

8

Referências Bibliográficas

- [1] ARCELORMITTAL. **Poutrelle Angelina™ Une idée audacieuse adaptée à un produit industriel.** Disponível em: <http://www.arcelormittal.com/sections/uploads/tx_abdownloads/files/Poutrelle_Angelina__FR_.Olivier_Vassart.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2008.
- [2] ARCELORMITTAL. **Products & Services.** Disponível em: <<http://www.arcelormittal.com/sections/index.php?id=47>>. Acesso em: 10 nov. 2008.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios,** Rio de Janeiro, 2008.
- [4] CBCA - Centro Brasileiro da Construção em Aço. **Construção em Aço: Aços Estruturais.** Disponível em: <http://www.cbca-ibs.org.br/nsite/site/acos_estruturais.asp>. Acesso em: 10 nov. 2008.
- [5] CHUNG, K. F., LIU, T. C. H., KO, A. C. H. Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: an empirical design method using a generalized moment-shear interaction curve. In: **Journal of Constructional Steel Research.** Elsevier, 2003, pp. 1177-1200.
- [6] CHUNG, K. F., LIU, T. C. H., KO, A. C. H. Investigation on Vierendeel Mechanism in Steel Beams with Circular Web Openings. In: **Journal of Constructional Steel Research.** Elsevier, 2000, pp. 467-490.
- [7] COOK, R. D. **Finite Element Modeling for Stress Analysis,** 1995. John Wiley & Sons, Inc.

- [8] DARWIN, D. **Design of Steel and Composite Beams with Web Openings**, AISC – American Institute of Steel Construction. Lawrence, EUA, 2003.
- [9] EUROCODE 3: **Design of steel structures - Annex N: Openings in webs**. ENV 1993-1-1: 1992/A2. European Committee for Standardisation.
- [10] ANSYS, Inc. - Computer-Aided Engineering Technology and Engineering Design Analysis Software Products and Services. **Element Library – Documentation for Ansys**, v. 11.
- [11] GRÜNBAUER BV, Diemen – Nederland. Disponível em: <<http://www.grunbauer.nl/eng/raatvorm.htm>>. Acesso em: 10 nov. 2008.
- [12] GRUPO GERDAU AÇO MINAS. **Galpões em pórticos de aço**. Disponível em: <<http://www.gerdau.com.br/gerdauacominas/br/produtos/pdfs/galpoes.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2008.
- [13] LABBAS - Laboratório de Computação do Ciclo Básico. **Apostila – Curso Ansys**. Disponível em: <<http://www.labbas.eng.uerj.br/>>. Acesso em: 10 nov. 2008.
- [14] LIU, T. C. H., CHUNG, K. F. **Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: finite element investigation**. Em: Journal of Constructional Steel Research. Elsevier, 2003, pp. 1159-1176.
- [15] REDWOOD R. G. **Design of I-Beams with Web Perforations. Beams and Beams Columns Stability and Strength**, chapter 4. Editado por R. Narayanan, Editora: Applied Science Publishers, pp. 95-133, 1983.
- [16] PEREIRA, L. A. **Aspectos Fundamentais do Método dos Elementos Finitos** - apostila de elementos finitos. PPGEE - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PUCRS, v. 1.8, 2005, 21 pp.

