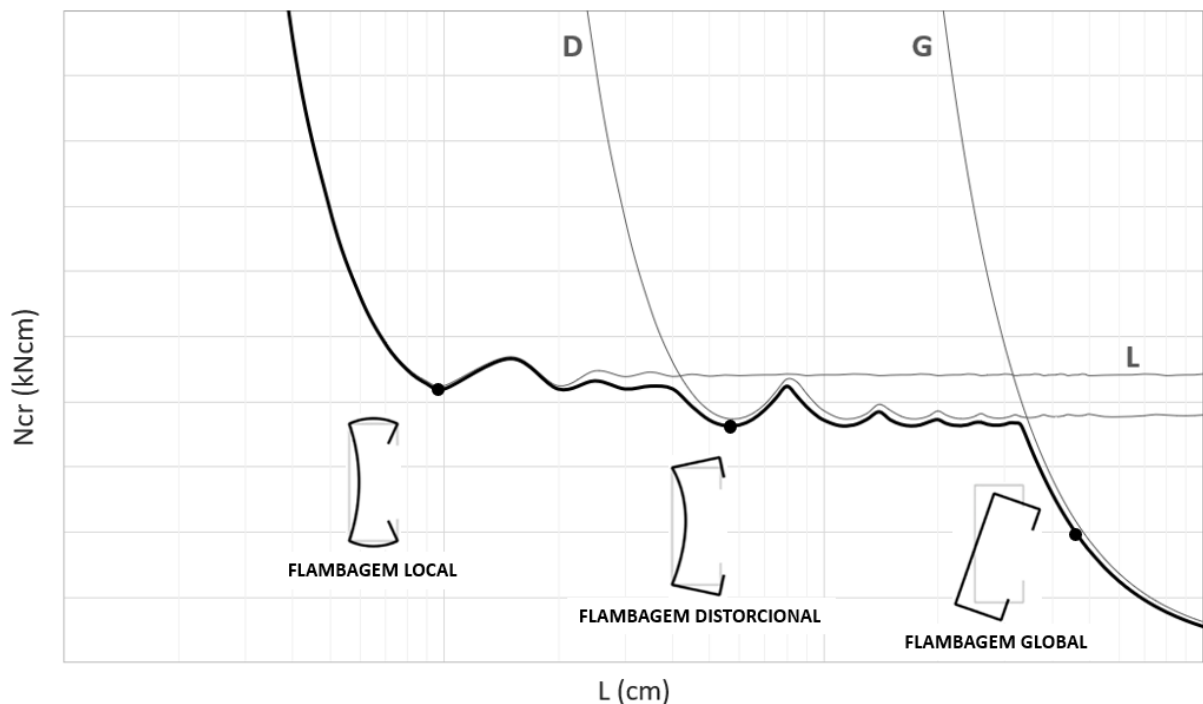


Fonte: Adaptado de Franco et al. (2014).

2.2 TEORIA GENERALIZADA DE VIGAS

Desenvolvida por Schardt (1994), a Teoria Generalizada de Viga é um método para análise de flambagem que permite quantificar a porcentagem de participação de cada modo de instabilidade do perfil, possibilitando melhor interpretação dos dados. A partir do método, Bebiano, Camotim e Gonçalves (2018) desenvolveram o programa computacional GBTUL, que permite realizar análises de instabilidade em perfis formados a frio, determinando a força crítica de flambagem e o modo de flambagem correspondente, além de exibir a curva de assinatura (curva que relaciona a força crítica com o comprimento do perfil). Por meio da curva de assinatura, ilustrada na Figura 5, é possível visualizar o comportamento da força crítica de flambagem em função do comprimento (escala logarítmica) e identificar o modo pelo qual o perfil perde a estabilidade: local (L), distorcional (D) ou global (G).

Figura 5 – Curva de assinatura ($N_{cr} \times L$)



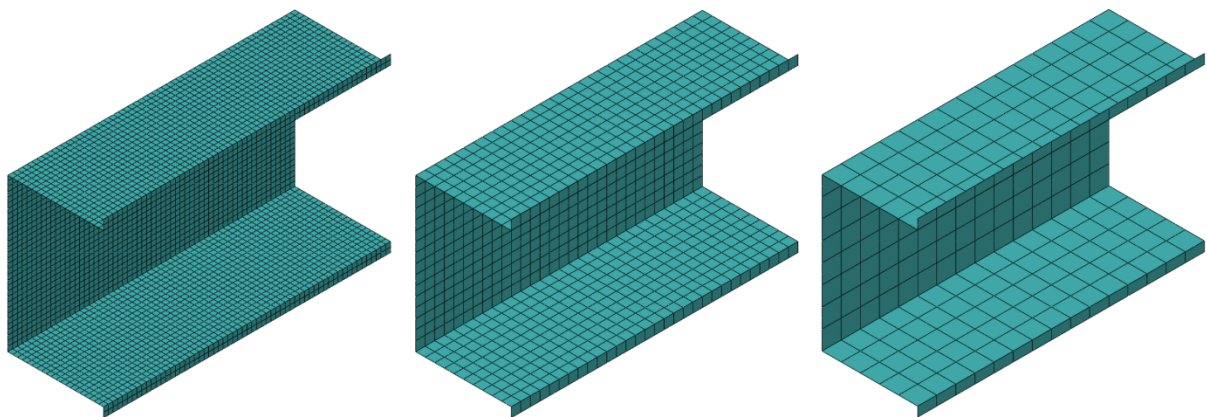
Fonte: Autor.

Conforme evidenciado por Martins et al. (2017a), as interações entre os modos de flambagem ocorrem quando os valores de força crítica correspondentes a diferentes modos apresentam valores próximos.

2.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Conforme apresentado por Reddy (2005), o Método dos Elementos Finitos é utilizado para reproduzir o comportamento das estruturas, traduzindo os modelos de forma numérica e resolvendo equações diferenciais para obtenção dos resultados. O método permite resolver um problema complexo discretizando a estrutura em uma série de elementos de geometria simples (os elementos finitos), conectados entre si através de pontos nodais criando uma malha. Os elementos finitos são agrupados em famílias, conforme a natureza de sua aplicação e a precisão do método depende da quantidade de nós e elementos, do tamanho e dos tipos de elemento finito. Na modelagem em elementos finitos, é importante utilizar uma malha suficientemente refinada para garantir uma solução precisa. Geralmente, conforme a densidade da malha aumenta, o resultado da simulação converge para uma solução única (entretanto, o recurso computacional necessário para executar a simulação também aumenta). Diferentes refinamentos de malha em elementos finitos, são ilustrados na Figura 6, para uma estrutura em PFF.

Figura 6 – Estrutura em PFF discretizada com diferentes refinamentos de malha



Fonte: Autor.

A qualidade dos resultados depende da assertividade nas condições de contorno estabelecida. Usualmente, são realizadas simplificações no processo de modelagem – como consideração de comportamento elástico-linear do material – mas estas podem resultar em modelos imprecisos e que não fornecem resultados consistentes com a realidade. Os perfis formados a frio possuem comportamento não-linear devido a imperfeições geométricas e deformações iniciais, tensões residuais (resultantes da conformação a frio das chapas), e o comportamento elasto-plástico do material. Portanto, uma análise não-linear possibilita uma representação mais adequada.

Um processo de simulação computacional normalmente consiste em três fases: pré-processamento, processamento e pós-processamento. Na fase de pré-processamento é necessário definir os elementos finitos, a geometria das peças, as condições de contorno (carregamentos e restrições de deslocamento), os parâmetros descritivos dos materiais e realizar o estudo de convergência de malha. Na fase de processamento são realizadas as análises e na fase de pós-processamento os resultados são obtidos: por meio do procedimento de análise linear de estabilidade são obtidos os valores de momento crítico de flambagem e o modo de instabilidade correspondente; e por meio do procedimento de análise estática pelo método de Riks são obtidos os esforços resistentes e as trajetórias de equilíbrio na pós-flambagem.

2.4 MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

Baseado nos estudos de Hancock, Kwon e Bernard (1994), o Método da Resistência Direta foi desenvolvido por Schafer e Peköz (1998), inicialmente formulado para colunas submetidas à compressão. O MRD é uma abordagem eficiente e confiável para o projeto de perfis formados a frio: incorporado na norma brasileira ABNT NBR 14762:2010 e nas normas internacionais AISI S100-16 e AS/NZS 4600:2018, o método é utilizado para dimensionamento de barras submetidas à compressão centrada e à flexão simples, por meio de curvas de resistência tipo Winter (1968). As curvas de dimensionamento são calibradas através de estudos experimentais e numéricos, e incluem os efeitos das não-linearidades físicas (comportamento elasto-plástico do material e tensões residuais geradas pelo processo de fabricação) e geométricas (imperfeições iniciais) dos elementos.

Os estudos de Yu e Schafer (2005) contribuíram para o aprimoramento do método, com a calibração da curva de resistência distorcional. Segundo a AISI S100-16 e AS/NZS 4600:2018, para barras submetidas à flexão simples o momento fletor resistente associado à flambagem distorcional (M_{Rdist}) é obtido por meio das Equações 1 a 5.

$$M_{Rdist} = \begin{cases} M_y + (1 - C_{yd}^{-2})(M_p - M_y) & \text{para } \lambda_{dist} \leq 0,673 \\ \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{dist}}\right) \frac{M_y}{\lambda_{dist}} & \text{para } \lambda_{dist} > 0,673 \end{cases} \quad (1)$$

onde

$$M_y = W \cdot f_y \quad (2)$$

$$M_p = Z \cdot f_y \quad (3)$$

$$\lambda_{\text{dist}} = \left(\frac{M_y}{M_{\text{dist}}} \right)^{0,5} \quad (4)$$

$$C_{yd} = \left(\frac{0,673}{\lambda_{\text{dist}}} \right)^{0,5} \leq 3 \quad (5)$$

Portanto, as equações apresentam como parâmetros de entrada: o momento fletor elástico associado à flambagem distorcional (M_{dist}), obtido por meio dos métodos de análise de estabilidade elástica, o índice de esbeltez distorcional da barra (λ_{dist}), a tensão de escoamento (f_y), o módulo de resistência elástico (W), o módulo de resistência plástico (Z), o momento fletor de escoamento (M_y), o momento fletor de plastificação (M_p) e o fator de deformação devido à compressão (C_{yd}).

2.5 ESTUDOS SOBRE O MODO DE FALHA DISTORCIONAL EM VIGAS

Entre os estudos desenvolvidos para verificar a adequabilidade das curvas do MRD na estimativa dos esforços resistentes em vigas formadas a frio, os mais relevantes a respeito da falha distorcional são: Yu e Schafer (2005), Barichello, Landesmann e Camotim (2017), Martins et al. (2017b) e Depolli (2018). Os estudos incluíram simulações numéricas e investigações experimentais e de modo geral, mostraram que o carregamento tem influência significativa no comportamento de pós-flambagem e na resistência última dos perfis, e que a curva de resistência distorcional do MRD é inadequada para estimar momentos de ruptura para índices de esbeltez moderado a alto e para a flexão não-uniforme.

Yu e Schafer (2005) realizaram um estudo numérico e experimental acerca do modo de flambagem distorcional em perfis tipo Z e U enrijecido submetidos à flexão uniforme e não-uniforme. Por meio dos dados experimentais foram desenvolvidos modelos numéricos para

ampliar as análises de flambagem e pós flambagem a outras geometrias, a fim de avaliar os efeitos de gradientes de momento sobre as forças críticas de flambagem e resistência última dos perfis. Os perfis foram analisados para índice de esbeltez distorcional menor que 1,5 e foram considerados cinco gradientes nas análises de flambagem ($\psi = 1; 0,5; 0; -0,5$ e -1) e três gradientes ($\psi = 1; 0,5$ e 0) nas análises de resistência última. Os resultados mostram que o gradiente de momento aumenta tanto o momento de flambagem quanto a resistência última dos perfis estudados. Nas análises de flambagem, os resultados mostraram que a consideração do gradiente aumenta o momento crítico de flambagem distorcional na sequência $\psi = 1 \rightarrow -1$. Nas análises de resistência última, os resultados mostraram que o MRD superestima os valores de resistência para os perfis submetidos à flexão não-uniforme. Para a consideração dos efeitos dos gradientes de momento, uma proposta de ajuste da curva de resistência distorcional do MRD foi apresentada, contribuindo para o aprimoramento do método.

Barichello, Landesmann e Camotim (2017) desenvolveram uma investigação numérica acerca do comportamento de pós-flambagem e resistência última de perfis tipo S submetidos à flexão uniforme e apresentando modo de falha distorcional. Os perfis analisados apresentam (i) dois tipos de seção transversal – S45 e S90 – com diferentes parâmetros geométricos, (ii) diferentes tensões de escoamento, de forma a cobrir uma ampla faixa de esbeltez distorcional e (iii) duas condições de suporte, se diferenciando apenas pela restrição ao empenamento (livre ou impedido). Os resultados – obtidos via MEF – reafirmaram a necessidade da calibração da curva de resistência distorcional do MRD para elementos com alto índice de esbeltez, principalmente para condição de suporte com empenamento livre.

Martins et al. (2017b) desenvolveram um estudo numérico acerca do modo de instabilidade distorcional em perfis formados a frio submetidos à flexão uniforme. Os perfis foram analisados para três tipos de seção transversal: (i) Ue, submetidos à flexão em torno do eixo de maior inércia, (ii) Z, submetidos à flexão oblíqua e (iii) cartola, submetidos à flexão em torno dos eixos de maior e menor inércia, com enrijecedores comprimidos no último caso (pior condição). Foram consideradas duas condições de suporte, se diferenciando apenas pela restrição ao empenamento (livre ou impedido) e diferentes parâmetros geométricos, a fim de avaliar sua influência no comportamento de pós-flambagem e resistência última dos perfis. Além disso, os perfis apresentam diferentes tensões de escoamento, possibilitando cobrir uma ampla faixa de esbeltez distorcional. Os resultados demonstraram que a curva de resistência distorcional do MRD atualmente normatizada é inadequada para estimar momentos de ruptura para índices de

esbeltez moderado a alto e , que elementos sujeitos a flexão nos eixos de maior e menor não podem ser manipuladas em conjunto. Por fim, foram propostos ajustes na Equação 1 da curva de resistência distorcional do MRD. Para os perfis cartola submetidos à flexão em torno dos eixos de maior e menor inércia com condição de apoio com empenamento impedido, os ajustes são apresentados nas Equações 6 e 7, respectivamente.

$$M_{\text{Rdist-M}} = \begin{cases} M_y + (1 - C_{yd}^{-2})(M_p - M_y) & \text{para } \lambda_{\text{dist}} \leq 0,673 \\ (1 - 0,23 \lambda_{\text{dist}}^{-1,30}) \lambda_{\text{dist}}^{-1,25} M_y & \text{para } \lambda_{\text{dist}} > 0,673 \end{cases} \quad (6)$$

$$M_{\text{Rdist-M}} = \begin{cases} M_y + (1 - C_{yd}^{-2})(M_p - M_y) & \text{para } \lambda_{\text{dist}} \leq 0,673 \\ (1 - 0,30 \lambda_{\text{dist}}^{-1,60}) \lambda_{\text{dist}}^{-2,10} M_y & \text{para } \lambda_{\text{dist}} > 0,673 \end{cases} \quad (7)$$

Com o objetivo avaliar a adequabilidade das curvas de resistência do MRD e a curva proposta por Martins et al. (2017b) na estimativa dos esforços resistentes, Depolli (2018) realizou um estudo numérico a respeito do comportamento de flambagem e pós-flambagem, elástica e elasto-plástica, e de resistência última para perfis tipo Ue submetidos à flexão não-uniforme. Os perfis foram analisados para uma combinação de (i) 15 geometrias, (ii) oito tensões de escoamento, (iii) cinco gradientes de momento e (iv) duas condições de suporte, se diferenciando apenas pela restrição ao empenamento (livre ou impedido). Os resultados mostraram que a curva de resistência normalizada do MRD é inadequada para índice de esbeltez moderado a alto, e superestima os esforços resistentes para os casos de flexão não-uniforme. A curva proposta por Martins et al. (2017b) se apresentou mais adequada do que a curva normalizada, entretanto, ainda superestima os resultados na flexão não-uniforme. Dessa forma, foram apontados ajustes em alguns parâmetros da curva de dimensionamento.

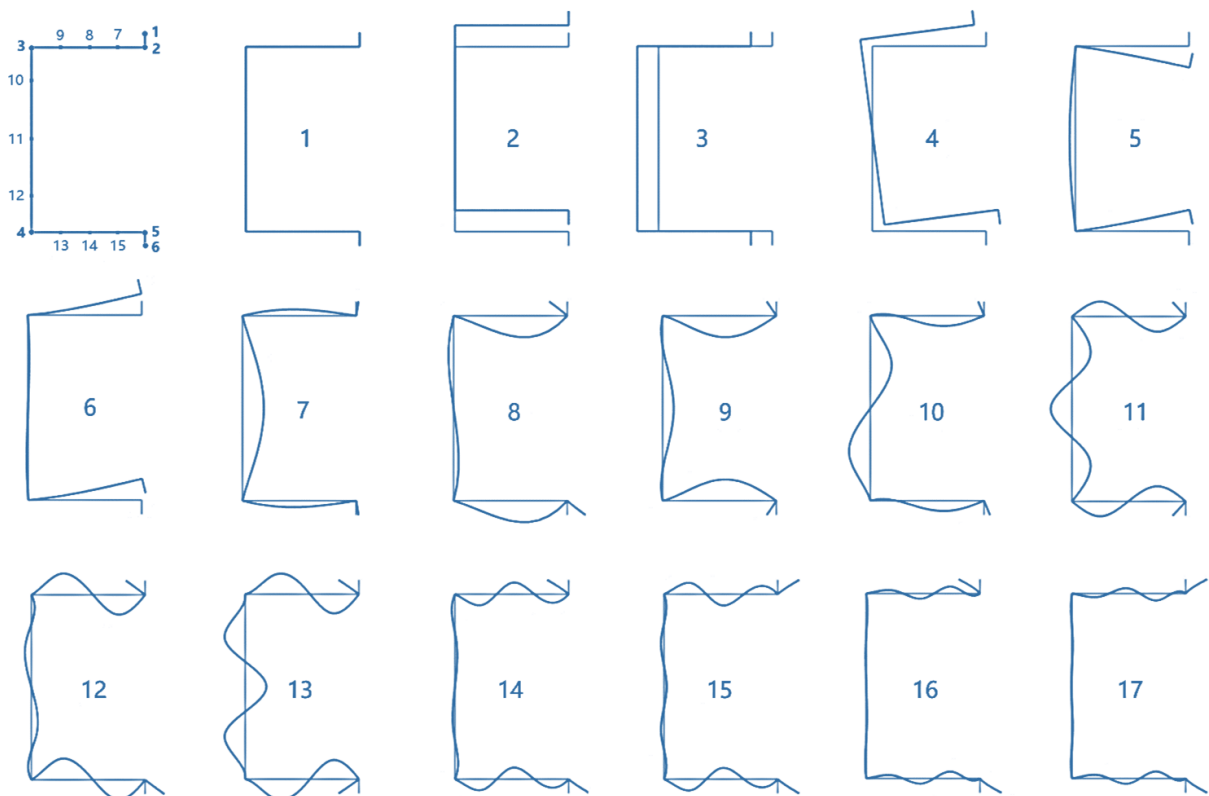
3 ANÁLISE DE FLAMBAGEM

3.1 SELEÇÃO DA GEOMETRIA DAS VIGAS

Inicialmente, com base nas vigas tipo cartola estudadas por Martins et al. (2017b), foram identificadas as geometrias (comprimento e dimensões da seção transversal) onde o modo de flambagem distorcional é predominante. Para isso, foi utilizado o programa computacional GBTUL, que permite determinar a força crítica de flambagem, quantificando a porcentagem de participação de cada modo de flambagem.

O número de modos de flambagem do GBTUL depende do número de lados, nós naturais e nós intermediários presentes na seção transversal. Para discretização da seção transversal de perfis tipo cartola com 9 nós intermediários, os modos de flambagem são apresentados na Figura 7. Para garantir um momento crítico de flambagem notadamente distorcional, foram selecionadas as geometrias com participação modal distorcional (P_D) maior que 85% – soma das participações modais 5 e 6.

Figura 7 – Modos de flambagem: (1 - 4) global, (5 - 6) distorcional e (7 - 17) local

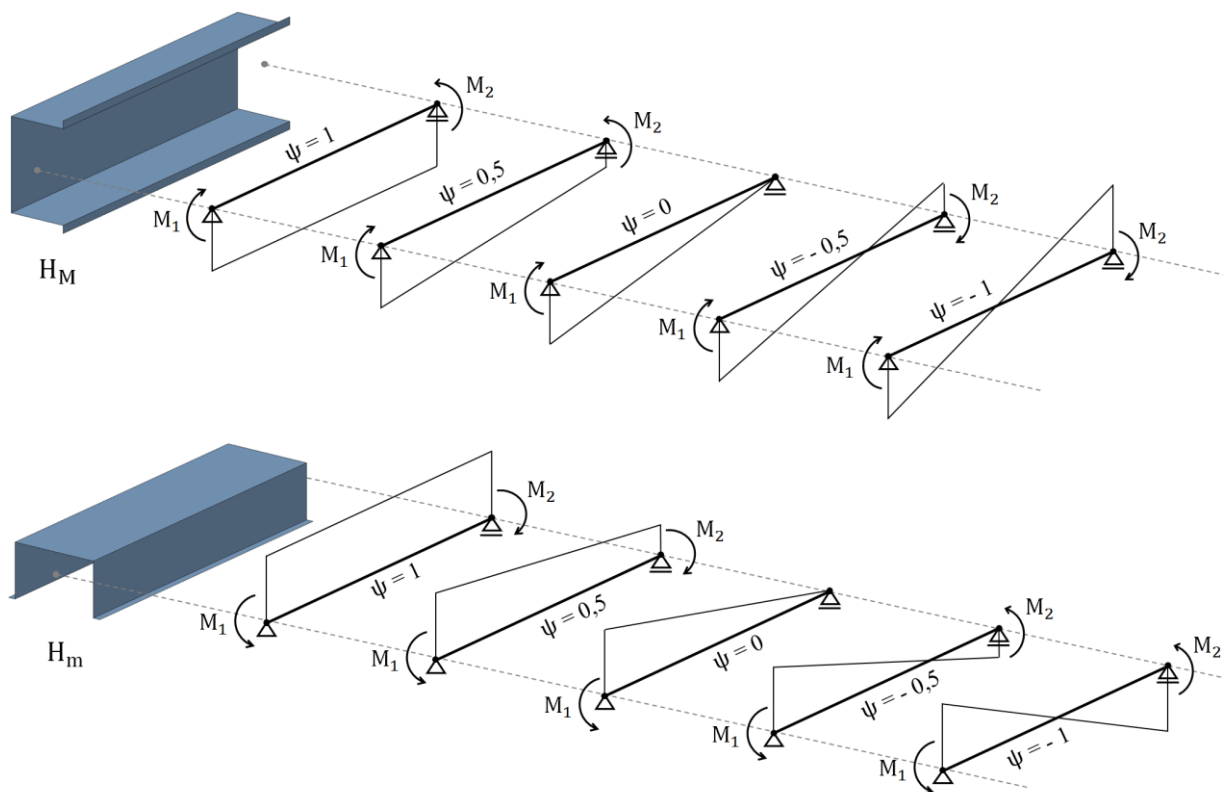


Fonte: Autor.

Como condição de apoio, as vigas foram analisadas considerando flexão livre em torno dos eixos de maior e menor inércia, torção e empenamento (deslocamento longitudinal) impedidos.

Conforme ilustrado na Figura 8, as vigas foram submetidas à flexão em torno dos eixos de maior (H_M) e menor (H_m) inércia, com enrijecedores comprimidos no último caso (pior cenário), por meio da aplicação de momentos nas extremidades (M_1 e M_2), constituindo cinco hipóteses de carregamento: $\psi = 1$, $\psi = 0,5$, $\psi = 0$, $\psi = -0,5$ e $\psi = -1$, onde $\psi = M_2/M_1$, sendo M_1 constante. A primeira hipótese de carregamento corresponde à flexão uniforme, e as demais hipóteses correspondem à flexão não-uniforme.

Figura 8 – Hipóteses de carregamento



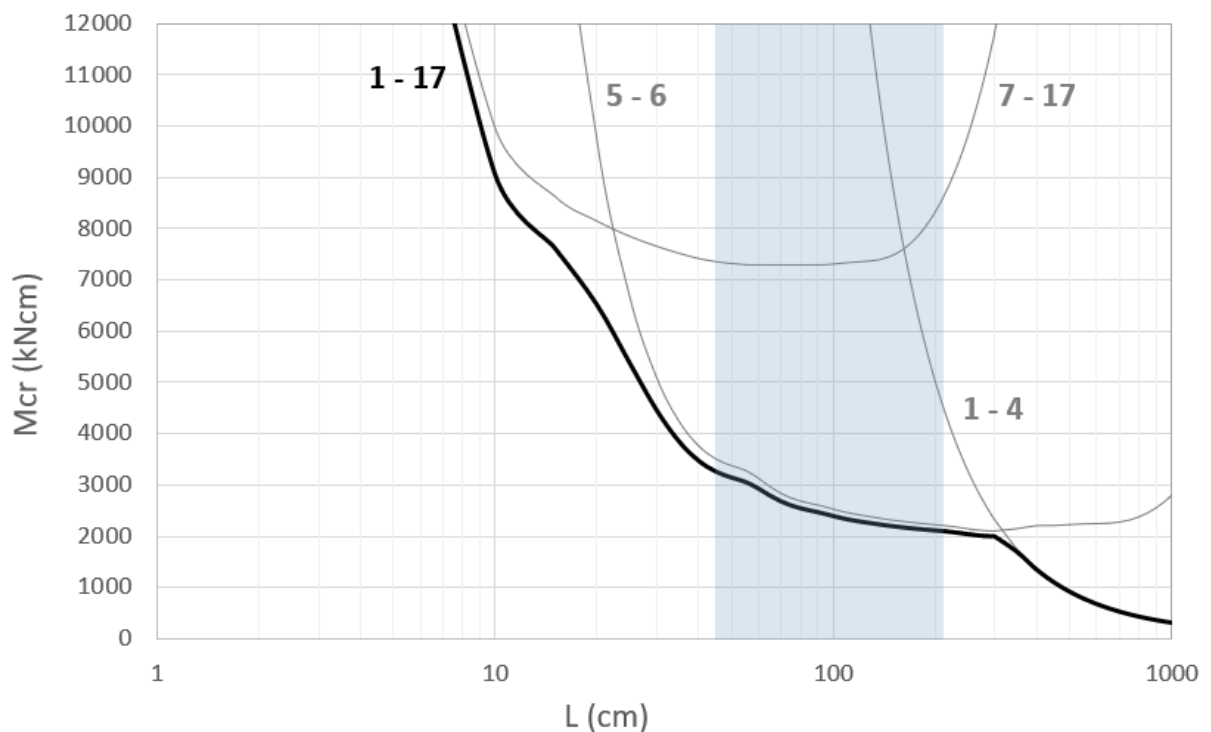
Fonte: Adaptado de Depolli (2018).

Os cálculos foram realizados considerando material com módulo de elasticidade $E = 210$ GPa e coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$.

A curva de assinatura foi utilizada para visualizar o comportamento do momento crítico de flambagem (curva 1-17) em função do comprimento, de forma a identificar o modo pelo qual o perfil perde a estabilidade: local (curva 7-17), distorcional (curva 5-6) ou global (curva 1-4). Quando os valores de força crítica de diferentes modos de instabilidade são próximos (ou, pelo menos, não muito distantes), ocorre a interação entre os modos de flambagem. Para evitar esses efeitos de interação, foram selecionados comprimentos onde o momento crítico de flambagem distorcional (M_{crD}) se encontra significativamente abaixo dos momentos críticos de flambagem local (M_{crL}) e global (M_{crG}). Dessa forma, considerando o proposto por Martins et al. (2017b), foram selecionados os comprimentos onde M_{crL}/M_{crD} e $M_{crG}/M_{crD} > 2$.

