



## **Projeto Final de Graduação em Engenharia Civil**

# **Análise da Influência de Furos na Alma de Vigas em Estruturas de Aço**

**Autor: Gisele Garcia Mendes**

Orientador: Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

Co-orientador: José Guilherme Santos da Silva

Departamento de Estruturas e Fundações

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Julho de 2008

# **Análise da Influência de Furos na Alma de Vigas em Estruturas de Aço**

**Gisele Garcia Mendes**

Projeto Final apresentado a Faculdade de Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Civil. Ênfase: Estruturas.

Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada

---

**Prof. Luciano R. O. de Lima, DSc – Presidente (Orientador)**  
Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

---

**Prof. José Guilherme Santos da Silva, DSc (Co-Orientador)**  
Departamento de Engenharia Mecânica – UERJ

---

**Prof. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco, PhD**  
Departamento de Estruturas e Fundações

Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
Julho de 2008.

MENDES, GISELE GARCIA

Análise da Influência de Furos na Alma de vigas em Estruturas de Aço [Rio de Janeiro] 2008.

xxii , 54 p. 29,7 cm (FEN/UERJ, Graduação, Faculdade de Engenharia Civil - Área de Concentração: Estruturas, 2008)

v, 54 f. : il. ; 30 cm

Dissertação - Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
- UERJ

1. Introdução
2. Vigas com Aberturas na Alma
3. Normas e Procedimentos de Dimensionamento
4. Modelo Numérico
5. Análise Paramétrica
6. Considerações Finais

I. FEN/UERJ II. Título (série)

A Deus, por ter me guiado ao longo de todos estes anos, à minha família e amigos pelo incentivo ao meu trabalho.

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus por toda saúde, calma, serenidade e persistência concedida durante todos esses anos e que foram fundamentais para a conclusão de mais esta etapa em minha vida.

A minha família que esteve ao meu lado durante muitos momentos de angústia e dúvidas durante os primeiros anos na Faculdade de Engenharia. E que mesmo após a certeza do rumo escolhido, ainda tiveram de suportar outros tantos momentos de ausências e estresse durante minha vida acadêmica.

Aos amigos que a UERJ colocou em minha vida e que foram imprescindíveis durante toda esta caminhada. Agradeço especialmente a Bianca Barros e Felipe Azevedo, pela amizade, companheirismo e incentivo durante estes anos.

E um agradecimento especial ao amigo, orientador e professor Luciano Rodrigues Ornelas de Lima, que esteve sempre disposto a compartilhar seu conhecimento, tornando o trabalho realizado muito mais simples. Agradeço pela compreensão quanto aos horários e sobretudo pela paciência com todas as minhas dúvidas.

## Resumo

Mendes, Gisele Garcia; Lima, Luciano Rodrigues Ornelas de (Orientador). **Análise da Influência de Furos na Alma de Vigas em Estruturas de Aço**. Rio de Janeiro, 2008. 54p. Projeto Final da Faculdade de Engenharia, Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Limitações de altura são frequentemente impostas à edificações de múltiplos pavimentos por regulamentos de zoneamento urbano, aspectos econômicos e considerações estéticas. Um pé-direito alto é normalmente requerido para se permitir a passagem de tubulações e dutos de grande diâmetro sob vigas de aço, conduzindo muitas vezes à alturas inaceitáveis entre pavimentos de edificações. Várias são as soluções possíveis para se resolver tal inconveniência, dentre elas pode-se citar: Vigas com inércia variável, *stub girders*, treliças mistas e vigas misuladas. Outra solução frequentemente utilizada é a abertura de furos na alma das vigas de aço para a passagem das tubulações de serviço.

O presente projeto de graduação tem por objetivo avaliar e descrever o comportamento estrutural de vigas de aço com aberturas na alma de diferentes tamanhos. Também é objetivo deste trabalho, a avaliação dos diferentes mecanismos de ruína para as vigas com aberturas na alma e as causas que conduziram o colapso das mesmas. A metodologia empregada para tal estudo baseou-se em uma análise paramétrica com o auxílio do método numérico dos elementos finitos.

## Palavras-chave

Elementos finitos; Mecanismo de *Vierendeel*; Abertura na alma; Curvas de interação flexão-cisalhamento; Não-linearidades física e geométrica; Reforço na alma; Vigas de aço e mistas; Análise paramétrica.

## Sumário

<b>1. Introdução [1]</b> .....	<b>16</b>
1.1. Motivação.....	16
1.2. Objetivos e Metodologia.....	20
1.3. Escopo.....	20
<b>2. Vigas com Aberturas na Alma</b> .....	<b>22</b>
2.1. Classificação das vigas de aço com furo na alma .....	22
2.2. Revisão bibliográfica .....	25
<b>3. Normas e Procedimentos de Dimensionamento</b> .....	<b>46</b>
3.1. Introdução .....	46
3.2. Recomendações gerais de dimensionamento .....	46
<b>4. Modelo Numérico</b> .....	<b>55</b>
4.1. Introdução.....	55
4.2. Características do Modelo.....	55
<b>5. Análise Paramétrica</b> .....	<b>66</b>
5.1. Introdução.....	66
5.2. Vigas com Abertura Circular na Alma.....	66
<b>6. Considerações Finais</b> .....	<b>74</b>
6.1. Introdução .....	74
6.2. Conclusões .....	74
<b>Anexo A - APDL – Modelo Viga 2A</b> .....	<b>80</b>

## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Vigas com inércia variável [31] .....	16
Figura 1.2 – Stub girder [31].....	17
Figura 1.3 – Sistema de treliça mista [31].....	17
Figura 1.4 – Viga celular com uma série de aberturas circulares [5].....	18
Figura 1.5 – Vigas com aberturas de formas variadas [15] .....	19
Figura 1.6 – Aberturas em uma estrutura composta por placas [4].....	19
Figura 2.1 – Viga de aço com furo circular [5] .....	22
Figura 2.2 – Viga com furos regulares [15].....	23
Figura 2.3 – Viga castelada constituída por furos hexagonais [22] .....	24
Figura 2.4 – Modelos em elementos finitos [76] .....	26
Figura 2.5 – Painéis com aberturas circulares [2].....	26
Figura 2.6 – Painéis com aberturas retangulares [2] .....	27
Figura 2.7 – Carga última x tamanho da abertura (furos circulares) [2] .....	27
Figura 2.8 – Campos de tração: a) Viga experimental; b) Modelo em elementos finitos [2] .....	28
Figura 2.9 – Campos de tração: a) Viga experimental; b) Modelo em elementos finitos [2] .....	28
Figura 2.10 – Campo de tração em um painel sem furo [9].....	30
Figura 2.11 – Campo de tração em um painel com furo [9].....	30
Figura 2.12 – Modelo em elementos finitos [9] .....	31
Figura 2.13 – Variação da carga última em relação ao grau de curvatura [9].....	32
Figura 2.14 – Instrumentação do ensaio das vigas soldadas curvas [17] [] .....	33
Figura 2.15 – Alma da viga após o ensaio [17].....	33
Figura 2.16 – a) Viga experimental; b) Modelo em elementos finitos [17].....	33
Figura 2.17 – Mecanismo de <i>Vierendeel</i> ao longo de um furo circular [3] .....	35
Figura 2.18 – Distribuição de esforços na seção perfurada [18] .....	37
Figura 2.19 – Curvas de interação flexão-cisalhamento [18].....	40
Figura 2.20 – Curvas de interação flexão-cisalhamento [18].....	41
Figura 2.21 – Curvas de interação flexão-cisalhamento [18].....	42
Figura 2.22 – Curvas de interação flexão-cisalhamento [18].....	43
Figura 2.23 – Configurações geométricas das aberturas na alma [18] .....	44
Figura 3.1 – Área de cisalhamento equivalente em um “T” [18] .....	49
Figura 3.2 – Curvas de interação flexão-cisalhamento propostas [18].....	53
Figura 4.1 – Elemento SHELL 181 [34] .....	56
Figura 4.2 – Curva tensão x deformação para todos os modelos .....	56
Figura 4.3 – Geometria da viga modelada [3].....	57
Figura 4.4 – Modelo em elementos finitos desenvolvido por Chung <i>et al</i> para a viga 2A [3].....	57
Figura 4.5 – Modelo em elementos finitos proposto para a viga 2A.....	58
Figura 4.6 – Modelo em elementos finitos proposto para a viga 3A.....	59
Figura 4.7 – Comparação entre o MEF e os ensaios de laboratório para a viga 2A.....	60

Figura 4.8 – Comparação entre o MEF e os ensaios de laboratório para a viga 3A.....	60
Figura 4.9 – Distribuição de tensões cisalhantes na seção perfurada da viga 2A (Chung et al) .....	61
Figura 4.10 – Tensões cisalhantes (MPa) no início do escoamento ( $M_{Sd}=50,5\text{kN.m}$ ) para a viga 2A.	62
Figura 4.11 – Tensões cisalhantes (MPa) na ruína ( $M_{Sd}=62,9\text{kN.m}$ ) para a viga 2A.....	62
Figura 4.12 – Distribuição de tensões normais na seção perfurada da viga 2A (Chung et al) .....	62
Figura 4.13 – Tensões normais – no eixo X (MPa) no início do escoamento ( $M_{Sd}=50,5\text{kN.m}$ ) para a viga 2A.....	63
Figura 4.14 – Tensões Normais – no eixo X (MPa) na ruína ( $M_{Sd}=62,9\text{kN.m}$ ) para a viga 2A .....	63
Figura 4.15 – Tensões de <i>Von Mises</i> na seção perfurada da viga 2A (Chung et al) .....	63
Figura 4.16 – Tensões de <i>Von Mises</i> (MPa) no início do escoamento ( $M_{Sd}=50,5\text{kN.m}$ ) para a viga 2A .....	64
Figura 4.17 – Tensão de <i>Von Mises</i> (MPa) na ruína ( $M_{Sd}=62,9\text{ kN.m}$ ) para a viga 2 <sup>a</sup> .....	64
Figura 5.1 – Curva Momento Fletor x Deslocamentos para a viga 2A .....	67
Figura 5.2 – Tensões Normais (MPa) na direção X – no momento da ruína para a viga 2A.....	68
Figura 5.3 – Tensões Cisalhantes (MPa)– no momento da ruína para a viga 2 <sup>a</sup> .....	69
Figura 5.4 – Tensões de <i>Von Mises</i> (MPa)– no momento da ruína para a viga 2 <sup>a</sup> .....	70
Figura 5.5 – Curva Momento-Fletor x Deslocamento para a viga 3A.....	70
Figura 5.6 – Tensões Normais (MPa) na direção X – no momento da ruína para a viga 3A.....	71
Figura 5.7 – Tensões Cisalhantes no plano xy (MPa) – no momento da ruína para a viga 3A .....	72
Figura 5.8 – Tensões de <i>Von Mises</i> (MPa) – no momento da ruína para a viga 3A.....	72

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Aumento na resistência ao cisalhamento [18] .....	49
Tabela 3.2 – Resumo das relações de resistência dupla ao cisalhamento, $\bar{v}$ , para seções perfuradas de diferentes tamanhos e formas [18].....	50
Tabela 4.1 – Resistências dos aços das amostras [23].....	57
Tabela 4.2 – Propriedades geométricas das amostras [23] .....	58
Tabela 4.3 – Propriedades geométricas das amostras [23] .....	58
Tabela 4.4 – Quadro comparativo entre os experimentos e os modelos numéricos.....	64
Tabela 5.1 –Características dos modelos desenvolvidos para a viga 2A .....	66
Tabela 5.2 –Características dos modelos desenvolvidos para a viga 3A .....	66

## Lista de Símbolos

$A_b$	área da seção transversal do “T” inferior baseada em $t_{eff}$ mais qualquer reforço horizontal devidamente soldado
$A_t$	área da seção transversal do “T” superior baseada em $t_{eff}$ , mais qualquer reforço horizontal devidamente soldado
$A_{v1}$	área cisalhada do “T” superior
$A_{v2}$	área cisalhada do “T” inferior
$A_v$	área cisalhada da seção não perfurada
$A_{vf}$	área de cisalhamento equivalente de uma mesa
$c$	comprimento crítico da abertura
$D$	altura da viga de aço
$d_0$	altura da abertura
$d_{eff}$	altura efetiva de uma alma não reforçada acima de uma abertura
$d_t$	altura da alma abaixo do raio de concordância de um perfil laminado
$EI_v$	momento de inércia de um “T”, levando em consideração qualquer efeito médio da ação mista ou variação da altura da alma acima ou abaixo da abertura
$f_{ck}$	resistência característica à compressão do concreto
$F_{C,Rd}$	máxima força de compressão que pode ser desenvolvida na laje de concreto no lado de menor momento da abertura
$f(x)$	variação na distribuição do momento fletor
$f_v$	resistência ao cisalhamento da viga de aço tomada como $0,577 \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$
$f_y$	resistência ao escoamento do aço
$g(x)$	variação na distribuição do cisalhamento
$h_c$	espessura sólida da laje de concreto
$L$	vão da viga
$l$	comprimento efetivo da abertura
$l_s$	comprimento total do reforço soldado
$M_{0,Rd}$	momento resistente da seção perfurada
$m$	proporção utilizada da resistência à flexão dada por $\frac{M_{0,Sd}}{M_{0,Rd}}$

$\bar{m}$	relação de resistência dupla à flexão dada por $\frac{M_{0,Rd,Vi}}{M_{0,Rd}}$
$M_{pl,Rd}$	resistência plástica da viga mista sem abertura na alma
$M_{pl,red}$	resistência reduzida à flexão de uma viga mista perfurada
$M_{Rd,0}$	resistência plástica à flexão da viga mista na posição da abertura, para interação parcial
$M_{Rd1}$	resistência plástica à flexão do “T” inferior baseada em $t_{eff}$ , junto com qualquer reforço horizontal devidamente soldado
$M_{Rd2}$	resistência plástica à flexão do “T” superior baseada em $t_{eff}$ , junto com qualquer reforço horizontal devidamente soldado
$M_{Sd}$	momento solicitante no centro da abertura
$M_{T,Rd}$	capacidade básica de resistência à flexão dos “T’s” submetidos à forças axiais e de cisalhamento nulas
$M_{v1,Rd}$	resistência à flexão combinada de <i>Vierendeel</i> devido à flexão local no “T” inferior
$M_{v2,Rd}$	parcela da resistência à flexão combinada de <i>Vierendeel</i> do “T” superior
$M_{vc,Rd}$	resistência adicional à flexão de <i>Vierendeel</i> devido à ação mista local entre o “T” superior e a laje de concreto
$N_1$	número de conectores de cisalhamento encontrados no comprimento $x$
$N_2$	número de conectores de cisalhamento encontrados no comprimento $(l + d_s)$
$P_{Rd}$	resistência ao cisalhamento de um conector de cisalhamento
$s$	distância entre as bordas de aberturas adjacentes
$S_b$	proporção de utilização da resistência à flexão no meio do vão
$S_v$	proporção de utilização da resistência ao cisalhamento nos apoios
$t$	espessura real da alma
$T_1$	Força de tração desenvolvida no “T” inferior
$T_2$	Força de tração desenvolvida no “T” superior
$t_{eff}$	espessura efetiva da alma sob cisalhamento elevado
$T_{Rd1}$	máxima força de tração que pode ser desenvolvida no “T” inferior
$T_{Rd2}$	máxima força de compressão desenvolvida no “T” superior
$t_f$	espessura da mesa
$t_w$	espessura da alma
$V_{0,Rd}$	resistência plástica ao cisalhamento da seção perfurada

$V_{0,Rd,Vi}$	resistência dupla ao cisalhamento global da seção perfurada
$v$	proporção utilizada da resistência ao cisalhamento dada por $\frac{V_{0,Sd}}{V_{0,Rd}}$
$\bar{v}$	relação de resistência dupla ao cisalhamento para as seções perfuradas
$V_{a,Rd}$	resistência ao cisalhamento vertical de uma alma não reforçada
$V_{a,Sd}$	força de cisalhamento atuante na alma da seção mista perfurada
$v_i$	parâmetro <i>Vierendeel</i>
$V_{Sd}$	força de cisalhamento atuante no centro da abertura
$V_{pl,Rd}$	resistência ao cisalhamento puro da viga mista com abertura na alma
$V_{pl,red}$	resistência ao cisalhamento puro da alma perfurada
$W_{pl}$	módulo plástico da seção não perfurada
$x$	distância da extremidade da abertura até o apoio mais próximo
$y_b$	distância do centróide do "T" inferior até a extremidade externa da mesa
$y_c$	espessura do concreto em compressão (conservadoramente, $y_c \approx d_s$ )
$y_t$	distância do centróide do "T" superior até a extremidade externa da mesa
$\delta_0$	deflexão no meio do vão da viga mista não perfurada devido à flexão
$\delta_b$	deflexão adicional no meio do vão devido aos esforços de flexão, devido a uma abertura única
$\gamma_a$	coeficiente de segurança parcial para o aço
$\gamma_{M0}$	coeficiente de segurança parcial do material adotado como 1,0

## Lista de Abreviaturas

Eurocode	European Committee for Standardisation
FEN	Faculdade de Engenharia
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro

*“Afinal, o que é o homem na natureza? Um nada em relação ao infinito, tudo em relação ao nada, um ponto central entre o nada e o tudo e infinitamente longe de entender a ambos. Ele é incapaz de ver o nada de onde provém e o infinito em que está mergulhado.”*

Pascal.

# 1. Introdução [1]

## 1.1. Motivação

Limitações de altura são frequentemente impostas às edificações de múltiplos pavimentos por regulamentos de zoneamento urbano, aspectos econômicos e considerações estéticas. Para se proporcionar a passagem de tubulações e dutos de grande diâmetro sob vigas de aço, um pé-direito alto é normalmente requerido, conduzindo muitas vezes às alturas inaceitáveis entre pavimentos de edificações. Várias são as soluções possíveis para se resolver tal inconveniência, dentre elas pode-se citar: Vigas com inércia variável, *stub girders*, treliças mistas, vigas misuladas e vigas com aberturas na alma.

A viga com inércia variável é projetada para proporcionar resistência ao momento fletor e ao esforço cortante em todos os pontos ao longo do vão. O vazio criado adjacente às colunas pode ser utilizado para a passagem de tubulações de serviço. Tipicamente, as vigas com inércia variável são mais econômicas para vãos variando entre 13 a 20 metros [31]. A dimensão das chapas que compõem a viga pode ser selecionada para a otimização do desempenho estrutural. As chapas são soldadas em um processo automático de arco submerso. Enrijecedores na alma frequentemente são necessários no ponto de mudança da seção transversal quando o ângulo de inclinação de variação da seção transversal excede  $6^\circ$ . Alguns exemplos de viga com inércia variável são mostrados na próxima figura.

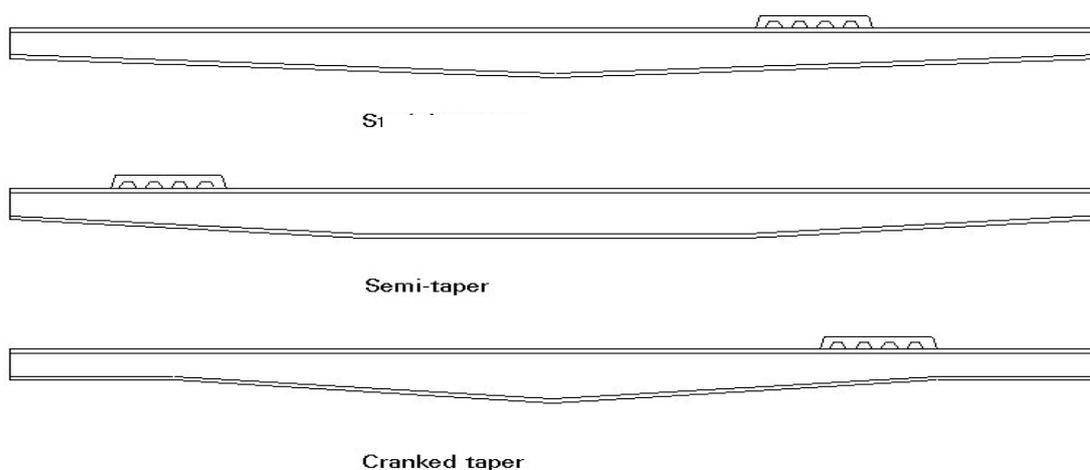
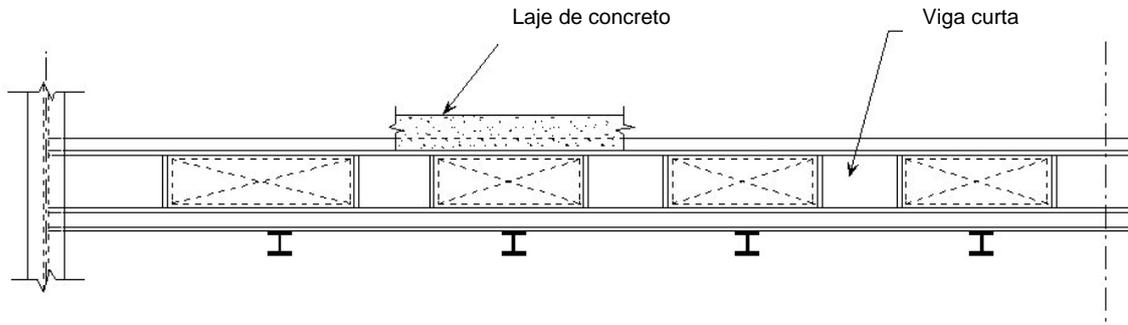


Figure 8b Shapes of fabricated tapered sections

Figura 1.1 – Vigas com inércia variável [31]

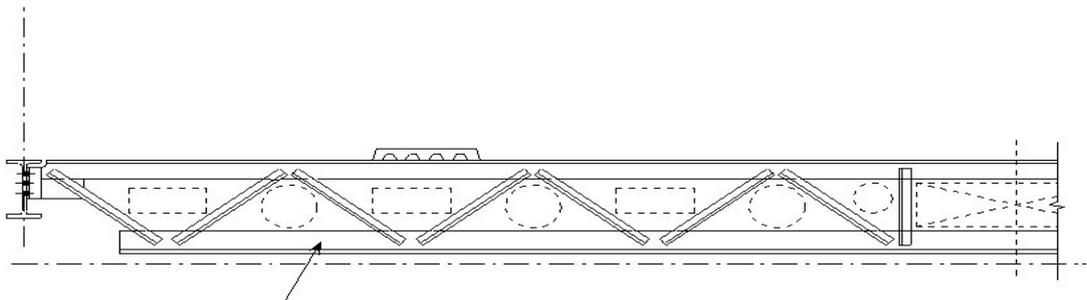
A solução estrutural conhecida como *stub girder* compreende uma viga inferior, que atua em tração, e uma série de vigas curtas que conectam a viga inferior à laje de concreto. Os espaços que são criados adjacentes às vigas curtas são utilizados para a passagem das tubulações de serviço. Esta forma de construção pode ser observada na Figura 1.1



**Figura 1.2 – Stub girder [31]**

A maior desvantagem do sistema *stub girder* é a necessidade de escoramento temporário até que o concreto tenha adquirido resistência adequada para o desenvolvimento da ação mista.

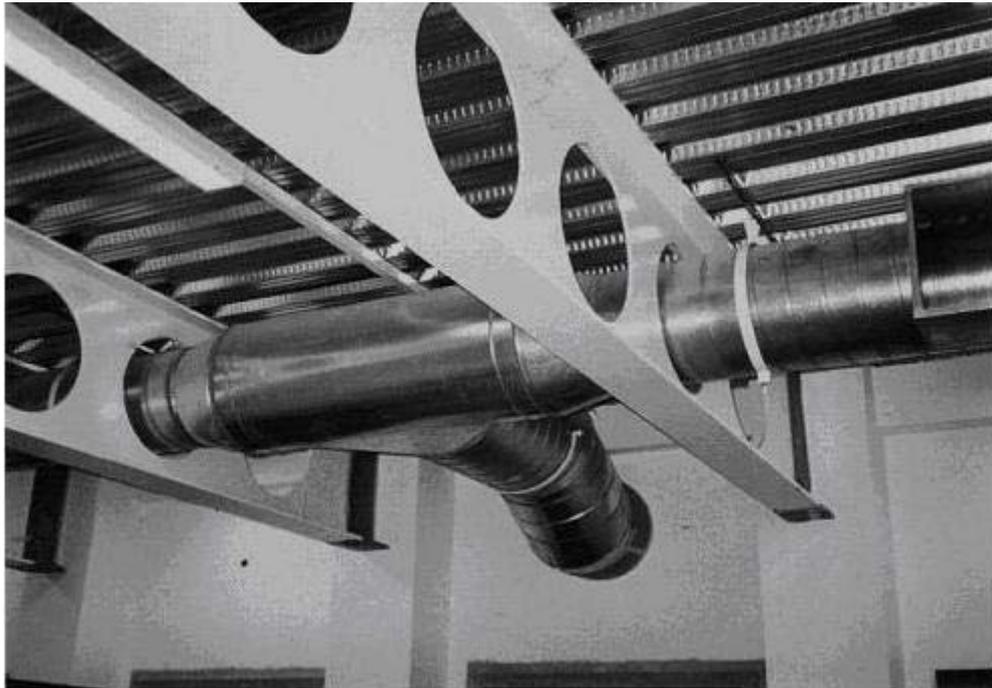
As treliças mistas, uma forma de construção comum na América do Norte, estão começando a ser utilizadas largamente em várias partes do mundo. Embora os custos de fabricação sejam significativamente maiores quando comparados com várias outras formas de construção, as treliças mistas apresentam vantagens, tais como: Elas não necessitam de equipamentos especiais de fabricação e oferecem bastante espaço para a acomodação das tubulações de serviço. A principal desvantagem das treliças mistas, além do custo elevado de fabricação, é a dificuldade de proteção deste sistema estrutural contra incêndios.



