

Análise Numérica da Flambagem do Montante de Alma devida ao Cisalhamento em Vigas de Aço Celulares

Hugo César Vieira

V657a Vieira, Hugo César.
Análise numérica da flambagem do montante de alma devida ao cisalhamento em vigas de aço celulares [manuscrito] / Hugo César Vieira. – 2014.
xiii, 80 f., enc.: il.

Orientador: Ricardo Hallal Fakury.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 78-80.

Bibliografia: f. 74-77.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Vigas - Teses. 3. Aço - Teses. 4. Método dos elementos finitos - Teses. I. Fakury, Ricardo Hallal. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 624(043)

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

**"ANÁLISE NUMÉRICA DA FLAMBAGEM DO MONTANTE DE ALMA
DEVIDA AO CISALHAMENTO EM VIGAS DE AÇO CELULARES"**

Hugo César Vieira

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

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Ricardo Hallal Fakury
DEES - UFMG - (Orientador)

Prof. Dr. Armando César Campos Lavall
DEES - UFMG

Profa. Dra. Ana Lydia Reis de Castro e Silva
DEES - UFMG

Prof. Dr. Gustavo de Souza Veríssimo
UFV

Belo Horizonte, 23 de maio de 2014

DEDICATÓRIA

Deus, obrigado pelo dia de hoje e pelo Dom da vida.

“No demais, irmãos meus, fortalecei-vos no Senhor e na força do seu poder revesti-vos de toda a armadura de Deus, para que possais estar firmes contra as astutas ciladas do diabo. Porque não temos que lutar contra a carne e o sangue, mas, sim, contra os principados, contra as potestades, contra os príncipes das trevas deste século, contra as hostes espirituais da maldade, nos lugares celestiais. Portanto, tomai toda a armadura de Deus, para que possais resistir no dia mau e, havendo feito tudo, ficar firmes. Estai, pois, firmes, tendo cingidos os vossos lombos com a verdade, e vestida à couraça da justiça; e tomando, sobretudo o escudo da fé, com o qual podereis apagar todos os dardos inflamados do maligno. Tomai também o capacete da salvação, e a espada do Espírito, que é a palavra de Deus; Orando em todo o tempo com toda a oração e súplica no Espírito, e vigiando nisto com toda perseverança e súplica por todos os santos.”

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por estar comigo em todos os momentos, principalmente os difíceis. Mesmo durante todas as tribulações da vida, nunca me senti sozinho.

Aos meus pais Antônio e Maria e ao meu irmão Rodrigo, pelo incentivo.

À minha Dani, pelo apoio, suporte, amor e paciência em todos os momentos. Esta vitória é nossa!

Ao meu orientador prof. Ricardo Fakury e à prof^a. Ana Lydia, pela oportunidade e confiança. Vocês foram fundamentais para o meu aprendizado. Obrigado por tudo!

À Inês, funcionária do PROPEES, por toda dedicação e empenho admiráveis.

Ao prof. Gabriel Ribeiro, fundamental na minha jornada, que instigou-me para a ampliação do conhecimento.

Ao prof. Gustavo Veríssimo por todo suporte no início deste trabalho.

Aos colegas de mestrado pelo companheirismo durante o curso, em especial ao Pedro Brasil, Leandro Mota, Thiago Vilela e Antônio Teixeira, meus sinceros agradecimentos.

Ao meu amigo Breno (frango) que desde a graduação esteve presente durante esta empreitada.

Aos Diretores da VLB Engenharia, Nathanael Villela, José Bernardino e José Henrique, que estimularam e incentivaram o desenvolvimento do meu conhecimento.

Aos Engenheiros Marcelo Rossi, Marcelo Botelho e Danielle Bretas, da VLB Engenharia, pela paciência, compreensão e incentivo.

Aos companheiros Maurício Marroque, Sérgio Araújo e Márcio Araújo, Engenheiros da VLB Engenharia, pela amizade e suporte.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| LISTA DE FIGURAS | vii |
| LISTA DE TABELAS | xi |
| RESUMO | xii |
| ABSTRACT | xiii |
| | |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Generalidades | 1 |
| 1.2 Parâmetros Geométricos e Simbologia | 3 |
| 1.3 Tipologias | 4 |
| 1.4 Campos de Aplicação | 5 |
| 1.5 Modos de Colapso | 8 |
| 1.5.1 Considerações Gerais | 8 |
| 1.5.2 Flambagem do Montante de Alma | 9 |
| 1.5.2.1 Generalidades | 9 |
| 1.5.2.2 Flambagem do Montante de Alma Devida à Força Cortante | 9 |
| 1.5.2.3 Flambagem do Montante de Alma Devida à Compressão | 10 |
| 1.5.3 Formação de um Mecanismo Vierendeel | 11 |
| 1.5.4 Flambagem Lateral com Torção..... | 12 |
| 1.5.5 Formação de Rótula Plástica | 12 |
| 1.5.6 Ruptura do montante na seção da solda..... | 13 |
| 1.6 Objetivos..... | 13 |
| 1.7 Justificativa..... | 13 |
| 1.8 Metodologia..... | 14 |
| | |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 16 |
| 2.1 Estudos Relevantes sobre o Colapso de Vigas Alveolares..... | 16 |
| 2.2 Estudos Relacionados à Flambagem do Montante de Alma de Vigas Celulares . | 19 |
| 2.2.1 Estudos Analíticos | 19 |
| 2.2.2 Estudos Experimentais e Numéricos | 20 |
| | |
| 3 ANÁLISE NUMÉRICA | 26 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.1 | Considerações Iniciais | 26 |
| 3.2 | Discretização e Condições de Contorno | 27 |
| 3.2.1 | Análise Linearizada de Estabilidade | 29 |
| 3.2.2 | Consideração da não Linearidade Geométrica | 29 |
| 3.2.3 | Consideração da não Linearidade Física | 29 |
| 3.2.4 | Processo Incremental e Iterativo de uma Análise não Linear | 31 |
| 3.2.5 | Validação do Modelo Numérico | 32 |
| 4 | ANÁLISE NUMÉRICA DE VIGAS DE AÇO CELULARES – AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS PERFIS I LAMINADOS BRASILEIROS DA SÉRIE W..... | 39 |
| 4.1 | Perfis Analisados | 39 |
| 4.2 | Resultados..... | 41 |
| 5 | CAPACIDADE RESISTENTE DO MONTANTE DE ALMA – PROCEDIMENTOS E PROPOSIÇÃO DE CÁLCULO..... | 55 |
| 5.1 | Resultados Numéricos Considerados | 55 |
| 5.2 | Métodos Analíticos Constantes da Literatura..... | 57 |
| 5.2.1 | Capacidade Resistente Segundo Ward (1990)..... | 57 |
| 5.2.2 | Capacidade Resistente Segundo Lawson <i>et al.</i> (2002)..... | 59 |
| 5.3 | Comparação entre os Métodos Existentes na Literatura e os Resultados Numéricos deste Trabalho | 60 |
| 5.4 | Capacidade Resistente Proposta | 64 |
| 6 | VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA ANALÍTICA PROPOSTA | 66 |
| 6.1 | Capacidade Resistente Proposta Aplicada aos Resultados Numéricos Deste Trabalho..... | 66 |
| 6.2 | Capacidade Resistente Proposta Aplicada a Outros Exemplos | 67 |
| 7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 71 |
| 7.1 | Sobre a Análise Numérica | 71 |
| 7.2 | Sobre a Capacidade Resistente | 72 |
| 7.3 | Sugestões para Trabalhos Futuros | 73 |
| 8 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 74 |
| | ANEXO A – CURVAS DE FLAMBAGEM ‘C’ DA BS 5950-1:2000 | 78 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 – Vigas alveolares casteladas. | 1 |
| Figura 1.2 – Processo de fabricação das vigas celulares (fonte: www.steelconstruction.info – acessado em 03/12/2012). | 2 |
| Figura 1.3 – Vigas celulares aplicadas em um ginásio poliesportivo (fonte: www.westok.co.uk – acessado em 23/12/2012). | 2 |
| Figura 1.4 – Parâmetros geométricos das vigas celulares (Veríssimo <i>et al.</i> , 2010). | 3 |
| Figura 1.5 – Simbologia dos elementos da seção transversal de vigas celulares (Veríssimo <i>et al.</i> , 2010). | 3 |
| Figura 1.6 – Viga celular com eixo curvo e seção constante (Oliveira, 2012). | 4 |
| Figura 1.7 – Viga celular com eixo reto e inércia variável (Oliveira, 2012). | 5 |
| Figura 1.8 – Aplicação de vigas celulares curvas, Winchester (Erdal, 2011). | 5 |
| Figura 1.9 – Dunfermline FC, vigas celulares com 21 m de vão (fonte: www.westok.co.uk – acessado em 02/11/2012). | 6 |
| Figura 1.10 – Vigas celulares aplicadas na cobertura de um supermercado (fonte: www.arcelormittal.com – acessado em 11/12/2012). | 6 |
| Figura 1.11 – Disposição das tubulações dentro das aberturas das vigas celulares (fonte: www.arcelormittal.com – acessado em 11/12/2012). | 7 |
| Figura 1.12 – Conexão com vigas secundárias. | 7 |
| Figura 1.13 – Aplicação de vigas celulares em sistemas de garagem, Fairhill Car Park, Ballymena (fonte: www.westok.co.uk – acessado em 23/12/2012). | 8 |
| Figura 1.14 – Flambagem do montante de alma devida ao cisalhamento (adaptado de Kerdal e Nethercot, 1984). | 9 |
| Figura 1.15 – Forças atuantes no montante de alma. | 10 |
| Figura 1.16 – Flambagem do montante de alma devida à compressão (Erdal, 2011). | 11 |
| Figura 1.17 – Mecanismo Vierendeel (Tsavdaridis e D’Mello, 2010). | 11 |
| Figura 1.18 – Diagrama de esforços na seção crítica (Olander, 1954). | 12 |
| Figura 1.19 – Flambagem lateral com torção (Erdal, 2011). | 12 |
| Figura 1.20 – Ruptura da solda entre as aberturas (Tsavdaridis e D’Mello, 2011). | 13 |
| Figura 1.21 – Faixas de variação de esbeltez da alma para perfis europeus e laminados brasileiros (Vieira, 2011). | 14 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Tensões no entorno do montante de alma (Lawson <i>et al.</i> , 2002)..... | 20 |
| Figura 2.2 – Modelos experimentais A1 e B1 após ensaios e tensões de von-Mises dos modelos numéricos (Tsavdaridis e D’Mello, 2010). | 23 |
| Figura 2.3 – Flambagem do montante de alma na série NPI_CB_280 (Erdal, 2011). | 25 |
| Figura 3.1 – Procedimento simplificado de resolução de um problema via MEF. | 26 |
| Figura 3.2 – Elementos de casca retangular de quatro nós triangular de três nós (Hibbit <i>et al.</i> , 2009)..... | 27 |
| Figura 3.3 – Tipos de malha. | 27 |
| Figura 3.4 – Discretização do modelo em elementos S4R com malha não estruturada..... | 28 |
| Figura 3.5 – Condições de contorno..... | 28 |
| Figura 3.6 – Diagrama trilinear elastoplástico (Earl, 1999). | 30 |
| Figura 3.7 – Instabilidades solucionadas pelo método de Riks..... | 31 |
| Figura 3.8 – Metodologia simplificada de uma análise não linear..... | 32 |
| Figura 3.9 – Diagrama bilinear elastoplástico da alma para o modelo 4B..... | 33 |
| Figura 3.10 – Diagrama bilinear elastoplástico das mesas para o modelo 4B. | 33 |
| Figura 3.11 – Modos de colapso dos modelos experimentais NPI_240 (Erdal, 2011). | 34 |
| Figura 3.12 – Modelo numérico NPI_240 (Erdal, 2011). | 34 |
| Figura 3.13 – Modelo numérico NPI_240 (Este trabalho). | 35 |
| Figura 3.14 – Curva carga <i>versus</i> deslocamento para os modelos NPI_240_CB. | 35 |
| Figura 3.15 – Modo de colapso do modelo experimental 4B (Warren, 2001)..... | 36 |
| Figura 3.16 – Modelo numérico 4B (Este trabalho)..... | 36 |
| Figura 3.17 – Curva carga <i>versus</i> deslocamento para os modelos 4B. | 36 |
| Figura 3.18 – Modo de colapso do modelo experimental B1 (Tsavdaridis e D’Mello, 2010). .. | 37 |
| Figura 3.19 – Modelo numérico B1 (Tsavdaridis e D’Mello, 2010)..... | 37 |
| Figura 3.20 – Modelo numérico B1 (Este trabalho)..... | 37 |
| Figura 3.21 – Curva carga <i>versus</i> deslocamento para os modelos B1. | 38 |
| Figura 4.1 – Carregamento e condições de contorno. | 41 |
| Figura 4.2 – Modelos A1 a A5. | 42 |
| Figura 4.3 – Modelos A6 a A10. | 43 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.4 – Modelos A11 a A15..... | 44 |
| Figura 4.5 – Modelos B1 a B5..... | 45 |
| Figura 4.6 – Modelos B6 a B10..... | 46 |
| Figura 4.7 – Modelos B11 a B15..... | 47 |
| Figura 4.8 – Modelos C1 a C5..... | 48 |
| Figura 4.9 – Modelos C6 a C10..... | 49 |
| Figura 4.10 – Modelos C11 a C15..... | 50 |
| Figura 4.11 – Flambagem do montante de alma (modelo C7)..... | 52 |
| Figura 4.12 – Colapso por plastificação (modelo A1)..... | 52 |
| Figura 4.13 – Mecanismo Vierendeel (modelo B15)..... | 53 |
| Figura 4.14 – Acoplamento da flambagem do montante de alma e do mecanismo Vierendeel (modelo B14)..... | 53 |
| Figura 4.15 – Relação entre P_{ult}/P_{cr} versus D_0/d_g | 54 |
| Figura 4.16 – Relação entre P_{ult}/P_{cr} versus p/D_0 | 54 |
| Figura 5.1 – Relação comparativa de V_h versus S/D_0 para $\lambda = 57,2$ | 55 |
| Figura 5.2 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 48,8$ | 56 |
| Figura 5.3 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 38,2$ | 56 |
| Figura 5.4 – Variação de V_h com p/D_0 versus D_0/d_g | 56 |
| Figura 5.5 – Forças aplicadas e seção crítica no montante de alma de uma viga castelada hexagonal equivalente (adaptado de Ward, 1990)..... | 57 |
| Figura 5.6 – Curvas utilizadas para o dimensionamento do montante de alma (Ward, 1990)..... | 58 |
| Figura 5.7 – Comportamento do montante de alma (adaptado de Lawson <i>et al.</i> , 2002)..... | 60 |
| Figura 5.8 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 57,2$ e $D_0/d_g = 0,57$ | 60 |
| Figura 5.9 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 57,2$ e $D_0/d_g = 0,70$ | 61 |
| Figura 5.10 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 57,2$ e $D_0/d_g = 0,80$ | 61 |
| Figura 5.11 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 48,8$ e $D_0/d_g = 0,57$ | 61 |
| Figura 5.12 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 48,8$ e $D_0/d_g = 0,70$ | 62 |
| Figura 5.13 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 48,8$ e $D_0/d_g = 0,80$ | 62 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.14 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 38,2$ e $D_0/d_g = 0,57$ | 62 |
| Figura 5.15 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 38,2$ e $D_0/d_g = 0,70$ | 63 |
| Figura 5.16 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 38,2$ e $D_0/d_g = 0,80$ | 63 |
| Figura 5.17 – Relação comparativa de V_h (este trabalho e Lawson <i>et al.</i> , 2002) versus p/D_0 . | 64 |
| Figura 5.18 – Relação comparativa de V_h (este trabalho e Lawson <i>et al.</i> , 2002) versus D_0/d_g . | 64 |
| Figura 6.1 – Colapso por plastificação (modelo D1). | 68 |
| Figura 6.2 – Flambagem do montante de alma (modelo D2)..... | 69 |
| Figura 6.3 – Acoplamento do mecanismo Vierendeel com a flambagem do montante de alma (modelo D3)..... | 69 |
| Figura 6.4 – Flambagem do montante de alma (modelo D4)..... | 69 |
| Figura 6.5 – Flambagem do montante de alma (modelo D5)..... | 70 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1 – Propriedades geométricas das vigas celulares | 32 |
| Tabela 3.2 – Comparação entre cargas últimas deste trabalho e Erdal (2011)..... | 34 |
| Tabela 3.3 – Comparação entre cargas ultimas deste trabalho e Warren (2001). | 35 |
| Tabela 3.4 – Comparação entre cargas ultimas deste trabalho e Tsavdaridis e D’Mello (2010). | 37 |
| Tabela 4.1 – Propriedades geométricas dos modelos numéricos. | 40 |
| Tabela 4.2 – Carga crítica, carga última e modos de colapso. | 51 |
| Tabela 6.1 – Comparação entre metodologia proposta e resultados numéricos..... | 67 |
| Tabela 6.2 – Propriedades geométricas dos modelos numéricos. | 68 |
| Tabela 6.3 – Comparação entre metodologia proposta e resultados numéricos..... | 68 |

RESUMO

Atualmente, a utilização de vigas celulares tem sido cada vez mais intensa devido à sua geometria flexível e também por proporcionar, em diversas situações, um projeto mais econômico. Desse modo, para uma aplicação eficiente, o conhecimento do seu comportamento é de fundamental importância, entretanto, foi observado que poucos são os trabalhos relacionados às vigas celulares principalmente no que diz respeito aos seus modos de colapso. Nesse contexto, um dos modos de colapso mais complexos é a flambagem do montante de alma, causada por compressão ou cisalhamento. O espaçamento entre as aberturas, a esbeltez da alma e o diâmetro das aberturas são alguns dos parâmetros que interferem no fenômeno, mas o conhecimento do seu comportamento ainda é impreciso. Este trabalho tem como objetivo estudar os parâmetros e as características que governam a flambagem do montante de alma devida apenas ao cisalhamento em vigas celulares via análise não linear pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Em adição, tem como objetivo estudar e avaliar a validade de formulações analíticas existentes e, caso necessário, propor novos procedimentos considerando a faixa de variação de esbeltez da alma dos perfis I laminados de faces paralelas (série W) fabricados no Brasil. Para tal, o modelo numérico desenvolvido considerou as não linearidades de geometria e de material. Resultados disponíveis na literatura foram utilizados para a validação e calibração desse modelo. Foi observado que a flambagem do montante de alma devida ao cisalhamento ocorre predominantemente quando a relação entre o passo e o diâmetro das aberturas se situa entre 1,2 e 1,4. Adicionalmente, tendo em vista a boa aproximação dos resultados obtidos, a capacidade resistente proposta é baseada no método desenvolvido por Lawson *et al.* (2002). Entretanto, algumas diferenças foram observadas, principalmente quando a relação entre o diâmetro das aberturas e a altura total da seção transversal da viga celular (D_0/d_g) e a relação entre o passo e o diâmetro das aberturas (p/D_0) se reduzem. Além disso, observou-se que o método de Lawson *et al.* (2002) não consegue levar em conta corretamente vigas nas quais a distância entre as faces das aberturas é pequena. Com base nessas constatações, foram adicionados ao método de Lawson *et al.* (2002) fatores de ajuste que permitiram tornar seus resultados mais próximos dos resultados numéricos obtidos neste trabalho.

Palavras-chave: Vigas celulares de aço, flambagem do montante de alma, análise não linear, método dos elementos finitos.

ABSTRACT

Currently, the use of cellular beams has been intensely increasing, due to their flexible geometry and to the fact that they provide, in several situations, a more economical design. Thus, for an efficient utilization, the knowledge of their behaviour is extremely important. However, it was observed that there are few works related to cellular beams, especially with regard to their collapse modes. In this context, one of the most complex collapse modes is the web-post buckling by compression or by shear. The spacing between the openings, the web slenderness and the opening diameter are some parameters that influence the phenomenon, but the knowledge of their behaviour is still unclear. This project aims at evaluating, by nonlinear Finite Element Method (FEM) analysis, the behavior of the cellular steel beams, according to the web-post buckling due to shear. In addition, it targets on studying and examining existing analytical formulations and, if necessary, proposing new procedures, considering the range variation of the slenderness of the web rolled parallel faces I profiles (W series) manufactured in Brazil. For this, numerical models were developed, taking geometric and material nonlinearities into account. Available results in the literature were used for validation and calibration of these models. It was observed that the web-post buckling by shear occurs predominantly when the spacing and diameter of the openings ratio is between 1.2 and 1.4. Additionally, considering the good approximation of the obtained results, the resistance capacity is based on Lawson's *et al.* (2002) methodology. However, some differences were observed especially when the diameter of the openings and the total height of the cellular beam cross section ratio (D_0/d_g) and the step and the diameter of the openings ratio (p/D_0) are reduced. Furthermore, it was observed that Lawson's *et al.* (2002) method doesn't consider properly the beams with a small the distance between the faces of the openings. Based on these findings, two adjustment factors were added to Lawson's *et al.* (2002) method, so that its results could approximate the numeral results got in this work.

Keywords: Cellular steel beams, web-post buckling, nonlinear analysis, finite element method.

1

INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Devido à pouca diversidade de altura dos perfis I ou H laminados fabricados na Europa por volta dos anos 1930, aliada à busca por novas soluções que minimizassem o custo de fabricação e o tempo de execução das estruturas após a Segunda Guerra Mundial, as vigas com aberturas sequencias originadas de cortes na alma, denominadas vigas alveolares, desenvolvidas pelo inglês Geoffrey Murray Boyd, surgiram como uma alternativa bastante interessante.

Inicialmente foram desenvolvidas somente vigas com aberturas hexagonais, que receberam o nome de vigas casteladas devido à semelhança das saliências com as ameias das muralhas dos castelos. A Fig. 1.1 ilustra a geometria das vigas alveolares casteladas.

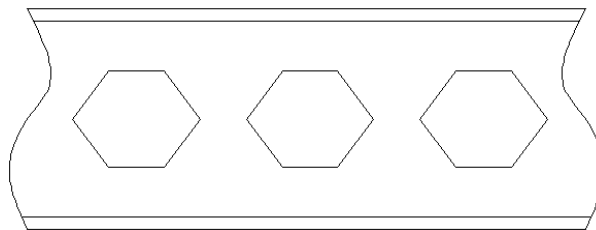


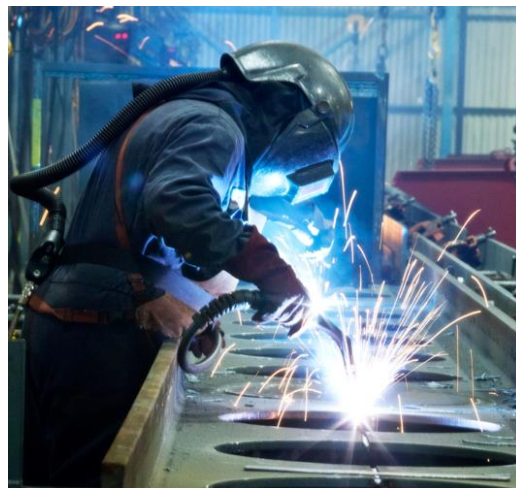
Figura 1.1 – Vigas alveolares casteladas.

Atualmente, o avanço do processo de automação proporcionou, além de uma maior velocidade de fabricação, a possibilidade de criação de novos formatos de aberturas como, por exemplo, o circular, gerando as chamadas vigas celulares. A fabricação dessas vigas é feita geralmente a partir de um perfil I laminado, no qual são efetuados dois cortes longitudinais, sendo cada corte constituído por módulos contínuos formados por uma semicircunferência

seguida de um pequeno segmento reto (Fig. 1.2-a). Posteriormente as duas metades são defasadas e soldadas entre si (Fig. 1.2-b), pelos segmentos retos. O resultado é uma viga com capacidade resistente à flexão e rigidez muito superiores à do perfil laminado original com praticamente a mesma quantidade de aço. Deve-se, no entanto, destacar que, em termos proporcionais, por uma questão geométrica, o ganho de rigidez é maior que o da capacidade resistente à flexão. Por essa razão, as vigas celulares encontram sua maior eficiência quando o estado-limite de serviço relativo ao deslocamento máximo (flecha) é predominante.



a) – Corte.



b) – Soldagem.

Figura 1.2 – Processo de fabricação das vigas celulares (fonte: www.steelconstruction.info – acessado em 03/12/2012).

Conforme Oliveira (2012), devido à geometria final, comparativamente às demais vigas alveolares, as vigas celulares são menos agressivas visualmente e possibilitam uma melhor expressão arquitetônica ao ambiente, como ilustra a Fig. 1.3.



Figura 1.3 – Vigas celulares aplicadas em um ginásio poliesportivo (fonte: www.westok.co.uk – acessado em 23/12/2012).

1.2 Parâmetros Geométricos e Simbologia

A geometria e a simbologia das vigas celulares são ilustradas nas Figs 1.4 e 1.5, em que:

p é o espaçamento entre as aberturas (passo);

D_0 é o diâmetro das aberturas;

d_g é a altura total da seção transversal da viga celular ($k = \text{razão de expansão} = d_g/d$);

b_w é a distância entre as faces das aberturas;

b_f é a largura das mesas superior e inferior;

t_f é a espessura das mesas superior e inferior;

t_w é a espessura da alma;

y_o é a distância do centro geométrico (G) do 'tê' ao eixo da viga;

h_t é a altura total do 'tê'.

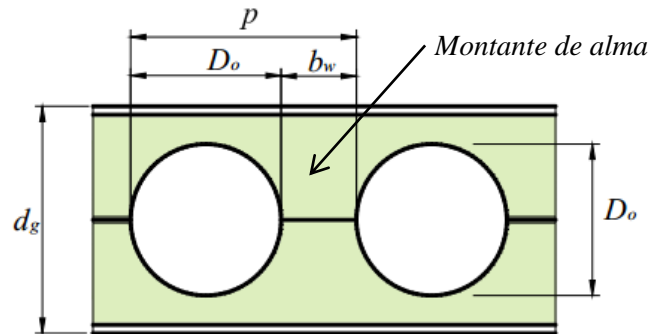


Figura 1.4 – Parâmetros geométricos das vigas celulares (Veríssimo *et al.*, 2010).

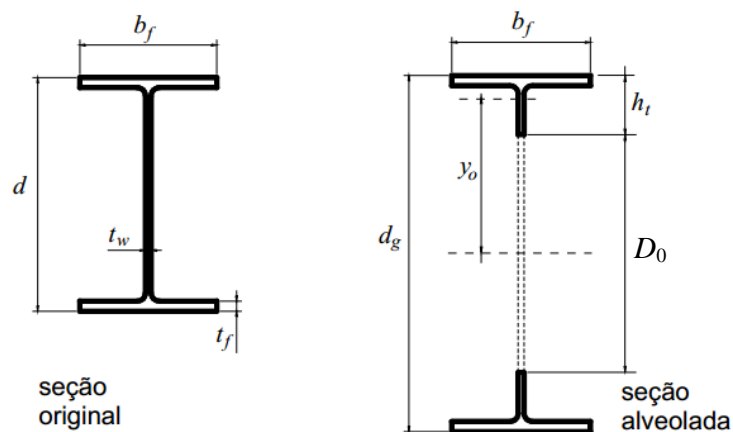


Figura 1.5 – Simbologia dos elementos da seção transversal de vigas celulares (Veríssimo *et al.*, 2010).

1.3 Tipologias

De acordo com a necessidade de cada projeto, as vigas celulares podem ser fabricadas com três configurações distintas:

- ✓ vigas de eixos retos e seção constante – configuração padrão podendo ser aplicada em qualquer sistema estrutural;
- ✓ vigas com eixo curvo e seção constante – geralmente aplicada em sistemas de coberturas sendo que curvatura da peça pode melhorar o desempenho estrutural;
- ✓ vigas com eixo reto e inércia variável – a variação de inércia mostra-se interessante em situações onde os esforços solicitantes também sofrem variações acentuadas ao longo do vão da viga (a inércia deve variar de acordo com o carregamento aplicado, garantindo economia e eficiência ao elemento estrutural).

As Fig. 1.5 e 1.6 ilustram a fabricação das vigas de eixo curvo e de inércia variável, respectivamente.

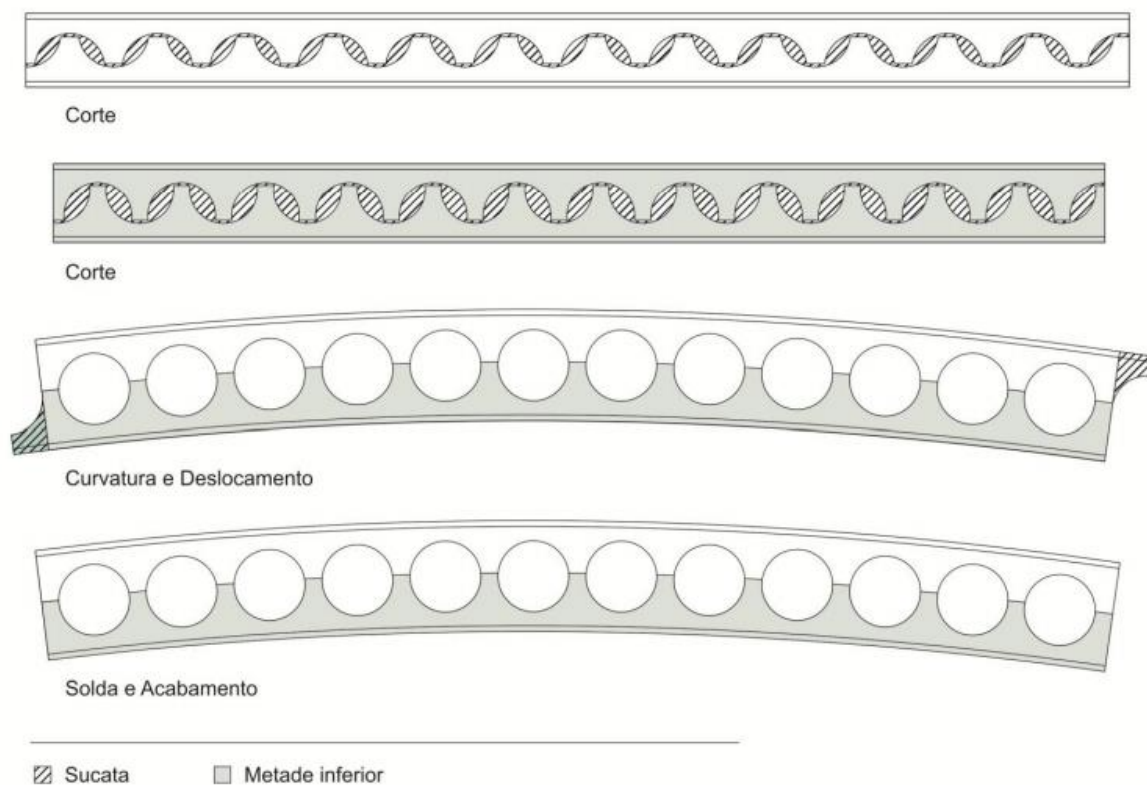


Figura 1.6 – Viga celular com eixo curvo e seção constante (Oliveira, 2012).

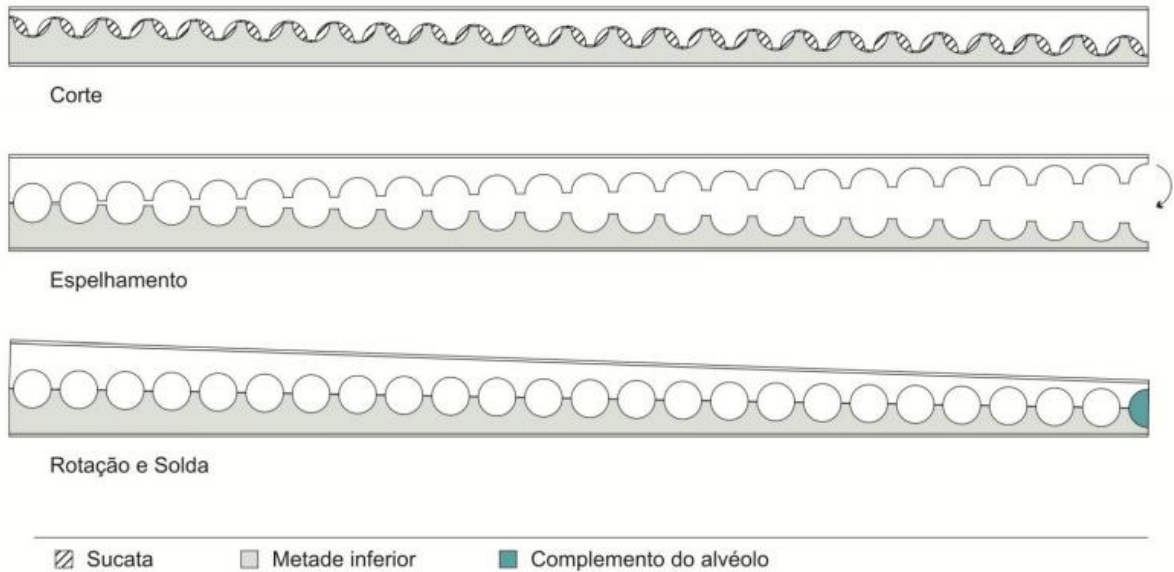


Figura 1.7 – Viga celular com eixo reto e inércia variável (Oliveira, 2012).

1.4 Campos de Aplicação

Com base no exposto em 1.1, as vigas celulares são especialmente adequadas para situações em que os vãos são grandes e as cargas atuantes não são muito elevadas e, adicionalmente, se deseja um aspecto estético elegante. Nessas situações, podem ser usadas com excelentes resultados em diversos tipos de construções, como galpões, supermercados, grandes lojas e determinados edifícios comerciais, assim como estádios (ver Figs. 1.8, 1.9 e 1.10).



Figura 1.8 – Aplicação de vigas celulares curvas, Winchester (Erdal, 2011).



Figura 1.9 – Dunfermline FC, vigas celulares com 21 m de vão (fonte: www.westok.co.uk – acessado em 02/11/2012).



Figura 1.10 – Vigas celulares aplicadas na cobertura de um supermercado (fonte: www.arcelormittal.com – acessado em 11/12/2012).