Na Figura 9 é apresentada a curva de assinatura, com o exemplo de um perfil com dimensões $120 \times 75 \times 10 \times 3$ mm, submetido à flexão não-uniforme de gradiente $\psi = 0,5$ em torno do eixo de maior inércia, onde é possível observar o intervalo onde o comprimento crítico poderia ser selecionado de modo a atender o critério estabelecido.

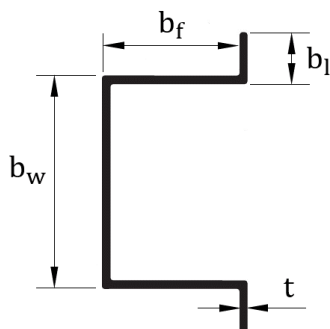
Figura 9 – Curvas de assinatura ($M_{cr} \times L$)



Fonte: Autor.

Os elementos da seção transversal – alma (b_w), mesa (b_f), enrijecedor (b_l) e espessura (t) – de perfis tipo cartola (*hat*, em inglês) são ilustrados na Figura 10 e os parâmetros geométricos das 12 vigas selecionadas são apresentados na Tabela 1.

Figura 10 – Seção transversal do perfil tipo cartola



Fonte: Autor.

Tabela 1 – Parâmetros geométricos das vigas selecionadas

VIGA	b_w (mm)	b_f (mm)	b_l (mm)	t (mm)	A (cm ²)	S (cm ³)	Z (cm ³)
H1	120	80	10	2,5	7,50	28,74	36,25
H2	120	75	10	3,0	8,70	32,95	41,70
H3	125	80	10	3,0	9,15	36,38	45,77
H4	130	80	10	2,5	7,75	31,91	40,06
H5	135	90	10	3,0	10,05	43,77	54,47
H6	140	90	10	2,5	8,50	38,23	47,50
H7	150	100	10	2,5	9,25	45,13	55,56
H8	150	120	10	3,5	14,35	72,46	88,29
H9	160	90	10	3,0	10,80	54,60	67,50
H10	160	100	10	2,5	9,50	49,06	60,25
H11	200	120	10	3,0	13,80	89,66	108,30
H12	210	110	10	3,5	15,75	104,69	127,14

Os comprimentos críticos (L_D), os momentos críticos de flambagem distorcional (M_{crD}), as relações M_{crL}/M_{crD} e M_{crG}/M_{crD} e a participação modal distorcional (P_D) são apresentados nas Tabelas 2 a 6, para os diferentes gradientes de momento. Para cada gradiente, foi adotado o menor comprimento que atendesse o critério estabelecido, simultaneamente, para a flexão em torno da maior e menor inércia.

Tabela 2 – Comprimentos críticos, M_{crD} e suas relações e participação modal – $\psi = 1$

VIGA	L_D (cm)	H_M				H_m			
		M_{crD} (kNcm)	$\frac{M_{crL}}{M_{crD}}$	$\frac{M_{crG}}{M_{crD}}$	P_D (%)	M_{crD} (kNcm)	$\frac{M_{crL}}{M_{crD}}$	$\frac{M_{crG}}{M_{crD}}$	P_D (%)
H1	60	1502,31	2,16	26,77	92,11	695,71	5,21	28,03	95,12
H2	45	2505,24	2,47	29,18	92,08	1120,92	5,78	32,77	93,18
H3	45	2489,66	2,41	36,42	91,56	1142,19	5,63	39,60	93,30
H4	55	1652,80	2,14	32,26	91,97	711,50	5,04	38,37	93,54
H5	50	2350,51	2,42	46,52	91,67	1104,55	5,71	48,71	94,11
H6	60	1566,90	2,14	42,40	91,86	695,37	5,06	48,19	94,28
H7	70	1475,41	2,15	47,29	92,21	663,27	5,14	52,36	95,11
H8	45	3200,50	2,37	117,14	88,48	1857,26	5,46	89,28	94,99
H9	45	2994,96	2,29	56,66	90,68	1208,33	5,01	77,03	88,88
H10	65	1594,07	2,15	55,34	91,94	678,72	5,02	67,58	93,73
H11	55	2747,71	2,32	114,89	90,26	1156,70	5,02	147,97	89,87
H12	70	3986,74	3,01	48,90	94,71	1375,23	6,89	82,33	89,97

Tabela 3 – Comprimentos críticos, M_{crD} e suas relações e participação modal – $\psi = 0,5$

VIGA	L_D (cm)	H_M				H_m			
		M_{crD} (kNcm)	$\frac{M_{crL}}{M_{crD}}$	$\frac{M_{crG}}{M_{crD}}$	P_D (%)	M_{crD} (kNcm)	$\frac{M_{crL}}{M_{crD}}$	$\frac{M_{crG}}{M_{crD}}$	P_D (%)
H1	75	1715,84	2,19	19,86	90,99	822,50	5,22	20,18	93,57
H2	45	3259,74	2,24	29,67	91,06	1467,40	5,13	33,15	92,90
H3	45	3243,73	2,20	36,98	90,54	1496,86	5,03	40,01	92,88
H4	75	1868,58	2,19	20,33	91,05	823,40	5,13	23,66	91,79
H5	50	3059,46	2,21	47,28	90,74	1446,74	5,12	49,25	93,66
H6	85	1733,03	2,23	25,30	91,44	784,61	5,28	28,24	93,00
H7	95	1625,33	2,26	30,86	91,74	751,53	5,37	33,28	93,87
H8	50	3834,81	2,38	104,79	89,84	2184,27	5,53	81,45	94,64
H9	50	3661,28	2,23	49,68	90,67	1453,56	4,89	68,70	90,16
H10	95	1738,83	2,28	31,45	91,81	752,60	5,34	37,85	92,53
H11	60	3384,20	2,25	103,72	90,26	1406,07	4,90	135,47	90,83
H12	70	5069,61	2,78	50,88	92,45	1778,78	6,15	84,29	89,58

Tabela 4 – Comprimentos críticos, M_{crD} e suas relações e participação modal – $\psi = 0$

VIGA	L_D (cm)	H_M				H_m			
		M_{crD} (kNcm)	$\frac{M_{crL}}{M_{crD}}$	$\frac{M_{crG}}{M_{crD}}$	P_D (%)	M_{crD} (kNcm)	$\frac{M_{crL}}{M_{crD}}$	$\frac{M_{crG}}{M_{crD}}$	P_D (%)
H1	95	1946,74	2,14	15,50	91,66	921,44	5,07	16,04	94,31
H2	65	3542,73	2,20	18,59	89,27	1604,63	5,13	20,81	91,71
H3	70	3399,60	2,22	20,72	89,72	1563,57	5,23	22,68	92,13
H4	95	2116,16	2,15	15,89	91,62	920,69	4,99	18,88	92,90
H5	75	3266,55	2,19	27,96	89,55	1545,45	5,17	29,33	92,96
H6	105	1995,77	2,15	20,44	91,70	894,33	5,04	23,23	93,75
H7	115	1894,04	2,16	25,66	91,76	870,03	5,05	28,05	94,37
H8	60	4699,96	2,22	88,00	89,09	2539,57	5,12	69,49	93,21
H9	75	3912,27	2,19	29,34	88,98	1548,42	4,93	41,00	89,45
H10	105	2102,77	2,09	30,21	90,79	910,04	4,82	36,60	92,80
H11	95	3516,64	2,25	56,51	89,50	1444,06	5,06	75,21	90,77
H12	70	6568,90	2,37	57,45	88,72	2300,69	5,20	93,03	87,89

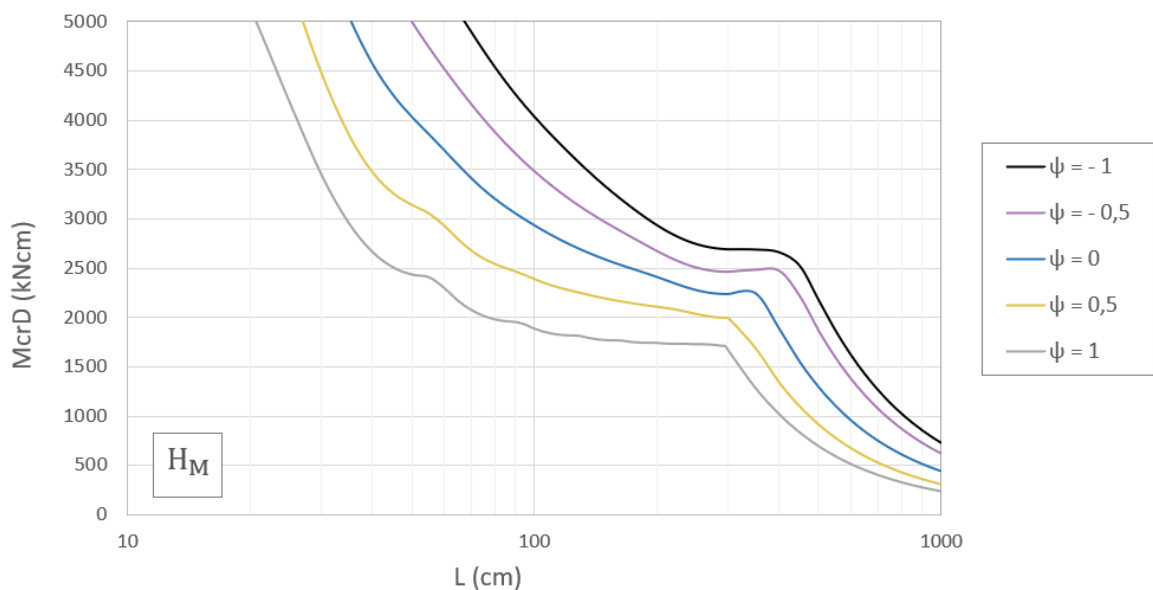
Tabela 5 – Comprimentos críticos, M_{crD} e suas relações e participação modal – $\psi = -0,5$

VIGA	L_D (cm)	H_M				H_m			
		M_{crD} (kNcm)	$\frac{M_{crL}}{M_{crD}}$	$\frac{M_{crG}}{M_{crD}}$	P_D (%)	M_{crD} (kNcm)	$\frac{M_{crL}}{M_{crD}}$	$\frac{M_{crG}}{M_{crD}}$	P_D (%)
H1	125	2074,46	2,15	12,50	90,52	983,61	3,97	13,38	93,88
H2	85	3764,98	2,25	15,21	89,54	1706,38	3,84	17,63	91,63
H3	85	3751,60	2,19	18,92	89,10	1732,71	3,88	21,35	91,81
H4	125	2255,06	2,16	12,81	90,55	982,67	3,64	15,75	92,85
H5	95	3526,97	2,21	23,97	89,59	1672,26	4,16	25,99	92,58
H6	135	2147,64	2,13	17,08	90,61	964,86	3,86	20,05	93,48
H7	150	2025,75	2,15	20,95	90,74	932,13	4,13	24,76	94,10
H8	90	4695,83	2,25	58,14	89,01	2526,87	5,35	47,75	93,04
H9	100	4113,61	2,27	23,31	89,43	1630,64	3,56	33,69	89,99
H10	150	2165,07	2,17	21,37	90,76	931,86	3,85	26,97	93,28
H11	115	3976,36	2,22	51,93	88,79	1603,33	3,90	71,03	90,85
H12	95	6845,51	2,29	44,38	87,75	2425,68	3,86	73,64	86,91

Tabela 6 – Comprimentos críticos, M_{crD} e suas relações e participação modal – $\psi = -1$

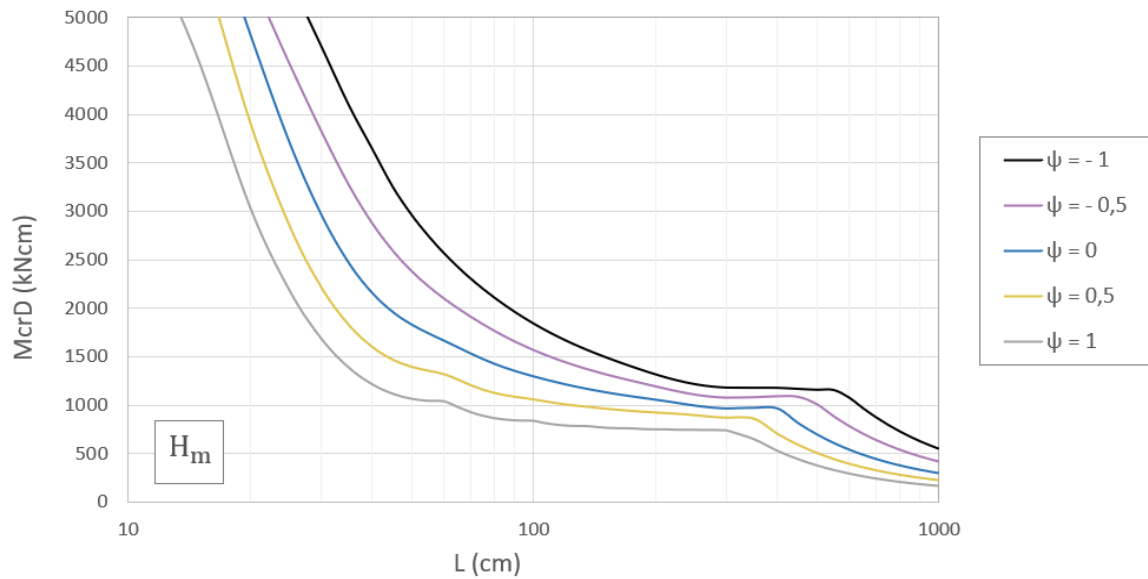
VIGA	L_D (cm)	H_M				H_m			
		M_{crD} (kNcm)	$\frac{M_{crL}}{M_{crD}}$	$\frac{M_{crG}}{M_{crD}}$	P_D (%)	M_{crD} (kNcm)	$\frac{M_{crL}}{M_{crD}}$	$\frac{M_{crG}}{M_{crD}}$	P_D (%)
H1	215	1867,17	3,26	5,62	88,94	884,79	2,10	7,88	93,94
H2	185	3033,94	3,55	4,80	88,33	1362,25	2,08	7,37	92,42
H3	185	3018,97	3,33	5,95	89,13	1375,90	2,08	8,94	92,82
H4	245	1931,91	3,79	4,67	89,58	835,65	2,09	7,59	93,05
H5	185	2993,92	3,01	8,89	90,63	1400,25	2,10	12,79	93,72
H6	245	1898,12	3,32	7,00	90,18	847,64	2,06	10,83	93,50
H7	245	1873,34	2,98	10,10	89,91	858,90	2,04	14,99	94,02
H8	115	4819,38	2,35	40,99	87,63	2601,83	2,22	43,90	92,76
H9	265	3122,07	4,26	5,26	91,57	1205,92	2,11	10,24	90,73
H10	275	1912,09	3,39	8,58	90,87	816,15	2,04	14,29	92,94
H11	275	3034,90	3,45	13,79	91,39	1223,16	2,09	25,35	91,49
H12	285	4765,63	4,34	8,21	92,74	1681,22	2,10	18,50	87,67

Como exemplo, para ilustrar os resultados apresentados, as curvas de assinatura da viga H2 são ilustradas nas Figuras 11 e 12, para as diferentes hipóteses carregamento.

Figura 11 – Curvas de assinatura ($M_{crD} \times L$) para os gradientes de momento (ψ) – $H_M 2$ 

Fonte: Autor.

Figura 12 – Curvas de assinatura ($M_{crD} \times L$) para os gradientes de momento (ψ) – H_m2



Fonte: Autor.

Os resultados permitem verificar como as hipóteses de carregamento influenciam os valores de momento crítico de flambagem elástica: as vigas submetidas à flexão não-uniforme apresentam maiores valores de momento crítico quando comparadas às vigas submetidas à flexão uniforme. Assim como observado por Yu e Schafer (2005) e Depolli (2018), para o mesmo comprimento, os valores de momento crítico de flambagem distorcional crescem na sequência $\psi = 1 \rightarrow 0,5 \rightarrow 0 \rightarrow -0,5 \rightarrow -1$. Esse comportamento é identificado nas vigas submetidas à flexão em torno dos eixos de maior ou menor inércia.

Além disso, é possível perceber que as vigas submetidas à flexão em torno do eixo de maior inércia apresentam maiores valores de momento crítico de flambagem elástica. Portanto, para o mesmo comprimento, os valores de momento crítico crescem na sequência $H_m \rightarrow H_M$.

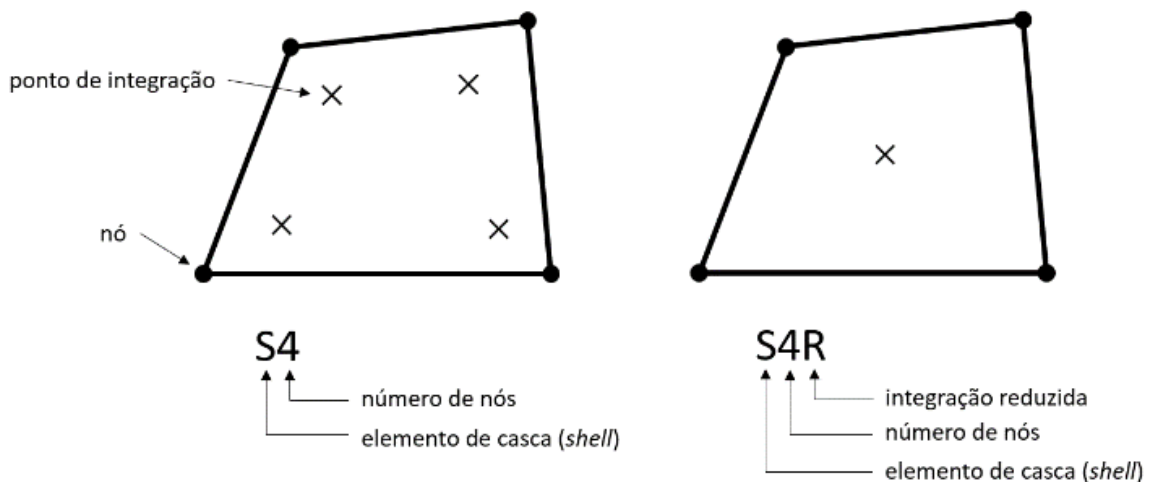
4 ANÁLISES DE PÓS-FLAMBAGEM

4.1 MODELO NUMÉRICO EM ELEMENTOS FINITOS

O modelo numérico em elementos finitos foi desenvolvido por meio do programa computacional ABAQUS. Como os perfis formados a frio são estruturas onde uma dimensão, a espessura, é significativamente menor que as outras dimensões, as vigas foram modeladas por meio de um modelo de casca, a partir de suas superfícies médias.

Para determinar o elemento a ser empregado no modelo, dois tipos de elementos de casca foram avaliados: S4 e S4R – elementos quadriláteros com quatro nós, seis graus de liberdade por nó (três componentes de translação e três componentes de rotação) e integração completa ou reduzida, respectivamente. Os elementos são ilustrados na Figura 13.

Figura 13 – Elementos de casca S4 e S4R



Fonte: Adaptado de Dassault Systèmes (2016).

Normalmente, o uso de elementos com integração reduzida exige menos recurso computacional para executar a análise, contudo, pode comprometer a precisão dos resultados. Para determinar o elemento mais adequado, o estudo comparativo foi realizado no perfil H3. Os valores de momento crítico de flambagem obtidos são apresentados na Tabela 7 e os resultados normalizados em relação aos valores obtidos via GBTUL (Tabelas 2 a 6) são apresentados na Tabela 8.

Tabela 7 – Momentos críticos de flambagem para S4 e S4R

M_{cr} (kNcm)	ψ									
	H_{M3}					H_{m3}				
ELEM.	1	0,5	0	- 0,5	- 1	1	0,5	0	- 0,5	- 1
S4	2427,90	3179,60	3371,90	3737,60	2927,40	1112,50	1455,70	1520,70	1676,90	1322,40
S4R	2330,00	3053,90	3236,70	3588,40	2819,90	1065,00	1392,50	1458,10	1607,00	1272,90

Tabela 8 – Momentos críticos de flambagem normalizados para S4 e S4R

$\frac{M_{cr}}{M_{GBTUL}}$	ψ									
	H_{M3}					H_{m3}				
ELEM.	1	0,5	0	- 0,5	- 1	1	0,5	0	- 0,5	- 1
S4	1,0254	1,0202	1,0082	1,0037	1,0313	1,0267	1,0283	1,0282	1,0333	1,0405
S4R	1,0671	1,0622	1,0503	1,0455	1,0706	1,0725	1,0749	1,0723	1,0782	1,0809

O estudo demonstra que o uso do elemento com integração reduzida S4R fornece resultados com menor precisão: para as vigas analisadas, as diferenças entre os momentos críticos de flambagem apresentam valor máximo de 8,09% e média de 6,75%, contra valor máximo de 4,05% e média de 2,46% para o elemento S4. Dessa forma, foi empregado no modelo o elemento S4, visto que esse elemento apresentou resultados mais precisos em um tempo de processamento satisfatório.

Na sequência, foram definidos os parâmetros descritivos do material. O comportamento do material foi estabelecido como: (i) linear elástico e (ii) elástico-perfeitamente plástico (modelo de Prandtl-Reuss: teoria de fluxo J2 associada ao critério de escoamento de von Mises). Para isso, foram especificados os valores de módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e tensão de escoamento (f_y). Para cada viga, foram considerados oito valores de tensão de escoamento de forma a cobrir uma faixa ampla de esbeltez distorcional ($0,25 \leq \lambda_{dist} \leq 4,80$). Partindo da hipótese de carregamento $\psi = 1$, os valores iniciais de λ_{dist} foram atribuídos aleatoriamente aos 12 perfis no intervalo de 0,25 a 0,80, com diferença de 0,05 entre eles. Com base nesses valores, por meio de progressões aritméticas de razão 0,10, 0,25, 0,40 e 0,50, foram obtidos os valores iniciais das hipóteses $\psi = 0,5$, $\psi = 0$, $\psi = -0,5$ e $\psi = -1$, respectivamente. Os demais valores foram obtidos por meio de progressão aritmética de razão 0,50.

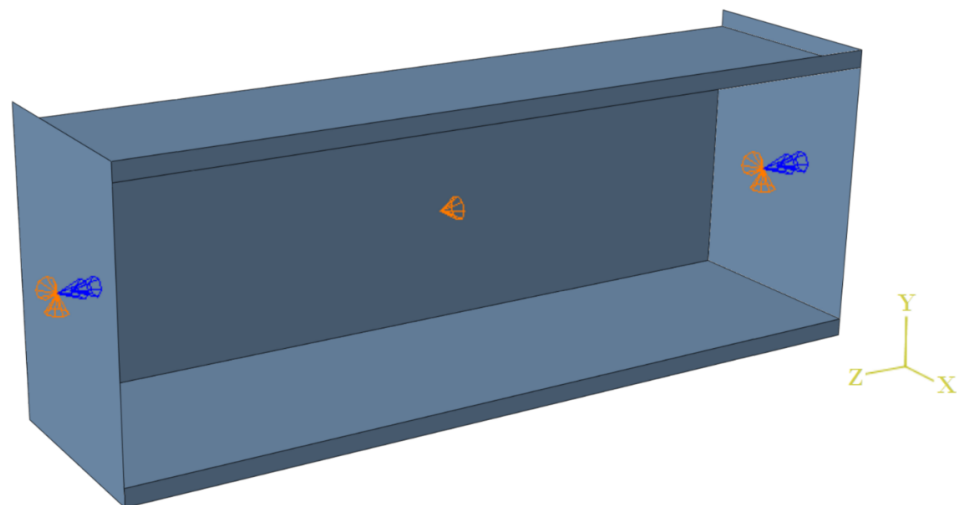
Os índices de esbeltez distorcional adotados são apresentados na Tabela 9 e os valores de tensão de escoamento correspondentes são apresentados nas Tabelas A.1 a A.24 do Apêndice A.

Tabela 9 – Índices de esbeltez distorcional adotados

λ_{dist}	VIGA												
	ψ	H4	H11	H10	H1	H9	H12	H2	H8	H7	H3	H5	H6
1		0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
		0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30
		1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
		1,75	1,80	1,85	1,90	1,95	2,00	2,05	2,10	2,15	2,20	2,25	2,30
		2,25	2,30	2,35	2,40	2,45	2,50	2,55	2,60	2,65	2,70	2,75	2,80
		2,75	2,80	2,85	2,90	2,95	3,00	3,05	3,10	3,15	3,20	3,25	3,30
		3,25	3,30	3,35	3,40	3,45	3,50	3,55	3,60	3,65	3,70	3,75	3,80
		3,75	3,80	3,85	3,90	3,95	4,00	4,05	4,10	4,15	4,20	4,25	4,30
0,5		0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90
		0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40
		1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85	1,90
		1,85	1,90	1,95	2,00	2,05	2,10	2,15	2,20	2,25	2,30	2,35	2,40
		2,35	2,40	2,45	2,50	2,55	2,60	2,65	2,70	2,75	2,80	2,85	2,90
		2,85	2,90	2,95	3,00	3,05	3,10	3,15	3,20	3,25	3,30	3,35	3,40
		3,35	3,40	3,45	3,50	3,55	3,60	3,65	3,70	3,75	3,80	3,85	3,90
		3,85	3,90	3,95	4,00	4,05	4,10	4,15	4,20	4,25	4,30	4,35	4,40
0		0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05
		1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55
		1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85	1,90	1,95	2,00	2,05
		2,00	2,05	2,10	2,15	2,20	2,25	2,30	2,35	2,40	2,45	2,50	2,55
		2,50	2,55	2,60	2,65	2,70	2,75	2,80	2,85	2,90	2,95	3,00	3,05
		3,00	3,05	3,10	3,15	3,20	3,25	3,30	3,35	3,40	3,45	3,50	3,55
		3,50	3,55	3,60	3,65	3,70	3,75	3,80	3,85	3,90	3,95	4,00	4,05
		4,00	4,05	4,10	4,15	4,20	4,25	4,30	4,35	4,40	4,45	4,50	4,55
-0,5		0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20
		1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70
		1,65	1,70	1,75	1,80	1,85	1,90	1,95	2,00	2,05	2,10	2,15	2,20
		2,15	2,20	2,25	2,30	2,35	2,40	2,45	2,50	2,55	2,60	2,65	2,70
		2,65	2,70	2,75	2,80	2,85	2,90	2,95	3,00	3,05	3,10	3,15	3,20
		3,15	3,20	3,25	3,30	3,35	3,40	3,45	3,50	3,55	3,60	3,65	3,70
		3,65	3,70	3,75	3,80	3,85	3,90	3,95	4,00	4,05	4,10	4,15	4,20
		4,15	4,20	4,25	4,30	4,35	4,40	4,45	4,50	4,55	4,60	4,65	4,70
-1		0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30
		1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
		1,75	1,80	1,85	1,90	1,95	2,00	2,05	2,10	2,15	2,20	2,25	2,30
		2,25	2,30	2,35	2,40	2,45	2,50	2,55	2,60	2,65	2,70	2,75	2,80
		2,75	2,80	2,85	2,90	2,95	3,00	3,05	3,10	3,15	3,20	3,25	3,30
		3,25	3,30	3,35	3,40	3,45	3,50	3,55	3,60	3,65	3,70	3,75	3,80
		3,75	3,80	3,85	3,90	3,95	4,00	4,05	4,10	4,15	4,20	4,25	4,30
		4,25	4,30	4,35	4,40	4,45	4,50	4,55	4,60	4,65	4,70	4,75	4,80

Com base no modelo desenvolvido por Martins (2017b), para reproduzir os apoios, foram adicionadas placas rígidas às extremidades dos perfis (módulo de elasticidade $E = 2100 \text{ Gpa}$), diretamente sobre as placas foram aplicadas restrições de deslocamento transversal $U1$ e $U2$ (direção dos eixos x e y) e restrição de rotação axial $UR3$ (em torno do eixo z) e, no ponto central do comprimento e alma, foi aplicada a restrição de deslocamento axial $U3$ (direção do eixo z). As restrições de deslocamento e rotação utilizadas são ilustradas na Figura 14.

