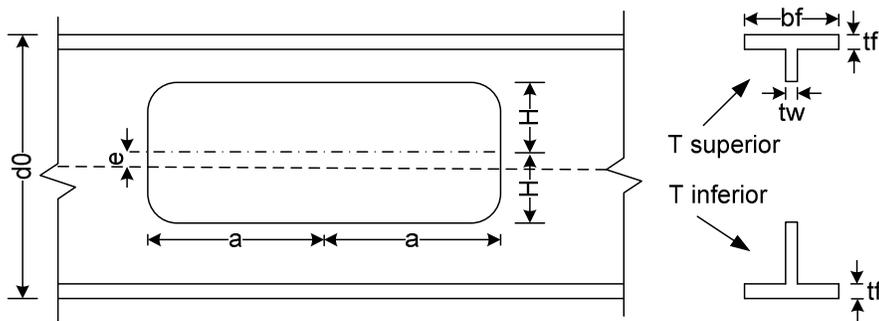


### 3 Análise dos Esforços

Neste capítulo serão descritas as abordagens de autores renomados no assunto, as hipóteses assumidas para cada maneira de analisar o problema e suas indicações de uso.

#### 3.1. Esforços no Entorno da Abertura

As tensões em uma viga de aço, sujeitas a carregamentos, são prontamente encontradas através dos diagramas de esforços, para qualquer ponto da viga sem abertura. Mas a perda de material na região devido à abertura leva a uma nova distribuição de esforços, e conseqüentemente uma redução da resistência neste local. Esta redistribuição é suportada pela nova geometria formada pelos “tês” acima e abaixo da abertura. Vários autores realizaram estudos em vigas de aço com aberturas na alma, como Redwood [15], Cung *et al* [5], Rodrigues [21], etc.



**Figura 3.1 - Ilustração dos “tês” e das variáveis utilizadas por Redwood [15]**

Redwood [15] contribuiu revisando estudos de vários autores, comentados na sequência, e realizando estudos de dimensionamento que serão demonstrados no item 3.4.

Neste mesmo trabalho Redwood cita que Bower, em 1966, considerou esforços através da totalidade da viga e não apenas nas extremidades da abertura, comparando os esforços resultantes com os requisitos de equilíbrio e estabeleceu tamanhos de aberturas em que sérios erros surgiriam. O autor sugeriu que para o

intervalo de taxas de momento-cortante apropriado para construção de edifícios, uma abertura de 50% da altura do perfil seria amena para a solução elástica. Bower constatou também, dois anos depois, que os esforços cortantes influem significativamente com o aumento desta proporção. Esta análise formou a base para a construção de diagramas de interação.

Através de análises em elementos finitos verificou-se que aberturas espaçadas em dois diâmetros absorvem esforços eliminando efeitos de interação entre aberturas em todas as taxas práticas de cortante-momento. Estes resultados foram obtidos com diâmetros de aberturas com 57% da altura do perfil da viga.

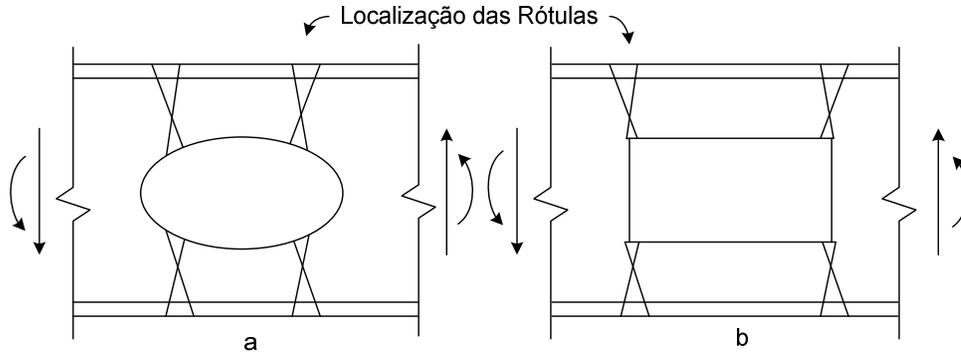
Assumindo pontos de deflexão dentro das seções da viga acima e abaixo da abertura, a deformação local dessas seções devido à força cortante que suportam pode ser encontrada usando as teorias de equilíbrio. Esses resultados podem ser somados às deformações causadas pelo momento global primário, calculado com a inércia original da seção sem abertura. Este processo tem sido chamado de aproximação de Vierendeel. Ignoram-se as concentrações de deformações nos cantos das aberturas.

Dimensionando somente com base no regime elástico, o máximo esforço deve ocorrer na mesa da viga e não na extremidade da abertura.

Redwood [15] cita o trabalho de Frost e Leffler, de 1971, onde uma possível situação de fadiga poderia ser combatida nos cantos das aberturas, utilizando-se raios de 16 mm ou com o dobro da espessura da alma, ao invés de cantos retos.

As flechas podem ser obtidas sobrepondo três partes, a primeira pela viga não perfurada, a segunda pela flexão das seções “tês” no comprimento da abertura e a terceira pelo cortante nos “tês” no comprimento da abertura, sem assumir rotações relativas. Em aberturas com até 60% da altura do perfil, aberturas circulares isoladas podem ser desprezadas. Flechas locais devem ser consideradas, pois podem variar significativamente com a presença das aberturas.

Uma primeira abordagem plástica nas perfurações foi feita em 1958 por Worley como cita Redwood [15], demonstrando a formação de quatro rótulas plásticas nos cantos das aberturas, como mostra a Figura 3.2.



**Figura 3.2 - Localização das rótulas plásticas Redwood [15]**

Entre 2000 e 2002 Chung e Ko, pela Universidade Politécnica de Hong Kong na China e Liu pela Universidade de Manchester na Inglaterra, através de dois trabalhos [5] e [6], analisaram e desenvolveram esforços e dimensionamentos para vigas de aço com aberturas na alma. Esta análise e suas conclusões são descritas na sequência.

Cada “T” possui uma resistência à flexão local, difícil de ser mensurada sob presença simultânea de forças axiais e de cisalhamento resultante do momento global.

Após uma revisão das recomendações de projeto, Chung *et al* [5] em 2003 mostram que existem duas abordagens na avaliação do comportamento estrutural de vigas de aço com aberturas na alma:

- Abordagem da seção “T”: a seção perfurada é considerada ser constituída por dois “tês” que são separados por uma distância que depende da altura do furo, e todas as ações globais são representadas como forças locais. A estabilidade estrutural das vigas de aço depende da capacidade de resistência dos “tês” submetidos a esforços axiais de cisalhamento e de flexão simultaneamente. 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: 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 freqüentemente utilizadas, portanto, os métodos de dimensionamento são geralmente considerados simples e adequados para os engenheiros em seu dimensionamento prático.

Contudo, consideram que os métodos de dimensionamento são de alguma forma restritivos, com aplicações limitadas e freqüentemente são muito conservadores.

Chung, Ko e Liu, [5] e [6], demonstram os esforços em uma seção perfurada submetida a momento global,  $M_{o,Sd}$ , e a uma força de cisalhamento global,  $V_{o,Sd}$ , na Figura 3.3 (parte a), e as três ações locais que são induzidas nos “tês” superior e inferior (parte b):