**Figura 1.3 – Sistema de treliça mista [31]**

As vigas misuladas são geralmente constituídas pela formação de uma ligação rígida à flexão entre as vigas e as colunas. A altura da mísula é selecionada primariamente para proporcionar um método econômico de transferência de momento para a coluna. O comprimento da mísula é selecionado para reduzir a altura da viga para o mínimo possível. A zona de tubulação de serviços criada sob a viga na região entre mísulas, oferece flexibilidade para a passagem de várias formas de tubulações.

Outra solução frequentemente utilizada é a abertura de furos na alma das vigas de aço para a passagem das tubulações de serviço. Um exemplo de viga celular pode ser visto na Figura 1.4



**Figura 1.4 – Viga celular com uma série de aberturas circulares [5]**

Atualmente, existe uma tendência de se utilizar tubos de água e dutos de ar de grandes diâmetros, cuja abertura na alma das vigas de aço chega até 75% da altura da viga. A presença de grandes aberturas na alma das vigas de aço pode ter uma severa penalidade na capacidade de carregamento das vigas das edificações, dependendo da forma, do tamanho e da localização dos furos. Aberturas circulares e retangulares são frequentemente utilizadas, e reforços ao redor dos furos na alma podem ser necessários para um dimensionamento racional [3].

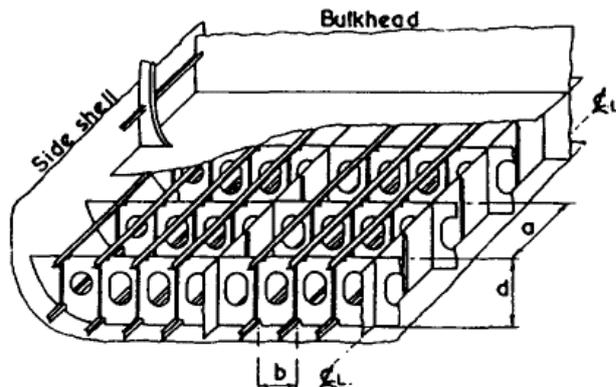
Na construção de pontes de auto-estrada, furos na alma das vigas são usados para propiciar o acesso ao serviço, à inspeção e à manutenção. A profundidade destas aberturas chega algumas vezes a 60% da altura da viga e, a largura das aberturas pode chegar até cerca de duas ou três vezes a profundidade dos furos. Aberturas de formas circulares e retangulares são largamente empregadas. Os cantos das aberturas retangulares são

normalmente arredondados a fim de se minimizar ou eliminar os efeitos de concentração de tensão [1].



**Figura 1.5 – Vigas com aberturas de formas variadas [15]**

Na indústria aeroespacial é comum a abertura de furos nas asas e fuselagens de aviões para a passagem de dutos de água, fios elétricos e sistemas de arrefecimento. Adicionalmente, além de permitirem o acesso à inspeção e manutenção das aeronaves, as aberturas servem também para reduzir o peso global da estrutura.



**Figura 1.6 – Aberturas em uma estrutura composta por placas [4]**

O tamanho da abertura em estruturas compostas por placas de aço pode ocupar uma proporção significativa da dimensão do elemento estrutural, podendo atingir uma extensão de 60% ou mais da peça. A presença de tais aberturas em membros estruturais obviamente resultará em mudanças na distribuição de tensões do elemento, além de uma redução na resistência e variação nas características de flambagem dos elementos compostos por placas de aço. O comportamento e a capacidade de carga na fase elástica e

de ruína de tais elementos estruturais será alterado significativamente pela presença dos furos. O desempenho de membros estruturais contendo furos é influenciado pelo tipo de tensão aplicada (compressão, tração, cisalhamento, etc), assim como pela forma, tamanho, localização e número de furos. Por outro lado, é frequentemente possível o reforço ao redor das aberturas para assegurar que a resistência perdida com a presença do furo no elemento estrutural seja recuperada. Contudo, a introdução de reforço adicional é uma operação dispendiosa quando se leva em conta os custos de soldagem e montagem envolvidos. Há casos em que o reforço da abertura pode representar 3% ou mais do peso da estrutura e portanto, do referido custo global da mesma. A necessidade de reforço deve, portanto, ser avaliada por critérios precisos ao se levar em consideração os efeitos das aberturas e sempre que possível deve ser evitada a fim de se baratear e facilitar a execução e montagem da estrutura [4].

## **1.2. Objetivos e Metodologia**

Face ao exposto anteriormente, é de todo desejável o desenvolvimento de métodos capazes de prever com razoável precisão o comportamento estrutural de vigas de aço com abertura na alma.

Um estudo paramétrico foi realizado para se avaliar o desempenho estrutural de vigas de aço simplesmente apoiadas com aberturas de diferentes tamanhos, a fim de se produzirem informações para um dimensionamento prático de vigas de aço com furo na alma. Para um dimensionamento prático, é bastante útil a elaboração de métodos simples, capazes de avaliar a capacidade de carga das vigas de aço, bem como a melhor localização, em termos estruturais, de aberturas na alma destas vigas.

O presente projeto de graduação tem por objetivo avaliar e descrever o comportamento estrutural de vigas de aço com aberturas de diferentes tamanhos na alma. Também é objetivo deste trabalho, a avaliação dos diferentes mecanismos de ruína para as vigas com aberturas na alma e as causas que conduziram o colapso das mesmas. A metodologia empregada para tal estudo baseou-se em uma análise paramétrica com o auxílio do método numérico dos elementos finitos [34].

## **1.3. Escopo**

Neste capítulo de introdução foram apresentados alguns sistemas estruturais que permitem a passagem de tubulações de serviços ao longo dos mesmos, bem como casos práticos da necessidade de execução de aberturas na alma das vigas de aço. A motivação para o estudo do comportamento estrutural de vigas com aberturas na alma, bem como os

objetivos principais do presente trabalho foram apresentados. Um resumo dos capítulos subseqüentes é descrito a seguir:

No capítulo dois, será realizada uma classificação em termos didáticos dos diferentes tipos de viga com aberturas na alma. Um resumo dos principais trabalhos de autores consagrados no estudo de vigas com furos na alma será também apresentado neste capítulo através de uma revisão bibliográfica.

No capítulo três, serão apresentadas algumas normas e orientações de dimensionamento para vigas de aço com aberturas na alma. Serão exibidas também algumas tabelas para um dimensionamento expedito, bem como orientações de projeto e dimensionamento que não são obrigatórias, mas que representam boa prática de Engenharia.

No capítulo quatro, será apresentada a calibração dos modelos numéricos em elementos finitos que serão utilizados para o estudo do comportamento estrutural de vigas de aço com aberturas na alma.

No capítulo cinco, serão exibidos os resultados da análise paramétrica realizada com o auxílio do método dos elementos finitos. Serão feitos comentários acerca do comportamento estrutural observado nas vigas de aço com aberturas na alma, bem como serão sugeridos alguns métodos para o aumento da capacidade de carregamento destas vigas.

No capítulo seis, serão tecidas as considerações finais sobre o presente trabalho.

Finalmente, em anexo será apresentado o APDL que gerou o modelo da viga desenvolvida em elementos finitos.

## 2. Vigas com Aberturas na Alma

### 2.1. Classificação das vigas de aço com furo na alma

Antes de se proceder à revisão bibliográfica propriamente dita, é conveniente uma classificação, em termos didáticos, das vigas de aço com furo na alma. Desta forma, as vigas de aço com abertura na alma, classificam-se:

#### a) Quanto à resistência mecânica

Esta classificação se dá de acordo com a forma com a qual as vigas resistem aos esforços atuantes, podendo ser classificadas como vigas de aço ou mistas. As vigas de aço são aquelas que fazem uso apenas do material de que são constituídas, ou seja, do aço, para resistirem aos esforços solicitantes.

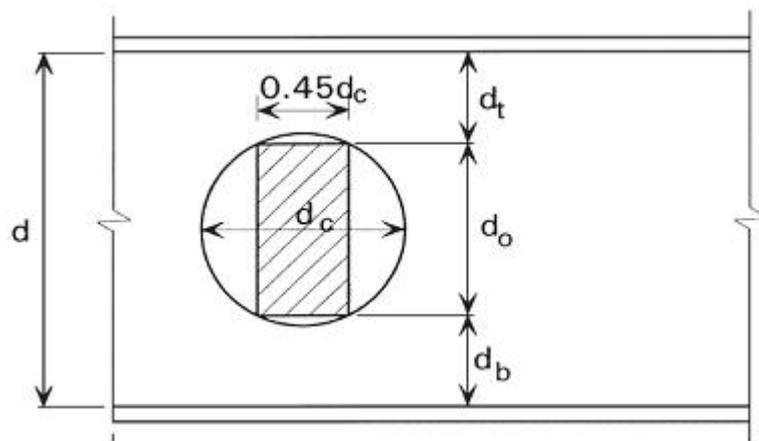


Figura 2.1 – Viga de aço com furo circular [5]

As vigas mistas fazem uso não somente do material de que são constituídas, mas também de uma parcela da área da laje com a qual estão conectadas, para resistirem aos esforços solicitantes. As vigas mistas compreendem vigas de aço ligadas por conectores de cisalhamento às lajes de concreto, de forma que a resistência mecânica e a rigidez à flexão destas vigas são consideravelmente maiores do que nas de aço.

#### b) Quanto à regularidade dos furos ao longo da viga

As vigas de aço ou mistas também podem ser classificadas como constituídas por furos com e sem regularidade. Nos furos sem regularidade as aberturas ao longo da alma

são feitas sem que haja um espaçamento pré-definido entre furos, ou seja, não existe nenhuma forma de simetria ou anti-simetria ao longo do vão da viga. Nos furos com regularidade, as aberturas ao longo da alma são feitas obedecendo a um espaçamento pré-definido entre furos, ou seja, existe simetria ou anti-simetria ao longo do vão da viga. Quando uma viga com regularidade é constituída por furos circulares, esta é denominada viga celular.



**Figura 2.2 – Viga com furos regulares {15}**

**c) Quanto ao processo de fabricação**

As vigas de aço com furo na alma podem ser constituídas por aberturas feitas diretamente na alma de um perfil sem a formação de dois “T’s” e aberturas que dão origem à formação de dois “T’s” a partir do perfil de aço original. No caso de abertura sem a formação dos “T’s”, a altura do perfil metálico original é mantida e este sofre redução de área no local onde será executada a abertura da alma.

No caso de abertura com a formação de dois “T’s”, o perfil de aço original é recortado e resoldado de forma defasada, ou seja, os furos são formados a partir da soldagem de parte da alma de cada “T” adjacente. No caso de abertura com a formação dos “T’s”, a altura do perfil metálico formado pode sofrer um incremento de até 50% em relação à altura do perfil metálico original. As vigas fabricadas pelo processo de defasagem dos “T’s” são costumeiramente denominadas vigas casteladas ou ameadas.

Entre as vantagens das vigas casteladas pode-se citar o peso reduzido por unidade de comprimento de viga e um aumento na rigidez à flexão originado do aumento da altura da viga, proporcionando portanto, maiores vãos livres. As vigas casteladas também apresentam boa estética quando usadas em estruturas em que as vigas ficam expostas.



**Figura 2.3 – Viga castelada constituída por furos hexagonais [22]**

**d) Quanto à geometria do furo**

Os furos nas vigas de aço podem apresentar diferentes geometrias dependendo do processo de fabricação, bem como da finalidade para a qual são projetados. As formas mais comuns de abertura na alma das vigas de aço são: furos circulares, furos hexagonais, furos retangulares, furos semicirculares-alongados. Certamente uma combinação das formas citadas anteriormente é possível, muito embora tal conformação acarrete a necessidade de um estudo mais detalhado dos mecanismos de resistência do perfil, além de apresentar um processo de fabricação mais oneroso quando comparado com as vigas que apresentam apenas uma geometria de furo ao longo do vão.

**e) Quanto à localização do furo em relação à altura da alma do perfil**

Quando o centróide do furo de uma viga de aço está localizado na metade da altura da alma do perfil, a viga é dita de furo concêntrico. Caso contrário, ou seja, quando o centróide do furo não está centrado na alma do perfil, a viga é dita de furo excêntrico.

Após estas classificações de ordem didática das vigas de aço com furo na alma, pode-se dar início à revisão bibliográfica propriamente dita.

## 2.2. Revisão bibliográfica

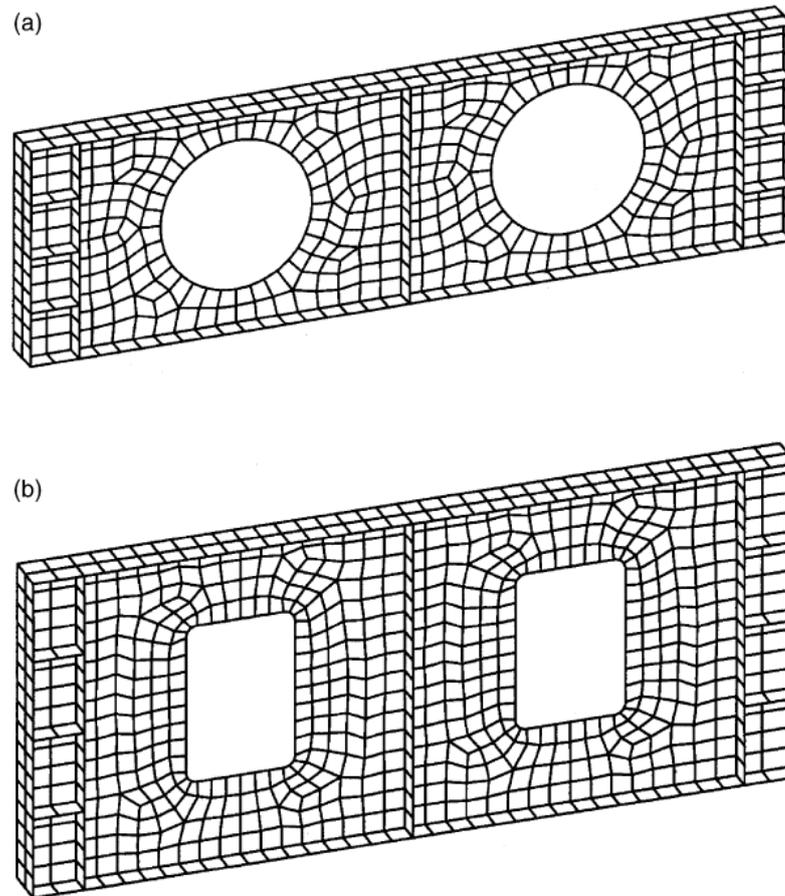
- **2.2.1. Vigas soldadas (*plate girders*)**

Um caso de importante aplicação prática é o de vigas formadas por placas soldadas, as chamadas “*plate girders*”. Assim como nas vigas laminadas, as vigas formadas por placas também podem necessitar de furo na alma para a passagem das tubulações de serviços que integram as construções. A seguir, serão descritos resumidamente trabalhos de alguns pesquisadores que discorrem sobre este tema.

Em artigo publicado em 2002, Shanmugam *et al* [2], apresentaram um modelo em elementos finitos para a previsão do comportamento e da carga última de vigas soldadas (*plate girders*) com aberturas na alma. A precisão do modelo foi avaliada pela comparação com vigas soldadas experimentais estudadas anteriormente por outros pesquisadores. A comparação dos resultados analíticos com os resultados experimentais disponíveis para os modelos de escoamento do aço, valores de cargas últimas e relações carga-deslocamento, mostraram boa concordância entre o modelo em elementos finitos e os resultados experimentais, validando portanto, a precisão do modelo proposto. O modelo em elementos finitos proposto foi utilizado para a realização de uma análise paramétrica em que foram estudadas a esbeltez da alma e a rigidez das mesas das vigas soldadas.

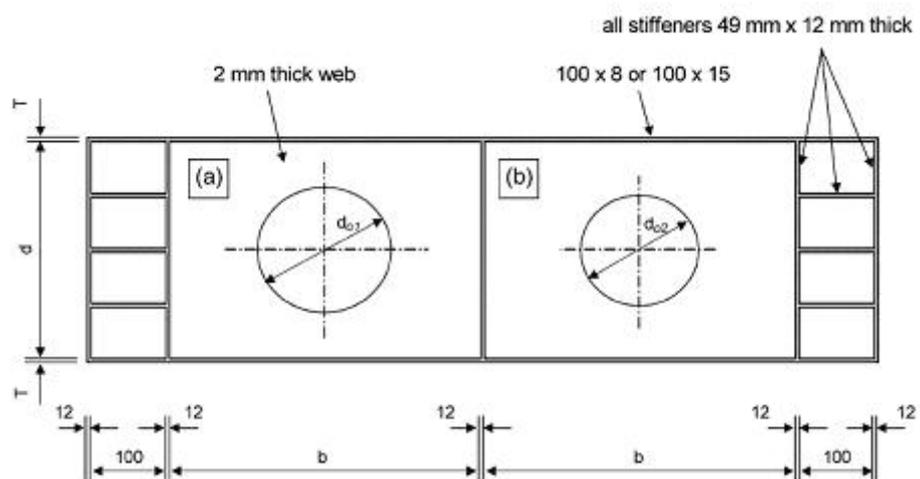
Shanmugam *et al* [2], propuseram um modelo tridimensional em elementos finitos para o estudo das vigas soldadas. Os apoios e as condições de carregamento das vigas experimentais foram simulados no modelo numérico pela restrição dos graus de liberdade apropriados. Da Figura 2.4 a Figura 2.6 são mostrados modelos típicos em elementos finitos. As almas, mesas e enrijecedores foram modelados por elementos de casca compostos por oito nós, apresentando cinco graus de liberdade por nó.

Almas finas, na prática, não são perfeitamente retas. Adicionalmente, há uma distorção extensiva devido à soldagem e, portanto, é essencial representar apropriadamente estas imperfeições no modelo em elementos finitos. Uma imperfeição geométrica correspondente a uma flambagem elástica na alma foi introduzida no modelo em elementos finitos. Tal imperfeição foi efetuada baseando-se numa análise de autovalores, que exigiu que o modelo numérico fosse avaliado duas vezes. Na primeira vez em que o modelo foi avaliado, uma análise para a determinação do autovalor de flambagem elástica na estrutura sem imperfeições foi realizada, para se estabelecer os prováveis modos de colapso. Adicionalmente, o modelo foi avaliado novamente, introduzindo-se uma imperfeição na geometria da viga pela adição dos modos de flambagem na estrutura perfeita, modos estes que foram determinados na primeira vez em que o modelo foi avaliado.



**Figura 2.4 – Modelos em elementos finitos [76]**

O modelo em elementos finitos apresentado acima foi utilizado para analisar vigas soldadas contendo furos circulares (Figura 2.5) e retangulares (Figura 2.6) de diferentes tamanhos na alma.



**Figura 2.5 – Painéis com aberturas circulares [2]**

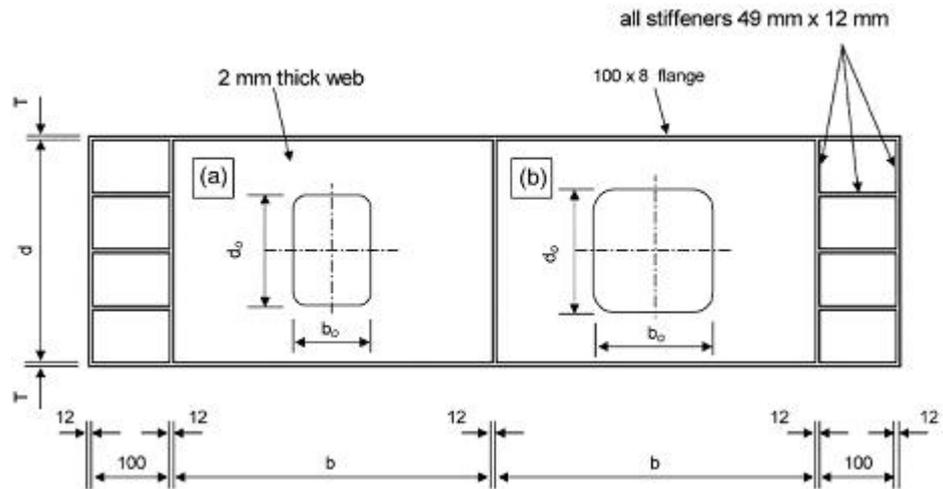


Figura 2.6 – Painéis com aberturas retangulares [2]

A variação da carga última das vigas soldadas em relação ao tamanho da abertura na alma para as vigas com furos circulares é mostrada na Figura 2.7, na qual os resultados dos modelos em elementos finitos estão plotados juntamente com os resultados experimentais. A figura mostra que a carga de ruína decresce continuamente com o aumento da abertura na alma e que o decréscimo da capacidade de carga é aproximadamente linear. Pode-se notar ainda que os pontos dos resultados experimentais estão bastante próximos dos respectivos pontos obtidos pelo modelo dos elementos finitos.

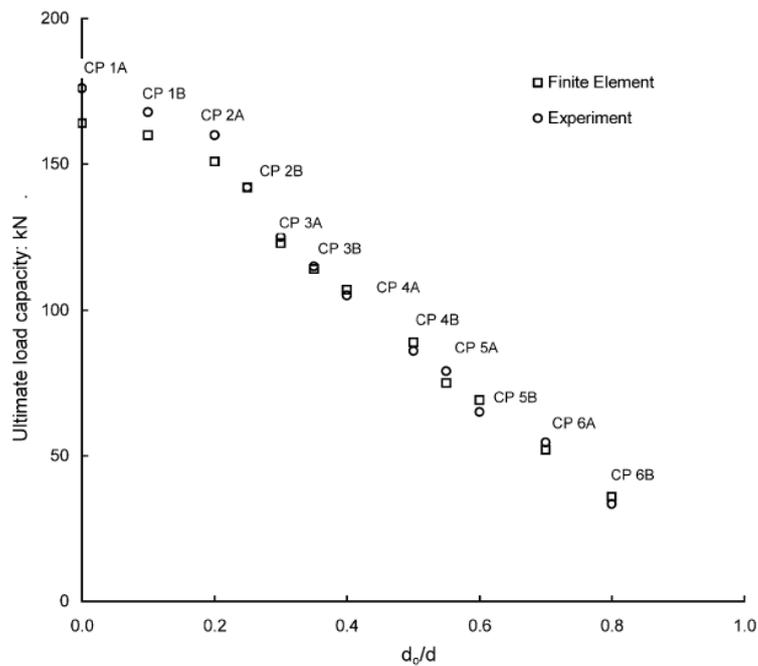
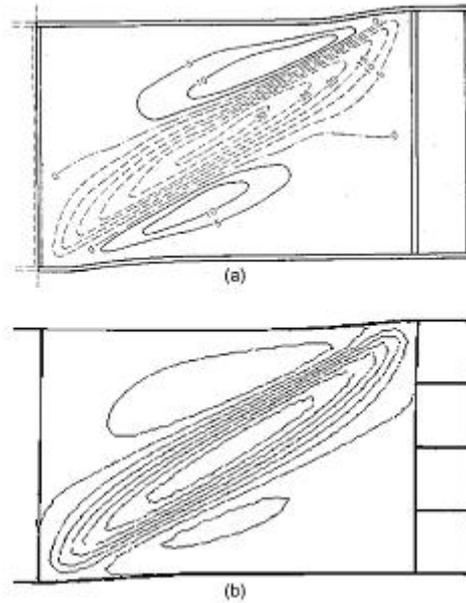
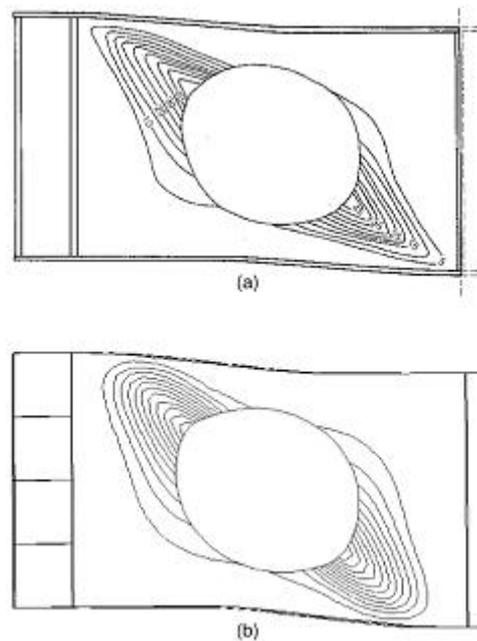


Figura 2.7 – Carga última x tamanho da abertura (furos circulares) [2]

A Figura 2.8 e a Figura 2.9 demonstram que o campo de tração verificado nas vigas experimentais pode ser previsto pelo modelo em elementos finitos. Tais observações reforçam o fato de que os modelos em elementos finitos são capazes de prever o comportamento completo de vigas soldadas com aberturas na alma submetidas à flexão.



**Figura 2.8 – Campos de tração: a) Viga experimental; b) Modelo em elementos finitos [2]**



**Figura 2.9 – Campos de tração: a) Viga experimental; b) Modelo em elementos finitos [2]**

Em 2004, Lian e Shanmugam deram continuidade a seus trabalhos sobre a abertura de furos em vigas soldadas [2], publicando um artigo sobre o dimensionamento de vigas soldadas curvadas horizontalmente, contendo aberturas circulares nas almas [9].