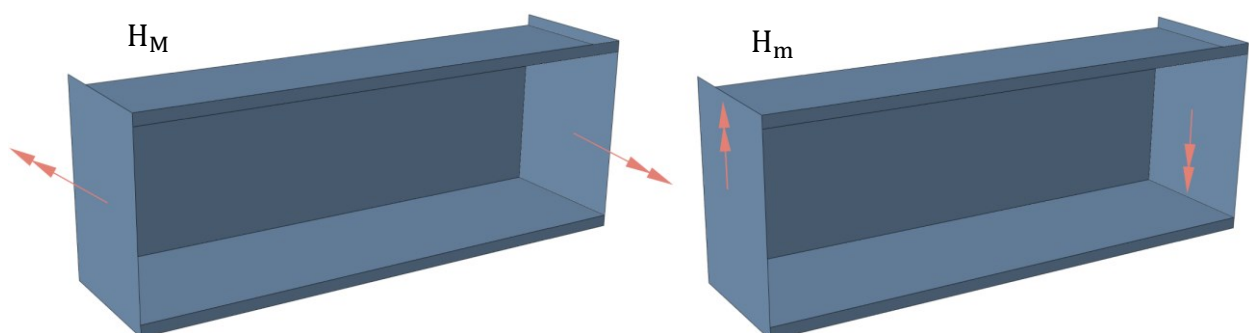
Figura 14 – Restrições de deslocamento e rotação



Fonte: Autor.

Os momentos foram aplicados diretamente sobre as placas rígidas, configurando as diferentes hipóteses de carregamento, em torno dos eixos de maior ou menor inércia, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Carregamentos: momentos aplicados sobre as placas rígidas



Fonte: Autor.

Para consideração da não-linearidade geométrica, imperfeições iniciais foram incorporadas ao modelo com a forma do modo crítico de instabilidade (distorcional), escaladas com amplitude igual a 10% da espessura do perfil (0,1t).

O endurecimento, as tensões residuais e os cantos arredondados não foram considerados – conforme reportado por Camotim et al. (2018), de forma combinada, esses efeitos têm pouco impacto na capacidade resistente da peça.

4.1.1 Estudo de convergência de malha

Foi realizado um estudo de convergência de malha a fim de otimizar o tempo de processamento das análises sem afetar a precisão dos resultados. O estudo permite estimar o refinamento mais adequado ao modelo e, de forma a analisar a influência da densidade da malha nos valores de momento resistente, foram consideradas quatro dimensões máximas de elemento finito: 10 mm, 7,5 mm, 5 mm e 2,5 mm.

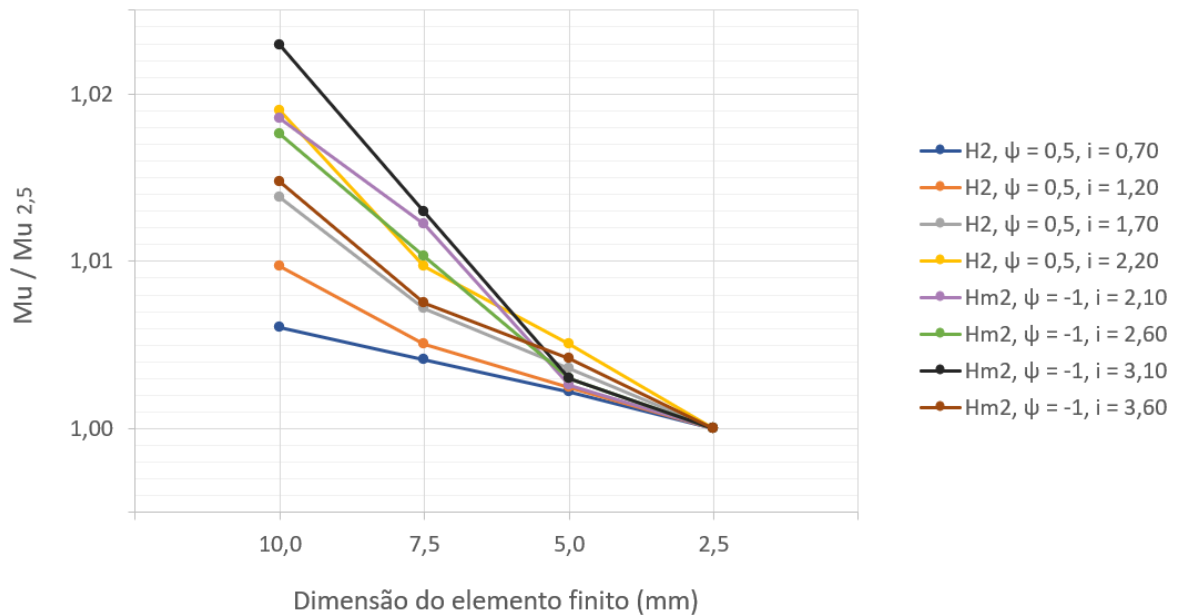
O estudo foi realizado no perfil H8, para as seguintes hipóteses de carregamento e índices de esbeltez: (i) flexão não-uniforme em torno do eixo de maior inércia com gradiente $\psi = 0,5$ e índices de esbeltez $\lambda_{\text{dist}} = 0,70; 1,20; 1,70; 2,20$ e (ii) flexão não-uniforme em torno do eixo de menor inércia com gradiente $\psi = -1$ e índices de esbeltez $\lambda_{\text{dist}} = 2,10; 2,60; 3,10; 3,60$. Os valores de momento último (M_u) obtidos com as análises são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Momentos resistentes para diferentes refinamentos de malha

M_u (kNcm)	λ_{dist}							
	$H_M8, \psi = 0,5$				$H_m8, \psi = -1$			
DIM. (mm)	0,70	1,20	1,70	2,20	2,10	2,60	3,10	3,60
10,0	2126,03	4007,98	6196,02	8301,04	2729,15	2913,33	3010,14	3001,32
7,5	2121,96	3989,55	6155,26	8225,50	2712,35	2892,46	2980,85	2980,02
5,0	2117,85	3979,28	6133,36	8187,75	2686,51	2871,44	2951,41	2970,22
2,5	2113,22	3969,57	6111,57	8146,39	2679,59	2862,92	2942,69	2957,82

De forma geral, malhas mais refinadas apresentam resultados mais precisos. Portanto, os resultados obtidos foram normalizados em relação aos valores previstos pela malha mais fina ($M_{u,2,5}$) e são apresentados na Figura 16 para as diferentes dimensões dos elementos.

Figura 16 – $M_u/M_{u,2,5}$ para diferentes dimensões dos elementos



Fonte: Autor.

Conforme a densidade da malha aumenta, o recurso computacional necessário para executar as simulações aumenta e os resultados convergem para uma solução única. Os dados demonstram como a dispersão dos resultados diminui à medida que a malha se torna mais refinada: para as malhas com elementos com dimensão de 10 mm, 7,5 mm e 5 mm as diferenças entre os momentos normalizados variam de 0,61% a 2,29%, 0,41% a 1,30% e 0,22% a 0,51%, respectivamente. Desse modo, com base no estudo de convergência realizado, foi adotada para o modelo a malha de elemento com dimensão máxima de 5 mm, uma vez que esse refinamento apresentou resultados precisos, exibindo erros relativos abaixo de 1% e pouca dispersão dos valores, sem exigir recurso computacional excessivo.

4.1.2 Validação do modelo numérico

A fim de verificar a assertividade das simplificações e hipóteses admitidas no desenvolvimento do modelo numérico – como o comportamento do material, a modelagem das condições de contorno (apoio e carregamentos), a discretização dos perfis e a incorporação das imperfeições

geométricas – e garantir uma solução precisa com representação adequada do comportamento do sistema, foi realizado um estudo de validação do modelo numérico. O processo de validação do modelo ocorreu em duas etapas e consiste na (i) comparação entre os momentos críticos de flambagem e obtidos via modelo desenvolvido e via GBTUL e análise da configuração deformada dos elementos e na (ii) comparação entre os momentos últimos e trajetórias de equilíbrio elástica obtidos via modelo desenvolvido e via modelo de Depolli (2018).

Primeiramente, por meio do procedimento de análise linear de estabilidade (*linear perturbation – buckle*) foram obtidos os valores de momento crítico de flambagem e o modo de instabilidade correspondente para as vigas selecionadas. A análise de flambagem via método dos elementos finitos é realizada por meio do método de autovalor (para determinar a força crítica) e autovetor (para determinar o modo de flambagem). Os valores apresentados correspondem ao menor autovalor (e respectivo autovetor), entretanto, o método permite calcular as demais soluções possíveis para o sistema. As Tabelas 11 a 15 apresentam, para as diferentes hipóteses de carregamento, os momentos críticos de flambagem obtidos via modelo numérico (M_{ABQ}) e sua relação com os momentos críticos de flambagem obtidos via GBTUL (M_{GBTUL}), relacionados nas Tabelas 2 a 6.

Tabela 11 – Momentos críticos de flambagem M_{ABQ} e relação com $M_{GBTUL} - \psi = 1$

VIGA	H_M		H_m	
	M_{ABQ} (kNcm)	M_{GBTUL}/M_{ABQ}	M_{ABQ} (kNcm)	M_{GBTUL}/M_{ABQ}
H1	1474,60	1,02	684,73	1,02
H2	2443,90	1,03	1093,10	1,03
H3	2427,90	1,03	1112,50	1,03
H4	1622,60	1,02	698,80	1,02
H5	2298,00	1,02	1078,90	1,02
H6	1540,30	1,02	683,88	1,02
H7	1452,60	1,02	654,04	1,01
H8	3101,40	1,03	1791,80	1,04
H9	2912,30	1,03	1172,10	1,03
H10	1569,00	1,02	668,10	1,02
H11	2681,80	1,02	1127,30	1,03
H12	3912,80	1,02	1349,70	1,02

Tabela 12 – Momentos críticos de flambagem M_{ABQ} e relação com M_{GBTUL} – $\psi = 0,5$

VIGA	H_M		H_m	
	M_{ABQ} (kNcm)	M_{GBTUL}/M_{ABQ}	M_{ABQ} (kNcm)	M_{GBTUL}/M_{ABQ}
H1	1686,20	1,02	804,92	1,02
H2	3195,10	1,02	1428,60	1,03
H3	3179,60	1,02	1455,70	1,03
H4	1836,30	1,02	805,66	1,02
H5	3007,80	1,02	1411,00	1,03
H6	1707,00	1,02	769,41	1,02
H7	1604,10	1,01	738,48	1,02
H8	3768,40	1,02	2119,50	1,03
H9	3595,30	1,02	1416,00	1,03
H10	1715,90	1,01	739,35	1,02
H11	3336,30	1,01	1374,40	1,02
H12	5009,30	1,01	1741,80	1,02

Tabela 13 – Momentos críticos de flambagem M_{ABQ} e relação com M_{GBTUL} – $\psi = 0$

VIGA	H_M		H_m	
	M_{ABQ} (kNcm)	M_{GBTUL}/M_{ABQ}	M_{ABQ} (kNcm)	M_{GBTUL}/M_{ABQ}
H1	1925,60	1,01	902,39	1,02
H2	3510,10	1,01	1558,50	1,03
H3	3371,90	1,01	1520,70	1,03
H4	2093,80	1,01	901,44	1,02
H5	3252,00	1,00	1505,80	1,03
H6	1978,10	1,01	876,90	1,02
H7	1880,10	1,01	854,12	1,02
H8	4596,20	1,02	2467,70	1,03
H9	3893,60	1,00	1508,40	1,03
H10	2091,00	1,01	892,62	1,02
H11	3522,70	1,00	1413,30	1,02
H12	6436,90	1,02	2238,00	1,03

Tabela 14 – Momentos críticos de flambagem M_{ABQ} e relação com $M_{GBTUL} - \psi = -0,5$

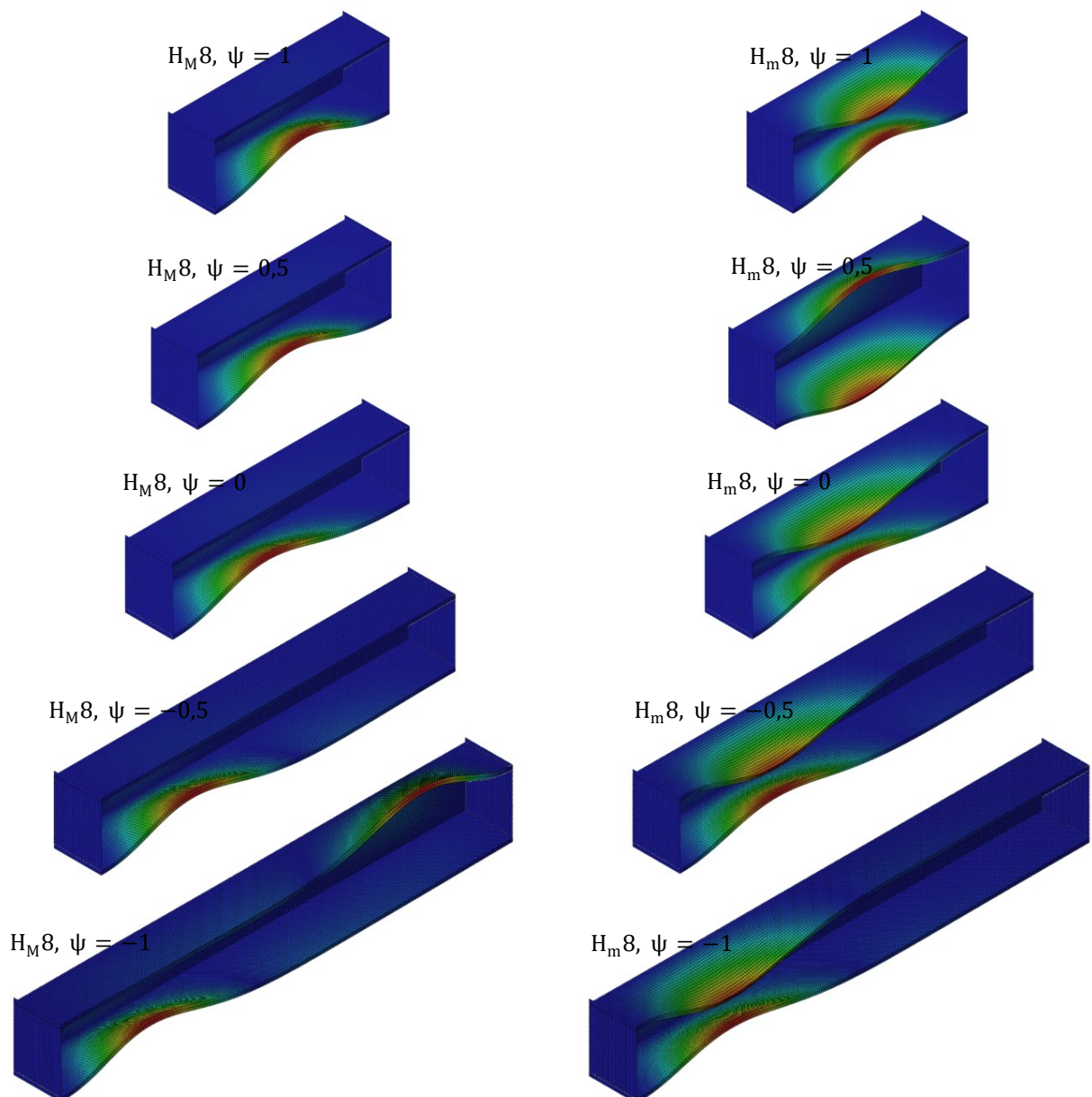
VIGA	H_M		H_m	
	M_{ABQ} (kNcm)	M_{GBTUL}/M_{ABQ}	M_{ABQ} (kNcm)	M_{GBTUL}/M_{ABQ}
H1	2036,30	1,02	956,80	1,03
H2	3734,50	1,01	1650,10	1,03
H3	3737,60	1,00	1676,90	1,03
H4	2214,70	1,02	955,71	1,03
H5	3522,00	1,00	1622,10	1,03
H6	2113,80	1,02	939,78	1,03
H7	1994,70	1,02	908,83	1,03
H8	4625,10	1,02	2450,80	1,03
H9	4096,40	1,00	1581,40	1,03
H10	2132,80	1,02	908,45	1,03
H11	3910,90	1,02	1561,50	1,03
H12	6755,50	1,01	2347,80	1,03

Tabela 15 – Momentos críticos de flambagem M_{ABQ} e relação com $M_{GBTUL} - \psi = -1$

VIGA	H_M		H_m	
	M_{ABQ} (kNcm)	M_{GBTUL}/M_{ABQ}	M_{ABQ} (kNcm)	M_{GBTUL}/M_{ABQ}
H1	1813,90	1,03	855,50	1,03
H2	2942,10	1,03	1310,10	1,04
H3	2927,40	1,03	1322,40	1,04
H4	1879,90	1,03	811,56	1,03
H5	2905,20	1,03	1345,70	1,04
H6	1847,20	1,03	821,45	1,03
H7	1821,20	1,03	830,79	1,03
H8	4716,10	1,02	2509,10	1,04
H9	3029,20	1,03	1169,00	1,03
H10	1863,40	1,03	792,51	1,03
H11	2962,40	1,02	1184,00	1,03
H12	4643,90	1,03	1627,50	1,03

Por meio dos dados é possível observar que as diferenças entre os momentos críticos de flambagem distorcional não são significativas, apresentando valores máximos na ordem de 4%. Além disso, conforme exemplificado na Figura 17, a configuração deformada das vigas exibe o aspecto esperado nas diferentes hipóteses de carregamento (deformação dos elementos da seção transversal associado ao deslocamento das arestas, representativo do modo de flambagem distorcional), sendo relevante destacar que as vigas submetidas à flexão em torno do eixo de maior inércia apresentam o menor autovalor associado a dois autovetores, i.e., movimentos de abertura ou fechamento do conjunto mesa-enrijecedor.

Figura 17 – Modo de flambagem distorcional: configuração deformada



Fonte: Autor.

Na segunda etapa do processo de validação, por meio do método de Riks modificado (*general – static, Riks*), foram realizadas análises não-lineares de pós-flambagem na viga C02 estudada por Depolli (2018): perfil tipo U enrijecido com dimensões $90 \times 75 \times 6,25 \times 1,8$ mm e comprimento $L = 55$ cm, submetido à flexão não-uniforme de gradientes $\psi = 0$ e $\psi = -0,5$ em torno do eixo de maior inércia e oito índices de esbeltez distorcional cada. Na Tabela 16, os momentos últimos obtidos através do modelo desenvolvido (M_u) são comparados aos reportados por Depolli ($M_{u,D}$), para as hipóteses consideradas.

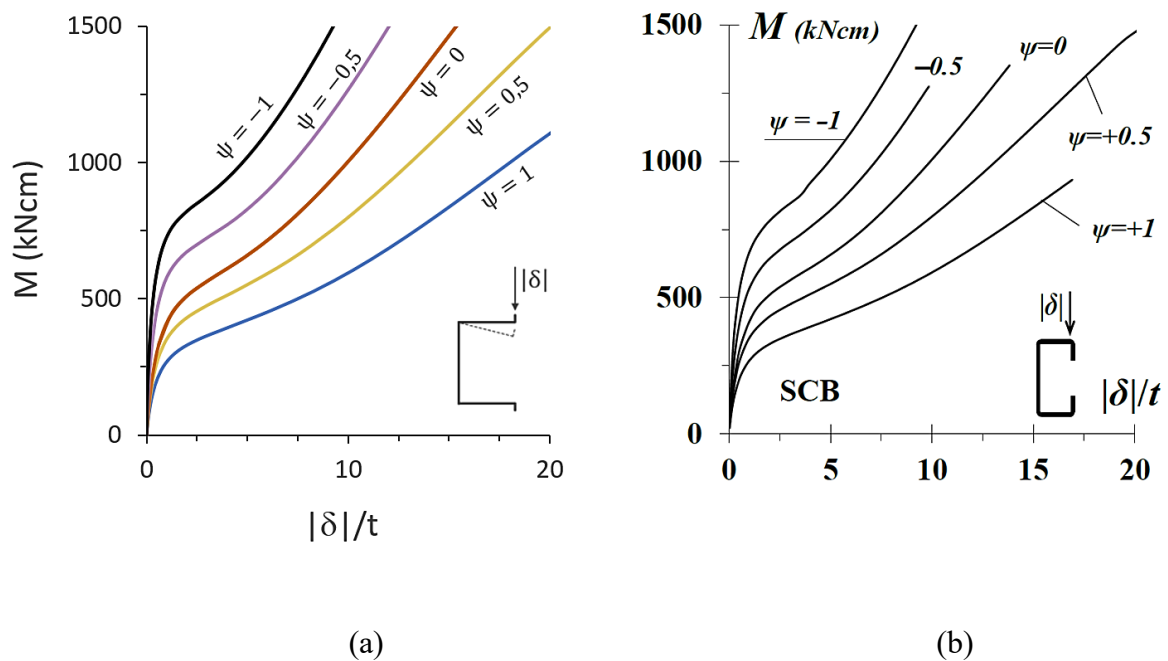
Tabela 16 – Momentos últimos obtidos e reportados por Depolli (2018) – viga C02

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	$M_{u,D}$ (kNcm)	$M_{u,D}/M_u$
1	0,55	7,8084	123,36	124,80	1,01
	1,05	28,4586	333,35	330,30	0,99
	1,55	62,0153	417,94	415,40	0,99
	2,05	108,4783	595,38	596,50	1,00
	2,55	167,8478	764,63	769,10	1,01
	3,05	240,1236	930,37	933,90	1,00
	3,55	325,3059	1078,50	1077,70	1,00
	4,05	423,3946	1191,75	1172,00	0,98
0	0,75	21,9638	361,60	352,30	0,97
	1,25	61,0107	580,81	569,10	0,98
	1,75	119,5809	883,04	873,30	0,99
	2,25	197,6746	1197,60	1169,70	0,98
	2,75	295,2916	1475,55	1446,80	0,98
	3,25	412,4321	1741,68	1693,10	0,97
	3,75	549,0960	1951,10	1896,90	0,97
	4,25	705,2833	1989,34	1963,30	0,99
-0,5	0,85	35,0526	534,55	504,60	0,94
	1,35	88,4198	788,20	758,00	0,96
	1,85	166,0449	1159,02	1121,30	0,97
	2,35	267,9279	1505,16	1451,30	0,96
	2,85	394,0686	1821,88	1746,50	0,96
	3,35	544,4672	2128,87	2010,00	0,94
	3,85	719,1237	2312,36	2224,50	0,96
	4,35	918,0380	2324,84	2287,10	0,98

Para as condições analisadas, é possível observar que os valores de momento último obtidos com o modelo apresentam boa concordância com os valores reportados por Depolli (2018), com as maiores diferenças menores que 6% e diferenças médias na ordem de 2%.

Na Figura 18 são ilustradas as trajetórias de equilíbrio de pós-flambagem elástica ($M \times |\delta|/t$), que relaciona o momento e o deslocamento vertical absoluto de maior amplitude – que ocorre ao longo da borda longitudinal do conjunto mesa-enrijecedor mais solicitado – normalizado em relação à espessura ($|\delta|/t$), obtidas por Depolli (2018) e obtidas por meio do modelo desenvolvido, onde é possível observar a similaridade entre as trajetórias.

Figura 18 – Trajetórias de equilíbrio obtidas (a) via modelo e (b) via Depolli (2018)



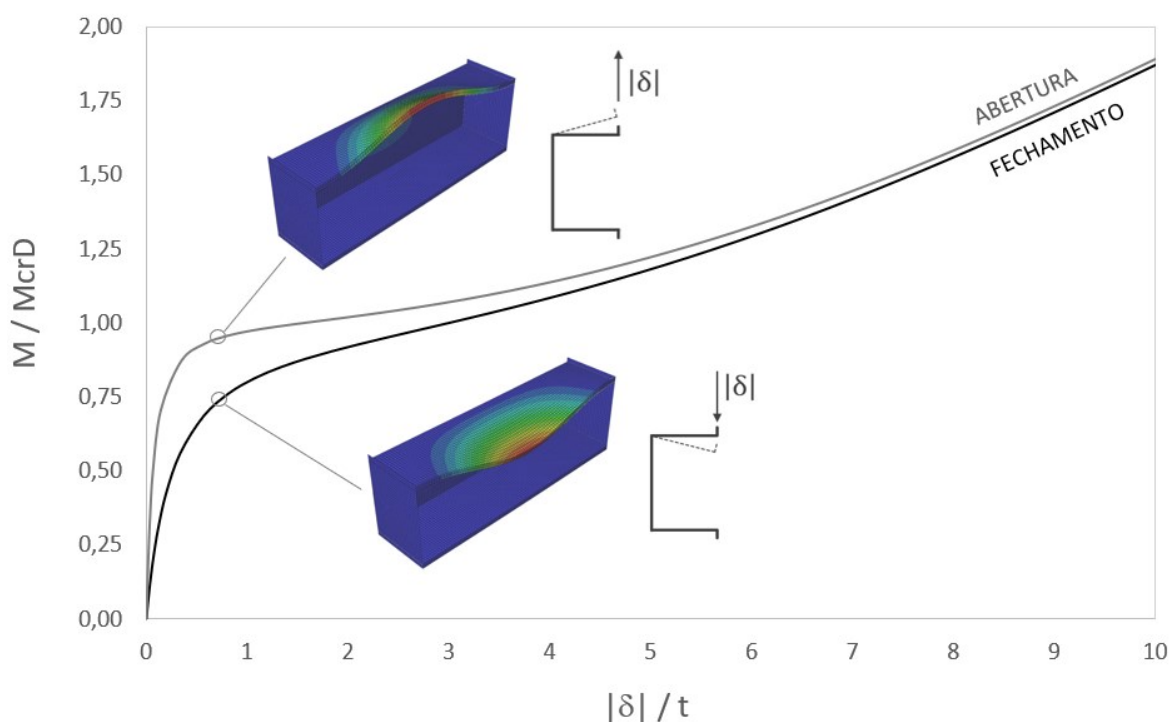
Fonte: Autor e Depolli (2018).

Diante do comportamento apropriado e dos resultados precisos apresentados nas análises de flambagem e de pós-flambagem, é possível verificar a adequabilidade dos procedimentos envolvidos no desenvolvimento do modelo numérico em elementos finitos e o mesmo pode ser considerado validado.

4.2 PÓS-FLAMBAGEM ELÁSTICA

Conforme evidenciado por Prola e Camotim (2002), a forma da imperfeição geométrica inicial incorporada ao modelo interfere diretamente na resistência do perfil, onde o movimento de fechamento do conjunto mesa-enrijecedor normalmente leva a menores valores de momento resistente do que o movimento de abertura. Exemplificando com a viga H_M11 , é ilustrado na Figura 19 o comportamento observado nas trajetórias de equilíbrio ($M/M_{crD} \times |\delta|/t$) de pós-flambagem elástica, obtidas para os movimentos de abertura e fechamento do conjunto mesa-enrijecedor, que relaciona: o momento normalizado em relação ao momento crítico de flambagem (M/M_{crD}) e o deslocamento vertical absoluto de maior amplitude normalizado em relação à espessura ($|\delta|/t$).

Figura 19 – Trajetórias de equilíbrio: abertura e fechamento do conjunto mesa-enrijecedor



Fonte: Autor.

Dessa forma, no modelo desenvolvido, a perturbação na geometria é incorporada compreendendo o movimento⁴ de fechamento do conjunto mesa-enrijecedor – cenário que conduz ao menor valor de momento resistente.

⁴ É pertinente observar que, o estudo dos movimentos de fechamento ou abertura do conjunto mesa-enrijecedor é relevante apenas quando esses movimentos estão associados ao mesmo momento crítico de flambagem (dois autovetores associados a um autovalor), i.e., os perfis com flexão em torno da maior inércia, nessa pesquisa.