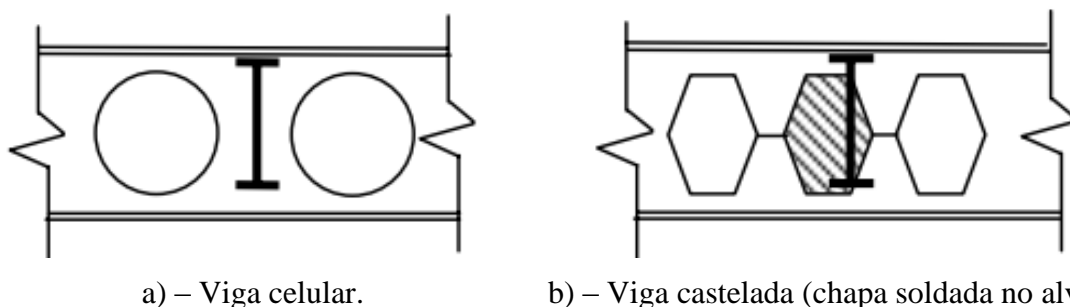
De modo geral, as vigas alveolares também são interessantes por facilitarem a passagem dos dutos de instalações diversas em edificações comerciais, propiciando economia de espaço vertical. Nos sistemas estruturais convencionais, algumas dessas tubulações devem necessariamente passar abaixo das vigas exigindo maior pé-direito. Entretanto, conforme ilustrado na Fig. 1.11, quando se utilizam vigas celulares, os dutos podem ser dispostos dentro das aberturas.



Figura 1.11 – Disposição das tubulações dentro das aberturas das vigas celulares (fonte: www.arcelormittal.com – acessado em 11/12/2012).

Adicionalmente, a possibilidade de vencimento de grandes vãos, superiores a 18 m, por exemplo, proporciona uma flexibilidade do espaço interno da edificação, facilita eventuais reformas ou ampliações, além de reduzir, no mínimo em 30% o peso total da estrutura, de acordo com os fabricantes *ArcelorMittal* e *CMC Steel Products*.

Em comparação às demais vigas alveolares, as vigas celulares apresentam uma solução mais econômica devido à sua geometria flexível, pois o diâmetro das aberturas e o espaçamento entre elas podem ser alterados. Além disso, conforme ilustrado na Fig. 1.12, a disposição das aberturas pode ser ajustada de modo que a conexão com vigas secundárias possa ocorrer no montante de alma.



a) – Viga celular.

b) – Viga castelada (chapa soldada no alvéolo).

Figura 1.12 – Conexão com vigas secundárias.

Em sistemas de coberturas de estacionamentos (ver Fig. 1.13), a aplicação das vigas celulares implica em uma maximização do espaço interno devido à redução do número de pilares.



Figura 1.13 – Aplicação de vigas celulares em sistemas de garagem, Fairhill Car Park, Ballymena (fonte: www.westok.co.uk – acessado em 23/12/2012).

1.5 Modos de Colapso

1.5.1 Considerações Gerais

Poucos foram os estudos desenvolvidos para as vigas celulares no que tange à determinação dos modos de colapso. Entretanto, de maneira similar às vigas casteladas, para as quais as pesquisas são mais abundantes, foi constatado que eles dependem principalmente da geometria do corte (altura e espaçamento das aberturas), do tipo de solicitação e das condições de vinculação da viga. Considerando que o carregamento aplicado produza momento fletor e força cortante, os modos de colapso observados são os seguintes:

- ✓ Flambagem do montante da alma;
- ✓ Formação de um mecanismo Vierendeel;
- ✓ Flambagem lateral com torção;
- ✓ Formação de rótula plástica;
- ✓ Ruptura do montante na seção da solda.

1.5.2 Flambagem do Montante de Alma

1.5.2.1 Generalidades

A flambagem do montante de alma é um dos mecanismos de colapso mais complexos existentes em vigas celulares e está associada a diversos parâmetros, incluindo o espaçamento entre as aberturas (p) e a esbeltez da alma (λ). Dependendo da variação de tais parâmetros, e do tipo de carregamento aplicado, o montante de alma pode sofrer colapso por cisalhamento ou por compressão, nesse último caso especialmente quando houver uma força localizada que o comprima.

1.5.2.2 Flambagem do Montante de Alma Devida à Força Cortante

A flambagem do montante da alma devida ao cisalhamento em vigas casteladas, de acordo com Kerdal e Nethercot (1984), é um tipo de instabilidade onde o montante se comporta como uma viga fletida em relação ao seu eixo de maior inércia. O montante pode sofrer flambagem por flexão combinada com torção, com o lado AB sujeito a tensões de tração e o lado CD a tensões de compressão, pois a parte comprimida tende a se deslocar para fora do plano longitudinal do perfil enquanto a parte tracionada tende a permanecer na posição inicial (ver Fig. 1.14). Para Kerdal e Nethercot (1984), esse modo de colapso ocorre geralmente em regime inelástico, após a ocorrência de plastificações significativas.

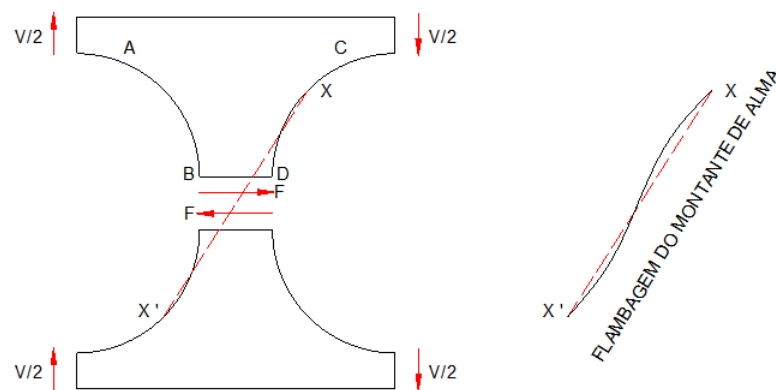


Figura 1.14 – Flambagem do montante de alma devida ao cisalhamento (adaptado de Kerdal e Nethercot, 1984).

A instabilidade do montante de alma é abordada através da consideração da força horizontal V_h localizada no centro do montante. Conforme descrito anteriormente, tal força produz um momento fletor em uma seção situada a uma distância y do eixo da viga que por sua vez produzirá uma tensão normal (ver Fig. 1.15).

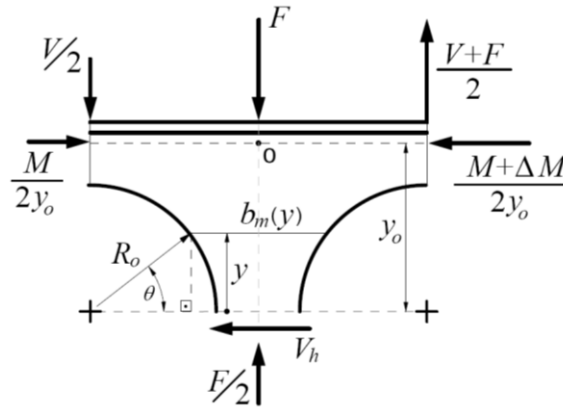


Figura 1.15 – Forças atuantes no montante de alma.

Assim, para o estudo da capacidade resistente, conforme apresentado pela Eq. (1.1), o equilíbrio das forças atuantes em relação ao ponto O resulta em:

$$-V_h y_0 + \frac{V}{2} \frac{p}{2} + \frac{V+F}{2} \frac{p}{2} = 0 \Rightarrow V_h = \left(V + \frac{F}{2} \right) \frac{p}{2y_0} \quad (1.1)$$

Considerando que a parcela $F/2$ é pequena em relação à cortante V , a Eq. (1.1) pode ser reescrita através da Eq. (1.2):

$$V_h = V \frac{p}{2y_0} \quad (1.2)$$

Após uma série de estudos experimentais em vigas casteladas, Zaarour e Redwood (1996) concluíram que esse tipo de colapso está associado às seguintes características geométricas:

- ✓ relação entre altura da abertura (D_0) e altura total da seção (d_g);
- ✓ relação entre altura da abertura (D_0) e largura do montante de alma (b_w);
- ✓ relação entre largura do montante de alma (b_w) e espessura da alma (t_w).

1.5.2.3 Flambagem do Montante de Alma Devida à Compressão

Conforme observado por Kerdal e Nethercot (1984), esse modo de falha ocorre preferencialmente devido a forças concentradas ou pontos de reação em que o montante se comporta como um elemento axialmente comprimido. Ademais, em contraste com a flambagem do montante de alma devida ao cisalhamento, o deslocamento lateral devido à compressão não é acompanhado de torção (ver Fig. 1.16).



Figura 1.16 – Flambagem do montante de alma devida à compressão (Erdal, 2011).

1.5.3 Formação de um Mecanismo Vierendeel

O mecanismo Vierendeel consiste na formação de rótulas plásticas nos cantos das aberturas devidas à presença de força cortante de grande magnitude na viga. Nesse caso, conforme ilustrado na Fig. 1.17, as aberturas sofrem uma distorção, deformando-se como um paralelogramo.



Figura 1.17 – Mecanismo Vierendeel (Tsavdaridis e D’Mello, 2010).

Esse mecanismo Vierendeel se manifesta porque a força cortante produz momentos adicionais – momento de Vierendeel – nos ‘tês’ acima e abaixo das aberturas, conforme ilustrado na Fig. 1.18.

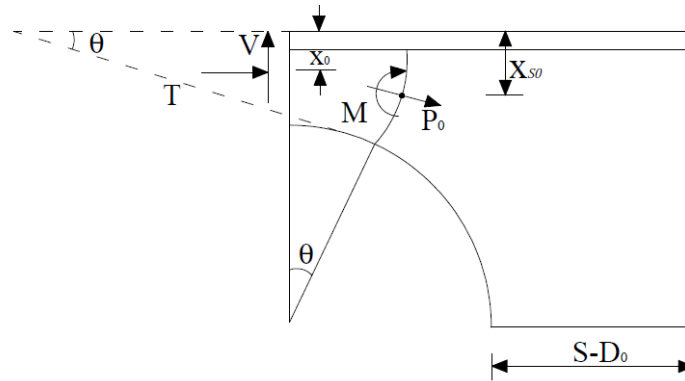


Figura 1.18 – Diagrama de esforços na seção crítica (Olander, 1954).

1.5.4 Flambagem Lateral com Torção

Conforme observado no trabalho de Abreu (2011), o comportamento das vigas celulares à flambagem lateral com torção (FLT) é similar ao das vigas de alma cheia (ver Fig. 1.19). Entretanto, ressalta-se que as propriedades geométricas das vigas alveolares devem ser calculadas no centro das aberturas (Kerdal e Nethercot, 1984).



Figura 1.19 – Flambagem lateral com torção (Erdal, 2011).

1.5.5 Formação de Rótula Plástica

Quando o momento fletor é o esforço predominante, os ‘tês’ superior e inferior escoam simultaneamente por tração e compressão formando uma rótula plástica. Nesse caso, o momento resistente é o próprio momento de plastificação (M_{p0}) correspondente à seção no centro da abertura.

1.5.6 Ruptura do montante na seção da solda

A ruptura na junção das duas metades do perfil, conforme ilustrado na Fig. 1.20, pode ocorrer se o comprimento da mesma não for suficiente para suportar as tensões de cisalhamento nessa região.



Figura 1.20 – Ruptura da solda entre as aberturas (Tsavdaridis e D’Mello, 2011).

1.6 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo estudar os parâmetros e as características que governam a flambagem do montante de alma devido à força cortante em vigas celulares via análise não linear pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Em adição, tem como objetivo estudar e avaliar a validade das formulações analíticas existentes e, caso necessário, propor novos procedimentos considerando a faixa de variação de esbeltez da alma dos perfis I laminados de faces paralelas (série W) fabricados no Brasil.

1.7 Justificativa

A partir dos anos de 1960, principalmente na Europa e nos Estados Unidos, com o surgimento dos computadores, as operações de corte e solda foram otimizadas e o avanço tecnológico proporcionou a reutilização das vigas alveolares, além da criação de novas tipologias geométricas. No Brasil, após 2002, ano do início da laminação de perfis I da série W no país, houve um forte aumento da tendência em se buscar novas soluções construtivas que possibilitassem uma aplicação mais eficiente das estruturas de aço. Entretanto, foi observado que os perfis brasileiros extrapolam a faixa de esbeltez coberta pelos perfis europeus trabalhando em uma faixa onde o seu comportamento ainda não é totalmente conhecido (ver

Fig. 1.21). Além disso, poucos são os estudos referentes às vigas celulares, principalmente no que diz respeito aos modos de colapso.

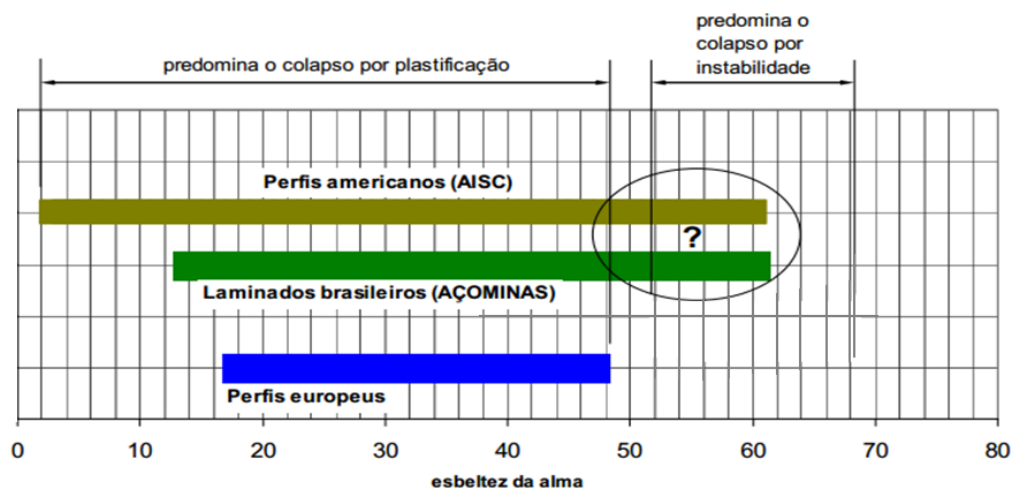


Figura 1.21 – Faixas de variação de esbeltez da alma para perfis europeus e laminados brasileiros (Vieira, 2011).

1.8 Metodologia

Para o cumprimento dos objetivos deste trabalho, as seguintes etapas foram executadas:

- 1) revisão bibliográfica considerando os principais estudos relacionados às vigas alveolares, com destaque para as celulares;
- 2) revisão bibliográfica específica considerando os estudos analíticos, numéricos e experimentais relacionados à flambagem do montante de alma de vigas alveolares, com destaque para as celulares;
- 3) desenvolvimento de um modelo numérico via MEF utilizando o programa ABAQUS (Hibbit *et al.*, 2009) para as vigas celulares considerando as não linearidades física e geométrica;
- 4) validação do modelo numérico através de resultados analíticos, numéricos e experimentais existentes na literatura;
- 5) avaliação do comportamento dos perfis laminados brasileiros através de um estudo paramétrico de acordo com a sua faixa de variação de esbeltez;

- 6) desenvolvimento e validação de um procedimento analítico de cálculo da capacidade resistente de vigas celulares para o estado-limite de flambagem do montante de alma (FMA).

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estudos Relevantes sobre o Colapso de Vigas Alveolares

Diversos estudos foram realizados para a determinação dos modos de colapso, cargas últimas e propriedades geométricas ótimas das vigas alveolares. Entretanto, foi observado que a maioria dos trabalhos desenvolvidos está relacionada às vigas casteladas. Dentre tais estudos, os mais importantes são os trabalhos de Altfillisch *et al.* (1957), Toprac e Cooke (1959), Shelbourne (1966), Delesques (1968), Husain e Speirs (1971), Kerdal e Nethercot (1984), Leonart (1988), Ward (1990), Harper (1994), Zaarour e Redwood (1996), Redwood e Demirdjian (1998) e Cimadevila *et al.* (2000).

Altfillisch *et al.* (1957) investigaram o comportamento estrutural e os modos de colapso das vigas casteladas nos regimes elástico e inelástico. Foram ensaiadas três vigas, todas submetidas a duas cargas concentradas dispostas simetricamente, tendo sido observada a flambagem da mesa devida à compressão. Além disso, concluíram que a expansão da altura das vigas pode acarretar um aumento de 10% a 35% do momento resistente em comparação com as vigas originais.

Toprac e Cooke (1959) investigaram a capacidade de carregamento e os modos de colapso em nove vigas casteladas. Nessa investigação, resultados experimentais foram comparados aos resultados analíticos com o objetivo de determinar a razão de expansão ótima para cada viga. Com relação aos modos de colapso, das vigas ensaiadas, duas apresentaram flambagem lateral com torção, quatro flambagem local da mesa superior e duas mecanismo Vierendeel. O resultado de um dos experimentos não foi divulgado.

Em um estudo experimental, Shelbourne (1966) observou a interação entre força cortante e momento fletor no comportamento das vigas casteladas sob variadas combinações de carregamentos. Dos sete ensaios realizados, apenas dois sofreram colapso devido a mecanismos de flexão.

Delesques (1968) apresentou um modelo analítico para a determinação da força cortante crítica que causa a flambagem do montante de alma devida ao cisalhamento em vigas casteladas. Inicialmente, o autor assumiu um comportamento indefinidamente elástico para a instabilidade. Entretanto, após observar os resultados experimentais, concluiu que o mais provável era a ocorrência da flambagem em regime inelástico.

Husain e Speirs (1971) estudaram, através de um programa experimental, a ruptura da solda entre as aberturas em seis vigas casteladas simplesmente apoiadas submetidas a diversas condições de carregamento. Foi observado que a ruptura do cordão de solda é frágil e acompanhada de grande liberação de energia.

Em um programa experimental, Kerdal e Nethercot (1984) estudaram alguns modos de colapso em vigas casteladas. Dentre esses modos, estão o mecanismo Vierendeel, a flambagem do montante de alma devida à força cortante e a ruptura da solda entre as aberturas. Outros modos como a ruptura devido à formação de rótulas plásticas e a flambagem lateral com torção são similares aos fenômenos observados em vigas de alma cheia.

O primeiro artigo a se referenciar às vigas celulares foi publicado pelo arquiteto Leonart (Leonart, 1988). Em seu texto, além de descrever e exemplificar alguns tipos de vigas alveolares, ele afirmou, evidentemente com base na realidade da época, que as vigas com aberturas circulares apresentavam pouca aceitação na prática.

Ward (1990) estudou o comportamento do montante de alma de vigas celulares de aço e mistas de aço e concreto com perfis celulares com base em um estudo paramétrico envolvendo análise não linear via MEF. Curvas para o dimensionamento do montante de alma foram geradas a partir desses resultados.

Harper (1994) observou, por meio de um estudo analítico, que para um melhor desempenho das vigas celulares o diâmetro do alvéolo (D_0) deve variar entre 0,57 e 0,80 da altura da viga celular (d_g) e o espaçamento entre as aberturas (p) de 1,08 a 1,50 D_0 . Adicionalmente, a

relação entre a altura do perfil expandido e altura do perfil original, denominada razão de expansão (d_g/d), deve variar entre 1,25 e 1,75.

Através de um programa experimental, Zaarour e Redwood (1996) examinaram a flambagem do montante de alma por cisalhamento em vigas casteladas de aço simplesmente apoiadas. Após o ensaio, esse modo de colapso foi observado em dez das quatorze vigas ensaiadas.

Também em um programa experimental, Redwood e Demirdjian (1998) estudaram a flambagem do montante de alma e investigaram os efeitos da relação momento/cisalhamento no modo de colapso de vigas casteladas. Todas as vigas ensaiadas apresentaram como modo de colapso a flambagem do montante de alma.

Cimadevila *et al.* (2000) apresentaram uma metodologia de cálculo para vigas casteladas baseada nas tensões e deformações admissíveis. Além disso, inicialmente, de uma maneira simplificada, há uma breve introdução das tipologias das vigas alveolares mais comuns, dentre elas as celulares.

Atualmente, no Brasil, a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), conjuntamente com a Universidade Federal de Viçosa (UFV), vem apresentando diversos trabalhos relacionados às vigas alveolares no âmbito teórico-numérico e experimental.

Abreu (2011) avaliou o comportamento de vigas celulares simétricas com foco na flambagem lateral com torção. Considerando os resultados numéricos, foi proposta uma nova metodologia de cálculo baseada na ABNT NBR 8800:2008.

Em um estudo numérico, Vieira (2011) estudou a influência dos parâmetros geométricos e dos tipos de carregamentos sobre a flambagem do montante de alma em vigas casteladas. Para vãos longos e carregamento uniformemente distribuído, foi observado que esse modo de colapso é menos frequente dentre os outros.

Bezerra (2012) observou o comportamento de vigas casteladas simétricas segundo a flambagem lateral com torção. Considerando os resultados numéricos, também foi proposta uma nova metodologia de cálculo baseada na ABNT NBR 8800:2008.

Silveira (2011) avaliou o comportamento plástico das vigas alveolares casteladas e celulares através de um estudo teórico-numérico. Dentre outras constatações, foi observado que a força cortante exerce grande influência na capacidade última. Além disso, para as vigas celulares, a formulação proposta considerando a flambagem do montante de alma como estado limite último, foco deste trabalho, inconsistentemente, possui parâmetros relacionados às vigas casteladas. Desse modo, a sua aplicação torna-se inviável.

Ferrari (2013) desenvolveu um estudo numérico com o intuito de investigar o comportamento de vigas alveolares (casteladas e celulares) mistas de aço e concreto com base em resultados experimentais disponíveis na literatura. O modelo numérico desenvolvido mostrou-se adequado, pois os modos de colapso obtidos nas análises apresentaram boas aproximações com os valores observados na literatura, além de representar com êxito a interação parcial e total entre o aço e o concreto.

2.2 Estudos Relacionados à Flambagem do Montante de Alma de Vigas Celulares

2.2.1 Estudos Analíticos

A primeira metodologia desenvolvida para o estudo da flambagem do montante de alma em vigas celulares foi apresentada por Ward (1990). Em seu estudo, o modo de colapso é governado por um mecanismo de flexão (causado pelo desenvolvimento de rótulas plásticas) ou por flambagem. Assim, visando o desenvolvimento de curvas para o dimensionamento do montante de alma, foram realizadas diversas análises numéricas via MEF considerando comportamento elastoplástico do material. De acordo com o autor, esse tipo de colapso foi assumido como dependente dos detalhes geométricos do montante de alma. Como limitação, somente seções transversais simétricas (aberturas dispostas no centro da alma) foram abordadas.

Lawson *et al.* (2002) abordou uma nova metodologia para a análise da flambagem do montante de alma em vigas celulares e vigas celulares mistas de aço e concreto simétricas. Essa metodologia foi baseada em uma zona de compressão (*'strut' model*) calibrada através de análises via método dos elementos finitos. As tensões de compressão e tração devidas à força horizontal no meio do montante de alma, conforme ilustrado na Fig. 2.1, variam no

entorno das aberturas. Assim, a força horizontal pode ser determinada por equilíbrio das forças horizontais, ou de momentos, ou ainda por meio do ângulo entre essas tensões.

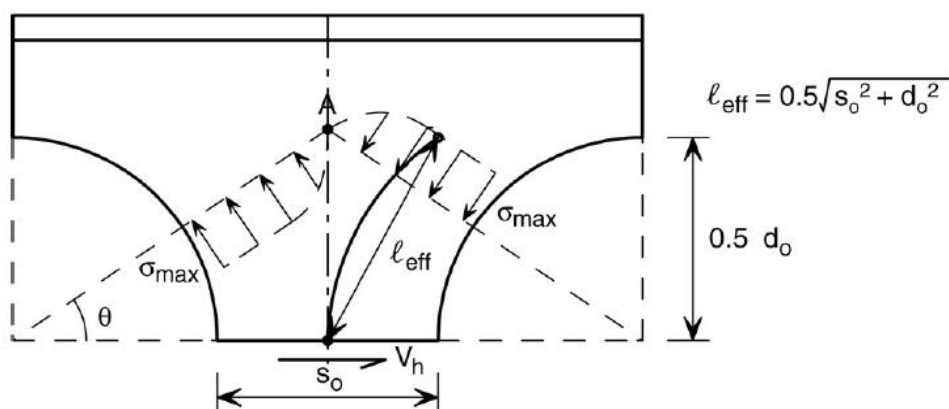


Figura 2.1 – Tensões no entorno do montante de alma (Lawson *et al.*, 2002).

Com base no método do laço, Lawson *et al.* (2006) desenvolveram um procedimento de cálculo para a flambagem do montante de alma em vigas celulares e vigas celulares mistas de aço e concreto assimétricas.

2.2.2 Estudos Experimentais e Numéricos

Sherbourne (1966) observou a interação entre forças cisalhantes e momentos fletores no comportamento das vigas casteladas sob variadas combinações de carregamentos. Sete vigas submetidas a condições de cisalhamento constante no entorno da castelação central e momento puro foram ensaiadas. Dessas vigas, duas apresentaram flambagem do montante de alma como modo de colapso, sendo uma em zona de cisalhamento máximo (considerando dois pontos de aplicação de cargas) e outra sob efeito de cisalhamento constante no entorno da castelação central.

Halleux (1967) realizou testes destrutivos em cinco vigas casteladas simplesmente apoiadas com padrões geométricos distintos considerando a aplicação de duas cargas concentradas nos terços médios do vão. As vigas sofreram colapso devido ao mecanismo Vierendeel.

Bazile e Texier (1968) ensaiaram duas séries de vigas casteladas visando à observação do comportamento das mesmas segundo diferentes propriedades geométricas e razões de expansão. Todas as vigas foram simplesmente vinculadas e testadas considerando a atuação de oito cargas concentradas. Foi observado que três das seis vigas ensaiadas apresentaram

como modo de colapso a flambagem do montante de alma em região de cisalhamento máximo.

Em uma série de testes, Kerdal e Nethercot (1984) investigaram os modos de colapso e seus fatores condicionantes em vigas casteladas. Foi observado que a flambagem do montante de alma está associada à geometria das vigas, assim como ao tipo de carregamento e vinculação.

Duas grandes séries de ensaios destrutivos foram realizadas pela primeira vez para vigas celulares sobre supervisão do *British Steel Construction Institute* (BSCI). A primeira série foi realizada pela Universidade de Bradford em 1955 e a segunda pela Universidade de Leeds em 1988. Os resultados obtidos não foram publicados.

Devido ao surgimento de novas tipologias de vigas alveolares, Zaarour e Redwood (1996) ressaltaram a importância de novos estudos do comportamento estrutural de vigas com essas novas tipologias. Com isso, foram realizados doze ensaios em vigas casteladas *Bantam* (perfis laminados leves fabricados pela *Chaparral Steel*), com o intuito de observar a flambagem do montante de alma, juntamente com análises numéricas inelásticas via MEF. A instabilidade foi observada em dez casos. De modo geral, pode-se considerar que os modelos numéricos apresentaram resultados de deslocamentos satisfatórios. Entretanto, devido a algumas aproximações, os resultados de cargas últimas observados foram superiores aos valores experimentais. Com base nos resultados, considerando o método das diferenças finitas, foi proposto um processo gráfico como ferramenta auxiliar para a estimativa da capacidade resistente das vigas casteladas.

Redwood e Demirdjian (1998) estudaram a flambagem local da alma por cisalhamento em vigas casteladas em um ensaio com quatro perfis com seções transversais e configurações de aberturas idênticas, variando apenas o vão. O maior foco do experimento era investigar a flambagem do montante de alma e estudar a influência da interação momento-cisalhamento na instabilidade. Adicionalmente, foram desenvolvidos modelos numéricos utilizando as mesmas configurações geométricas dos modelos experimentais. Considerando a análise elástica de bifurcação via MEF, comparativamente aos modelos experimentais, foi observado que todas as cargas críticas numéricas foram inferiores aos valores experimentais. A variação média foi de 9%. Além disso, os resultados demonstraram que a utilização de uma análise elástica para a estimativa da resistência do montante de alma submetido a forças de cisalhamento elevadas é válida.

Warren (2001) avaliou a confiabilidade do método apresentado pelo *The Steel Construction Institute* (SCI) em oito vigas celulares com a proposta de melhorá-lo através de uma metodologia simples, caso necessário. Foi proposta também uma nova metodologia de análise que determina os modos de colapso (e as respectivas cargas últimas) e o estado-limite de serviço relacionado aos deslocamentos. Os resultados obtidos experimentalmente foram utilizados para validar os modelos numéricos. De acordo com os resultados experimentais, todas as vigas apresentaram como modo de colapso o mecanismo Vierendeel, exceto uma delas que sofreu flambagem do montante de alma. Adicionalmente, foi observado que em todos os modelos numéricos as cargas últimas foram em média 19% superiores aos valores experimentais. Outro ponto relevante foi a observação de que grandes deformações plásticas ocorreram antes do colapso das vigas nos modelos numéricos, enquanto nos modelos experimentais somente pequenas deformações foram observadas.

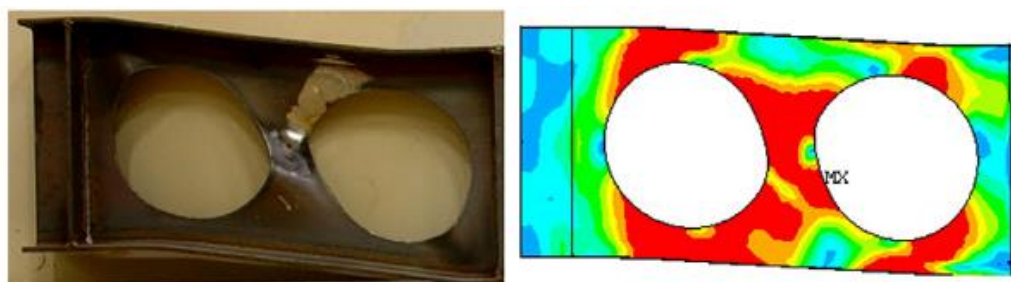
Os resultados com relação às abordagens teóricas demonstraram que a metodologia do SCI segundo Ward (1990) é extremamente conservadora prevendo uma carga média de 76% dos valores observados experimentalmente. Dos métodos propostos, o dimensionamento através de gráficos (*design charts*) mostrou-se mais preciso e de fácil utilização, além de ser aplicável a qualquer tipo de carregamento.

Como limitação, o programa computacional e o aplicativo de análise (*spreadsheet*) – derivado do programa computacional – podem ser utilizados apenas em vigas celulares simplesmente apoiadas sujeitas a cargas concentradas. Pode-se observar também que os gráficos desenvolvidos para o dimensionamento não identificam problemas associados a efeitos localizados causados pelas cargas concentradas. Adicionalmente, uma das complexidades dessa metodologia foi estabilizar um comprimento efetivo razoável para a zona de compressão devido ao complexo estado de tensões composto no entorno das aberturas.

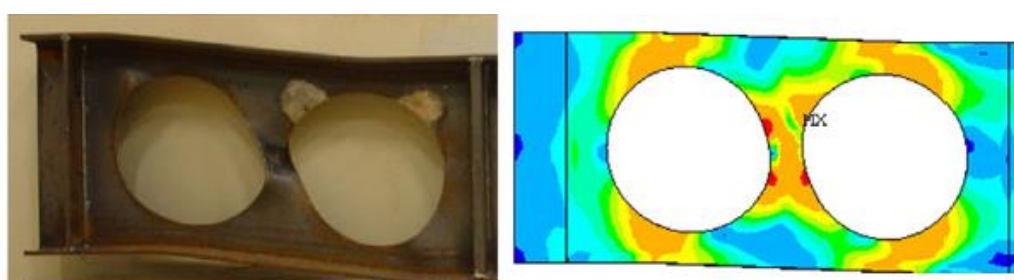
Bake (2010) avaliou o comportamento de vigas celulares mistas de aço e concreto à temperatura ambiente e em situação de incêndio. Dentre outras observações, o autor sugere que os trabalhos futuros avaliem a capacidade resistente à flambagem do montante de alma submetido a elevadas temperaturas.

Tsavdaridis e D’Mello (2010) investigaram e compararam, através de um programa experimental e modelos desenvolvidos em elementos finitos, o comportamento de vigas alveolares com novas tipologias de aberturas quanto à flambagem do montante de alma.

Conforme ilustrado na Fig. 2.2, com relação às vigas celulares A1 e B1, os modelos numéricos apresentaram resultados muito próximos aos obtidos experimentalmente. Em ambos foram observados elevados níveis de tensões nos montantes de alma.



a) – Modelo experimental A1 e modelo numérico.



b) – Modelo experimental B1 e modelo numérico.

Figura 2.2 – Modelos experimentais A1 e B1 após ensaios e tensões de von-Mises dos modelos numéricos (Tsavdaridis e D’Mello, 2010).

Comparando-se os experimentos A1 e B1 observa-se que a espessura do montante de alma afeta a capacidade das vigas celulares.

Tsavdaridis e D’Mello (2011) apresentaram técnicas para a modelagem em elementos finitos de vigas alveolares considerando a flambagem do montante de alma. Para tal, foram ensaiadas duas vigas alveolares, uma castelada e a outra celular, sendo essa última foco da análise. Similarmente aos modelos experimentais, foram desenvolvidos dois modelos em elementos finitos no programa ANSYS. O primeiro modelo, para a determinação da carga crítica de flambagem, utiliza uma solução linearizada através de autovalores (que fornecem as cargas de flambagem) e autovetores (que fornecem os modos de flambagem). Já o segundo modelo utiliza uma análise não linear incremental através de ‘cargas de gatilho’ (*trigger load*) que induzem a peça à instabilidade.

Os resultados apresentaram valores de cargas superestimados em decorrência do limitado número de nós (quatro) dos elementos, além da utilização da integração reduzida minimizando problemas numéricos como o efeito de bloqueio do cisalhamento (*shear*

locking) em elementos de casca. Adicionalmente, foi observado que a análise via MEF é uma boa escolha quando a teoria de flambagem tradicional é de difícil solução. Mais importante ainda, todos os fatores que afetam a estabilidade das vigas podem ser incorporados nos modelos numéricos gerando uma boa previsão do comportamento pós-flambagem por meio da solução linearizada (autovalores) e perturbação (*trigger load*), com forças ou deslocamentos impostos aos modelos.

Ellobody (2011) propôs o desenvolvimento de um modelo tridimensional em elementos finitos considerando a não linearidade geométrica e de material e destacando a interação entre os modos de flambagem em vigas celulares. Um extensivo estudo paramétrico foi desenvolvido para investigar o comportamento das cargas últimas e dos modos de flambagem das mesmas segundo diferentes geometrias da seção transversal, vãos e esbeltezes. Diferentemente dos outros trabalhos apresentados, foi observada a consideração de tensões residuais nos modelos numéricos. Segundo o autor, pode-se utilizar a mesma distribuição de tensões recomendada para perfis I duplamente simétricos, assumindo que o processo de corte seja cuidadosamente conduzido.