Neste artigo, os autores apresentam um método de dimensionamento simples para a previsão da resistência última ao cisalhamento destas vigas soldadas. A solução é obtida pela incorporação dos efeitos de curvatura e do tamanho da abertura em uma equação de equilíbrio para vigas soldadas retas (sem curvatura) contendo aberturas na alma. Foi observado no estudo paramétrico que a capacidade última de carga decresce linearmente com o aumento do grau de curvatura para as vigas curvas que apresentam aberturas de tamanho reduzido. Nenhum decréscimo significativo na capacidade última de carga é observado, entretanto, quando o tamanho da abertura na alma excede metade da altura da viga. A precisão da equação proposta foi avaliada pela comparação dos resultados com os resultados encontrados com o método dos elementos finitos, assim como, pela comparação com os resultados experimentais disponíveis.

O método corrente para se estimar a capacidade última de carga de vigas soldadas retas com alma sem furos é baseado na abordagem do campo de tração proposta por Porter *et al.* [10] e Narayanan e Der Avanessian [11,12]. Este método consiste em avaliar a resistência da viga soldada como a soma de três contribuições: A carga crítica elástica na alma, a carga suportada pela tensão de membrana desenvolvida na fase pós-crítica e a carga suportada pelas mesas quando o colapso é iminente. Posteriormente, Narayanan e Der Avanessian [11,13] aprimoraram o método para que o mesmo pudesse contemplar a existência de furos na alma das vigas soldadas. Uma hipótese adicional feita para as equações de equilíbrio aproximadas é de que a largura da banda do campo de tração desenvolvido ao longo de uma banda diagonal, que suporta a carga aplicada no estágio pós-crítico, é reduzida pela maior dimensão do furo (Figura 2.10).

No estágio pós-crítico, a carga adicional é suportada pela tensão de membrana desenvolvida na alma. A tensão de membrana forma duas bandas de tração, uma acima e a outra abaixo das aberturas, conforme pode ser visto na Figura 2.11. Este fenômeno foi observado no modelo de flambagem visto nas vigas testadas por Narayanan e Rockey [14]. As mesas suportam parte do carregamento. Quando o colapso está próximo de ocorrer, a resistência ao momento das mesas é igual ao momento de plastificação. A carga última da viga soldada é obtida pela soma da contribuição devido à rigidez das mesas à carga suportada pela alma.

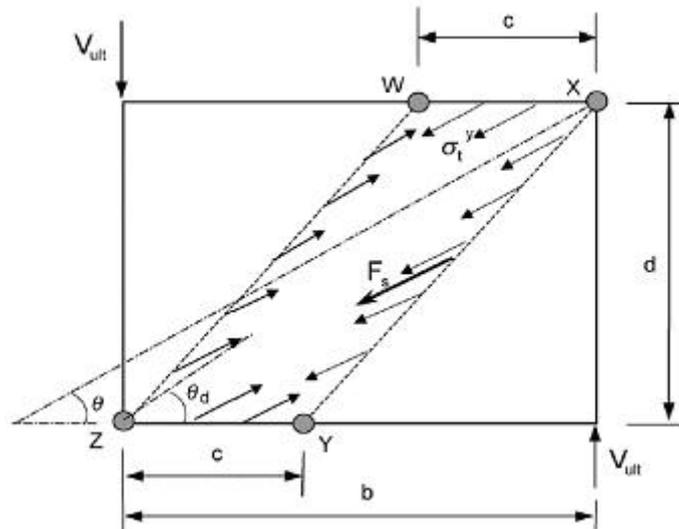


Figura 2.10 – Campo de tração em um painel sem furo [9]

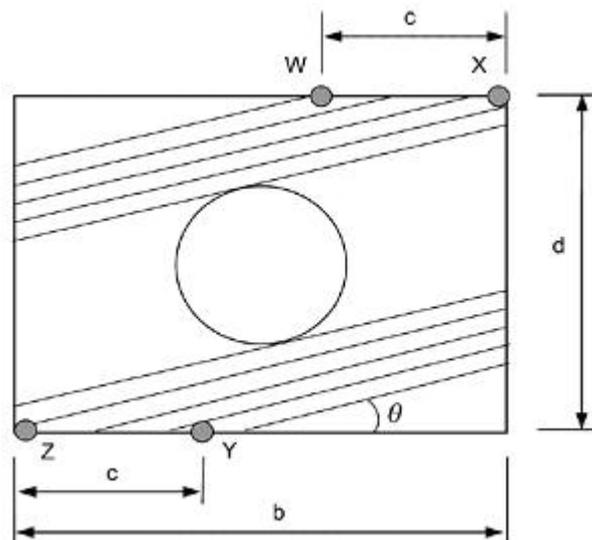
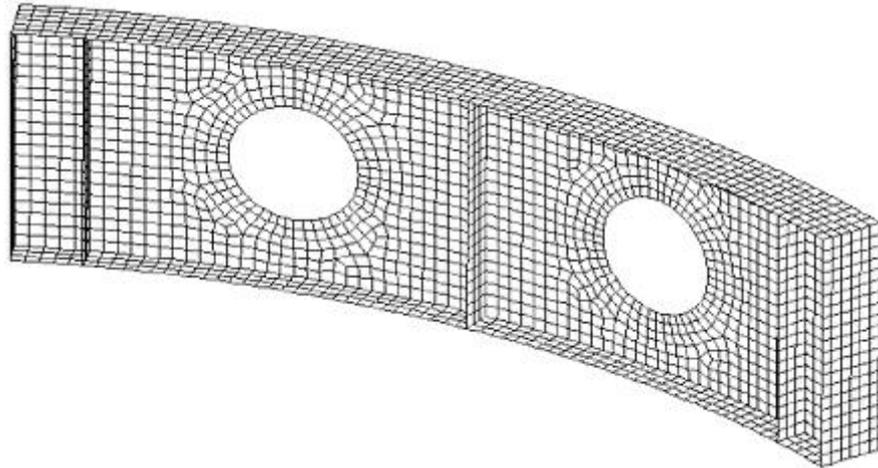


Figura 2.11 – Campo de tração em um painel com furo [9]

Os mais importantes parâmetros físicos que afetam o comportamento de vigas soldadas retas contendo aberturas na alma, submetidas à carga última são: Esbeltez da alma, relação entre a altura e a largura do painel da alma ( $d/b$ ), proporção do furo em relação à altura da viga, rigidez das mesas e dos “T’s” superior e inferior. Um parâmetro adicional que influencia o comportamento de vigas soldadas curvadas horizontalmente é a sua curvatura. No estudo desenvolvido por Lian e Shanmugam [9], foi dada atenção especial ao grau de curvatura e ao tamanho da abertura na alma, mantendo-se os outros parâmetros constantes.

Foram estudadas 48 vigas soldadas curvadas horizontalmente, contendo oito curvaturas diferentes e cinco diferentes tamanhos de abertura. Cada estudo foi conduzido nos modelos pela variação de um parâmetro em particular, enquanto os outros parâmetros

foram mantidos constantes. Um modelo tridimensional em elementos finitos foi empregado no estudo paramétrico (Figura 2.12). As vigas foram analisadas até a ruína e foram obtidos todos os valores de carga última.



**Figura 2.12 – Modelo em elementos finitos [9]**

A variação da carga última em relação ao grau de curvatura é mostrada na Figura 2.13. O decréscimo na carga última devido ao acréscimo no grau de curvatura pode ser observado na figura. A relação de decréscimo é aproximadamente linear para todos os tamanhos de abertura. Para as vigas contendo a relação entre o diâmetro do furo e a altura do painel ( $d_o/d$ ) maior do que 0,5, nenhuma redução na resistência devido ao aumento no grau de curvatura é observada. Tais observações foram similares às verificadas nas vigas experimentais.

Um método de equilíbrio para a previsão da resistência última ao cisalhamento de vigas soldadas retas com furos circulares na alma, proposto por Narayanan e Der Avanessian [13, 16] foi empregado para a previsão da carga última das vigas soldadas (curvadas horizontalmente) escolhidas para as análises paramétricas, e os resultados foram comparados com os obtidos pelo método dos elementos finitos.

A comparação dos resultados mostra que o método de equilíbrio pode prever com razoável precisão a capacidade última de carregamento de vigas soldadas curvadas horizontalmente para as vigas que apresentam um grau de curvatura menor do que  $20^\circ$ . Uma superestimativa de capacidade de carregamento é observada entretanto, para outras situações em que o grau de curvatura excede  $20^\circ$ .

Tal fato sugere que um fator de redução para se levar em conta os efeitos da curvatura deveria ser incluído na equação de dimensionamento. Equações empíricas para a previsão da carga última de vigas soldadas curvadas horizontalmente, foram então desenvolvidas no trabalho de Lian e Shanmugam [9], equações estas que incorporaram

coeficientes de correção na equação de equilíbrio original, de modo que a nova equação de equilíbrio pudesse apresentar resultados razoáveis para os casos das vigas que possuem grau de curvatura superior a  $20^\circ$ .

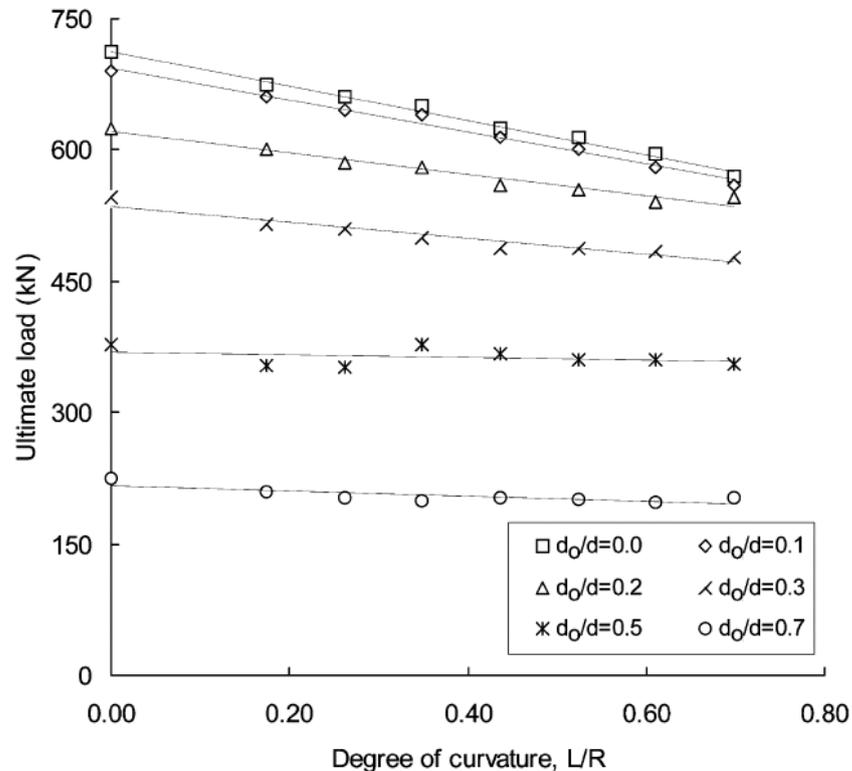


Figura 2.13 – Variação da carga última em relação ao grau de curvatura [9]

Os experimentos que deram suporte ao desenvolvimento do trabalho de Lian e Shanmugam [9], foram descritos detalhadamente em artigo assinado pelos mesmos autores [17]. Neste artigo, são apresentados minuciosamente todos os procedimentos necessários à execução dos ensaios, bem como os equipamentos utilizados para o rompimento das vigas e os sistemas de aquisição de dados empregados. Os materiais utilizados na montagem das vigas, assim como o processo de soldagem e as precauções tomadas para que os ensaios se tornassem o mais fidedigno possível também podem ser encontradas neste artigo. Os modelos em elementos finitos utilizados para a comparação com os testes experimentais são igualmente descritos neste trabalho, assim como o confronto dos resultados percebidos para os modelos experimentais e para os modelos numéricos, quais sejam: Modos de ruína, gráficos carga-deslocamento, carga última, deformada da estrutura e comportamento dos campos de tração. Da Figura 2.14 a Figura 2.16 são apresentados os experimentos realizados.

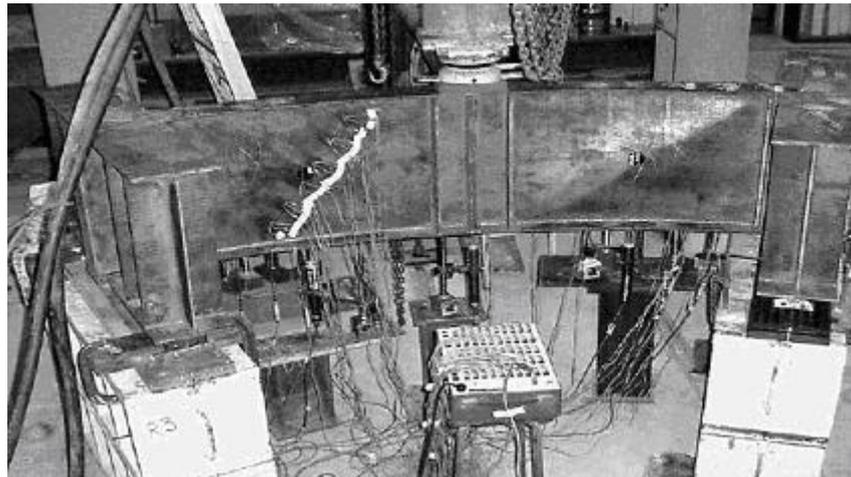


Figura 2.14 – Instrumentação do ensaio das vigas soldadas curvas [17] []

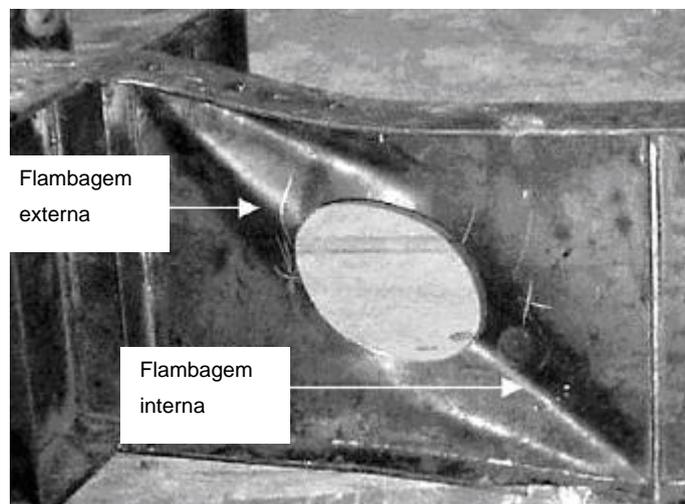


Figura 2.15 – Alma da viga após o ensaio [17]

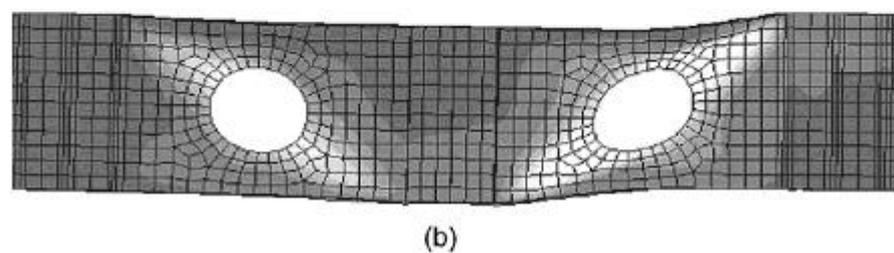
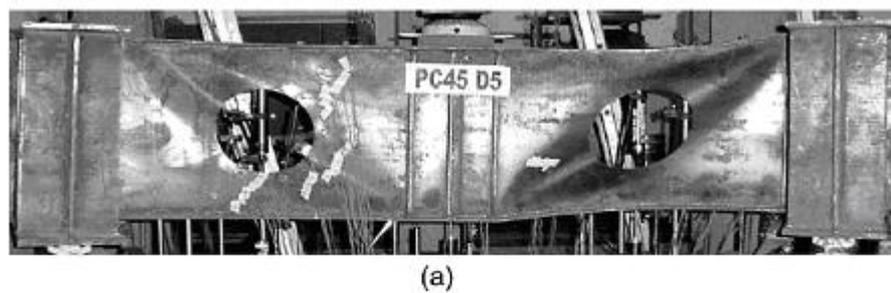


Figura 2.16 – a) Viga experimental; b) Modelo em elementos finitos [17]

- **2.2.3. Vigas de aço**

Nesta seção serão descritos resumidamente alguns trabalhos acerca de vigas de aço com furo na alma, ou seja, vigas que fazem uso apenas do material de que são constituídas para resistirem aos esforços atuantes.

Em 2001, Chung *et al* [3] publicaram um importante trabalho sobre o mecanismo de *Vierendeel* em vigas de aço com aberturas circulares na alma. Segundo os autores, no método de dimensionamento corrente para este tipo de vigas, a capacidade de carga das vigas é assumida estar limitada pela formação de rótulas plásticas no “tê superior” no lado de menor momento, LMS (*low moment side*) do furo. Além disso, uma fórmula de interação linear é utilizada para avaliar a capacidade ao momento dos “T’s” acima e abaixo dos furos, quando submetidos a esforços axiais e de cisalhamento simultâneos. O método é considerado conservador, pois a formação de rótulas plásticas no “T” superior no lado de menor momento (LMS) das aberturas na alma nem sempre causa a falha. As vigas são capazes de suportar carga adicional até que sejam desenvolvidas quatro rótulas plásticas em posições críticas nas seções perfuradas, para a formação de um mecanismo de *Vierendeel*. Além disso, a redução na capacidade ao momento dos “T’s” submetidos a esforços axiais e de cisalhamento simultâneos, é menos severa do que a prevista pela fórmula de interação linear.

O artigo apresenta uma investigação do mecanismo de *Vierendeel* em vigas de aço com furos circulares na alma, basendo-se em estudos analíticos e numéricos. O método de dimensionamento corrente é analisado em detalhes com as rótulas plásticas formadas no lado de menor momento (LMS) e no lado de maior momento (*high moment side*) das aberturas na alma. Um modelo em elementos finitos é então estabelecido, incorporando-se as não-linearidades geométricas e de material, para que a redistribuição de carga ao longo da abertura na alma possa estar representada adequadamente. De acordo com os autores, a resistência à flexão dos “T’s” superior e inferior quando submetidos a esforços axiais e de cisalhamento simultâneos, pode ser avaliada pelo modelo em elementos finitos. Finalmente, uma curva empírica de interação flexão-cisalhamento nas seções perfuradas é proposta para o dimensionamento prático de vigas de aço com furos circulares na alma.

A presença de furos na alma de vigas de aço introduz três diferentes modos de ruína nas seções perfuradas:

- Falha por cisalhamento devido à capacidade reduzida ao cisalhamento;
- Falha por flexão devido à reduzida capacidade ao momento;

- Mecanismo de *Vierendeel*, conforme mostrado na Figura 2.17, devido à formação de quatro rótulas plásticas nos “T’s”, oriundas da transferência de cisalhamento lateral ao longo da abertura da alma.

Geralmente, as resistências ao cisalhamento e ao momento fletor das seções perfuradas podem ser prontamente avaliadas. Contudo, as resistências ao momento dos “T’s” quando submetidos aos esforços locais de flexão são relativamente difíceis de serem avaliadas na presença de esforços axiais e de cisalhamento simultâneos, devido ao momento fletor global atuante na viga. Além disso, é necessária a utilização de dimensionamento plástico para incorporar a formação das quatro rótulas plásticas nos “T’s”, objetivando uma previsão aprimorada da capacidade de carga das vigas.

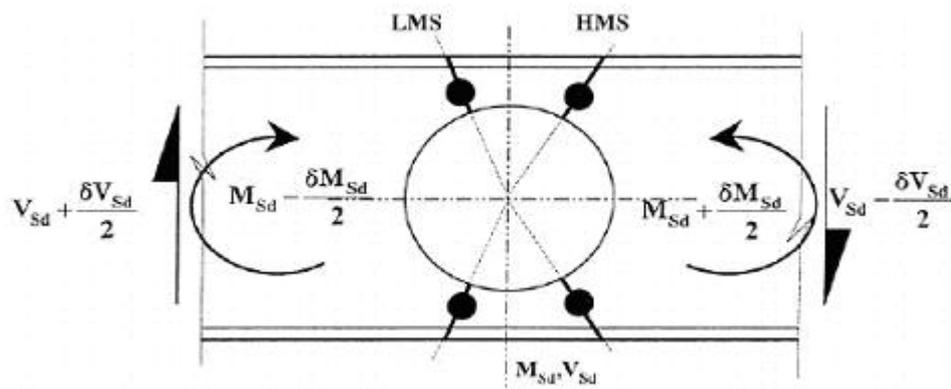


Figura 2.17 – Mecanismo de *Vierendeel* ao longo de um furo circular [3]

A investigação do trabalho de Chung et al [3], foi dividida em duas partes: Estudo analítico do método de dimensionamento corrente e modelagem em elementos finitos do mecanismo de *Vierendeel* nas seções perfuradas.

No estudo analítico do método de dimensionamento corrente, são descritos os mecanismos de formação das rótulas plásticas, assim como, são exibidas curvas de interação flexão-cisalhamento que podem ser utilizadas para a previsão das capacidades aos referidos esforços globais atuantes nos centros dos furos das vigas. Finalmente, são apontadas pelos autores [3] algumas deficiências no método de dimensionamento corrente. Segundo Chung *et al* [3], o método de dimensionamento corrente adapta uma abordagem simplificada na qual somente as rótulas plásticas nos “T’s” no lado de menor momento (LMS) são consideradas. Contudo, depois do começo do escoamento nos “T’s”, uma capacidade de carga adicional das vigas pode ser alcançada devido à redistribuição de esforços ao longo da abertura da alma. É geralmente esperado que quatro rótulas plásticas sejam necessárias para o desenvolvimento e formação de um mecanismo de *Vierendeel*.

Adicionalmente, o método de dimensionamento corrente considera que a resistência ao momento dos “T’s” seja reduzida linearmente de acordo com a magnitude das forças axiais simultâneas. Contudo, é provável que a interação flexão-cisalhamento seja menos severa na realidade do que a prevista pelo método corrente, e uma outra abordagem menos conservadora seja apropriada.

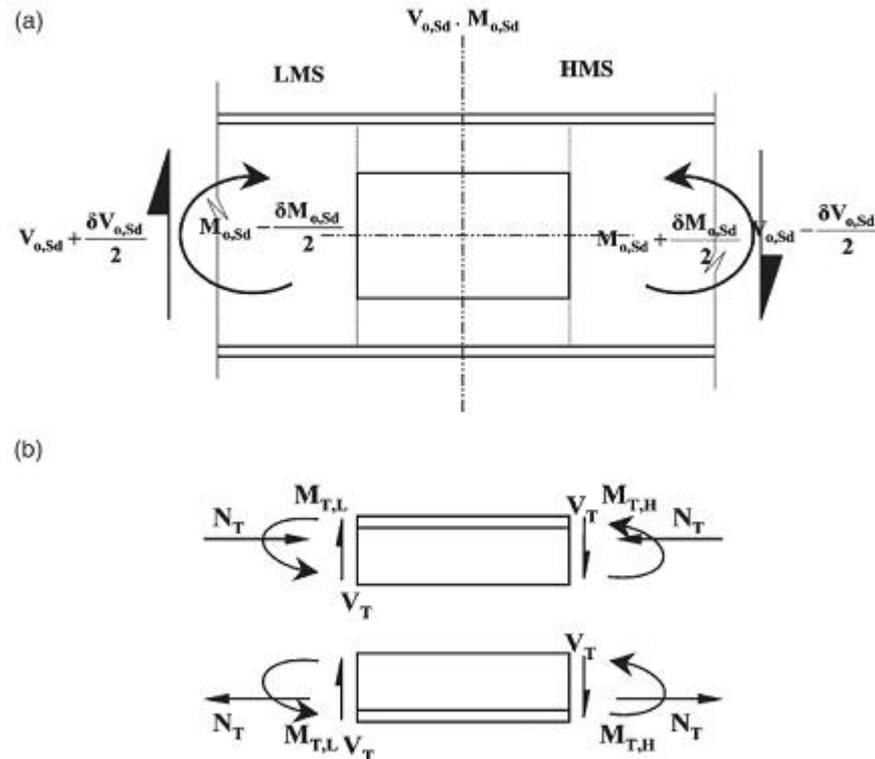
Baseado na modelagem em elementos finitos do mecanismo de *Vierendeel* nas seções perfuradas, foi proposta uma curva empírica de interação flexão-cisalhamento para o dimensionamento prático de vigas de aço com furo circular na alma.

O mecanismo de *Vierendeel* é sempre crítico em vigas de aço com furo na alma. Enquanto a profundidade da abertura da alma controla as falhas por flexão e por cisalhamento das seções perfuradas, é o comprimento da abertura na alma que controla o mecanismo de *Vierendeel*, que por sua vez depende das resistências locais ao cisalhamento e à flexão dos “T’s” superior e inferior.

Segundo Chung et al [18], a comparação entre as curvas de interação flexão-cisalhamento de vigas de aço com furos de diferentes tamanhos e formas, mostra similaridade entre as mesmas, e portanto, seria possível o desenvolvimento de uma curva de interação flexão-cisalhamento generalizada para a avaliação da capacidade de carga de todas as vigas de aço. Como a força de cisalhamento global causa as falhas por cisalhamento e o mecanismo de *Vierendeel* nas seções perfuradas, o efeito da flexão de *Vierendeel* localizada atuando nos “T’s” pode ser incorporado através de uma redução na capacidade de resistência ao cisalhamento global das seções perfuradas. Partindo-se desta idéia, os autores propuseram uma resistência ao cisalhamento global que levasse em conta os dois efeitos: Falha por mecanismo de *Vierendeel* e por cisalhamento. Uma resistência dupla ao cisalhamento global foi, portanto estabelecida e seus valores para as aberturas de diferentes formas e tamanhos na alma foram obtidos diretamente da investigação através do método dos elementos finitos.