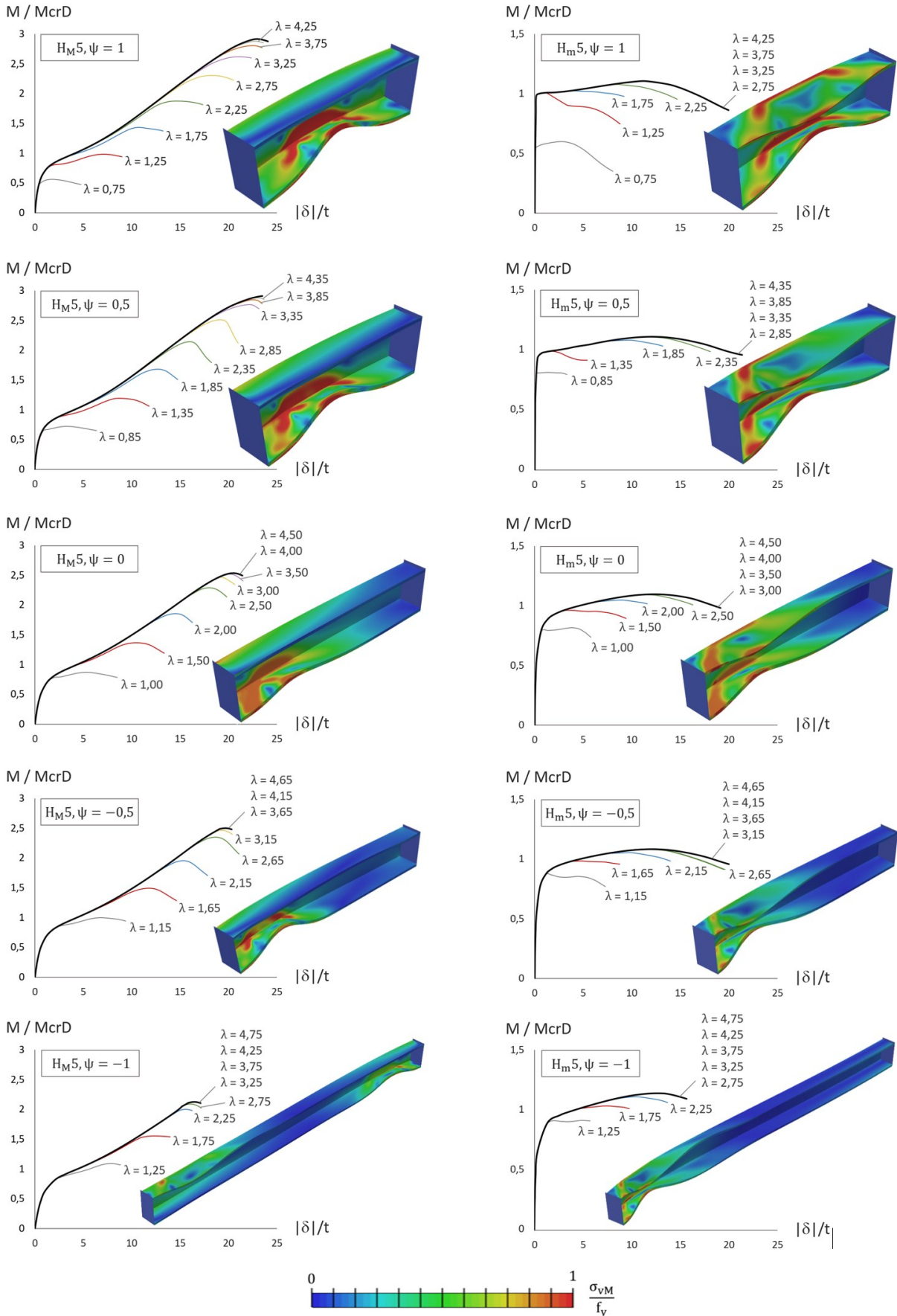
4.3 PÓS-FLAMBAGEM ELASTO-PLÁSTICA

Conforme ilustrado na Figura 20, com o início da plastificação do material, que acontece quando o ponto mais solicitado atinge a tensão de escoamento, ocorre a transição entre o comportamento elástico e o comportamento elasto-plástico da estrutura; no ponto de maior ordenada da trajetória de equilíbrio, a estrutura atinge sua capacidade resistente (momento último M_u) e o colapso ocorre: o mecanismo de colapso da estrutura – observado por meio da configuração deformada e o respectivo gradiente de tensão de von Mises (σ_{vM}), normalizado em relação à tensão de escoamento – compreende o escoamento das bordas livres dos enrijecedores e dos cantos dobrados dos conjuntos alma-mesa e mesa-enrijecedor mais solicitados, com o aspecto do modo de flambagem distorcional, em conformidade com a imperfeição geométrica inicial incorporada ao modelo, e o desenvolvimento de uma rótula plástica.

Invariavelmente, o aumento do índice de esbeltez distorcional provoca aumento da relação M_u/M_{crD} – e do deslocamento vertical correspondente – até um determinado limite, quando a trajetória de equilíbrio exhibe um comportamento completamente elástico. Conforme apontado por Reis e Camotim (2000), o colapso em estruturas menos esbeltas ocorre em regime elasto-plástico e compreende a combinação entre as não-linearidades geométrica e física, entretanto, em estruturas com elevada esbeltez, a capacidade resistente é condicionada pelo fenômeno da instabilidade e o colapso ocorre em regime elástico, envolvendo apenas a consideração da não-linearidade geométrica. É relevante destacar que, em estruturas com esbeltez muito reduzida não acontece flambagem e o colapso ocorre exclusivamente pela falha do material ($M_u < M_{crD}$).

As trajetórias de equilíbrio permitem observar um comportamento nitidamente distinto entre os diferentes eixos de flexão considerados: para o mesmo índice de esbeltez, enquanto os perfis submetidos à flexão em torno do eixo de maior inércia exibem maior ductilidade e significativa reserva de resistência pós-crítica distorcional (diferença entre o início da flambagem distorcional e o colapso) e reserva de resistência elasto-plástica (diferença entre o início do escoamento e o colapso da estrutura) os perfis submetidos à flexão em torno do eixo de menor inércia apresentam menor deformação e colapso quase imediatamente após a flambagem, simultaneamente com o início do escoamento, o que indica que os fenômenos de instabilidade são mais condicionantes nos perfis submetidos à flexão em torno do eixo de menor inércia.

Figura 20 – Trajetórias de equilíbrio de pós-flambagem e mecanismos de colapso – H5



Fonte: Autor.

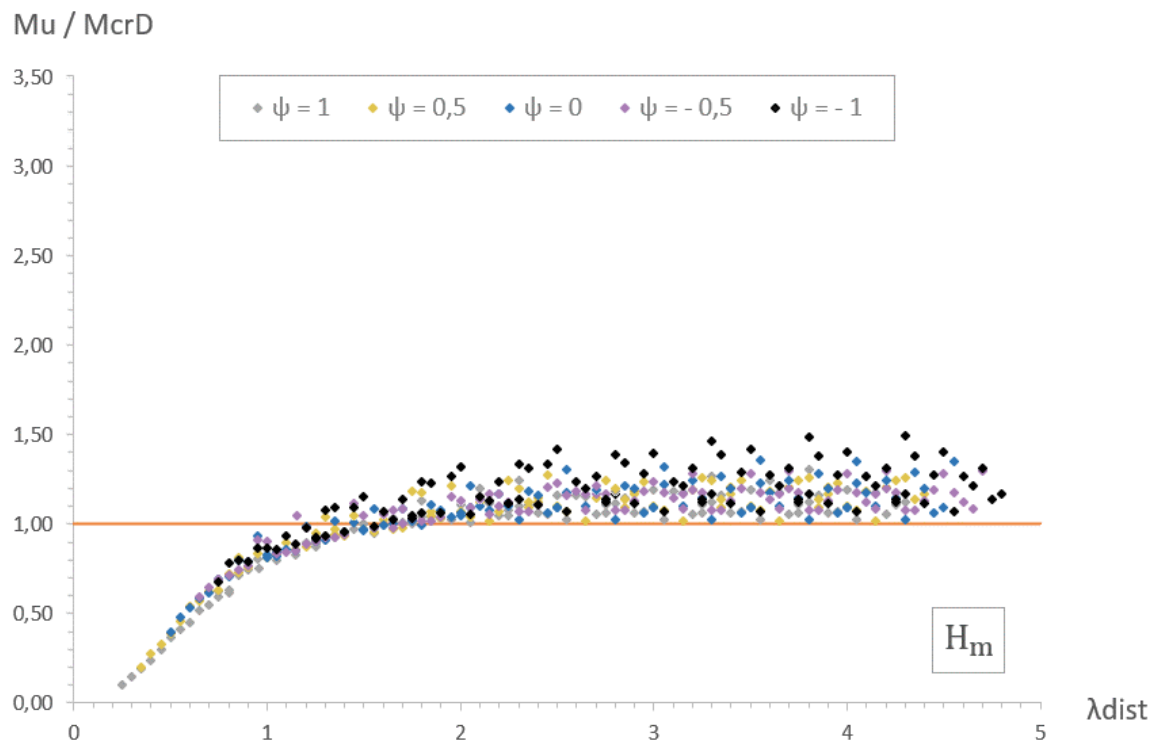
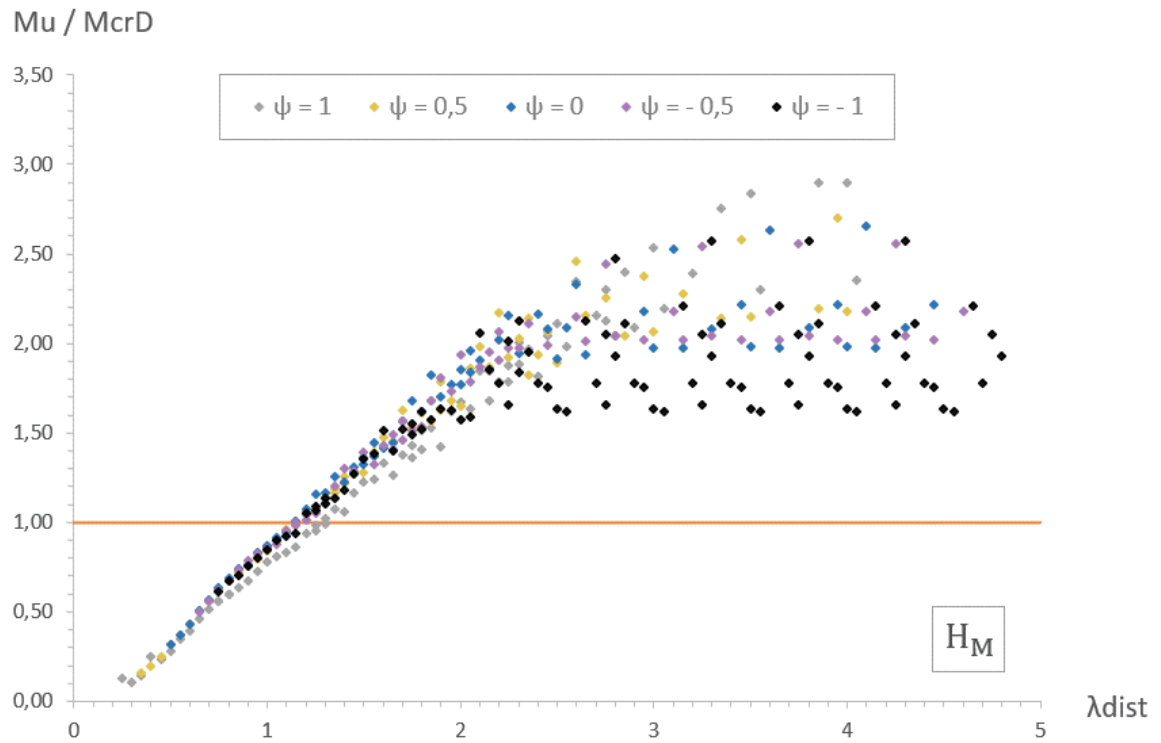
5 MOMENTO RESISTENTE

5.1 MOMENTO RESISTENTE VIA MODELO NUMÉRICO

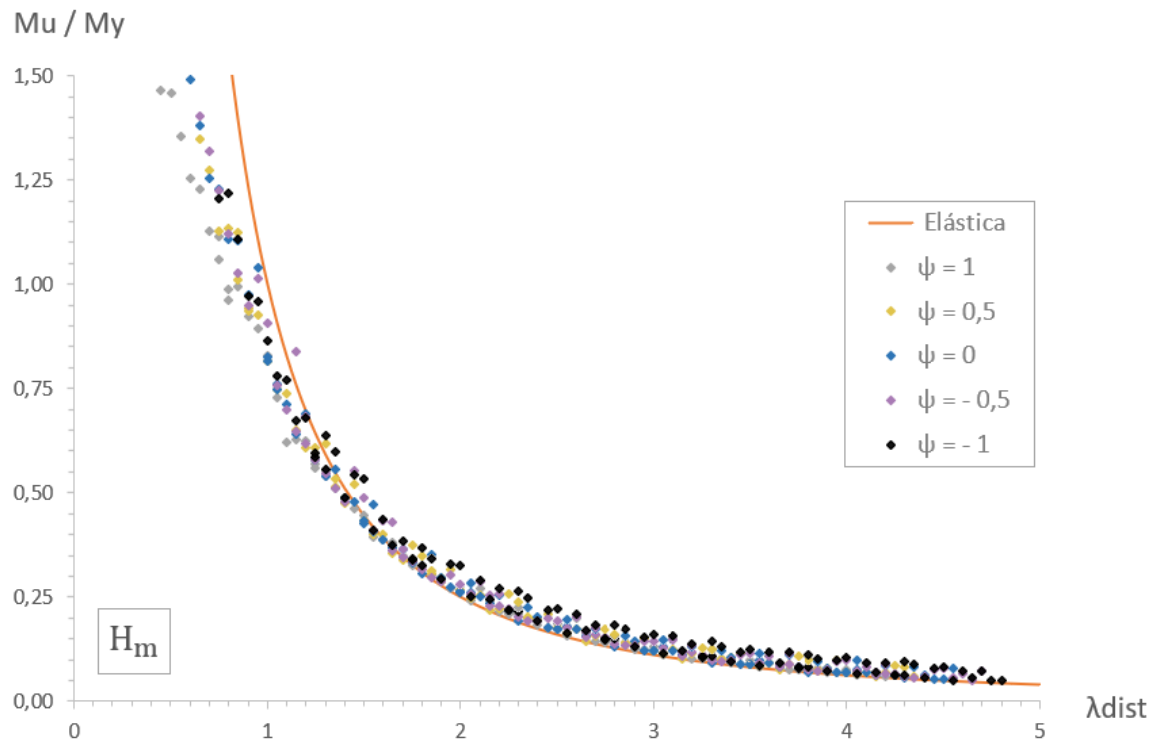
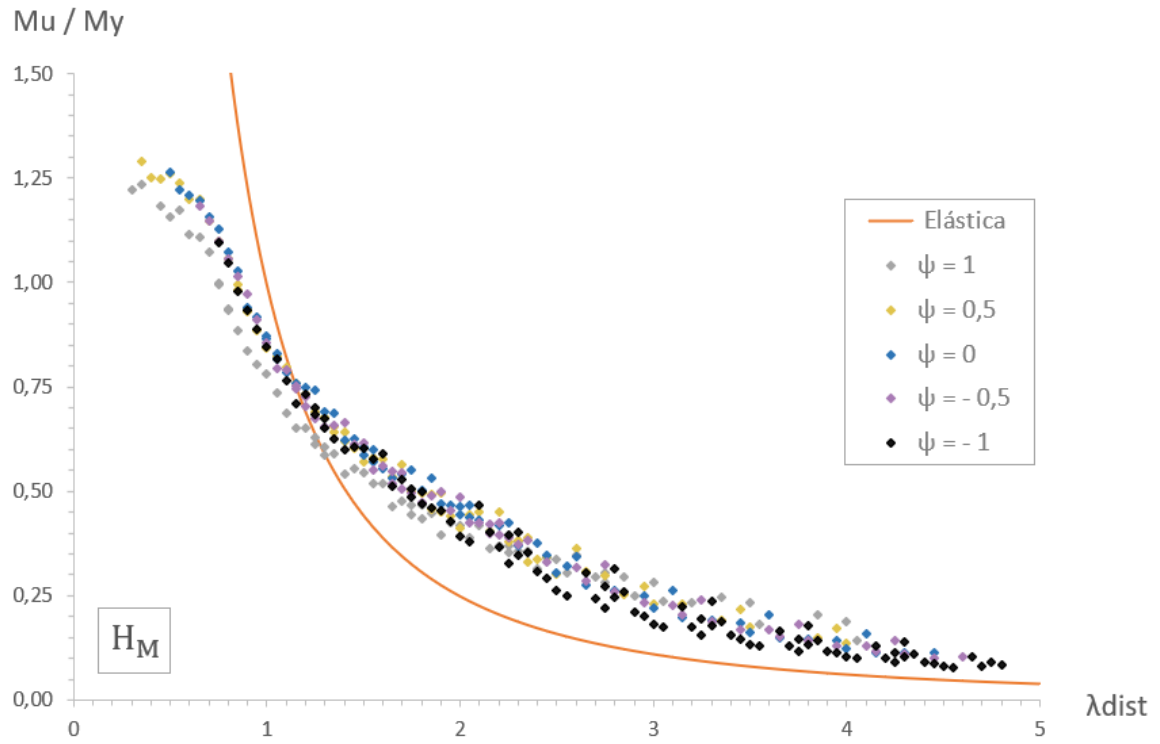
Os valores de momento último obtidos com o modelo numérico desenvolvido são relacionados nas Tabelas A.1 a A.24 do Apêndice A – para as (i) 12 geometrias, (ii) cinco gradientes de momento, (iii) dois eixos de flexão (maior e menor inércia) e (iv) oito índices de esbeltez distorcional considerados, totalizando 960 vigas. Para qualquer perfil, hipótese de carregamento ou eixo de flexão avaliado, os resultados permitem verificar que o aumento do índice de esbeltez distorcional (i.e., o aumento da tensão de escoamento do material) provoca aumento do valor de momento resistente até um determinado limite, a partir do qual o colapso ocorre em regime elástico, evidenciando que a capacidade resistente da estrutura fica restringida pelo fenômeno da instabilidade. Conforme apontado por Martins et al. (2017a), estruturas muito esbeltas podem atingir forças que desenvolvem uma “interação secundária” entre os modos de flambagem, portanto, em virtude dos comprimentos (curtos) que foram adotados, as estruturas onde o momento resistente supera o momento crítico de flambagem local correspondente foram descartadas das análises posteriores (valor sublinhado, totalizando 140 vigas), de forma a evitar o desenvolvimento de interação local-distorcional secundária nos elementos.

Nas Figuras 21 e 22, os resultados são exibidos em forma de nuvem de pontos, relacionando: os momentos últimos normalizados – em relação aos momentos críticos de flambagem (M_u/M_{crD}) e aos momentos de escoamento (M_u/M_y), respectivamente – e os índices de esbeltez distorcional correspondentes, para os eixos de flexão considerados. Os dados ilustrados nas nuvens de pontos $M_u/M_{crD} \times \lambda_{dist}$ evidenciam que os perfis submetidos à flexão em torno da maior inércia apresentam maior reserva de resistência pós-crítica distorcional (diferença entre o momento último e o momento crítico de flambagem distorcional). Nas nuvens de pontos $M_u/M_y \times \lambda_{dist}$, os resultados apresentam aspecto em conformidade com a curva de dimensionamento “tipo-Winter” para os diferentes eixos de flexão considerados (com uma dispersão vertical mais significativa nos perfis submetidos à flexão em torno do eixo de maior inércia, devido à reserva de resistência), o que sugere que o Método da Resistência Direta pode ser empregado para determinar os momentos resistentes e uma melhor estimativa dos valores pode ser alcançada pelo ajuste dos parâmetros da Equação (1). Além disso, devido à menor reserva de resistência dos perfis submetidos à flexão em torno da menor inércia, a curva elástica de resistência à flambagem ($1/\lambda_{dist}^2$) proporciona boa estimativa da sua capacidade resistente.

Figura 21 – Nuvens de pontos $M_u/M_{crD} \times \lambda_{dist}$



Fonte: Autor.

Figura 22 – Nuvens de pontos $M_u/M_y \times \lambda_{dist}$ 

Fonte: Autor.

Os resultados apresentados no Apêndice A e nas Figuras 21 e 22 permitem observar que o eixo de flexão influencia consideravelmente o comportamento de pós-flambagem e resistência última das estruturas, o que demonstra que as vigas H_M e H_m devem ser tratadas separadamente e o momento resistente distorcional não deve ser estimado por meio da mesma curva de dimensionamento.

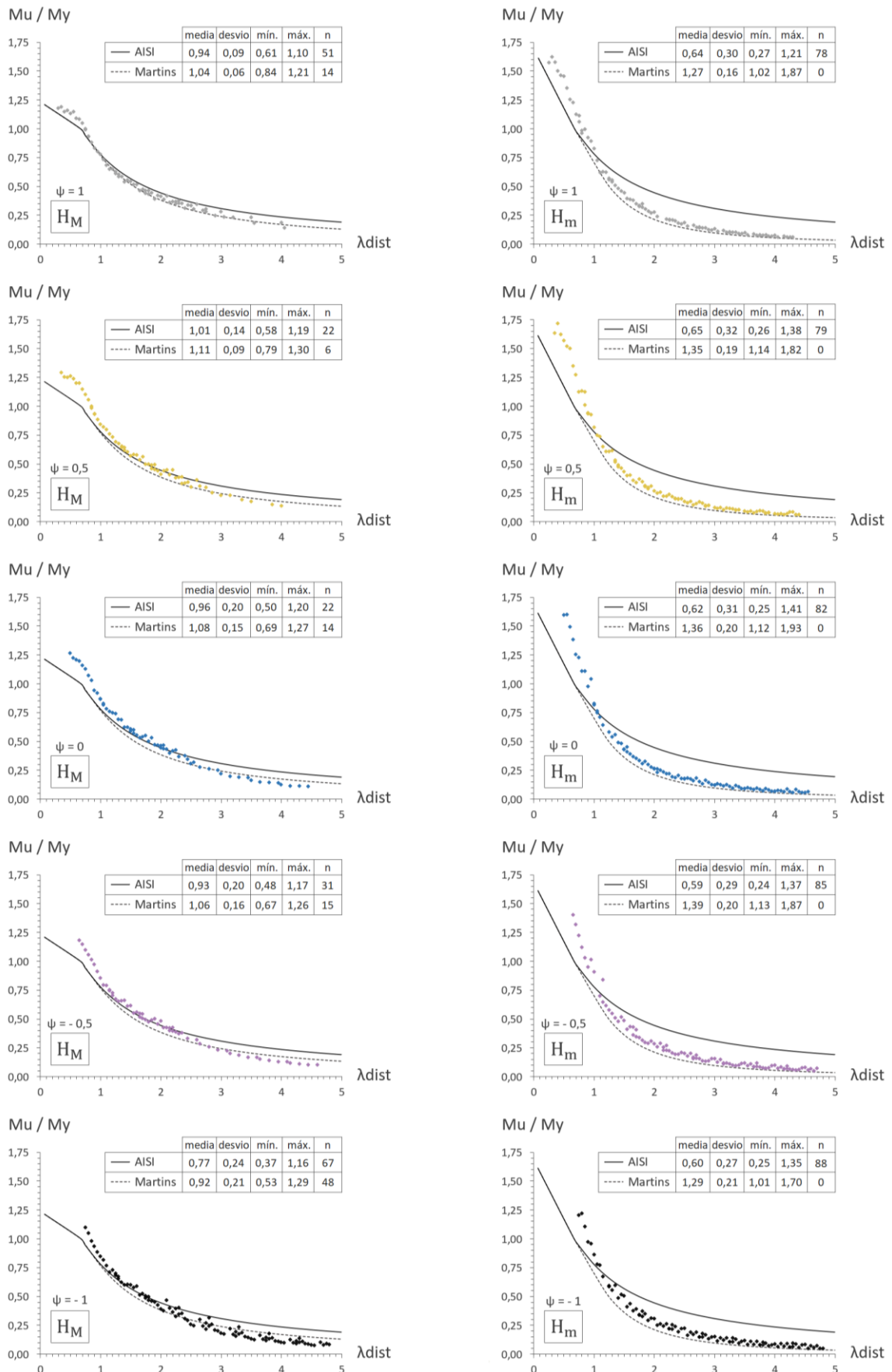
5.2 MOMENTO RESISTENTE VIA MRD

Nas Tabelas A.1 a A.24 do Apêndice A são apresentados os momentos últimos, normalizados em relação aos momentos resistentes associados à flambagem distorcional, determinados por meio do MRD conforme previsto pela norma técnica AISI S100-16 (M_{Rdist}) e pela proposta de Martins et al. (2017b) ($M_{Rdist-M}$). Os indicadores de média, desvio padrão, mínimo, máximo e estimativas inseguras (i.e., quando $M_u < M_{Rdist}$) são apresentadas na Figura 23, juntamente com as curvas de dimensionamento, normativa e proposta por Martins et al. (2017b), e a nuvem de pontos $M_u/M_y \times \lambda_{dist}$, para os diferentes gradientes de momento e eixos de flexão considerados.

Em conformidade com o reportado por Martins (2017b), os resultados evidenciam que a curva de dimensionamento distorcional atualmente normatizada é inadequada para estimar a capacidade resistente das estruturas com índice de esbeltez distorcional moderado a alto, superestimando consideravelmente os esforços resistentes, sobretudo nos perfis submetidos à flexão em torno da menor inércia: nas diferentes hipóteses consideradas, além do número significativo de estimativas inseguras, as relações M_u/M_{Rdist} apresentam média < 1 e atingem o valor mínimo de 0,24 (ou seja, a curva normativa chega a estimar momentos resistentes quatro vezes maiores).

Os ajustes propostos por Martins et al. (2017b) proporcionam uma melhora significativa na previsão da capacidade resistente das estruturas, entretanto, as curvas de dimensionamento apresentam uma quantidade relevante de estimativas inseguras para os perfis submetidos à flexão em torno do eixo de maior inércia, principalmente nas hipóteses de carregamento não-uniforme, em conformidade com o observado por Depolli (2018).

Figura 23 – Comparativo: curvas de dimensionamento e momentos resistentes obtidos



Fonte: Autor.