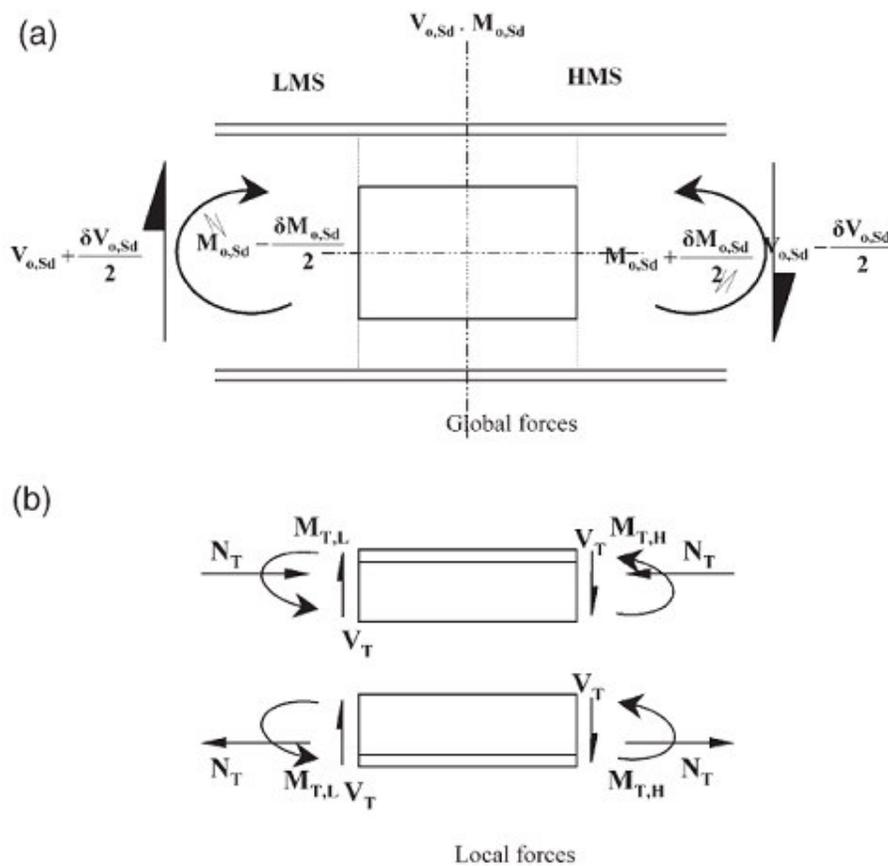
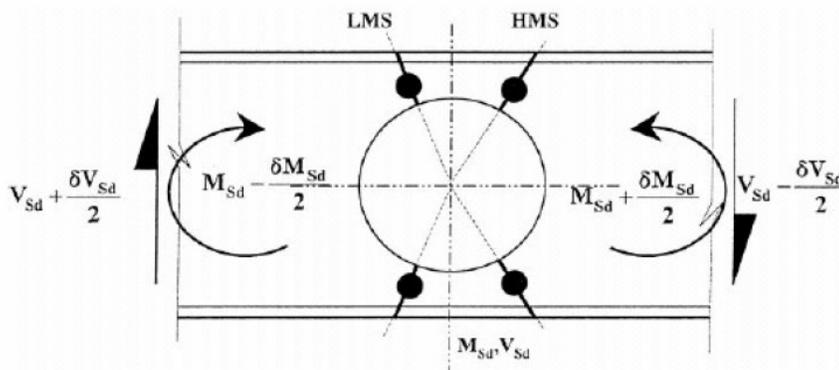


Figura 3.3 - Distribuição de forças na seção perfurada [5]

Sendo as forças locais as seguintes:

- Força axial no “T”,  $N_T$ , devido ao momento global  $M_{0,Sd}$  ;
- Força de cisalhamento no “T”,  $V_T$ , devido à força de cisalhamento global  $V_{0,Sd}$  ;
- Momento local no “T”,  $M_T$ , devido à transferência da força de cisalhamento  $V_{0,Sd}$ , ao longo do comprimento da abertura.

Chung *et al* [6] dizem que no método corrente do ano de 2001, o dimensionamento da capacidade de vigas com aberturas é limitada pela formação de rótulas plásticas no “T” superior do lado de menor momento do furo (LMS). Classificando o método como 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. A forma de interação linear utilizada neste método para avaliar a capacidade ao momento dos “tês” submetidos a esforços axiais e de cisalhamento simultâneos subestima a resistência. Os autores propuseram então a utilização de dimensionamento plástico para incorporar a formação das quatro rótulas plásticas nos “tês”, objetivando uma previsão aprimorada da capacidade de carga das vigas.



**Figura 3.4 - Mecanismo de Vierendeel no entorno de uma abertura circular, Chung *et al* [6]**

Um modelo em elementos finitos, que segundo Chung *et al* [6], consegue avaliar a resistência à flexão dos “tês” superior e inferior quando submetidos a

esforços axiais e de cisalhamento simultâneos, foi concebido. As não-linearidades geométricas e do material, para que a redistribuição de carga ao longo da abertura na alma foi representada. Assim um estudo paramétrico foi realizado detalhadamente em artigo publicado por Liu e Chung [14], onde podem ser observados esses 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.

Seguindo seus trabalhos sobre a investigação do mecanismo de Vierendeel em vigas de aço com furo circular na alma [6], Chung *et al* [5]. Nesse artigo, os autores propõem um método de dimensionamento empírico que versa sobre o dimensionamento de vigas de aço, com aberturas de diferentes tamanhos e formas fazendo uso de uma curva de flexão-cisalhamento generalizada, para a previsão das resistências aos esforços globais que atuam no centro do furo das vigas. Pois após comparações entre as curvas de interação flexão-cisalhamento de vigas de aço com furos de diferentes tamanhos e formas, encontraram similaridade entre as mesmas, sugerindo que 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.

Assim realizado, geraram várias curvas de dimensionamento, flexão-cisalhamento para diferentes formas e tamanhos de aberturas e quatro diferentes perfis. Algumas delas estão aqui apresentadas na Figura 3.5, por tratarem de formas similares às aqui estudadas, c-hexagonais e circulares.

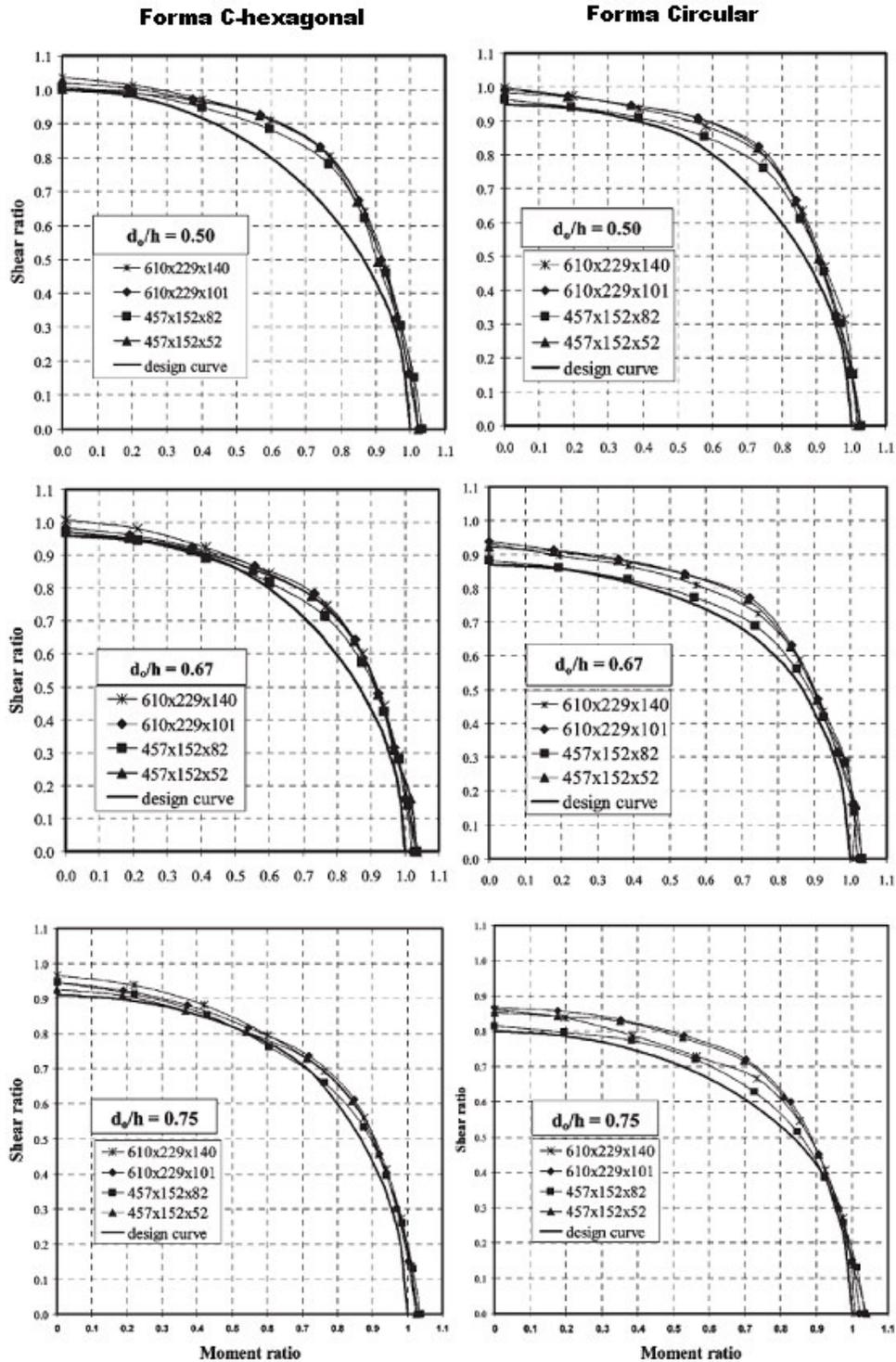
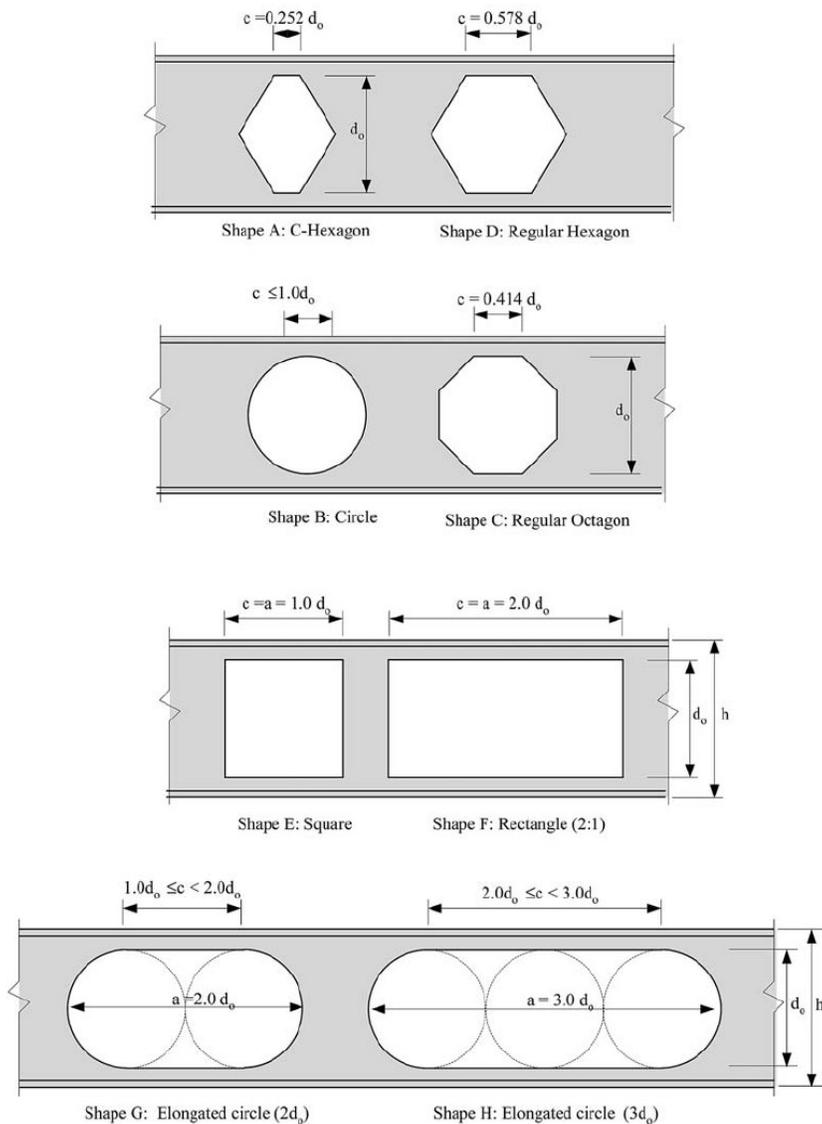