Os resultados demonstraram que as vigas celulares que apresentaram como modo de colapso a flambagem distorcional da alma associada à flambagem do montante de alma apresentaram uma redução considerável da carga última. Ademais, foi observado que a utilização de aço de alta resistência contribuiu para um aumento considerável das cargas últimas nas vigas celulares menos esbeltas.

Erdal (2011) avaliou a capacidade última de vigas celulares considerando a variação das propriedades geométricas. Similarmente aos modelos experimentais, para fins de comparação, foram desenvolvidos modelos em elementos finitos considerando as não linearidades geométrica e física. Esses modelos também foram utilizados para determinar as tensões, deformações e deslocamentos nas vigas celulares, além de investigar os modos de colapso, principalmente a flambagem do montante de alma.

A flambagem do montante de alma foi observada em seis experimentos, nos quais as vigas foram apoiadas lateralmente (ver Fig. 2.3). A instabilidade foi associada à carga diretamente aplicada no montante de alma, à sua geometria e às forças horizontais internas.



Figura 2.3 – Flambagem do montante de alma na série NPI_CB_280 (Erdal, 2011).

Em comparação com os resultados experimentais, foi observado que os deslocamentos nas mesas no modelo numérico foram em torno de 10% menores que os valores obtidos experimentalmente.

3

ANÁLISE NUMÉRICA

3.1 Considerações Iniciais

Na elaboração dos modelos numéricos procurou-se representar com fidelidade a geometria e as características físicas dos materiais empregados. Posteriormente, através de um estudo de convergência e sensibilidade de malha, os modelos foram validados por meio de resultados numéricos e experimentais existentes na literatura. Após sua calibração e aferição, foi feita a avaliação do comportamento dos perfis laminados brasileiros da série W através de um estudo paramétrico de acordo com a sua faixa de variação de esbeltez.

Neste trabalho, os modelos numéricos foram desenvolvidos no programa ABAQUS (Hibbit *et al.*, 2009) versão 6.10 que apresenta como base o MEF. De maneira simplificada, o procedimento de resolução é ilustrado na Fig. 3.1. Para uma simulação mais realística, foram consideradas as não linearidades física e geométrica.



Figura 3.1 – Procedimento simplificado de resolução de um problema via MEF.

3.2 Discretização e Condições de Contorno

Devido à complexidade do comportamento do fenômeno analisado, é necessária a utilização de um elemento plano que incorpore comportamentos associados de flexão e de membrana. Nesse contexto, e sabendo-se que as espessuras das mesas e da alma são significativamente inferiores ao comprimento da viga, a utilização de elementos de casca para a representação do modelo é adequada. A Fig. 3.2 apresenta a geometria desses elementos, assim como a orientação positiva das normais.

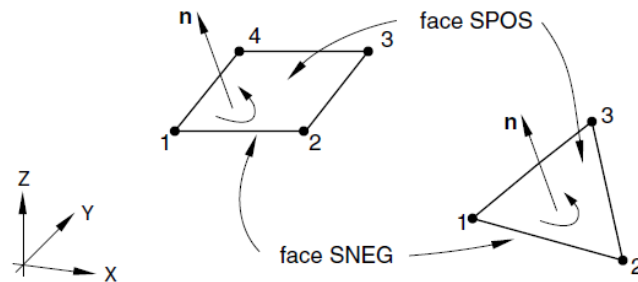
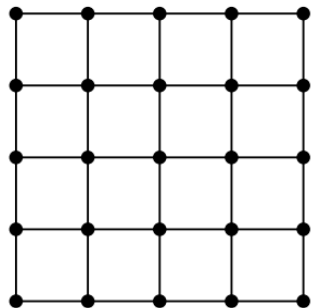


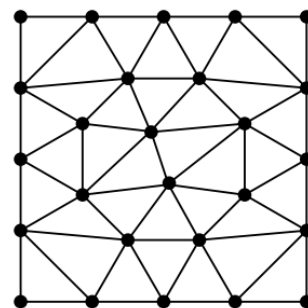
Figura 3.2 – Elementos de casca retangular de quatro nós triangular de três nós (Hibbit *et al.*, 2009).

Todos os elementos apresentados possuem seis graus de liberdade por nó (três de translação e três de rotação). Adicionalmente, nesse caso, devido ao comportamento do montante de alma, optou-se por utilizar integração reduzida para minimizar problemas numéricos como o efeito de bloqueio do cisalhamento (*shear locking*) em elementos de casca.

Inicialmente, o modelo foi discretizado com elementos S4R (elemento retangular de quatro nós com integração reduzida) em uma malha não estruturada. Na discretização utilizada, ao contrário de uma malha estruturada, o número de elementos que rodeiam os nós dos vértices não é constante (ver Fig. 3.3).



a) – Malha estruturada.



b) – Malha não-estruturada.

Figura 3.3 – Tipos de malha.

Mesmo sabendo-se que a utilização de uma malha estruturada minimiza problemas de não convergência devido à distorção excessiva dos elementos, por simplicidade de discretização, optou-se pela utilização de uma malha não estruturada. Assim, de modo a evitar problemas numéricos, a dimensão máxima admitida dos lados dos elementos é da ordem de 1,0 cm (ver Fig. 3.4).

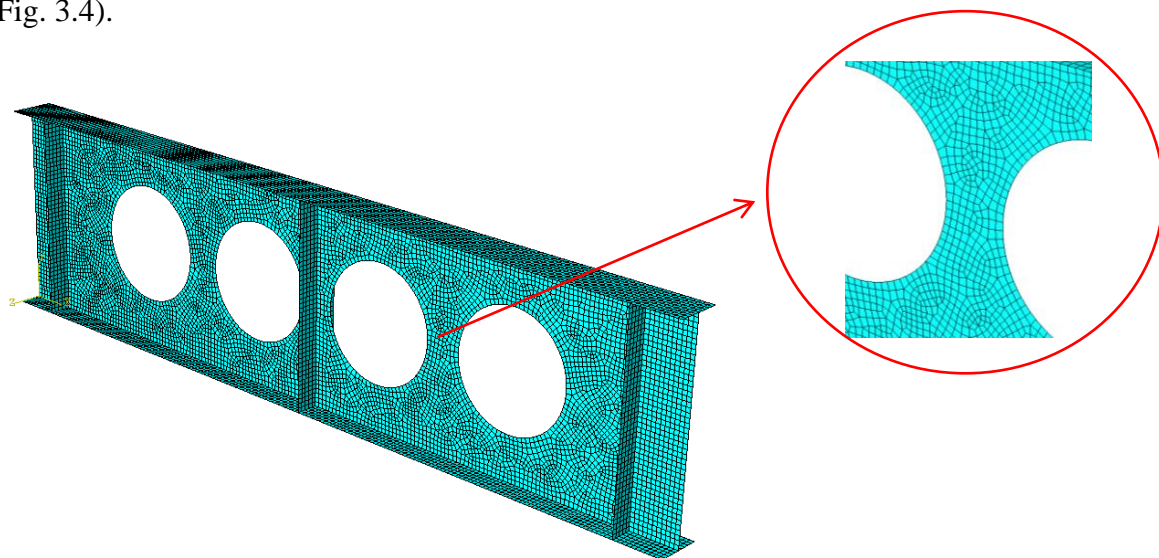


Figura 3.4 – Discretização do modelo em elementos S4R com malha não estruturada.

Com relação às condições de contorno, a viga, considerada simplesmente apoiada, foi submetida a uma carga concentrada aplicada sobre o enrijecedor central. Além disso, de acordo com a Fig. 3.5, de modo a prevenir a flambagem lateral com torção, a viga foi contida lateralmente nos apoios e no ponto de aplicação da carga.

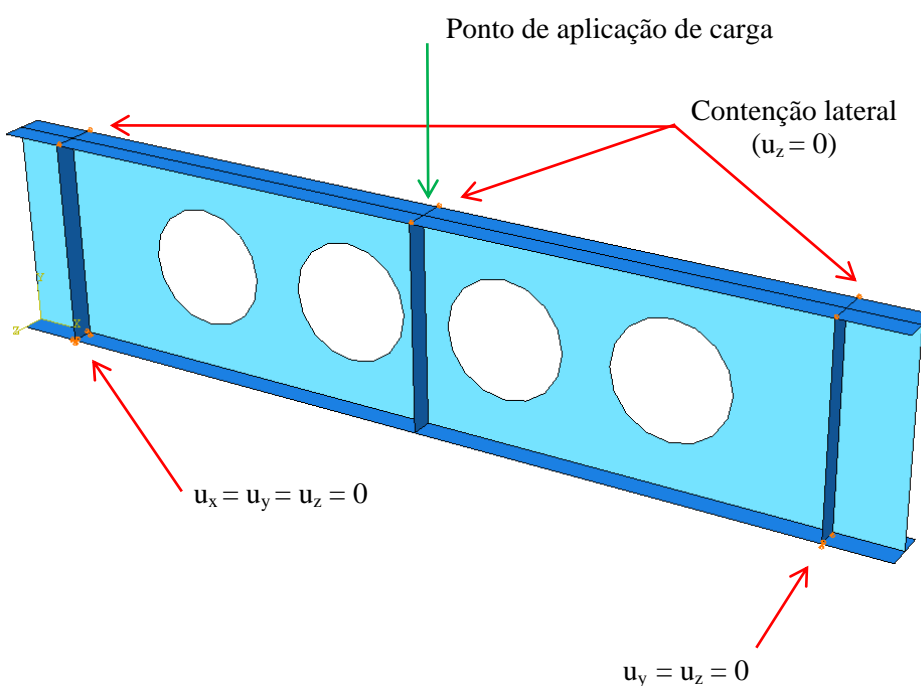


Figura 3.5 – Condições de contorno.

3.2.1 Análise Linearizada de Estabilidade

A carga crítica de flambagem elástica foi estimada através de uma análise numérica pelo MEF. Os autovalores (cargas críticas) associados aos autovetores (modos de flambagem) permitiram uma avaliação do comportamento da estrutura considerando o tipo de carregamento e as condições de contorno a que essa foi submetida. De modo geral, apenas o menor autovalor é de interesse. Ademais, nesse tipo de análise as não linearidades físicas não são incorporadas ao modelo.

3.2.2 Consideração da não Linearidade Geométrica

A não linearidade geométrica foi considerada através da introdução das imperfeições geométricas iniciais no modelo. Trata-se de perturbações aplicadas no modelo elástico (geometricamente “perfeito”) com o intuito de se observar o comportamento pós-flambagem da estrutura. Tais imperfeições são baseadas nos modos de flambagem (previamente determinados na análise linearizada de estabilidade) e funcionam como um ‘gatilho’ para iniciar a análise não linear incremental.

Para os problemas abordados neste trabalho, em concordância com Vieira (2011) e Ferrari (2013), foi utilizado aqui o valor de imperfeição igual a 1/2000 da altura total da viga celular. Entretanto, com o avanço das pesquisas, acredita-se que novos valores possam ser utilizados.

3.2.3 Consideração da não Linearidade Física

Através da análise não linear pode-se estimar a carga máxima resistente de uma determinada estrutura sem que esta se torne instável ou entre em colapso. Para tal, além da consideração das imperfeições geométricas, também foram consideradas as não linearidades do material através do diagrama trilinear elastoplástico proposto por Earl (1999) e utilizado por diversos pesquisadores, como Castro e Silva (2006), conforme ilustrado na Fig. 3.6.

O aço estrutural considerado foi o ASTM A572-Grau 50 (usado normalmente na fabricação dos perfis laminados brasileiros da série W), que possui resistência ao escoamento f_y igual a 345 MPa e resistência à ruptura f_u igual a 450 MPa, com o módulo de elasticidade E suposto igual a 200.000 MPa. As deformações correspondentes ao final de cada zona foram retiradas

do diagrama real tensão versus deformação desse aço, conforme Earl (1999), de modo que ε_{st} , ε_b e ε_u (ver Fig. 3.6) são iguais a 0,01726, 0,05394 e 0,1519, respectivamente.

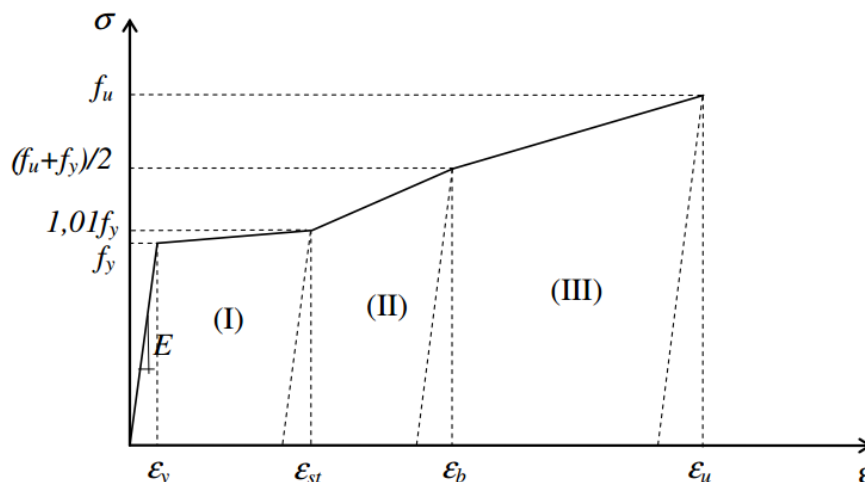


Figura 3.6 – Diagrama trilinear elastoplástico (Earl, 1999).

Para a determinação das deformações plásticas, devem-se utilizar três propriedades que caracterizam o comportamento do material:

- ✓ superfície de escoamento – especifica o estado de tensões multiaxial correspondente ao início do escoamento. Para o aço foi considerada a função de escoamento de von Mises;
- ✓ regra de fluxo – define a propagação das deformações plásticas no contínuo através da relação tensão e deformação. Utiliza como base uma superfície chamada superfície potencial;
- ✓ regra de encruamento – especifica como a função de escoamento é modificada após o material ter atingido o escoamento. Neste trabalho, se tratando de um caso bidimensional, considera-se o modelo de encruamento isotrópico.

Em uma análise não linear, para cada incremento de carga, devem-se verificar quais regiões sofreram plastificação para que essas possam ter as rigidezes atualizadas, assim como toda a estrutura.

Desse modo, nesse incremento de carga, sabendo-se que as tensões calculadas se situam fora do volume limitado pela superfície de escoamento, deve-se determinar a real condição da estrutura através das três propriedades descritas.

3.2.4 Processo Incremental e Iterativo de uma Análise não Linear

A solução de um problema não linear acontece através da resolução das equações de equilíbrio não lineares. O processo é iterativo, ou seja, passo a passo. Simultaneamente à atualização da matriz de rigidez, incrementa-se o carregamento aplicado a fim de definir o novo caminho de equilíbrio do modelo. Neste estudo foi considerado o método de Riks que apresenta uma implementação do método de Newton-Raphson, cuja solução é obtida por um caminho único de equilíbrio através do comprimento do arco constante (*arc-length*) num espaço definido pelas variáveis de deslocamento (u) e de carga (P). Esse método também pode ser utilizado em casos em que a carga diminui e os deslocamentos aumentam (*snap-through*) ou a carga e os deslocamentos diminuem (*snap-back*) (ver Fig. 3.7), ao contrário do método de Newton-Raphson que para esses casos de instabilidade torna-se uma ferramenta insuficiente. Entretanto, devido ao maior número de iterações necessárias para a sua solução (pode ser considerado que o método é mais ‘caro’ computacionalmente), o método de Riks deve ser utilizado somente em situações onde a aplicação do método de Newton-Raphson não pode ser aplicado.

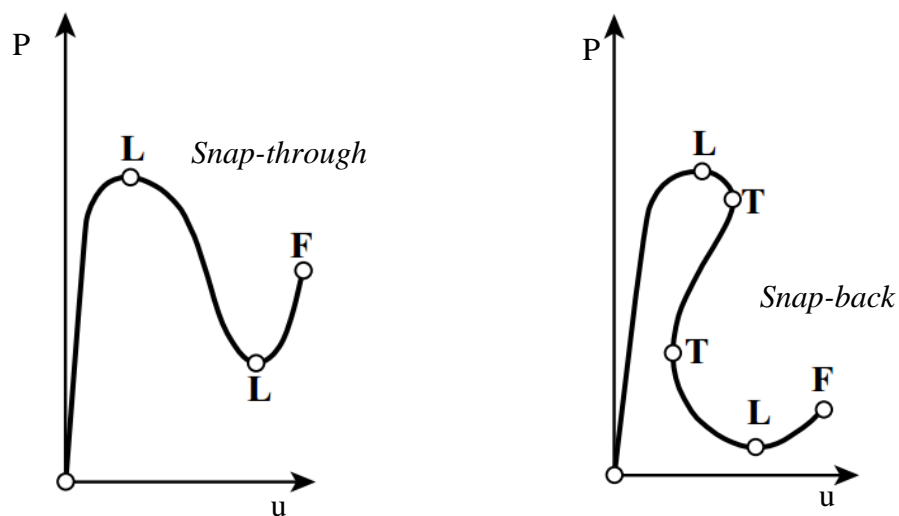


Figura 3.7 – Instabilidades solucionadas pelo método de Riks.

Após a primeira iteração, a acurácia e a eficiência da solução são verificadas através do critério de convergência que pode ser baseado em deslocamentos, cargas ou energia. Entretanto, com o intuito de assegurar uma resposta precisa e consistente, recomenda-se uma combinação dos três critérios. Em adição, ao utilizar uma análise via MEF, deve-se salientar que a utilização de elementos distorcidos compromete a convergência da análise, pois a cada

incremento de carga o erro tende a aumentar. Desse modo, a análise pode ser interrompida devido às deformações excessivas nos elementos.

De maneira simplificada, a metodologia de solução de uma análise não linear pode ser interpretada através do fluxograma ilustrado na Fig. 3.8.

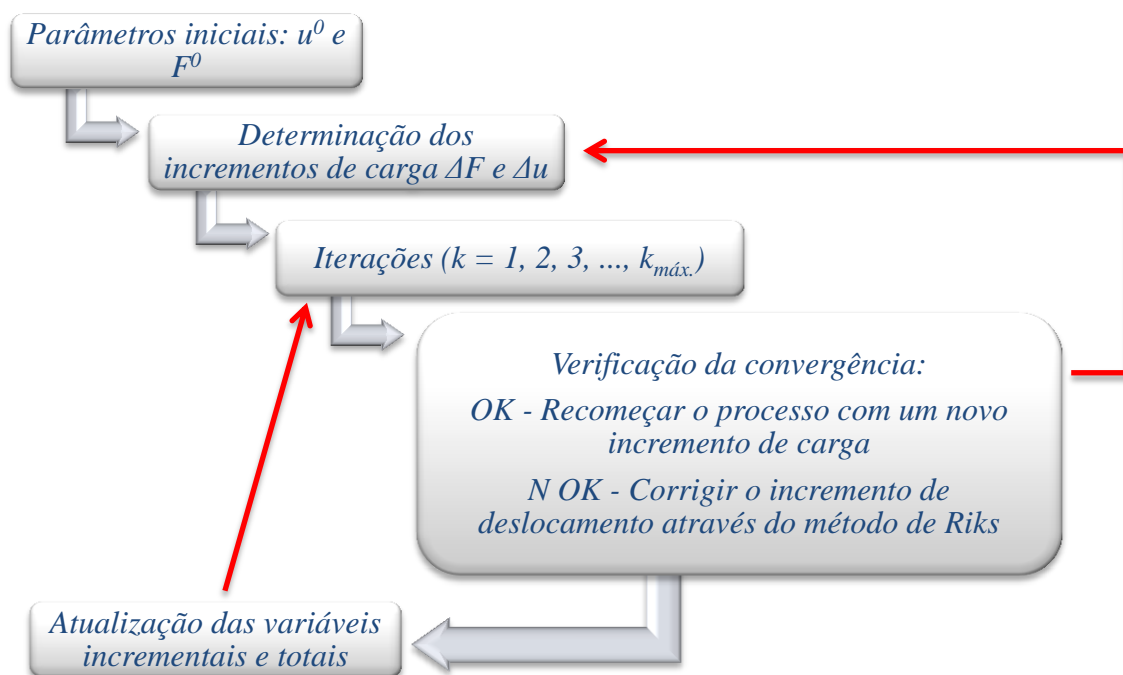


Figura 3.8 – Metodologia simplificada de uma análise não linear.

3.2.5 Validação do Modelo Numérico

Para a utilização do modelo numérico desenvolvido neste trabalho, primeiramente, foi feita a sua aferição com base em resultados experimentais encontrados na literatura. Nesse contexto, foram consideradas as viga celulares NPI_240_CB, 4B e B1 ensaiadas por Erdal (2011), Warren (2001) e Tsavdaridis e D’Mello (2010), respectivamente. As dimensões são apresentadas na Tab. 3.1. Maiores detalhes sobre os programas experimentais estão disponíveis nas respectivas referências.

Tabela 3.1 – Propriedades geométricas das vigas celulares

| Modelo | d_g (mm) | D_o (mm) | p (mm) | t_w (mm) | b_f (mm) | t_f (mm) | L (mm) |
|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|----------|
| NPI_240_CB | 355,6 | 251,0 | 344,0 | 8,7 | 106,0 | 13,1 | 2846 |
| 4B | 463,2 | 325,0 | 400,0 | 5,8 | 101,6 | 8,0 | 7400 |
| B1 | 449,8 | 315,0 | 378,0 | 7,6 | 152,4 | 10,9 | 1900 |

Considerando as propriedades físicas dos materiais empregados nos ensaios, para as vigas celulares NPI_240_CB, admitiu-se o aço com módulo de elasticidade igual a 185.000 MPa, coeficiente de Poisson igual a 0,3; resistência ao escoamento igual a 290 MPa e resistência à ruptura igual 405 MPa. Para o modelo 4B, as propriedades físicas da alma e das mesas foram representadas através dos diagramas bilineares elastoplásticos ilustrados nas Figs. 3.9 e 3.10.

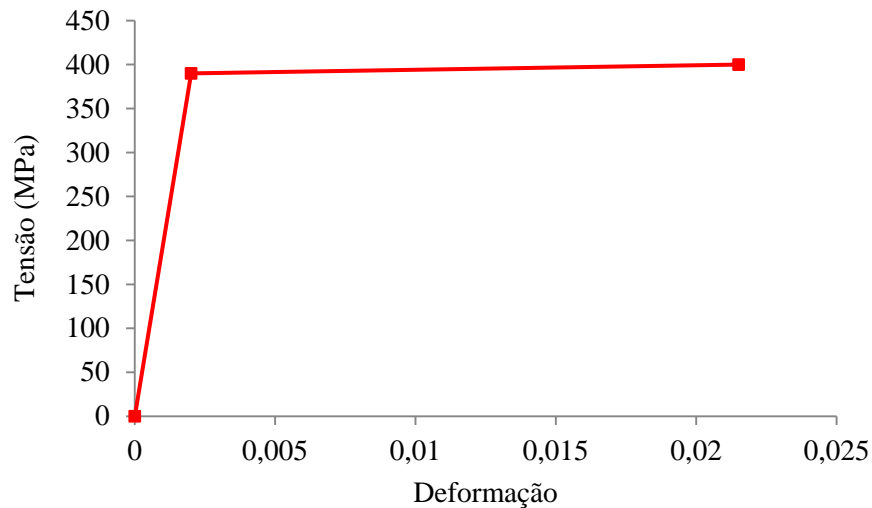


Figura 3.9 – Diagrama bilinear elastoplástico da alma para o modelo 4B.

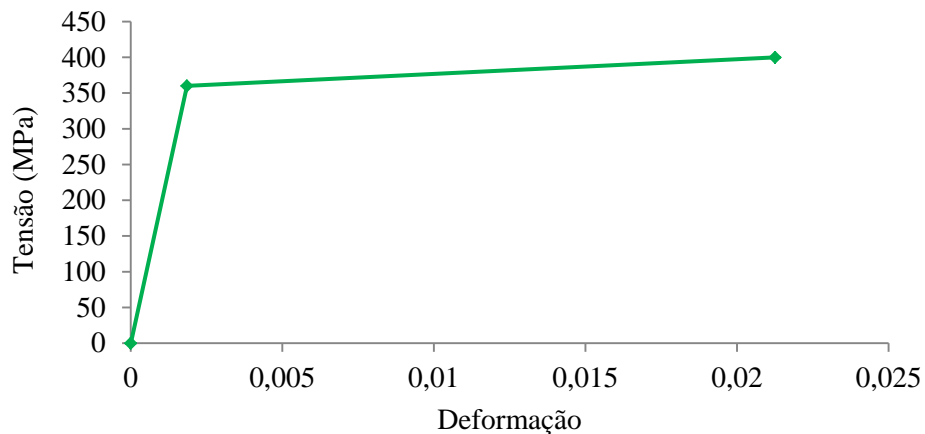


Figura 3.10 – Diagrama bilinear elastoplástico das mesas para o modelo 4B.

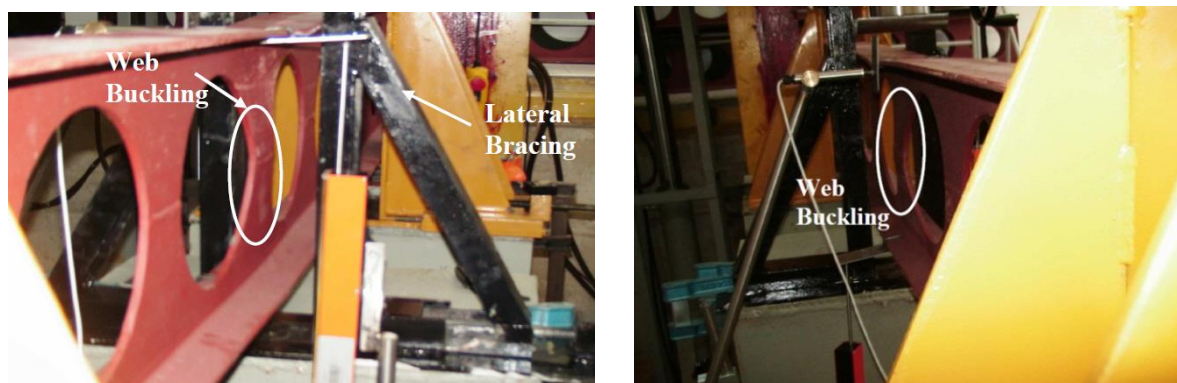
As propriedades físicas da viga celular B1 foram determinadas através de ensaio de tração. Assim, admitiu-se o aço com módulo de elasticidade igual a 200.000 MPa, coeficiente de Poisson igual a 0,3; resistência ao escoamento igual a 355 MPa e resistência à ruptura igual 480 MPa.

Os valores da carga última deste trabalho foram comparados aos valores obtidos experimentalmente e numericamente por Erdal (2011), Warren (2001) e Tsavdaridis e

D’Mello (2010) (ver Tabs. 3.2, 3.3 e 3.4). Foi observado que apenas o modelo reproduzido do trabalho Warren (2011) apresentou diferenças significativas. Entretanto, os próprios valores obtidos pelo autor foram divergentes. Os modelos reproduzidos dos trabalhos de Erdal (2011) e Tsavdaridis e D’Mello (2010) apresentaram boas aproximações com uma diferença máxima de 9,8%. Além disso, conforme ilustrado nas Figs. 3.11 a 3.21, além das curvas carga *versus* deslocamento, as configurações deformadas reproduzidas neste trabalho são muito próximas às obtidas pelos trabalhos originais. Assim, considerou-se válido o modelo numérico desenvolvido.

Tabela 3.2 – Comparação entre cargas últimas deste trabalho e Erdal (2011).

| Modelo | P_{ult} (kN) |
|--|----------------|
| Modelo experimental NPI_240_CB_3 (Erdal, 2011) | 284,11 |
| Modelo experimental NPI_240_CB_4 (Erdal, 2011) | 286,12 |
| Modelo numérico (Erdal, 2011) | 280,00 |
| Este trabalho | 282,50 |



a) – Modelo experimental NPI_240_CB_3. b) – Modelo experimental NPI_240_CB_4.

Figura 3.11 – Modos de colapso dos modelos experimentais NPI_240 (Erdal, 2011).

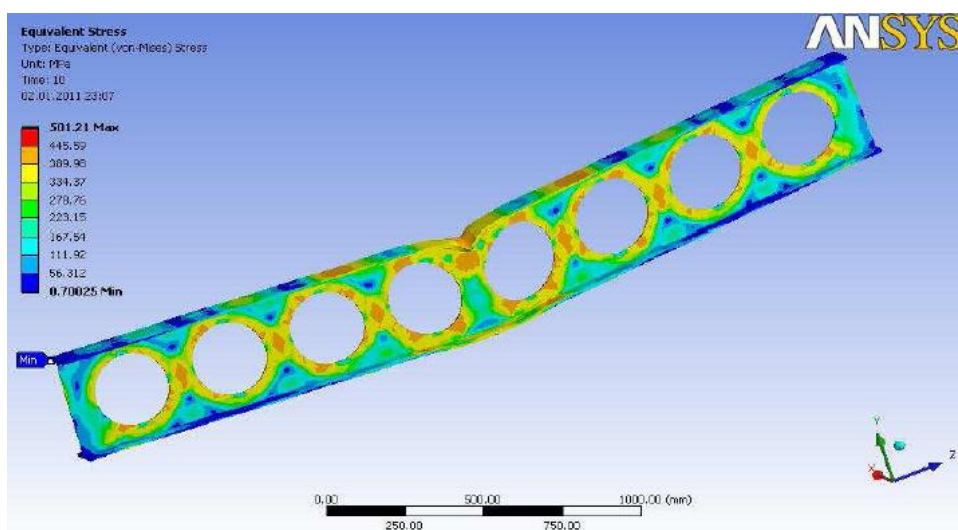


Figura 3.12 – Modelo numérico NPI_240 (Erdal, 2011).

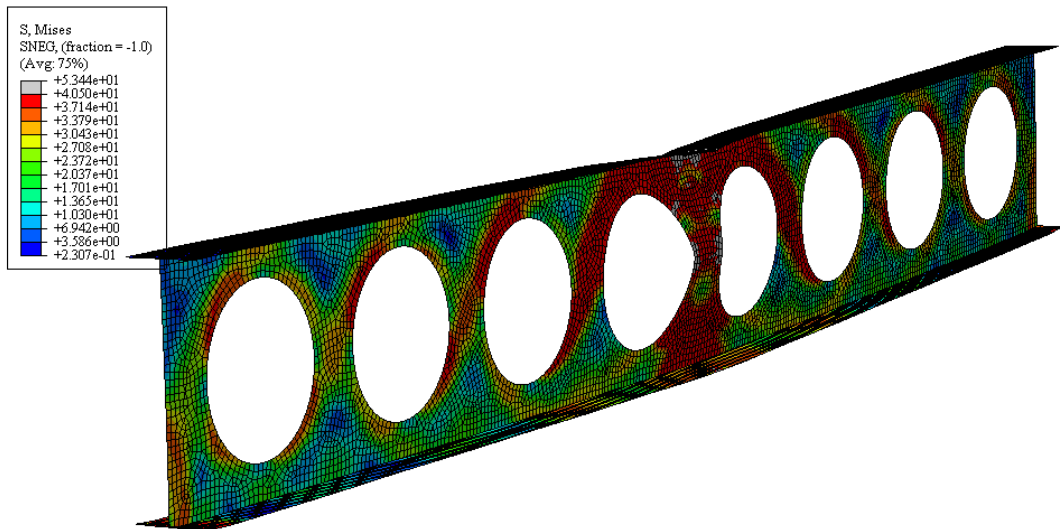


Figura 3.13 – Modelo numérico NPI_240 (Este trabalho).

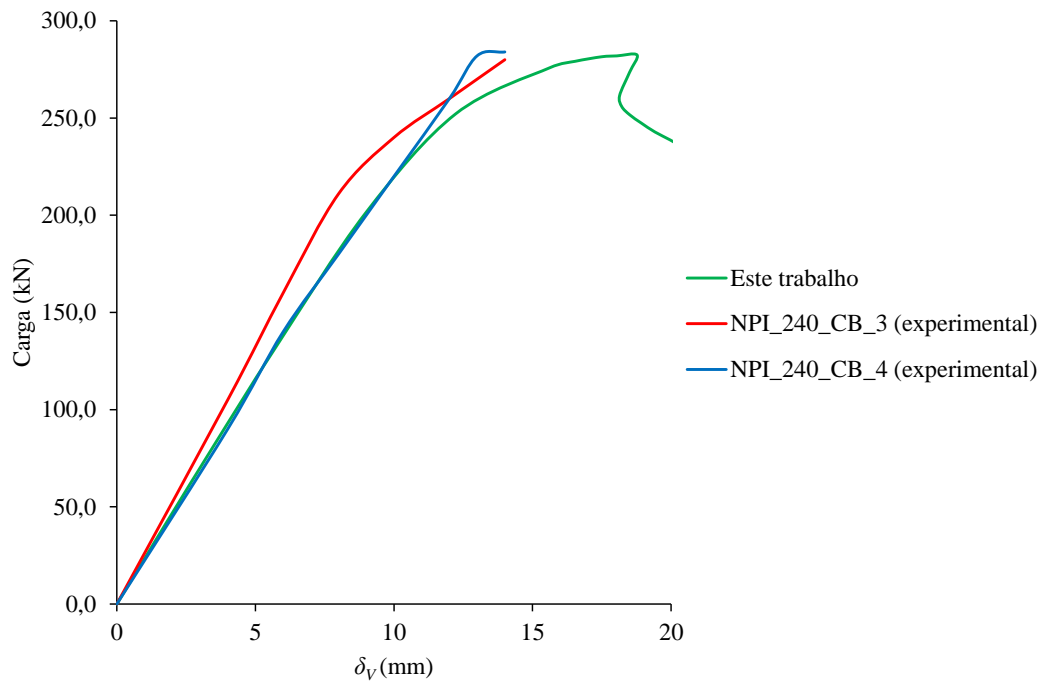


Figura 3.14 – Curva carga *versus* deslocamento para os modelos NPI_240_CB.