- [17] REDWOOD R. G., SHRIVASTAVA S. C. Design recommendation for steel beams with web holes. In: **Canadian Journal of Civil Engineering**, Vol. 7, 1980, pp. 642-650.
- [18] Tecnologia de Ponta na Cobertura do WTC. **Revista Conexão Racional**. Ed. Maio/Junho/Julho, ano 7, no. 34, 2006, pp. 4. Disponível em: <http://www.racional.com/pdf/jornal_interno/Conexao%2034%20Ano%207_2006_Maio_Jun_Julho.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2008.
- [19] RESEARCH FUND FOR COAL AND STEEL, Report. **Web Openings for Service Integration in Composites Floors**, 2006. Disponível em <http://cordis.europa.eu/coal-steel-rtd/home_en.html>. Acesso em 10 jan. 2009.
- [20] RIBEIRO, F. L. B. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos**. COPPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2004, 35 pp.
- [21] RODRIGUES, F. **Comportamento Estrutural de Vigas de Aço com Aberturas na Alma**. Dissertação de Mestrado, UERJ-RJ, 2007.
- [22] RODRIGUES, F., LIMA, L. R. O., VELLASCO, P. C. G. da S., ANDRADE, S. A. L., SILVA, J. G. S. Análise do Efeito de Aberturas na Alma no Comportamento Estrutural de Vigas de Aço. **CILAMCE – Congresso Ibero Latino-Americano sobre Métodos Computacionais em Engenharia**, Portugal, 2007.
- [23] STUDIENGESELLSCHAFT FÜR ANWENDUNGSTECHNIK VON EISEN UND STAHL. Steifenlose Stahlskelettragwerke und dünnwandige Vollwandträger, Berechnung und Konstruktion, **EKS - Europäische Konvention für Stahlbau**, Berlin 1977, 112 pp.

- [24] VERÍSSIMO, G. S., FAKURY, R. H., RIBEIRO, J. C.
Soluções Práticas para Execução de Aberturas em Almas de Vigas de
Aço. **II CICOM - Congresso Internacional da Construção Metálica**,
São Paulo, 2002.

Anexo A – Curvas de Interação Flexão-cisalhamento

Curvas de interação flexão-cisalhamento obtidas por Chung *et al* [5] através dos estudos paramétricos em elementos finitos seguem as seguintes geometria de aberturas:

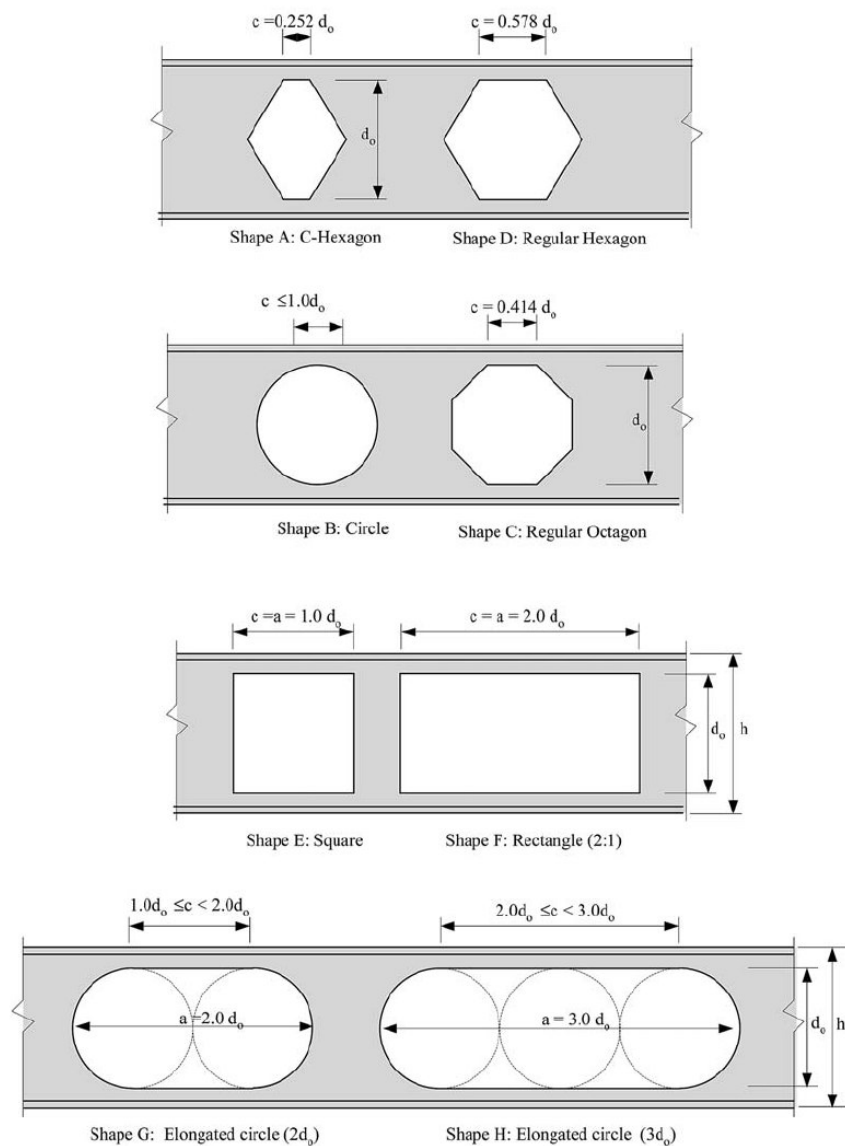


Figura A.1 - Configurações geométricas analisadas

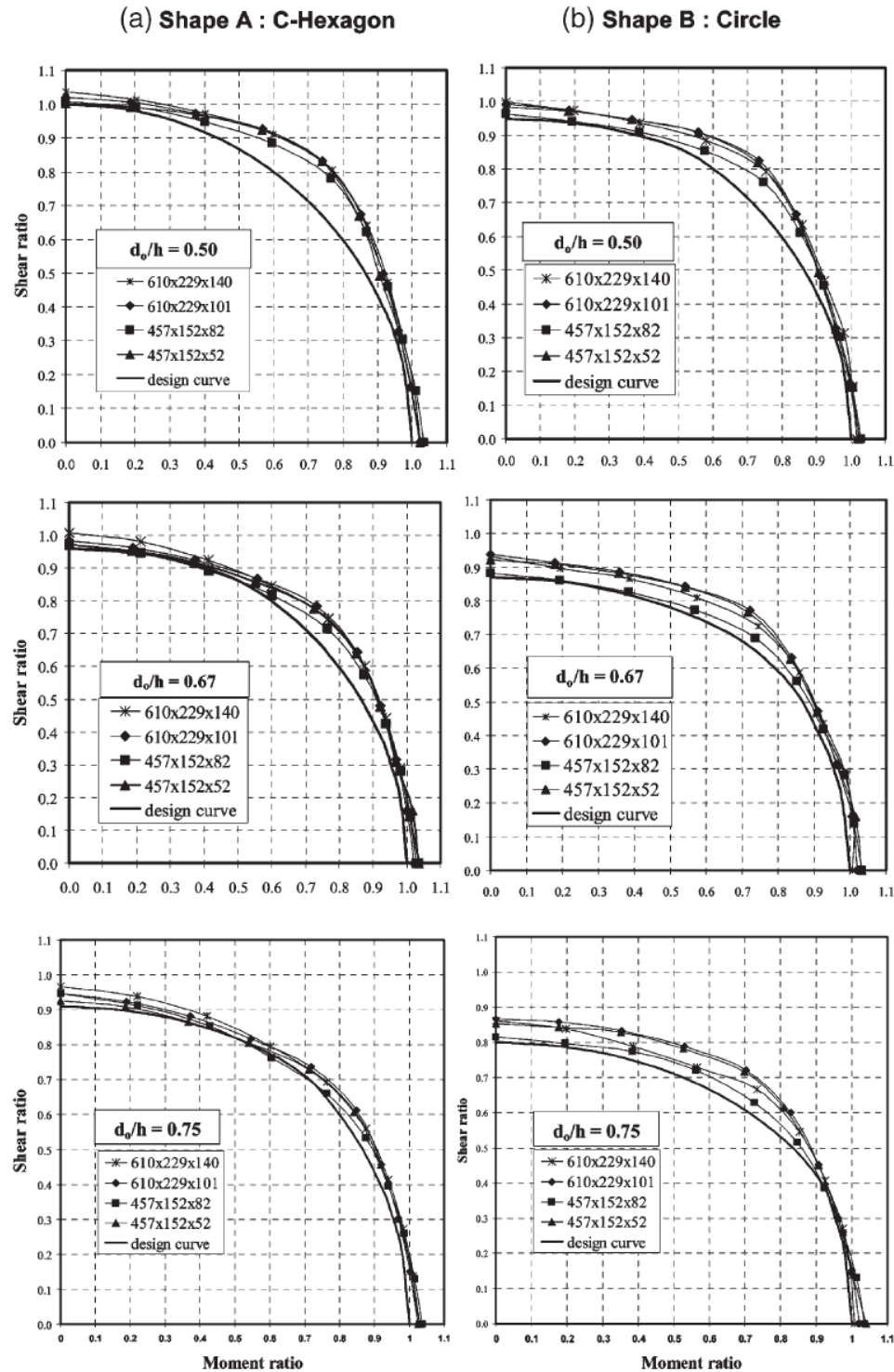


Figura A.2 - Gráfico de interação flexão-cisalhamento para as formas (a) C-Hexagonal e (b) Circular