Figura 3.5 - Exemplo de curvas de interação flexão-cisalhamento obtidas por investigações em elementos finitos [5]

As outras formas e suas curvas de resistências pesquisadas pelos autores podem ser encontradas no Anexo A desta dissertação. E suas geometrias estão representadas na Figura 3.6.



**Figura 3.6 - Formas e variáveis das aberturas estudadas por Chung *et al* [5]**

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”, diferentes capacidades ao cisalhamento nas seções perfuradas sob momento global nulo, provavelmente

devido aos diferentes momentos locais de Vierendeel atuando nos “tês” 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,  $d_0$ , 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 “tês” superior e inferior.

Geralmente, um aumento na profundidade da abertura,  $d_0$ , 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  $d_0$ . 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 “tês” e, portanto, promove o mecanismo de Vierendeel nas seções perfuradas. Conseqüentemente, para furos na alma com os mesmos valores de  $d_0$ , mas com diferentes valores de  $c$ , a capacidade de carga das seções perfuradas é inversamente proporcional aos valores de  $c$ .

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 “tês”, promovendo escoamento local dos “tês” e, portanto, colapso das seções perfuradas, como mostrado na Figura 3.3. Para seções perfuradas submetidas a momentos globais significativos, a capacidade de resistência ao cisalhamento global será reduzida fortemente.

A apresentação das fórmulas de dimensionamento para vigas de aço com furo na alma, bem como o desenvolvimento de um “parâmetro Vierendeel” e a curva de interação flexão-cisalhamento generalizada proposta por Chung *et al* [5], estarão contemplados no item 3.4.

O trabalho de Liu e Chung [14] descreve, após uma extensiva investigação paramétrica em elementos finitos, alguns comportamentos notados:

- Quando a seção perfurada está sob força cortante pura, não existe força axial nas seções “tês” do momento global, então o padrão de escoamento é devido a forças cortantes locais e também pelo momento de Vierendeel. É interessante que as rótulas plásticas se formam perto dos cantos das aberturas com padrões assimétricos em relação ao centro da abertura, simétricos na diagonal. (Figura 3.4).
- Quando a seção perfurada está sob alto esforço cortante global e pequeno momento global, geram-se rótulas plásticas no lado de maior momento (HMS). Enquanto as mesas das seções “tês” no lado de menor momento (LMS) não escoam, o momento resistente destas seções é parcialmente mobilizado.
- E quando sob baixo cortante global adicionado a um alto momento global, rótulas plásticas em ambos os fins das seções “tês”, acima e abaixo da abertura da alma são mobilizadas sob presença de grande força axial local. Para aberturas c-hexagonais e circulares, ambos os lados (HMS e LMS) apresentaram zonas significantes de escoamento.

Teremos no item seguinte os modos de falhas que as vigas de aço com aberturas na alma podem apresentar.

### **3.2. Modos de Falhas**

Chung *et al* [6] consideram que a presença de aberturas na alma de vigas, introduzem três tipos de modos de falhas nas seções perfuradas, por flexão, cisalhamento e pelo mecanismo de Vierendeel. Mas ainda podem ocorrer falhas por flambagem na mesa e na alma cheia (regiões entre aberturas adjacentes).

Uma deflexão adicional devido à presença destas aberturas também deve ser considerada, Chung *et al* [6].

### **3.2.1. Flexão**

A profundidade da abertura diminui a quantidade de material da alma, podendo causar falhas por flexão assim como por cisalhamento das seções perfuradas.

A comparação dos resultados da investigação de Chung *et al* [5] realizada em elementos finitos, revelou que para aberturas na alma com altura considerável, submetidas a cisalhamento reduzido, constata-se que a ruína por flexão na seção perfurada pode ser crítica.

### **3.2.2. Cisalhamento**

A redução de material da alma diminui drasticamente a resistência ao cisalhamento. Para aberturas na alma com comprimento reduzido, submetidas a elevado esforço cisalhante, a ruína por cisalhamento é aparente na seção perfurada, especialmente nas aberturas com grandes alturas.

O aumento na altura da abertura afeta diretamente a resistência ao esforço cortante e momento na abertura, Liu e Chung [14].

### **3.2.3. Mecanismo de Vierendeel**

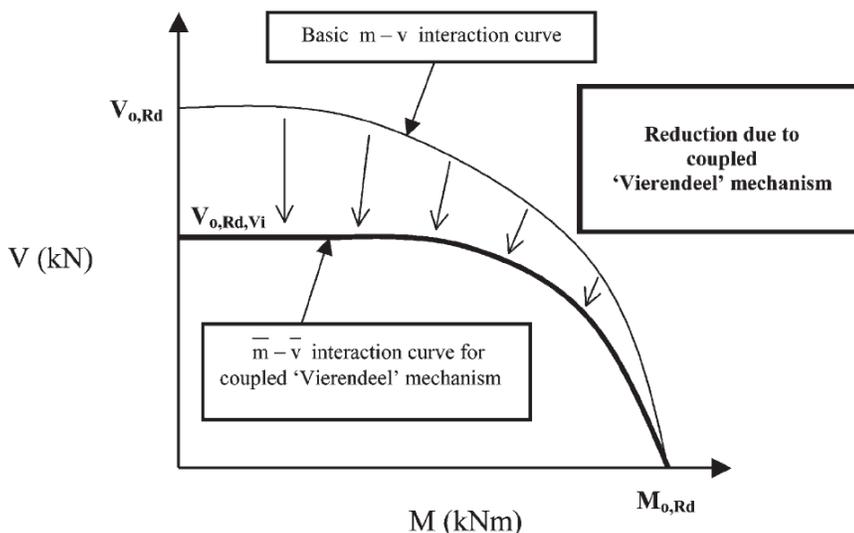
O mecanismo de Vierendeel, ilustrado na Figura 3.4, mostra que há a formação de quatro rótulas plásticas nos “tês”, oriundas da transferência de cisalhamento lateral ao longo da abertura da alma, sendo esse fenômeno sempre crítico em vigas de aço com aberturas na alma.