Adicionalmente, um parâmetro indicativo, o parâmetro “*Vierendeel*”, foi estabelecido para se avaliar o grau de importância do mecanismo de *Vierendeel* nas seções perfuradas. Através da comparação entre as proporções utilizadas da resistência à flexão e ao cisalhamento, (“m” e “v”), e do parâmetro *Vierendeel*, (“ $v_i$ ”), os modos críticos de falha nas seções perfuradas sob diferentes “m” e “v” podem ser prontamente avaliados.

Em uma seção perfurada submetida a momento global ( $M_{o,sd}$ ) e a uma força de cisalhamento global ( $V_{o,sd}$ ), três ações locais são induzidas nos “T’s” superior e inferior, como mostrado na figura abaixo:



**Figura 2.18 – Distribuição de esforços na seção perfurada [18]**

- Força axial no “T”,  $N_T$ , devido ao momento global  $M_{o,Sd}$ ;
- Força de cisalhamento no “T”,  $V_T$ , devido à força de cisalhamento global  $V_{o,Sd}$ ;
- Momento local no “T”,  $M_T$ , devido à transferência da força de cisalhamento  $V_{o,Sd}$ , ao longo do comprimento da abertura.

De acordo com Chung et al [18], uma revisão global das recomendações de projeto [6, 7, 19, 20], mostra que em geral, há duas abordagens de projeto na avaliação do comportamento estrutural de vigas de aço com furos na alma:

- Abordagem da seção “T”: Nesta abordagem, a seção perfurada é considerada constituída por dois “T’s” que são separados por uma distância que depende da altura do furo, e todas as ações globais são representadas como esforços locais. A estabilidade estrutural das vigas de aço depende da capacidade de resistência dos “T’s” submetidos a esforços simultâneos axiais, de cisalhamento e de flexão. Geralmente, os métodos de dimensionamento com esta abordagem são complicados e o esforço de cálculo é considerável. A precisão dos métodos depende da precisão de um número de regras de dimensionamento contra os respectivos modos de falha. Contudo, devido à complexidade dos problemas, expressões aproximadas de dimensionamento são frequentemente apresentadas para reduzir o esforço de cálculo, conduzindo a resultados conservadores;

- Abordagem da seção perfurada: Nesta abordagem, a seção perfurada é a seção crítica a ser considerada no dimensionamento, e a estabilidade estrutural das vigas de aço depende da capacidade de resistência da seção perfurada submetida a esforços simultâneos globais de cisalhamento e de flexão. Curvas simples e empíricas de interação flexão-cisalhamento são frequentemente utilizadas, e portanto, os métodos de dimensionamento são geralmente considerados simples e adequados para os engenheiros em seu dimensionamento prático. Contudo, os métodos de dimensionamento são de alguma forma restritivos, com aplicações limitadas, e frequentemente são muito conservadores.

O projeto de investigação de Chung et al [18], foi dividido em duas partes:

- Investigação em elementos finitos: Baseado em modelos em elementos finitos com não-linearidades geométricas e de material, estabelecidos para vigas de aço com aberturas circulares na alma, um estudo paramétrico foi realizado para investigar e comparar as capacidades de carga de vigas de aço com aberturas de vários tamanhos e formas.
- Desenvolvimento de um método empírico de dimensionamento: Baseado nos resultados da investigação em elementos finitos, um método empírico de dimensionamento para vigas de aço com aberturas na alma de vários tamanhos e formas foi desenvolvido, através do uso de uma curva de interação flexão-cisalhamento generalizada.

As curvas de interação flexão-cisalhamento obtidas através do método dos elementos finitos são apresentadas da Figura 2.19 a Figura 2.22 onde foram consideradas as configurações geométricas apresentadas na Figura 2.23. As curvas de interação flexão-cisalhamento para oito formas de abertura com três tamanhos de abertura, submetidas à variadas relações  $m/v$  em vigas de aço de quatro tamanhos diferentes são arrumadas de uma maneira racional para fácil comparação e referência. A força global de cisalhamento,  $V_{o,Sd}$ , e o momento global,  $M_{o,Sd}$ , no centro da seção perfurada, foram normalizados em relação às respectivas capacidades de resistência aos esforços globais das seções perfuradas,  $V_{o,Rd}$  e  $M_{o,Sd}$ . Todas as curvas de interação apresentaram-se similares em suas formas. Tal fato confirma a adequabilidade de uma curva de interação flexão-cisalhamento generalizada para o dimensionamento das seções perfuradas de várias formas e tamanhos. Deve ser notado que a despeito da variação dos tamanhos e das formas das aberturas na alma, todas as curvas convergem para o mesmo ponto de interseção “x”, apresentando a mesma resistência à flexão sob cisalhamento global nulo, desde que as aberturas na alma tenham a mesma profundidade. Contudo, todas as curvas apresentam diferentes pontos de interseção “y”, ou seja, diferentes capacidades ao cisalhamento nas seções perfuradas sob

momento global nulo, provavelmente devido aos diferentes momentos locais de *Vierendeel* atuando nos “T’s” superior e inferior.

A fim de se compreender os efeitos das formas e dos tamanhos das aberturas na resistência das seções perfuradas, é importante relacionar a profundidade da abertura,  $d_o$ , e o comprimento crítico de abertura,  $c$ , da seguinte maneira:

- Cisalhamento e momento global atuando na seção perfurada;
- Esforços locais axiais, de cisalhamento e de flexão simultâneos atuando nos “T’s” superior e inferior.

Geralmente, um aumento na profundidade da abertura,  $d_o$ , sempre reduz a resistência ao cisalhamento e ao momento das seções perfuradas, e portanto, as falhas por cisalhamento e por flexão das seções perfuradas são controladas pela magnitude de  $d_o$ . Contudo, enquanto um aumento no comprimento da abertura,  $c$ , não afeta a resistência ao cisalhamento e à flexão das seções perfuradas, tal incremento aumenta diretamente o momento local de *Vierendeel* atuante nos “T’s”, e portanto, promove o mecanismo de *Vierendeel* nas seções perfuradas. Consequentemente, para furos na alma com os mesmos valores de  $d_o$ , mas com diferentes valores de  $c$ , a capacidade de carga das seções perfuradas é inversamente proporcional aos valores de  $c$ .

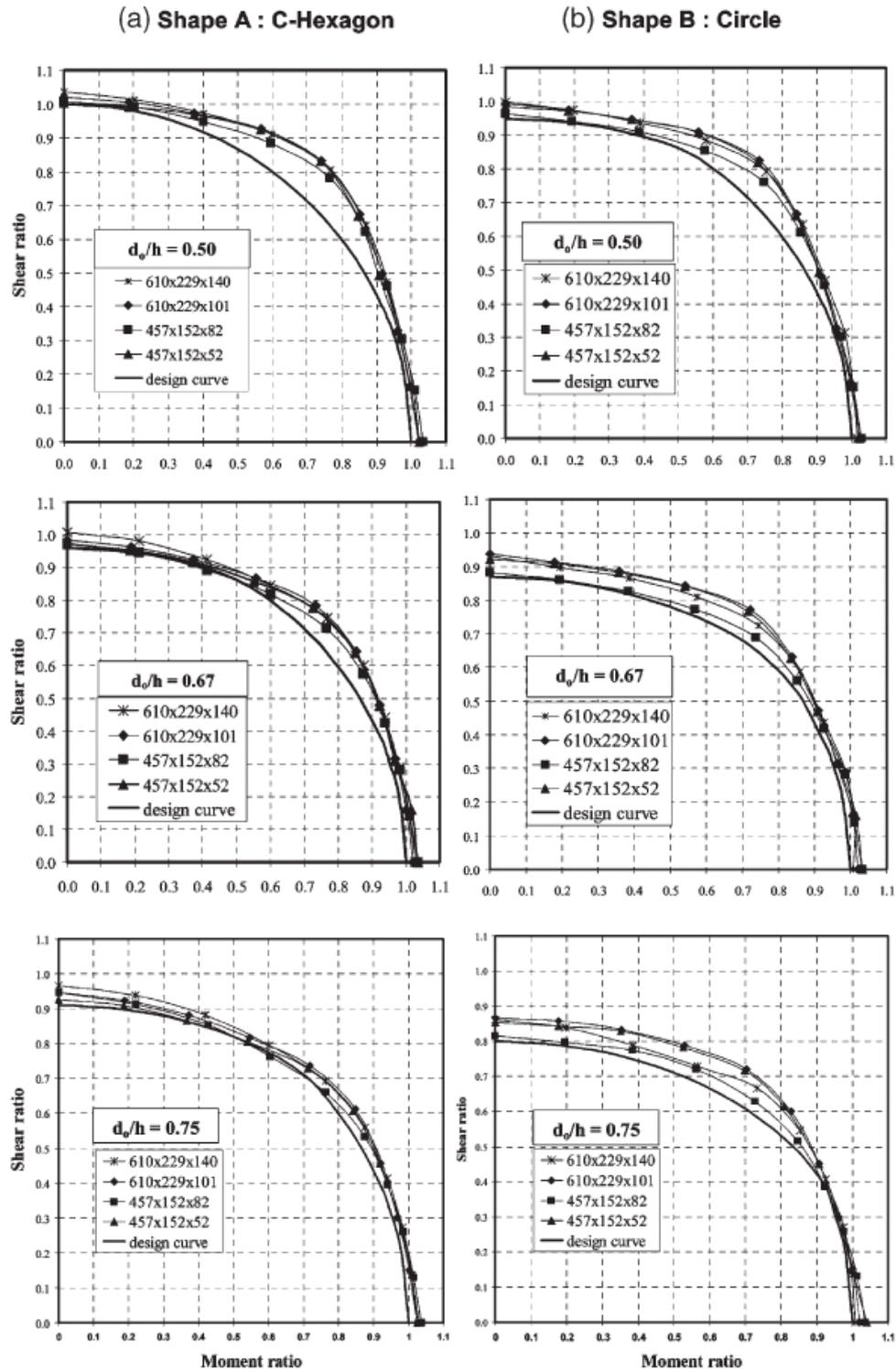


Figura 2.19 – Curvas de interação flexão-cisalhamento [18]

(c) Shape C : Regular Octagon

(d) Shape D : Regular Hexagon

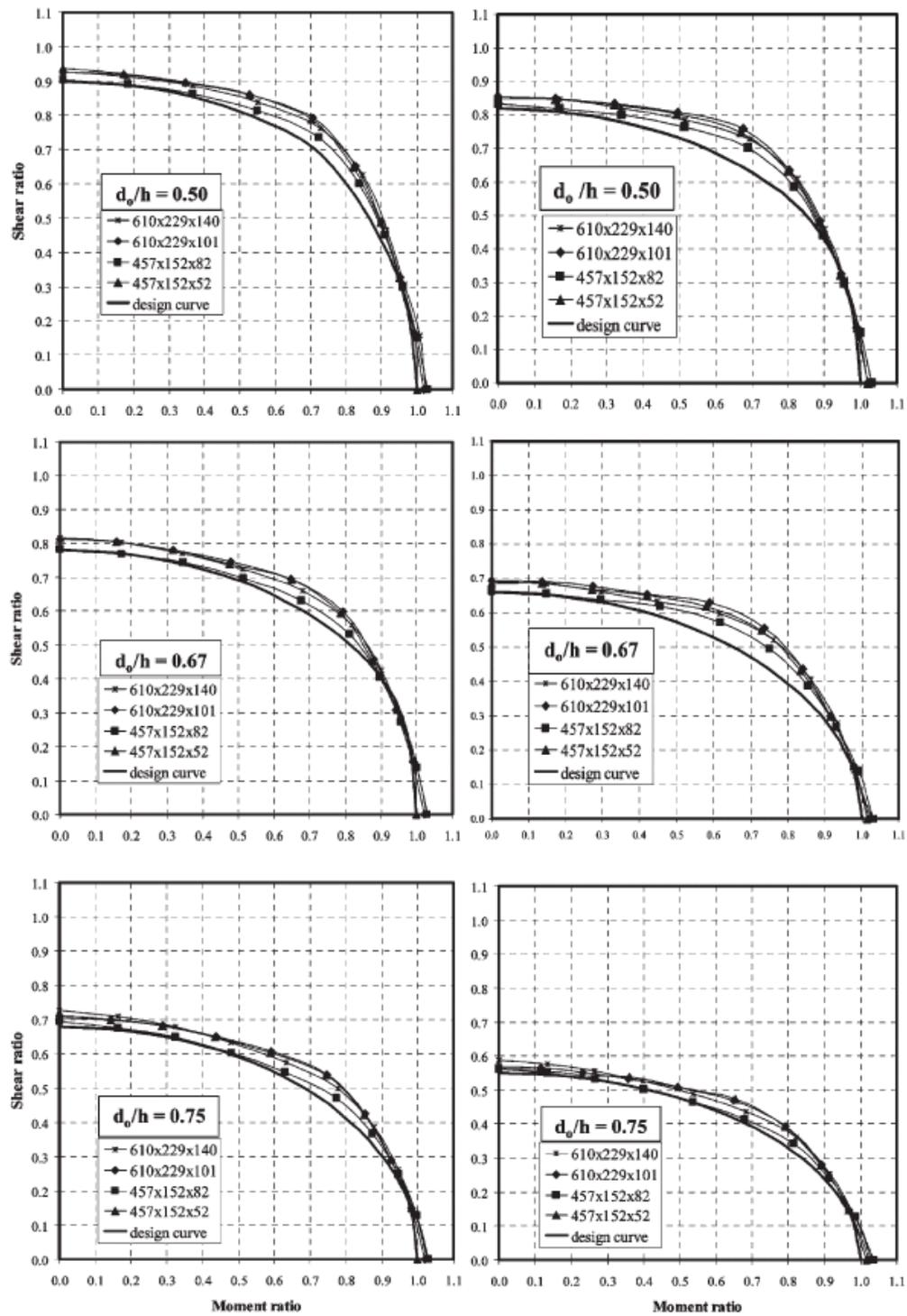


Figura 2.20 – Curvas de interação flexão-cisalhamento [18]

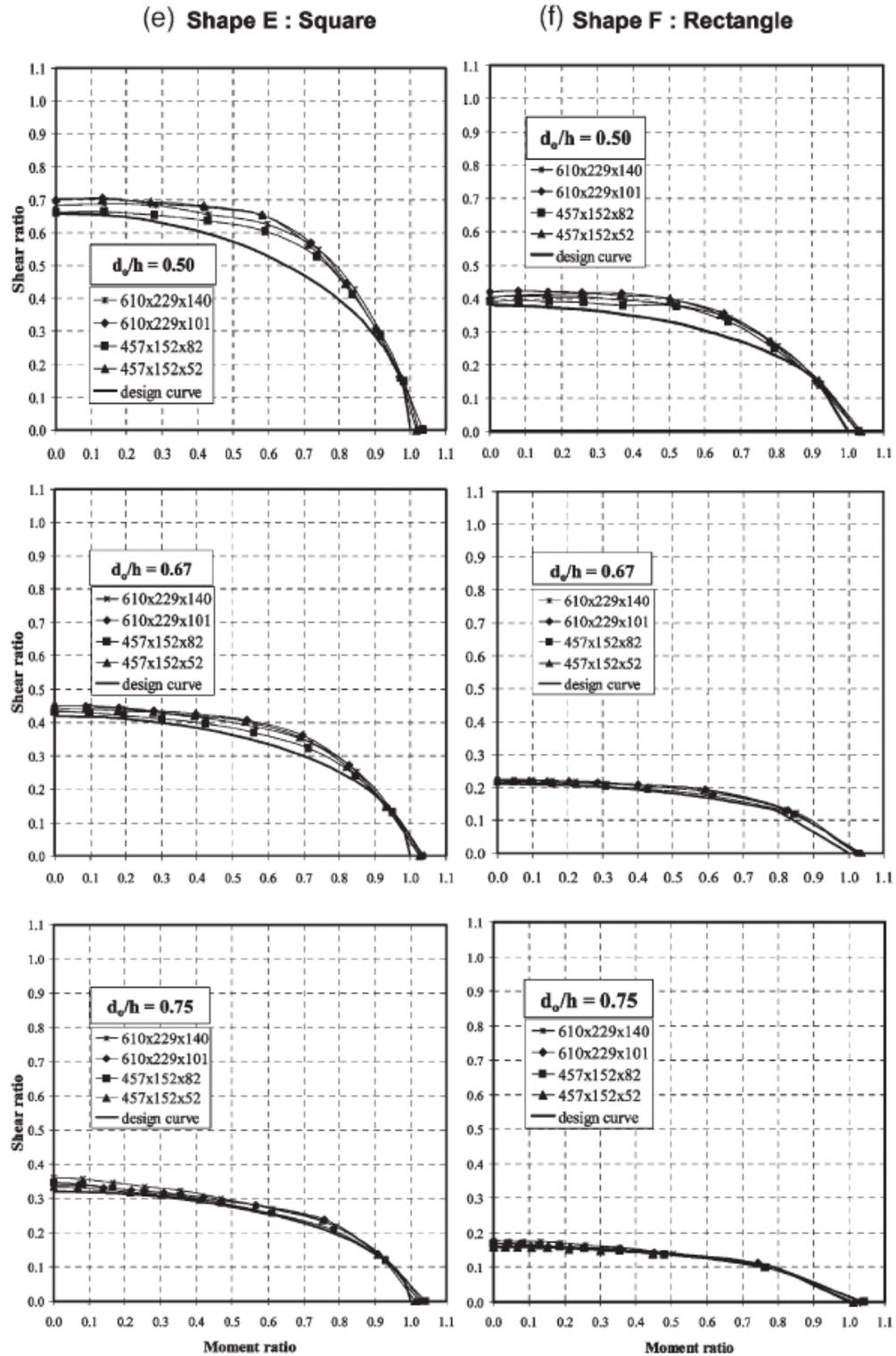


Figura 2.21 – Curvas de interação flexão-cisalhamento [18]

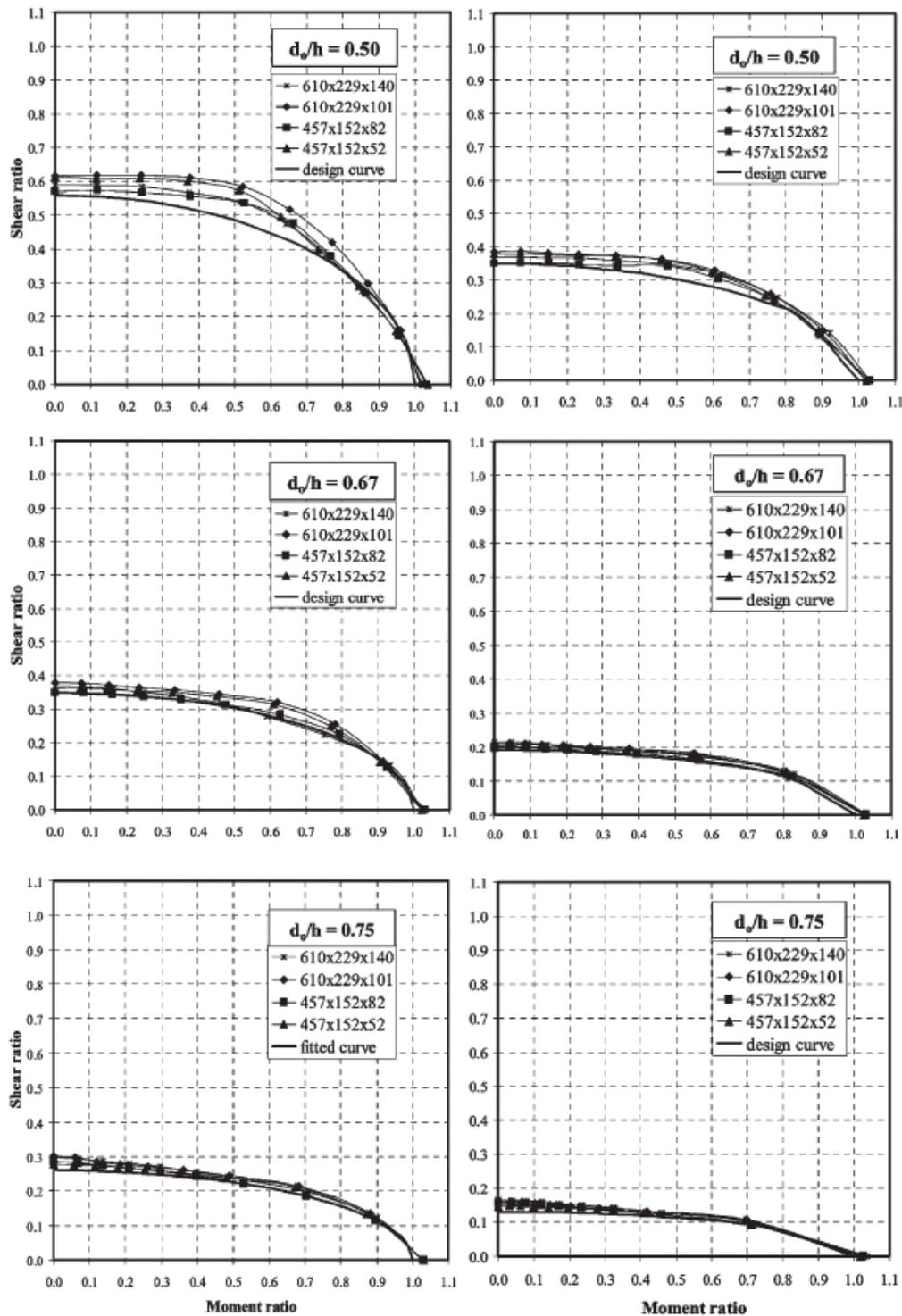
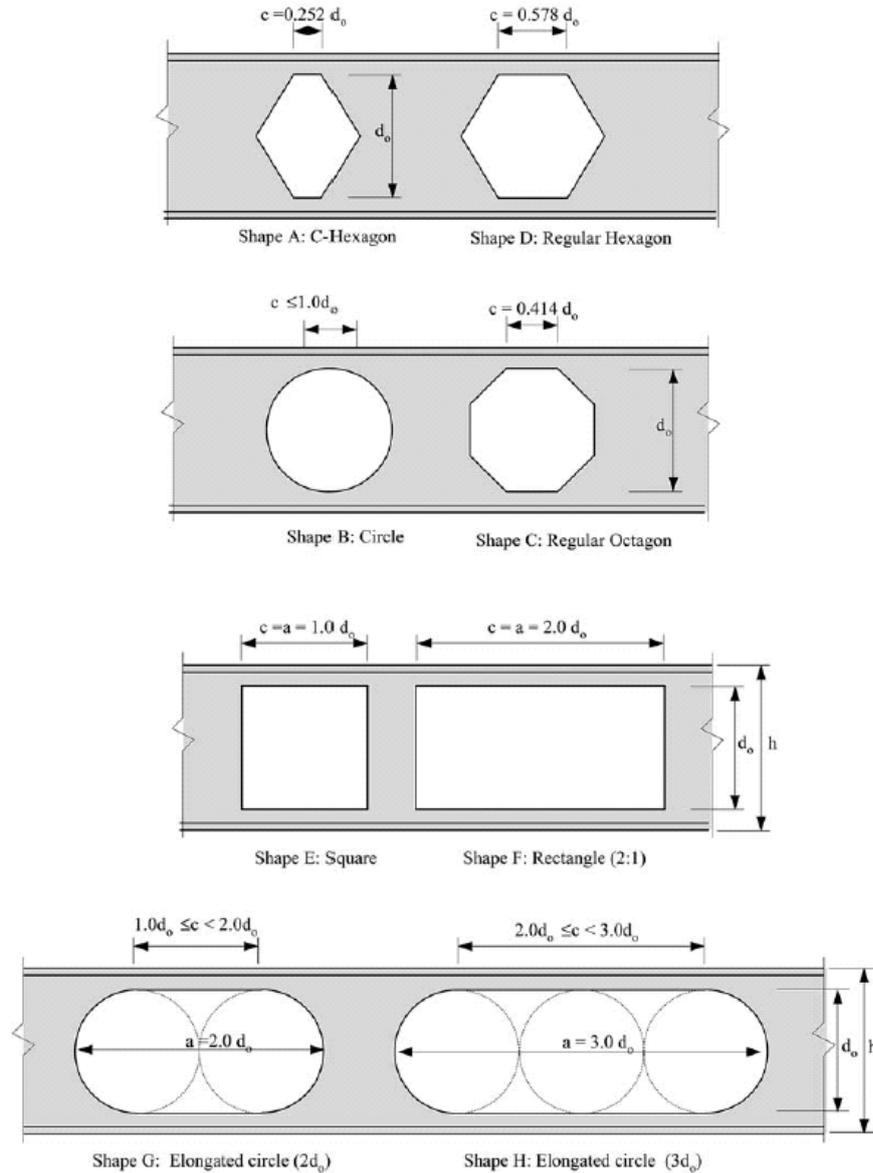
(g) Shape G : Elongated circle  $2d_o$ (h) Shape H : Elongated circle  $3d_o$ 

Figura 2.22 – Curvas de interação flexão-cisalhamento [18]



**Figura 2.23 – Configurações geométricas das aberturas na alma [18]**

Pode ser conveniente considerar que as ruínas por cisalhamento e por mecanismo de *Vierendeel* nas seções perfuradas são primariamente causadas pelo cisalhamento global. A resistência ao cisalhamento global das seções perfuradas atinge seu valor máximo na ausência de forças axiais devido ao momento global. Qualquer aumento no momento global na seção perfurada irá induzir esforços axiais locais nos “T’s”, promovendo escoamento local dos “T’s” e portanto, colapso das seções perfuradas. Para seções perfuradas submetidas a momentos globais significativos, a capacidade de resistência ao cisalhamento global será reduzida fortemente.