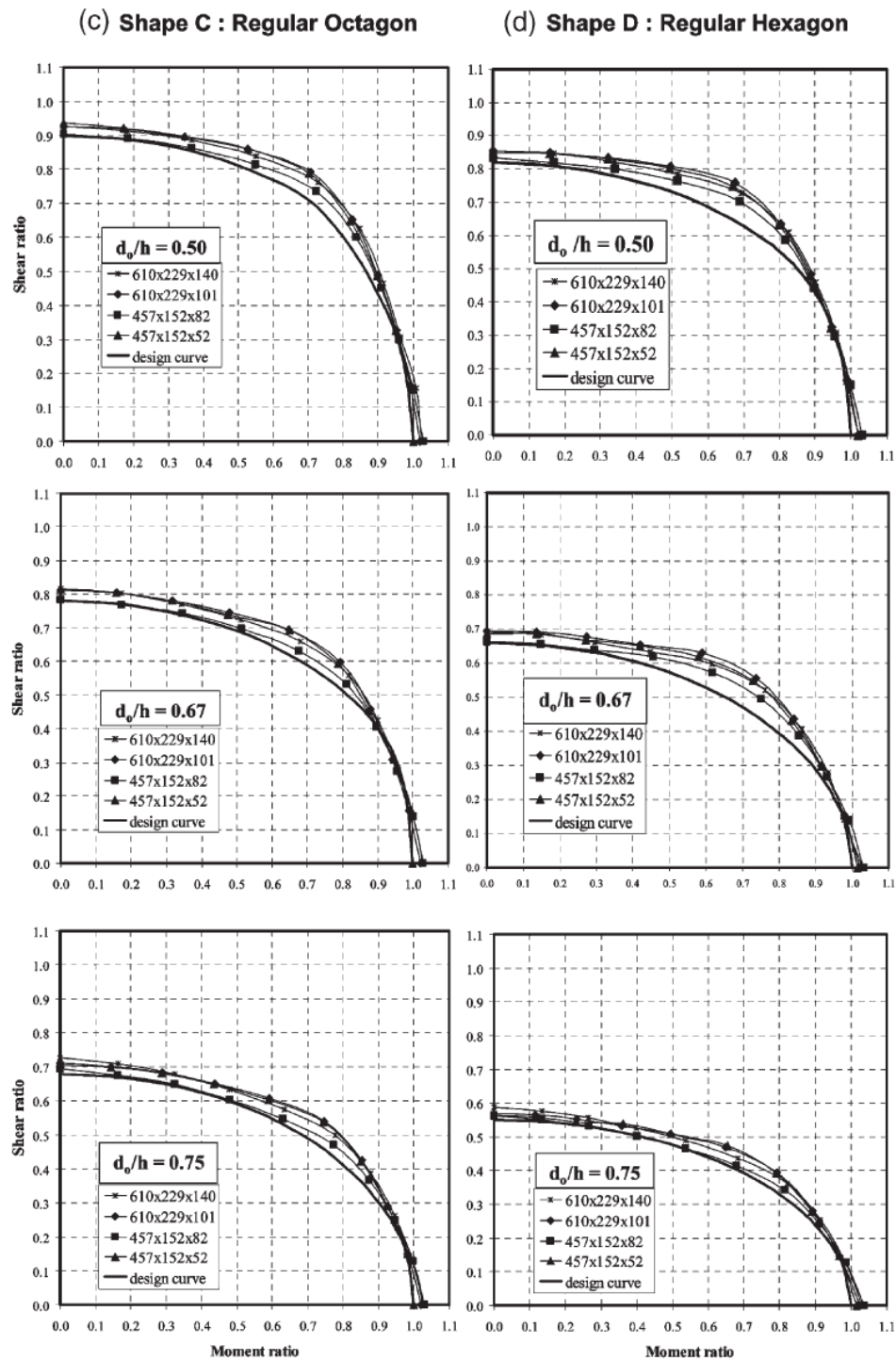


Figura A.3 - Gráfico de interação flexão-cisalhamento para as formas (a) Regular Octogonal e (b) Regular Hexagonal