Tabela 3.3 – Comparação entre cargas ultimas deste trabalho e Warren (2001).

| Modelo | P_{ult} (kN) |
|---------------------------------------|----------------|
| Modelo experimental 4B (Warren, 2001) | 114,00 |
| Modelo numérico (Warren, 2001) | 150,00 |
| Este trabalho | 132,60 |

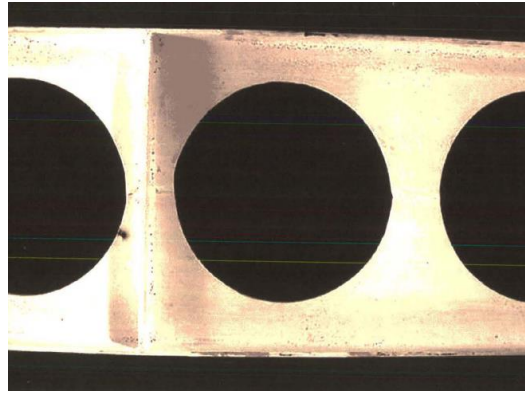


Figura 3.15 – Modo de colapso do modelo experimental 4B (Warren, 2001).

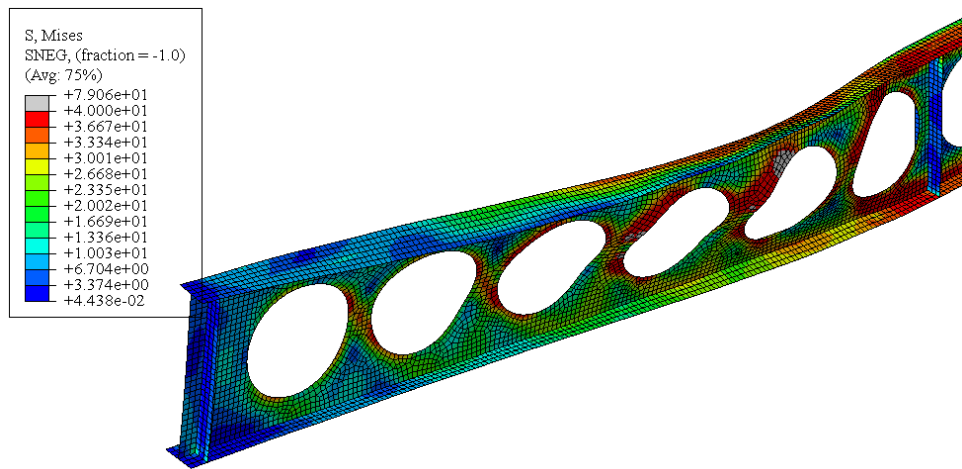


Figura 3.16 – Modelo numérico 4B (Este trabalho).

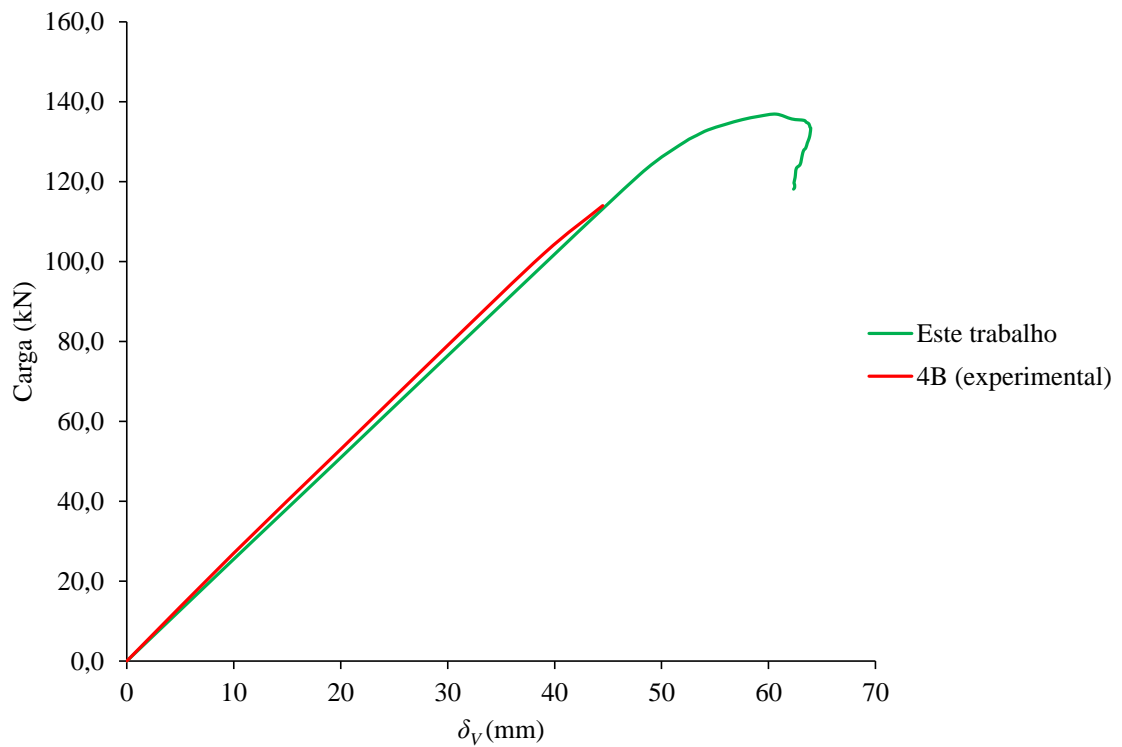


Figura 3.17 – Curva carga *versus* deslocamento para os modelos 4B.

Tabela 3.4 – Comparação entre cargas ultimas deste trabalho e Tsavdaridis e D’Mello (2010).

| Modelo | P_{ult} (kN) |
|--|----------------|
| Modelo experimental B1 (Tsavdaridis e D’Mello, 2010) | 255,00 |
| Modelo numérico (Tsavdaridis e D’Mello, 2010) | 275,00 |
| Este trabalho | 280,10 |

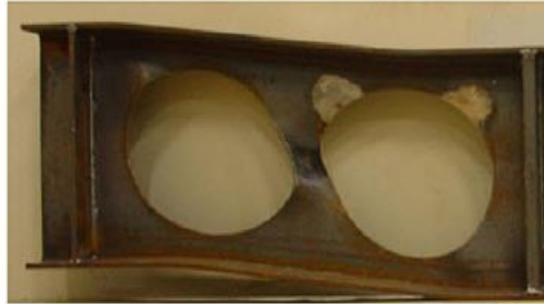


Figura 3.18 – Modo de colapso do modelo experimental B1 (Tsavdaridis e D’Mello, 2010).

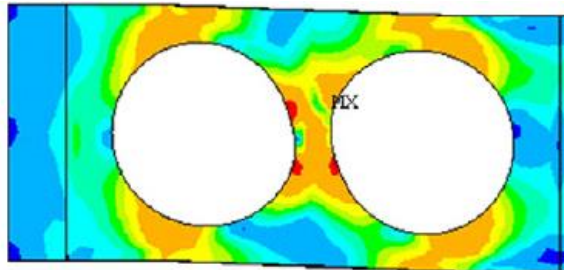


Figura 3.19 – Modelo numérico B1 (Tsavdaridis e D’Mello, 2010).

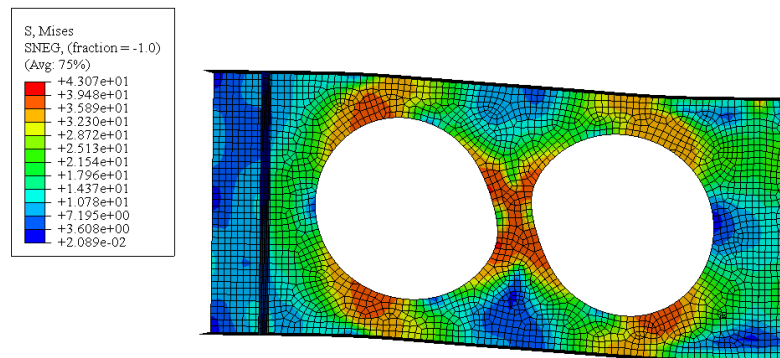


Figura 3.20 – Modelo numérico B1 (Este trabalho).

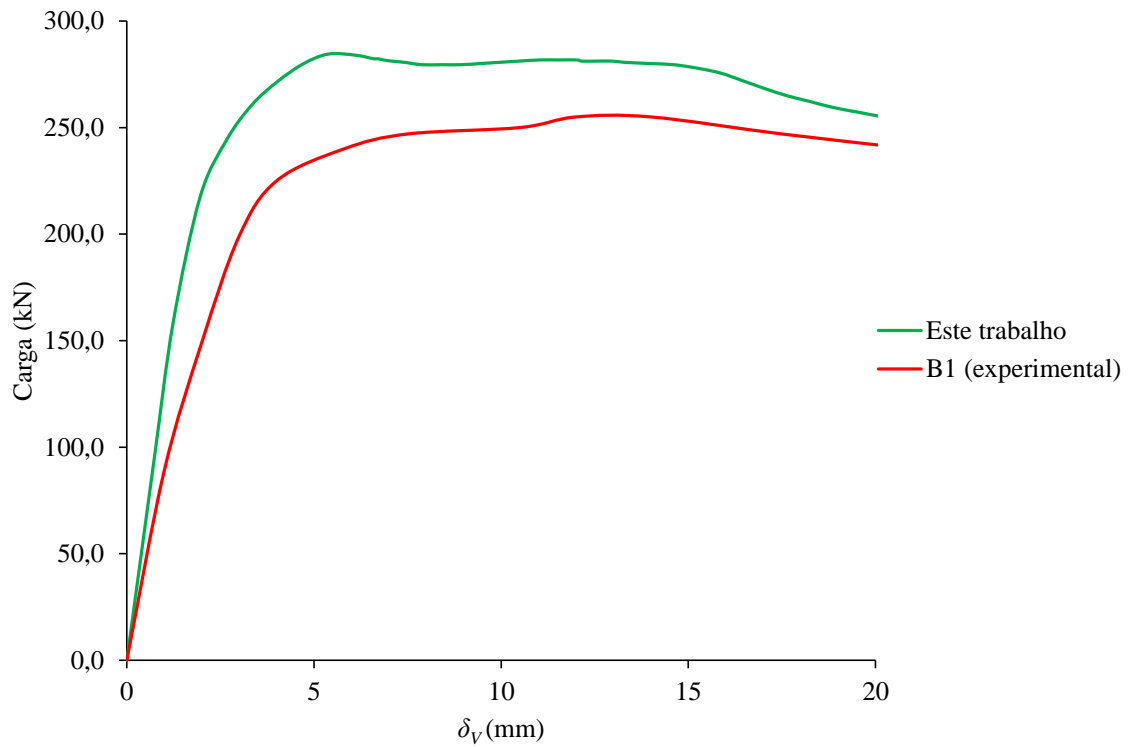


Figura 3.21 – Curva carga *versus* deslocamento para os modelos B1.

Outro ponto importante observado foi que a consideração das tensões residuais para a validação do modelo (considerando este modo de colapso) não foi relevante. Entretanto, segundo Vieira (2011) e Ellobody (2011), pode-se utilizar a mesma distribuição de tensões recomendada para perfis I duplamente simétricos. Assim, de maneira discutível, deve-se assumir que os processos de corte e soldagem são cuidadosamente conduzidos de modo a não provocarem alterações nas distribuições das tensões residuais assumidas para perfis I duplamente simétricos.

4

ANÁLISE NUMÉRICA DE VIGAS DE AÇO CELULARES – AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS PERFIS I LAMINADOS BRASILEIROS DA SÉRIE W

4.1 Perfis Analisados

O comportamento das vigas de aço celulares foi analisado através de um estudo paramétrico considerando três diferentes esbeltezes de alma (razão entre a altura total da alma e a sua espessura), avaliadas a partir de perfis laminados W310x21 ($\lambda = 57,2$), W310x28 ($\lambda = 48,8$) e W310x52 ($\lambda = 38,8$) produzidos no Brasil. Esses perfis foram escolhidos por representarem aproximadamente as esbeltezes máxima, mínima e intermediária dos perfis da série W disponíveis no Brasil.

Para cada esbelteza, foram considerados três diâmetros das aberturas (D_0), $0,57d_g$, $0,70d_g$ e $0,80d_g$ onde d_g é a altura total da seção transversal da viga celular. Já para cada diâmetro das aberturas, cinco espaçamentos entre as aberturas (p) foram analisados, $1,08D_0$, $1,20D_0$, $1,30D_0$, $1,40D_0$ e $1,50D_0$, resultando em um total de 45 modelos. Todas as vigas foram projetadas com razão de expansão igual a 1,5. Na Tab. 4.1 estão listadas as características dos modelos numéricos utilizados.

Tabela 4.1 – Propriedades geométricas dos modelos numéricos.

| Ensaio | Modelo | Perfil | λ | d (mm) | d_g (mm) | D_o (mm) | p (mm) | b_w (mm) | b_{we} (mm) | L_v (mm) | L_c (mm) |
|--------|--------|---------|-----------|----------|------------|------------|----------|------------|---------------|------------|------------|
| 1 | A1 | | | 303 | 454,5 | 259,1 | 279,8 | 20,7 | 42,4 | 1183 | 1360 |
| 2 | A2 | | | 303 | 454,5 | 259,1 | 310,9 | 51,8 | 106,0 | 1404 | 1615 |
| 3 | A3 | | | 303 | 454,5 | 259,1 | 336,8 | 77,7 | 158,9 | 1587 | 1825 |
| 4 | A4 | | | 303 | 454,5 | 259,1 | 362,7 | 103,6 | 211,9 | 1771 | 2055 |
| 5 | A5 | | | 303 | 454,5 | 259,1 | 388,6 | 129,5 | 268,1 | 1961 | 2255 |
| 6 | A6 | | | 303 | 454,5 | 318,2 | 343,6 | 25,5 | 52,0 | 1453 | 1670 |
| 7 | A7 | | | 303 | 454,5 | 318,2 | 381,8 | 63,6 | 130,1 | 1724 | 1985 |
| 8 | A8 | W310x21 | 57,2 | 303 | 454,5 | 318,2 | 413,6 | 95,4 | 195,2 | 1949 | 2235 |
| 9 | A9 | | | 303 | 454,5 | 318,2 | 445,4 | 127,3 | 260,2 | 2175 | 2525 |
| 10 | A10 | | | 303 | 454,5 | 318,2 | 477,2 | 159,1 | 329,3 | 2408 | 2770 |
| 11 | A11 | | | 303 | 454,5 | 363,6 | 392,7 | 29,1 | 61,1 | 1664 | 1915 |
| 12 | A12 | | | 303 | 454,5 | 363,6 | 436,3 | 72,7 | 152,7 | 1978 | 2275 |
| 13 | A13 | | | 303 | 454,5 | 363,6 | 472,7 | 109,1 | 229,1 | 2240 | 2575 |
| 14 | A14 | | | 303 | 454,5 | 363,6 | 509,0 | 145,4 | 305,4 | 2502 | 2865 |
| 15 | A15 | | | 303 | 454,5 | 363,6 | 545,4 | 181,8 | 378,7 | 2757 | 2950 |
| 1 | B1 | | | 309 | 463,5 | 264,2 | 285,3 | 21,1 | 43,2 | 1207 | 1370 |
| 2 | B2 | | | 309 | 463,5 | 264,2 | 317,0 | 52,8 | 108,1 | 1431 | 1625 |
| 3 | B3 | | | 309 | 463,5 | 264,2 | 343,5 | 79,3 | 162,1 | 1619 | 1840 |
| 4 | B4 | | | 309 | 463,5 | 264,2 | 369,9 | 105,7 | 216,1 | 1806 | 2050 |
| 5 | B5 | | | 309 | 463,5 | 264,2 | 396,3 | 132,1 | 273,4 | 2000 | 2300 |
| 6 | B6 | | | 309 | 463,5 | 324,5 | 350,4 | 26,0 | 53,1 | 1482 | 1675 |
| 7 | B7 | | | 309 | 463,5 | 324,5 | 389,3 | 64,9 | 132,7 | 1758 | 1995 |
| 8 | B8 | W310x28 | 48,8 | 309 | 463,5 | 324,5 | 421,8 | 97,3 | 199,1 | 1988 | 2255 |
| 9 | B9 | | | 309 | 463,5 | 324,5 | 454,2 | 129,8 | 265,4 | 2218 | 2530 |
| 10 | B10 | | | 309 | 463,5 | 324,5 | 486,7 | 162,2 | 335,8 | 2456 | 2825 |
| 11 | B11 | | | 309 | 463,5 | 370,8 | 400,5 | 29,7 | 62,3 | 1697 | 1935 |
| 12 | B12 | | | 309 | 463,5 | 370,8 | 445,0 | 74,2 | 155,7 | 2017 | 2320 |
| 13 | B13 | | | 309 | 463,5 | 370,8 | 482,0 | 111,2 | 233,6 | 2284 | 2635 |
| 14 | B14 | | | 309 | 463,5 | 370,8 | 519,1 | 148,3 | 311,5 | 2551 | 2935 |
| 15 | B15 | | | 309 | 463,5 | 370,8 | 556,2 | 185,4 | 386,2 | 2812 | 3020 |
| 1 | C1 | | | 317 | 475,5 | 271,0 | 292,7 | 21,7 | 44,3 | 1238 | 1405 |
| 2 | C2 | | | 317 | 475,5 | 271,0 | 325,2 | 54,2 | 110,9 | 1468 | 1660 |
| 3 | C3 | | | 317 | 475,5 | 271,0 | 352,3 | 81,3 | 166,3 | 1661 | 1880 |
| 4 | C4 | | | 317 | 475,5 | 271,0 | 379,4 | 108,4 | 221,7 | 1853 | 2095 |
| 5 | C5 | | | 317 | 475,5 | 271,0 | 406,6 | 135,5 | 280,5 | 2052 | 2245 |
| 6 | C6 | | | 317 | 475,5 | 332,9 | 359,5 | 26,6 | 54,5 | 1520 | 1725 |
| 7 | C7 | | | 317 | 475,5 | 332,9 | 399,4 | 66,6 | 136,1 | 1803 | 2040 |
| 8 | C8 | W310x52 | 38,2 | 317 | 475,5 | 332,9 | 432,7 | 99,9 | 204,2 | 2039 | 2305 |
| 9 | C9 | | | 317 | 475,5 | 332,9 | 466,0 | 133,1 | 272,3 | 2275 | 2560 |
| 10 | C10 | | | 317 | 475,5 | 332,9 | 499,3 | 166,4 | 344,5 | 2520 | 2745 |
| 11 | C11 | | | 317 | 475,5 | 380,4 | 410,8 | 30,4 | 63,9 | 1741 | 1880 |
| 12 | C12 | | | 317 | 475,5 | 380,4 | 456,5 | 76,1 | 159,8 | 2069 | 2235 |
| 13 | C13 | | | 317 | 475,5 | 380,4 | 494,5 | 114,1 | 239,7 | 2343 | 2520 |
| 14 | C14 | | | 317 | 475,5 | 380,4 | 532,6 | 152,2 | 319,5 | 2617 | 2800 |
| 15 | C15 | | | 317 | 475,5 | 380,4 | 570,6 | 190,2 | 396,2 | 2885 | 3085 |

Conforme ilustrado na Fig. 4.1, as vigas possuem enrijecedores nos apoios e no ponto de aplicação de carga. Adicionalmente, as vigas foram simuladas como biapoiadas e com contenções laterais de modo a evitar a flambagem lateral com torção.

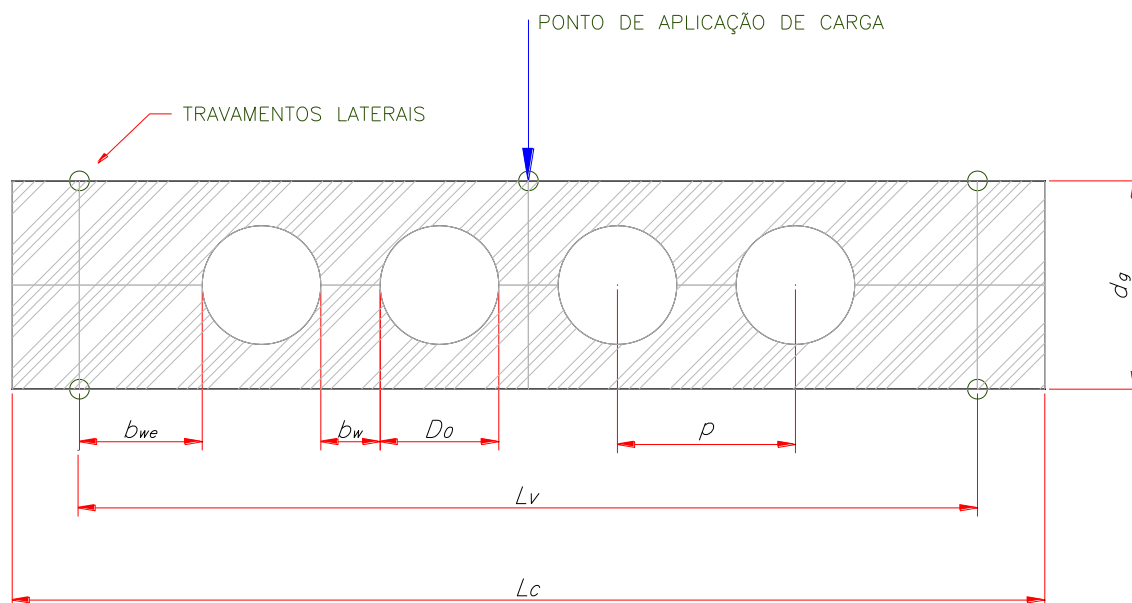
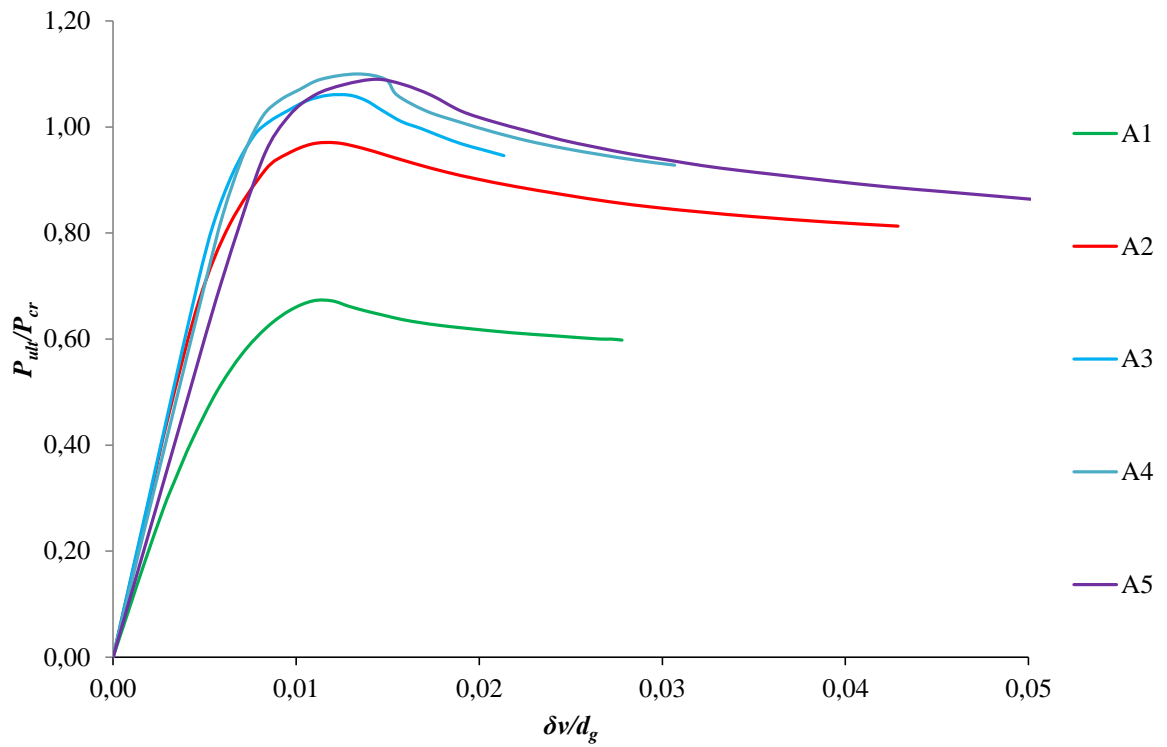


Figura 4.1 – Carregamento e condições de contorno.

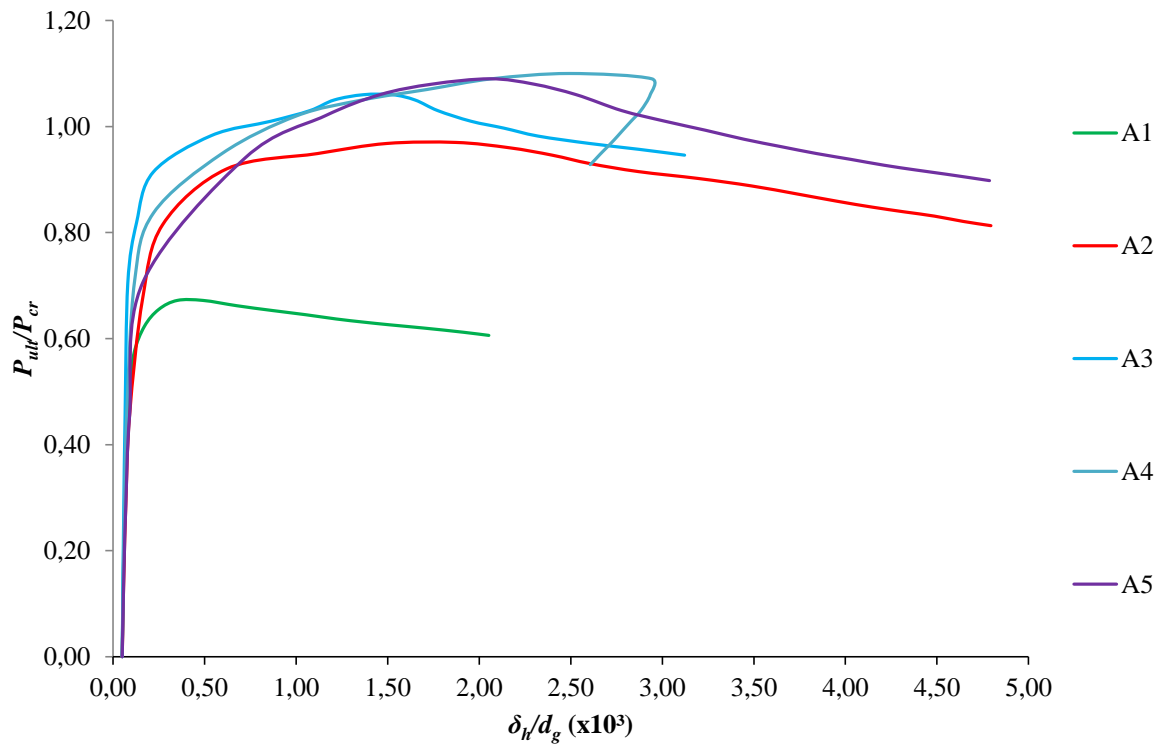
4.2 Resultados

Os valores de carga última para cada modelo foram determinados por meio de dois critérios: análise das tensões atuantes ou observação de deslocamentos excessivos, acima dos valores estipulados como aceitáveis.

Para cada modelo, a avaliação ocorreu através da observação do comportamento em dois gráficos. O primeiro relaciona a razão entre as cargas última e crítica (P_{ult}/P_{cr}) em função da razão entre os deslocamentos verticais/altura da viga celular (δ_v/d_g). Já o segundo relaciona a razão entre as cargas última e crítica (P_{ult}/P_{cr}) em função da razão entre os deslocamentos horizontais/altura da viga celular (δ_h/d_g). Dependendo do modo de colapso, a flambagem do montante de alma, por exemplo, foi avaliada a intensidade do deslocamento fora do plano (δ_h). As Figs. 4.2 a 4.10 ilustram esses gráficos para cada índice de esbeltez e relação de D_o .

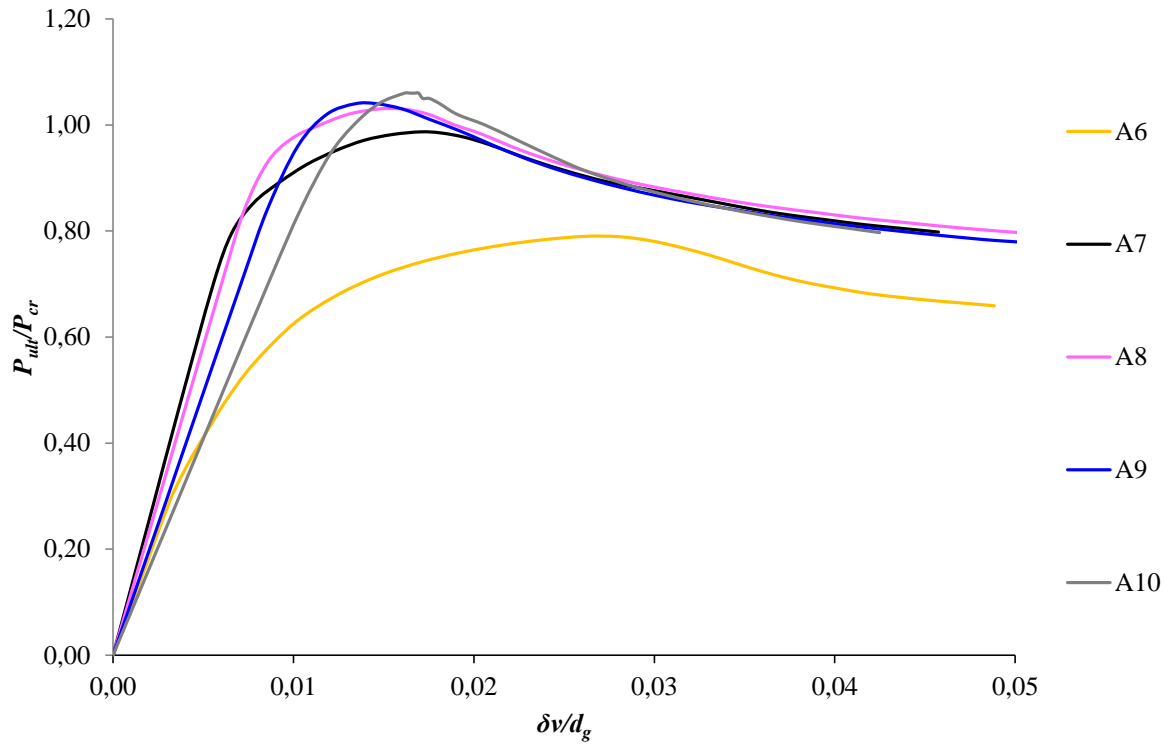


a) – Relação entre carga última e carga crítica *versus* deslocamento vertical e altura da viga.

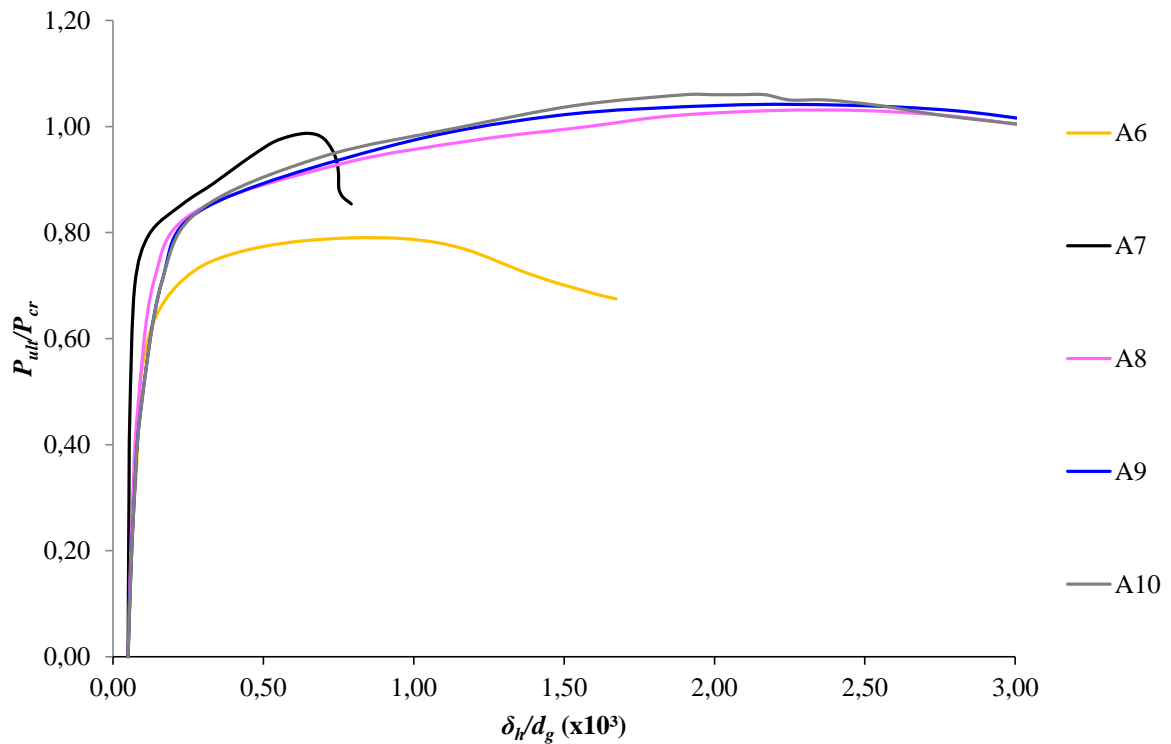


b) – Relação entre carga última e carga crítica *versus* deslocamento horizontal e altura da viga.

Figura 4.2 – Modelos A1 a A5.