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 “tês” superior e inferior, Chung *et al* [5].

Após 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.

Um “parâmetro de Vierendeel” foi estabelecido no artigo por Chung *et al* [5] 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 “ $m$ ” e ao cisalhamento “ $v$ ”, e do parâmetro Vierendeel “ $v_i$ ”, os modos críticos de falha nas seções perfuradas sob diferentes “ $m$ ” e “ $v$ ” puderam ser prontamente avaliados, e serão aqui descritos.

A Figura 3.7 apresenta a curva montada com a redução adicional provocada pelo mecanismo de Vierendeel:



**Figura 3.7 - Redução na curva de interação flexão-cisalhamento de uma seção perfurada devido ao mecanismo de Vierendeel [5]**

As investigações em elementos finitos, realizadas por estes autores, confirmaram que para aberturas na alma com comprimento considerável, submetidas a elevado esforço cisalhante, a falha pelo mecanismo de Vierendeel é predominante nas seções perfuradas.

### 3.2.4. Flambagem Local da Mesa Comprimida

A flambagem da mesa pode ocorrer quando a viga estiver solicitada por um grande esforço de momento global na região da abertura, a qual tem suas tensões redistribuídas pelas novas áreas reduzidas dos “tês” de compressão e tração, que resultam em um esforço de compressão exagerado na área da mesa em questão.

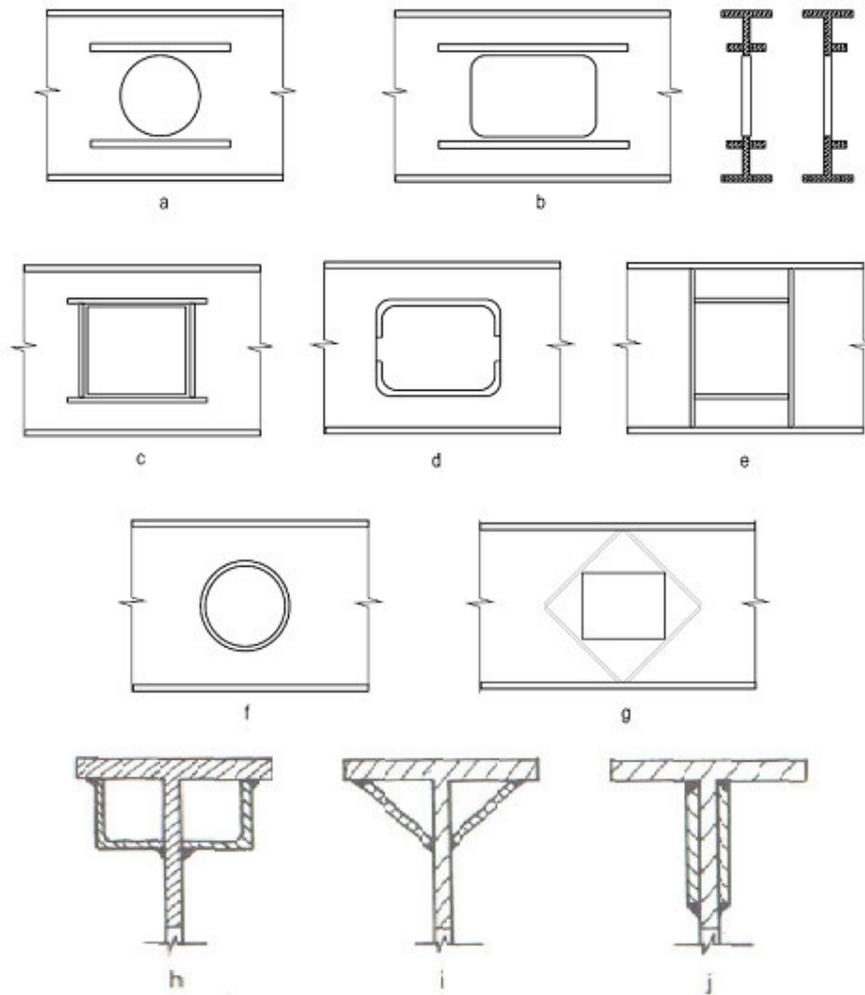
### **3.2.5. Flambagem Local da Alma**

Para vigas com múltiplas aberturas na alma, como no caso de vigas casteladas ou celulares, a flambagem da alma pode ser crítica quando as aberturas adjacentes estiverem pouco espaçadas.

Recomendam-se espaçamentos de, no mínimo, dois comprimentos de aberturas, evitando sobreposição de esforço de uma abertura na outra. Condição inatingível no método de fabricação de vigas casteladas, pois este espaçamento é de no máximo o comprimento da própria abertura, quando no caso de abertura retangular.

### **3.3. Reforços Estruturais**

Redwood [15] cita que exceto no caso de vigas casteladas, o reforço ao redor de aberturas é frequentemente usado. Vários tipos de reforços são mostrados na Figura 3.8. O propósito estrutural varia dos tipos (a) a (d), que ressaltam predominantemente a resistência à flexão global e local, até tipos (j), que realçam predominantemente a resistência de carga ao cisalhamento da alma. Ambas as resistências à flexão e ao cisalhamento podem ser melhoradas pela combinação desses tipos ou por agrupamentos com os tipos (g) a (i).



**Figura 3.8 - Tipos de Reforço para Aberturas na Alma - Redwood [15]**

A seleção de um reforço em particular é influenciada por um número de fatores: o tipo de carga, especialmente a relativa importância do momento fletor e da força cortante, que vai determinar quando o reforço deverá ser predominantemente à flexão ou ao cisalhamento; a facilidade de fabricação; e o grau de confiança em que a análise pode ser conduzida.

O reforço horizontal é efetivo quando há pouco esforço cortante. O reforço inclinado é utilizado quando se quer reduzir esforço nas bordas e, quanto menor for a taxa de momento-cortante. O reforço circular se mostrou mais efetivo, contudo experimentalmente a distribuição não foi uniforme segundo Redwood [15].

### 3.4. Procedimentos de Dimensionamento

Nesta seção serão apresentados critérios de dimensionamentos sugeridos por alguns autores e algumas diretrizes constantes em normas.

#### 3.4.1. Aberturas sem Reforço

Chung *et al* [5] propõem um método de dimensionamento baseado em uma investigação numérica em elementos finitos, abrangendo várias formas de aberturas na alma e com diferentes tamanhos. Onde uma curva de interação flexão-cisalhamento rege a resistência da viga com a abertura.

O momento resistente da seção perfurada,  $M_{0,Rd}$ , é dado por:

$$M_{0,Rd} = f_y W_{0,pl} \geq M_{0,Sd} \quad \text{eq. 3-1}$$

$$W_{0,pl} = W_{pl} - \frac{d_0^2 t_w}{4} \quad \text{eq. 3-2}$$

Onde:

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

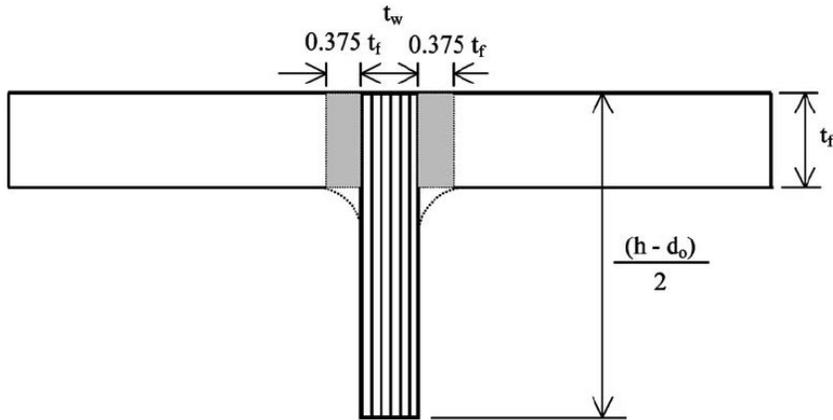
$t_w$  é a espessura da alma;

$d_0$  é a altura da abertura;

$f_y$  é a tensão de escoamento do aço.