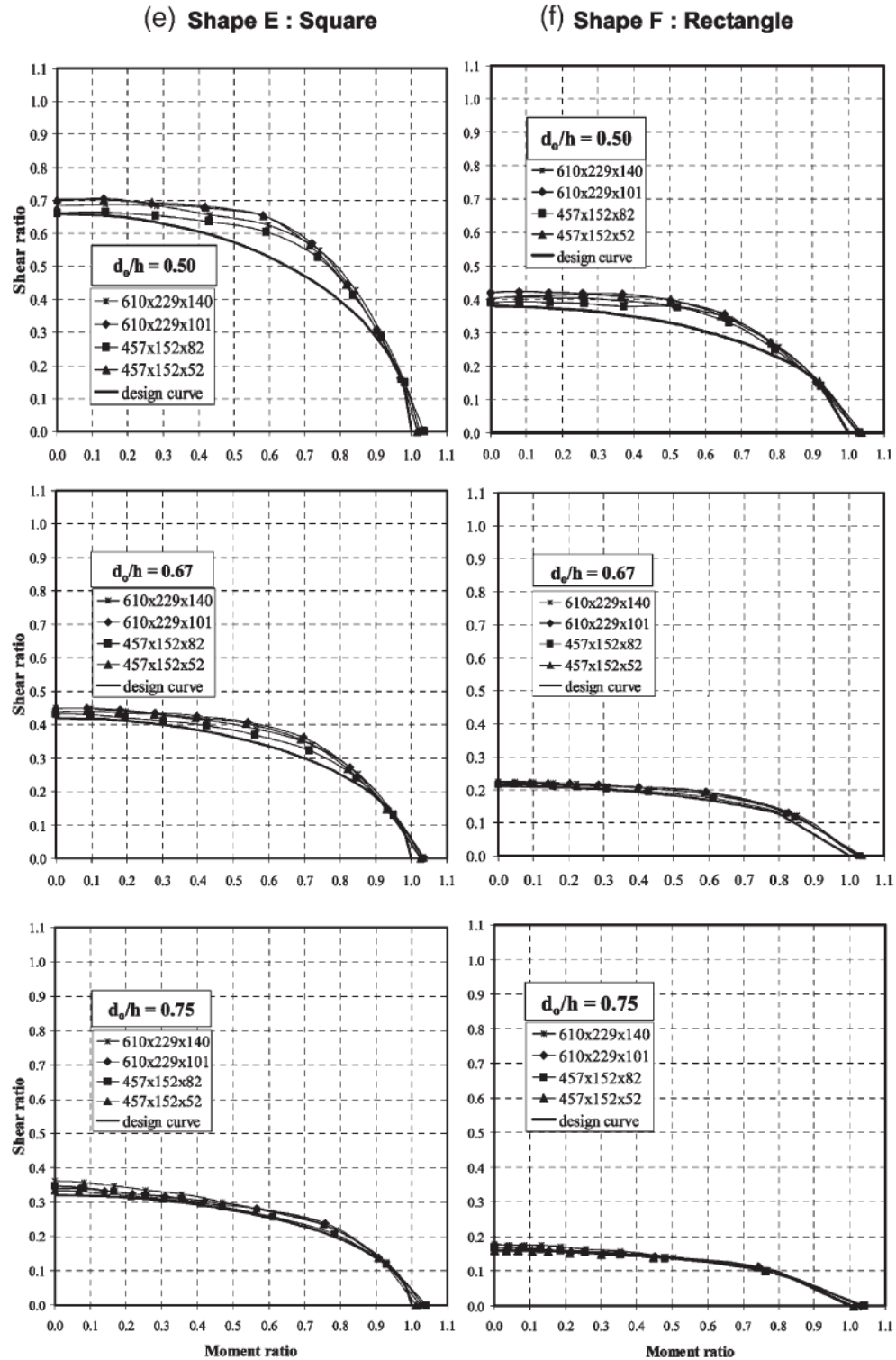


Figura A.4 - Gráfico de interação flexão-cisalhamento para as formas (a) Quadrada e (b) Retangular