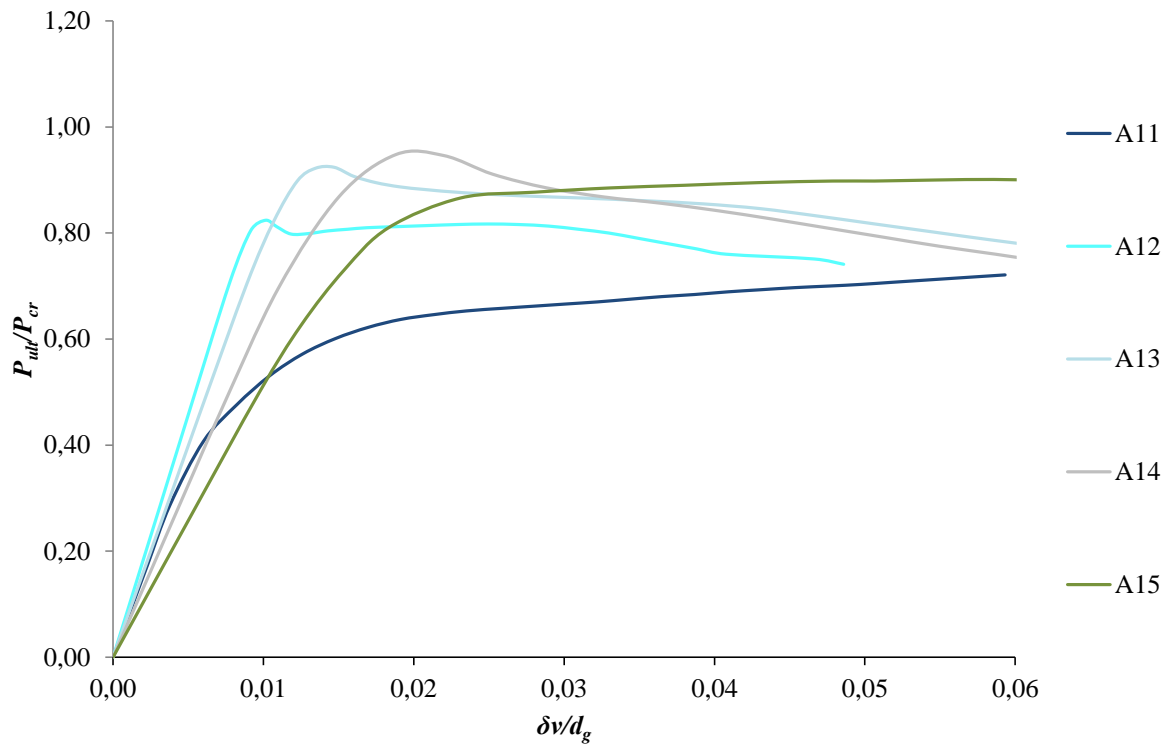


a) – Relação entre carga última e carga crítica *versus* deslocamento vertical e altura da viga.

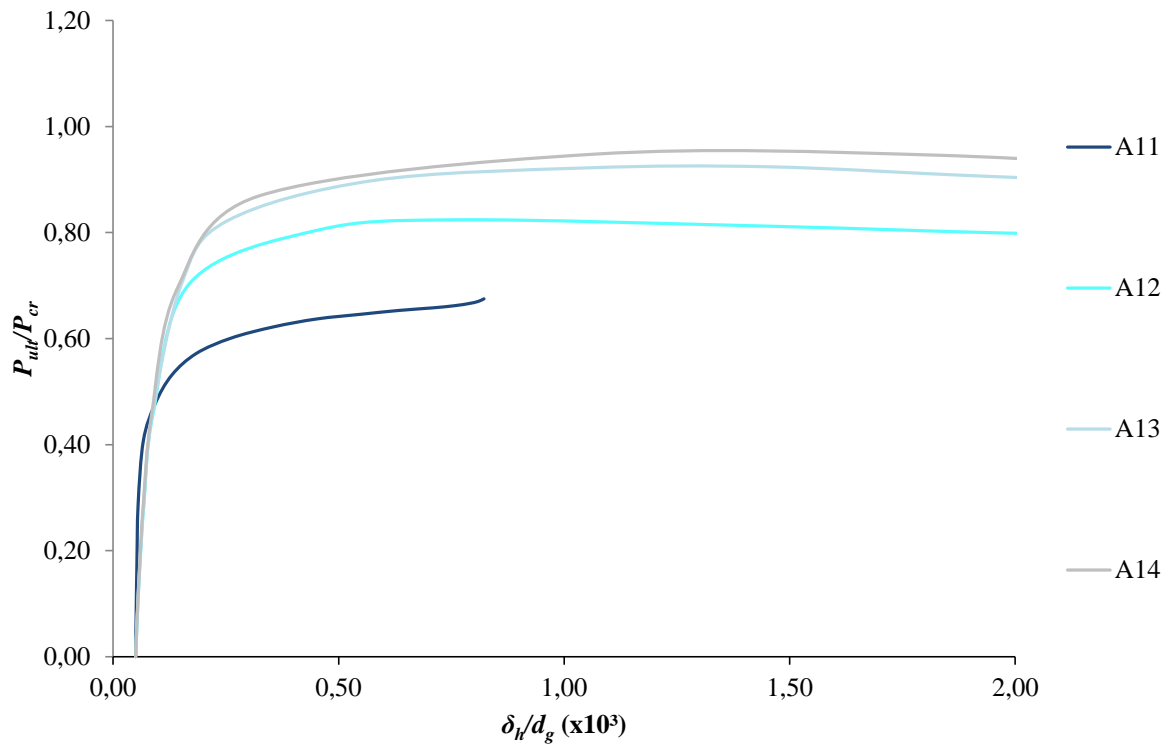


b) – Relação entre carga última e carga crítica *versus* deslocamento horizontal e altura da viga.

Figura 4.3 – Modelos A6 a A10.

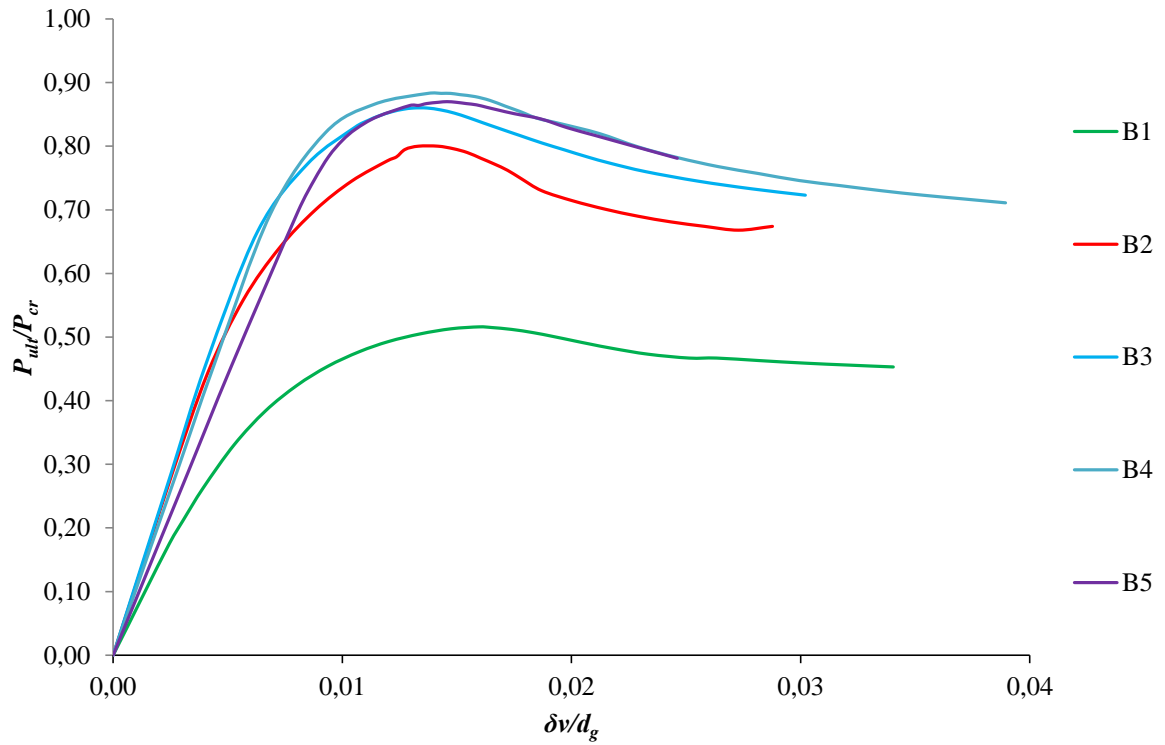


a) – Relação entre carga última e carga crítica *versus* deslocamento vertical e altura da viga.

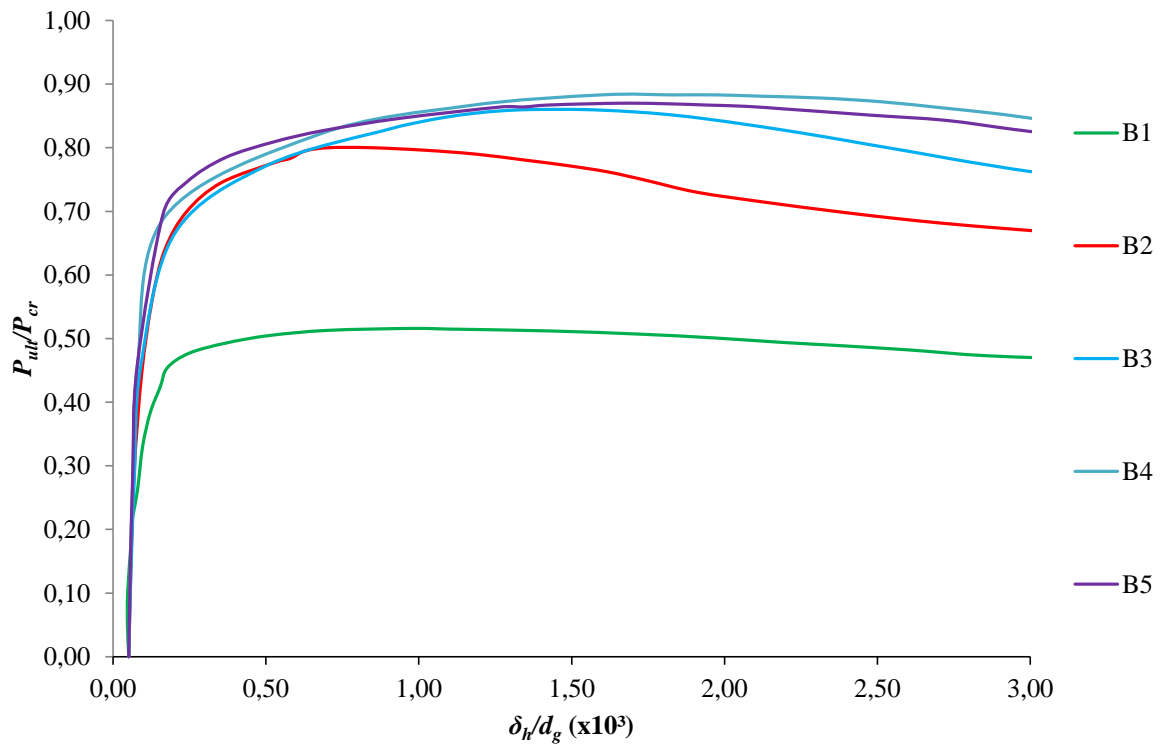


b) – Relação entre carga última e carga crítica *versus* deslocamento horizontal e altura da viga.

Figura 4.4 – Modelos A11 a A15.

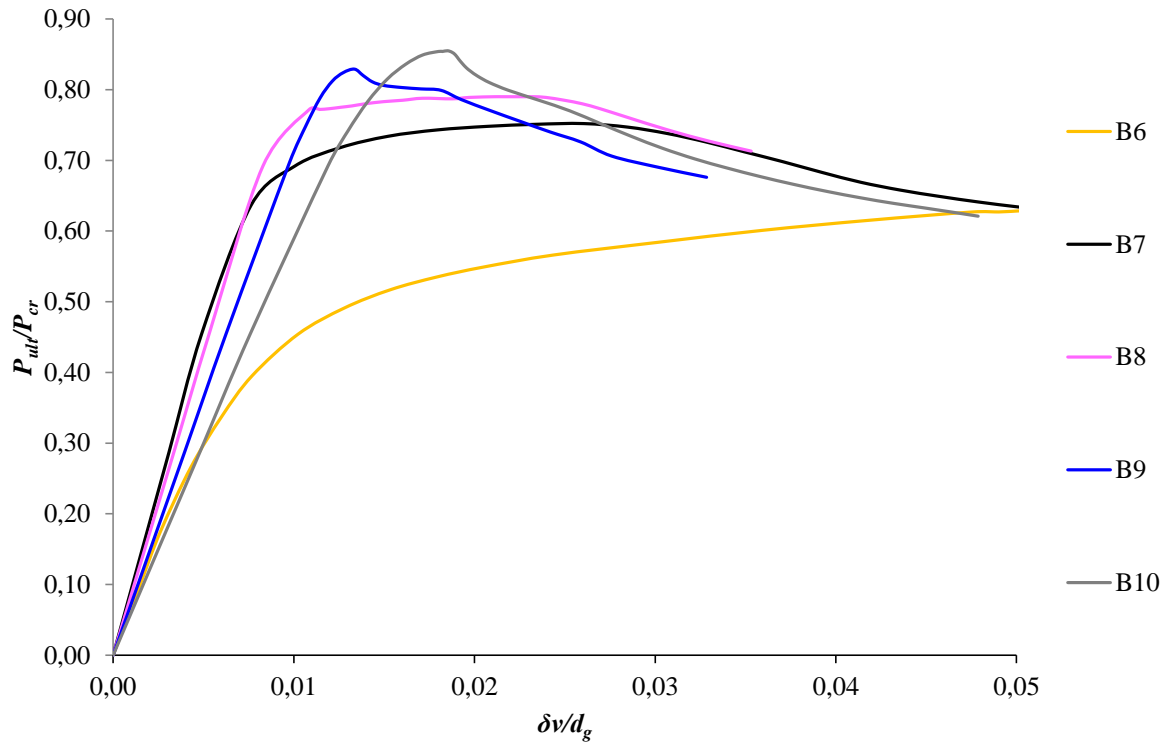


a) – Relação entre carga última e carga crítica *versus* deslocamento vertical e altura da viga.

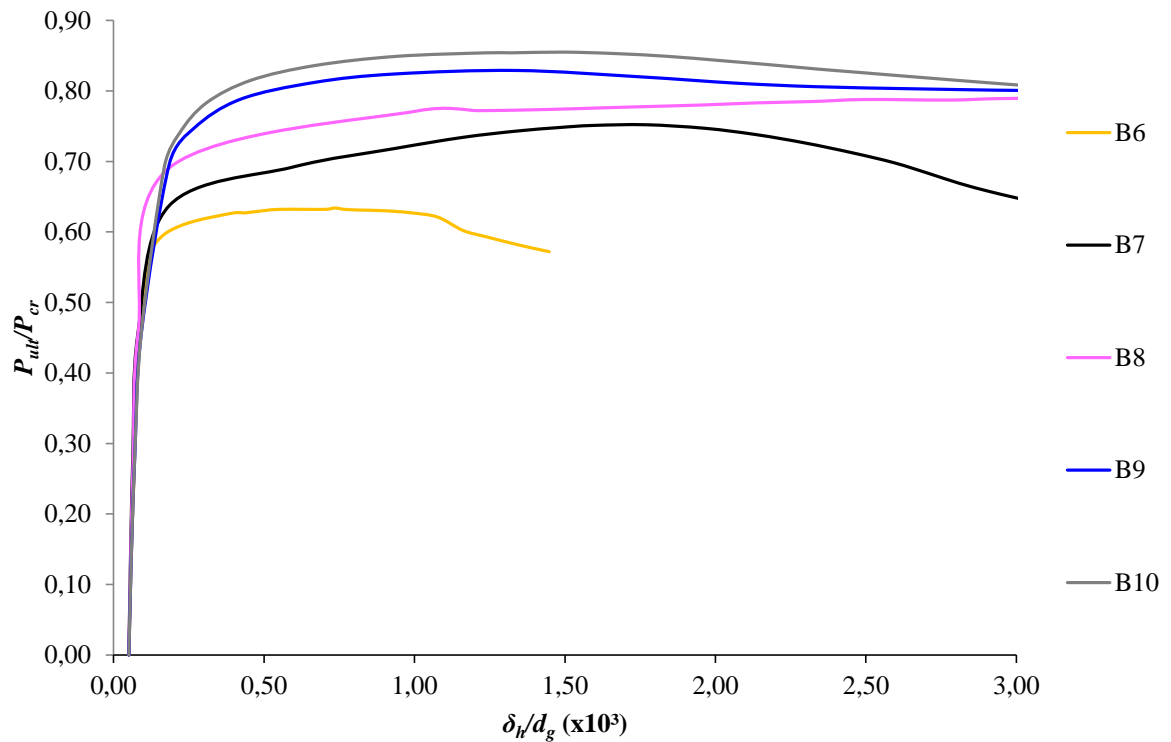


b) – Relação entre carga última e carga crítica *versus* deslocamento horizontal e altura da viga.

Figura 4.5 – Modelos B1 a B5.

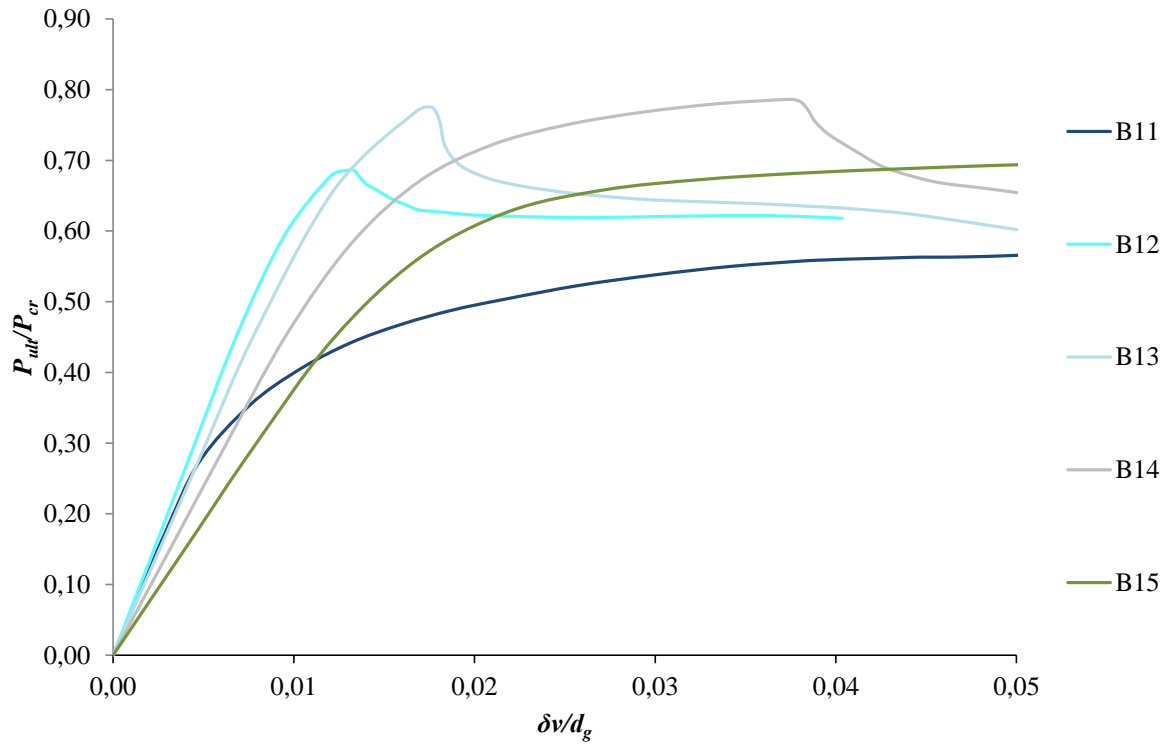


a) – Relação entre carga última e carga crítica *versus* deslocamento vertical e altura da viga.

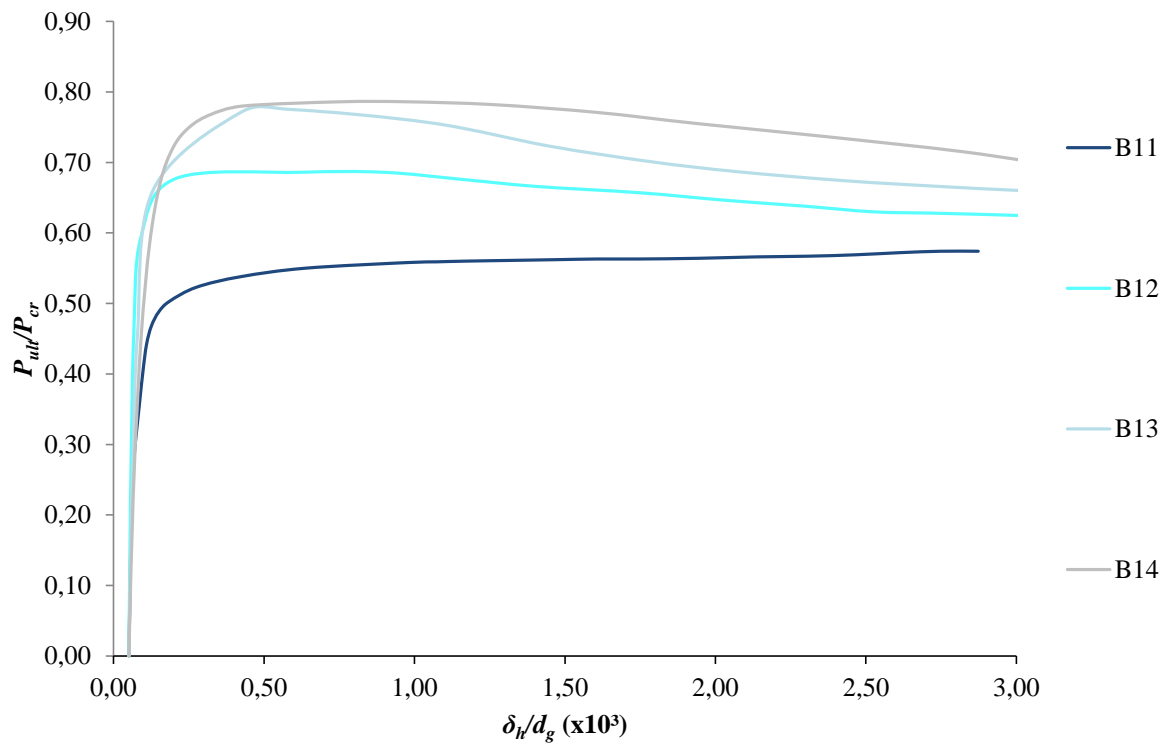


b) – Relação entre carga última e carga crítica *versus* deslocamento horizontal e altura da viga.

Figura 4.6 – Modelos B6 a B10.

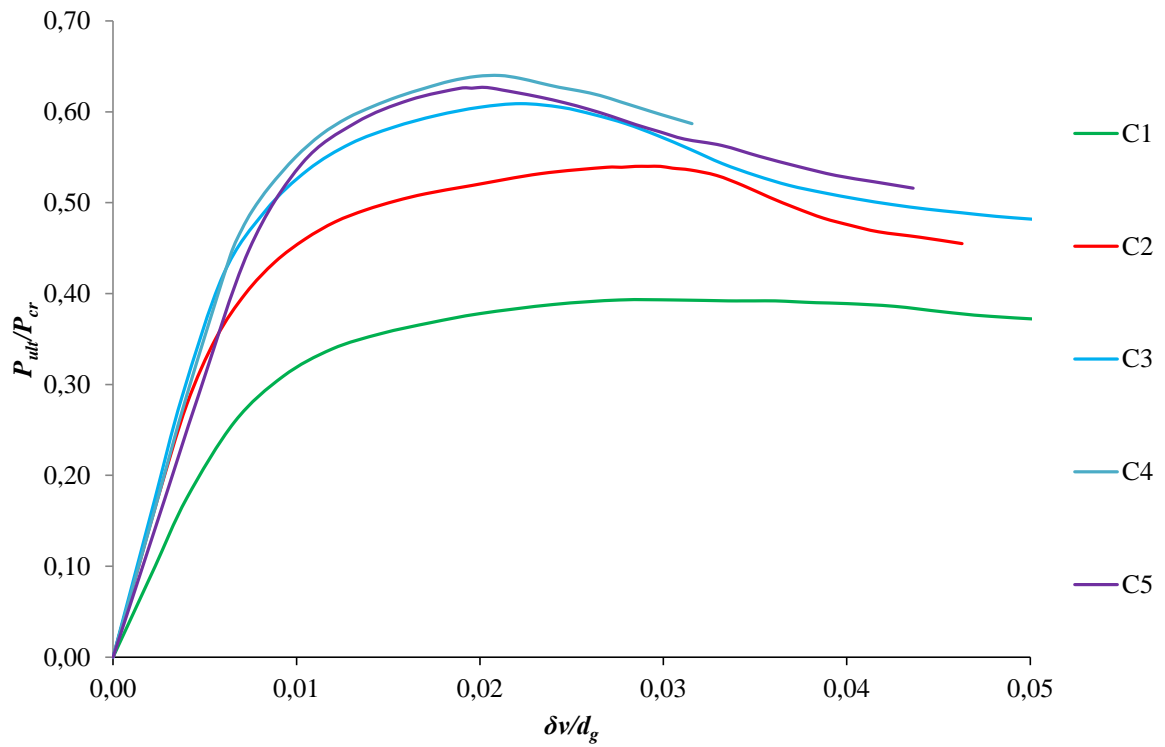


a) – Relação entre carga última e carga crítica *versus* deslocamento vertical e altura da viga.

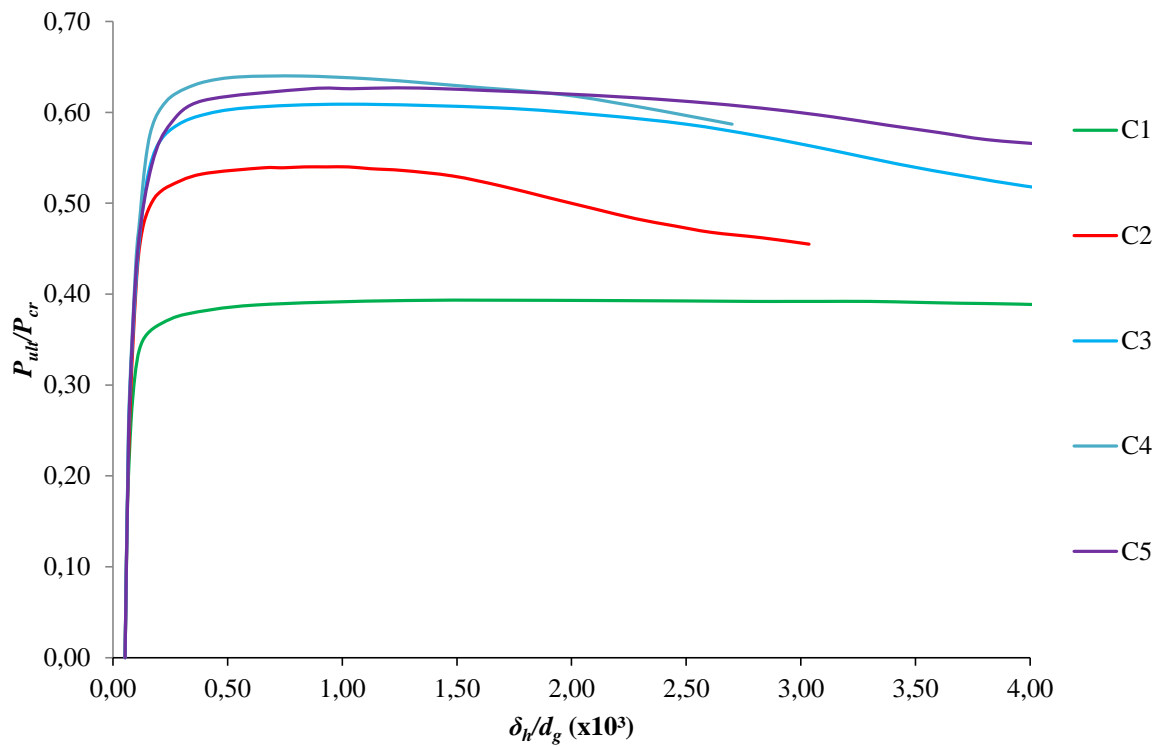


b) – Relação entre carga última e carga crítica *versus* deslocamento horizontal e altura da viga.

Figura 4.7 – Modelos B11 a B15.

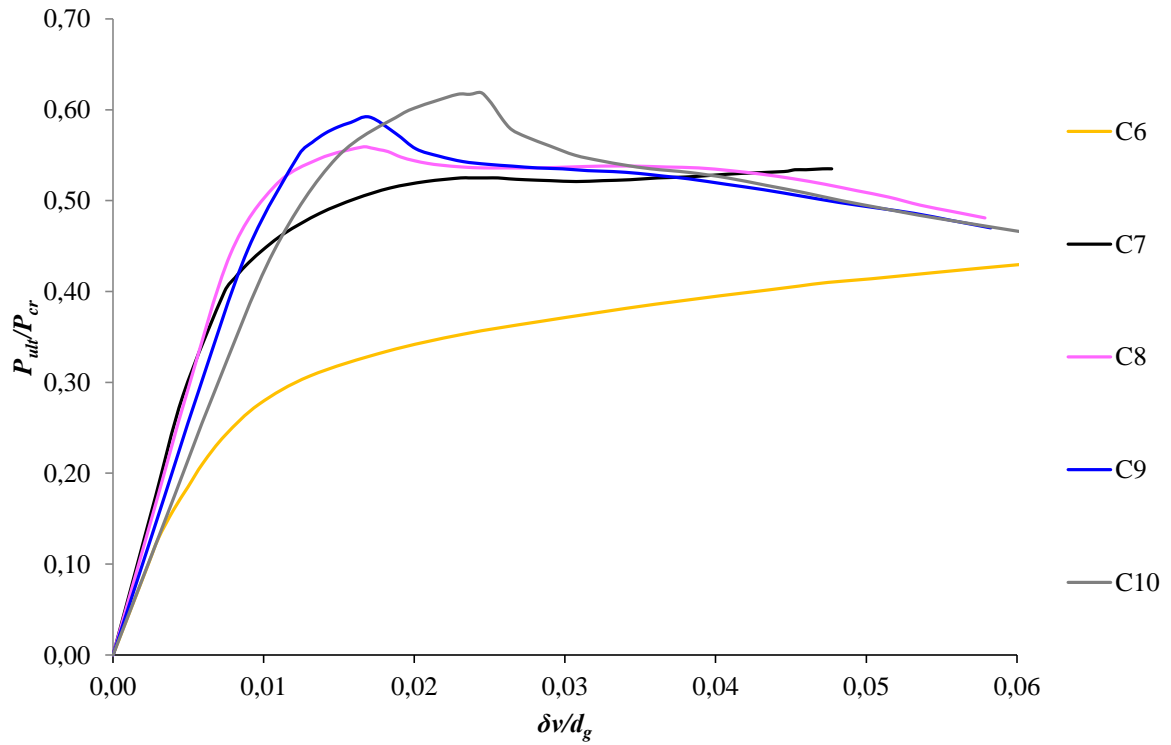


a) – Relação entre carga última e carga crítica *versus* deslocamento vertical e altura da viga.

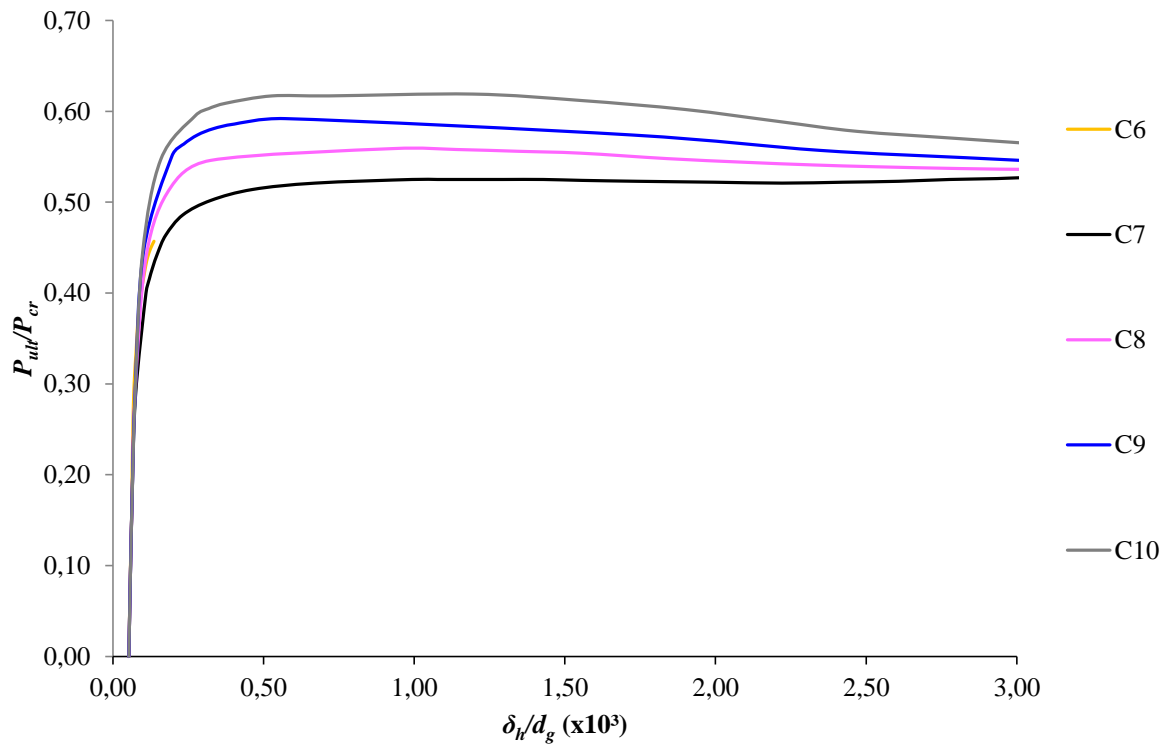


b) – Relação entre carga última e carga crítica *versus* deslocamento horizontal e altura da viga.

Figura 4.8 – Modelos C1 a C5.