Usualmente, a área destinada a resistir esforços cortantes em uma viga de aço é assumida como sendo a altura  $h$  multiplicada pela espessura  $t_w$  da alma. Esta aproximação é feita pela simplicidade de cálculo, pois é de praxe considerar que as mesas resistem ao momento fletor enquanto a alma ao cisalhamento. Esta simplificação desconsidera uma pequena seção da mesa que auxilia na resistência ao cisalhamento sem causar erros significativos ao dimensionamento comum (sem abertura). Tratando-se de uma alma com a resistência reduzida devido à perda de área na região da abertura, esta simplificação não é utilizada.

Este fenômeno foi verificado por Chung *et al* [5] em sua investigação em elementos finitos, representada na Figura 3.9:



**Figura 3.9 - Região adicional considerada em um “T”, dada pela mesa da viga [5]**

Tendo assim uma área total de resistência ao cisalhamento fornecido pela mesa,  $A_{vf}$  dada por:

$$A_{vf} = t_f (0,375 t_f + t_w + 0,375 t_f) \quad \text{eq. 3-3}$$

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:

$$V_{0,Rd} = f_v A_{v0} \geq V_{0,Sd} \quad \text{eq. 3-4}$$

$$A_{v0} = A_v - d_0 t_w \quad \text{eq. 3-5}$$

$$A_v = h t_w + 2(0,75 t_f t_f) \quad \text{eq. 3-6}$$

Onde:

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

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

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

Para uma seção típica de viga tal como, UB 457x152x52 S275, a área cisalhada adicional das mesas contribui com um aumento de 10% na resistência ao cisalhamento de uma seção perfurada com abertura na alma de  $\frac{d_0}{h}$  igual a 0,50.

Para uma seção perfurada com  $\frac{d_0}{h}$  igual a 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 3.1 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 da resistência ao cisalhamento fornecido pela nova consideração da mesa [5]**

Perforated section	$d_0/h=0.50$	$d_0/h=0.67$	$d_0/h=0.75$
UB 457x152x52	10%	16%	21%
UB 457x152x82	22%	33%	43%
UB 610x229x101	10%	16%	21%
UB 610x229x140	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 “tês” acima e abaixo da abertura na alma, na capacidade de resistência 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 solicitantes 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* [5], pode ser obtida diretamente das curvas flexão-cisalhamento apresentadas na Figura 3.5, e na íntegra no Anexo A. Para propósitos de dimensionamento, uma relação de

resistência dupla ao cisalhamento para as seções perfuradas,  $\bar{v}$ , é definida a seguir:

$$\bar{v} = \frac{V_{0,Rd,Vi}}{V_{0,Rd}} \quad \text{eq. 3-7}$$

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 Tabela 3.2 resume os valores de  $\bar{v}$  para as seções perfuradas presentes no trabalho de Chung *et al* [5], que foram obtidos diretamente dos modelos em elementos finitos por eles investigados. É mostrado que para aberturas na alma com pequeno comprimento de abertura, tal como 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 que 0,5.

**Tabela 3.2 - Algumas relações de resistência dupla,  $\bar{v}$ , para diferentes relações  $\frac{d_0}{h}$ , examinadas por Chung *et al* [5]**

Opening shapes	Opening sizes		
	$d_0/h=0.50$	$d_0/h=0.67$	$d_0/h=0.75$
C-hexagon	1.00	0.96	0.91
Circle	0.95	0.87	0.80
Regular octagon	0.90	0.78	0.68
Regular hexagon	0.82	0.66	0.55
Square	0.66	0.42	0.32
Elongated circle $2d_0$	0.56	0.35	0.26
Rectangle 2:1	0.38	0.21	0.16
Elongated circle $3d_0$	0.35	0.19	0.13

Uma expressão elíptica pode ser utilizada para considerar a curva de iteração momento fletor e esforço cisalhante em placas sólidas retangulares:

$$m^2 + v^2 = 1 \quad \text{eq. 3-8}$$

ou

$$v = \sqrt{1 - m^2} \quad \text{eq. 3-9}$$

Onde:

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

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

Contudo, para seções perfuradas, esta curva de iteração deveria ser modificada para considerar a presença do mecanismo de Vierendeel conforme mostrado na Figura 3.7.

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 iteração flexão-cisalhamento obtidas no trabalho de Chung *et al* [5], uma curva de iteração flexão-cisalhamento generalizada é recomendada, conforme mostrado a seguir:

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

$$\left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2 + m^2 = 1 \quad \text{eq. 3-10}$$

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

$$\left(\frac{v - \left(\bar{v} - \frac{2}{3}\right)}{\frac{2}{3}}\right)^2 + m^2 = 1 \quad \text{eq. 3-11}$$

$\bar{m}$  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:

$$\text{Para } \bar{v} < \frac{2}{3}$$

$$\bar{m} = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2} \quad \text{eq. 3-12}$$

$$\text{Para } \bar{v} \geq \frac{2}{3}$$

$$\bar{m} = \sqrt{1 - \left(\frac{v - \left(\bar{v} - \frac{2}{3}\right)}{\frac{2}{3}}\right)^2} \quad \text{eq. 3-13}$$

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 3.10 exibe as curvas de iteração flexão-cisalhamento propostas por Chung *et al* [5] 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 das vigas de aço com aberturas na alma de diferentes tamanhos e formas pode ser obtida prontamente através das curvas de iteração flexão-cisalhamento propostas.

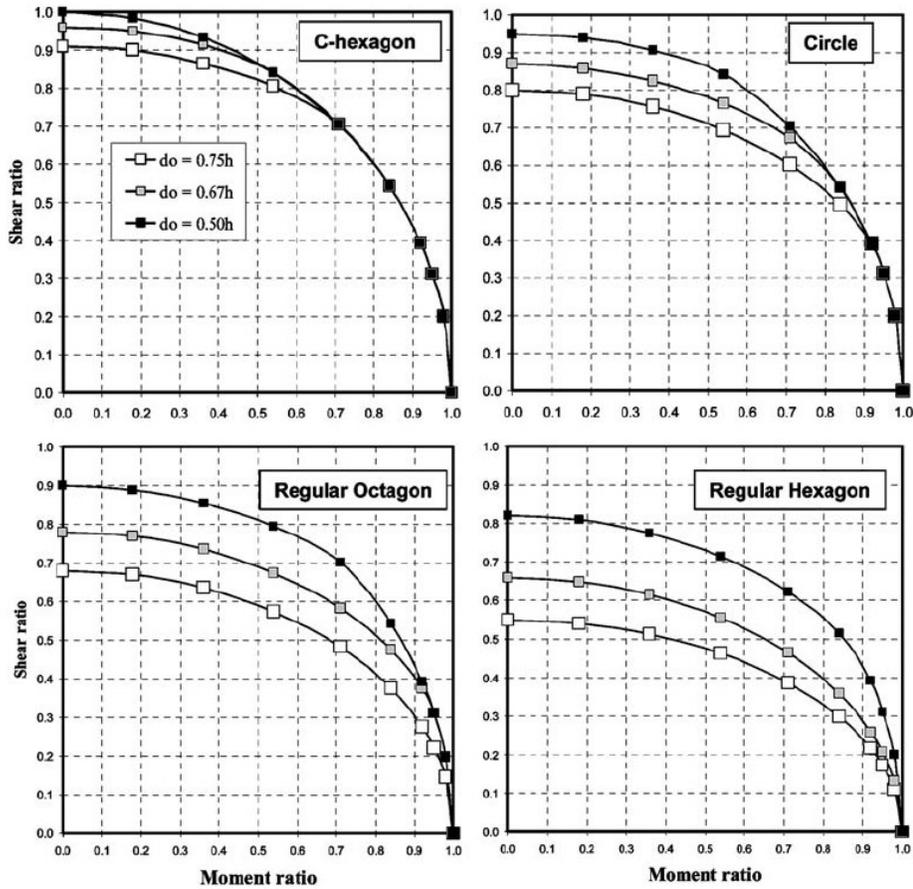


Figura 3.10 - Curvas de iteração flexão-cisalhamento propostas [5]

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.