O método empírico de dimensionamento proposto por Chung *et al* [18] através de uma curva de interação flexão-cisalhamento generalizada para vigas de aço com aberturas de tamanhos e formas variadas na alma, foi desenvolvido baseado em uma análise paramétrica utilizando o método dos elementos finitos. Tal análise é descrita detalhadamente em artigo publicado por Liu e Chung [21], onde podem ser observados os modelos numéricos, as curvas carga-deslocamento, os modos de ruína e os modelos de escoamento observados na região ao redor dos furos após as falhas das vigas.

## 3. Normas e Procedimentos de Dimensionamento

### 3.1. Introdução

Existe um grande número de normas e procedimentos de dimensionamento para vigas mistas e vigas de aço com aberturas na alma. A seguir, serão apresentadas as normas e procedimentos mais relevantes propostas por autores consagrados no estudo deste campo de pesquisa das estruturas de aço.

### 3.2. Recomendações gerais de dimensionamento

Para vigas de aço com abertura circular na alma, a maioria das normas de dimensionamento são aplicáveis utilizando uma abertura retangular equivalente de dimensões modificadas, como sugerido por Redwood [25]. Todavia, devido à simplicidade da abordagem, a capacidade de carregamento das vigas de aço é sempre subestimada significativamente.

Para chapas dobradas a frio, uma extensa investigação experimental [29] foi realizada com aberturas circulares e retangulares, em seções C (enrijecidas) e em seções sigma, e um conjunto de regras de dimensionamento complementares ao BS5950: Parte 5 foi proposto [29], após calibração utilizando o resultado de ensaios experimentais.

Conforme comentado no capítulo dois, uma revisão global das recomendações de projeto [6, 7, 19, 20] mostra que, em geral, há duas abordagens de projeto na avaliação do comportamento estrutural de vigas de aço com furos na alma:

- Abordagem da seção “T”: Nesta abordagem, a seção perfurada é considerada constituída por dois “T’s” que são separados por uma distância que depende da altura do furo, e todas as ações globais são representadas como esforços locais. A estabilidade estrutural das vigas de aço depende da capacidade de resistência dos “T’s” submetidos a esforços simultâneos axiais, de cisalhamento e de flexão. Geralmente, os métodos de dimensionamento com esta abordagem são complicados e o esforço de cálculo é considerável. A precisão dos métodos depende da precisão de um número de regras de dimensionamento contra os respectivos modos de falha. Contudo, devido à complexidade dos problemas, expressões aproximadas de dimensionamento

são frequentemente apresentadas para reduzir o esforço de cálculo, conduzindo a resultados conservadores.

- Abordagem da seção perfurada: Nesta abordagem, a seção perfurada é a seção crítica a ser considerada no dimensionamento, e a estabilidade estrutural das vigas de aço depende da capacidade de resistência da seção perfurada submetida a esforços simultâneos globais de cisalhamento e de flexão. Curvas simples e empíricas de interação flexão-cisalhamento são frequentemente utilizadas, e portanto, os métodos de dimensionamento são geralmente considerados simples e adequados para os engenheiros em seu dimensionamento prático. Contudo, os métodos de dimensionamento são de alguma forma restritivos, com aplicações limitadas, e frequentemente são muito conservadores.

Em uma viga de aço com abertura de altura  $d_0$  na alma, o momento resistente da seção perfurada,  $M_{0,Rd}$ , é dado por:

$$M_{0,Rd} = f_y W_{0,pl} \geq M_{0,Sd} \quad (3.1)$$

$$W_{0,pl} = W_{pl} - \frac{d_0^2 t_w}{4} \quad (3.2)$$

Onde:

$W_{pl}$  é o módulo plástico da seção não perfurada;

$t_w$  é a espessura da alma;

$d_0$  é a altura da abertura;

$f_y$  é a tensão de escoamento do aço.

Geralmente, a área da seção transversal de uma viga de aço que é considerada para resistir aos esforços de cisalhamento é definida como  $ht_w$  baseada em uma análise simples da seção plástica e  $h$  é a altura da seção transversal. Esta aproximação é largamente adotada em códigos modernos de estruturas de aço por causa da sua simplicidade. Além do mais, como as mesas estão destinadas a resistir ao momento fletor enquanto a alma está destinada a resistir ao cisalhamento, a contribuição das mesas na resistência ao cisalhamento da seção transversal como um todo pode frequentemente ser

desprezada sem causar erro significativo. Contudo, em uma seção transversal com uma grande abertura na alma, a área da alma destinada a resistir ao cisalhamento é substancialmente reduzida, e portanto, as áreas das mesas tornam-se significativas na avaliação da capacidade de resistência ao cisalhamento da seção perfurada.

Durante a investigação em elementos finitos realizada por Chung *et al* [18], as resistências ao cisalhamento das seções perfuradas apresentaram-se consistentemente maiores do que aquelas previstas pelas normas de dimensionamento correntes, sugerindo que partes das áreas das mesas deveriam ser incorporadas a fim de se avaliar a resistência ao cisalhamento das seções perfuradas com maior precisão. Conforme mostrado na Figura 3.1, a área de cisalhamento equivalente de uma mesa,  $A_{vf}$ , após a calibração com os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos, é dada por:

$$A_{vf} = t_f(0,375t_f + t_w + 0,375t_f) \quad (3.3)$$

Onde:

$t_w$  é a espessura da alma;

$t_f$  é a espessura da mesa.

Conseqüentemente, a resistência plástica ao cisalhamento da seção perfurada,  $V_{0,Rd}$ , será dada por:

$$V_{0,Rd} = f_v A_{v0} \geq V_{0,Sd} \quad (3.4)$$

$$A_{v0} = A_v - d_0 t_w \quad (3.5)$$

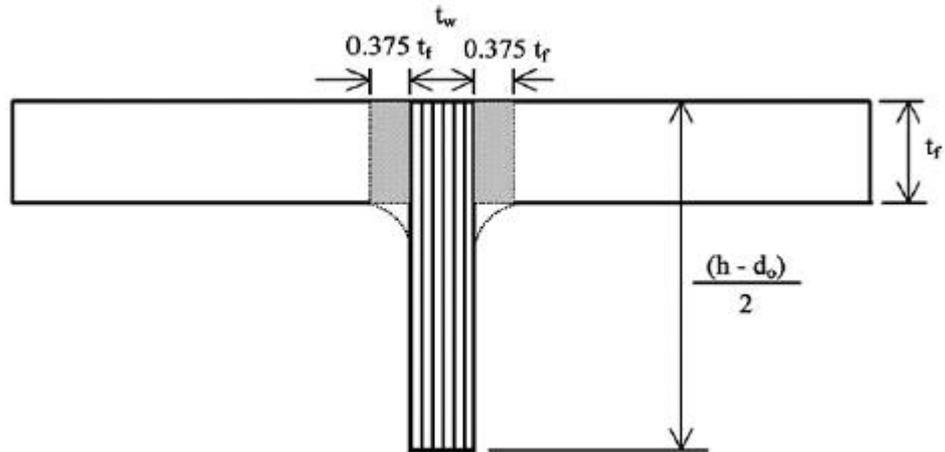
Onde:

$f_v$  é a resistência ao cisalhamento da viga de aço tomada como  $0,577 \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$ ;

$\gamma_{M0}$  é um coeficiente de segurança parcial do material adotado como 1,0;

$A_v$  é a área cisalhada da seção não perfurada.

$$A_v = ht_w + 2(0,75t_f t_f) \quad (3.6)$$



**Figura 3.1 – Área de cisalhamento equivalente em um “T” [18]**

Para uma seção típica de viga tal como, UB 457x152x52 S275, a área cisalhada das mesas contribui com um aumento de 10% na resistência ao cisalhamento de uma seção perfurada com uma abertura na alma de  $\frac{d_0}{h}$  igual a 0,50. Para uma seção perfurada com  $\frac{d_0}{h}$  igual a 0,75, o aumento na resistência ao cisalhamento é de 21%. Deve ser notado que para as seções com mesas espessas, o aumento na resistência ao cisalhamento frequentemente excede 30%. A tabela a seguir apresenta os aumentos na resistência ao cisalhamento em quatro vigas de aço com aberturas na alma para três diferentes relações de  $\frac{d_0}{h}$ .

**Tabela 3.1 – Aumento na resistência ao cisalhamento [18]**

Seções perfuradas	$d_0/h = 0.50$	$d_0/h = 0.67$	$d_0/h = 0.75$
UB 457 × 152 × 52	10%	16%	21%
UB 457 × 152 × 82	22%	33%	43%
UB 610 × 229 × 101	10%	16%	21%
UB 610 × 229 × 140	18%	27%	36%

Após a determinação da resistência ao cisalhamento da seção perfurada,  $V_{0,Rd}$ , é importante considerar o efeito do momento local de *Vierendeel*, atuando nos “T’s” acima e abaixo da abertura na alma, na capacidade de resistência ao cisalhamento global da seção perfurada. Deve ser notado que o esforço de cisalhamento global e o momento local de *Vierendeel* interagem, atuando simultaneamente na seção perfurada. A extensão da

interação na seção perfurada é obviamente muito complicada, dependendo não somente das formas e dos tamanhos das aberturas, mas também da força de cisalhamento global e do momento fletor global solicitante na seção perfurada. A resistência ao cisalhamento global considerando o mecanismo de *Vierendeel*, ou a resistência dupla ao cisalhamento global,  $V_{0,Rd,Vi}$ , da seção perfurada contemplada no estudo de Chung *et al* [18], pode ser obtida diretamente das curvas de interação flexão-cisalhamento apresentadas na figura 2.31. Para os propósitos de dimensionamento, uma relação de resistência dupla ao cisalhamento para as seções perfuradas,  $\bar{v}$ , é definida a seguir:

$$\bar{v} = \frac{V_{0,Rd,Vi}}{V_{0,Rd}} \quad (3.7)$$

A relação de resistência dupla ao cisalhamento governa a resistência ao cisalhamento global de uma seção perfurada submetida simultaneamente à ruína por cisalhamento e por mecanismo de *Vierendeel* na ausência de momento global. A próxima tabela resume os valores de  $\bar{v}$  para as seções perfuradas presentes no trabalho de Chung *et al* [18], que foram obtidos diretamente dos modelos em elementos finitos. É mostrado que para as aberturas na alma com pequeno comprimento de abertura, tal como o c-hexagonal, os valores de  $\bar{v}$  estão próximos da unidade para várias relações de  $\frac{d_0}{h}$ , indicando pouco efeito de interação do mecanismo de *Vierendeel* nas seções perfuradas. Contudo, para as aberturas na alma com grandes comprimentos de abertura, tal como em uma abertura retangular e em uma abertura alongada, o mecanismo de *Vierendeel* torna-se aparente e os valores de  $\bar{v}$  são frequentemente menores do que 0,5.

**Tabela 3.2 – Resumo das relações de resistência dupla ao cisalhamento,  $\bar{v}$ , para seções perfuradas de diferentes tamanhos e formas [18]**

Forma da Abertura	Tamanho da Abertura		
	$d_0/h=0.5$	$d_0/h=0.67$	$d_0/h=0.75$
Hexagonal	1.00	0.96	0.91
Circular	0.95	0.87	0.80
Octogonal Regular	0.90	0.78	0.68
Hexagonal Regular	0.82	0.66	0.55
Quadrada	0.66	0.42	0.32
Circular Alongada $2d_0$	0.56	0.35	0.26
Retangular 2:1	0.38	0.21	0.16
Circular Alongada $3d_0$	0.35	0.19	0.13

Geralmente, uma curva de interação com uma expressão elíptica pode ser usada para considerar a interação entre o momento fletor e o esforço de cisalhamento em placas sólidas retangulares:

$$m^2 + v^2 = 1 \quad (3.8)$$

Ou

$$v = \sqrt{1 - m^2} \quad (3.9)$$

Onde:

$v$  é a proporção utilizada da resistência ao cisalhamento dada por  $\frac{V_{0,Sd}}{V_{0,Rd}}$ ;

$m$  é a proporção utilizada da resistência à flexão dada por  $\frac{M_{0,Sd}}{M_{0,Rd}}$ .

Contudo, para seções perfuradas, esta curva de interação deveria ser modificada para considerar a presença do mecanismo de *Vierendeel* conforme mostrado na Figura 3.2. Geralmente, para seções perfuradas submetidas a momento fletor global nulo, a proporção utilizada da resistência ao cisalhamento é reduzida da unidade para a relação de resistência dupla ao cisalhamento,  $\bar{v}$ . Na presença de momento global, a proporção utilizada da resistência ao cisalhamento das seções perfuradas diminuirá gradualmente, dependendo da magnitude do momento global. Após uma calibração cuidadosa com as curvas de interação flexão-cisalhamento obtidas do trabalho de Chung *et al* [18], uma curva de interação flexão-cisalhamento generalizada é recomendada, conforme mostrado a seguir:

Para  $\bar{v} < 2/3$

$$\left( \frac{v}{\bar{v}} \right)^2 + m^2 = 1 \quad (3.10)$$

Para  $\bar{v} \geq 2/3$

$$\left( \frac{v - \left( \bar{v} - 2/3 \right)}{2/3} \right)^2 + \bar{m}^2 = 1 \quad (3.11)$$

Onde:

$\bar{m}$  é a relação de resistência dupla à flexão dada por  $\frac{M_{0,Rd,Vi}}{M_{0,Rd}}$  ;

Por análise direta, a proporção utilizada da resistência ao cisalhamento,  $v$ , e a relação de resistência dupla à flexão,  $\bar{m}$ , são dadas por:

Para  $\bar{v} < 2/3$

$$\bar{m} = \sqrt{1 - \left( \frac{v}{\bar{v}} \right)^2} \quad (3.12)$$

Para  $\bar{v} \geq 2/3$

$$\bar{m} = \sqrt{1 - \left( \frac{v - \left( \bar{v} - 2/3 \right)}{2/3} \right)^2} \quad (3.13)$$

Em todos os casos, a proporção utilizada da resistência ao cisalhamento,  $v$ , não deve exceder a relação de resistência dupla ao cisalhamento,  $\bar{v}$ . A Figura 3.2 a seguir exibe as curvas de interação flexão-cisalhamento propostas por Chung *et al* [18] para aberturas na alma com diferentes tamanhos e formas, e elas são consideradas aplicáveis a vigas de aço com dimensões práticas.

É importante notar que, baseado em três relações denominadas: A proporção utilizada da resistência ao cisalhamento, ( $v$ ), a proporção utilizada da resistência à flexão, ( $m$ ), e a relação de resistência dupla ao cisalhamento, ( $\bar{v}$ ), a capacidade de carregamento de vigas de aço com aberturas na alma de diferentes tamanhos e formas pode ser obtida prontamente através das curvas de interação flexão-cisalhamento propostas.

Deve ser notado que o método de dimensionamento proposto é bastante eficaz e foi cuidadosamente calibrado com os resultados das análises não-lineares com elementos finitos. A expressão de dimensionamento é simples e fácil de usar.

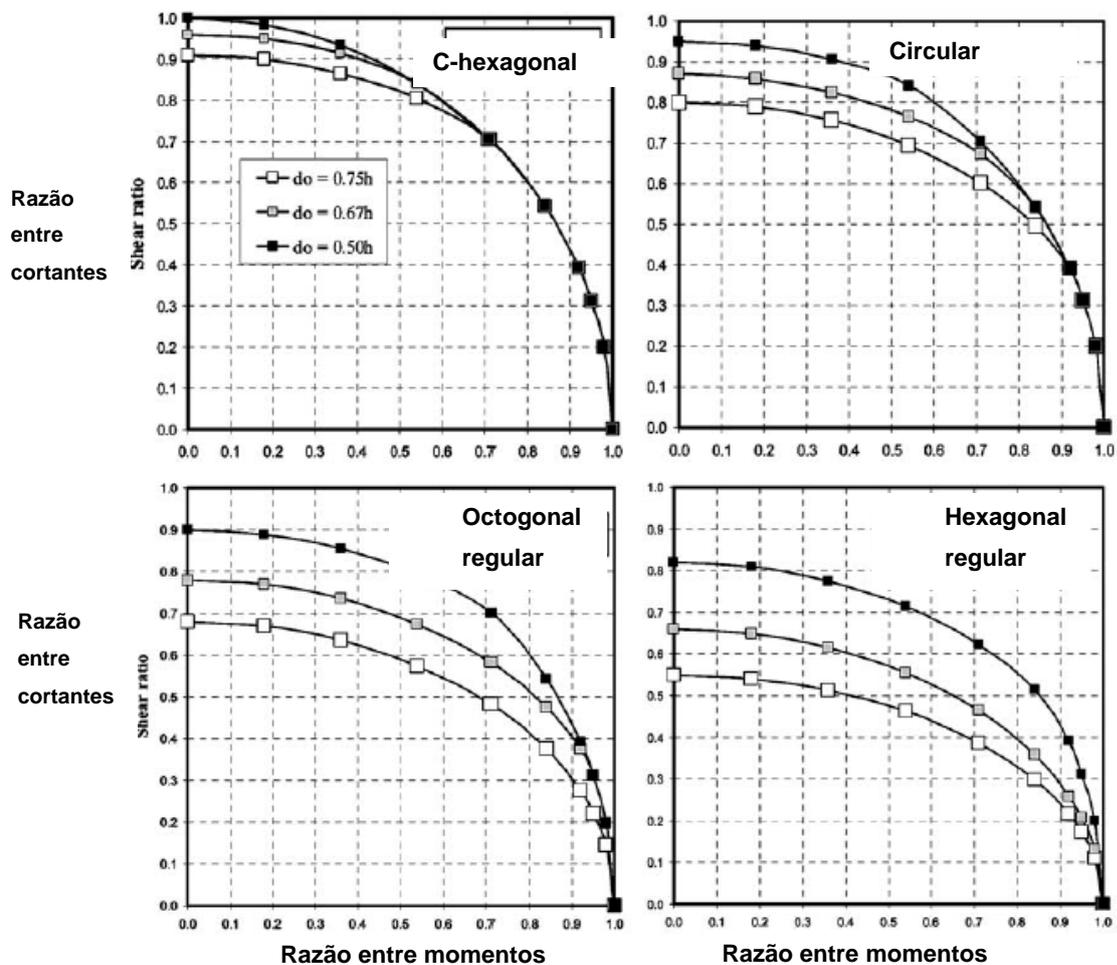


Figura 3.2 – Curvas de interação flexão-cisalhamento propostas [18]

Após a avaliação das capacidades de resistência ao cisalhamento e ao momento global das seções perfuradas, pode ser conveniente em alguns casos conhecer a importância relativa do mecanismo de *Vierendeel* nas seções perfuradas de diferentes tamanhos e formas. A comparação dos resultados da investigação em elementos finitos realizada por Chung *et al* [18] revela que:

- Para aberturas na alma com comprimento reduzido, submetidas a elevado cisalhamento, a ruína por cisalhamento é aparente na seção perfurada, especialmente nas aberturas com grandes alturas;
- Para aberturas na alma com comprimento considerável, submetidas a elevado cisalhamento, o mecanismo de *Vierendeel* é preponderante na seção perfurada;
- Para aberturas na alma com altura considerável, submetidas a cisalhamento reduzido, a ruína por flexão na seção perfurada pode ser crítica.

A fim de se avaliar o grau de importância do mecanismo de *Vierendeel* nas seções perfuradas, um parâmetro indicativo denominado parâmetro *Vierendeel*, ( $v_i$ ), foi estabelecido por Chung *et al* [18] e é definido a seguir:

$$v_i = \frac{V_{0,Rd,Vi}}{4M_{T,Rd} / c} \quad (3.14)$$

Onde:

$M_{T,Rd}$  é a capacidade básica de resistência à flexão dos “T’s” submetidos à forças axiais e de cisalhamento nulas.

$V_{0,Rd,Vi}$  é a resistência dupla ao cisalhamento global da seção perfurada.

$c$  é o comprimento crítico da abertura.

Para seções perfuradas com momento global nulo, o parâmetro *Vierendeel*, ( $v_i$ ), é igual à unidade desde que rótulas plásticas sejam totalmente desenvolvidas nas extremidades dos “T’s” acima e abaixo da abertura.

## 4. Modelo Numérico

### 4.1. Introdução

Com a finalidade de simular o comportamento estrutural de vigas de aço com aberturas na alma, foram elaborados modelos em elementos finitos através do Programa Ansys 10.0 [34]. Tais modelos foram calibrados a partir do trabalho de Chung *et al* [3], que por sua vez, baseou-se no resultado de ensaios experimentais realizados por outros pesquisadores [23] para a validação dos modelos propostos.

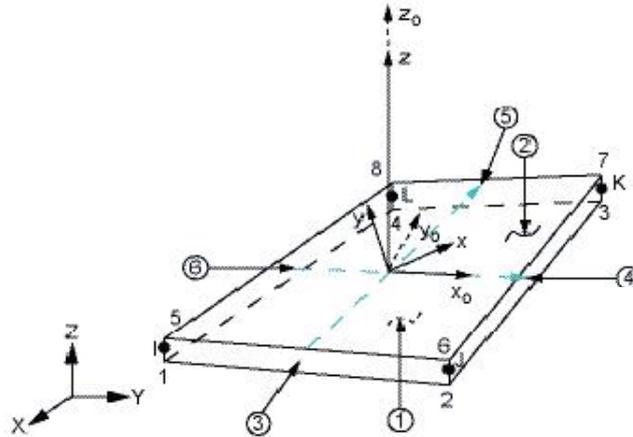
### 4.2. Características do Modelo

Não-linearidades físicas e geométricas foram incorporadas aos modelos em elementos finitos, a fim de se mobilizar totalmente a capacidade de resistência ao momento dos “T’s” submetidos a esforços axiais e de cisalhamento simultâneos, devido à ação de esforços globais. Adicionalmente, a utilização de não-linearidade geométrica permite a previsão de grandes deformações, considerando a redistribuição de carregamento na alma ao longo da abertura após o escoamento inicial. Portanto, o mecanismo de *Vierendeel* com a formação das rótulas plásticas nos “T’s” pode ser estudado detalhadamente.

Os modelos numéricos foram elaborados utilizando-se elemento de casca **SHELL 181** presente na biblioteca de elementos do software Ansys versão 10.0 [34]. Este elemento é adequado para a análise de estruturas compostas por cascas que apresentem espessuras finas e médias. O elemento **SHELL 181** é composto por quatro nós com seis graus de liberdade por nó: Translações nas direções X, Y e Z e rotações em relação aos eixos X, Y e Z. Trata-se de um elemento adequado para a modelagem de problemas estruturais que envolvam análise linear e análise não-linear física e geométrica. Na Figura 4.1, será mostrado o aspecto deste elemento que foi utilizado na elaboração dos modelos em elementos finitos do presente projeto de graduação.

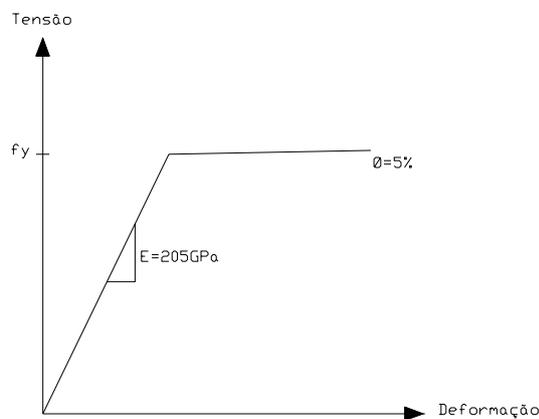
Os apoios e as condições de carregamento das vigas de aço experimentais foram simulados nos modelos numéricos pela restrição dos graus de liberdade apropriados. Uma análise de sensibilidade da malha de elementos finitos foi realizada nos modelos numéricos de forma que a densidade da malha representasse adequadamente os efeitos oriundos dos carregamentos e das condições de contorno do modelo. O número de elementos na malha foi aumentado sucessivamente até o ponto em que os resultados obtidos entre a última iteração e a anterior não fossem significativos. Adotou-se a malha que com o menor número

de elementos finitos possível, representasse adequadamente os efeitos observados nas vigas de aço experimentais. A preocupação com o número de elementos na malha é justificada pelo tempo de processamento computacional envolvido. Quanto maior o número de elementos, maior o esforço computacional empreendido.



**Figura 4.1 – Elemento SHELL 181 [34]**

O aço dos modelos numéricos foi modelado de forma a exibir um comportamento elasto-plástico bilinear com um encruamento de 5%. Adotou-se um módulo de elasticidade para o aço de 205 GPa. As tensões de escoamento e de ruína do aço dos modelos, bem como suas propriedades geométricas, foram retiradas diretamente dos valores medidos nas amostras dos testes [23] para as vigas com apenas um furo na alma.