5.3 AJUSTES NAS CURVAS DE DIMENSIONAMENTO

De forma a possibilitar uma melhor estimativa da capacidade resistente das estruturas, foram propostos ajustes nos parâmetros “a”, “b” e “c” da curva de dimensionamento “tipo-Winter”, conforme Equação 8.

$$M_{\text{Rdist-D}} = \begin{cases} M_y + (1 - C_{yd}^{-2})(M_p - M_y) & \text{para } \lambda_{\text{dist}} \leq 0,673 \\ (1 - a \lambda_{\text{dist}}^{-b}) \lambda_{\text{dist}}^{-c} M_y & \text{para } \lambda_{\text{dist}} > 0,673 \end{cases} \quad (8)$$

Para os diferentes gradientes de momento e eixos de flexão considerados, os parâmetros foram determinados por um processo de tentativa e erro, de modo a restringir a quantidade de estimativas inseguras, mesmo ao custo de maiores diferenças entre a curva de dimensionamento e os momentos resistentes obtidos com o modelo numérico. Nos perfis submetidos à flexão em torno da maior inércia, de modo a incluir o gradiente de momento explicitamente na estimativa dos esforços resistentes, os parâmetros “a”, “b” e “c” foram relacionados ao gradiente através de funções de segundo grau – as constantes foram determinadas por meio do procedimento de minimização da Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQR), através da ferramenta Solver do EXCEL – conforme Equações 9 a 11. Nos perfis submetidos à flexão em torno da menor inércia, os parâmetros “a”, “b” e “c” ajustados são constantes⁵: a = 0,275, b = 1,85 e c = 1,95.

$$a = 0,030 \psi^2 + 0,030 \psi + 0,195 \quad (9)$$

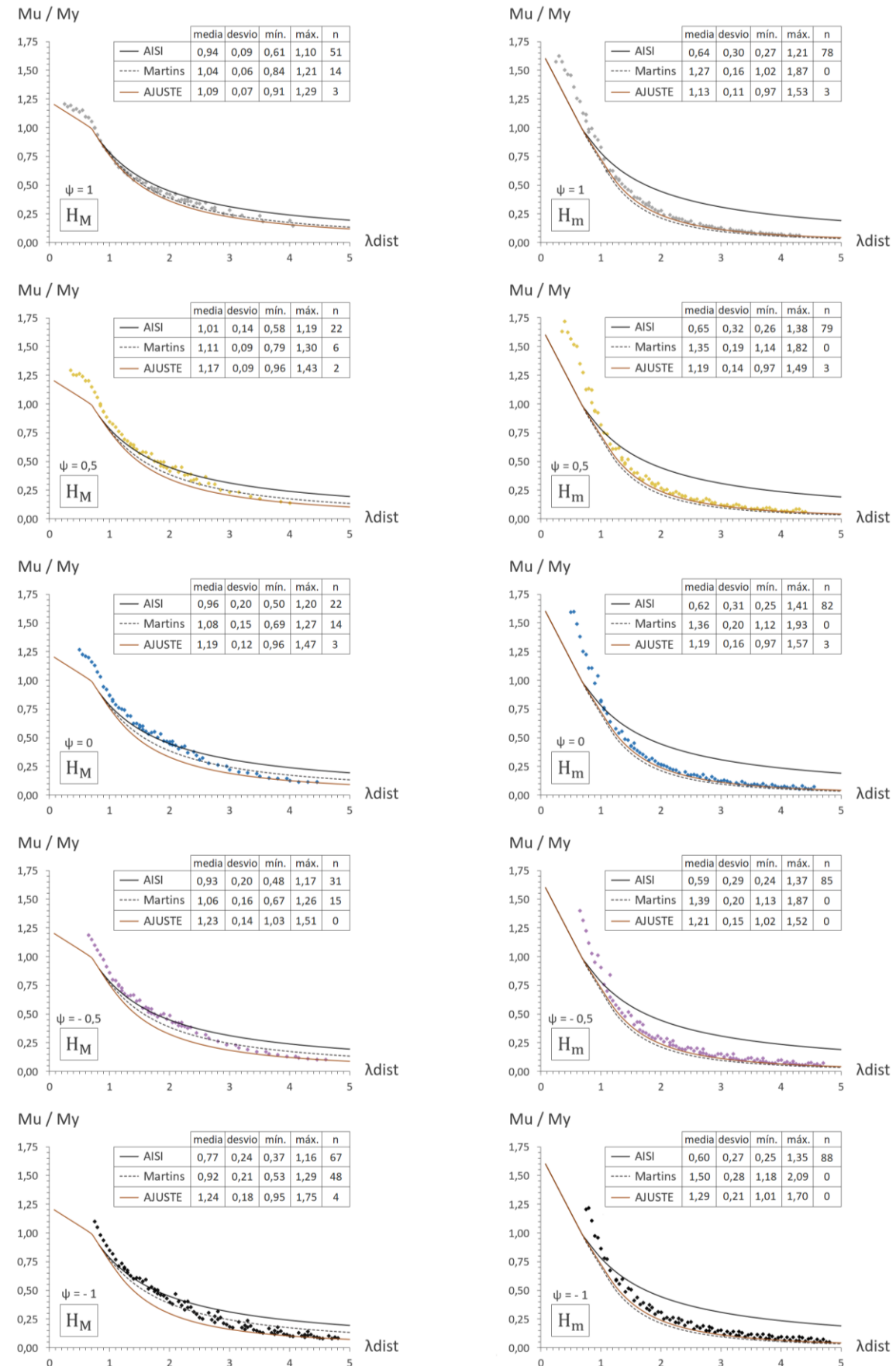
$$b = -0,330 \psi^2 - 0,500 \psi + 2,135 \quad (10)$$

$$c = -0,015 \psi^2 - 0,175 \psi + 1,485 \quad (11)$$

Nas Tabelas A.1 a A.24 do Apêndice A são apresentados os momentos últimos, normalizados em relação aos momentos resistentes determinados conforme previsto pela proposta apresentada ($M_{\text{Rdist-D}}$). Na Figura 24, os dados apresentados na Figura 23 são reapresentados, juntamente com os indicadores e as curvas de dimensionamento ajustadas.

⁵ Nos perfis submetidos à flexão em torno da menor inércia, o gradiente de momento influencia a capacidade resistente das estruturas de forma menos significativa, logo, valores constantes dos parâmetros “a”, “b” e “c” proporcionam bom ajuste da curva de dimensionamento nas diferentes hipóteses de carregamento.

Figura 24 – Comparativo: curvas de dimensionamento normativa e propostas



Os resultados permitem comparar a qualidade das estimativas obtidas pelas curvas de dimensionamento normativa, propostas por Martins (2017b) e propostas por meio deste estudo. De forma geral, nos perfis submetidos à flexão em torno da menor inércia, os ajustes propostos proporcionam uma melhora significativa nos indicadores, com os valores de média, mínimo e máximo mais próximos de 1 e redução dos valores de desvio padrão, mantendo um número reduzido de estimativas inseguras. Nos perfis submetidos à flexão em torno da maior inércia, os ajustes proporcionam melhora nos indicadores de mínimo e desvio padrão, e restringem a quantidade de estimativas inseguras, entretanto, isso implica (de forma esperada) em maiores diferenças entre a curva de dimensionamento e os momentos resistentes obtidos com o modelo numérico – refletidos nos indicadores de média e máximo.

Essas diferenças, no entanto, não são injustificadas: conforme apontado por Martins (2017b), existe uma dependência (natural) do momento resistente na geometria (comprimento e dimensões da seção transversal) do perfil, que não pode ser contabilizada pelo Método da Resistência Direta sem que esses parâmetros sejam explicitamente incluídos nas equações da curva de dimensionamento, ou seja, os esforços resistentes podem ser previstos adequadamente com base apenas no índice de esbeltez distorcional, entretanto, isso implica em alguns valores consideravelmente subestimados (excessivamente seguros), conforme observado por meio dos resultados obtidos.

6 CONCLUSÕES

Esse estudo reportou uma investigação numérica acerca do comportamento estrutural de perfis formados a frio tipo cartola submetidos à flexão não-uniforme, relativamente aos riscos do modo de flambagem distorcional. As análises foram realizadas em 960 vigas, referente a combinação entre: (i) 12 geometrias, (ii) cinco gradientes de momento, (iii) dois eixos de flexão (maior e menor inércia) e (iv) oito índices de esbeltez distorcional. Por meio do programa computacional GBTUL, foram identificadas geometrias onde o modo de flambagem distorcional é predominante e através do programa computacional ABAQUS, um modelo numérico de casca em elementos finitos foi desenvolvido para realizar as análises de flambagem e pós-flambagem nos elementos selecionados, que incluem trajetórias de equilíbrio, mecanismos de colapso e momentos resistentes.

As trajetórias de equilíbrio permitiram observar que o aumento do índice de esbeltez distorcional provoca aumento do momento resistente até um determinado limite, a partir do qual o colapso ocorre em regime elástico, evidenciando que a capacidade resistente da estrutura fica restringida pelo fenômeno da instabilidade. Além disso, um comportamento nitidamente distinto entre os diferentes eixos de flexão considerados foi observado: para o mesmo índice de esbeltez, enquanto os perfis submetidos à flexão em torno do eixo de maior inércia exibem maior ductilidade e significativa reserva de resistência pós-crítica distorcional e elasto-plástica, os perfis submetidos à flexão em torno do eixo de menor inércia apresentam menor deformação e colapso quase imediatamente após a flambagem, simultaneamente com o início do escoamento, demonstrando que os perfis devem ser tratados separadamente e não devem ser estimados por meio da mesma curva de dimensionamento.

Os mecanismos de colapso apresentaram o aspecto do modo de flambagem distorcional, em conformidade com a imperfeição geométrica inicial incorporada ao modelo, compreendendo o escoamento das bordas livres dos enrijecedores e dos cantos dobrados dos conjuntos alma-mesa e mesa-enrijecedor mais solicitados e o desenvolvimento de uma rótula plástica.

Os resultados obtidos evidenciaram que a curva de dimensionamento distorcional do Método da Resistência Direta atualmente normatizada é inadequada para estimar a capacidade resistente das estruturas com índice de esbeltez distorcional moderado a alto, superestimando consideravelmente os esforços resistentes, sobretudo nos perfis submetidos à flexão em torno

da menor inércia. Os ajustes propostos por Martins et al. (2017b) proporcionaram uma melhora na previsão da capacidade resistente das estruturas, entretanto, apresentaram uma quantidade relevante de estimativas inseguras para os perfis submetidos à flexão em torno do eixo de maior inércia, principalmente nas hipóteses de carregamento não-uniforme.

De forma a restringir a quantidade de estimativas inseguras, foram propostos ajustes nos parâmetros da curva de dimensionamento que possibilitaram uma melhora significativa na previsão da capacidade resistente dos perfis submetidos à flexão em torno do eixo de menor inércia, entretanto, nos perfis submetidos à flexão em torno do eixo de maior inércia, os ajustes resultaram (de forma esperada) em alguns valores consideravelmente subestimados (excessivamente seguros).

REFERÊNCIAS

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. AISI S100-16 (reaffirmed in 2020) with Supplement 3. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. Washington, DC. 2022.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6355: Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização. Rio de Janeiro. 2012.

AUSTRALIAN / NEW ZEALAND STANDARDS. AS/NZS 4600. Cold-formed steel structures. Sydney. 2018.

BARICHELLO, C.; LANDESMANN, A.; CAMOTIM, D. Distortional Failure and DSM Design of Cold-Formed Steel S-Shaped Beams Under Uniform Bending. Latin American Journal of Solids and Structures, v.14, p.2123-2140, 2017. <https://doi.org/10.1590/1679-78253616>

BEBIANO, R.; CAMOTIM, D.; GONÇALVES, R. GBTUL 2.0 – a second-generation code for the GBT-based buckling and vibration analysis of thin-walled members. Thin-Walled Structures, v.124, p.235-253, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.12.002>

CAMOTIM, D.; DINIS, P. B.; MARTINS, A. D.; YOUNG, B. Interactive behaviour, failure and DSM design of cold-formed steel members prone to distortional buckling. Thin-Walled Structures, v.128, p.12-42, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.07.011>

DASSAULT SYSTÈMES. Abaqus User's Manual, 2016.

DEPOLLI, I. C. Dimensionamento à falha distorcional via método da resistência direta de vigas de aço em perfil formado a frio sob flexão não-uniforme. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

FRANCO, J. M.S.; DUARTE, J. P.; BATISTA, E. M.; LANDESMANN, A. Shape Grammar of steel cold-formed sections based on manufacturing rules. *Thin-Walled Structures*, v.79, p.218-232, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.01.005>

HANCOCK, G. J.; KWON, Y. B.; BERNARD, E. S. Strength design curves for thin-walled sections undergoing distortional buckling. *Journal of Constructional Steel Research*, v.31, n.2-3, p.169-186, 1994. [https://doi.org/10.1016/0143-974X\(94\)90009-4](https://doi.org/10.1016/0143-974X(94)90009-4)

LANDESMANN, A.; CAMOTIM, D. Distortional failure and DSM design of cold-formed steel lipped channel beams under elevated temperatures. *Thin-Walled Structures*, v.98, p.75-93, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.06.004>

MARTINS, A. D.; CAMOTIM, D.; DINIS, P. B. Local-distortional interaction in cold-formed steel beams: behaviour, strength and DSM design. *Thin-Walled Structures*, v.119, p.879-901, 2017a. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.06.011>

MARTINS, A. D.; LANDESMANN, A.; CAMOTIM, D.; DINIS, P. B. Distortional failure of cold-formed steel beams under uniform bending: Behaviour, strength and DSM design. *Thin-Walled Structures*, v.118, p.196-213, 2017b. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.04.009>

REDDY, J. N. *An introduction to the finite element method*. McGraw-Hill, 2005.

PROLA, L. C.; CAMOTIM, D. On the distortional post-buckling behaviour of cold-formed lipped channel steel beams. *Advances in Steel Structures (ICASS'02)*, p.331-339, 2002. <https://doi.org/10.1016/B978-008044017-0/50038-X>

REIS, A.; CAMOTIM, D. *Estabilidade Estrutural*. McGraw-Hill, 2001.

SANTOS, W. S.; LANDESMANN, A.; CAMOTIM, D. Distortional strength of end-bolted CFS lipped channel columns: Experimental investigation, numerical simulations and DSM design. *Thin-Walled Structures*, v.148, 106469, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106469>

SCHAFFER, B. W.; PEKOZ, T. Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions. Elsevier, p.137-144, 1998.

SCHARDT, R. Generalized beam theory – an adequate method for coupled stability problems. Thin-walled structures, v.19, n.2-4, p.161-180, 1994. [https://doi.org/10.1016/0263-8231\(94\)90027-2](https://doi.org/10.1016/0263-8231(94)90027-2)

SOUZA, F. T.; DOS SANTOS, E. T.; SARMANHO, A. M.C. Análise numérica da influência das dimensões de perfurações em perfis formados a frio tipo rack submetidos à compressão. Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão, v.5, 2020.

WINTER, G. Thin walled structures, theoretical solutions and test results. Eighth Congress, IABSE, p.112, 1968.

YU, C.; SCHAFFER, B. W. Distortional buckling of cold-formed steel members in bending. American Iron and Steel Institute (AISI), 2005.

APÊNDICE A

Nas Tabelas A.1 a A.24 são apresentados, para as diferentes geometrias e condições de carregamento consideradas, os valores relativos a: (i) índice de esbeltez distorcional λ_{dist} , (ii) tensão de escoamento f_y , (iii) momento de escoamento M_y e plasticidade M_p , (iv) momento último M_u e (v) suas relações com o momento de escoamento e os momentos resistentes M_{Rdist} , $M_{\text{Rdist-M}}$ e $M_{\text{Rdist-D}}$.

Tabela A.1 – Resultados numéricos e estimativas – H_M1

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist}}}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist-D}}}$
1	0,40	8,21	371,53	235,94	297,57	1,15	1,04	1,04	1,04
	0,90	41,56	998,21	1194,43	1506,46	0,84	1,00	1,00	1,03
	1,40	100,56	1564,88	2890,22	3645,25	0,54	0,90	0,97	1,00
	1,90	185,21	2095,97	5323,31	6713,96	0,39	0,85	0,97	1,02
	2,40	295,52	2671,91	8493,70	10712,58	0,31	0,83	1,01	1,06
	2,90	431,48	3079,67	12401,39	15641,12	0,25	0,78	0,99	1,05
	3,40	593,10	<u>3291,91</u>	17046,38	21499,56	0,19	0,70	0,92	0,99
	3,90	780,36	<u>3390,56</u>	22428,67	28287,92	0,15	0,62	0,85	0,92
0,5	0,50	14,67	531,00	421,55	531,68	1,26	1,18	1,18	1,18
	1,00	58,67	1422,22	1686,20	2126,70	0,84	1,08	1,10	1,08
	1,50	132,00	2158,24	3793,95	4785,08	0,57	1,00	1,09	1,12
	2,00	234,67	2775,46	6744,80	8506,81	0,41	0,92	1,07	1,15
	2,50	366,68	3187,62	10538,75	13291,89	0,30	0,83	1,01	1,13
	3,00	528,01	3488,69	15175,80	19140,32	0,23	0,74	0,95	1,10
	3,50	718,68	3624,14	20655,95	26052,10	0,18	0,66	0,87	1,03
	4,00	938,69	3675,36	26979,20	34027,23	0,14	0,58	0,79	0,96
0	0,65	28,31	972,86	813,57	1026,10	1,20	1,19	1,19	1,19
	1,15	88,60	1934,56	2546,61	3211,88	0,76	1,08	1,12	1,09
	1,65	182,40	2788,21	5242,45	6611,98	0,53	1,01	1,13	1,20
	2,15	309,70	3564,35	8901,09	11226,40	0,40	0,96	1,13	1,30
	2,65	470,49	3730,94	13522,53	17055,14	0,28	0,80	0,99	1,20
	3,15	664,78	3796,78	19106,77	24098,21	0,20	0,67	0,87	1,11
	3,65	892,57	3798,48	25653,81	32355,59	0,15	0,58	0,77	1,03
	4,15	1153,86	3798,48	33163,65	41827,30	0,11	0,50	0,69	0,96
-0,5	0,80	45,34	1375,10	1303,23	1643,69	1,06	1,16	1,16	1,08
	1,30	119,73	2248,91	3441,35	4340,36	0,65	1,02	1,08	1,10
	1,80	229,55	3127,78	6597,61	8321,17	0,47	0,97	1,10	1,25
	2,30	374,79	4020,16	10772,03	13586,10	0,37	0,95	1,14	1,42
	2,80	555,46	4156,75	15964,59	20135,17	0,26	0,79	0,99	1,33
	3,30	771,55	4156,75	22175,31	27968,37	0,19	0,66	0,87	1,23
	3,80	1023,06	4156,75	29404,17	37085,70	0,14	0,57	0,77	1,16
	4,30	1310,00	4156,75	37651,19	47487,16	0,11	0,50	0,70	1,10
-1	0,90	51,12	1373,64	1469,26	1853,09	0,93	1,11	1,12	1,05
	1,40	123,70	2134,74	3555,24	4484,01	0,60	1,00	1,07	1,15
	1,90	227,83	2960,20	6548,18	8258,82	0,45	0,97	1,11	1,36
	2,40	363,52	3226,38	10448,06	13177,51	0,31	0,82	0,99	1,34
	2,90	530,76	3229,50	15254,90	19240,08	0,21	0,66	0,84	1,24
	3,40	729,56	3229,50	20968,68	26446,53	0,15	0,56	0,74	1,17
	3,90	959,92	3229,50	27589,42	34796,86	0,12	0,48	0,66	1,11
	4,40	1221,83	3229,50	35117,10	44291,08	0,09	0,43	0,60	1,06

Tabela A.2 – Resultados numéricos e estimativas – H_m1

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-D}}}$
1	0,40	9,13	164,45	109,56	178,48	1,50	1,20	1,20	1,20
	0,90	46,20	512,14	554,63	903,54	0,92	1,10	1,14	1,13
	1,40	111,80	648,48	1342,07	2186,34	0,48	0,80	1,18	1,09
	1,90	205,92	707,93	2471,88	4026,88	0,29	0,62	1,22	1,09
	2,40	328,57	725,64	3944,04	6425,16	0,18	0,49	1,24	1,07
	2,90	479,73	727,20	5758,58	9381,18	0,13	0,40	1,24	1,05
	3,40	659,41	727,20	7915,48	12894,93	0,09	0,33	1,24	1,03
	3,90	867,62	727,20	10414,74	16966,43	0,07	0,29	1,24	1,01
0,5	0,50	16,76	315,65	201,23	327,82	1,57	1,35	1,35	1,35
	1,00	67,06	657,09	804,92	1311,28	0,82	1,05	1,16	1,13
	1,50	150,87	783,79	1811,07	2950,37	0,43	0,76	1,19	1,10
	2,00	268,22	860,88	3219,68	5245,11	0,27	0,60	1,26	1,12
	2,50	419,10	889,16	5030,75	8195,48	0,18	0,48	1,29	1,11
	3,00	603,50	889,16	7244,28	11801,50	0,12	0,40	1,29	1,08
	3,50	821,43	889,16	9860,27	16063,15	0,09	0,34	1,29	1,07
	4,00	1072,88	889,16	12878,72	20980,44	0,07	0,29	1,29	1,05
0	0,65	31,76	526,01	381,26	621,10	1,38	1,35	1,35	1,35
	1,15	99,42	765,00	1193,41	1944,16	0,64	0,91	1,12	1,07
	1,65	204,66	905,30	2456,76	4002,25	0,37	0,70	1,21	1,10
	2,15	347,50	975,00	4171,30	6795,37	0,23	0,56	1,27	1,11
	2,65	527,92	990,98	6337,03	10323,52	0,16	0,45	1,28	1,10
	3,15	745,93	990,98	8953,96	14586,71	0,11	0,37	1,28	1,07
	3,65	1001,52	990,98	12022,09	19584,93	0,08	0,32	1,28	1,06
	4,15	1294,70	990,98	15541,41	25318,17	0,06	0,28	1,29	1,04
-0,5	0,80	51,01	685,31	612,35	997,57	1,12	1,23	1,22	1,24
	1,30	134,71	884,59	1616,99	2634,21	0,55	0,86	1,17	1,10
	1,80	258,25	977,19	3100,03	5050,19	0,32	0,65	1,22	1,09
	2,30	421,65	1027,76	5061,47	8245,53	0,20	0,52	1,26	1,09
	2,80	624,91	1033,99	7501,31	12220,22	0,14	0,42	1,26	1,07
	3,30	868,02	1033,99	10419,55	16974,26	0,10	0,35	1,26	1,05
	3,80	1150,98	1033,99	13816,19	22507,66	0,07	0,30	1,26	1,03
	4,30	1473,80	1033,99	17691,23	28820,40	0,06	0,26	1,27	1,02
-1	0,90	57,73	674,06	692,96	1128,88	0,97	1,16	1,20	1,19
	1,40	139,69	817,50	1676,78	2731,61	0,49	0,81	1,19	1,10
	1,90	257,28	908,98	3088,36	5031,17	0,29	0,63	1,26	1,12
	2,40	410,51	951,02	4927,68	8027,58	0,19	0,51	1,30	1,13
	2,90	599,37	953,23	7194,76	11720,82	0,13	0,42	1,30	1,10
	3,40	823,87	953,23	9889,58	16110,90	0,10	0,35	1,30	1,08
	3,90	1084,00	953,23	13012,16	21197,82	0,07	0,30	1,30	1,06
	4,40	1379,77	953,23	16562,48	26981,57	0,06	0,27	1,31	1,05

Tabela A.3 – Resultados numéricos e estimativas – H_M2

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-D}}}$
1	0,55	22,44	849,57	739,28	935,65	1,15	1,10	1,10	1,10
	1,05	81,78	1983,21	2694,40	3410,10	0,74	0,98	1,00	1,03
	1,55	178,20	3036,66	5871,47	7431,07	0,52	0,93	1,02	1,07
	2,05	311,72	3988,23	10270,49	12998,58	0,39	0,89	1,04	1,09
	2,55	482,32	4838,13	15891,46	20112,61	0,30	0,85	1,04	1,11
	3,05	690,00	5362,81	22734,38	28773,17	0,24	0,78	0,99	1,06
	3,55	934,78	5621,44	30799,25	38980,26	0,18	0,69	0,92	0,99
	4,05	1216,64	5742,65	40086,07	50733,88	0,14	0,61	0,84	0,91
0,5	0,65	40,97	1619,10	1349,93	1708,50	1,20	1,19	1,19	1,19
	1,15	128,25	3207,19	4225,52	5347,92	0,76	1,08	1,12	1,11
	1,65	264,01	4650,02	8698,66	11009,23	0,53	1,02	1,13	1,18
	2,15	448,26	5982,37	14769,35	18692,44	0,41	0,97	1,14	1,25
	2,65	681,00	6895,67	22437,59	28397,55	0,31	0,89	1,10	1,24
	3,15	962,22	7273,46	31703,38	40124,55	0,23	0,78	1,00	1,17
	3,65	1291,93	<u>7413,05</u>	42566,72	53873,45	0,17	0,68	0,90	1,08
	4,15	1670,13	<u>7464,31</u>	55027,61	69644,25	0,14	0,59	0,82	1,00
0	0,80	68,18	2407,70	2246,46	2843,18	1,07	1,18	1,18	1,12
	1,30	180,04	4102,78	5932,07	7507,77	0,69	1,08	1,15	1,15
	1,80	345,17	5695,52	11372,72	14393,59	0,50	1,03	1,16	1,27
	2,30	563,57	6836,86	18568,43	23500,64	0,37	0,94	1,12	1,31
	2,80	835,23	7179,52	27519,18	34828,93	0,26	0,79	0,99	1,23
	3,30	1160,16	7309,70	38224,99	48378,45	0,19	0,68	0,88	1,14
	3,80	1538,35	7326,84	50685,84	64149,21	0,14	0,58	0,79	1,06
	4,30	1969,81	7326,84	64901,75	82141,19	0,11	0,51	0,71	0,99
-0,5	0,95	102,29	3073,64	3370,39	4265,64	0,91	1,13	1,14	1,07
	1,45	238,31	4802,87	7851,79	9937,41	0,61	1,05	1,13	1,19
	1,95	430,99	6460,42	14200,44	17972,41	0,45	1,00	1,15	1,35
	2,45	680,35	7441,98	22416,34	28370,65	0,33	0,89	1,09	1,39
	2,95	986,38	7531,78	32499,49	41132,12	0,23	0,74	0,94	1,28
	3,45	1349,09	7533,01	44449,89	56256,83	0,17	0,62	0,82	1,20
	3,95	1768,46	7533,01	58267,54	73744,78	0,13	0,54	0,74	1,12
	4,45	2244,51	7533,01	73952,44	93595,96	0,10	0,48	0,67	1,07
-1	1,05	98,45	2651,39	3243,67	4105,26	0,82	1,09	1,11	1,07
	1,55	214,53	4080,68	7068,40	8945,93	0,58	1,04	1,14	1,28
	2,05	375,26	4675,38	12364,18	15648,39	0,38	0,87	1,01	1,28
	2,55	580,64	4765,97	19131,01	24212,65	0,25	0,70	0,85	1,19
	3,05	830,67	4765,97	27368,89	34638,71	0,17	0,57	0,73	1,11
	3,55	1125,34	4765,97	37077,82	46926,56	0,13	0,49	0,65	1,04
	4,05	1464,66	4765,97	48257,80	61076,21	0,10	0,42	0,58	0,99
	4,55	1848,63	4765,97	60908,83	77087,66	0,08	0,37	0,53	0,95

Tabela A.4 – Resultados numéricos e estimativas – H_m2

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-D}}}$
1	0,55	25,40	447,52	330,66	541,38	1,35	1,21	1,21	1,21
	1,05	92,59	876,35	1205,14	1973,13	0,73	0,97	1,11	1,07
	1,55	201,76	1036,03	2626,17	4299,73	0,39	0,71	1,15	1,06
	2,05	352,92	1106,37	4593,75	7521,17	0,24	0,55	1,19	1,05
	2,55	546,07	1121,42	7107,88	11637,46	0,16	0,44	1,20	1,03
	3,05	781,21	1121,42	10168,56	16648,59	0,11	0,36	1,19	1,01
	3,55	1058,33	1121,42	13775,79	22554,57	0,08	0,31	1,20	0,99
	4,05	1377,45	1121,42	17929,57	29355,39	0,06	0,27	1,20	0,98
0,5	0,65	46,37	813,95	603,58	988,22	1,35	1,32	1,32	1,32
	1,15	145,15	1227,81	1889,32	3093,32	0,65	0,92	1,14	1,08
	1,65	298,80	1386,03	3889,36	6367,90	0,36	0,68	1,17	1,06
	2,15	507,33	1450,37	6603,70	10811,99	0,22	0,53	1,19	1,05
	2,65	770,74	1455,80	10032,34	16425,57	0,15	0,42	1,19	1,02
	3,15	1089,02	1455,80	14175,28	23208,64	0,10	0,35	1,19	0,99
	3,65	1462,18	1455,80	19032,52	31161,21	0,08	0,30	1,19	0,98
	4,15	1890,22	1455,80	24604,06	40283,27	0,06	0,26	1,20	0,97
0	0,80	76,63	1104,35	997,44	1633,07	1,11	1,22	1,21	1,23
	1,30	202,35	1419,71	2633,87	4312,32	0,54	0,84	1,16	1,08
	1,80	387,93	1547,18	5049,54	8267,42	0,31	0,63	1,18	1,06
	2,30	633,39	1592,11	8244,46	13498,34	0,19	0,49	1,19	1,04
	2,80	938,70	1592,11	12218,64	20005,10	0,13	0,40	1,19	1,01
	3,30	1303,89	1592,11	16972,07	27787,70	0,09	0,33	1,19	0,99
	3,80	1728,94	1592,11	22504,74	36846,13	0,07	0,29	1,19	0,98
	4,30	2213,86	1592,11	28816,67	47180,40	0,06	0,25	1,20	0,97
-0,5	0,95	114,41	1508,05	1489,22	2438,23	1,01	1,25	1,34	1,31
	1,45	266,53	1920,63	3469,34	5680,21	0,55	0,95	1,44	1,33
	1,95	482,04	2119,52	6274,51	10273,00	0,34	0,74	1,52	1,35
	2,45	760,94	2291,78	9904,73	16216,62	0,23	0,62	1,62	1,40
	2,95	1103,21	2391,51	14360,00	23511,06	0,17	0,53	1,69	1,43
	3,45	1508,88	2430,75	19640,32	32156,32	0,12	0,46	1,72	1,42
	3,95	1977,93	2435,38	25745,69	42152,41	0,09	0,40	1,73	1,41
	4,45	2510,36	2435,38	32676,11	53499,31	0,07	0,35	1,74	1,39
-1	1,05	110,97	1126,97	1444,39	2364,84	0,78	1,04	1,19	1,15
	1,55	241,81	1293,05	3147,52	5153,30	0,41	0,74	1,20	1,10
	2,05	422,98	1386,11	5505,70	9014,26	0,25	0,58	1,24	1,10
	2,55	654,47	1400,89	8518,93	13947,70	0,16	0,46	1,25	1,07
	3,05	936,29	1400,89	12187,21	19953,64	0,11	0,38	1,24	1,05
	3,55	1268,43	1400,89	16510,54	27032,06	0,08	0,32	1,25	1,03
	4,05	1650,90	1400,89	21488,92	35182,96	0,07	0,28	1,25	1,02
	4,55	2083,69	1400,89	27122,35	44406,36	0,05	0,25	1,26	1,01