A fim de se avaliar o grau de importância do mecanismo de Vierendeel nas seções perfuradas, um parâmetro indicativo denominado parâmetro de Vierendeel,  $v_i$ , foi estabelecido por Chung *et al* [5] e é definido a seguir:

$$v_i = \frac{V_{0,Rd,Vi}}{\left( \frac{4M_{T,Rd}}{c} \right)} \quad \text{eq. 3-14}$$

Onde:

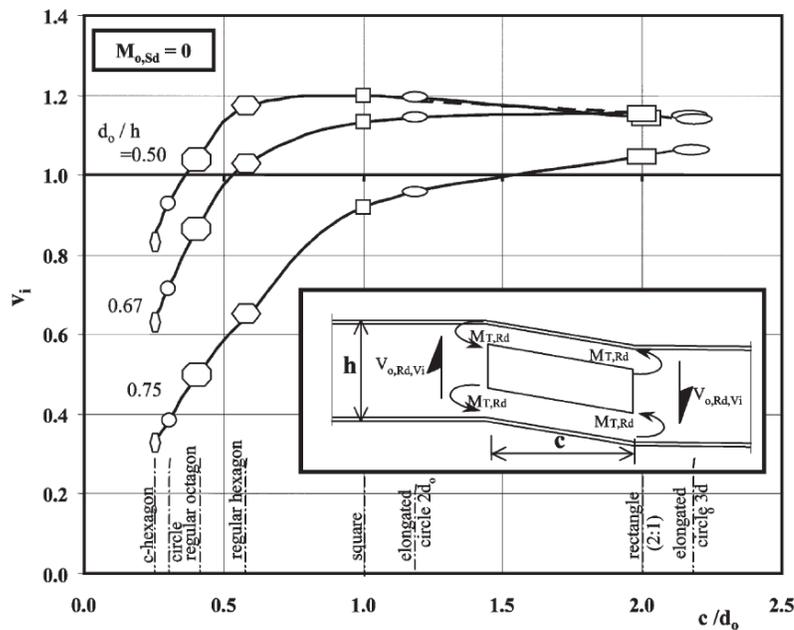
$M_{T,Rd}$  é a capacidade básica de resistência à flexão dos “tês” submetidos à forças axiais e de cisalhamento nulas;

$V_{0,Rd,Vi}$  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 de Vierendeel,  $v_i$ , é igual à unidade desde que rótulas plásticas sejam totalmente desenvolvidas nas extremidades dos “tês” acima e abaixo da abertura.

A fim de se ilustrar a importância do mecanismo do Vierendeel nas seções perfuradas de diferentes tamanhos e formas, um gráfico que relaciona o parâmetro Vierendeel,  $v_i$ , com a relação  $\frac{c}{d_0}$ , para seções perfuradas submetidas a momento global nulo é representado na Figura 3.11. Pode ser observado que para aberturas na alma com  $c$  significativo, tal como aberturas quadradas, retangulares e alongadas,  $v_i$  está sempre próximo à unidade, mostrando a importância do mecanismo de Vierendeel. Para aberturas na alma com  $c$  reduzido, tal como as aberturas c-hexagonal, circular, octogonal e hexagonal,  $v_i$  é geralmente pequeno, particularmente nas aberturas com  $\frac{d_0}{h}$  igual a 0,50.

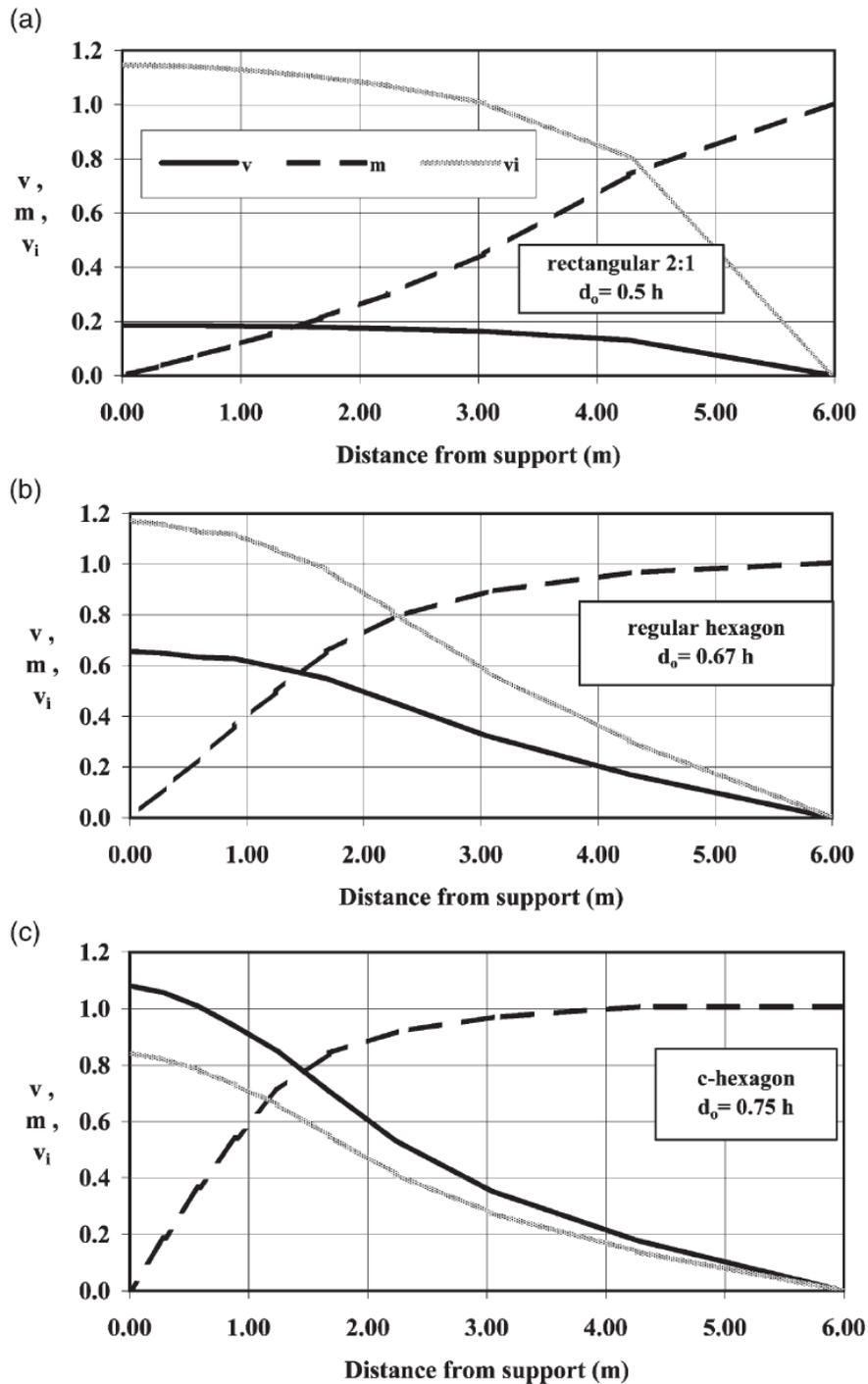


**Figura 3.11 - Valores típicos do parâmetro Vierendeel para um perfil UB 457x152x52 S275 [5]**

Na Figura 3.12 é apresentado um gráfico para três formas diferentes de aberturas na alma localizada em diversas posições ao longo de uma viga

simplesmente apoiada com um vão de 12m. Trata-se de um perfil UB 457x152x52 constituído de um aço S275. As proporções utilizadas das resistências ao cisalhamento e à flexão das seções perfuradas,  $v$  e  $m$ , são plotadas no gráfico para uma comparação imediata. Pode ser observado que:

- Para seções perfuradas com aberturas retangulares (parte a) com  $d_0 = 0,5h$ ,  $v_i$  é bastante elevado onde as seções estão submetidas às forças de cisalhamento com intensidade variando de elevada a média. Nas seções perfuradas localizadas a uma distância maior que 4 m em relação ao apoio mais próximo,  $m$  aumenta rapidamente em detrimento de  $v_i$ , demonstrando uma mudança repentina do modo crítico de ruína, do mecanismo de Vierendeel para ruína por flexão;
- Para seções perfuradas com abertura regular hexagonal (parte b) com  $d_0 = 0,67h$ ,  $v_i$  é bastante elevado somente nas seções submetidas à grande cisalhamento. Nas seções perfuradas localizadas a uma distância maior que 2 metros em relação ao apoio mais próximo,  $v_i$  diminui rapidamente, mas  $m$  aumenta vertiginosamente tendendo à unidade mostrando uma redução significativa na resistência à flexão das seções perfuradas devido à presença das aberturas na alma;
- Para seções perfuradas com abertura c-hexagonal (parte c) com  $d_0 = 0,75h$ , o valor de  $v$  é sempre maior que  $v_i$  ao longo do vão da viga, mostrando que a ruína por cisalhamento é sempre mais crítica do que o mecanismo de Vierendeel, pois o comprimento crítico da abertura é pequeno. Contudo, a troca do modo crítico de ruína de falha por cisalhamento para ruína por flexão ocorre aproximadamente a 1,5 metros em relação ao apoio mais próximo, mostrando uma severa redução na resistência ao momento das seções perfuradas devido à presença das grandes aberturas da alma.