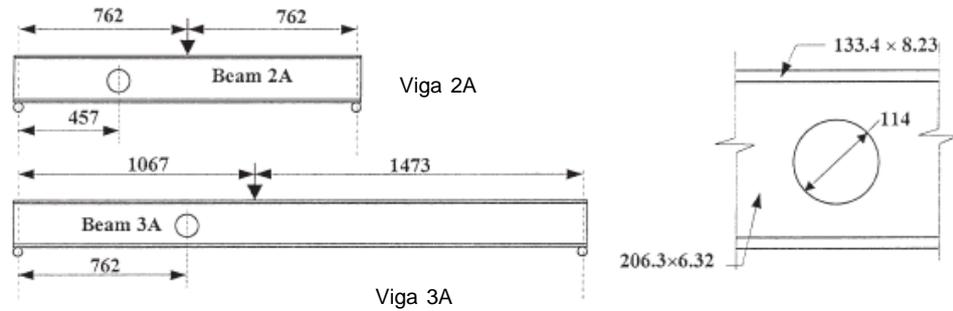


**Figura 4.2 – Curva tensão x deformação para todos os modelos**

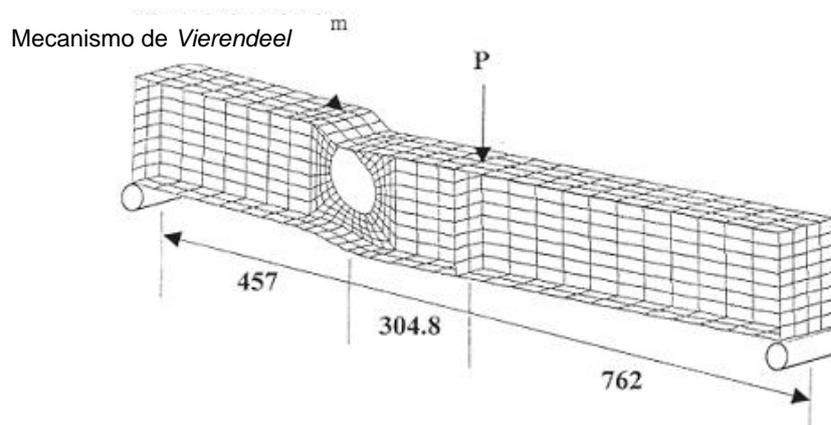
Durante a investigação numérica, foi necessário assegurar que a ruína do modelo não ocorresse por flambagem lateral à torção. Por isso, foram impostas restrições de deslocamento lateral em vários pontos na parte superior da viga (parte submetida à compressão), a fim de se eliminar esta flambagem. Também não era desejável que o modelo ruísse por flambagem local. Para evitar tal tipo de falha, enrijecedores transversais foram incorporados aos modelos no ponto de aplicação da carga concentrada e nos apoios.

- **Vigas com um furo na alma (Chung *et al* [3])**

A seguir, serão exibidos na Figura 4.3 e Figura 4.4, respectivamente, os modelos encontrados no trabalho de Chung *et al* [3].



**Figura 4.3 – Geometria da viga modelada [3]**



**Figura 4.4 – Modelo em elementos finitos desenvolvido por Chung *et al* para a viga 2A [3]**

Nos quadros que se seguem (Tabela 4.1, Tabela 4.2 e Tabela 4.3) são apresentadas características físicas e geométricas das vigas de aço experimentais modeladas por Chung *et al* [3], retiradas diretamente das amostras dos ensaios realizados por Redwood e McCutcheon [23].

**Tabela 4.1 – Resistências dos aços das amostras [23]**

		Viga 2A	Viga 3A
Mesas	Tensão de escoamento (MPa)	352	311
	Tensão de ruína (MPa)	503	476
Alma	Tensão de escoamento (MPa)	376	361
	Tensão de ruína (MPa)	512	492

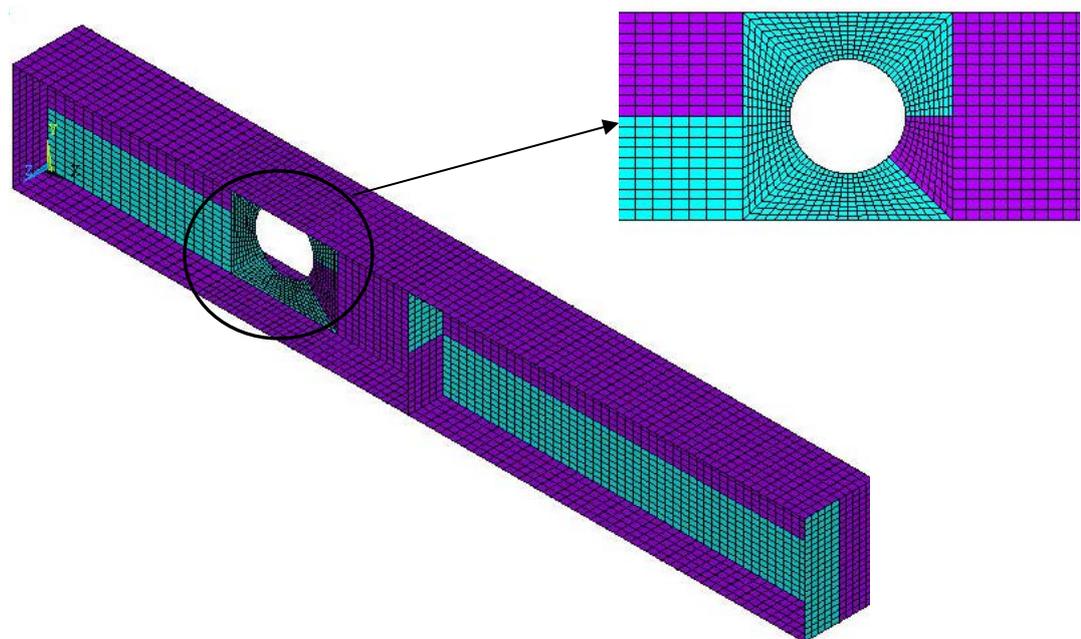
**Tabela 4.2 – Propriedades geométricas das amostras [23]**

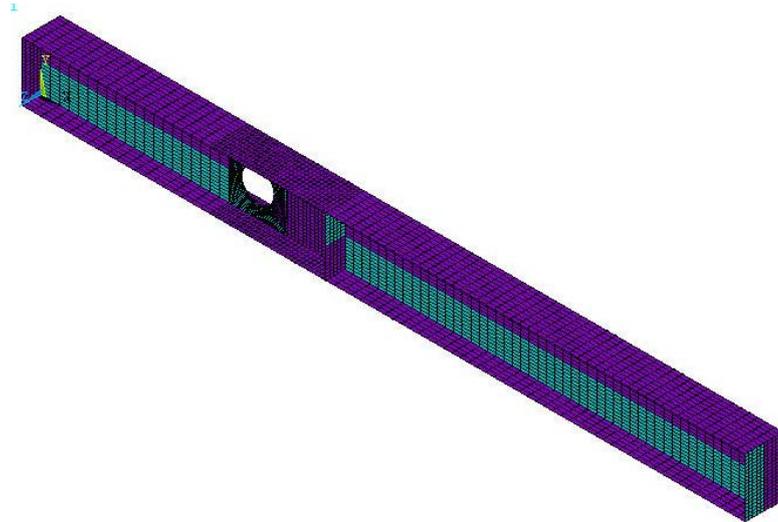
	Vão (mm)	Largura da mesa (mm)	Espessura da mesa (mm)	Altura da alma (mm)	Espessura da alma (mm)	Diâmetro do furo (mm)
Viga 2A	1524	133.4	8.23	206.3	6.32	114
Viga 3A	2540	133.4	8.23	206.3	6.32	114

**Tabela 4.3 – Propriedades geométricas das amostras [23]**

	Centro do furo na horizontal (mm)	Centro do furo na vertical (mm)	Ponto de aplicação da carga concentrada (mm)
Viga 2A	457	111.38	762
Viga 3A	762	111.38	1067

Os modelos numéricos apresentados nesta seção foram elaborados com as mesmas características básicas dos modelos desenvolvidos por Chung *et al* [3]. Através da comparação direta dos resultados obtidos por Chung *et al* [3], com os resultados obtidos pelos modelos apresentados nesta dissertação, pôde-se verificar a acuidade e a relevância dos modelos apresentados, para posteriormente serem utilizados numa análise paramétrica de vigas de aço com furos na alma. A seguir, serão exibidos os modelos propostos (figuras 4.5 a 4.8) para comparação com os modelos de Chung *et al* [3] (Figura 4.5e Figura 4.6).

**Figura 4.5 – Modelo em elementos finitos proposto para a viga 2A**



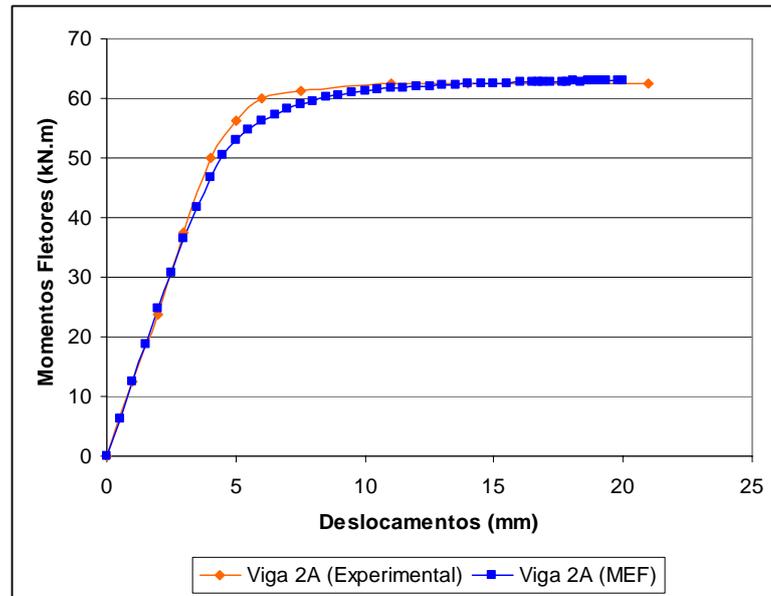
**Figura 4.6 – Modelo em elementos finitos proposto para a viga 3A**

Pode-se observar que os modelos apresentados são bastante semelhantes aos modelos propostos por Chung *et al* [3]. A malha de elementos finitos na região ao redor das aberturas foi refinada para que os modelos pudessem representar de forma fidedigna os efeitos de concentração de tensão, escoamento da alma e das mesas, bem como a formação de rótulas plásticas, caracterizando assim, o mecanismo de *Vierendeel*.

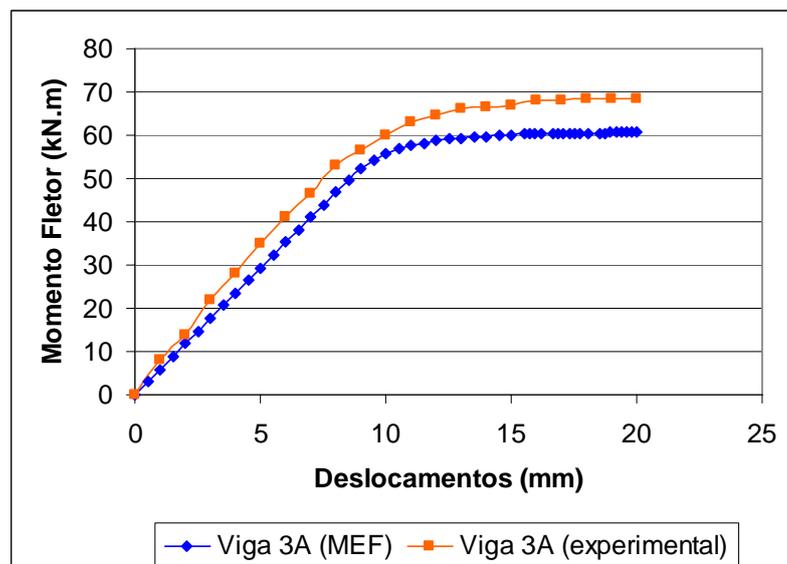
O apoio no lado esquerdo das vigas foi modelado de forma a representar um apoio do segundo gênero, enquanto o apoio no lado direito das vigas foi modelado para ser um apoio do primeiro gênero. Podem ser observados ainda, travamentos laterais na parte superior da viga (parte submetida à compressão) com o objetivo de prevenir a flambagem lateral à torção dos perfis. O ponto de aplicação da carga concentrada, bem como os enrijecedores transversais, podem ser vistos claramente nos modelos apresentados nas Figura 4.5 e Figura 4.6.

Pode-se observar que os modelos de escoamento encontrados por Chung *et al* [3] para a viga 2A e os modelos de escoamento do presente trabalho apresentam bastante semelhança entre si, indicando que ambos foram calibrados de forma adequada e em consonância com os experimentos de Redwood e McCutcheon [23]

Para confirmar a validade dos modelos propostos no presente trabalho, apresentam-se gráficos comparativos entre os resultados obtidos em vigas experimentais por Redwood e McCutcheon [23], para o momento fletor atuante no centro da abertura e a deflexão no meio do vão, e os modelos numéricos apresentados para as vigas 2A e 3A (Figura 4.7 e Figura 4.8), respectivamente.



**Figura 4.7 – Comparação entre o MEF e os ensaios de laboratório para a viga 2A**



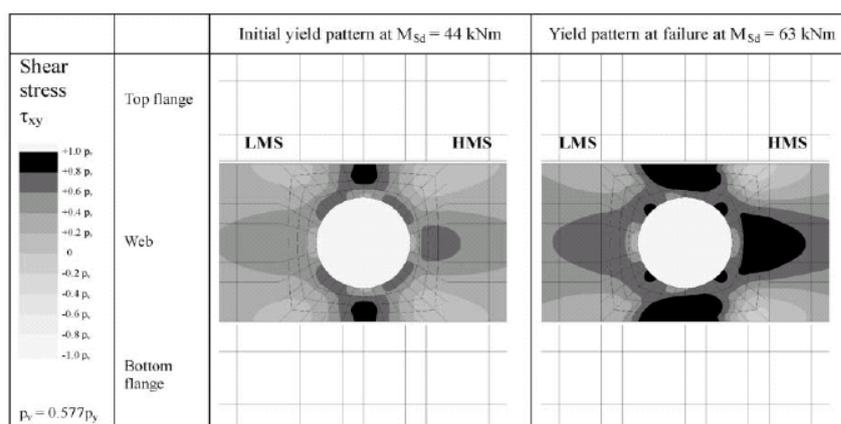
**Figura 4.8 – Comparação entre o MEF e os ensaios de laboratório para a viga 3A**

Pode ser observado dos gráficos acima (Figura 4.7 e Figura 4.8) que o modelo numérico da viga 2A concorda com razoável precisão com o resultado obtido para a viga experimental, sobretudo na fase elástica. Na região do “cotovelo” da curva, há uma ligeira diferença entre o modelo numérico e o resultado obtido no ensaio. Tal diferença provavelmente pode ser atribuída ao encruamento de 5% que foi utilizado na elaboração dos modelos numéricos, além de tensões residuais que não foram incorporadas aos modelos e que na prática existem devido aos processos de soldagem. Somam-se a isso as imperfeições geométricas existentes nas vigas de aço. Para a viga 3A, o resultado numérico

apresentou-se um pouco abaixo do experimental, fornecendo assim, valores a favor da segurança.

Conforme observado por Chung *et al* [3], é interessante examinar a distribuição de tensões na seção perfurada no início do escoamento e na ruína para a viga 2A. O início do escoamento ocorre na alma dos “T’s” nas seções com  $\varphi=30^\circ$  e  $\varphi=-45^\circ$ . Ao mesmo tempo, o escoamento por cisalhamento na alma dos “T’s” nas seções com  $\varphi=0^\circ$  é também aparente. Contudo, tal escoamento não materializa um mecanismo de colapso, e a viga continua a suportar carregamento adicional até que a flexão de *Vierendeel* seja suficientemente grande para causar extenso escoamento nos “T’s”.

Na ruína, a alma e as mesas dos “T’s” no lado de maior momento (HMS) apresentam uma distribuição plástica considerável. Adicionalmente, há também uma extensa plastificação por cisalhamento na alma dos “T’s” com profundidade mínima da alma ( $\varphi=0^\circ$ ). Contudo, no lado de menor momento (LMS), somente as almas dos “T’s” apresentam-se plastificadas, enquanto o nível de tensão das mesas chega somente a cerca de 60% da resistência de escoamento. Como resultado, a viga 2A falha com a formação de duas rótulas plásticas no lado de maior momento (HMS), mas com somente duas rótulas plásticas parciais no lado de menor momento (LMS). Provavelmente, isto se deve ao fato de que na ruína, um extensa plastificação ocorre nos “T’s” com profundidade mínima de alma, o que reduz a capacidade de redistribuição de esforços ao longo da abertura da alma. Estas observações concordam bem com as verificações de um estudo analítico descrito por Ko e Chung [24], sobre os métodos de dimensionamento existentes, em que nem todas as quatro rótulas plásticas são totalmente desenvolvidas na ruína



**Figura 4.9 – Distribuição de tensões cisalhantes na seção perfurada da viga 2A (Chung et al)**

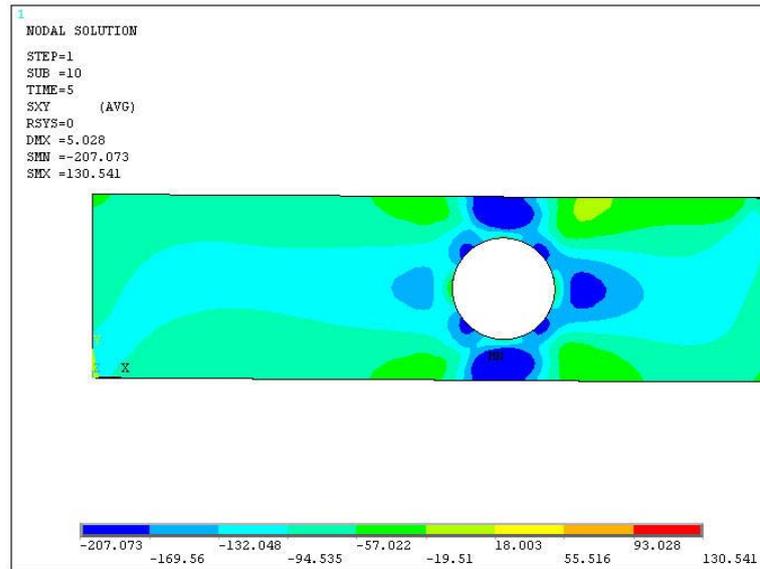


Figura 4.10 – Tensões cisalhantes (MPa) no início do escoamento ( $M_{sd}=50,5\text{kN.m}$ ) para a viga 2A

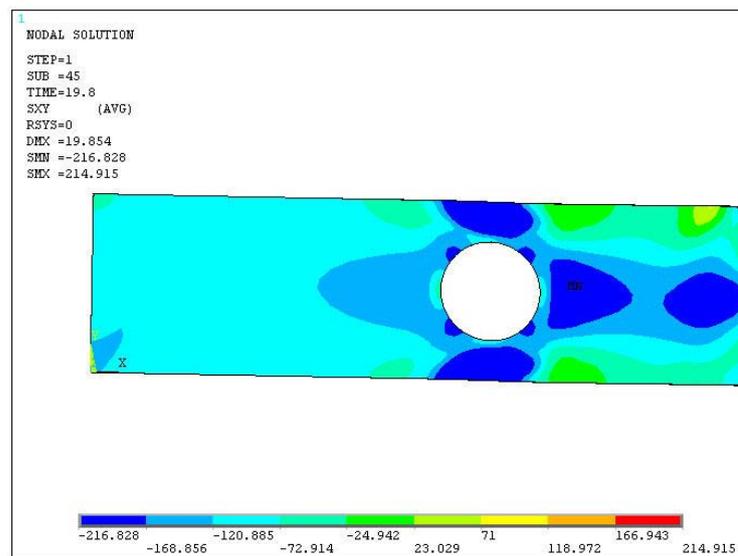


Figura 4.11 – Tensões cisalhantes (MPa) na ruína ( $M_{sd}=62,9\text{kN.m}$ ) para a viga 2A

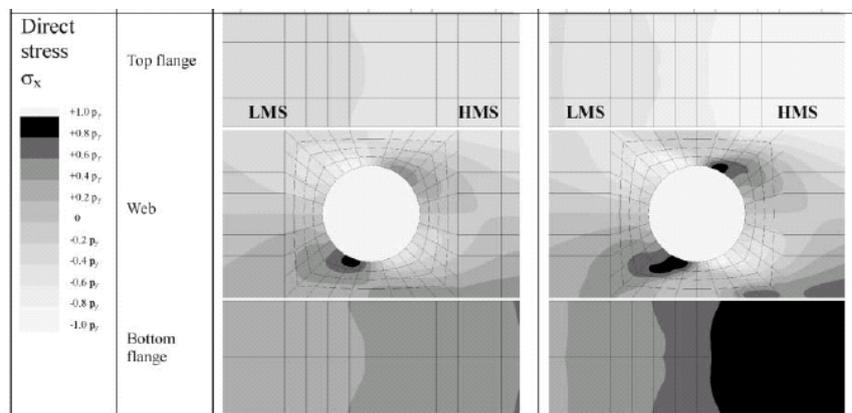


Figura 4.12 – Distribuição de tensões normais na seção perfurada da viga 2A (Chung *et al*)

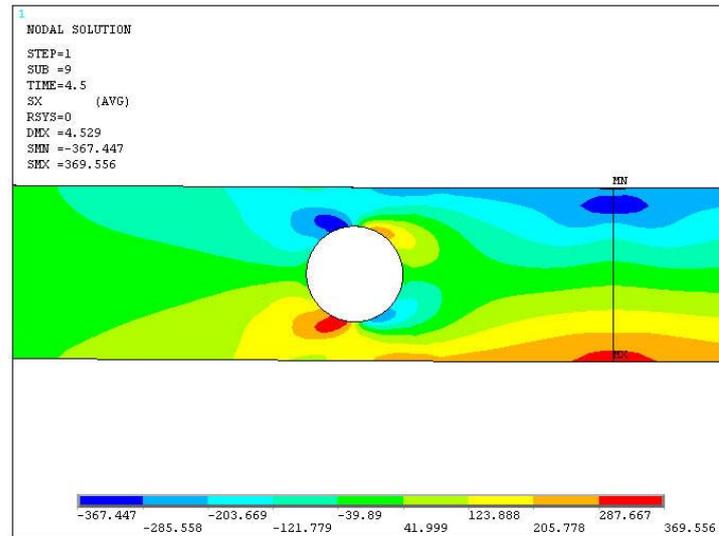


Figura 4.13 – Tensões normais – no eixo X (MPa) no início do escoamento ( $M_{sd}=50,5kN.m$ ) para a viga 2A

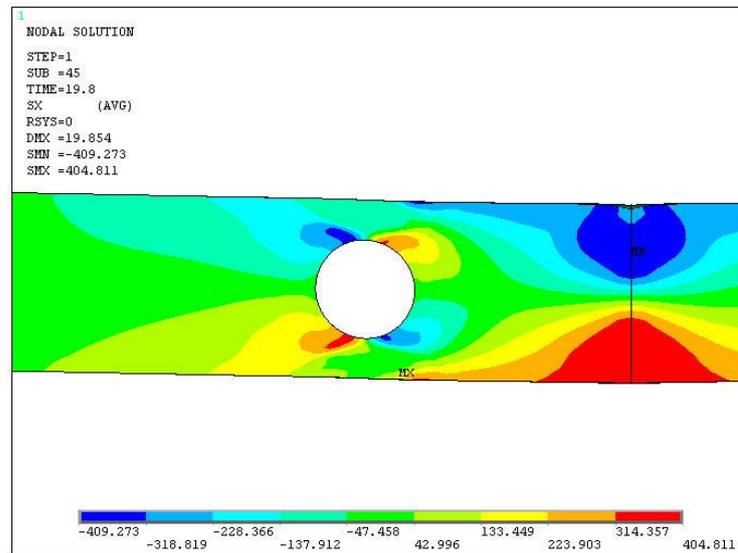


Figura 4.14 – Tensões Normais – no eixo X (MPa) na ruína ( $M_{sd}=62,9kN.m$ ) para a viga 2A

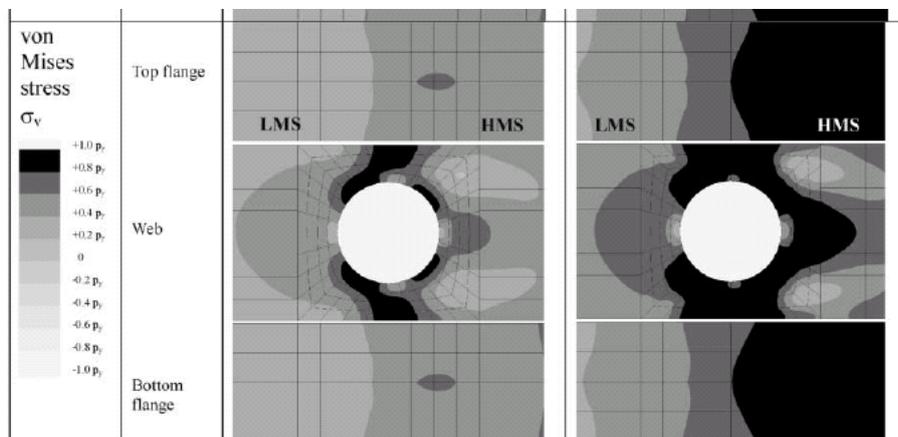


Figura 4.15 – Tensões de Von Mises na seção perfurada da viga 2A (Chung et al)

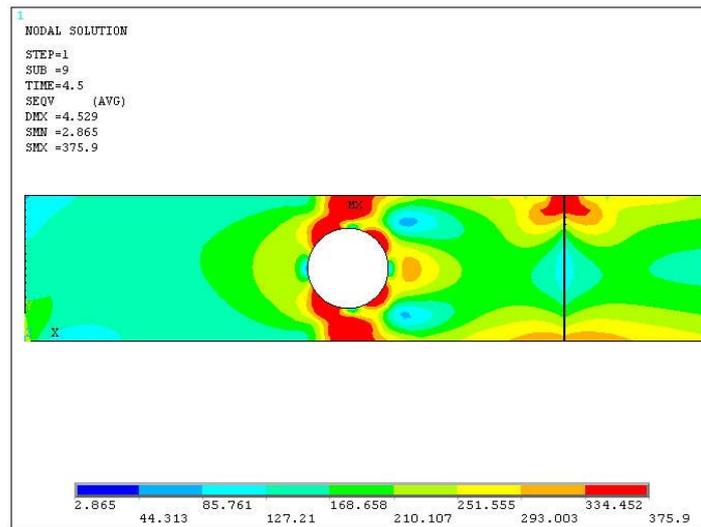


Figura 4.16 – Tensões de Von Mises (MPa) no início do escoamento ( $M_{Sd}=50,5\text{kN.m}$ ) para a viga 2A

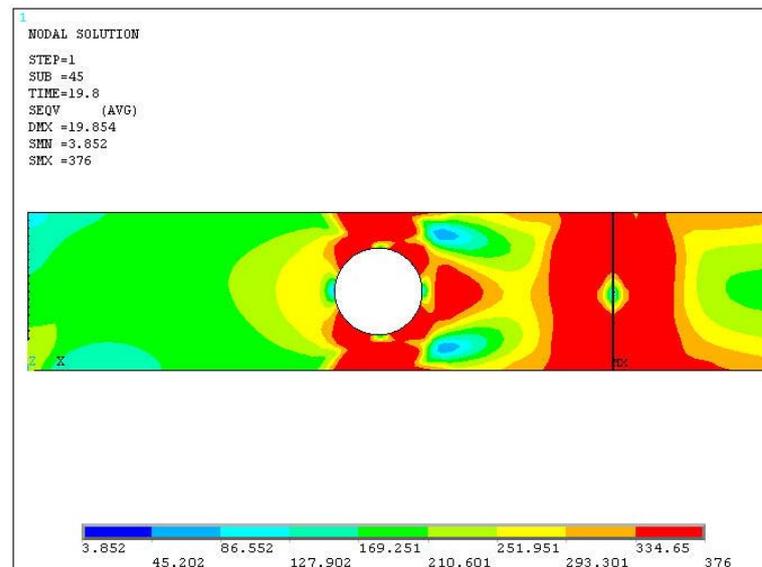


Figura 4.17 – Tensão de Von Mises (MPa) na ruína ( $M_{Sd}=62,9\text{ kN.m}$ ) para a viga 2<sup>a</sup>

No quadro a seguir, é exibido um resumo comparativo entre os experimentos e os modelos numéricos para as vigas 2A e 3A.