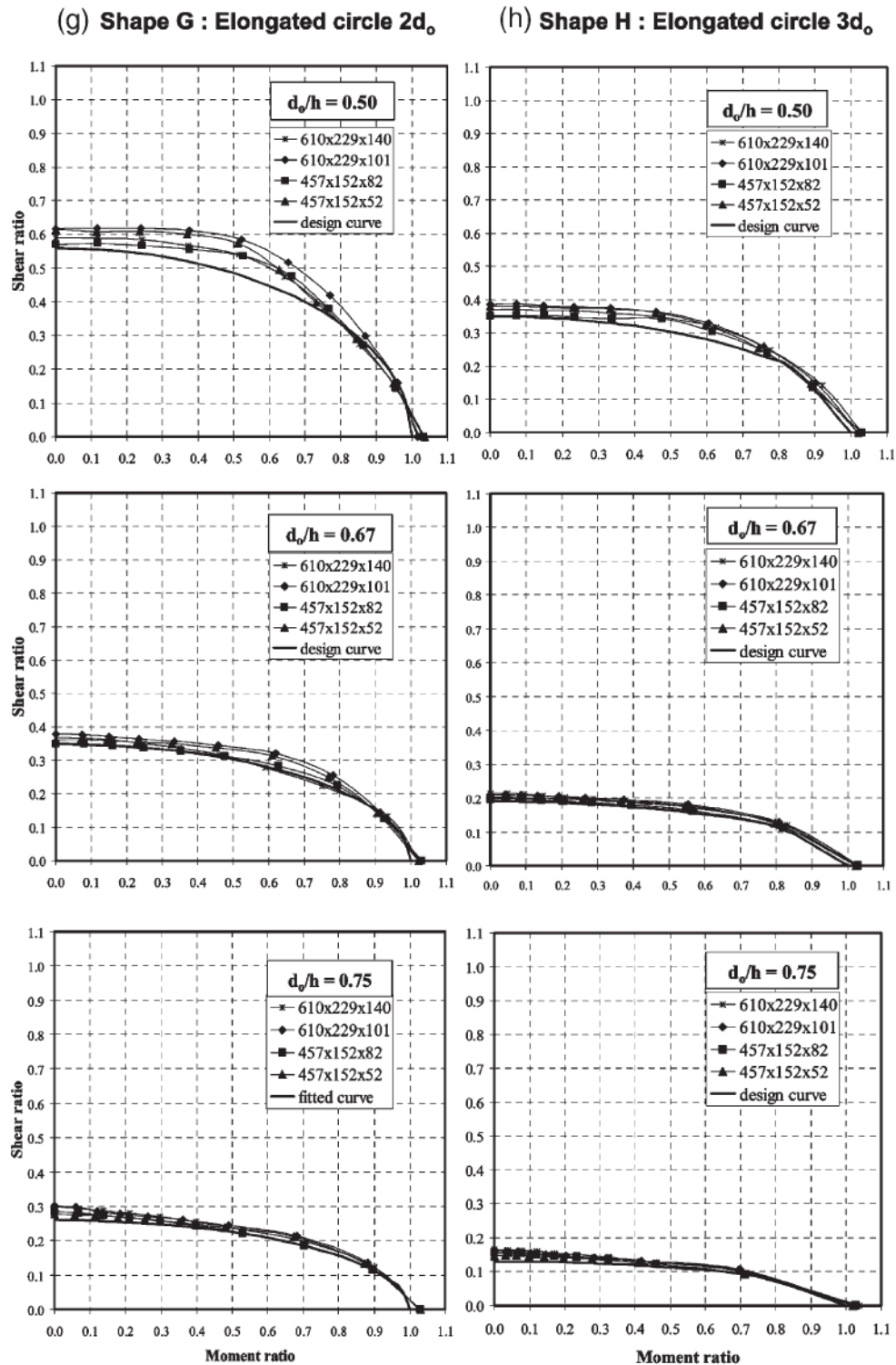


Figura A.5 - Gráfico de interação flexão-cisalhamento para as formas (a) Circular Alongada em $2d_o$ e (b) Circular Alongada em $3d_o$

Anexo B – Exemplos de Dimensionamento

B.1 Exemplo dado por Chung *et al* [5], baseados nas fórmulas empíricas de dimensionamento propostas.

a) Uma viga simplesmente apoiada com um vão de 7,5 m e com seis aberturas circulares ($d_0 = 0,75h$) é submetida a um carregamento uniformemente distribuído de 35 kN/m. Trata-se de um perfil UB 457x152x52 S275. As aberturas estão localizadas simetricamente em relação ao centro da viga com um intervalo de 1,0 m começando pelos apoios. Pede-se verificar a adequabilidade estrutural da viga de aço. A capacidade de carregamento da viga sem abertura na alma, w_0 , é igual a 42,9 kN/m para um vão de 7,5 m. Dados:

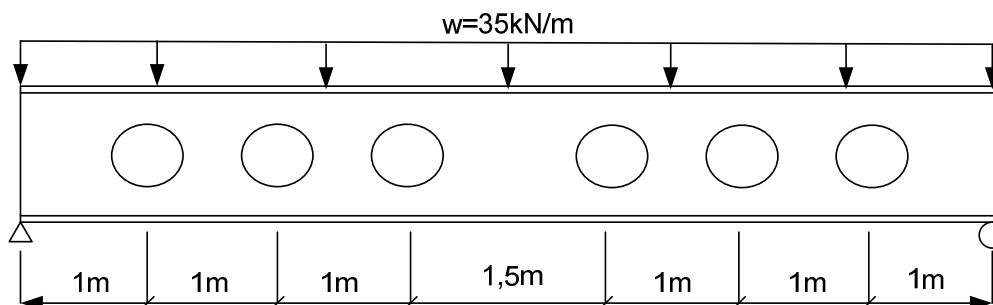


Figura B.1 - Viga do exemplo a) [5]

$L=7,5 \text{ m}$; $h=449,8 \text{ mm}$; $t_w=7,6 \text{ mm}$; $b_f=152,4 \text{ mm}$; $t_f=10,9 \text{ mm}$; $d_0=337,35 \text{ mm}$; $W_{pl}=1096 \times 10^3 \text{ mm}^3$; $\bar{v}=0,8$ para abertura circular.

Passo 1: Determinar as resistências ao cisalhamento e ao momento da seção perfurada.

$$M_{0,Rd} = f_y W_{0,pl} = f_y \left(W_{pl} - \frac{t_w d_0^2}{4} \right)$$

$$= 275 \times \left(1096 - \frac{7.6 \times 337.35^2}{4 \times 1000} \right) \times 10^{-3} = 241.9 \text{ kNm}$$

$$A_{v0} = t_w (h - d_0) + 2(0.75 t_f^2)$$

$$= 7.6 \times (449.8 - 337.35) + 2 \times 0.75 \times 10.9^2 = 1032.8 \text{ mm}^2$$

$$V_{0,Rd} = 0.557 f_y A_{v0} = 0.557 \times 275 \times 1032.8 \times 10^{-3} = 163.9 \text{ kN}$$

Passo 2: Determinar o esforço cortante e o momento fletor solicitantes no centro da abertura.