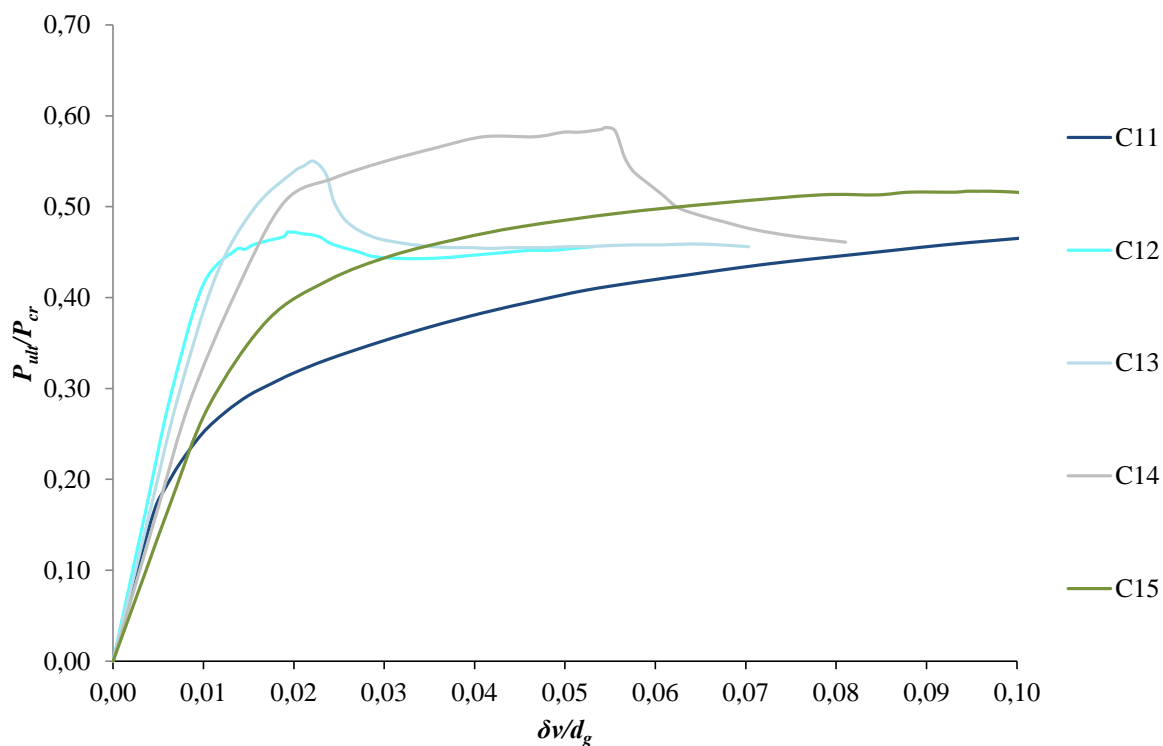


a) – Relação entre carga última e carga crítica *versus* deslocamento vertical e altura da viga.

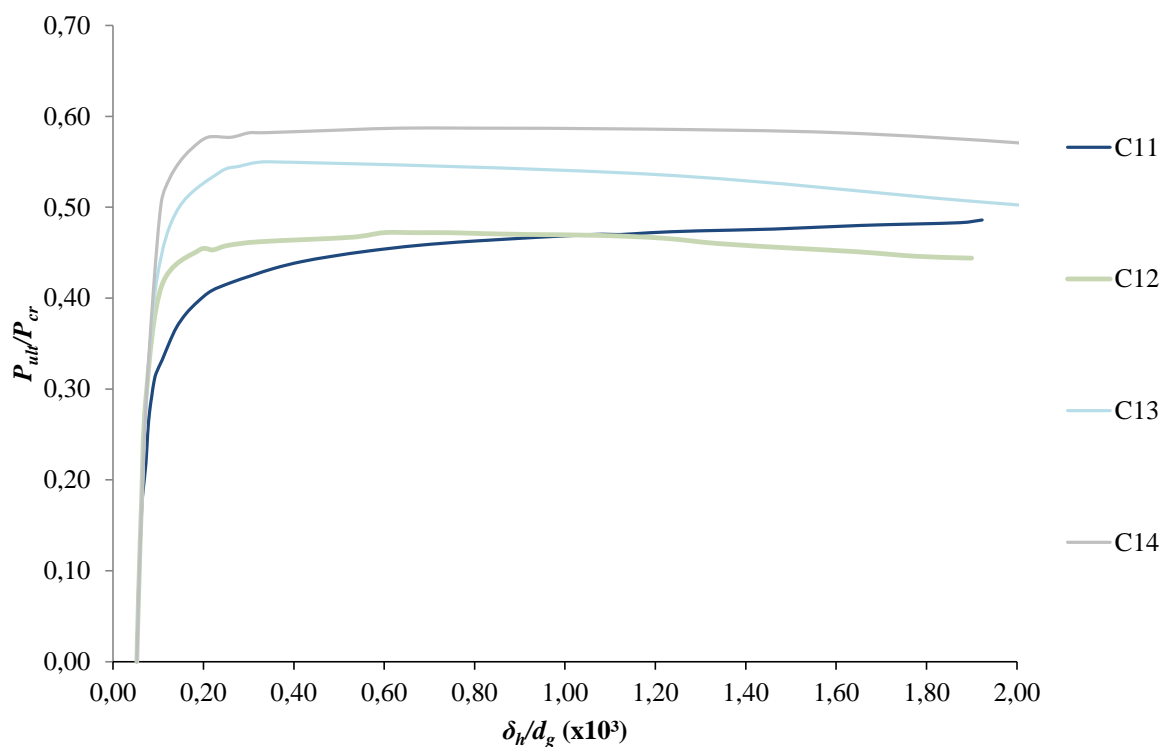


b) – Relação entre carga última e carga crítica *versus* deslocamento horizontal e altura da viga.

Figura 4.9 – Modelos C6 a C10.



a) – Relação entre carga última e carga crítica *versus* deslocamento vertical e altura da viga.



b) – Relação entre carga última e carga crítica *versus* deslocamento horizontal e altura da viga.

Figura 4.10 – Modelos C11 a C15.

Conforme apresentado na Tab. 4.2, o modo de colapso predominante no estudo foi a flambagem do montante de alma pelo efeito da força cortante (ver Fig. 4.11).

Tabela 4.2 – Carga crítica, carga última e modos de colapso.

| Modelo | P_{cr} (kN) | P_{ult} (kN) | P_{ult}/P_{cr} | Modo de Colapso ¹⁾ |
|--------|---------------|----------------|------------------|-------------------------------|
| A1 | 298,4 | 199,9 | 0,67 | CP |
| A2 | 229,8 | 222,9 | 0,97 | FMA |
| A3 | 216,4 | 229,4 | 1,06 | FMA |
| A4 | 214,8 | 236,3 | 1,10 | FMA |
| A5 | 220,0 | 239,8 | 1,09 | FMA |
| A6 | 159,6 | 126,0 | 0,79 | CP |
| A7 | 145,4 | 143,9 | 0,99 | FMA |
| A8 | 153,8 | 158,4 | 1,03 | FMA |
| A9 | 163,6 | 170,1 | 1,04 | FMA |
| A10 | 172,8 | 183,2 | 1,06 | FMA |
| A11 | 110,8 | 83,1 | 0,75 | CP |
| A12 | 115,6 | 94,8 | 0,82 | FMA |
| A13 | 130,4 | 120,0 | 0,92 | FMA |
| A14 | 144,8 | 137,5 | 0,95 | FMA |
| A15 | 161,0 | 144,5 | 0,90 | MV |
| B1 | 538,1 | 279,8 | 0,52 | CP |
| B2 | 395,0 | 316,0 | 0,80 | FMA |
| B3 | 375,5 | 322,9 | 0,86 | FMA |
| B4 | 375,6 | 330,6 | 0,88 | FMA |
| B5 | 391,4 | 340,5 | 0,87 | FMA |
| B6 | 275,6 | 173,7 | 0,63 | CP |
| B7 | 253,2 | 188,6 | 0,75 | FMA |
| B8 | 270,4 | 213,6 | 0,79 | FMA |
| B9 | 290,8 | 241,4 | 0,83 | FMA |
| B10 | 311,2 | 264,5 | 0,85 | FMA |
| B11 | 174,6 | 99,5 | 0,57 | CP |
| B12 | 204,9 | 141,4 | 0,69 | FMA |
| B13 | 230,9 | 180,1 | 0,78 | FMA |
| B14 | 258,9 | 204,5 | 0,79 | MV+FMA |
| B15 | 291,6 | 205,9 | 0,71 | MV |
| C1 | 1065,0 | 415,4 | 0,39 | CP |
| C2 | 892,0 | 480,8 | 0,54 | FMA |
| C3 | 830,6 | 502,5 | 0,61 | FMA |
| C4 | 839,9 | 537,5 | 0,64 | FMA |
| C5 | 886,4 | 558,4 | 0,63 | FMA |
| C6 | 611,8 | 293,6 | 0,48 | CP |
| C7 | 559,3 | 296,4 | 0,53 | CP |
| C8 | 600,0 | 336,0 | 0,56 | FMA |
| C9 | 651,2 | 384,2 | 0,59 | FMA |
| C10 | 703,9 | 436,4 | 0,62 | FMA |
| C11 | 385,4 | 185,0 | 0,48 | CP |
| C12 | 446,5 | 210,8 | 0,47 | CP |
| C13 | 514,0 | 282,7 | 0,55 | FMA |
| C14 | 579,4 | 341,9 | 0,59 | MV+FMA |
| C15 | 691,8 | 359,7 | 0,52 | MV |

¹⁾ FMA: Flambagem do montante de alma

MV: Mecanismo Vierendeel

CP: Colapso por plastificação

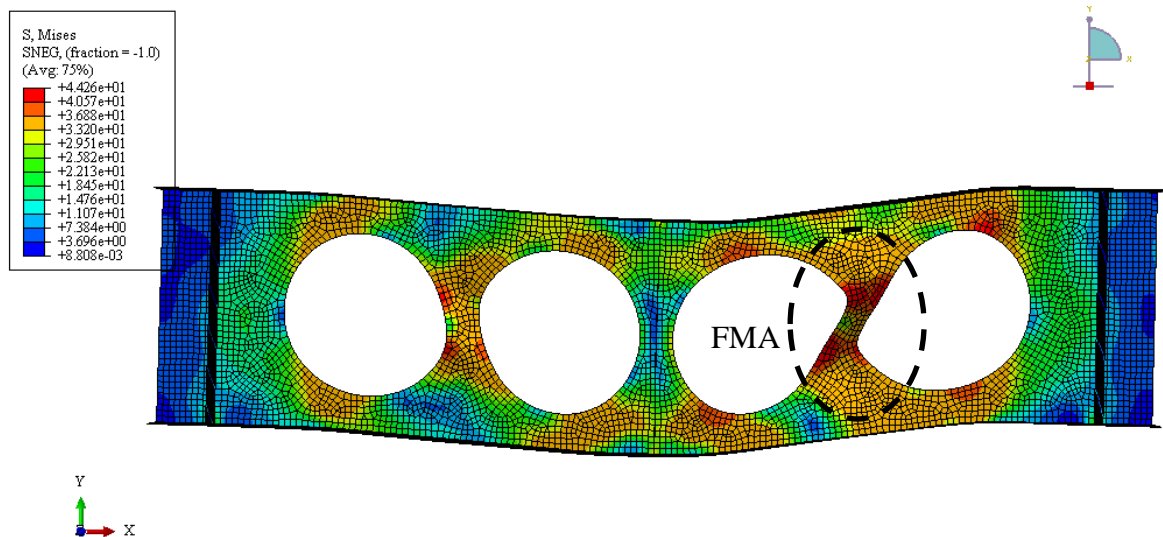


Figura 4.11 – Flambagem do montante de alma (modelo C7).

De modo geral, foi observado que os modelos com os parâmetros $D_0 = 0,57d_g$ e $p = 1,08D_0$ (A1, A6, A11, B1, B6, B11, C1, C6 e C11) apresentaram colapso por plastificação (CP), conforme ilustrado na Fig. 4.12. Adicionalmente, constatou-se que os modelos A1, B1 e C1 chegaram ao colapso muito antes de atingir a carga crítica de flambagem ($P_{ult}/P_{cr} < 0,60$). Além dos parâmetros descritos, esse comportamento está diretamente relacionado à menor esbelteza do montante. O colapso por plastificação também foi observado em alguns modelos com $p = 1,20D_0$ para a esbelteza $\lambda = 38,2$ (C7 e C12).

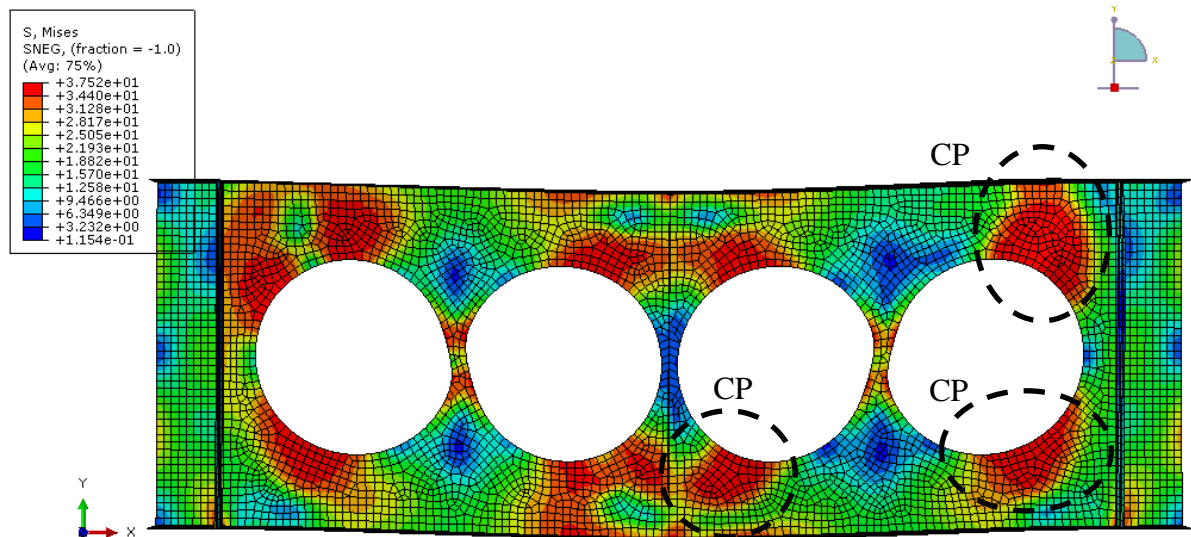


Figura 4.12 – Colapso por plastificação (modelo A1).

Para os modelos A15, B15 e C15, conforme ilustrado na Fig. 4.13, em que $D_0 = 0,80d_g$ e $p = 1,50D_0$, o modo de colapso observado foi o mecanismo Vierendeel (MV). Por se tratar de um caso limite, em que o espaçamento entre as aberturas (p) é maior que o recomendado por Harper (1994), observa-se a formação de rótulas plásticas nos cantos das aberturas. Essa

geometria proporcional, além de tensões normais e de cisalhamento na extremidade do ‘tê’ (decorrentes do momento fletor e do esforço cortante, respectivamente), uma parcela adicional de tensão normal que se origina da flexão produzida pela ação da força cortante.

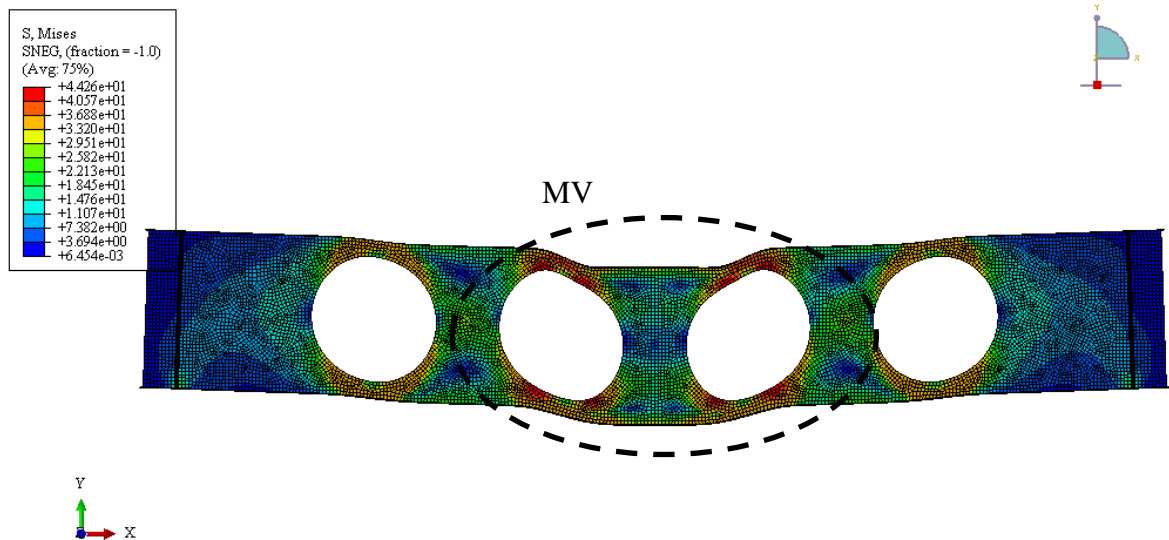


Figura 4.13 – Mecanismo Vierendeel (modelo B15).

Para os modelos B14 e C14, em que $D_0 = 0,80$ e $p = 1,40D_0$, foi observado um acoplamento do mecanismo Vierendeel com a flambagem do montante de alma (MV+FMA) sendo que o primeiro a ser observado foi o MV. Esses modos de colapso ocorreram somente para as esbeltezes $\lambda = 48,8$ e $\lambda = 38,2$. Os modelos com essa combinação geométrica caracterizam uma fase de transição entre os dois modos de instabilidade (ver Fig. 4.14).

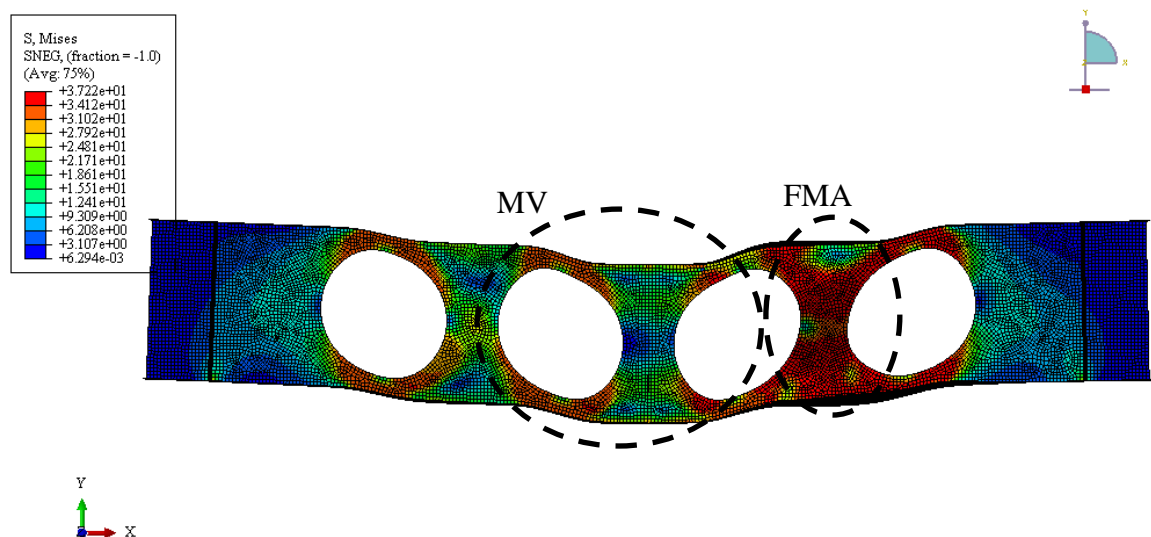


Figura 4.14 – Acoplamento da flambagem do montante de alma e do mecanismo Vierendeel (modelo B14).

A relação entre as cargas última e crítica (P_{ult}/P_{cr}) e os parâmetros geométricos das vigas é apresentada nas Figs. 4.15 e 4.16. Observa-se que à medida que o índice de esbelteza aumenta,

mais a carga última (P_{ult}) se aproxima da carga crítica (P_{cr}). Para $\lambda = 57,2$ vários modelos apresentaram comportamento pós-crítico. Esse comportamento, além do índice de esbeltez, está relacionado à amplitude das imperfeições geométricas iniciais e da relação P_{ult}/P_{cr} .

Além disso, conforme esperado, quanto menor a área do montante de alma – ou seja, maior a relação D_0/d_g – menor é a capacidade resistente das vigas. Observa-se que com o aumento da relação p/D_0 , a capacidade resistente das vigas aumenta de forma diretamente proporcional (devido ao aumento da área do montante de alma).

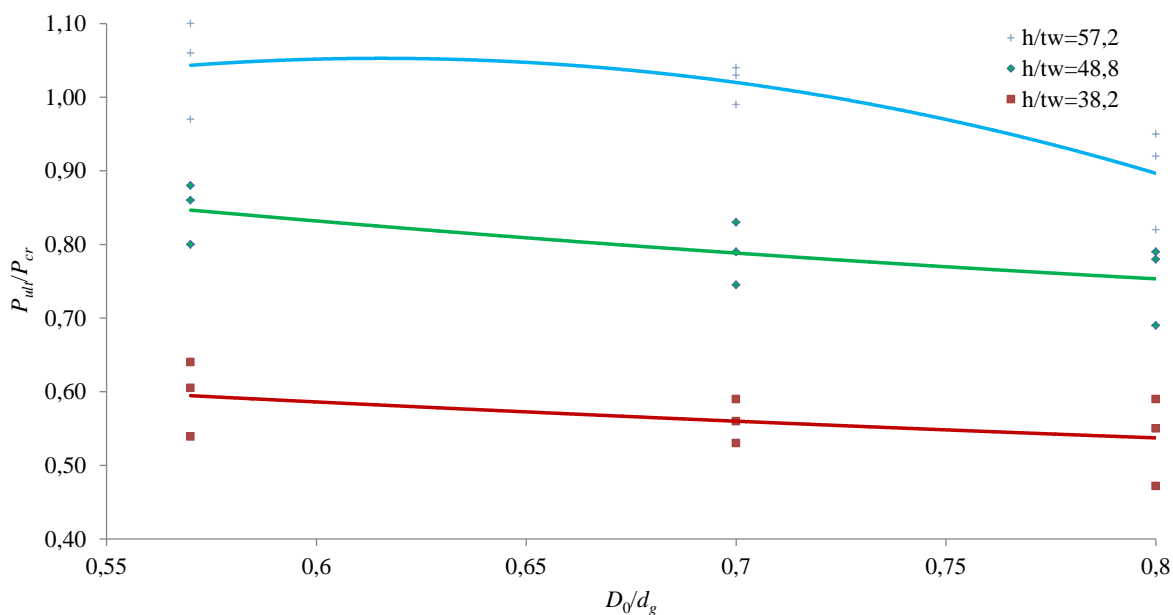


Figura 4.15 – Relação entre P_{ult}/P_{cr} versus D_0/d_g .

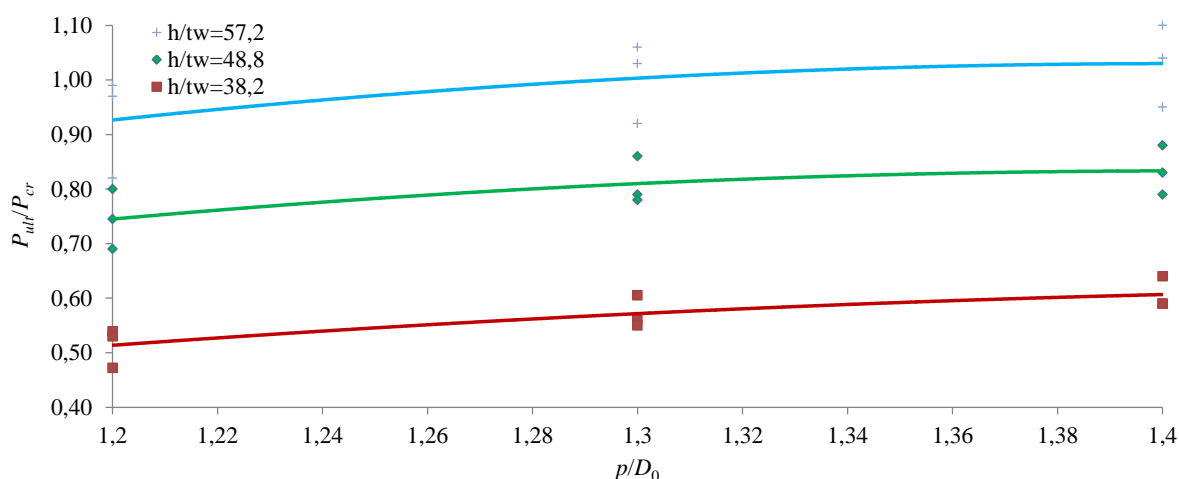


Figura 4.16 – Relação entre P_{ult}/P_{cr} versus p/D_0 .

5

CAPACIDADE RESISTENTE DO MONTANTE DE ALMA – PROCEDIMENTOS E PROPOSIÇÃO DE CÁLCULO

5.1 Resultados Numéricos Considerados

Com base nos resultados apresentados, de modo geral, foi observado que a flambagem do montante de alma ocorre predominantemente para a relação $1,2 \leq p / D_0 \leq 1,4$. Desse modo, a proposição da capacidade resistente do montante de alma foi desenvolvida considerando os resultados desse intervalo. Conforme ilustrado nas Figs. 5.1 a 5.4, em todas as esbeltezes analisadas, foi observado que a capacidade resistente das vigas (V_h) diminui à medida que a relação D_0/d_g aumenta. Adicionalmente, quanto menor o índice de esbeltez maior é a capacidade resistente das vigas.

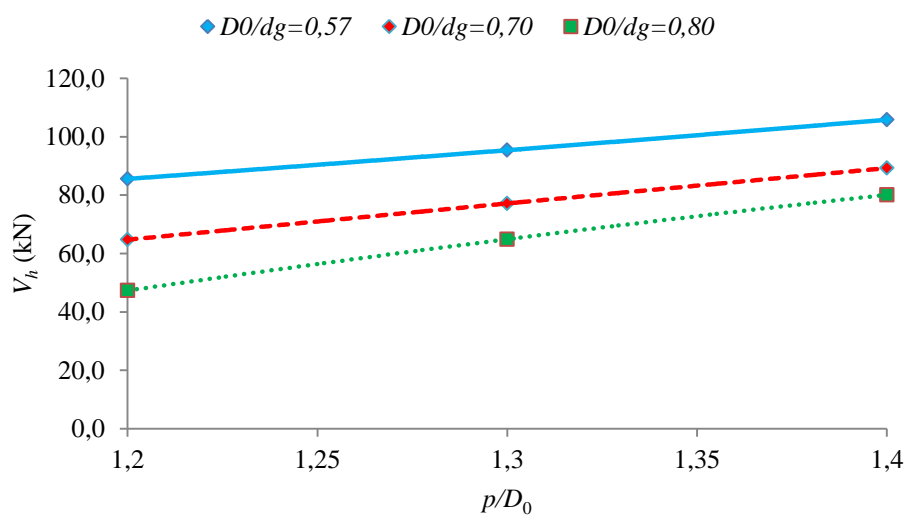


Figura 5.1 – Relação comparativa de V_h versus S/D_0 para $\lambda = 57,2$.

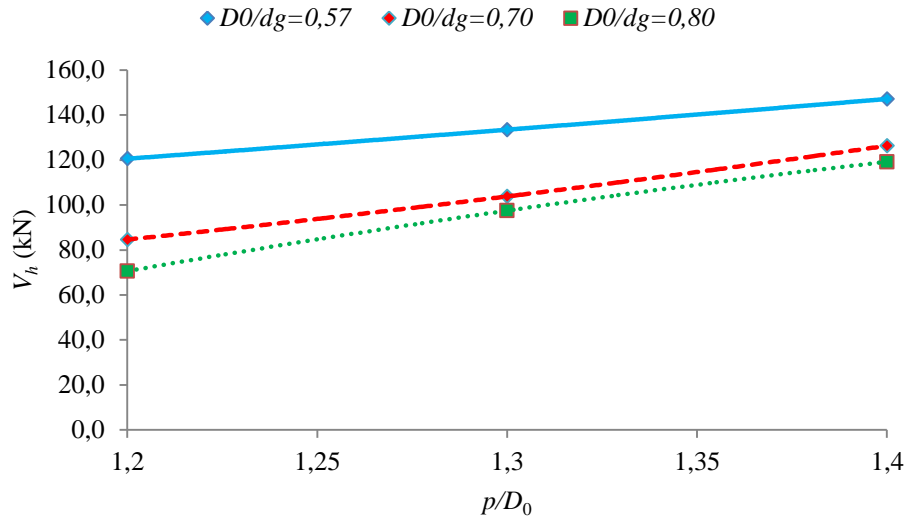


Figura 5.2 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 48,8$.

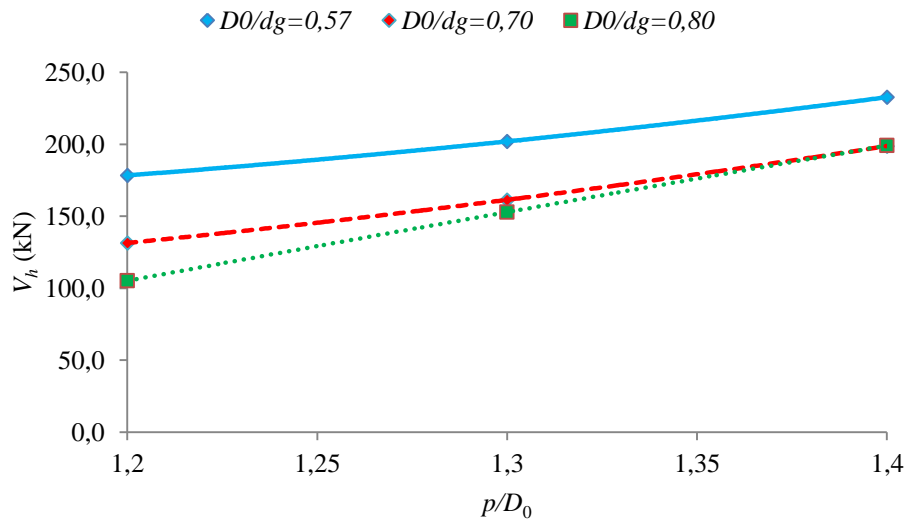


Figura 5.3 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 38,2$.

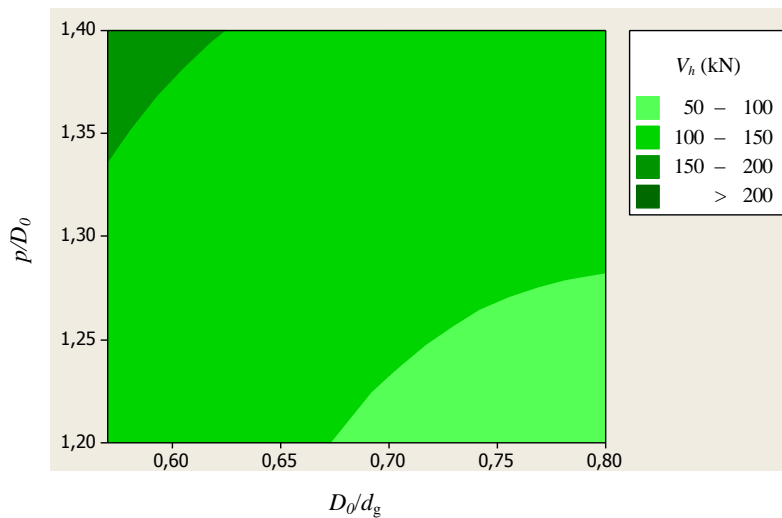


Figura 5.4 – Variação de V_h com p/D_0 versus D_0/d_g .

5.2 Métodos Analíticos Constantes da Literatura

5.2.1 Capacidade Resistente Segundo Ward (1990)

Dependendo da geometria, governada pela espessura da alma t_w e da relação p/D_0 , o cisalhamento horizontal V_h pode induzir o montante de alma à flambagem ou ao colapso por flexão. Nesse contexto, conforme ilustrado na Fig. 5.5, tal cisalhamento causa um momento na seção A-A admitida como rígida.

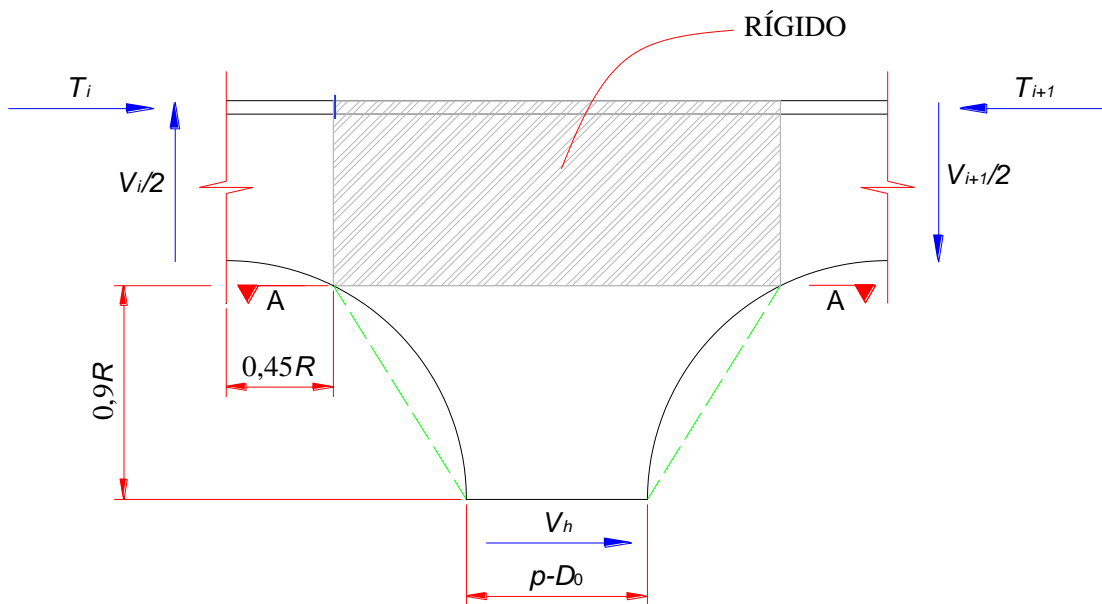


Figura 5.5– Forças aplicadas e seção crítica no montante de alma de uma viga castelada hexagonal equivalente (adaptado de Ward, 1990).

Desse modo, visando ao desenvolvimento de curvas para o dimensionamento do montante de alma, foram realizadas diversas análises numéricas via MEF considerando comportamento elastoplástico do material. Com isso, a Eq. (5.1) para o momento resistente do montante de alma pôde ser proposta:

$$\frac{M}{M_e} = C_1 \left(\frac{S}{D_0} \right) - C_2 \left(\frac{S}{D_0} \right)^2 - C_3 \quad (5.1)$$

em que:

M_e é o momento resistente dado por $M_e = Wf_y$ onde W é o módulo elástico da seção A-A (ver Fig. 5.5);

M é o momento máximo atuante dado por $M = 0,9RV_h$ onde R é o raio da abertura;

C_1 , C_2 e C_3 são constantes dadas por:

$$C_1 = 5,097 + 0,1464\left(\frac{D_0}{t_w}\right) - 0,00174\left(\frac{D_0}{t_w}\right)^2 \quad (5.2)$$

$$C_2 = 1,441 + 0,0625\left(\frac{D_0}{t_w}\right) - 0,000683\left(\frac{D_0}{t_w}\right)^2 \quad (5.3)$$

$$C_3 = 3,645 + 0,0853\left(\frac{D_0}{t_w}\right) - 0,00108\left(\frac{D_0}{t_w}\right)^2 \quad (5.4)$$

A metodologia previamente apresentada foi convertida em um gráfico (ver Fig. 5.6) que é válido para o intervalo $1,08 \leq p/D_0 \leq 1,5$.