Tabela 4.4 – Quadro comparativo entre os experimentos e os modelos numéricos

	Momento resistente da viga sem furo (kN.m)		Momento (exp) Momento(MEF)	Momento de ruína no centro do furo (kN.m)		Momento (MEF) Momento(exp)
	Experimental	MEF		Experimental	MEF	
Viga 2A	99,0	110,9	0,89	63,7	62,9	0,98
Viga 3A	88,7	103,7	0,86	69,0	61,2	0,88

A comparação dos resultados da modelagem numérica com os resultados experimentais disponíveis para modelos de escoamento, magnitude da carga última e relação momento-deslocamento, mostra boa concordância entre os modelos em elementos finitos e os resultados experimentais, validando, portanto, a precisão dos modelos numéricos propostos.

## 5. Análise Paramétrica

### 5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados de uma análise paramétrica utilizando o método dos elementos finitos para a avaliação do comportamento estrutural de vigas de aço com abertura na alma. Será objeto desta análise, a variação do diâmetro do furo e a influência desta variação no mecanismo de ruptura da estrutura.

### 5.2. Vigas com Abertura Circular na Alma

A avaliação do comportamento estrutural de vigas de aço com abertura circular na alma, foi realizada a partir de uma série de análises em elementos finitos. As características físicas e geométricas dos perfis modelados e apresentados nesta seção são iguais aos descritos no capítulo 4 para as vigas 2A e 3A.

A análise realizada tem como objetivo verificar o Estado Limite Último da estrutura de acordo com a variação do diâmetro da abertura na alma. O vão e a posição de aplicação da carga serão considerados fixos para todos os modelos desenvolvidos.

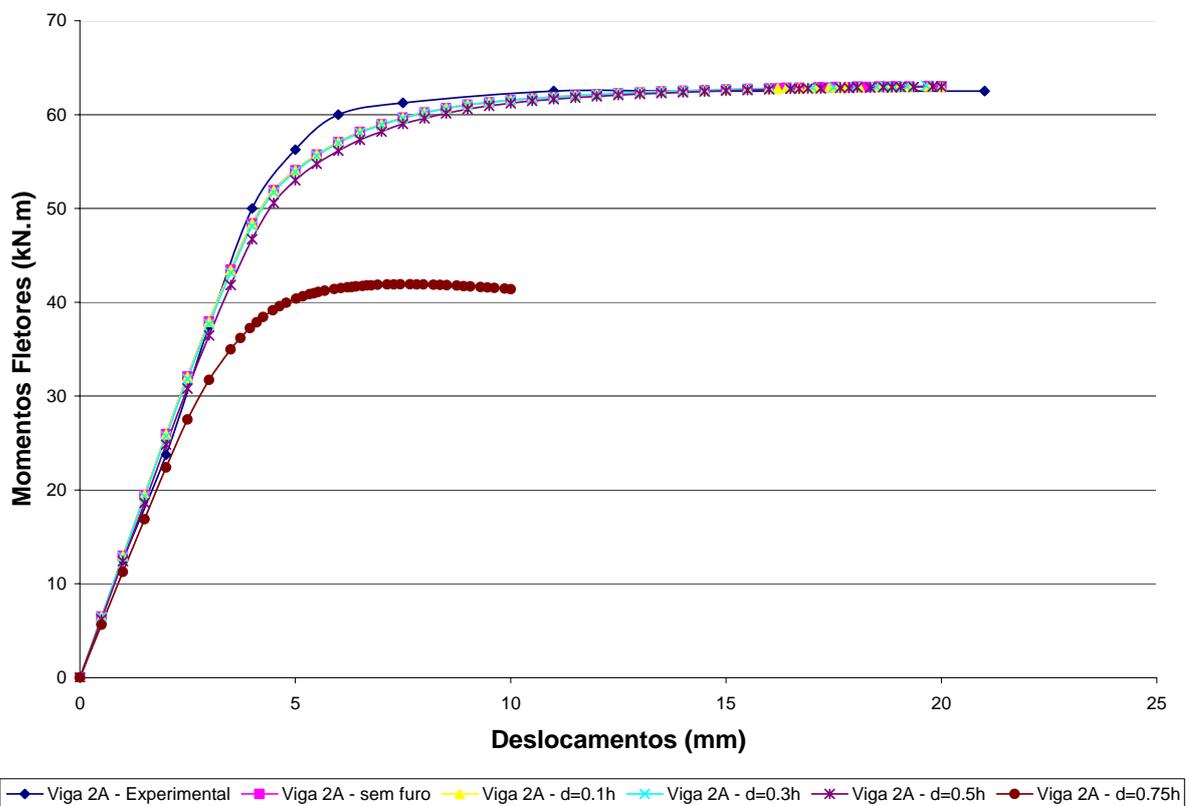
**Tabela 5.1 –Características dos modelos desenvolvidos para a viga 2A**

Modelo	Ø Furo	Posição do furo (mm)	Posição da carga	Vão (mm)
1	0,10H	457	0,5L	1524
2	0,30H	457	0,5L	1524
3	0,50H	457	0,5L	1524
4	0,70H	457	0,5L	1524
5	0,75H	457	0,5L	1524

**Tabela 5.2 –Características dos modelos desenvolvidos para a viga 3A**

Modelo	Ø Furo	Posição do furo (mm)	Posição da carga	Vão (mm)
1	0,10H	762	0,5L	2540
2	0,30H	762	0,5L	2540
3	0,50H	762	0,5L	2540
4	0,70H	762	0,5L	2540
5	0,75H	762	0,5L	2540
6	0,85H	762	0,5L	2540

O gráfico a seguir mostra a relação entre o momento fletor e os deslocamentos desenvolvidos na viga 2A para os diversos diâmetros mostrados na Tabela 5.1. A análise do gráfico mostra que para  $0,1h < \phi < 0,5h$  o momento de plastificação das peças sofre ligeira alteração, no entanto os momentos de ruína das peças continuam associados à plastificação do elemento por flexão no ponto de aplicação da carga. No entanto, no caso do modelo em que foi utilizado um diâmetro de furo igual a  $0,75h$ , nota-se que a ruína da viga se dá de forma brusca para um momento fletor bastante inferior aos indicados para os demais modelos. Neste caso, o estado limite associado a peça não será mais governado pela flexão da viga, mas sim pela formação de rótulas plásticas nas regiões próximas ao furo de acordo com o mecanismo de *Vierendeel*.



**Figura 5.1 – Curva Momento Fletor x Deslocamentos para a viga 2A**

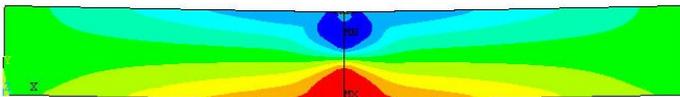
As figuras subseqüentes têm por objetivo mostrar de forma clara as diferenças existentes no mecanismo de plastificação das vigas com furo na alma, de acordo com a variação de seu diâmetro.

A primeira figura mostra o mecanismo que leva a ruína da viga 2A íntegra onde é possível observar que a ruptura está associada a plastificação da seção por flexão no ponto de aplicação da carga. Nota-se em seguida que o comportamento da ruptura se altera a medida em que o diâmetro do furo aumenta. Para um furo com diâmetro igual 75% da altura

da viga, há a formação de quatro rótulas plásticas próximas ao furo. E o colapso da estrutura passa então a estar associado a esta situação.

A Figura 5.4 têm por objetivo mostrar de forma clara as diferenças existentes no mecanismo de plastificação das vigas com furo na alma, de acordo com a variação de seu diâmetro.

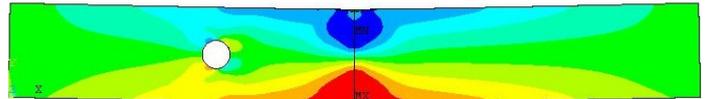
```
STEP=1
SUB =47
TIME=20
SX (AVG)
RSYS=0
DMX =20.083
SMN =-408.377
SMX =399.437
```



-408.377 -318.62 -228.863 -139.105 -49.348 40.409 130.166 219.923 309.68 399.437

a) Viga sem Furo

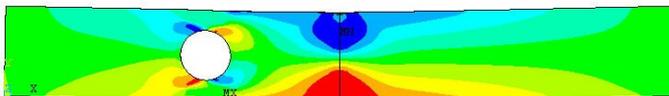
```
STEP=1
SUB =42
TIME=20
SX (AVG)
RSYS=0
DMX =20.082
SMN =-408.496
SMX =399.796
```



-408.496 -318.686 -228.876 -139.065 -49.255 40.555 130.365 220.175 309.986 399.796

b) Viga com furo -  $\phi = 0,3h$

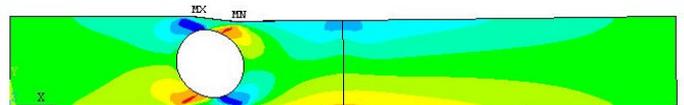
```
STEP=1
SUB =46
TIME=20
SX (AVG)
RSYS=0
DMX =20.054
SMN =-409.087
SMX =403.871
```



-409.087 -318.759 -228.43 -138.101 -47.773 42.556 132.885 223.213 313.542 403.871

c) Viga com furo  $\phi = 0,5h$

```
STEP=1
SUB =46
TIME=10
SX (AVG)
RSYS=0
DMX =11.833
SMN =-403.548
SMX =403.355
```

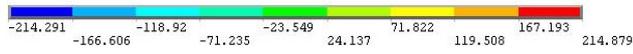
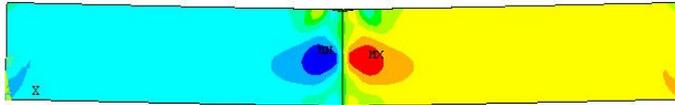


-403.548 -313.892 -224.236 -134.58 -44.924 44.731 134.387 224.043 313.699 403.355

d) Viga com furo  $\phi = 0,75h$

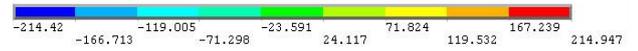
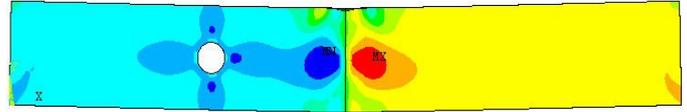
Figura 5.2 – Tensões Normais (MPa) na direção X – no momento da ruína para a viga 2A

STEP=1  
SUB =47  
TIME=20  
SXY (AVG)  
RSYS=0  
DMX =20.083  
SMN =-214.291  
SMX =214.879



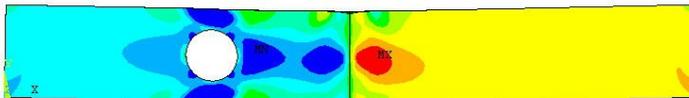
a) Viga sem Furo

STEP=1  
SUB =42  
TIME=20  
SXY (AVG)  
RSYS=0  
DMX =20.082  
SMN =-214.42  
SMX =214.947



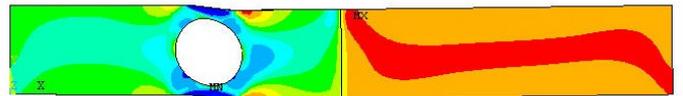
b) Viga com furo -  $\phi = 0,3h$

STEP=1  
SUB =46  
TIME=20  
SXY (AVG)  
RSYS=0  
DMX =20.054  
SMN =-216.755  
SMX =214.921



c) Viga com furo  $\phi = 0,5h$

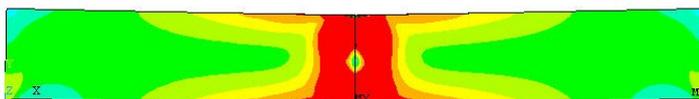
STEP=1  
SUB =46  
TIME=10  
SXY (AVG)  
RSYS=0  
DMX =11.833  
SMN =-215.332  
SMX =109.207



d) Viga com furo  $\phi = 0,75h$

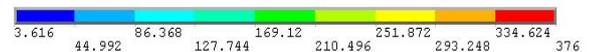
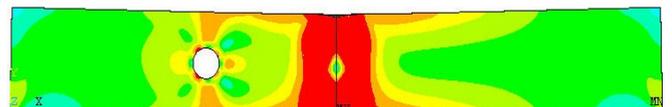
Figura 5.3 – Tensões Cisalhantes (MPa)– no momento da ruína para a viga 2<sup>a</sup>

STEP=1  
SUB =47  
TIME=20  
SEQV (AVG)  
DMX =20.083  
SMN =3.847  
SMX =376



a) Viga sem Furo

STEP=1  
SUB =42  
TIME=20  
SEQV (AVG)  
DMX =20.082  
SMN =3.616  
SMX =376

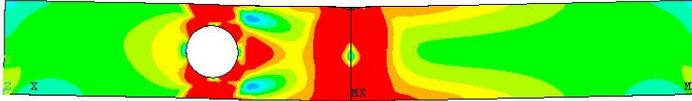


b) Viga com furo -  $\phi = 0,3h$

```

STEP=1
SUB =46
TIME=20
SEQV (AVG)
DMX =20.054
SMN =3.855
SMX =376

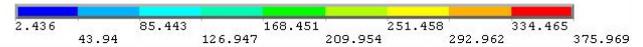
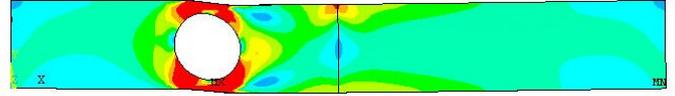
```

c) Viga com furo  $\phi = 0,5h$ 

```

STEP=1
SUB =46
TIME=10
SEQV (AVG)
DMX =11.833
SMN =2.436
SMX =375.969

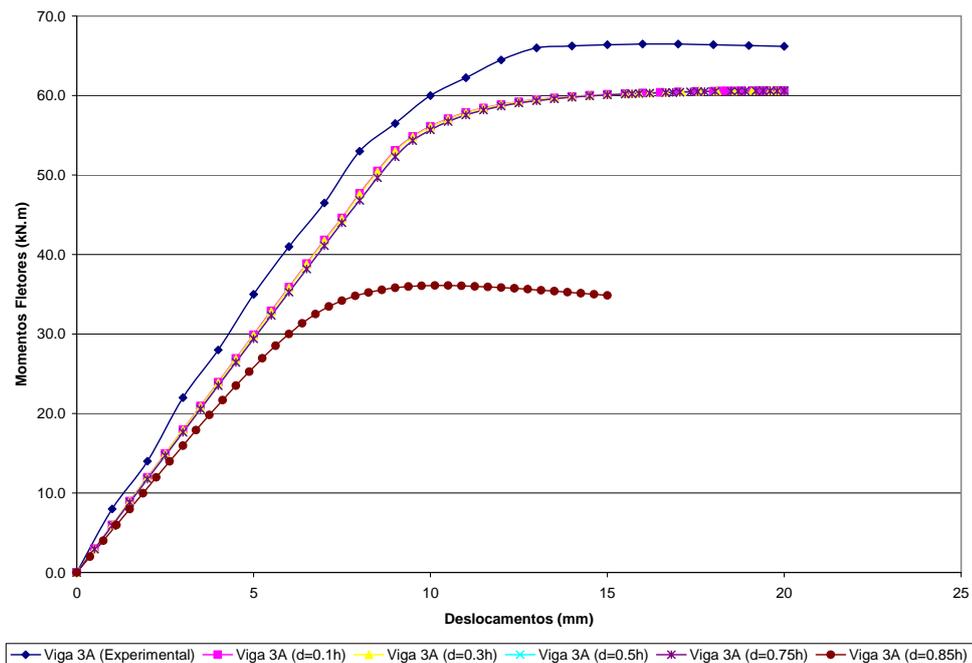
```

d) Viga com furo  $\phi = 0,75h$ 

**Figura 5.4 – Tensões de Von Mises (MPa)– no momento da ruína para a viga 2<sup>a</sup>**

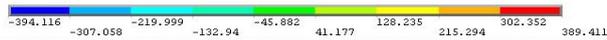
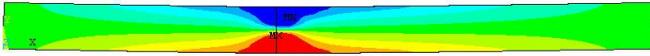
A Figura 5.4 (a) mostra o mecanismo que leva a ruína da viga 2A íntegra, é possível observar que a ruptura está associada a plastificação da seção por flexão no ponto de aplicação da carga. Nota-se em seguida que o comportamento da ruptura se altera a medida em que o diâmetro do furo aumenta. Para um furo com diâmetro igual 75% da altura da viga, há a formação de quatro rótulas plásticas próximas ao furo. E o colapso da estrutura passa então a estar associado a esta condição.

A seguir (Figura 5.5) será mostrado o gráfico que relaciona os momentos fletores e os deslocamentos atuantes na viga 3A.



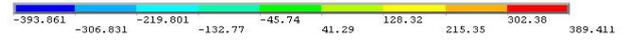
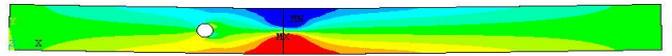
**Figura 5.5 – Curva Momento-Fletor x Deslocamento para a viga 3A**

1  
STEP=1  
SUB =44  
TIME=20  
SX (AVG)  
RSYS=0  
DMX =20.15  
SMN =-394.116  
SMX =389.411



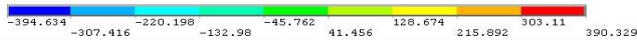
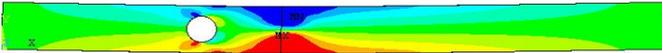
a) Viga sem Furo

1  
STEP=1  
SUB =42  
TIME=19.8  
SX (AVG)  
RSYS=0  
DMX =19.948  
SMN =-393.861  
SMX =389.411



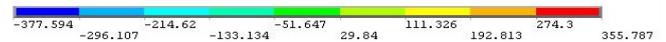
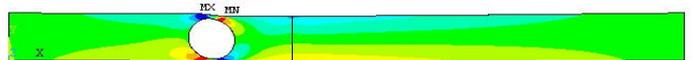
b) Viga com furo -  $\phi = 0,3h$

1  
STEP=1  
SUB =49  
TIME=20  
SX (AVG)  
RSYS=0  
DMX =20.142  
SMN =-394.634  
SMX =390.329



c) Viga com furo  $\phi = 0,5h$

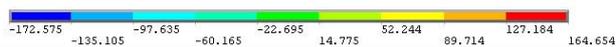
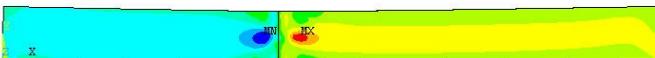
1  
STEP=1  
SUB =40  
TIME=15  
SX (AVG)  
RSYS=0  
DMX =16.206  
SMN =-377.594  
SMX =355.787



d) Viga com furo  $\phi = 0,85h$

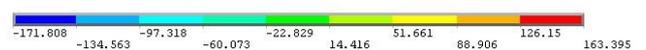
Figura 5.6 – Tensões Normais (MPa) na direção X – no momento da ruína para a viga 3A

3  
STEP=1  
SUB =44  
TIME=20  
SXY (AVG)  
RSYS=0  
DMX =20.15  
SMN =-172.575  
SMX =164.654

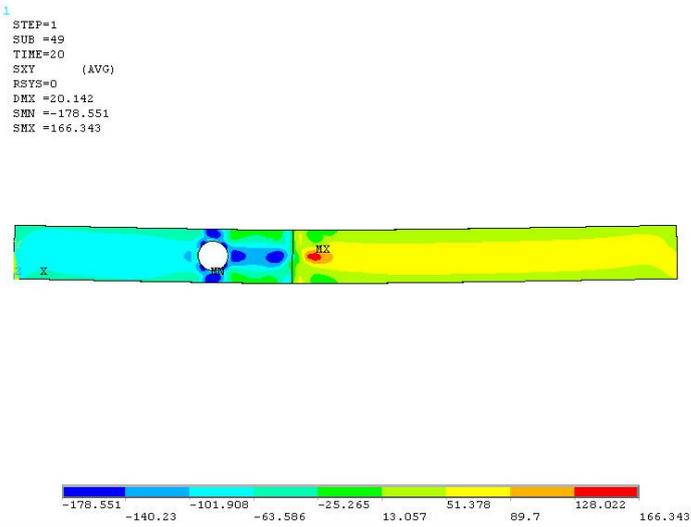


a) Viga sem Furo

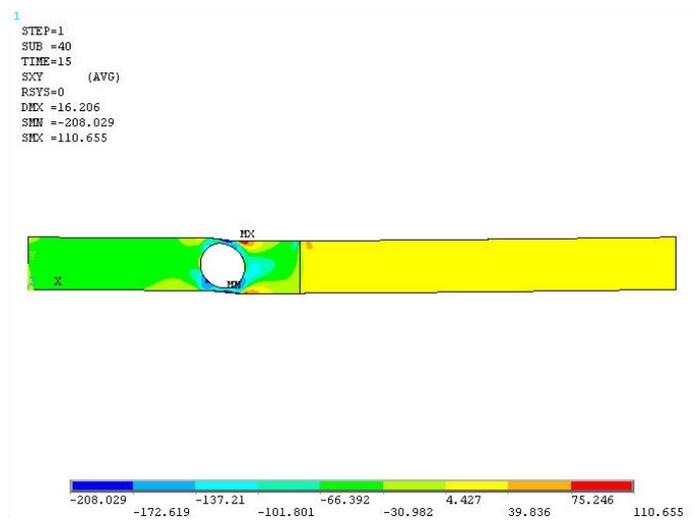
1  
STEP=1  
SUB =42  
TIME=19.8  
SXY (AVG)  
RSYS=0  
DMX =19.948  
SMN =-171.808  
SMX =163.395



b) Viga com furo -  $\phi = 0,3h$

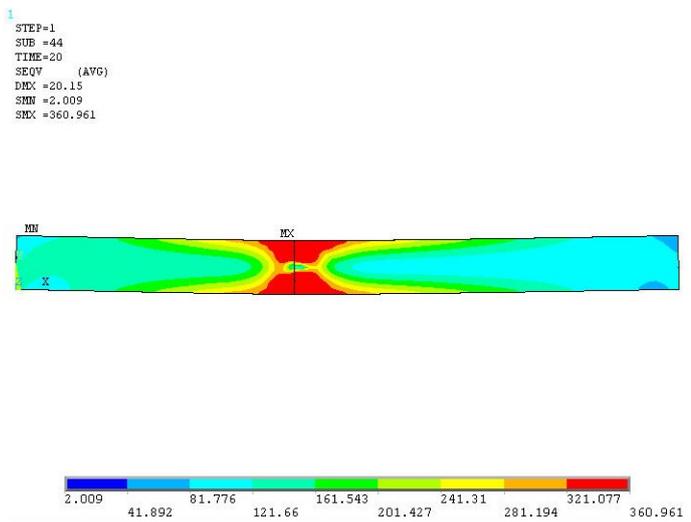


c) Viga com furo  $\phi = 0,5h$

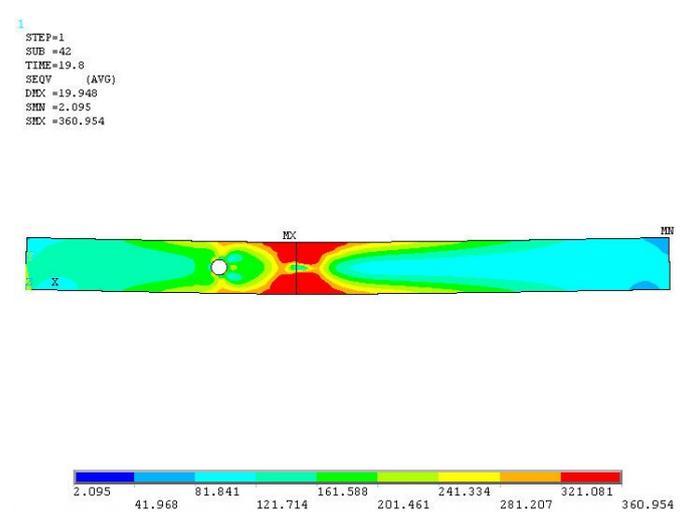


d) Viga com furo  $\phi = 0,85h$

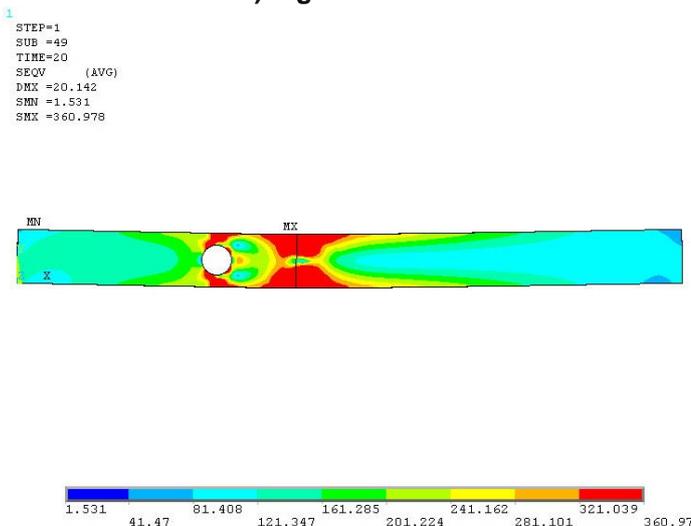
Figura 5.7 – Tensões Cisalhantes no plano xy (MPa) – no momento da ruína para a viga 3A