**Figura 3.12 -  $v_i$ ,  $v$  e  $m$  das seções perfuradas ao longo do vão da viga. Perfil UB 457x152x52 S275 [5]**

No Anexo B; serão apresentados alguns exemplos de previsão da capacidade de um carregamento de vigas de aço com aberturas na alma de

diferentes tamanhos e formas, baseados nas fórmulas empíricas de dimensionamento propostas por Chung *et al* [5].

Drawin [8] desenvolveu a segunda versão de um guia de dimensionamento para o AISC, o qual também utiliza curvas de interação flexão-cisalhamento. Ressalta que a seção com a abertura possui uma resistência máxima ao momento  $M_m$  e outra resistência máxima ao cisalhamento  $V_m$ , mas quando há a interação dos esforços produz-se uma resistência mais baixa que sob puro momento fletor ou puro esforço cortante sozinhos. Acrescenta que a interação entre o momento e o cortante é fraca, isto é, nem a resistência ao momento nem a resistência ao cortante caem rapidamente quando as aberturas estão sujeitas a combinação destes esforços.

Redwood [15] trabalhou com a abordagem local das seções “tês”. Os pontos mais relevantes deste trabalho são apresentados a seguir.

Em aberturas sem reforço, considerando material perfeitamente plástico, escoamento total, pode-se dividir a abertura em duas seções (1 e 2), como mostra a Figura 3.13, onde a seção 1 é onde o momento fletor é maior e onde o esforço normal muda de sinal dentro da seção “T” de acordo com o valor da taxa momento-cortante, sendo este ponto na mesa ou na alma tem-se baixo ou alto valores de taxa de momento-cortante respectivamente.

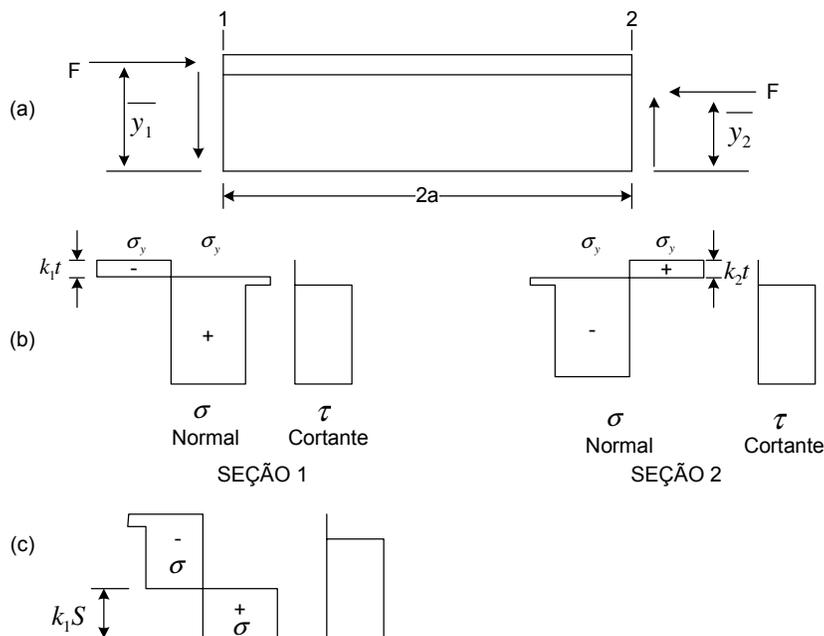


Figura 3.13 - Análise dos esforços assumindo plastificação, Redwood [15]

Sendo:

- a) Seção “T” acima da abertura;
- b) Distribuição de esforços nas seções 1 e 2 para taxas de LMS;
- c) Distribuição de esforços na seção 1 para taxas de HMS.

O equilíbrio é dado por:

$$M = F \bar{y}_1 + F \bar{y}_2 + 2FH \quad \text{eq. 3-15}$$

$$Va = F \bar{y}_1 - F \bar{y}_2 \quad \text{eq. 3-16}$$

Para baixa taxa de momento-cortante na seção 1 tem-se:

$$F = bt\sigma_y(2k_1 - 1) - sw\sigma \quad \text{eq. 3-17}$$

$$F \bar{y}_1 = -0,5sw\sigma + bt\sigma_y[2k_1(s+t) - (s+0,5t) - tk_1^2] \quad \text{eq. 3-18}$$

E na seção 2, novamente para baixa taxa de momento-cortante tem-se:

$$F = sw\sigma + bt\sigma_y(1 - 2k_2) \quad \text{eq. 3-19}$$

$$F \bar{y}_2 = 0,5s^2w\sigma - bt\sigma_y[2k_2(s+t) - (s+0,5t) - tk_2^2] \quad \text{eq. 3-20}$$

Para o caso de alta taxa de momento-cortante as equações eqs. 2-17 e 2-18 são substituídas por:

$$F = bt\sigma_y + sw\sigma(1 - 2k_1) \quad \text{eq. 3-21}$$

$$F \bar{y}_1 = bt\sigma_y(s + 0,5t) + 0,5s^2w\sigma(1 - 2k_1^2) \quad \text{eq. 3-22}$$

Onde  $k_1$  agora tem um significado diferente como demonstrado na parte “c” da Figura 3.13. A tensão normal na alma,  $\sigma$ , está relacionada com a tensão cisalhante  $\tau$  (que é assumida constante na alma e zero na mesa) através do critério de escoamento.

Assumindo o critério de escoamento Von Mises,  $\sigma$  é dado por:

$$\sigma^2 + 3\left(\frac{V}{2sw}\right)^2 = \sigma_y^2 \quad \text{eq. 3-23}$$

No caso de baixa taxa de momento-cortante as equações 2-15 a 2-20 e 2-23 podem ser utilizadas para encontrar valores de  $M$  e  $V$ . Assumindo-se valores do cortante  $V$ , baseado em frações de  $V_p$ , a eq. 2-23 fornece  $\sigma$  e as eq. 2-17 e 2-19 podem ser usadas para eliminar  $k_1$  (ou  $k_2$ ). Da equação 2-16 resulta  $k_2$  (ou  $k_1$ ) e então o valor limite do momento  $M$  é dado pela equação 2-15. Se o valor de  $k_1$  excede a unidade, a solução para alta taxa momento-cortante que segue a mesma aproximação deve ser utilizada.

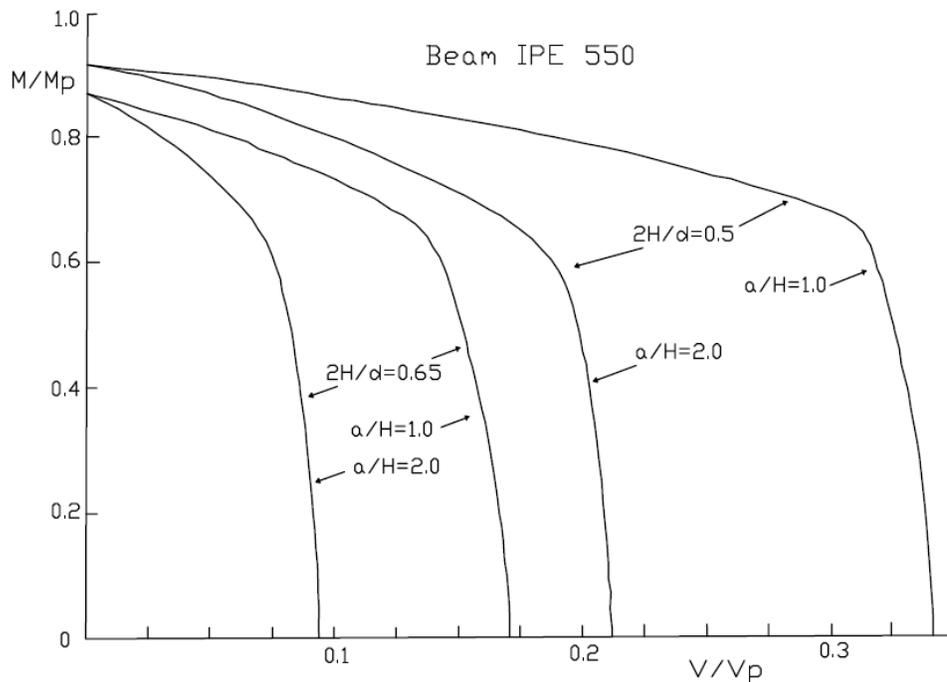
Para uma viga com abertura dada, pode-se utilizar este processo para fornecer curvas de interação relacionando  $M$  e  $V$ . Criando-se taxas destes valores

relacionando-os aos  $M_p$  e  $V_p$  da viga não perfurada, no caso  $\frac{M}{M_p}$  e  $\frac{V}{V_p}$ , tem-se a resistência proporcional destas novas vigas com aberturas em relação às resistências sem a presença das mesmas:

$$M_p = Z\sigma_y = [bt(d-t) + 0,25w(d-2t)^2] \sigma_y \quad \text{eq. 3-24}$$

$$V_p = \frac{A_w \sigma_y}{\sqrt{3}} = w(d-2t) \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad \text{eq. 3-25}$$

A Figura 3.14 foi retirada de Redwood [15], e ilustra as curvas de resistência encontradas por ele para o perfil IPE550 com diferentes variações de uma abertura.