Tabela A.5 – Resultados numéricos e estimativas – H_M3

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-D}}}$
1	0,70	32,70	1248,92	1189,67	1496,68	1,05	1,07	1,07	1,11
	1,20	96,10	2282,41	3496,18	4398,40	0,65	0,96	1,00	1,03
	1,70	192,87	3344,50	7016,63	8827,35	0,48	0,93	1,04	1,09
	2,20	323,01	4342,50	11751,04	14783,52	0,37	0,90	1,07	1,13
	2,70	486,51	5231,01	17699,39	22266,92	0,30	0,87	1,08	1,15
	3,20	683,39	5800,57	24861,70	31277,53	0,23	0,80	1,04	1,11
	3,70	913,63	<u>6077,98</u>	33237,95	41815,38	0,18	0,72	0,97	1,04
	4,20	1177,24	<u>6207,61</u>	42828,16	53880,44	0,14	0,64	0,89	0,97
0,5	0,80	55,94	2148,70	2034,94	2560,08	1,06	1,17	1,16	1,15
	1,30	147,71	3637,41	5373,52	6760,22	0,68	1,06	1,12	1,13
	1,80	283,17	5114,85	10301,90	12960,43	0,50	1,02	1,15	1,22
	2,30	462,34	6449,63	16820,08	21160,69	0,38	0,98	1,17	1,29
	2,80	685,21	<u>7410,80</u>	24928,06	31361,03	0,30	0,90	1,13	1,29
	3,30	951,78	<u>7853,83</u>	34625,84	43561,43	0,23	0,80	1,05	1,23
	3,80	1262,05	<u>8007,57</u>	45913,42	57761,90	0,17	0,70	0,95	1,14
	4,30	1616,02	<u>8067,71</u>	58790,80	73962,43	0,14	0,62	0,87	1,06
0	0,95	83,65	2794,82	3043,14	3828,46	0,92	1,14	1,15	1,09
	1,45	194,87	4423,04	7089,42	8918,92	0,62	1,07	1,15	1,19
	1,95	352,44	5978,41	12821,65	16130,42	0,47	1,02	1,18	1,32
	2,45	556,34	7003,77	20239,83	25462,94	0,35	0,93	1,13	1,35
	2,95	806,60	7343,58	29343,96	36916,50	0,25	0,80	1,01	1,27
	3,45	1103,19	7471,32	40134,04	50491,08	0,19	0,69	0,91	1,19
	3,95	1446,13	7484,45	52610,07	66186,69	0,14	0,60	0,81	1,11
	4,45	1835,40	7484,45	66772,05	84003,32	0,11	0,52	0,74	1,04
-0,5	1,10	124,31	3574,82	4522,50	5689,58	0,79	1,09	1,12	1,08
	1,60	263,01	5351,15	9568,26	12037,45	0,56	1,04	1,15	1,25
	2,10	453,07	6994,97	16482,82	20736,39	0,42	1,00	1,17	1,41
	2,60	694,51	8040,71	25266,18	31786,39	0,32	0,90	1,11	1,45
	3,10	987,31	8142,51	35918,34	45187,46	0,23	0,76	0,97	1,36
	3,60	1331,48	8147,48	48439,30	60939,60	0,17	0,64	0,86	1,27
	4,10	1727,02	8147,48	62829,06	79042,80	0,13	0,56	0,77	1,19
	4,60	2173,93	8147,48	79087,62	99497,06	0,10	0,50	0,70	1,14
-1	1,20	115,87	3081,65	4215,46	5303,30	0,73	1,07	1,12	1,13
	1,70	232,55	4455,02	8460,19	10643,43	0,53	1,03	1,15	1,34
	2,20	389,46	5199,53	14168,62	17824,99	0,37	0,90	1,06	1,39
	2,70	586,61	5197,72	21340,75	26847,96	0,24	0,72	0,89	1,27
	3,20	823,98	5197,72	29976,58	37712,37	0,17	0,60	0,77	1,19
	3,70	1101,60	5197,72	40076,11	50418,19	0,13	0,51	0,68	1,13
	4,20	1419,44	5197,72	51639,34	64965,44	0,10	0,45	0,62	1,07
	4,70	1777,52	5197,72	64666,27	81354,12	0,08	0,40	0,56	1,03

Tabela A.6 – Resultados numéricos e estimativas – H_m3

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist}}}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist-D}}}$
1	0,70	37,63	613,99	545,13	895,70	1,13	1,15	1,13	1,20
	1,20	110,60	999,83	1602,00	2632,26	0,62	0,92	1,17	1,11
	1,70	221,96	1125,10	3215,13	5282,80	0,35	0,68	1,21	1,10
	2,20	371,73	1165,70	5384,50	8847,31	0,22	0,53	1,23	1,08
	2,70	559,90	1177,10	8110,12	13325,81	0,15	0,43	1,23	1,05
	3,20	786,48	1177,10	11392,00	18718,28	0,10	0,36	1,23	1,03
	3,70	1051,45	1177,10	15230,13	25024,73	0,08	0,30	1,24	1,02
	4,20	1354,83	1177,10	19624,50	32245,16	0,06	0,27	1,24	1,00
0,5	0,80	64,32	1054,81	931,65	1530,80	1,13	1,25	1,24	1,25
	1,30	169,84	1518,31	2460,13	4042,26	0,62	0,97	1,32	1,24
	1,80	325,61	1839,84	4716,47	7749,66	0,39	0,80	1,51	1,35
	2,30	531,64	2013,52	7700,65	12653,00	0,26	0,66	1,62	1,41
	2,80	787,91	2130,98	11412,69	18752,27	0,19	0,57	1,70	1,45
	3,30	1094,42	2211,51	15852,57	26047,48	0,14	0,49	1,77	1,48
	3,80	1451,19	2248,60	21020,31	34538,63	0,11	0,43	1,81	1,48
	4,30	1858,21	2257,87	26915,89	44225,71	0,08	0,38	1,82	1,47
0	0,95	94,75	1424,77	1372,43	2255,05	1,04	1,28	1,38	1,35
	1,45	220,73	1530,94	3197,27	5253,46	0,48	0,82	1,24	1,15
	1,95	399,21	1582,98	5782,46	9501,21	0,27	0,60	1,23	1,09
	2,45	630,18	1616,62	9128,00	14998,29	0,18	0,48	1,24	1,07
	2,95	913,64	1616,62	13233,89	21744,71	0,12	0,39	1,24	1,05
	3,45	1249,59	1616,62	18100,13	29740,46	0,09	0,33	1,24	1,03
	3,95	1638,04	1616,62	23726,72	38985,56	0,07	0,29	1,25	1,01
	4,45	2078,98	1616,62	30113,66	49479,99	0,05	0,25	1,25	1,00
-0,5	1,10	140,08	1418,73	2029,05	3333,95	0,70	0,96	1,14	1,09
	1,60	296,37	1851,53	4292,86	7053,64	0,43	0,80	1,34	1,22
	2,10	510,54	2131,65	7395,13	12150,99	0,29	0,68	1,49	1,32
	2,60	782,60	2293,13	11335,84	18626,01	0,20	0,57	1,59	1,37
	3,10	1112,54	2363,83	16115,01	26478,69	0,15	0,49	1,64	1,38
	3,60	1500,37	2368,12	21732,62	35709,04	0,11	0,42	1,65	1,36
	4,10	1946,08	2368,12	28188,69	46317,05	0,08	0,36	1,66	1,34
	4,60	2449,68	2368,12	35483,20	58302,72	0,07	0,32	1,67	1,33
-1	1,20	131,47	1291,50	1904,26	3128,90	0,68	1,00	1,27	1,20
	1,70	263,84	1629,65	3821,74	6279,52	0,43	0,83	1,48	1,34
	2,20	441,87	1877,24	6400,42	10516,57	0,29	0,72	1,66	1,46
	2,70	665,54	2022,51	9640,30	15840,04	0,21	0,62	1,78	1,52
	3,20	934,87	2099,73	13541,38	22249,94	0,16	0,53	1,85	1,55
	3,70	1249,83	2120,43	18103,66	29746,25	0,12	0,46	1,87	1,54
	4,20	1610,45	2120,43	23327,14	38328,99	0,09	0,40	1,88	1,52
	4,70	2016,72	2120,43	29211,82	47998,16	0,07	0,36	1,89	1,51

Tabela A.7 – Resultados numéricos e estimativas – H_M4

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-D}}}$
1	0,25	3,18	122,00	101,41	127,32	1,20	1,04	1,04	1,04
	0,75	28,60	907,56	912,71	1145,86	0,99	1,06	1,05	1,09
	1,25	79,45	1551,84	2535,31	3182,93	0,61	0,93	0,98	1,01
	1,75	155,72	2204,08	4969,21	6238,55	0,44	0,89	1,00	1,04
	2,25	257,41	2893,19	8214,41	10312,71	0,35	0,88	1,05	1,10
	2,75	384,53	3455,37	12270,91	15405,40	0,28	0,84	1,05	1,12
	3,25	537,07	<u>3826,15</u>	17138,71	21516,64	0,22	0,78	1,01	1,09
	3,75	715,04	<u>3971,41</u>	22817,81	28646,41	0,17	0,69	0,93	1,01
0,5	0,35	7,05	290,23	224,95	282,41	1,29	1,15	1,15	1,15
	0,85	41,58	1301,86	1326,73	1665,63	0,98	1,13	1,12	1,10
	1,35	104,87	2145,47	3346,66	4201,53	0,64	1,03	1,10	1,12
	1,85	196,94	2880,31	6284,74	7890,11	0,46	0,96	1,10	1,16
	2,35	317,79	3353,08	10140,97	12731,38	0,33	0,86	1,03	1,14
	2,85	467,40	3749,31	14915,35	18725,33	0,25	0,78	0,98	1,12
	3,35	645,78	3933,45	20607,88	25871,96	0,19	0,68	0,90	1,06
	3,85	852,94	4032,37	27218,56	34171,28	0,15	0,60	0,82	0,99
0	0,50	16,40	662,30	523,45	657,16	1,27	1,19	1,19	1,19
	1,00	65,61	1810,73	2093,80	2628,64	0,86	1,11	1,13	1,07
	1,50	147,63	2766,90	4711,05	5914,44	0,59	1,03	1,12	1,17
	2,00	262,45	3713,66	8375,20	10514,57	0,44	1,00	1,16	1,30
	2,50	410,08	4005,43	13086,25	16429,01	0,31	0,84	1,02	1,23
	3,00	590,52	4136,42	18844,20	23657,77	0,22	0,71	0,91	1,14
	3,50	803,76	4153,54	25649,05	32200,86	0,16	0,60	0,80	1,05
	4,00	1049,81	4153,54	33500,80	42058,26	0,12	0,52	0,72	0,98
-0,5	0,65	29,32	1107,30	935,71	1174,73	1,18	1,17	1,17	1,17
	1,15	91,78	2180,20	2928,94	3677,11	0,74	1,06	1,10	1,07
	1,65	188,95	3117,68	6029,52	7569,71	0,52	0,98	1,09	1,21
	2,15	320,81	4088,79	10237,45	12852,51	0,40	0,96	1,13	1,37
	2,65	487,37	4453,63	15552,73	19525,53	0,29	0,83	1,02	1,35
	3,15	688,64	4466,11	21975,36	27588,76	0,20	0,69	0,89	1,25
	3,65	924,60	4466,11	29505,34	37042,20	0,15	0,59	0,79	1,16
	4,15	1195,27	4466,11	38142,67	47885,86	0,12	0,51	0,71	1,10
-1	0,75	33,14	1158,71	1057,44	1327,56	1,10	1,16	1,16	1,10
	1,25	92,05	2011,56	2937,34	3687,66	0,68	1,04	1,09	1,12
	1,75	180,41	2804,38	5757,19	7227,81	0,49	0,98	1,10	1,29
	2,25	298,23	3119,96	9516,99	11948,02	0,33	0,82	0,97	1,28
	2,75	445,51	3116,63	14216,74	17848,28	0,22	0,66	0,82	1,18
	3,25	622,24	3116,63	19856,44	24928,59	0,16	0,55	0,71	1,11
	3,75	828,42	3116,63	26436,09	33188,95	0,12	0,47	0,63	1,05
	4,25	1064,06	3116,63	33955,69	42629,36	0,09	0,41	0,57	1,00

Tabela A.8 – Resultados numéricos e estimativas – H_m4

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-D}}}$
1	0,25	3,60	68,75	43,68	72,38	1,57	1,11	1,11	1,11
	0,75	32,40	437,88	393,08	651,43	1,11	1,18	1,16	1,20
	1,25	90,01	622,88	1091,88	1809,52	0,57	0,87	1,15	1,08
	1,75	176,42	699,78	2140,08	3546,65	0,33	0,65	1,20	1,08
	2,25	291,63	734,45	3537,68	5862,83	0,21	0,52	1,23	1,08
	2,75	435,64	740,92	5284,68	8758,06	0,14	0,42	1,23	1,05
	3,25	608,46	740,92	7381,08	12232,33	0,10	0,35	1,24	1,03
	3,75	810,07	740,92	9826,88	16285,64	0,08	0,30	1,24	1,02
0,5	0,35	8,14	161,20	98,69	163,56	1,63	1,24	1,24	1,24
	0,85	47,98	588,30	582,09	964,67	1,01	1,16	1,17	1,17
	1,35	121,04	756,68	1468,32	2433,37	0,52	0,83	1,18	1,10
	1,85	227,30	841,98	2757,37	4569,67	0,31	0,64	1,24	1,11
	2,35	366,77	880,99	4449,26	7373,56	0,20	0,51	1,28	1,11
	2,85	539,45	882,09	6543,97	10845,04	0,13	0,42	1,27	1,08
	3,35	745,33	882,09	9041,52	14984,11	0,10	0,35	1,28	1,06
	3,85	984,42	882,09	11941,90	19790,77	0,07	0,30	1,28	1,05
0	0,50	18,58	359,19	225,36	373,48	1,59	1,36	1,36	1,36
	1,00	74,31	745,13	901,44	1493,92	0,83	1,06	1,17	1,14
	1,50	167,20	875,22	2028,24	3361,31	0,43	0,76	1,19	1,09
	2,00	297,24	958,25	3605,76	5975,67	0,27	0,60	1,25	1,11
	2,50	464,44	985,57	5634,00	9336,98	0,17	0,48	1,27	1,10
	3,00	668,79	985,58	8112,96	13445,25	0,12	0,39	1,27	1,07
	3,50	910,29	985,58	11042,64	18300,48	0,09	0,33	1,28	1,06
	4,00	1188,96	985,58	14423,04	23902,66	0,07	0,29	1,28	1,04
-0,5	0,65	33,29	565,89	403,79	669,18	1,40	1,37	1,37	1,37
	1,15	104,19	1061,35	1263,93	2094,65	0,84	1,19	1,47	1,40
	1,65	214,49	1120,45	2601,92	4312,05	0,43	0,82	1,41	1,28
	2,15	364,18	1120,45	4417,77	7321,37	0,25	0,61	1,38	1,21
	2,65	553,26	1120,45	6711,47	11122,63	0,17	0,48	1,36	1,17
	3,15	781,73	1120,45	9483,03	15715,81	0,12	0,40	1,37	1,14
	3,65	1049,59	1120,45	12732,45	21100,92	0,09	0,34	1,37	1,13
	4,15	1356,85	1120,45	16459,72	27277,95	0,07	0,30	1,38	1,11
-1	0,75	37,63	549,87	456,50	756,54	1,20	1,28	1,25	1,29
	1,25	104,53	752,60	1268,06	2101,50	0,59	0,90	1,19	1,12
	1,75	204,88	851,20	2485,40	4118,95	0,34	0,69	1,25	1,13
	2,25	338,68	904,98	4108,52	6808,87	0,22	0,55	1,30	1,14
	2,75	505,94	913,63	6137,42	10171,28	0,15	0,44	1,31	1,12
	3,25	706,64	913,63	8572,10	14206,16	0,11	0,37	1,31	1,10
	3,75	940,79	913,63	11412,56	18913,53	0,08	0,32	1,32	1,08
	4,25	1208,39	913,63	14658,80	24293,38	0,06	0,28	1,32	1,07

Tabela A.9 – Resultados numéricos e estimativas – H_M5

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-D}}}$
1	0,75	29,54	1292,02	1292,63	1608,77	1,00	1,06	1,06	1,10
	1,25	82,04	2257,30	3590,63	4468,81	0,63	0,95	1,00	1,04
	1,75	160,80	3287,40	7037,63	8758,87	0,47	0,93	1,05	1,10
	2,25	265,82	4303,75	11633,63	14478,96	0,37	0,92	1,10	1,16
	2,75	397,09	5285,95	17378,63	21629,06	0,30	0,91	1,14	1,21
	3,25	554,61	<u>6016,48</u>	24272,63	30209,18	0,25	0,86	1,12	1,21
	3,75	738,39	<u>6439,56</u>	32315,63	40219,32	0,20	0,79	1,07	1,16
	4,25	948,42	<u>6606,71</u>	41507,63	51659,49	0,16	0,71	0,99	1,08
0,5	0,85	49,65	2165,37	2173,14	2704,64	1,00	1,14	1,14	1,12
	1,35	125,25	3584,07	5481,72	6822,42	0,65	1,05	1,13	1,14
	1,85	235,22	5055,65	10294,20	12811,93	0,49	1,03	1,17	1,25
	2,35	379,54	6431,85	16610,58	20673,16	0,39	1,00	1,21	1,34
	2,85	558,23	<u>7544,75</u>	24430,86	30406,11	0,31	0,95	1,20	1,37
	3,35	771,28	<u>8316,76</u>	33755,04	42010,78	0,25	0,88	1,16	1,36
	3,85	1018,69	<u>8585,41</u>	44583,12	55487,17	0,19	0,79	1,07	1,29
	4,35	1300,47	<u>8657,46</u>	56915,10	70835,29	0,15	0,70	0,97	1,20
0	1,00	74,31	2831,00	3252,00	4047,37	0,87	1,12	1,13	1,08
	1,50	167,19	4439,66	7317,00	9106,58	0,61	1,07	1,16	1,21
	2,00	297,22	6019,77	13008,00	16189,47	0,46	1,04	1,21	1,36
	2,50	464,41	<u>7426,43</u>	20325,00	25296,05	0,37	1,00	1,22	1,46
	3,00	668,75	<u>7998,62</u>	29268,00	36426,32	0,27	0,88	1,13	1,42
	3,50	910,25	<u>8186,83</u>	39837,00	49580,26	0,21	0,77	1,02	1,34
	4,00	1188,89	<u>8239,52</u>	52032,00	64757,89	0,16	0,67	0,92	1,25
	4,50	1504,69	<u>8239,52</u>	65853,00	81959,21	0,13	0,59	0,83	1,18
-0,5	1,15	106,43	3509,10	4657,85	5797,05	0,75	1,07	1,11	1,09
	1,65	219,09	5236,55	9588,65	11933,82	0,55	1,04	1,16	1,27
	2,15	372,00	6869,52	16280,45	20262,29	0,42	1,01	1,19	1,45
	2,65	565,14	<u>8276,20</u>	24733,25	30782,46	0,33	0,97	1,20	1,57
	3,15	798,52	<u>8641,61</u>	34947,05	43494,33	0,25	0,84	1,08	1,52
	3,65	1072,13	<u>8670,89</u>	46921,85	58397,91	0,18	0,72	0,96	1,42
	4,15	1385,98	<u>8670,89</u>	60657,65	75493,18	0,14	0,63	0,86	1,34
	4,65	1740,08	<u>8670,89</u>	76154,45	94780,16	0,11	0,56	0,79	1,28
-1	1,25	103,72	3171,05	4539,38	5649,61	0,70	1,06	1,11	1,14
	1,75	203,29	4509,02	8897,18	11073,23	0,51	1,01	1,14	1,34
	2,25	336,06	5836,14	14707,58	18304,73	0,40	0,99	1,18	1,55
	2,75	502,01	5953,28	21970,58	27344,10	0,27	0,81	1,01	1,46
	3,25	701,16	5953,46	30686,18	38191,35	0,19	0,68	0,88	1,37
	3,75	933,49	5953,46	40854,38	50846,47	0,15	0,58	0,78	1,29
	4,25	1199,02	5953,46	52475,18	65309,46	0,11	0,51	0,71	1,23
	4,75	1497,74	5953,46	65548,57	81580,33	0,09	0,45	0,65	1,18

Tabela A.10 – Resultados numéricos e estimativas – H_m5

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-D}}}$
1	0,75	34,39	642,52	606,88	1003,45	1,06	1,12	1,10	1,14
	1,25	95,53	944,15	1685,78	2787,36	0,56	0,85	1,13	1,06
	1,75	187,24	1104,39	3304,13	5463,24	0,33	0,67	1,22	1,10
	2,25	309,52	1163,29	5461,93	9031,06	0,21	0,53	1,26	1,10
	2,75	462,37	1197,81	8159,18	13490,85	0,15	0,44	1,29	1,10
	3,25	645,80	1197,81	11395,88	18842,59	0,11	0,37	1,29	1,08
	3,75	859,79	1197,81	15172,03	25086,28	0,08	0,31	1,30	1,06
	4,25	1104,35	1197,81	19487,63	32221,94	0,06	0,28	1,30	1,05
0,5	0,85	57,77	1145,32	1019,45	1685,61	1,12	1,29	1,30	1,30
	1,35	145,73	1371,56	2571,55	4251,94	0,53	0,86	1,22	1,14
	1,85	273,66	1509,81	4829,15	7984,78	0,31	0,66	1,27	1,14
	2,35	441,58	1582,10	7792,25	12884,14	0,20	0,53	1,31	1,14
	2,85	649,48	1603,15	11460,85	18950,00	0,14	0,43	1,32	1,12
	3,35	897,35	1603,15	15834,95	26182,39	0,10	0,36	1,32	1,10
	3,85	1185,21	1603,15	20914,55	34581,28	0,08	0,31	1,33	1,09
	4,35	1513,05	1603,15	26699,65	44146,69	0,06	0,28	1,34	1,08
0	1,00	85,33	1228,30	1505,80	2489,77	0,82	1,05	1,16	1,13
	1,50	192,00	1448,70	3388,05	5601,99	0,43	0,75	1,18	1,08
	2,00	341,33	1577,13	6023,20	9959,10	0,26	0,59	1,23	1,10
	2,50	533,33	1641,54	9411,25	15561,09	0,17	0,48	1,27	1,10
	3,00	767,99	1649,02	13552,20	22407,96	0,12	0,39	1,27	1,08
	3,50	1045,32	1649,02	18446,05	30499,73	0,09	0,33	1,28	1,06
	4,00	1365,32	1649,02	24092,80	39836,38	0,07	0,29	1,28	1,04
	4,50	1727,98	1649,02	30492,45	50417,92	0,05	0,26	1,29	1,03
-0,5	1,15	121,57	1384,95	2145,23	3547,04	0,65	0,92	1,13	1,08
	1,65	250,26	1595,46	4416,17	7301,94	0,36	0,69	1,19	1,08
	2,15	424,91	1708,30	7498,16	12397,87	0,23	0,55	1,24	1,09
	2,65	645,53	1754,64	11391,20	18834,84	0,15	0,45	1,26	1,08
	3,15	912,11	1755,60	16095,29	26612,85	0,11	0,37	1,26	1,06
	3,65	1224,65	1755,60	21610,43	35731,89	0,08	0,32	1,26	1,04
	4,15	1583,15	1755,60	27936,62	46191,96	0,06	0,28	1,27	1,03
	4,65	1987,61	1755,60	35073,86	57993,07	0,05	0,24	1,28	1,02
-1	1,25	119,16	1232,23	2102,66	3476,65	0,59	0,89	1,18	1,11
	1,75	233,55	1391,09	4121,21	6814,23	0,34	0,68	1,24	1,11
	2,25	386,06	1497,24	6812,61	11264,34	0,22	0,55	1,30	1,14
	2,75	576,71	1532,01	10176,86	16826,98	0,15	0,45	1,32	1,13
	3,25	805,49	1532,01	14213,96	23502,15	0,11	0,38	1,33	1,11
	3,75	1072,40	1532,01	18923,91	31289,84	0,08	0,32	1,33	1,09
	4,25	1377,44	1532,01	24306,71	40190,06	0,06	0,28	1,34	1,08
	4,75	1720,61	1532,01	30362,36	50202,81	0,05	0,25	1,34	1,07