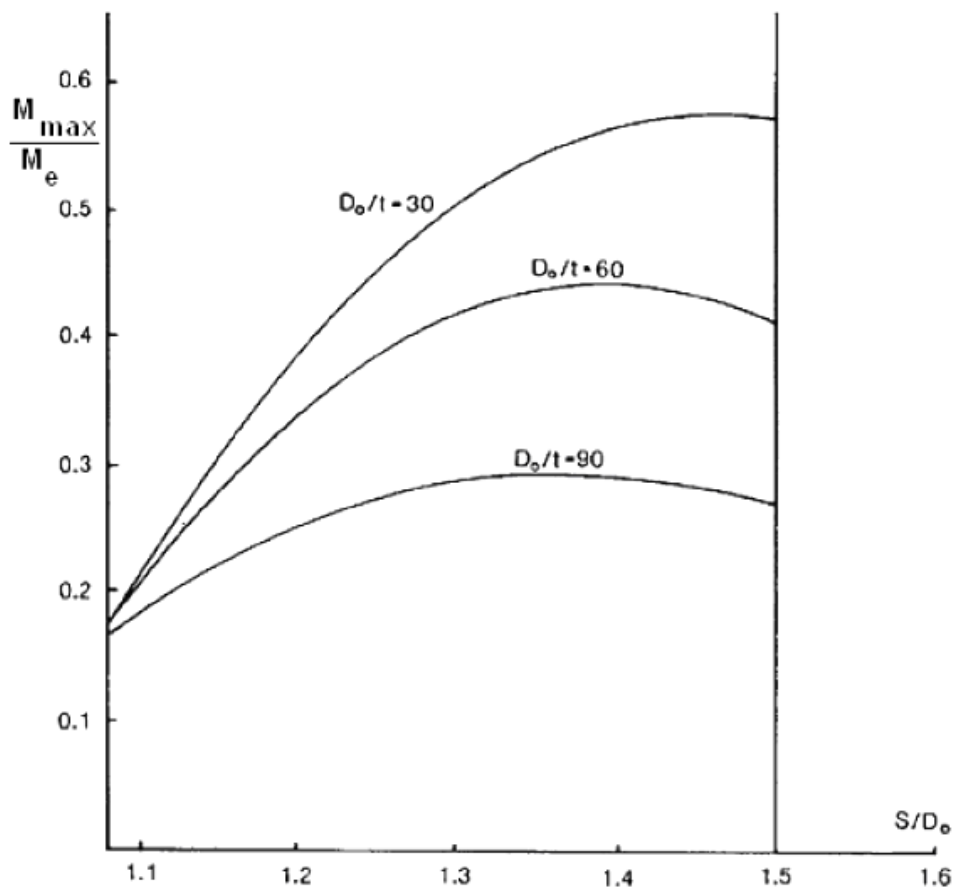


Figura 5.6 – Curvas utilizadas para o dimensionamento do montante de alma (Ward, 1990).

5.2.2 Capacidade Resistente Segundo Lawson *et al.* (2002)

Lawson *et al.* (2002) apresentou uma abordagem empírica baseada no método do laço (*'strut' model*). De acordo com a Fig. 5.7, a ação da força de cisalhamento horizontal causa tensões de compressão e de tração no montante de alma, provocando uma flexão. Nesse contexto, o ângulo crítico para a tensão de compressão máxima no entorno da abertura encontra-se compreendido entre 25° e 40°, dependendo da largura do montante de alma. Assim, o equilíbrio horizontal adaptado para as vigas celulares simétricas é apresentado de acordo com a Eq. (5.5):

$$V_h = \sigma \cdot b_w \cdot t_w \quad (5.5)$$

em que:

σ é a tensão de compressão na diagonal;

b_w é o comprimento do montante de alma;

t_w é a espessura do montante de alma.

A tensão de compressão resistente σ é obtida das curvas de flambagem 'C' da BS 5950-1:2000 (ver anexo A) – apropriada para seções com espessuras inferiores a 40 mm – considerando a esbeltez λ do montante de alma. Para tal, deve-se determinar o valor do comprimento efetivo l_{eff} da diagonal comprimida (ver Fig. 5.7) que para vigas celulares foram estimados de acordo com a Eq. (5.6):

$$l_{eff} = 0,5\sqrt{b_w^2 + D_0^2} \leq 0,7D_0 \quad (5.6)$$

e a esbeltez λ do montante de alma baseada no método do laço é dada pela Eq. (5.7):

$$\lambda = \frac{l_{eff} \sqrt{12}}{t_w} \quad (5.7)$$

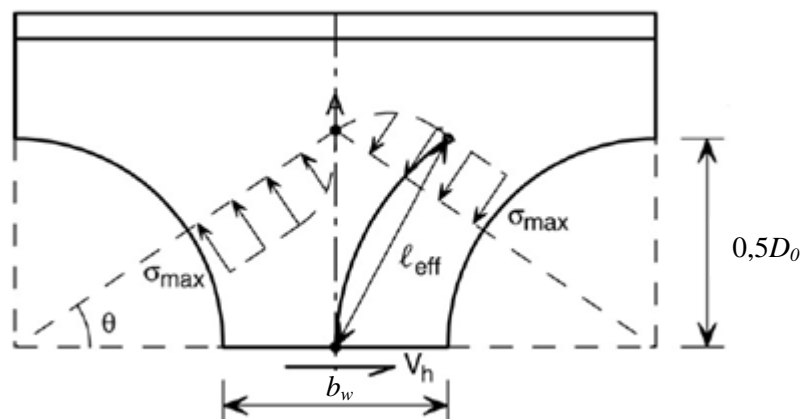


Figura 5.7 – Comportamento do montante de alma (adaptado de Lawson *et al.*, 2002).

5.3 Comparação entre os Métodos Existentes na Literatura e os Resultados Numéricos deste Trabalho

As Figs. 5.8 a 5.16 ilustram gráficos dos resultados numéricos obtidos neste trabalho em comparação com os resultados dos métodos desenvolvidos por Ward (1990) e Lawson *et al.* (2002).

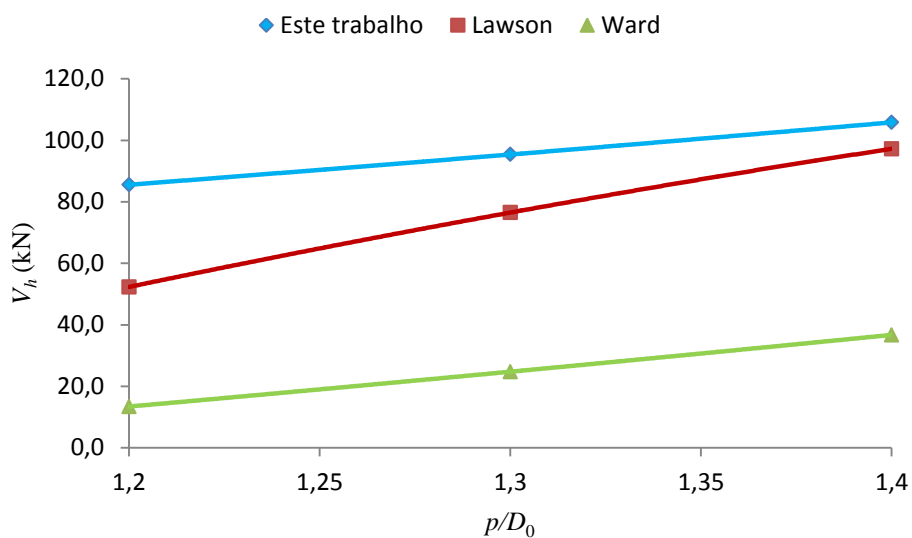


Figura 5.8 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 57,2$ e $D_0/d_g = 0,57$.

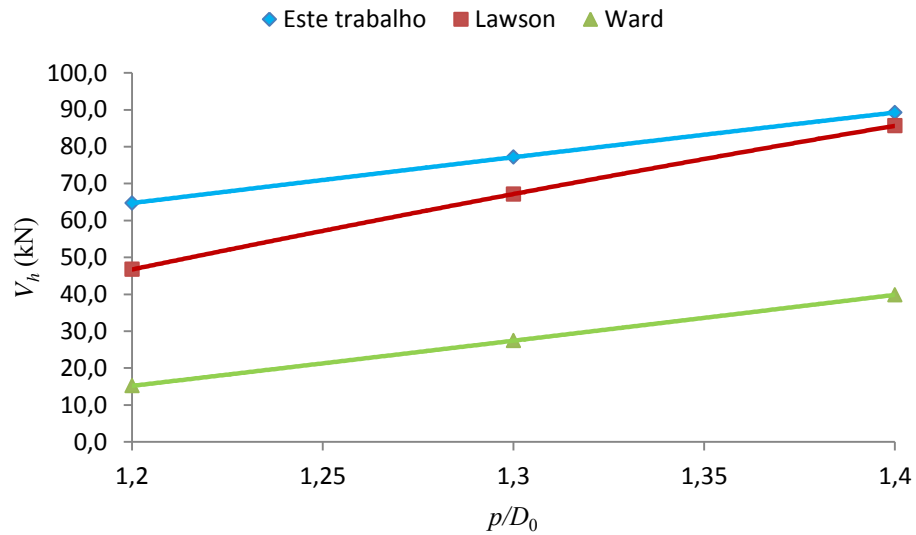


Figura 5.9 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 57,2$ e $D_0/d_g = 0,70$.

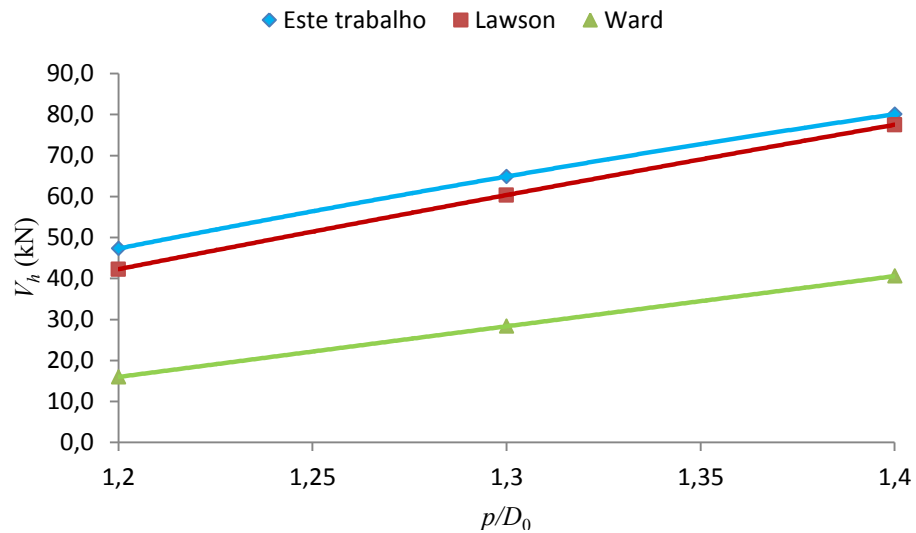


Figura 5.10 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 57,2$ e $D_0/d_g = 0,80$.

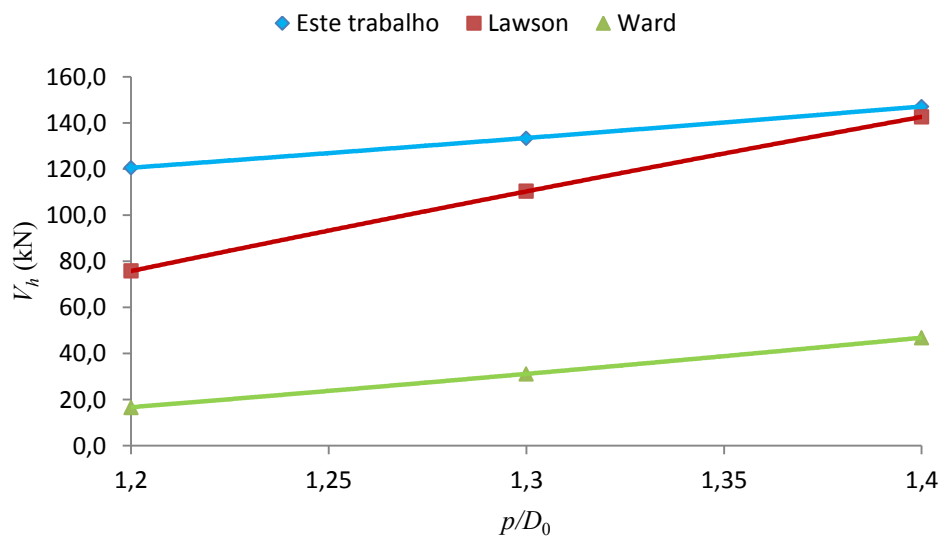


Figura 5.11 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 48,8$ e $D_0/d_g = 0,57$.

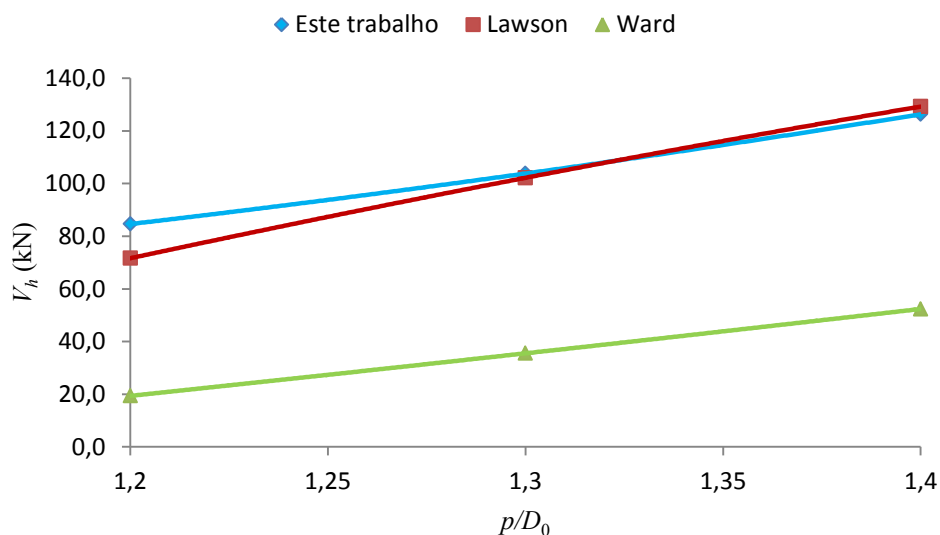


Figura 5.12 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 48,8$ e $D_0/d_g = 0,70$.

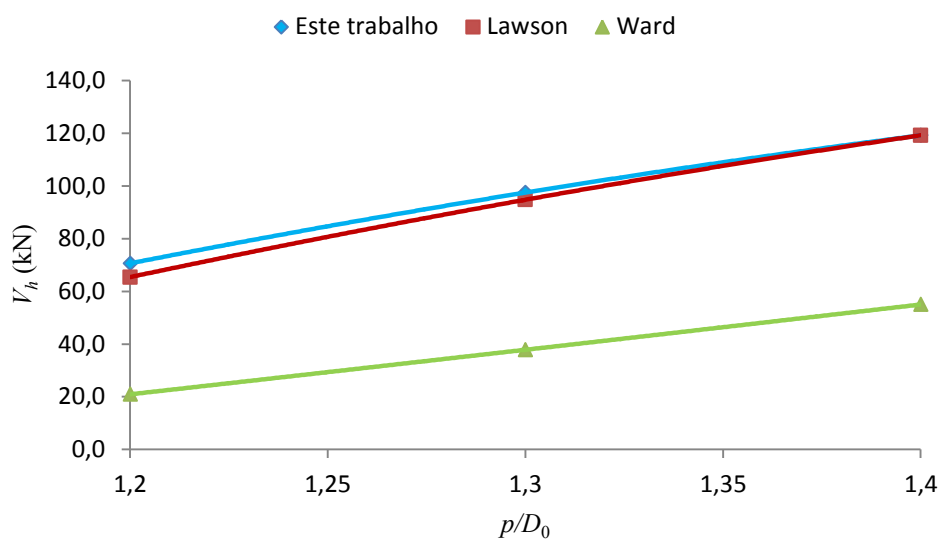


Figura 5.13 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 48,8$ e $D_0/d_g = 0,80$.

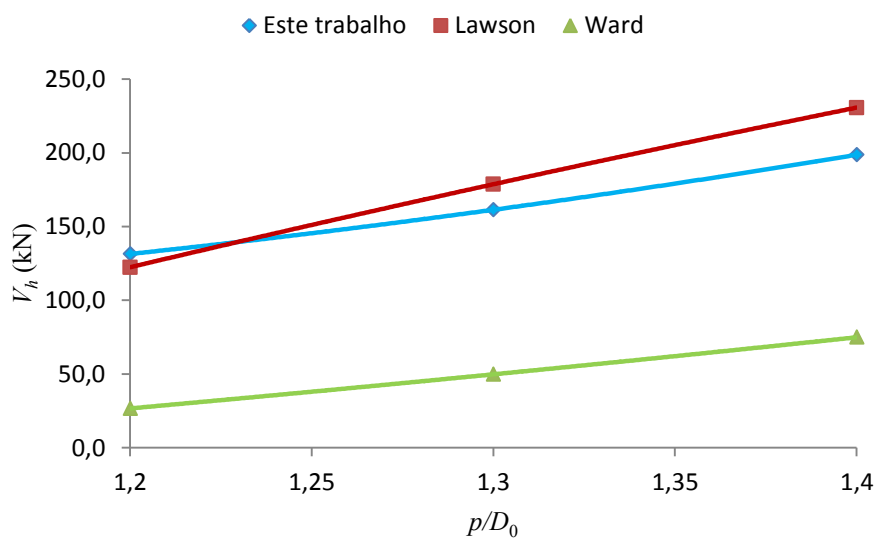


Figura 5.14 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 38,2$ e $D_0/d_g = 0,57$.

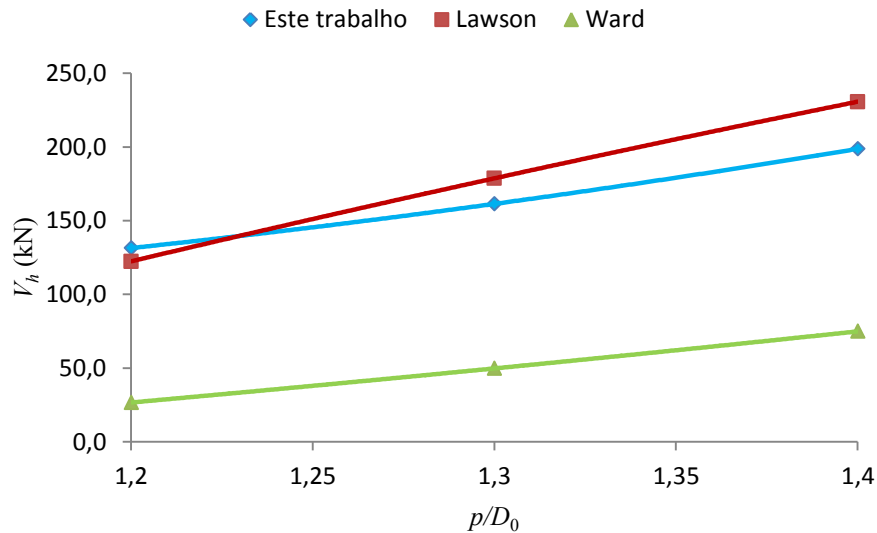


Figura 5.15 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 38,2$ e $D_0/d_g = 0,70$.

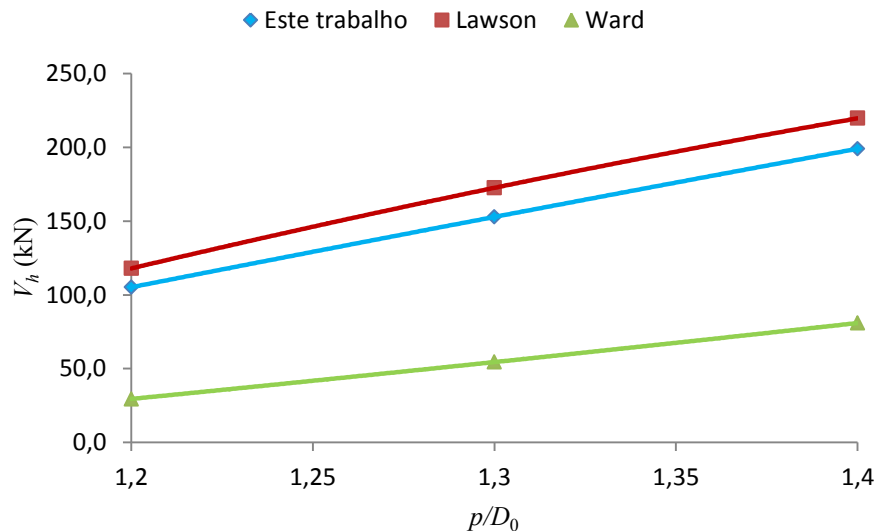


Figura 5.16 – Relação comparativa de V_h versus p/D_0 para $\lambda = 38,2$ e $D_0/d_g = 0,80$.

Os resultados obtidos da metodologia analítica desenvolvida por Ward (1990) foram significativamente inferiores aos valores observados neste trabalho. Essa metodologia, conservadoramente, considera as propriedades elásticas da seção.

Apesar de algumas diferenças significativas, principalmente para a relação $D_0/d_g = 0,57$, os resultados obtidos da metodologia analítica desenvolvida por Lawson *et al.* (2002) foram próximos aos valores observados deste trabalho. Adicionalmente, na maioria dos casos, foi observado que as curvas obtidas deste trabalho são superiores aos valores analíticos.

De modo geral, constatou-se que o cisalhamento horizontal diminui à medida que D_0/d_g aumenta.

5.4 Capacidade Resistente Proposta

Tendo em vista a boa aproximação dos resultados obtidos, a capacidade resistente proposta baseou-se na metodologia desenvolvida por Lawson *et al.* (2002). Entretanto, algumas diferenças foram observadas, principalmente para as relações $D_0/d_g = 0,57$ e $p/D_0 = 1,2$; conforme ilustrado nas Figs. 5.17 e 5.18.

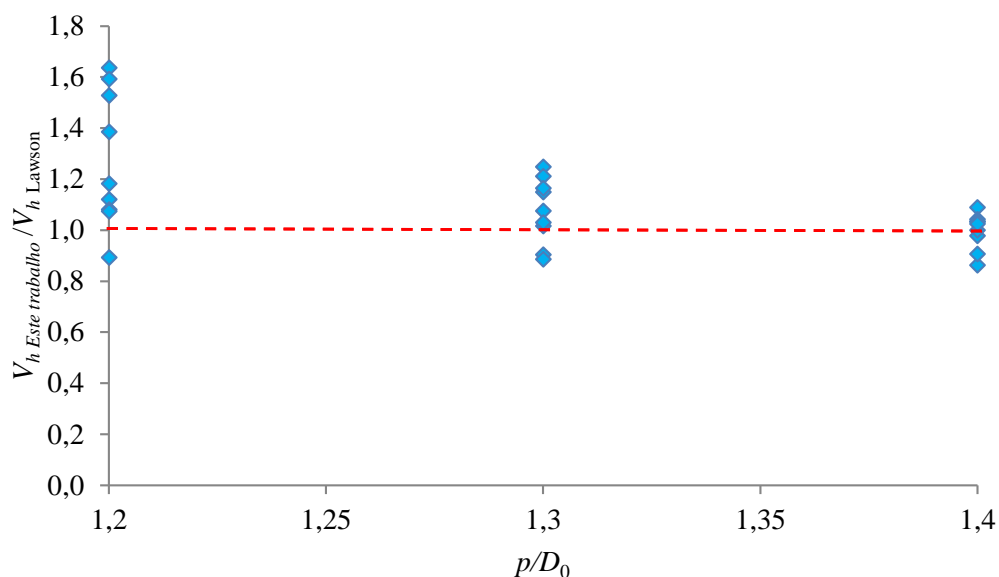


Figura 5.17 – Relação comparativa de V_h (este trabalho e Lawson *et al.*, 2002) versus p/D_0 .

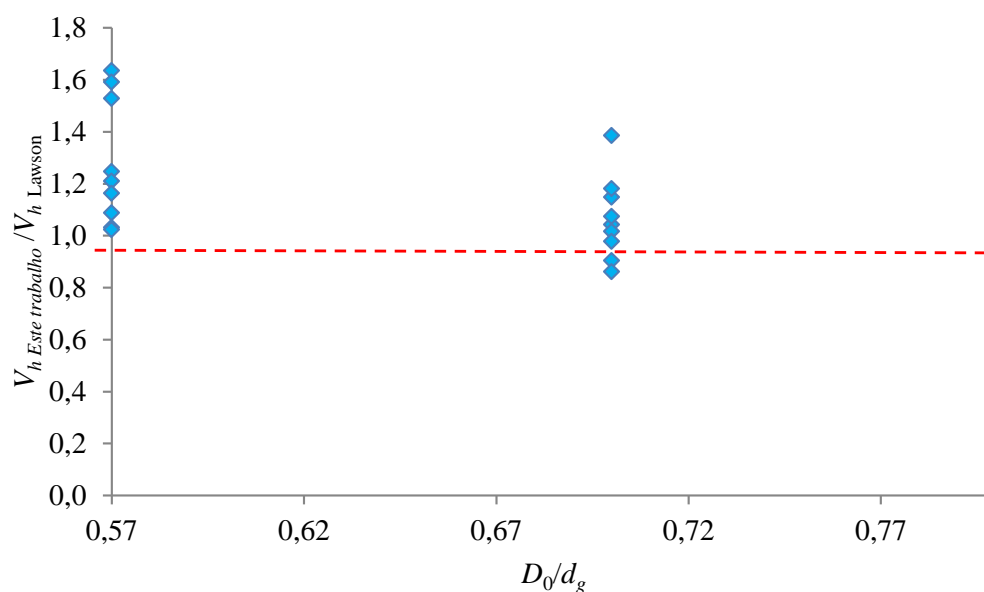


Figura 5.18 – Relação comparativa de V_h (este trabalho e Lawson *et al.*, 2002) versus D_0/d_g .

Observa-se que à medida que D_0/d_g e p/D_0 aumentam, a diferença entre os valores obtidos deste trabalho comparativamente à metodologia de Lawson *et al.* (2002) diminuem. Pode-se

concluir que comprimentos pequenos do montante (b_w) não são representados corretamente pela formulação.

Desse modo, de acordo com a Eq. (5.8), a força cortante resistente na direção horizontal é:

$$V_h = C_1 \cdot C_2 \cdot \sigma \cdot b_w \cdot t_w \quad (5.8)$$

em que:

C_1 e C_2 são fatores de ajuste com base nos resultados numéricos deste trabalho dados por:

- ✓ para $1,20 \leq p/D_0 \leq 1,25$ e $0,57 \leq D_0/d_g \leq 0,65$

$$C_1 = -2,0267 \left(\frac{p}{D_0} \right) + 3,7082 \quad (5.9)$$

$$C_2 = -1,559 \left(\frac{D_0}{d_g} \right) + 2,1648 \quad (5.10)$$

- ✓ para $1,20 \leq p/D_0 \leq 1,25$ e $0,65 < D_0/d_g \leq 0,75$ adotar a Eq. (5.9) para a determinação de C_1 e $C_2 = 1$;
- ✓ para $1,20 \leq p/D_0 \leq 1,25$ e $0,75 < D_0/d_g \leq 0,8$ adotar $C_1 = C_2 = 1$;
- ✓ para $1,25 < p/D_0 \leq 1,40$ e $0,57 \leq D_0/d_g \leq 0,80$ adotar $C_2 = 1$ e

$$C_1 = -0,8157 \left(\frac{p}{D_0} \right) + 2,1372 \quad (5.11)$$

σ é a tensão de compressão na diagonal (conforme apresentada no item 5.2.2);

b_w é o comprimento do montante de alma;

t_w é a espessura do montante de alma.

6 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA ANALÍTICA PROPOSTA

6.1 Capacidade Resistente Proposta Aplicada aos Resultados Numéricos Deste Trabalho

Como primeiro exemplo, deseja-se avaliar os resultados da metodologia analítica proposta comparativamente aos resultados dos modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho. Conforme apresentado na Tab. 6.1, pode-se concluir que na maioria nos casos abordados a aproximação foi satisfatória com uma relação $V_{h \text{ ult}}/V_{h \text{ proposta}}$ máxima de 16%. Entretanto, para os modelos C7 a C9; C12 e C13, todos com esbeltez $\lambda = 38,2$, a metodologia proposta apresentou valores superiores a 10% quando comparados aos resultados numéricos. Ressalta-se que alguns desses modelos apresentaram colapso por plastificação.

Tabela 6.1 – Comparação entre metodologia proposta e resultados numéricos.

| Modelo | P_{cr} (kN) | P_{ult} (kN) | P_{ult}/P_{cr} | $V_{h\text{ ult}}$ (kN) | $V_{h\text{ proposta}}$ (kN) | $V_{h\text{ ult}}/V_{h\text{ proposta}}$ |
|--------|---------------|----------------|------------------|-------------------------|------------------------------|--|
| A2 | 229,8 | 222,9 | 0,97 | 85,6 | 85,2 | 1,00 |
| A3 | 216,4 | 229,4 | 1,06 | 95,4 | 82,4 | 1,16 |
| A4 | 214,8 | 236,3 | 1,10 | 105,8 | 96,8 | 1,09 |
| A7 | 145,4 | 143,9 | 0,99 | 64,7 | 59,6 | 1,09 |
| A8 | 153,8 | 158,4 | 1,03 | 77,2 | 72,3 | 1,07 |
| A9 | 163,6 | 170,1 | 1,04 | 89,3 | 85,3 | 1,05 |
| A12 | 115,6 | 94,8 | 0,82 | 47,3 | 42,3 | 1,12 |
| A13 | 130,4 | 120,0 | 0,92 | 64,9 | 65,0 | 1,00 |
| A14 | 144,8 | 137,5 | 0,95 | 80,1 | 77,1 | 1,04 |
| B2 | 395,0 | 316,0 | 0,80 | 120,6 | 123,4 | 0,98 |
| B3 | 375,5 | 322,9 | 0,86 | 133,5 | 118,8 | 1,12 |
| B4 | 375,6 | 330,6 | 0,88 | 147,2 | 142,0 | 1,04 |
| B7 | 253,2 | 188,6 | 0,75 | 84,6 | 91,4 | 0,93 |
| B8 | 270,4 | 213,6 | 0,79 | 103,8 | 110,0 | 0,94 |
| B9 | 290,8 | 241,4 | 0,83 | 126,4 | 128,6 | 0,98 |
| B12 | 204,9 | 141,4 | 0,69 | 70,6 | 65,4 | 1,08 |
| B13 | 230,9 | 180,1 | 0,78 | 97,5 | 102,1 | 0,96 |
| B14 | 258,9 | 204,5 | 0,79 | 119,2 | 118,7 | 1,00 |
| C2 | 892,0 | 480,8 | 0,54 | 178,4 | 190,2 | 0,94 |
| C3 | 830,6 | 502,5 | 0,61 | 202,0 | 187,0 | 1,08 |
| C4 | 839,9 | 537,5 | 0,64 | 232,7 | 226,3 | 1,03 |
| C7 | 559,3 | 296,4 | 0,53 | 131,4 | 156,2 | 0,84 |
| C8 | 600,0 | 336,0 | 0,56 | 161,4 | 192,4 | 0,84 |
| C9 | 651,2 | 384,2 | 0,59 | 198,8 | 229,6 | 0,87 |
| C12 | 446,5 | 210,8 | 0,47 | 105,2 | 118,0 | 0,89 |
| C13 | 514,0 | 282,7 | 0,55 | 152,9 | 185,8 | 0,82 |
| C14 | 579,4 | 341,9 | 0,59 | 199,1 | 218,7 | 0,91 |

6.2 Capacidade Resistente Proposta Aplicada a Outros Exemplos

Neste item, deseja-se avaliar o comportamento da metodologia analítica proposta através da consideração de diferentes perfis I da série W. Nesse contexto, foram desenvolvidos modelos a partir dos perfis W360x72 ($\lambda = 37,2$), W410x67 ($\lambda = 43,2$), W530x82 ($\lambda = 52,7$), W460x82 ($\lambda = 43,3$) e W200x31,3 ($\lambda = 29,7$). A Tab. 6.2 apresenta as propriedades geométricas dos modelos. Adicionalmente, ressalta-se que todos os modelos foram desenvolvidos de acordo com as premissas apresentadas no Capítulo 3.

Tabela 6.2 – Propriedades geométricas dos modelos numéricos.

| Modelo | Perfil | λ | d (mm) | d_g (mm) | D_o (mm) | p (mm) | b_w (mm) | b_{we} (mm) | L_v (mm) | L_c (mm) |
|--------|-----------|-----------|----------|------------|------------|----------|------------|---------------|------------|------------|
| D1 | W360x72 | 37,2 | 350 | 525,0 | 299,25 | 359,1 | 59,9 | 122,4 | 1621 | 1834 |
| D2 | W410x67 | 43,2 | 410 | 615,0 | 430,5 | 559,7 | 129,2 | 264,1 | 2638 | 2981 |
| D3 | W530x82 | 52,7 | 528 | 792,0 | 633,6 | 887,0 | 253,4 | 532,2 | 4359 | 4664 |
| D4 | W460x82 | 43,3 | 460 | 690,0 | 483,0 | 627,9 | 144,9 | 296,3 | 2959 | 3345 |
| D5 | W200x31,3 | 29,7 | 210 | 315,0 | 220,5 | 286,7 | 66,2 | 135,3 | 1351 | 1527 |

Considerando os resultados ilustrados nas Figs. 6.1 a 6.5 e Tab. 6.3, das quatro análises realizadas, somente o modelo D3 apresentou relação $V_{h\text{ ult}}/V_{h\text{ proposta}}$ significativa (1,24). Contudo, o acoplamento do mecanismo Vierendeel associado à flambagem do montante de alma provocou a divergência do resultado (Fig.6.3). Para os demais modelos, foi observada uma boa aproximação, com uma divergência máxima de 9%.