Tabela B.1 - Esforços solicitantes em cada abertura do exemplo B.1

x_o (m)	$V_{sd} = w \left(\frac{L}{2} - x_o \right)$ (kN)	v	$M_{sd} = \frac{w x_o (L - x_o)}{2}$ (kNm)
1.0	96.3	0.587	113.8
2.0	61.3	0.374	192.5
3.0	26.3	0.160	236.3

Passo 3: Determinar o momento resistente da seção perfurada sob grande cisalhamento.

Para $x_0 = 1,0\text{m}$, $v = 0,587$:

$$M_{1,Rd} = M_{0,Rd} \sqrt{1 - v^2} = 241.9 \sqrt{1 - 0.587^2} = 195.8 \text{ kNm}$$

Notando que $\bar{v} = 0.8 > \frac{2}{3}$, da Tabela 3.2 da página 53.

$$M_{2,Rd} = M_{0,Rd} \sqrt{1 - \left[\frac{v - \left(\bar{v} - \frac{2}{3} \right)}{\frac{2}{3}} \right]^2} = M_{0,Rd} \sqrt{1 - \left[\frac{0.587 - \left(0.8 - \frac{2}{3} \right)}{\frac{2}{3}} \right]^2} = 0.733 M_{0,Rd} = 177.3 \text{ kNm}$$

$$\text{Então } M_{0,Rd \cdot vi} = 177.3 \text{ kNm} > M_{sd} = 113.8 \text{ kNm}$$

Similarmente para as outras aberturas:

Para $x_0= 2,0m$, $M_{0,Rd} \cdot v_i = 0,928M_{0,Rd} = 224,4kNm > M_{Sd} = 192,5kNm$

Para $x_0= 3,0m$, $M_{0,Rd} \cdot v_i = 0,987M_{0,Rd} = 238,8kNm > M_{Sd} = 236,3kNm$

B.2 Este exemplo refere-se ao formato de abertura C-hexagonal para a mesma geometria da viga e esforços solicitantes.

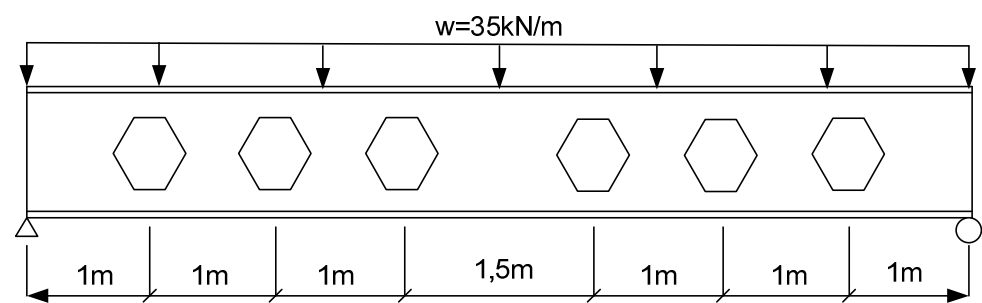


Figura B.2 - Viga do exemplo de Chung [5]

Para $x_0= 1,0m$, $v=0,587$:

$$M_{1,Rd} = M_{0,Rd} \sqrt{1 - v^2} = 241,9 \sqrt{1 - 0,587^2} = 195,8kNm$$

Tabela B.2 - Esforços solicitantes em cada abertura do exemplo B.2

x_o (m)	d_o/h	w (kN/m)	\bar{v}	V_{Sd} (kN)	v	M_{Sd} (kNm)	$M_{o,Rd,Vi}$ (kNm)	$\frac{M_{Sd}}{M_{o,Rd,Vi}}$	Checking
1	0.75	35	0.91	96.3	0.587	113.8	195.9	0.581	OK
2	0.75	35	0.91	61.3	0.374	192.5	224.4	0.858	OK
3	0.75	35	0.91	26.3	0.160	236.3	238.8	0.989	OK