Tabela A.11 – Resultados numéricos e estimativas – H_{M6}

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-D}}}$
1	0,80	25,78	922,85	985,79	1224,74	0,94	1,03	1,03	1,06
	1,30	68,09	1530,79	2603,11	3234,09	0,59	0,92	0,97	1,01
	1,80	130,53	2167,02	4990,57	6200,26	0,43	0,89	1,01	1,05
	2,30	213,12	2896,35	8148,19	10123,26	0,36	0,90	1,08	1,14
	2,80	315,86	<u>3506,74</u>	12075,95	15003,09	0,29	0,88	1,11	1,18
	3,30	438,73	<u>3973,69</u>	16773,87	20839,76	0,24	0,84	1,09	1,17
	3,80	581,76	<u>4234,07</u>	22241,93	27633,25	0,19	0,77	1,04	1,12
	4,30	744,92	<u>4326,14</u>	28480,15	35383,57	0,15	0,69	0,96	1,04
0,5	0,90	36,16	1286,27	1382,67	1717,82	0,93	1,11	1,11	1,09
	1,40	87,51	2073,84	3345,72	4156,70	0,62	1,03	1,11	1,12
	1,90	161,18	2780,43	6162,27	7655,97	0,45	0,97	1,11	1,18
	2,40	257,17	3311,29	9832,32	12215,62	0,34	0,89	1,08	1,19
	2,90	375,49	<u>3765,66</u>	14355,87	17835,65	0,26	0,82	1,04	1,19
	3,40	516,13	<u>4039,88</u>	19732,92	24516,07	0,20	0,74	0,98	1,15
	3,90	679,10	<u>4181,44</u>	25963,47	32256,87	0,16	0,67	0,90	1,09
	4,40	864,39	<u>4228,57</u>	33047,52	41058,05	0,13	0,59	0,83	1,02
0	1,05	57,04	1780,89	2180,86	2709,48	0,82	1,08	1,11	1,07
	1,55	124,30	2703,51	4752,39	5904,34	0,57	1,03	1,13	1,18
	2,05	217,43	3636,62	8312,97	10327,98	0,44	1,00	1,17	1,33
	2,55	336,43	4128,30	12862,60	15980,41	0,32	0,90	1,10	1,32
	3,05	481,30	<u>4354,94</u>	18401,28	22861,64	0,24	0,78	1,00	1,26
	3,55	652,04	<u>4433,86</u>	24929,01	30971,65	0,18	0,67	0,89	1,18
	4,05	848,65	<u>4443,48</u>	32445,79	40310,46	0,14	0,59	0,80	1,10
	4,55	1071,12	<u>4443,48</u>	40951,62	50878,05	0,11	0,52	0,73	1,04
-0,5	1,20	79,62	2138,08	3043,87	3781,69	0,70	1,03	1,08	1,07
	1,70	159,78	3084,74	6108,88	7589,64	0,50	0,99	1,10	1,23
	2,20	267,59	4037,46	10230,79	12710,68	0,39	0,96	1,14	1,40
	2,70	403,05	<u>4741,51</u>	15409,60	19144,80	0,31	0,90	1,12	1,49
	3,20	566,15	<u>4873,96</u>	21645,31	26892,01	0,23	0,77	1,00	1,41
	3,70	756,90	<u>4873,96</u>	28937,92	35952,31	0,17	0,66	0,89	1,32
	4,20	975,28	<u>4873,96</u>	37287,43	46325,69	0,13	0,58	0,80	1,25
	4,70	1221,32	<u>4873,96</u>	46693,84	58012,16	0,10	0,51	0,73	1,19
-1	1,30	81,65	2035,63	3121,77	3878,47	0,65	1,02	1,08	1,12
	1,80	156,54	2809,58	5984,93	7435,64	0,47	0,96	1,09	1,30
	2,30	255,59	3393,31	9771,69	12140,29	0,35	0,88	1,06	1,41
	2,80	378,79	3562,55	14482,05	17992,41	0,25	0,75	0,94	1,36
	3,30	526,15	3562,55	20116,01	24992,01	0,18	0,63	0,82	1,28
	3,80	697,67	3562,55	26673,57	33139,09	0,13	0,54	0,73	1,21
	4,30	893,35	3562,55	34154,73	42433,64	0,10	0,47	0,66	1,16
	4,80	1113,18	3562,55	42559,49	52875,66	0,08	0,42	0,60	1,11

Tabela A.12 – Resultados numéricos e estimativas – H_m6

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist}}}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist-D}}}$
1	0,80	29,62	431,65	437,68	729,35	0,99	1,09	1,08	1,09
	1,30	78,22	624,37	1155,76	1925,93	0,54	0,85	1,16	1,08
	1,80	149,96	712,17	2215,77	3692,32	0,32	0,66	1,24	1,11
	2,30	244,84	750,61	3617,73	6028,51	0,21	0,53	1,28	1,12
	2,80	362,87	765,15	5361,62	8934,50	0,14	0,43	1,30	1,11
	3,30	504,04	766,45	7447,45	12410,29	0,10	0,36	1,31	1,09
	3,80	668,35	766,45	9875,23	16455,88	0,08	0,31	1,31	1,07
	4,30	855,80	766,45	12644,94	21071,28	0,06	0,27	1,32	1,06
0,5	0,90	42,18	587,71	623,22	1038,52	0,94	1,12	1,17	1,15
	1,40	102,06	736,66	1508,04	2512,97	0,49	0,81	1,19	1,10
	1,90	187,98	826,00	2777,57	4628,49	0,30	0,64	1,27	1,13
	2,40	299,94	882,57	4431,80	7385,07	0,20	0,53	1,34	1,16
	2,90	437,93	901,54	6470,74	10782,71	0,14	0,44	1,36	1,16
	3,40	601,96	901,54	8894,38	14821,42	0,10	0,37	1,37	1,13
	3,90	792,03	901,54	11702,73	19501,19	0,08	0,32	1,37	1,12
	4,40	1008,13	901,54	14895,78	24822,03	0,06	0,28	1,38	1,11
0	1,05	65,43	721,52	966,78	1611,03	0,75	0,99	1,14	1,10
	1,55	142,58	993,25	2106,75	3510,65	0,47	0,85	1,38	1,26
	2,05	249,41	1180,85	3685,17	6140,90	0,32	0,74	1,58	1,40
	2,55	385,91	1306,32	5702,04	9501,77	0,23	0,64	1,74	1,49
	3,05	552,08	1391,79	8157,36	13593,27	0,17	0,56	1,85	1,56
	3,55	747,93	1431,54	11051,13	18415,39	0,13	0,49	1,91	1,57
	4,05	973,45	1438,12	14383,35	23968,13	0,10	0,43	1,92	1,56
	4,55	1228,65	1438,12	18154,02	30251,50	0,08	0,38	1,93	1,55
-0,5	1,20	91,59	922,18	1353,28	2255,08	0,68	1,00	1,28	1,21
	1,70	183,81	1106,09	2715,96	4525,83	0,41	0,80	1,41	1,28
	2,20	307,84	1272,45	4548,54	7579,59	0,28	0,68	1,59	1,39
	2,70	463,67	1388,28	6851,00	11416,36	0,20	0,60	1,72	1,47
	3,20	651,30	1459,54	9623,35	16036,15	0,15	0,52	1,81	1,51
	3,70	870,73	1488,59	12865,59	21438,96	0,12	0,46	1,85	1,52
	4,20	1121,97	1489,40	16577,72	27624,78	0,09	0,40	1,86	1,50
	4,70	1405,00	1489,40	20759,74	34593,62	0,07	0,35	1,87	1,49
-1	1,30	93,96	770,15	1388,25	2313,35	0,55	0,87	1,19	1,11
	1,80	180,13	871,43	2661,50	4435,07	0,33	0,67	1,26	1,14
	2,30	294,10	938,25	4345,47	7241,21	0,22	0,55	1,34	1,16
	2,80	435,87	962,36	6440,17	10731,77	0,15	0,45	1,36	1,16
	3,30	605,43	962,39	8945,59	14906,75	0,11	0,38	1,37	1,14
	3,80	802,79	962,39	11861,74	19766,16	0,08	0,33	1,37	1,12
	4,30	1027,95	962,39	15188,61	25310,00	0,06	0,29	1,38	1,11
	4,80	1280,91	962,39	18926,21	31538,26	0,05	0,26	1,38	1,10

Tabela A.13 – Resultados numéricos e estimativas – H_M7

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist}}}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist-D}}}$
1	0,65	13,60	666,30	613,72	755,55	1,09	1,08	1,08	1,08
	1,15	42,56	1252,12	1921,06	2364,99	0,65	0,93	0,96	0,99
	1,65	87,62	1836,63	3954,70	4868,58	0,46	0,88	0,98	1,02
	2,15	148,77	2441,35	6714,64	8266,30	0,36	0,87	1,03	1,08
	2,65	226,02	<u>3180,61</u>	10200,88	12558,16	0,31	0,90	1,12	1,19
	3,15	319,35	<u>3708,82</u>	14413,42	17744,15	0,26	0,87	1,12	1,21
	3,65	428,78	<u>4078,61</u>	19352,26	23824,28	0,21	0,82	1,09	1,18
	4,15	554,30	<u>4260,56</u>	25017,40	30798,55	0,17	0,75	1,03	1,12
0,5	0,75	19,99	991,75	902,31	1110,82	1,10	1,17	1,16	1,16
	1,25	55,53	1728,07	2506,41	3085,60	0,69	1,05	1,10	1,10
	1,75	108,85	2453,39	4912,56	6047,78	0,50	1,00	1,13	1,18
	2,25	179,93	3083,34	8120,76	9997,34	0,38	0,95	1,13	1,24
	2,75	268,78	3611,49	12131,01	14934,30	0,30	0,89	1,11	1,26
	3,25	375,41	<u>3944,54</u>	16943,31	20858,65	0,23	0,81	1,06	1,24
	3,75	499,80	<u>4241,28</u>	22557,66	27770,40	0,19	0,75	1,01	1,21
	4,25	641,97	<u>4348,26</u>	28974,06	35669,53	0,15	0,67	0,93	1,15
0	0,90	33,74	1432,01	1522,88	1874,80	0,94	1,12	1,12	1,06
	1,40	81,65	2298,06	3685,00	4536,54	0,62	1,04	1,11	1,14
	1,90	150,38	3196,48	6787,16	8355,57	0,47	1,01	1,16	1,29
	2,40	239,94	4061,36	10829,38	13331,88	0,38	0,99	1,20	1,42
	2,90	350,33	<u>4429,14</u>	15811,64	19465,48	0,28	0,88	1,11	1,39
	3,40	481,55	<u>4653,93</u>	21733,96	26756,35	0,21	0,78	1,02	1,34
	3,90	633,60	<u>4718,76</u>	28596,32	35204,51	0,17	0,68	0,93	1,26
	4,40	806,47	<u>4729,40</u>	36398,74	44809,94	0,13	0,60	0,84	1,18
-0,5	1,05	48,73	1749,21	2199,16	2707,35	0,80	1,06	1,08	1,03
	1,55	106,18	2635,38	4792,27	5899,69	0,55	0,99	1,09	1,17
	2,05	185,73	3566,76	8382,73	10319,85	0,43	0,98	1,14	1,36
	2,55	287,38	<u>4509,37</u>	12970,54	15967,84	0,35	0,97	1,19	1,54
	3,05	411,13	<u>5126,42</u>	18555,70	22843,64	0,28	0,91	1,16	1,61
	3,55	556,98	<u>5138,15</u>	25138,21	30947,27	0,20	0,77	1,03	1,51
	4,05	724,92	<u>5138,15</u>	32718,07	40278,73	0,16	0,67	0,92	1,42
	4,55	914,96	<u>5138,15</u>	41295,28	50838,00	0,12	0,59	0,84	1,35
-1	1,15	53,37	1709,35	2408,54	2965,11	0,71	1,01	1,05	1,04
	1,65	109,86	2542,37	4958,22	6103,99	0,51	0,98	1,08	1,25
	2,15	186,53	3369,97	8418,50	10363,89	0,40	0,96	1,13	1,46
	2,65	283,37	3874,17	12789,38	15744,81	0,30	0,88	1,08	1,54
	3,15	400,39	4021,43	18070,86	22246,76	0,22	0,75	0,97	1,49
	3,65	537,58	4021,43	24262,94	29869,74	0,17	0,64	0,86	1,41
	4,15	694,96	4021,43	31365,62	38613,75	0,13	0,56	0,78	1,34
	4,65	872,50	4021,43	39378,90	48478,78	0,10	0,50	0,71	1,29

Tabela A.14 – Resultados numéricos e estimativas – H_m7

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist}}}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist-D}}}$
1	0,65	15,64	339,35	276,33	462,64	1,23	1,20	1,20	1,20
	1,15	48,95	543,05	864,97	1448,14	0,63	0,89	1,10	1,05
	1,65	100,77	677,53	1780,62	2981,14	0,38	0,72	1,25	1,13
	2,15	171,10	727,51	3023,30	5061,65	0,24	0,58	1,30	1,15
	2,65	259,93	754,15	4593,00	7689,65	0,16	0,47	1,34	1,15
	3,15	367,27	767,46	6489,71	10865,16	0,12	0,40	1,37	1,15
	3,65	493,12	768,21	8713,45	14588,17	0,09	0,34	1,37	1,13
	4,15	637,47	768,21	11264,20	18858,68	0,07	0,30	1,38	1,12
0,5	0,75	23,51	467,56	415,40	695,46	1,13	1,19	1,17	1,21
	1,25	65,30	701,96	1153,88	1931,83	0,61	0,92	1,22	1,15
	1,75	127,99	938,94	2261,60	3786,39	0,42	0,83	1,52	1,37
	2,25	211,57	1054,12	3738,56	6259,14	0,28	0,70	1,67	1,46
	2,75	316,06	1112,14	5584,76	9350,07	0,20	0,60	1,75	1,49
	3,25	441,43	1131,42	7800,20	13059,19	0,15	0,51	1,78	1,49
	3,75	587,71	1132,33	10384,88	17386,49	0,11	0,43	1,79	1,47
	4,25	754,88	1132,33	13338,80	22331,99	0,08	0,38	1,80	1,45
0	0,90	39,15	674,71	691,84	1158,28	0,98	1,16	1,21	1,19
	1,40	94,74	815,15	1674,08	2802,76	0,49	0,81	1,19	1,10
	1,90	174,50	918,52	3083,37	5162,22	0,30	0,64	1,27	1,14
	2,40	278,42	991,45	4919,73	8236,68	0,20	0,53	1,35	1,18
	2,90	406,51	1026,27	7183,15	12026,12	0,14	0,45	1,40	1,18
	3,40	558,77	1027,22	9873,63	16530,56	0,10	0,38	1,40	1,16
	3,90	735,20	1027,22	12991,17	21749,98	0,08	0,33	1,41	1,15
	4,40	935,80	1027,22	16535,76	27684,39	0,06	0,29	1,42	1,14
-0,5	1,05	56,70	760,09	1001,99	1677,54	0,76	1,01	1,16	1,11
	1,55	123,57	893,54	2183,46	3655,58	0,41	0,74	1,20	1,10
	2,05	216,15	990,30	3819,36	6394,42	0,26	0,60	1,28	1,13
	2,55	334,44	1052,90	5909,67	9894,04	0,18	0,50	1,35	1,16
	3,05	478,46	1070,44	8454,39	14154,45	0,13	0,42	1,37	1,15
	3,55	648,19	1070,44	11453,53	19175,65	0,09	0,35	1,37	1,14
	4,05	843,63	1070,44	14907,08	24957,64	0,07	0,31	1,38	1,12
	4,55	1064,79	1070,44	18815,05	31500,41	0,06	0,27	1,39	1,11
-1	1,15	62,18	739,61	1098,72	1839,49	0,67	0,96	1,18	1,12
	1,65	128,00	848,85	2261,83	3786,78	0,38	0,71	1,23	1,12
	2,15	217,33	939,98	3840,33	6429,53	0,24	0,59	1,33	1,17
	2,65	330,17	994,56	5834,22	9767,73	0,17	0,49	1,39	1,19
	3,15	466,52	1007,99	8243,51	13801,40	0,12	0,41	1,41	1,18
	3,65	626,38	1007,99	11068,20	18530,53	0,09	0,35	1,42	1,17
	4,15	809,74	1007,99	14308,28	23955,11	0,07	0,31	1,42	1,15
	4,65	1016,62	1007,99	17963,76	30075,16	0,06	0,27	1,43	1,14

Tabela A.15 – Resultados numéricos e estimativas – H_{M8}

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist}}}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist-D}}}$
1	0,60	15,41	1218,80	1116,50	1360,42	1,09	1,07	1,07	1,07
	1,10	51,79	2578,27	3752,69	4572,52	0,69	0,94	0,97	1,00
	1,60	109,58	4129,01	7939,58	9674,09	0,52	0,96	1,07	1,11
	2,10	188,76	5729,26	13677,17	16665,12	0,42	0,98	1,15	1,21
	2,60	289,35	7263,90	20965,46	25545,63	0,35	0,98	1,21	1,29
	3,10	411,34	<u>8662,23</u>	29804,45	36315,61	0,29	0,97	1,25	1,34
	3,60	554,73	<u>9909,79</u>	40194,14	48975,06	0,25	0,95	1,26	1,36
	4,10	719,52	<u>10951,80</u>	52134,53	63523,97	0,21	0,91	1,25	1,36
0,5	0,70	25,48	2117,85	1846,52	2249,91	1,15	1,17	1,17	1,19
	1,20	74,89	3979,28	5426,50	6611,98	0,73	1,08	1,13	1,12
	1,70	150,30	6133,36	10890,68	13269,88	0,56	1,10	1,23	1,29
	2,20	251,72	8187,75	18239,06	22223,61	0,45	1,10	1,30	1,42
	2,70	379,14	<u>10051,20</u>	27471,64	33473,16	0,37	1,08	1,34	1,52
	3,20	532,57	<u>11701,30</u>	38588,42	47018,54	0,30	1,04	1,35	1,58
	3,70	711,99	<u>13108,30</u>	51589,40	62859,74	0,25	1,00	1,34	1,61
	4,20	917,43	<u>13883,40</u>	66474,58	80996,78	0,21	0,93	1,28	1,57
0	0,85	45,83	3416,62	3320,75	4046,21	1,03	1,18	1,18	1,12
	1,35	115,61	5757,79	8376,57	10206,54	0,69	1,11	1,18	1,20
	1,85	217,10	8376,67	15730,49	19167,02	0,53	1,12	1,27	1,40
	2,35	350,31	<u>10726,10</u>	25382,51	30927,64	0,42	1,10	1,32	1,55
	2,85	515,23	<u>12754,40</u>	37332,63	45488,42	0,34	1,06	1,33	1,65
	3,35	711,88	<u>14459,10</u>	51580,85	62849,34	0,28	1,01	1,32	1,71
	3,85	940,23	<u>15536,10</u>	68127,17	83010,41	0,23	0,93	1,26	1,71
	4,35	1200,31	<u>15686,10</u>	86971,59	105971,63	0,18	0,83	1,15	1,61
-0,5	1,00	63,83	3963,86	4625,10	5635,51	0,86	1,10	1,12	1,05
	1,50	143,62	6422,19	10406,48	12679,90	0,62	1,08	1,18	1,26
	2,00	255,33	8964,53	18500,40	22542,04	0,48	1,09	1,26	1,49
	2,50	398,95	<u>11232,20</u>	28906,88	35221,94	0,39	1,07	1,30	1,67
	3,00	574,49	<u>13196,50</u>	41625,90	50719,60	0,32	1,03	1,31	1,80
	3,50	781,94	<u>14839,60</u>	56657,48	69035,01	0,26	0,98	1,30	1,89
	4,00	1021,31	<u>15322,70</u>	74001,60	90168,17	0,21	0,88	1,20	1,84
	4,50	1292,59	<u>15322,70</u>	93658,28	114119,10	0,16	0,77	1,09	1,74
-1	1,10	78,76	4370,96	5706,48	6953,13	0,77	1,05	1,08	1,06
	1,60	166,62	7120,31	12073,22	14710,76	0,59	1,09	1,21	1,37
	2,10	287,04	9720,37	20798,00	25341,58	0,47	1,10	1,29	1,64
	2,60	439,99	<u>11952,30</u>	31880,84	38845,60	0,37	1,06	1,31	1,85
	3,10	625,49	<u>13197,30</u>	45321,72	55222,82	0,29	0,97	1,25	1,90
	3,60	843,54	<u>13554,90</u>	61120,66	74473,23	0,22	0,85	1,13	1,84
	4,10	1094,12	<u>13556,80</u>	79277,64	96596,83	0,17	0,74	1,02	1,76
	4,60	1377,26	<u>13556,80</u>	99792,68	121593,63	0,14	0,66	0,93	1,68

Tabela A.16 – Resultados numéricos e estimativas – H_m8

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist}}}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist-D}}}$
1	0,60	19,37	809,55	645,05	1061,16	1,26	1,17	1,17	1,17
	1,10	65,11	1346,79	2168,08	3566,66	0,62	0,85	1,02	0,97
	1,60	137,76	1781,35	4587,01	7545,99	0,39	0,72	1,20	1,10
	2,10	237,31	2143,45	7901,84	12999,15	0,27	0,64	1,41	1,24
	2,60	363,77	2410,30	12112,57	19926,13	0,20	0,57	1,57	1,35
	3,10	517,13	2597,92	17219,20	28326,94	0,15	0,50	1,69	1,42
	3,60	697,40	2715,29	23221,73	38201,58	0,12	0,45	1,77	1,46
	4,10	904,58	2789,96	30120,16	49550,04	0,09	0,40	1,83	1,48
0,5	0,70	31,19	1322,67	1038,56	1708,51	1,27	1,30	1,28	1,36
	1,20	91,66	1856,46	3052,08	5020,91	0,61	0,89	1,14	1,08
	1,70	183,96	2075,34	6125,36	10076,69	0,34	0,66	1,18	1,06
	2,20	308,08	2277,19	10258,38	16875,85	0,22	0,54	1,26	1,10
	2,70	464,03	2434,84	15451,16	25418,37	0,16	0,46	1,34	1,14
	3,20	651,81	2528,41	21703,68	35704,27	0,12	0,40	1,39	1,16
	3,70	871,42	2560,16	29015,96	47733,54	0,09	0,35	1,41	1,16
	4,20	1122,85	2560,18	37387,98	61506,19	0,07	0,30	1,42	1,15
0	0,85	53,54	1972,00	1782,91	2933,03	1,11	1,27	1,28	1,28
	1,35	135,07	2504,32	4497,38	7398,55	0,56	0,90	1,28	1,19
	1,85	253,64	2966,14	8445,70	13893,85	0,35	0,74	1,43	1,28
	2,35	409,28	3371,75	13627,87	22418,93	0,25	0,64	1,60	1,39
	2,85	601,96	3643,70	20043,89	32973,79	0,18	0,56	1,72	1,46
	3,35	831,71	3799,81	27693,76	45558,43	0,14	0,49	1,79	1,49
	3,85	1098,51	3883,48	36577,48	60172,85	0,11	0,43	1,84	1,51
	4,35	1402,36	3893,86	46695,05	76817,06	0,08	0,38	1,86	1,49
-0,5	1,00	73,60	2221,04	2450,80	4031,76	0,91	1,16	1,29	1,25
	1,50	165,61	2682,79	5514,30	9071,46	0,49	0,86	1,34	1,23
	2,00	294,41	3091,69	9803,20	16127,04	0,32	0,71	1,49	1,32
	2,50	460,02	3452,59	15317,50	25198,50	0,23	0,62	1,64	1,42
	3,00	662,43	3687,53	22057,20	36285,84	0,17	0,54	1,75	1,48
	3,50	901,64	3814,59	30022,30	49389,06	0,13	0,47	1,82	1,50
	4,00	1177,65	3856,59	39212,80	64508,16	0,10	0,42	1,84	1,50
	4,50	1490,46	3856,99	49628,70	81643,14	0,08	0,37	1,85	1,49
-1	1,10	91,18	2338,21	3036,01	4994,48	0,77	1,06	1,26	1,21
	1,60	192,91	2803,41	6423,30	10566,83	0,44	0,81	1,35	1,23
	2,10	332,31	3223,59	11065,13	18203,02	0,29	0,68	1,51	1,33
	2,60	509,39	3558,21	16961,52	27903,04	0,21	0,60	1,65	1,42
	3,10	724,15	3764,78	24112,45	39666,89	0,16	0,52	1,75	1,47
	3,60	976,59	3876,91	32517,94	53494,58	0,12	0,46	1,80	1,49
	4,10	1266,70	3896,58	42177,97	69386,10	0,09	0,40	1,82	1,48
	4,60	1594,49	3896,59	53092,56	87341,46	0,07	0,35	1,83	1,46

Tabela A.17 – Resultados numéricos e estimativas – H_M9

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-D}}}$
1	0,45	10,80	684,24	589,74	729,01	1,16	1,08	1,08	1,08
	0,95	48,13	2109,00	2628,35	3249,04	0,80	0,99	1,00	1,03
	1,45	112,13	3401,64	6123,11	7569,09	0,56	0,95	1,03	1,07
	1,95	202,80	4708,68	11074,02	13689,17	0,43	0,93	1,08	1,13
	2,45	320,14	5952,06	17481,08	21609,27	0,34	0,92	1,11	1,18
	2,95	464,14	<u>7037,26</u>	25344,29	31329,39	0,28	0,89	1,12	1,20
	3,45	634,81	<u>7920,54</u>	34663,65	42849,53	0,23	0,84	1,11	1,20
	3,95	832,14	<u>8494,42</u>	45439,16	56169,70	0,19	0,78	1,07	1,16
0,5	0,55	19,92	1344,95	1087,58	1344,41	1,24	1,19	1,19	1,19
	1,05	72,59	3257,59	3963,82	4899,88	0,82	1,09	1,12	1,10
	1,55	158,19	5004,19	8637,71	10677,52	0,58	1,05	1,15	1,18
	2,05	276,70	6688,18	15109,25	18677,32	0,44	1,02	1,19	1,28
	2,55	428,14	<u>8167,33</u>	23378,44	28899,30	0,35	0,97	1,20	1,34
	3,05	612,50	<u>9365,83</u>	33445,28	41343,44	0,28	0,92	1,18	1,36
	3,55	829,77	<u>10073,00</u>	45309,77	56009,75	0,22	0,84	1,12	1,33
	4,05	1079,97	<u>10253,70</u>	58971,91	72898,23	0,17	0,74	1,02	1,24
0	0,70	34,94	2207,69	1907,86	2358,41	1,16	1,18	1,18	1,17
	1,20	102,68	4189,04	5606,78	6930,84	0,75	1,10	1,15	1,13
	1,70	206,07	6084,64	11252,50	13909,80	0,54	1,06	1,18	1,27
	2,20	345,12	7858,12	18845,02	23295,31	0,42	1,02	1,21	1,40
	2,70	519,81	<u>9072,48</u>	28384,34	35087,36	0,32	0,94	1,17	1,43
	3,20	730,16	<u>9549,68</u>	39870,46	49285,95	0,24	0,82	1,07	1,37
	3,70	976,16	<u>9709,27</u>	53303,38	65891,07	0,18	0,72	0,96	1,29
	4,20	1257,82	<u>9740,37</u>	68683,10	84902,74	0,14	0,63	0,87	1,21
-0,5	0,85	54,20	3002,27	2959,65	3658,58	1,01	1,16	1,16	1,08
	1,35	136,72	4920,52	7465,69	9228,72	0,66	1,06	1,13	1,16
	1,85	256,75	6866,82	14019,93	17330,76	0,49	1,03	1,17	1,35
	2,35	414,29	8632,86	22622,37	27964,68	0,38	0,99	1,19	1,50
	2,85	609,34	<u>9469,23</u>	33273,01	41130,49	0,28	0,88	1,11	1,50
	3,35	841,90	<u>9569,51</u>	45971,85	56828,18	0,21	0,75	0,98	1,40
	3,85	1111,97	<u>9572,99</u>	60718,89	75057,76	0,16	0,64	0,87	1,32
	4,35	1419,54	<u>9572,99</u>	77514,13	95819,23	0,12	0,57	0,79	1,25
-1	0,95	50,07	2423,42	2733,85	3379,46	0,89	1,10	1,11	1,04
	1,45	116,64	3854,35	6368,89	7872,92	0,61	1,03	1,12	1,22
	1,95	210,94	4923,98	11518,53	14238,66	0,43	0,94	1,08	1,34
	2,45	332,99	5307,16	18182,77	22476,67	0,29	0,79	0,95	1,31
	2,95	482,77	5307,16	26361,61	32586,96	0,20	0,64	0,82	1,21
	3,45	660,29	5307,16	36055,05	44569,52	0,15	0,54	0,72	1,14
	3,95	865,55	5307,16	47263,09	58424,36	0,11	0,47	0,64	1,08
	4,45	1098,54	5307,16	59985,73	74151,47	0,09	0,41	0,58	1,04