Tabela 6.3 – Comparação entre metodologia proposta e resultados numéricos.

| Modelo | P_{cr} (kN) | P_{ult} (kN) | P_{ult}/P_{cr} | $V_{h\text{ ult}}$ (kN) | $V_{h\text{ proposta}}$ (kN) | $V_{h\text{ ult}}/V_{h\text{ proposta}}$ |
|--------|---------------|----------------|------------------|-------------------------|------------------------------|--|
| D1 | 1138,2 | 621,5 | 0,55 | 226,3 | 207,0 | 1,09 |
| D2 | 690,9 | 455,3 | 0,66 | 216,4 | 205,6 | 1,05 |
| D3 | 605,9 | 516,2 | 0,85 | 297,7 | 239,6 | 1,24 |
| D4 | 866,7 | 572,0 | 0,66 | 272,1 | 259,5 | 1,05 |
| D5 | 538,89 | 219,3 | 0,41 | 104,1 | 112,6 | 0,92 |

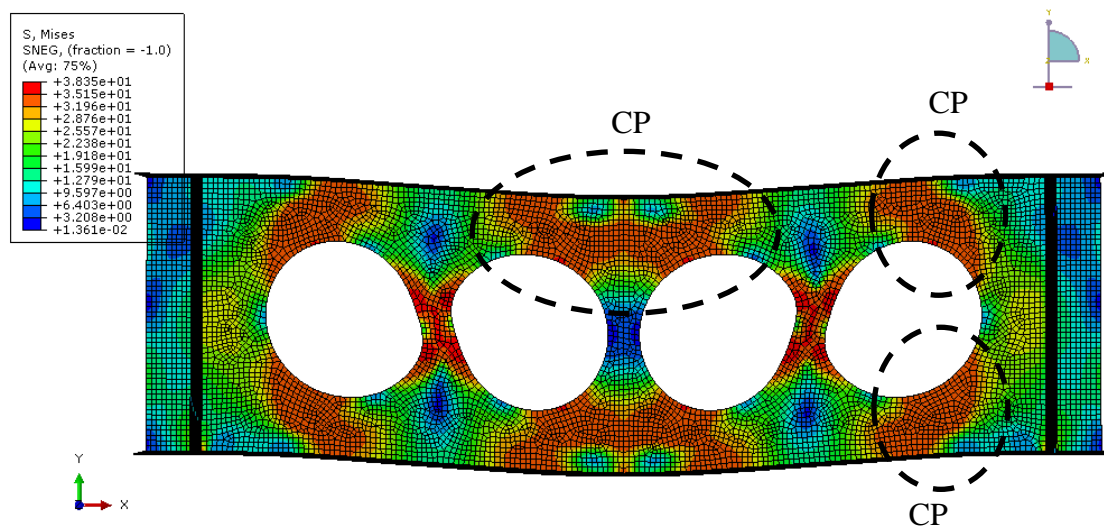


Figura 6.1 – Colapso por plastificação (modelo D1).

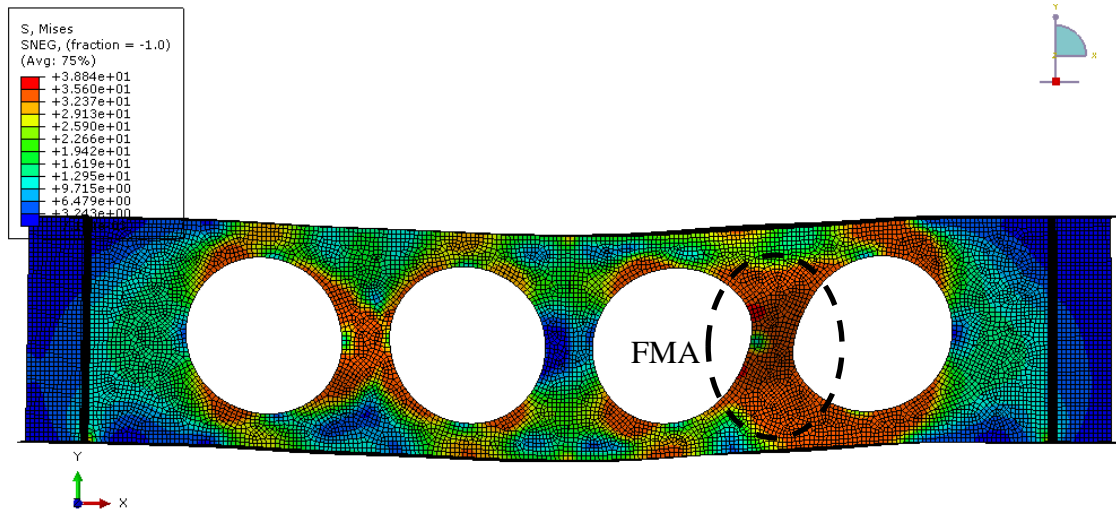


Figura 6.2 – Flambagem do montante de alma (modelo D2).

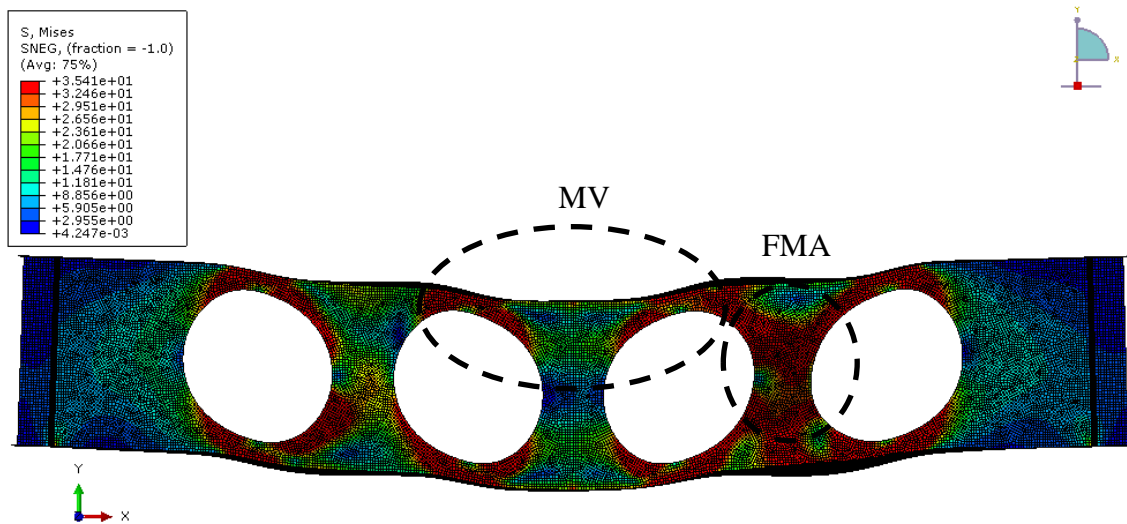


Figura 6.3 – Acoplamento do mecanismo Vierendeel com a flambagem do montante de alma (modelo D3).

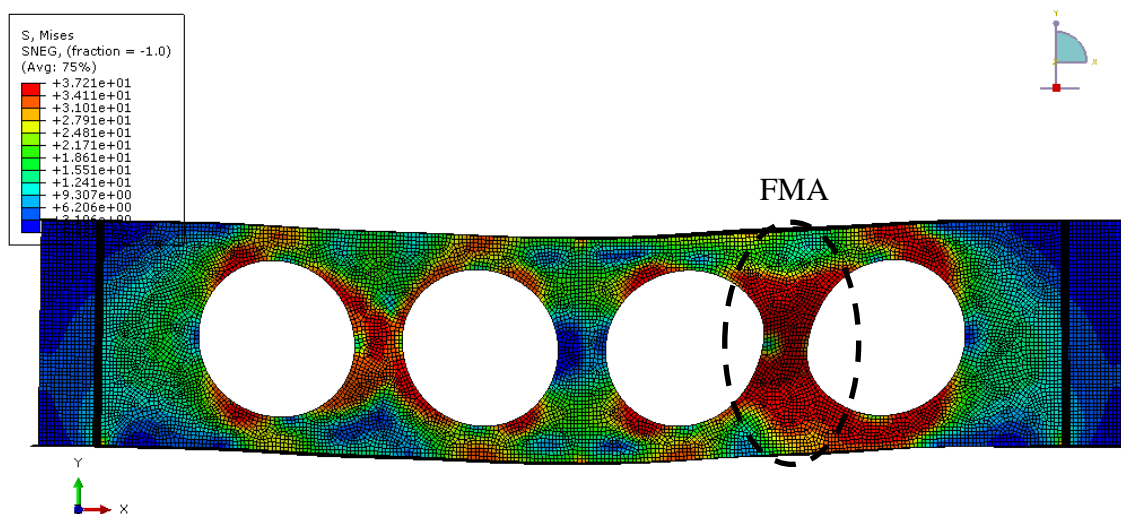


Figura 6.4 – Flambagem do montante de alma (modelo D4).

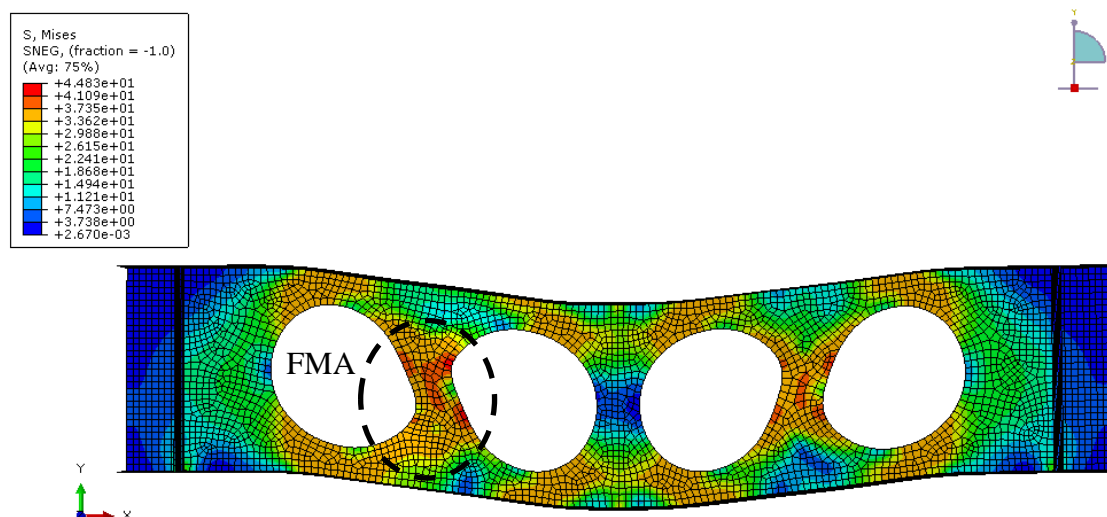


Figura 6.5 – Flambagem do montante de alma (modelo D5).

Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que a metodologia apresentada foi satisfatória.

7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Sobre a Análise Numérica

Neste trabalho, após o desenvolvimento e aferição dos modelos numéricos, utilizando-se o programa ABAQUS (Hibbit *et al.*, 2009), o comportamento do montante de alma das vigas celulares foi observado e discutido. Nesses modelos, foram consideradas as não linearidades geométrica e de material.

As vigas celulares utilizadas para o desenvolvimento dos modelos foram originadas a partir dos perfis laminados W310x21, W310x28 e W310x52 fabricados no Brasil. Essas vigas, submetidas a uma carga concentrada no meio do vão, foram consideradas biapoiadas, além de possuírem contenções laterais de modo a evitar a flambagem lateral. Nesse contexto, através de um estudo paramétrico, 45 modelos numéricos foram desenvolvidos considerando os limites pré-determinados por Harper (1994) em que $1,08 \leq p/D_0 \leq 1,5$ e $0,57 \leq D_0/d_d \leq 0,80$.

Com base nos resultados, foi observado que os modelos com os parâmetros $D_0 = 0,57d_g$ e $p = 1,08D_0$ (A1, A6, A11, B1, B6, B11, C1, C6 e C11) apresentaram colapso por plastificação (CP). Adicionalmente, constatou-se que os modelos A1, B1 e C1 chegaram ao colapso muito antes de atingir a carga crítica de flambagem ($P_{ult}/P_{cr} < 0,60$). Além dos parâmetros descritos, esse comportamento está diretamente relacionado à menor esbeltez do montante. O colapso por plastificação também foi observado em alguns modelos com $p = 1,20D_0$ para a esbeltez $\lambda = 38,2$ (C7 e C12).

Para os modelos A15, B15 e C15, em que $D_0 = 0,80d_g$ e $p = 1,50D_0$, o modo de colapso observado foi o mecanismo Vierendeel (MV). Por se tratar de um caso limite, em que o espaçamento entre as aberturas (p) é maior que o recomendado por Harper (1994), observa-se a formação de rótulas plásticas nos cantos das aberturas. Essa geometria proporciona, além de tensões normais e de cisalhamento na extremidade do ‘tê’ (decorrentes do momento fletor e do esforço cortante, respectivamente), uma parcela adicional de tensão normal que se origina da flexão produzida pela ação da força cortante.

Para os modelos B14 e C14, em que $D_0 = 0,80$ e $p = 1,40D_0$, foi observado um acoplamento do mecanismo Vierendeel com a flambagem do montante de alma (MV+FMA) sendo que o primeiro a ser observado foi o MV. Esses modos de colapso ocorreram somente para as esbeltezes $\lambda = 48,8$ e $\lambda = 38,2$. Os modelos com essa combinação geométrica caracterizam uma fase de transição entre os dois modos de instabilidade.

7.2 Sobre a Capacidade Resistente

Os valores do limite em que ocorre instabilidade no montante de alma foram comparados com as formulações existentes na literatura. Os resultados obtidos da metodologia analítica desenvolvida por Ward (1990) foram significativamente inferiores aos valores observados neste trabalho. Uma explicação seria que tal metodologia, conservadoramente, considera as propriedades elásticas da seção. Apesar de algumas diferenças significativas, principalmente para a relação $D_0/d_g = 0,57$, os resultados obtidos da metodologia analítica desenvolvida por Lawson *et al.* (2002) ficaram próximos dos valores alcançados neste trabalho. Adicionalmente, na maioria dos casos, foi observado que as curvas obtidas neste trabalho são superiores aos valores analíticos.

Tendo em vista a boa aproximação dos resultados obtidos, a capacidade resistente proposta baseou-se na metodologia desenvolvida por Lawson *et al.* (2002). Entretanto, conforme descrito, algumas diferenças foram observadas, principalmente para as relações $D_0/d_g = 0,57$ e $p/D_0 = 1,2$. À medida que D_0/d_g e p/D_0 aumentam, a diferença entre os valores obtidos deste trabalho comparativamente à metodologia de Lawson *et al.* (2002) diminuem. Pode-se concluir que comprimentos pequenos do montante (b_w) não são representados corretamente pela formulação. Nesse contexto, para uma melhor aproximação, com base nos resultados

numéricos deste trabalho, foram adicionados à formulação de Lawson *et al.* (2002) dois fatores de ajuste.

Logo, para o dimensionamento de vigas celulares oriundas de perfis laminados brasileiros, considerando a flambagem do montante de alma, recomenda-se a utilização da formulação proposta neste trabalho.

7.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Considerando a flambagem do montante de alma devida à força cortante, objetivo de estudo deste trabalho, algumas investigações podem ser sugeridas, conforme descrito abaixo:

- ✓ consideração e verificação da influência das tensões residuais na modelagem (considerando as perturbações provocadas pelo corte e soldagem dos perfis);
- ✓ influência do valor da imperfeição geométrica na modelagem;
- ✓ desenvolvimento de um programa experimental considerando os perfis analisados;
- ✓ avaliação numérica do comportamento dos perfis segundo acoplamento dos modos de colapso;
- ✓ estudo comparativo entre vigas celulares e casteladas nos âmbitos numérico e analítico;
- ✓ avaliação e investigação da flambagem do montante de alma em vigas celulares com a alma expandida.

8

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 8800:2008, Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios, *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, 2008.

ABREU, L. M. P. Determinação do momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas de aço celulares, Dissertação de Mestrado, *Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais*, Belo Horizonte, 2011.

ALTFILLISCH, M. D.; COOKE, B. R.; TOPRAC, A. A. An investigation of welded open-web expanded beams, *Welding Research Supplement*, pp. 77-88, Vol. 22, 1957.

BAKE, S. Cellular beams at ambient and elevated temperatures, Tese de Doutorado, *School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, MACE, The University of Manchester*, Manchester, 2010.

BAZILE, A. e TEXIER, J. Tests on castellated beams, *Constr. Métallique*, Paris, France, Vol. 3, pp.12-25, 1968.

BEZERRA, E. M. Determinação do momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas de aço casteladas, Dissertação de Mestrado, *Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais*, Belo Horizonte, 2012.

BS5950. The structural use of steel in buildings Part 1: Code of practice for design. In: Rolled and welded sections. *British Standards Institution (BSI)*, 2000.

CASTRO e SILVA, A. L. R. Análise numérica não linear da flambagem local de perfis de aço estrutural submetidos à compressão uniaxial, Tese de Doutorado, *Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte*, 2006.

CIMADEVILA, F. J. E.; GUTIÉRREZ, E. M.; RODRÍGUEZ, J. A. V. Vigas alveoladas. Vol. 3. Madri: A Coruña: Biblioteca Técnica Universitária; 2000.

DELESQUES, R. Stabilité des montants des poutres ajourées, *Construction Métallique*, pp. 26-33, Vol. 3, 1968.

DOUGUERTY, B. K. Castellated Beams: A state of the art report, *South African Institute of Civil Engineers Journal*, pp.12-20, 1993.

EARLS, C. J. Effects of material property stratification and residual stresses on single angle flexural ductility, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 51, p. 147-75, 1999.

ELLOBODY, E. Nonlinear analysis of cellular steel beams under combined buckling modes, *Thin-Walled Structures*, 2011.

ERDAL, F. e SAKA, M. P. Ultimate load carrying capacity of optimally designed steel cellular beams, *Journal of Constructional Steel Research*, 2012.

ERDAL, F. Ultimate load capacity of optimally designed cellular beams, Tese de Doutorado, *Engineering Sciences Department, Middle East Technical University, Turquia*, 2011.

FERRARI, G. A. Simulação numérica do comportamento estrutural de vigas alveolares mistas de aço e concreto, Dissertação de Mestrado, *Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UFV, Viçosa*, 2013.

HALLEUX, P. Limit analysis of castellated steel beams. *Acier-Stahl-Steel*, pp. 133-144, 1967.

HARPER, C.S. Design in steel 4: Castellated & Cellular Beams, *British Steel Publications*, 1994.

HIBBITT, KARLSSON and SORENSEN. ABAQUS/Standard – User’s manual, Vol. I, II e III, *Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc*, EUA, 2009.

HUSAIN, M. U. e SPEIRS, W. G. Failure of castellated beams due to rupture of welded joints, *Acier-Stahl-Steer*, N° 1, 1971.

KERDAL, D. e NETHECORT, D. A. Failure modes for castellated beams. *Journal of Construction Steel Research*. Vol. 4. p. 295-315, 1984.

LAWSON, R. M., M, N. G. e D., O. Design of FABSEC Beams in Non-Composite and Composite Applications (including Fire), *The Steel Construction Institute*, Vol. 269, 2002.

LAWSON, R. M.; LIM, J.; HICKS, S. J.; e SIMMS, W. I. Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings, *Journal of Constructional Steel Research*, 2006.

LLEONART, J. M. Geometria de los perfiles alveolares, *Informes de La Construcción*, v. 40, 1988, p. 51-64.

OLANDER, H.C. A method of calculating stresses in rigid frames corners. *Journal of ASCE*, 1954.

OLIVEIRA, L. B. Procedimentos para definição das características geométricas de vigas alveolares de aço para sistemas de piso e de cobertura, Dissertação de Mestrado, *Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais*, Belo Horizonte, 2012.

REDWOOD, R., DEMIRDJIAN, S. Castellated beam web buckling in shear. *Journal of Structural Engineering*, ASCE 124(10):1202–7, 1998.

SHERBOURNE, A. N. Plastic behavior of castellated beams. *Institute of Welding*, N° C2, Londres, 1966.

SILVEIRA, E. G. Estudo de vigas alveolares com ênfase nos modos de colapso com formação de rótulas plásticas, Dissertação de Mestrado, *Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UFV, Viçosa*, 2011.

SURTEES, J. LIU, Z. Report of loading tests on cellform beams. *Research report, University of Leeds*, 1995.

TOPRAC, A; COOKE B.R. An experimental investigation of open-web beams. *Welding research council bulletin series*, Nº 47, 1959.

TSAVDARIDIS, K.D.; D'MELLO, C. Hawes M. Experimental study of ultra shallow floor beams with perforated steel sections. *Research report, National Specialist Contractors' Council*, NSCC2009, p. 312–9, 2009.

TSAVDARIDIS, K.D.; D'MELLO, C. Finite Element Investigation on Web-Post Buckling of Perforated Steel Beams with Various Web Opening Shapes subjected under different shear-moment interaction, *6th European Conference on Steel and Composite Structures*, 2011.

TSAVDARIDIS, K.D.; D'MELLO, C. Web buckling study of the behaviour and strength of perforated steel beams with various novel web opening shapes, *Journal of Constructional Steel Research*, 2010.

VERÍSSIMO, G. S.; PAES, J. L. R.; FAKURY, R. H.; RODRIGUES, F. C. Estudo de vigas de aço alveolares fabricadas a partir de perfis laminados brasileiros. Relatório de Pesquisa. Registro FAPEMIG: TEC-APQ-01429-08. Registro UFV: 30157258412, 2010.

VIEIRA, W. B. Simulação numérica do comportamento estrutural de vigas casteladas de aço com ênfase na flambagem do montante de alma, Dissertação de Mestrado, *Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UFV, Viçosa*, 2011.

WARD, J. K. Design of Composite and Non-Composite Cellular Beams, *The Steel Construction Institute*, 1ª edição, 1990.

WARREN, J. Ultimate load and deflection behaviour of cellular beams, Dissertação de Mestrado, *School of Civil Engineering, University of Natal, Durban*, 2001.

WESTOK. <www.westok.co.uk> acessado em 02/11/2012.

ZAAROUR W, REDWOOD R. Web post buckling in thin webbed castellated beams. *Journal of Structural Engineering*, ASCE 122 (8): 860–6, 1996.

ANEXO A – CURVAS DE FLAMBAGEM ‘C’ DA BS 5950-1:2000

Neste anexo, apresentam-se as curvas de flambagem ‘C’ da BS 5950-1:2000 para a determinação da tensão de compressão σ (apresentada como p_c na referência descrita) resistente do montante de alma em vigas celulares segundo Lawson *et al.* (2002).

| 5) Values of p_c (N/mm ²) with $\lambda < 110$ for strut curve c | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|
| λ | Steel grade and design strength p_y (N/mm ²) | | | | | | | | | | | | | | |
| | S 275 | | | | | S 355 | | | | | S 460 | | | | |
| | 235 | 245 | 255 | 265 | 275 | 315 | 325 | 335 | 345 | 355 | 400 | 410 | 430 | 440 | 460 |
| 15 | 235 | 245 | 255 | 265 | 275 | 315 | 325 | 335 | 345 | 355 | 398 | 408 | 427 | 436 | 455 |
| 20 | 233 | 242 | 252 | 261 | 271 | 308 | 317 | 326 | 336 | 345 | 387 | 396 | 414 | 424 | 442 |
| 25 | 226 | 235 | 245 | 254 | 263 | 299 | 308 | 317 | 326 | 335 | 375 | 384 | 402 | 410 | 428 |
| 30 | 220 | 228 | 237 | 246 | 255 | 289 | 298 | 307 | 315 | 324 | 363 | 371 | 388 | 396 | 413 |
| 35 | 213 | 221 | 230 | 238 | 247 | 280 | 288 | 296 | 305 | 313 | 349 | 357 | 374 | 382 | 397 |
| 40 | 206 | 214 | 222 | 230 | 238 | 270 | 278 | 285 | 293 | 301 | 335 | 343 | 358 | 365 | 380 |
| 42 | 203 | 211 | 219 | 227 | 235 | 266 | 273 | 281 | 288 | 296 | 329 | 337 | 351 | 358 | 373 |
| 44 | 200 | 208 | 216 | 224 | 231 | 261 | 269 | 276 | 284 | 291 | 323 | 330 | 344 | 351 | 365 |
| 46 | 197 | 205 | 213 | 220 | 228 | 257 | 264 | 271 | 279 | 286 | 317 | 324 | 337 | 344 | 357 |
| 48 | 195 | 202 | 209 | 217 | 224 | 253 | 260 | 267 | 274 | 280 | 311 | 317 | 330 | 337 | 349 |
| 50 | 192 | 199 | 206 | 213 | 220 | 248 | 255 | 262 | 268 | 275 | 304 | 310 | 323 | 329 | 341 |
| 52 | 189 | 196 | 203 | 210 | 217 | 244 | 250 | 257 | 263 | 270 | 297 | 303 | 315 | 321 | 333 |
| 54 | 186 | 193 | 199 | 206 | 213 | 239 | 245 | 252 | 258 | 264 | 291 | 296 | 308 | 313 | 324 |
| 56 | 183 | 189 | 196 | 202 | 209 | 234 | 240 | 246 | 252 | 258 | 284 | 289 | 300 | 305 | 315 |
| 58 | 179 | 186 | 192 | 199 | 205 | 229 | 235 | 241 | 247 | 252 | 277 | 282 | 292 | 297 | 306 |
| 60 | 176 | 183 | 189 | 195 | 201 | 225 | 230 | 236 | 241 | 247 | 270 | 274 | 284 | 289 | 298 |
| 62 | 173 | 179 | 185 | 191 | 197 | 220 | 225 | 230 | 236 | 241 | 262 | 267 | 276 | 280 | 289 |
| 64 | 170 | 176 | 182 | 188 | 193 | 215 | 220 | 225 | 230 | 235 | 255 | 260 | 268 | 272 | 280 |
| 66 | 167 | 173 | 178 | 184 | 189 | 210 | 215 | 220 | 224 | 229 | 248 | 252 | 260 | 264 | 271 |
| 68 | 164 | 169 | 175 | 180 | 185 | 205 | 210 | 214 | 219 | 223 | 241 | 245 | 252 | 256 | 262 |
| 70 | 161 | 166 | 171 | 176 | 181 | 200 | 204 | 209 | 213 | 217 | 234 | 238 | 244 | 248 | 254 |
| 72 | 157 | 163 | 168 | 172 | 177 | 195 | 199 | 203 | 207 | 211 | 227 | 231 | 237 | 240 | 246 |
| 74 | 154 | 159 | 164 | 169 | 173 | 190 | 194 | 198 | 202 | 205 | 220 | 223 | 229 | 232 | 238 |
| 76 | 151 | 156 | 160 | 165 | 169 | 185 | 189 | 193 | 196 | 200 | 214 | 217 | 222 | 225 | 230 |
| 78 | 148 | 152 | 157 | 161 | 165 | 180 | 184 | 187 | 191 | 194 | 207 | 210 | 215 | 217 | 222 |
| 80 | 145 | 149 | 153 | 157 | 161 | 176 | 179 | 182 | 185 | 188 | 201 | 203 | 208 | 210 | 215 |
| 82 | 142 | 146 | 150 | 154 | 157 | 171 | 174 | 177 | 180 | 183 | 195 | 197 | 201 | 203 | 207 |
| 84 | 139 | 142 | 146 | 150 | 154 | 167 | 169 | 172 | 175 | 178 | 189 | 191 | 195 | 197 | 201 |
| 86 | 135 | 139 | 143 | 146 | 150 | 162 | 165 | 168 | 170 | 173 | 183 | 185 | 189 | 190 | 194 |
| 88 | 132 | 136 | 139 | 143 | 146 | 158 | 160 | 163 | 165 | 168 | 177 | 179 | 183 | 184 | 187 |
| 90 | 129 | 133 | 136 | 139 | 142 | 153 | 156 | 158 | 161 | 163 | 172 | 173 | 177 | 178 | 181 |
| 92 | 126 | 130 | 133 | 136 | 139 | 149 | 152 | 154 | 156 | 158 | 166 | 168 | 171 | 173 | 175 |
| 94 | 124 | 127 | 130 | 133 | 135 | 145 | 147 | 149 | 151 | 153 | 161 | 163 | 166 | 167 | 170 |
| 96 | 121 | 124 | 127 | 129 | 132 | 141 | 143 | 145 | 147 | 149 | 156 | 158 | 160 | 162 | 164 |
| 98 | 118 | 121 | 123 | 126 | 129 | 137 | 139 | 141 | 143 | 145 | 151 | 153 | 155 | 157 | 159 |
| 100 | 115 | 118 | 120 | 123 | 125 | 134 | 135 | 137 | 139 | 140 | 147 | 148 | 151 | 152 | 154 |
| 102 | 113 | 115 | 118 | 120 | 122 | 130 | 132 | 133 | 135 | 136 | 143 | 144 | 146 | 147 | 149 |
| 104 | 110 | 112 | 115 | 117 | 119 | 126 | 128 | 130 | 131 | 133 | 138 | 139 | 142 | 142 | 144 |
| 106 | 107 | 110 | 112 | 114 | 116 | 123 | 125 | 126 | 127 | 129 | 134 | 135 | 137 | 138 | 140 |
| 108 | 105 | 107 | 109 | 111 | 113 | 120 | 121 | 123 | 124 | 125 | 130 | 131 | 133 | 134 | 136 |

Figura A.1 – Tensão de compressão resistente (p_c) para $15 \leq \lambda \leq 108$.

| 6) Values of p_c (N/mm ²) with $\lambda \geq 110$ for strut curve c | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|
| λ | Steel grade and design strength p_y (N/mm ²) | | | | | | | | | | | | | | |
| | S 275 | | | | | S 355 | | | | | S 460 | | | | |
| | 235 | 245 | 255 | 265 | 275 | 315 | 325 | 335 | 345 | 355 | 400 | 410 | 430 | 440 | 460 |
| 110 | 102 | 104 | 106 | 108 | 110 | 116 | 118 | 119 | 120 | 122 | 126 | 127 | 129 | 130 | 132 |
| 112 | 100 | 102 | 104 | 106 | 107 | 113 | 115 | 116 | 117 | 118 | 123 | 124 | 125 | 126 | 128 |
| 114 | 98 | 100 | 101 | 103 | 105 | 110 | 112 | 113 | 114 | 115 | 119 | 120 | 122 | 123 | 124 |
| 116 | 95 | 97 | 99 | 101 | 102 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 |
| 118 | 93 | 95 | 97 | 98 | 100 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 |
| 120 | 91 | 93 | 94 | 96 | 97 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 110 | 110 | 112 | 112 | 113 |
| 122 | 89 | 90 | 92 | 93 | 95 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 107 | 107 | 109 | 109 | 110 |
| 124 | 87 | 88 | 90 | 91 | 92 | 97 | 98 | 99 | 100 | 100 | 104 | 104 | 106 | 106 | 107 |
| 126 | 85 | 86 | 88 | 89 | 90 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 101 | 102 | 103 | 103 | 104 |
| 128 | 83 | 84 | 86 | 87 | 88 | 92 | 93 | 94 | 95 | 95 | 98 | 99 | 100 | 100 | 101 |
| 130 | 81 | 82 | 84 | 85 | 86 | 90 | 91 | 91 | 92 | 93 | 96 | 96 | 97 | 98 | 99 |
| 135 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 84 | 85 | 86 | 87 | 87 | 90 | 90 | 91 | 92 | 92 |
| 140 | 72 | 74 | 75 | 76 | 76 | 79 | 80 | 81 | 81 | 82 | 84 | 85 | 85 | 86 | 87 |
| 145 | 69 | 70 | 71 | 71 | 72 | 75 | 76 | 76 | 77 | 77 | 79 | 80 | 80 | 81 | 81 |
| 150 | 65 | 66 | 67 | 68 | 68 | 71 | 71 | 72 | 72 | 73 | 75 | 75 | 76 | 76 | 76 |
| 155 | 62 | 63 | 63 | 64 | 65 | 67 | 67 | 68 | 68 | 69 | 70 | 71 | 71 | 72 | 72 |
| 160 | 59 | 59 | 60 | 61 | 61 | 63 | 64 | 64 | 65 | 65 | 66 | 67 | 67 | 67 | 68 |
| 165 | 56 | 56 | 57 | 58 | 58 | 60 | 60 | 61 | 61 | 61 | 63 | 63 | 64 | 64 | 64 |
| 170 | 53 | 54 | 54 | 55 | 55 | 57 | 57 | 58 | 58 | 58 | 60 | 60 | 60 | 60 | 61 |
| 175 | 51 | 51 | 52 | 52 | 53 | 54 | 54 | 55 | 55 | 55 | 56 | 57 | 57 | 57 | 58 |
| 180 | 48 | 49 | 49 | 50 | 50 | 51 | 52 | 52 | 52 | 53 | 54 | 54 | 54 | 54 | 55 |
| 185 | 46 | 46 | 47 | 47 | 48 | 49 | 49 | 50 | 50 | 50 | 51 | 51 | 52 | 52 | 52 |
| 190 | 44 | 44 | 45 | 45 | 45 | 47 | 47 | 47 | 47 | 48 | 49 | 49 | 49 | 49 | 49 |
| 195 | 42 | 42 | 43 | 43 | 43 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 46 | 46 | 47 | 47 | 47 |
| 200 | 40 | 41 | 41 | 41 | 42 | 43 | 43 | 43 | 43 | 43 | 44 | 44 | 45 | 45 | 45 |
| 210 | 37 | 37 | 38 | 38 | 38 | 39 | 39 | 39 | 40 | 40 | 40 | 40 | 41 | 41 | 41 |
| 220 | 34 | 34 | 35 | 35 | 35 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 37 | 37 | 37 | 37 | 38 |
| 230 | 31 | 32 | 32 | 32 | 32 | 33 | 33 | 33 | 33 | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 | 35 |
| 240 | 29 | 29 | 30 | 30 | 30 | 30 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 32 | 32 | 32 |
| 250 | 27 | 27 | 27 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 |
| 260 | 25 | 25 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 |
| 270 | 23 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| 280 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 290 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| 300 | 19 | 19 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 |
| 310 | 18 | 18 | 18 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 20 |
| 320 | 17 | 17 | 17 | 17 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| 330 | 16 | 16 | 16 | 16 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 |
| 340 | 15 | 15 | 15 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |
| 350 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |

Figura A.2 – Tensão de compressão resistente (p_c) para $350 \leq \lambda \leq 110$.