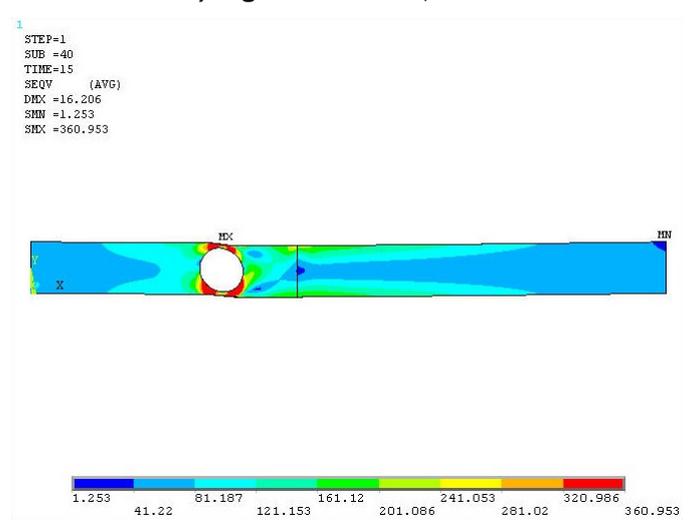
a) Viga sem Furo



b) Viga com furo -  $\phi = 0,3h$



c) Viga com furo  $\phi = 0,5h$



d) Viga com furo  $\phi = 0,85h$

Figura 5.8 – Tensões de Von Mises (MPa) – no momento da ruína para a viga 3A

No caso da viga 3A é possível notar que a formação de rótulas plásticas acontecerá para um diâmetro igual a 85% da altura atribuída a viga. Voltando ao resultado mostrado para a viga 2A , vê-se que o mecanismo de *Vierendeel* torna-se determinante para a ruína do elemento, quando o diâmetro do furo se iguala a 75% da altura da viga. Através da comparação destes resultados conclui-se que o aumento do vão diminui a importância do mecanismo de *Vierendeel*, cedendo lugar aos modos de ruína misto e por flexão

## 6. Considerações Finais

### 6.1. Introdução

O presente projeto apresentou alguns aspectos do comportamento estrutural de vigas de aço com abertura na alma. Foram mostradas algumas normas e procedimentos de dimensionamento para as vigas de aço, assim como tabelas práticas para uma escolha expedita da localização das aberturas na alma das vigas. Além disso, este trabalho demonstrou que o método numérico dos elementos finitos é bastante adequado para a modelagem e previsão da carga de ruína, mecanismos de ruína, distribuição de tensões, deformada e outros aspectos das vigas de aço com abertura na alma. Uma análise paramétrica foi realizada e alguns aspectos pertinentes às vigas de aço com aberturas na alma foram avaliados através do método numérico dos elementos finitos.

### 6.2. Conclusões

O método numérico dos elementos finitos demonstrou-se bastante útil e preciso na avaliação do comportamento estrutural de vigas de aço com abertura na alma. A utilização de tal método mostrou-se eficaz na previsão da distribuição de tensões, modelos de escoamento, deformada e carga de ruína, para as vigas constituídas por perfis laminados.

Foi verificado nesta pesquisa que as curvas de momento fletor (no centro do furo) versus o deslocamento vertical no ponto de aplicação da carga concentrada, podem indicar o tipo de mecanismo de ruína ocorrido nas vigas com abertura na alma. Observou-se que para as vigas com ruína brusca (sem a formação de um patamar de escoamento bem definido), estas atingiram o colapso através da formação de um mecanismo de *Vierendeel*. Contudo, para as vigas que apresentaram curvas de momento fletor (no centro do furo) versus o deslocamento vertical no ponto de aplicação da carga concentrada, com patamar de escoamento bem definido (sem ruína brusca), podem ocorrer dois modos de ruína: Ruína por flexão e ruína pela formação do mecanismo de *Vierendeel* (com quatro rótulas plásticas).

Este trabalho exibiu alguns possíveis modos de ruína para as vigas de aço com abertura na alma, tais como ruína por flexão, ruína pela formação do mecanismo de *Vierendeel* e ruína mista (flexão e mecanismo de *Vierendeel*).

Pode-se concluir ainda que o aumento do vão diminui a importância do mecanismo de *Vierendeel*, cedendo lugar aos modos de ruína misto e por flexão. Contudo, para as vigas

com furo de altura igual a 75% da altura do perfil de aço, independentemente da geometria e da localização do furo, o mecanismo de *Vierendeel* continua sendo o modo de ruína prevalente independentemente do vão da viga de aço.

Verificou-se que dependendo das dimensões do furo em relação a altura da viga de aço, não há penalização da carga de ruína, indicando que a presença do furo é irrelevante no que tange à resistência da viga.

## Referências Bibliográficas

- 1 RODRIGUES, F. Comportamento Estrutural de Vigas de Aço com Abertura na Alma.2007. 177f. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2007.
- 2 SHANMUGAM, N. E., LIAN, V. T., THEVENDRAN, V. **Finite element modelling of plate girders with web openings.** 2002. In: Thin-Walled Structures. Singapore: Elsevier, p. 443-464, 2002.
- 3 CHUNG, K. F., LIU, T. C. H, KO, A. C. H., **Investigation on *Vierendeel* mechanism in steel beams with circular web openings.** 2001. In: Journal of Constructional Steel Research. Hong Kong: Elsevier, p. 467-490, 2001.
- 4 SHANMUGAM, N. E. **Openings in Thin-Walled Steel Structures.** 1997. In: Thin-Walled Structures. Singapore: Elsevier, v.28, nº 3-4, p. 355-372, 1997.
- 5 CHUNG, K. F., LAWSON, R. M., **Simplified design of composite beams with large web openings to Eurocode 4.** 2001. In: Journal of Constructional Steel Research. Elsevier, p. 135-163, 2001.
- 6 LAWSON, R. M., **Design for openings in the webs of composite beams.** The Steel Construction Institute/CIRIA joint publication SCI-P068,1987.
- 7 DARWIN, D., **Design of steel and composite beams with web openings.** In: Steel design guide series 2. American Institute of Steel Construction, 1990.
- 8 LAWSON, R. M., CHUNG, K., F., PRICE, A., M.,**Tests on composite beams with large web openings to justify existing design methods.** Struct. Eng. 1992:70(1).
- 9 LIAN, V., T., SHANMUGAM, N. E., **Design of horizontally curved plate girder webs containing circular openings.** 2004. In: Thin-Walled Structures. Singapore: Elsevier, p. 719-739, 2004.

- 10 PORTER, D., M., ROCKEY, K. C., EVANS, H., R., **The collapse behaviour of plate girders loaded in shear.** J. Struct. Eng. ASCE 1975; 53 (8): 313-25.
- 11 NARAYANAN, R., DER AVANESSIAN, N. G., V., **Equilibrium solution for predicting the strength of webs with rectangular holes.** Proc Inst. Civ. Eng. 1983; 75 (2): 265-82.
- 12 NARAYANAN, R., DER AVANESSIAN, N. G., V., **A theoretical method for the prediction of ultimate capacity of webs with circular cutouts.** Report. Cardiff: University College; 1981.
- 13 NARAYANAN, R., DER AVANESSIAN, N. G., V., **Design of slender webs containing circular holes.** IABSE Periodica 1984; 1: 72-84.
- 14 NARAYANAN, R., ROCKEY, K. C., **Ultimate load capacity of plate girders with webs containing circular cut-outs.** Proc Inst. Civ. Eng. 1981; 71 (2): 845-62.
- 15 LAWSON, R. M., LIM, J., HICKS, S., J., SIMMS, W., I., **Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings.**In: Journal of Constructional Steel Research, 2005
- 16 NARAYANAN, R., DER AVANESSIAN, N. G., V., **Strength of web containing circular cutouts.** IABSE Periodica 1983; 3: 64-83.
- 17 LIAN, V., T., SHANMUGAM, N. E., **Openings in horizontally curved plate girder webs.** 2003. In: Thin-Walled Structures. Singapore: Elsevier, p. 245-269, 2003.
- 18 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 generalised moment-shear interaction curve.** 2003. In: Journal of Constructional Steel Research. Elsevier, p. 1177-1200, 2003.
- 19 REDWOOD, R. G., CHO, S. H., **Design of steel and composite beams with web openings.** In: Journal of Constructional Steel Research. Elsevier, p. 23-41, 1993.

- 20 OEHLERS, D. J., BRADFORD, M. A., **Composite steel and concrete structural members**. Fundamental behaviour. Pergamon, 1995.
- 21 LIU, T. C. H, CHUNG, K. F., **Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: finite element investigation**. 2003. In: Journal of Constructional Steel Research. Elsevier, p. 1159-1176, 2003.
- 22 ZIRAKIAN, T., SHOWKATI, H. **Distortional buckling of castellated beams**. 2006. In: Journal of Constructional Steel Research. Elsevier. 2006.
- 23 REDWOOD, R., G., MCCUTCHEON, J., O. **Beam tests with un-reinforced web openings**. J. Struct. Div. Proc. ASCE 1968; 94 (ST1): 1-17.
- 24 KO, A. C. H., CHUNG, K. F. **A comparative study on existing design rules for steel beams with circular web openings**. In: Yang Y. B., Leu L. L., Hsieh S. H., editors. Proceedings of the First International Conference on Structural Stability and Dynamics, Taipei, December 2000. p. 733-38.
- 25 REDWOOD, R., G., **The strength of steel beams with unreinforced web holes**. Civil Engng Public Works Rev, London 1969; 64(755):559-62.
- 26 CHAN, P., W., REDWOOD, R., G., **Stresses in beams with circular eccentric web holes**. J. Struct. Div, Proc ASCE 1974; 100(ST1):231-48.
- 27 OLANDER, H., C., **A method of calculating stress in rigid frame corners**. J. Struct. Div, Proc ASCE 1953; August.
- 28 ENV 1993-1-3, Eurocode 3: Design of steel structures: Part 1.1. Genetal rules and rules for buildings, 1992, and Amendment A2 of Eurocode 3: Annex N "Openings in webs". British Standards Institution, 1998.
- 29 CHUNG, K. F. **Structural performance of cold-formed sections with single and multiple web openings – experimental investigation**. The Struct Engr 1995; 73(9): 141-9.

- 30 ENV 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures, 1991.
- 31 <http://www.kuleuven.ac.be/bwk/materials/teaching/>.
- 32 PEACE, G. S. **Taguchi methods**. Addison-Wesley Publishing Company (1993).
- 33 <http://www.statease.com>
- 34 <http://www.ansys.com>

## Anexo A - APDL – Modelo Viga 2A

```

FINISH
/CLEAR,NOSTART
/FILNAME,VIGA2A_COMPFURO

/prep7
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
! ***VIGA COM ENRIJECEDOR INTERMEDIÁRIO ***
! *** PROPRIEDADES DO MATERIAL ***
MPTEMP,,,,,,,,

MP, EX, 1, 205000      !MÓDULO DE ELASTICIDADE DO MATERIAL
MP, PRXY, 1, 0.3      !COEFICIENTE DE POISSON DO MATERIAL
TB, BISO, 1, 1, 2,    !MATERIAL BILINEAR ISOTRÓPICO
TBTEMP, 0
TBDATA, , 352, 0.05  !TENSÃO DE ESCOAMENTO E INCLINAÇÃO DA RETA NO REGIME PLÁSTICO
MP, EX,2,205000      !MÓDULO DE ELASTICIDADE DO MATERIAL
MP,PRXY,2,0.3        !COEFICIENTE DE POISSON DO MATERIAL

TB, BISO, 2, 1, 2,    !MATERIAL BILINEAR ISOTRÓPICO
TBTEMP,0
TBDATA,, 376, 0.05   !TENSÃO DE ESCOAMENTO E INCLINAÇÃO DA RETA NO REGIME PLÁSTICO

! *** IDENTIFICAÇÃO DO TIPO DE ELEMENTO ***
ET,1,SHELL181

! *** DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA ***
L=1524      !VÃO DA VIGA
B=133.4     !LARGURA DO FLANGE
TF=8.23     !ESPESSURA DO FLANGE
H=206.3     !ALTURA DA ALMA
TW=6.32     !ESPESSURA DA ALMA
PNTC=L/2
DFURO=114   !DIÂMETRO DO FURO
RFURO=DFURO/2 !RAIO DO FURO
CFURO=457   !CENTRO DO FURO
N_DIVB=5    !NÚMERO DE DIVISÕES APLICADOS AS LINHAS
N_DIVC=10
N_DIVD=15
N_DIVE=20
N_DIVF=50

! *** CARREGAMENTO ***

DISP=20      !DESLOCAMENTO PRESCRITO
! *** DEFINIÇÃO DOS KEYPOINTS (VIGA) ***

```

K, 1, 0, 0, -B/2  
K, 2, CFURO-H/2, 0, -B/2  
K, 3, CFURO, 0, -B/2  
K, 4, CFURO+H/2, 0, -B/2  
K, 5, L/2, 0, -B/2  
K, 6, L, 0, -B/2  
K, 7, 0, 0, 0  
K, 8, CFURO-H/2, 0, 0  
K, 9, CFURO, 0, 0  
K, 10, CFURO+H/2, 0, 0  
K, 11, L/2, 0, 0  
K, 12, L, 0, 0  
K, 13, 0, 0, B/2  
K, 14, CFURO-H/2, 0, B/2  
K, 15, CFURO, 0, B/2  
K, 16, CFURO+H/2, 0, B/2  
K, 17, L/2, 0, B/2  
K, 18, L, 0, B/2  
K, 19, 0, H/2, -B/2  
K, 20, L/2, H/2, -B/2  
K, 21, L, H/2, -B/2  
K, 22, 0, H/2, 0  
K, 23, CFURO-H/2, H/2, 0  
K, 24, CFURO-DFURO/2, H/2, 0  
K, 25, CFURO, H/2, 0  
K, 26, CFURO+DFURO/2, H/2, 0  
K, 27, CFURO+H/2, H/2, 0  
K, 28, L/2, H/2, 0  
K, 29, L, H/2, 0  
K, 30, 0, H/2, B/2  
K, 31, L/2, H/2, B/2  
K, 32, L, H/2, B/2  
K, 33, 0, H, -B/2  
K, 34, CFURO-H/2, H, -B/2  
K, 35, CFURO, H, -B/2  
K, 36, CFURO+H/2, H, -B/2  
K, 37, L/2, H, -B/2  
K, 38, L, H, -B/2  
K, 39, 0, H, 0  
K, 40, CFURO-H/2, H, 0  
K, 41, CFURO, H, 0  
K, 42, CFURO+H/2, H, 0  
K, 43, L/2, H, 0  
K, 44, L, H, 0  
K, 45, 0, H, B/2  
K, 46, CFURO-H/2, H, B/2  
K, 47, CFURO, H, B/2  
K, 48, CFURO+H/2, H, B/2  
K, 49, L/2, H, B/2  
K, 50, L, H, B/2

K, 51,CFURO-RFURO\*0.70711,H/2+RFURO\*0.7011,0  
K, 52,CFURO,H/2+RFURO,0  
K, 53,CFURO+RFURO\*0.70711,H/2+RFURO\*0.7011,0  
K, 54,CFURO+RFURO\*0.70711,H/2-RFURO\*0.7011,0  
K, 55,CFURO,H/2-RFURO,0  
K, 56,CFURO-RFURO\*0.70711,H/2-RFURO\*0.7011,0

! \*\*\* DEFINIÇÃO DAS LINHAS (VIGA)\*\*\*

\*DO, i,1,5  
LSTR, i,i+1  
\*ENDDO

\*DO, i,7,11  
LSTR, i,i+1  
\*ENDDO

\*DO, i,13,17  
LSTR, i,i+1  
\*ENDDO

\*DO, i,22,28  
LSTR, i,i+1  
\*ENDDO

\*DO, i,33,37  
LSTR, i,i+1  
\*ENDDO

\*DO, i, 39,43  
LSTR, i,i+1  
\*ENDDO

\*DO, i, 45,49  
LSTR, i,i+1  
\*ENDDO

\*DO, i, 1,12  
LSTR, i,i+6  
\*ENDDO

\*DO, i, 33,44  
LSTR, i,i+6  
\*ENDDO

LSTR,33,19  
LSTR,19,1  
LSTR,37,20  
LSTR,20,5  
LSTR,38,21  
LSTR,21,6

LSTR, 39, 22  
LSTR, 22, 7  
LSTR, 43, 28  
LSTR, 28, 11  
LSTR, 44, 29  
LSTR, 29, 12  
LSTR, 45, 30  
LSTR, 30, 13  
LSTR, 49, 31  
LSTR, 31, 17  
LSTR, 50, 32  
LSTR, 32, 18  
LSTR, 40, 23  
LSTR, 23, 8  
LSTR, 41, 52  
LSTR, 55, 9  
LSTR, 42, 27  
LSTR, 27, 10  
LSTR, 40, 51  
LSTR, 42, 53  
LSTR, 10, 54  
LSTR, 8, 56  
LSTR, 19, 22  
LSTR, 22, 30  
LSTR, 20, 28  
LSTR, 28, 31  
LSTR, 21, 29  
LSTR, 29, 32

! \*\*\* DEFINIÇÃO DOS ARCOS (FURO)\*\*\*

LARC, 24, 51, 25, RFURO  
LARC, 51, 52, 25, RFURO  
LARC, 52, 53, 25, RFURO  
LARC, 53, 26, 25, RFURO  
LARC, 26, 54, 25, RFURO  
LARC, 54, 55, 25, RFURO  
LARC, 55, 56, 25, RFURO  
LARC, 56, 24, 25, RFURO

! \*\*\* DISCRETIZAÇÃO DAS LINHAS \*\*\*

\*DO, i, 38, 61  
LESIZE, i, , , N\_DIVB  
\*ENDDO  
  
\*DO, i, 90, 95  
LESIZE, i, , , N\_DIVB  
\*ENDDO

```
*DO, i, 80,89
LESIZE,i,,N_DIVC
*ENDDO
```

```
*DO, i, 96,103
LESIZE,i,,N_DIVC
*ENDDO
```

```
*DO, i, 62,79
LESIZE,i,,N_DIVC
*ENDDO
```

```
LESIZE,2,,N_DIVC
LESIZE,3,,N_DIVC
LESIZE,7,,N_DIVC
LESIZE,8,,N_DIVC
LESIZE,12,,N_DIVC
LESIZE,13,,N_DIVC
LESIZE,24,,N_DIVC
LESIZE,25,,N_DIVC
LESIZE,29,,N_DIVC
LESIZE,30,,N_DIVC
LESIZE,34,,N_DIVC
LESIZE,35,,N_DIVC
LESIZE,17,,N_DIVC
LESIZE,20,,N_DIVC
LESIZE,4,,N_DIVD
LESIZE,9,,N_DIVD
LESIZE,14,,N_DIVD
LESIZE,21,,N_DIVD
LESIZE,26,,N_DIVD
LESIZE,31,,N_DIVD
LESIZE,36,,N_DIVD
LESIZE,1,,N_DIVE
LESIZE,6,,N_DIVE
LESIZE,11,,N_DIVE
LESIZE,16,,N_DIVE
LESIZE,23,,N_DIVE
LESIZE,28,,N_DIVE
LESIZE,33,,N_DIVE
LESIZE,5,,N_DIVF
LESIZE,10,,N_DIVF
LESIZE,15,,N_DIVF
LESIZE,22,,N_DIVF
LESIZE,27,,N_DIVF
LESIZE,32,,N_DIVF
LESIZE,37,,N_DIVF
```

```
! *** DEFINIÇÃO DAS ÁREAS ***
```

AL,1,38,6,39  
AL,2,39,7,40  
AL,3,40,8,41  
AL,4,41,9,42  
AL,5,42,10,43  
AL,6,44,11,45  
AL,7,45,12,46  
AL,8,46,13,47  
AL,9,47,14,48  
AL,10,48,15,49  
AL,23,50,28,51  
AL,24,51,29,52  
AL,25,52,30,53  
AL,26,53,31,54  
AL,27,54,32,55  
AL,28,56,33,57  
AL,29,57,34,58  
AL,30,58,35,59  
AL,31,59,36,60  
AL,32,60,37,61  
AL,28,68,16,80  
AL,6,81,16,69  
AL,17,96,86,80  
AL,97,82,29,86  
AL,98,87,30,82  
AL,20,84,87,99  
AL,88,85,20,100  
AL,8,88,101,83  
AL,7,83,102,89  
AL,89,103,17,81  
AL,31,84,21,70  
AL,21,85,9,71  
AL,32,70,22,72  
AL,10,73,22,71  
AL,50,68,90,62  
AL,68,56,74,91  
AL,90,69,38,63  
AL,69,91,75,44  
AL,65,92,71,42  
AL,60,76,93,70  
AL,71,93,77,48  
AL,66,55,72,94  
AL,61,78,95,72  
AL,67,94,73,43  
AL,95,79,49,73  
AL,64,54,70,92

! \*\*\* DEFINIÇÃO DAS 'REAL CONSTANTS' \*\*\*

R, 1, TF, TF, TF, TF, , ,

R, 2, TW, TW, TW, TW, , ,

! \*\*\* ELEMENTOS \*\*\*

REAL,1

MAT ,1

\*DO,i,1,20

AMESH,i

\*ENDDO

REAL,2

MAT, 2

\*DO,i,21,46

AMESH,i

\*ENDDO

! \*\*\* POSIÇÃO DOS APOIOS DA VIGA \*\*\*

NSEL, S, LOC, X, 0 !SELECIONA OS NÓS EM UM NOVO CONJUNTO DE ACORDO COM A SUAS COORDENADAS

NSEL, R, LOC, Y, 0 !SELECIONA OS NÓS DENTRO DO CONJUNTO ANTERIOR DE ACORDO COM A NOVA COORDENADA

D,ALL,,,,,UX,UY !DEFINE O APOIO DE SEGUNDO GÊNERO PARA OS NÓS SELECIONADOS

NSEL, S, LOC, X, L !SELECIONA OS NÓS EM UM NOVO CONJUNTO DE ACORDO COM A SUAS COORDENADAS

NSEL, R, LOC, Y, 0 !SELECIONA OS NÓS DENTRO DO CONJUNTO ANTERIOR DE ACORDO COM A NOVA COORDENADA

D,ALL,,,,,UY !DEFINE O APOIO DE PRIMEIRO GÊNERO PARA OS NÓS SELECIONADOS

ALLSELL,ALL,ALL !TORNA TODOS OS NÓS ATIVOS NOVAMENTE

NSEL, S, LOC, X, 0

NSEL, R, LOC, Y, H

NSEL, R, LOC, Z, -B/2

D,ALL,,,,,UZ

NSEL, S, LOC, X, L

NSEL, R, LOC, Y, H

NSEL, R, LOC, Z, -B/2

D,ALL,,,,,UZ

ALLSELL,ALL,ALL !TORNA TODOS OS NÓS ATIVOS NOVAMENTE

! \*\*\* DEFINIÇÃO DO CARREGAMENTO ATUANTE \*\*\*

! CARREGAMENTO PRESCRITO APLICADO NO MEIO DO VÃO

```
NSEL,S,LOC,X,PNTC  
NSEL,R,LOC,Y,H  
NSEL,R,LOC,Z,0  
D,ALL,-DISP,,,,UY
```

```
ALLSELL,ALL,ALL !TORNA TODOS OS NÓS ATIVOS NOVAMENTE
```

```
! *** SOLUÇÃO ***
```

```
/SOL
```

```
ANTYPE,0  
NLGEOM,ON  
NSUBST,40,100,40  
OUTRES,ALL,ALL  
AUTOTS,ON  
TIME,DISP  
NEQIT,500
```

```
SAVE
```

```
SOLVE
```