Tabela A.18 – Resultados numéricos e estimativas – H_m9

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-D}}}$
1	0,45	13,15	347,64	237,35	406,97	1,46	1,18	1,18	1,18
	0,95	58,63	945,35	1057,82	1813,79	0,89	1,10	1,18	1,16
	1,45	136,58	1136,69	2464,34	4225,48	0,46	0,79	1,20	1,10
	1,95	247,01	1202,15	4456,91	7642,04	0,27	0,59	1,21	1,08
	2,45	389,93	1240,70	7035,53	12063,47	0,18	0,47	1,23	1,07
	2,95	565,32	1255,72	10200,20	17489,77	0,12	0,39	1,25	1,05
	3,45	773,20	1255,99	13950,92	23920,94	0,09	0,33	1,25	1,04
	3,95	1013,55	1255,99	18287,69	31356,99	0,07	0,29	1,26	1,02
0,5	0,55	23,74	650,52	428,34	734,45	1,52	1,34	1,34	1,34
	1,05	86,52	1167,85	1561,14	2676,81	0,75	0,99	1,14	1,10
	1,55	188,54	1358,66	3401,94	5833,14	0,40	0,72	1,17	1,07
	2,05	329,81	1473,76	5950,74	10203,44	0,25	0,57	1,22	1,08
	2,55	510,31	1521,25	9207,54	15787,71	0,17	0,46	1,25	1,08
	3,05	730,05	1524,33	13172,34	22585,95	0,12	0,38	1,25	1,05
	3,55	989,03	1524,33	17845,14	30598,17	0,09	0,32	1,26	1,04
	4,05	1287,25	1524,33	23225,94	39824,36	0,07	0,28	1,26	1,02
0	0,70	40,96	925,99	739,12	1267,33	1,25	1,28	1,26	1,34
	1,20	120,38	1493,85	2172,10	3724,38	0,69	1,01	1,29	1,22
	1,70	241,60	1779,71	4359,28	7474,63	0,41	0,80	1,42	1,28
	2,20	404,62	2033,20	7300,66	12518,07	0,28	0,68	1,58	1,38
	2,70	609,44	2193,59	10996,24	18854,70	0,20	0,59	1,69	1,45
	3,20	856,06	2283,22	15446,02	26484,51	0,15	0,51	1,76	1,48
	3,70	1144,48	2306,25	20650,00	35407,51	0,11	0,44	1,79	1,47
	4,20	1474,70	2306,30	26608,18	45623,71	0,09	0,38	1,80	1,45
-0,5	0,85	63,32	1174,19	1142,56	1959,09	1,03	1,18	1,19	1,19
	1,35	159,73	1470,24	2882,10	4941,80	0,51	0,82	1,17	1,09
	1,85	299,97	1611,48	5412,34	9280,27	0,30	0,63	1,21	1,08
	2,35	484,02	1691,72	8733,28	14974,52	0,19	0,50	1,25	1,09
	2,85	711,90	1706,91	12844,92	22024,54	0,13	0,41	1,26	1,07
	3,35	983,60	1706,91	17747,26	30430,34	0,10	0,34	1,26	1,05
	3,85	1299,13	1706,91	23440,30	40191,91	0,07	0,30	1,26	1,03
	4,35	1658,47	1706,91	29924,04	51309,26	0,06	0,26	1,27	1,02
-1	0,95	58,47	1010,20	1055,02	1808,99	0,96	1,18	1,27	1,24
	1,45	136,22	1334,94	2457,82	4214,31	0,54	0,93	1,41	1,30
	1,95	246,36	1628,37	4445,12	7621,83	0,37	0,81	1,65	1,46
	2,45	388,90	1773,90	7016,92	12031,57	0,25	0,68	1,77	1,53
	2,95	563,83	1812,79	10173,22	17443,52	0,18	0,57	1,80	1,53
	3,45	771,15	1825,19	13914,02	23857,68	0,13	0,48	1,82	1,51
	3,95	1010,87	1825,19	18239,32	31274,05	0,10	0,42	1,83	1,49
	4,45	1282,99	1825,19	23149,12	39692,64	0,08	0,37	1,84	1,47

Tabela A.19 – Resultados numéricos e estimativas – H_M10

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-D}}}$
1	0,35	3,92	229,06	192,20	236,05	1,19	1,07	1,07	1,07
	0,85	23,11	1001,60	1133,60	1392,20	0,88	1,01	1,01	1,05
	1,35	58,29	1682,75	2859,50	3511,81	0,59	0,95	1,01	1,05
	1,85	109,46	2392,62	5369,90	6594,88	0,45	0,94	1,07	1,12
	2,35	176,62	3089,47	8664,80	10641,41	0,36	0,92	1,11	1,18
	2,85	259,77	<u>3760,37</u>	12744,20	15651,39	0,30	0,91	1,15	1,22
	3,35	358,92	<u>4320,04</u>	17608,10	21624,84	0,25	0,88	1,15	1,24
	3,85	474,05	<u>4723,61</u>	23256,50	28561,75	0,20	0,83	1,12	1,22
0,5	0,45	7,08	433,40	347,47	426,73	1,25	1,16	1,16	1,16
	0,95	31,57	1368,13	1548,60	1901,86	0,88	1,09	1,10	1,08
	1,45	73,54	2180,02	3607,68	4430,66	0,60	1,03	1,12	1,14
	1,95	133,00	2878,81	6524,71	8013,12	0,44	0,97	1,12	1,20
	2,45	209,95	3547,03	10299,69	12649,24	0,34	0,93	1,13	1,25
	2,95	304,38	<u>4069,83</u>	14932,62	18339,03	0,27	0,87	1,10	1,27
	3,45	416,31	<u>4420,14</u>	20423,50	25082,48	0,22	0,80	1,05	1,24
	3,95	545,72	<u>4631,58</u>	26772,33	32879,60	0,17	0,72	0,99	1,20
0	0,60	15,34	909,42	752,76	924,48	1,21	1,18	1,18	1,18
	1,10	51,57	1983,93	2530,11	3107,28	0,78	1,08	1,11	1,07
	1,60	109,11	2966,16	5352,96	6574,07	0,55	1,03	1,13	1,20
	2,10	187,96	3983,42	9221,31	11324,86	0,43	1,01	1,19	1,35
	2,60	288,13	<u>4868,95</u>	14135,16	17359,65	0,34	0,98	1,21	1,46
	3,10	409,60	<u>5290,10</u>	20094,51	24678,44	0,26	0,88	1,13	1,44
	3,60	552,39	<u>5504,33</u>	27099,36	33281,23	0,20	0,78	1,04	1,38
	4,10	716,48	<u>5556,83</u>	35149,71	43168,02	0,16	0,68	0,94	1,30
-0,5	0,75	24,45	1317,89	1199,70	1473,37	1,10	1,17	1,16	1,10
	1,25	67,93	2244,78	3332,50	4092,71	0,67	1,02	1,07	1,08
	1,75	133,14	3231,56	6531,70	8021,70	0,49	0,99	1,11	1,26
	2,25	220,09	4208,49	10797,30	13260,37	0,39	0,97	1,16	1,43
	2,75	328,78	<u>5213,49</u>	16129,30	19808,70	0,32	0,97	1,21	1,61
	3,25	459,20	<u>5424,94</u>	22527,70	27666,69	0,24	0,84	1,09	1,55
	3,75	611,36	<u>5446,79</u>	29992,50	36834,35	0,18	0,72	0,97	1,46
	4,25	785,26	<u>5446,79</u>	38523,70	47311,68	0,14	0,63	0,88	1,38
-1	0,85	27,44	1317,89	1346,31	1653,42	0,98	1,12	1,12	1,05
	1,35	69,22	2121,30	3396,05	4170,75	0,62	1,01	1,07	1,13
	1,85	130,00	2926,32	6377,49	7832,31	0,46	0,96	1,10	1,32
	2,35	209,76	3637,38	10290,63	12638,11	0,35	0,92	1,10	1,48
	2,85	308,52	3927,64	15135,47	18588,15	0,26	0,80	1,01	1,48
	3,35	426,26	3927,64	20912,01	25682,43	0,19	0,67	0,88	1,39
	3,85	563,00	3927,64	27620,25	33920,94	0,14	0,58	0,79	1,32
	4,35	718,73	3927,64	35260,19	43303,70	0,11	0,51	0,71	1,26

Tabela A.20 – Resultados numéricos e estimativas – H_m10

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist}}}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist-D}}}$
1	0,35	4,59	128,94	81,84	138,89	1,58	1,18	1,18	1,18
	0,85	27,08	480,02	482,70	819,19	0,99	1,14	1,15	1,15
	1,35	68,31	620,25	1217,61	2066,40	0,51	0,82	1,17	1,09
	1,85	128,28	695,14	2286,57	3880,53	0,30	0,64	1,24	1,11
	2,35	207,00	740,61	3689,58	6261,57	0,20	0,52	1,29	1,13
	2,85	304,45	766,21	5426,64	9209,53	0,14	0,44	1,33	1,13
	3,35	420,65	775,79	7497,75	12724,40	0,10	0,37	1,35	1,13
	3,85	555,59	775,79	9902,91	16806,19	0,08	0,32	1,36	1,11
0,5	0,45	8,40	243,03	149,72	254,09	1,62	1,32	1,32	1,32
	0,95	37,44	617,80	667,26	1132,41	0,93	1,14	1,23	1,20
	1,45	87,21	807,81	1554,48	2638,11	0,52	0,89	1,35	1,24
	1,95	157,73	991,28	2811,38	4771,18	0,35	0,77	1,58	1,41
	2,45	248,98	1076,72	4437,95	7531,62	0,24	0,65	1,70	1,47
	2,95	360,98	1111,11	6434,19	10919,44	0,17	0,55	1,75	1,48
	3,45	493,71	1121,66	8800,11	14934,63	0,13	0,47	1,77	1,47
	3,95	647,19	1121,66	11535,71	19577,20	0,10	0,41	1,78	1,45
0	0,60	18,03	479,10	321,34	545,35	1,49	1,39	1,39	1,39
	1,10	60,60	767,28	1080,07	1832,98	0,71	0,98	1,16	1,11
	1,60	128,20	888,12	2285,11	3878,05	0,39	0,72	1,21	1,10
	2,10	220,85	983,84	3936,45	6680,54	0,25	0,59	1,29	1,14
	2,60	338,53	1038,78	6034,11	10240,46	0,17	0,49	1,36	1,16
	3,10	481,26	1051,48	8578,08	14557,82	0,12	0,41	1,37	1,15
	3,60	649,02	1051,48	11568,36	19632,60	0,09	0,35	1,38	1,13
	4,10	841,83	1051,48	15004,94	25464,82	0,07	0,30	1,38	1,12
-0,5	0,75	28,67	625,61	511,00	867,22	1,22	1,30	1,27	1,31
	1,25	79,64	819,61	1419,45	2408,95	0,58	0,88	1,16	1,09
	1,75	156,09	936,17	2782,13	4721,54	0,34	0,67	1,23	1,11
	2,25	258,02	1021,12	4599,03	7804,99	0,22	0,55	1,32	1,15
	2,75	385,44	1062,53	6870,15	11659,31	0,15	0,46	1,36	1,16
	3,25	538,34	1066,05	9595,50	16284,48	0,11	0,39	1,37	1,14
	3,75	716,72	1066,05	12775,08	21680,53	0,08	0,33	1,37	1,13
	4,25	920,59	1066,05	16408,88	27847,43	0,06	0,29	1,38	1,11
-1	0,85	32,12	633,52	572,59	971,74	1,11	1,27	1,28	1,28
	1,35	81,03	864,70	1444,35	2451,20	0,60	0,97	1,37	1,28
	1,85	152,17	1044,59	2712,37	4603,14	0,39	0,81	1,57	1,40
	2,35	245,54	1187,44	4376,64	7427,57	0,27	0,70	1,75	1,52
	2,85	361,15	1275,70	6437,16	10924,48	0,20	0,61	1,87	1,59
	3,35	498,98	1316,44	8893,94	15093,87	0,15	0,53	1,94	1,61
	3,85	659,04	1325,27	11746,98	19935,75	0,11	0,46	1,96	1,60
	4,35	841,34	1325,27	14996,27	25450,10	0,09	0,40	1,97	1,58

Tabela A.21 – Resultados numéricos e estimativas – H_M11

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist}}}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist-D}}}$
1	0,30	2,69	285,07	241,36	291,54	1,18	1,06	1,06	1,06
	0,80	19,14	1601,47	1716,35	2073,17	0,93	1,03	1,03	1,06
	1,30	50,55	2741,81	4532,24	5474,46	0,60	0,95	1,00	1,04
	1,80	96,91	4060,04	8689,03	10495,42	0,47	0,96	1,09	1,13
	2,30	158,23	5381,17	14186,72	17136,05	0,38	0,96	1,16	1,22
	2,80	234,50	<u>6651,00</u>	21025,31	25396,33	0,32	0,96	1,21	1,29
	3,30	325,73	<u>7824,72</u>	29204,80	35276,29	0,27	0,95	1,24	1,33
	3,80	431,91	<u>8891,99</u>	38725,19	46775,90	0,23	0,93	1,25	1,35
0,5	0,40	5,95	668,67	533,81	644,78	1,25	1,16	1,16	1,16
	0,90	30,14	2527,50	2702,40	3264,21	0,94	1,11	1,12	1,10
	1,40	72,93	4197,70	6539,15	7898,59	0,64	1,07	1,15	1,16
	1,90	134,33	5954,58	12044,04	14547,92	0,49	1,06	1,22	1,30
	2,40	214,33	<u>7622,83</u>	19217,09	23212,19	0,40	1,05	1,27	1,41
	2,90	312,94	<u>9153,50</u>	28058,28	33891,41	0,33	1,02	1,30	1,49
	3,40	430,15	<u>10540,90</u>	38567,63	46585,58	0,27	0,99	1,31	1,54
	3,90	565,97	<u>11760,30</u>	50745,12	61294,70	0,23	0,96	1,30	1,57
0	0,55	11,89	1300,77	1065,62	1287,15	1,22	1,18	1,18	1,18
	1,05	43,32	3222,15	3883,78	4691,19	0,83	1,10	1,13	1,08
	1,55	94,39	5077,55	8463,29	10222,75	0,60	1,08	1,19	1,25
	2,05	165,11	6911,07	14804,15	17881,83	0,47	1,07	1,25	1,42
	2,55	255,48	<u>8676,09</u>	22906,36	27668,44	0,38	1,06	1,30	1,56
	3,05	365,49	<u>10217,60</u>	32769,92	39582,56	0,31	1,02	1,31	1,66
	3,55	495,15	<u>11382,60</u>	44394,83	53624,22	0,26	0,97	1,29	1,70
	4,05	644,45	<u>11686,60</u>	57781,09	69793,39	0,20	0,87	1,19	1,63
-0,5	0,70	21,37	2200,25	1916,34	2314,74	1,15	1,17	1,17	1,14
	1,20	62,81	4085,55	5631,70	6802,49	0,73	1,07	1,11	1,10
	1,70	126,06	6135,23	11302,50	13652,22	0,54	1,06	1,19	1,32
	2,20	211,12	8062,66	18928,76	22863,92	0,43	1,04	1,23	1,51
	2,70	317,98	<u>9845,29</u>	28510,46	34437,60	0,35	1,02	1,26	1,67
	3,20	446,66	<u>11460,90</u>	40047,62	48373,25	0,29	0,98	1,27	1,80
	3,70	597,15	<u>11974,70</u>	53540,22	64670,88	0,22	0,88	1,18	1,76
	4,20	769,44	<u>12042,60</u>	68988,28	83330,48	0,17	0,77	1,07	1,67
-1	0,80	21,15	1985,36	1895,94	2290,09	1,05	1,16	1,15	1,08
	1,30	55,84	3367,94	5006,46	6047,26	0,67	1,05	1,12	1,16
	1,80	107,05	4787,16	9598,18	11593,57	0,50	1,02	1,16	1,38
	2,30	174,78	6298,86	15671,10	18929,01	0,40	1,02	1,22	1,63
	2,80	259,04	7327,48	23225,22	28053,58	0,32	0,96	1,20	1,75
	3,30	359,81	7621,96	32260,54	38967,29	0,24	0,84	1,09	1,71
	3,80	477,10	7621,96	42777,06	51670,12	0,18	0,72	0,97	1,62
	4,30	610,92	7621,96	54774,78	66162,09	0,14	0,63	0,88	1,54

Tabela A.22 – Resultados numéricos e estimativas – H_m11

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-D}}}$
1	0,30	3,42	164,84	101,46	177,01	1,62	1,15	1,15	1,15
	0,80	24,29	694,20	721,47	1258,76	0,96	1,06	1,05	1,07
	1,30	64,13	1054,34	1905,14	3323,90	0,55	0,87	1,19	1,11
	1,80	122,95	1271,82	3652,45	6372,45	0,35	0,71	1,34	1,21
	2,30	200,74	1477,03	5963,42	10404,40	0,25	0,63	1,53	1,34
	2,80	297,51	1631,65	8838,03	15419,76	0,18	0,56	1,68	1,43
	3,30	413,25	1736,40	12276,30	21418,51	0,14	0,50	1,79	1,50
	3,80	547,97	1799,98	16278,21	28400,67	0,11	0,45	1,87	1,53
0,5	0,40	7,40	377,88	219,90	383,67	1,72	1,32	1,32	1,32
	0,90	37,48	1040,71	1113,26	1942,32	0,93	1,11	1,16	1,14
	1,40	90,68	1282,36	2693,82	4699,93	0,48	0,79	1,16	1,08
	1,90	167,02	1423,40	4961,58	8656,50	0,29	0,62	1,23	1,09
	2,40	266,49	1544,29	7916,54	13812,03	0,20	0,52	1,31	1,14
	2,90	389,10	1623,92	11558,70	20166,52	0,14	0,44	1,37	1,16
	3,40	534,83	1659,64	15888,06	27719,98	0,10	0,38	1,41	1,17
	3,90	703,70	1660,56	20904,62	36472,40	0,08	0,33	1,41	1,15
0	0,55	14,39	682,69	427,52	745,90	1,60	1,41	1,41	1,41
	1,05	52,45	1187,17	1558,16	2718,53	0,76	1,01	1,16	1,12
	1,55	114,30	1383,05	3395,45	5924,06	0,41	0,74	1,19	1,09
	2,05	199,94	1543,81	5939,39	10362,49	0,26	0,60	1,29	1,14
	2,55	309,36	1664,03	9189,98	16033,81	0,18	0,51	1,37	1,18
	3,05	442,57	1726,01	13147,22	22938,02	0,13	0,43	1,42	1,20
	3,55	599,57	1733,25	17811,11	31075,13	0,10	0,37	1,43	1,18
	4,05	780,35	1733,25	23181,65	40445,14	0,07	0,32	1,44	1,17
-0,5	0,70	25,76	1007,92	765,14	1334,93	1,32	1,34	1,32	1,40
	1,20	75,69	1386,30	2248,56	3923,07	0,62	0,91	1,16	1,09
	1,70	151,91	1560,32	4512,74	7873,39	0,35	0,68	1,20	1,08
	2,20	254,41	1717,29	7557,66	13185,88	0,23	0,56	1,29	1,13
	2,70	383,19	1824,05	11383,34	19860,56	0,16	0,47	1,36	1,16
	3,20	538,26	1865,84	15989,76	27897,41	0,12	0,40	1,39	1,16
	3,70	719,60	1868,29	21376,94	37296,44	0,09	0,34	1,40	1,15
	4,20	927,23	1868,29	27544,86	48057,65	0,07	0,30	1,40	1,14
-1	0,80	25,51	923,67	757,76	1322,07	1,22	1,35	1,33	1,35
	1,30	67,36	1276,67	2000,96	3491,08	0,64	1,00	1,37	1,28
	1,80	129,13	1568,34	3836,16	6692,97	0,41	0,84	1,58	1,42
	2,30	210,84	1798,69	6263,36	10927,71	0,29	0,73	1,78	1,55
	2,80	312,47	1957,60	9282,56	16195,33	0,21	0,64	1,92	1,64
	3,30	434,04	2058,34	12893,76	22495,80	0,16	0,56	2,03	1,69
	3,80	575,53	2101,98	17096,96	29829,15	0,12	0,50	2,08	1,70
	4,30	736,95	2106,52	21892,16	38195,35	0,10	0,44	2,09	1,69

Tabela A.23 – Resultados numéricos e estimativas – H_M12

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{R\text{dist-D}}}$
1	0,50	9,34	1108,54	978,20	1187,99	1,13	1,07	1,07	1,07
	1,00	37,38	3052,03	3912,80	4751,97	0,78	1,00	1,02	1,05
	1,50	84,10	4784,02	8803,80	10691,94	0,54	0,96	1,04	1,08
	2,00	149,51	6540,69	15651,20	19007,89	0,42	0,94	1,09	1,14
	2,50	233,60	8251,14	24455,00	29699,83	0,34	0,92	1,13	1,20
	3,00	336,39	9905,19	35215,20	42767,76	0,28	0,91	1,16	1,24
	3,50	457,87	11110,60	47931,80	58211,67	0,23	0,87	1,15	1,24
	4,00	598,03	11788,00	62604,80	76031,57	0,19	0,80	1,09	1,18
0,5	0,60	17,23	2163,48	1803,35	2190,11	1,20	1,17	1,17	1,17
	1,10	57,90	4824,60	6061,25	7361,20	0,80	1,09	1,13	1,11
	1,60	122,50	7408,06	12823,81	15574,11	0,58	1,07	1,18	1,23
	2,10	211,02	9929,90	22091,01	26828,84	0,45	1,05	1,24	1,34
	2,60	323,47	12303,70	33862,87	41125,39	0,36	1,03	1,27	1,43
	3,10	459,85	<u>14235,00</u>	48139,37	58463,76	0,30	0,99	1,27	1,47
	3,60	620,15	<u>15406,90</u>	64920,53	78843,95	0,24	0,91	1,21	1,45
	4,10	804,38	<u>15817,50</u>	84206,33	102265,95	0,19	0,81	1,12	1,37
0	0,75	34,59	4078,79	3620,76	4397,30	1,13	1,20	1,19	1,15
	1,25	96,08	7454,14	10057,66	12214,71	0,74	1,12	1,18	1,17
	1,75	188,31	10828,90	19713,01	23940,83	0,55	1,10	1,24	1,34
	2,25	311,28	13864,70	32586,81	39575,66	0,43	1,06	1,26	1,47
	2,75	465,00	<u>16473,60</u>	48679,06	59119,19	0,34	1,01	1,26	1,56
	3,25	649,47	<u>18370,90</u>	67989,76	82571,43	0,27	0,94	1,22	1,58
	3,75	864,68	<u>18817,00</u>	90518,91	109932,38	0,21	0,83	1,12	1,50
	4,25	1110,63	<u>18905,50</u>	116266,51	141202,03	0,16	0,73	1,01	1,41
-0,5	0,90	52,27	5325,34	5471,96	6645,52	0,97	1,16	1,16	1,08
	1,40	126,48	8782,32	13240,78	16080,51	0,66	1,10	1,18	1,23
	1,90	232,96	12202,70	24387,36	29617,68	0,50	1,08	1,23	1,43
	2,40	371,70	<u>15249,20</u>	38911,68	47257,02	0,39	1,04	1,25	1,59
	2,90	542,71	<u>17405,50</u>	56813,76	68998,53	0,31	0,96	1,22	1,65
	3,40	745,98	<u>17751,40</u>	78093,58	94842,21	0,23	0,83	1,09	1,57
	3,90	981,52	<u>17837,80</u>	102751,16	124788,06	0,17	0,72	0,98	1,48
	4,40	1249,33	<u>17837,80</u>	130786,48	158836,08	0,14	0,63	0,88	1,40
-1	1,00	44,36	3930,65	4643,90	5639,87	0,85	1,09	1,10	1,05
	1,50	99,81	6290,27	10448,78	12689,71	0,60	1,06	1,15	1,27
	2,00	177,44	7298,16	18575,60	22559,48	0,39	0,88	1,02	1,28
	2,50	277,25	7580,96	29024,38	35249,19	0,26	0,72	0,87	1,21
	3,00	399,24	7603,87	41795,10	50758,84	0,18	0,59	0,75	1,13
	3,50	543,42	7603,87	56887,78	69088,42	0,13	0,50	0,66	1,06
	4,00	709,77	7603,87	74302,40	90237,94	0,10	0,43	0,59	1,01
	4,50	898,30	7603,87	94038,98	114207,39	0,08	0,38	0,54	0,97

Tabela A.24 – Resultados numéricos e estimativas – H_m12

ψ	λ_{dist}	f_y (kN/cm ²)	M_u (kNcm)	M_y (kNcm)	M_p (kNcm)	$\frac{M_u}{M_y}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist}}}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist-M}}}$	$\frac{M_u}{M_{\text{Rdist-D}}}$
1	0,50	11,17	491,54	337,43	600,70	1,46	1,21	1,21	1,21
	1,00	44,68	1120,57	1349,70	2402,81	0,83	1,06	1,18	1,15
	1,50	100,52	1354,94	3036,83	5406,31	0,45	0,78	1,23	1,13
	2,00	178,71	1494,47	5398,80	9611,22	0,28	0,62	1,31	1,16
	2,50	279,23	1565,82	8435,62	15017,54	0,19	0,51	1,35	1,17
	3,00	402,09	1603,93	12147,30	21625,26	0,13	0,43	1,38	1,17
	3,50	547,30	1610,05	16533,83	29434,38	0,10	0,36	1,39	1,15
	4,00	714,83	1610,05	21595,20	38444,90	0,07	0,32	1,40	1,14
0,5	0,60	20,76	941,29	627,05	1116,30	1,50	1,38	1,38	1,38
	1,10	69,76	1557,82	2107,58	3752,02	0,74	1,02	1,21	1,16
	1,60	147,60	1789,71	4459,01	7938,16	0,40	0,74	1,24	1,13
	2,10	254,26	1953,79	7681,34	13674,72	0,25	0,60	1,32	1,16
	2,60	389,76	2043,80	11774,57	20961,70	0,17	0,49	1,37	1,17
	3,10	554,08	2063,50	16738,70	29799,10	0,12	0,41	1,38	1,16
	3,60	747,23	2063,50	22573,73	40186,93	0,09	0,35	1,38	1,14
	4,10	969,20	2063,50	29279,66	52125,17	0,07	0,31	1,39	1,13
0	0,75	41,67	1544,21	1258,88	2241,11	1,23	1,30	1,27	1,32
	1,25	115,75	2022,84	3496,88	6225,32	0,58	0,88	1,16	1,09
	1,75	226,87	2281,78	6853,88	12201,63	0,33	0,67	1,22	1,10
	2,25	375,04	2461,78	11329,88	20170,03	0,22	0,54	1,29	1,13
	2,75	560,24	2545,18	16924,88	30130,54	0,15	0,45	1,32	1,13
	3,25	782,48	2558,11	23638,88	42083,16	0,11	0,38	1,33	1,11
	3,75	1041,77	2558,11	31471,88	56027,87	0,08	0,32	1,34	1,10
	4,25	1338,09	2558,11	40423,88	71964,69	0,06	0,28	1,34	1,08
-0,5	0,90	62,95	1806,00	1901,72	3385,54	0,95	1,13	1,17	1,16
	1,40	152,32	2207,49	4601,69	8192,16	0,48	0,80	1,17	1,08
	1,90	280,55	2439,46	8475,56	15088,63	0,29	0,62	1,23	1,10
	2,40	447,64	2598,02	13523,33	24074,93	0,19	0,51	1,29	1,12
	2,90	653,59	2658,53	19745,00	35151,07	0,13	0,42	1,32	1,12
	3,40	898,39	2662,02	27140,57	48317,05	0,10	0,36	1,32	1,10
	3,90	1182,06	2662,02	35710,04	63572,87	0,07	0,31	1,33	1,08
	4,40	1504,58	2662,02	45453,41	80918,52	0,06	0,27	1,33	1,07
-1	1,00	53,87	1406,49	1627,50	2897,36	0,86	1,11	1,23	1,19
	1,50	121,21	1953,20	3661,88	6519,06	0,53	0,94	1,47	1,35
	2,00	215,49	2358,14	6510,00	11589,44	0,36	0,81	1,71	1,52
	2,50	336,70	2603,66	10171,88	18108,50	0,26	0,70	1,86	1,61
	3,00	484,85	2703,32	14647,50	26076,24	0,18	0,60	1,93	1,63
	3,50	659,94	2750,69	19936,88	35492,66	0,14	0,52	1,97	1,63
	4,00	861,96	2752,97	26040,00	46357,76	0,11	0,45	1,98	1,61
	4,50	1090,92	2752,97	32956,88	58671,55	0,08	0,40	1,99	1,60