**Figura 3.14 - Diagrama de interações momento-cortante para o perfil IPE550**

### 3.4.1.1. Excentricidade

Redwood [15] cita estudos de alguns autores pela teoria da elasticidade em chapas sujeitas a esforço uniaxial ou biaxial e que funções complexas foram criadas por Muskhelishvili para vários tipos de aberturas. Utilizaram métodos fotoelásticos para análise, com aberturas de até 50% da altura da viga. Apresenta também uma equação formulada por Helder sobre o esforço tangencial para um dado ângulo medido da horizontal.

$$\sigma_{\phi} = \frac{M}{S_x} \left[ \left( \frac{2R}{d} \right) (\sin \phi - \sin 3\phi) + 2 \left( \frac{e}{d} \right) (1 - 2 \cos 2\phi) \right] + \frac{V}{A_w} \left[ \left( 4\Gamma - \frac{2e^2 A_w}{I} \right) \sin 2\phi - \frac{A_w Re}{I} (\cos \phi - 3 \cos 3\phi) \right] \quad \text{eq. 3-26}$$

Onde:

$\phi$  é o ângulo medido da horizontal com origem no centro da abertura;

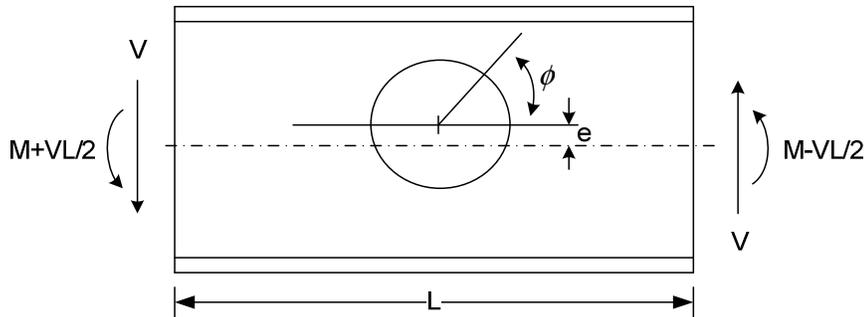
$\Gamma$  é a taxa do máximo para a média do esforço cortante nominal na viga não perfurada;

$S_x$  é o módulo de elasticidade do perfil da viga não perfurada;

$e$  é a excentricidade medida do centro da abertura a meia altura do perfil da viga;

$R$  é o radius da abertura circular;

$d$  é altura total da seção da viga.



**Figura 3.15 - Abertura circular excêntrica sujeita a momento e cortante, Redwood [15]**

Redwood [15] também cita o trabalho de Frost de 1971, quando este determina o valor das forças cortantes  $V_t$  e  $V_b$  acima e abaixo da abertura, respectivamente como sendo:

$$\frac{V_t}{V_b} = \frac{\frac{a^2}{3EI_b} + \frac{1 \cdot 2}{A_{wb}G}}{\frac{a^2}{3EI_t} + \frac{1 \cdot 2}{A_{wt}G}} \quad \text{eq. 3-27}$$

$$V_t + V_b = V \quad \text{eq. 3-28}$$

Onde:

t e b referem-se à acima (*top*) e abaixo (*bottom*) da abertura respectivamente;

$I$  é o momento de inércia;

$A_w$  é a área da alma;

$G$  é o módulo de elasticidade transversal.

Redwood e Shrivastava [17] propuseram regras de dimensionamento para vigas sujeitas a momento fletor e força cortante considerando excentricidade das aberturas. Dividindo o artigo produzido em duas partes, sendo que a primeira contém as recomendações de dimensionamento e a segunda, comentários mais detalhados sobre pressuposições da primeira. Segue-se esse dimensionamento, respeitando algumas restrições gerais:

- Vigas na classe 1 ou classe 2 de perfil W como definido na norma CSA CAN3-S16.1-M78 (1978);
- O aço utilizado deve ter  $F_y \leq 0,8F_u$ , onde  $F_y$  é especificado como tensão de escoamento mínimo, e  $F_u$  é especificado como a força mínima elástica. Em adição, o aço deve exibir as características necessárias para atingir redistribuição de momentos;
- As alturas das aberturas consideradas estão em 30 e 70% da altura da viga, e seus comprimentos devem ser até três vezes sua altura;
- Os cantos das perfurações devem ter raio de no mínimo 16mm ou duas vezes a espessura da alma;
- Forças pontuais não são aplicadas na viga dentro do comprimento da abertura.

Faz-se primeira uma checagem da estabilidade da alma de maneira a evitar a flambagem da mesma. Para isto as seguintes condições devem ser satisfeitas:

$$\text{Para seções de classe 1, } V_f \leq 0,67V_r \quad \text{eq. 3-29}$$

$$\text{e p/ aberturas retangulares } \frac{a}{H} \leq 3,0 \text{ e } \frac{a}{H} + 6\left(\frac{2H}{d}\right) \leq 5,6 \text{ eqs. 3-30 e 3-31}$$

$$\text{Para seções de classe 2, } V_f \leq 0,45V_r \quad \text{eq. 3-32}$$

$$\text{e p/ aberturas retangulares } \frac{a}{H} \leq 2,2 \text{ e } \frac{a}{H} + 6\left(\frac{2H}{d}\right) \leq 5,6 \quad \text{eq. 3-33 e 3-34}$$

Onde:

$V_f$  é a força cortante devido à cargas fatoradas;

$V_r$  é a resistência ao cisalhamento fatorado de uma viga não perfurada;

$a$  é metade do comprimento da abertura;

$H$  é a metade da altura da abertura;

$d$  é a altura total da viga.

A segunda parte deste artigo [17] faz referência a casos fora destes limites.

Estando estas condições satisfeitas, uma abertura retangular pode ser feita na alma de um perfil W se a força cortante fatorada aplicada,  $V_f$ , e o momento fatorado aplicado,  $M_f$ , na linha central da abertura satisfizerem:

$$V_f \leq V_1 \quad \text{eq. 3-35}$$

$$M_f \leq M_0 - \frac{(M_0 - M_1)V_f}{V_1} \quad \text{eq. 3-36}$$

$$\frac{M_0}{M_r} = 1 - \frac{\frac{A_w}{4A_f} \left[ \left( \frac{2H}{d} \right)^2 + \left( \frac{4e}{d} \right) \left( \frac{2H}{d} \right) \right]}{1 + \frac{A_w}{4A_f}} \quad \text{eq. 3-37}$$

$$\frac{M_1}{M_r} = \frac{1 - \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{A_w}{A_f} \right) \left( \frac{a}{d} \right) \left( \frac{\alpha_2}{1 + \alpha_2} \right)^{\frac{1}{2}}}{1 + \frac{A_w}{4A_f}} \quad \text{eq. 3-38}$$

$$\frac{V_1}{V_r} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{a}{d} \right) \left( \frac{\alpha_1}{\sqrt{1 + \alpha_1}} + \frac{\alpha_2}{\sqrt{1 + \alpha_2}} \right) \quad \text{eq. 3-39}$$

$$\alpha_1 = \frac{3}{16} \left( \frac{d}{a} \right)^2 \left( 1 - \frac{2H}{d} - \frac{2e}{d} \right)^2 \quad \text{eq. 3-40}$$

$$\alpha_2 = \frac{3}{16} \left( \frac{d}{a} \right)^2 \left( 1 - \frac{2H}{d} + \frac{2e}{d} \right)^2 \quad \text{eq. 3-41}$$

Onde:

$e$  é a excentricidade considerada positiva, se a abertura estiver acima ou abaixo da linha central da viga;

$M_r$  é a resistência ao momento fatorado de uma seção de classe 1 ou 2  
( $= \phi Z F_y$ )

$M_f$  é o momento fletor devido a cargas fatoradas;

$M_0, M_1$  são resistências de momento definido anteriormente nas equações;

$V_r$  é a resistência ao cisalhamento fatorado baseado na análise plástica  
( $0,55 w d F_y$ )

$V_1$  valor de resistência ao cisalhamento fatorado definido nas equações;

$A_w$  é a área da alma =  $d w$ ;

$A_f$  é a área da mesa;

$\alpha_1$  é uma variável auxiliar;

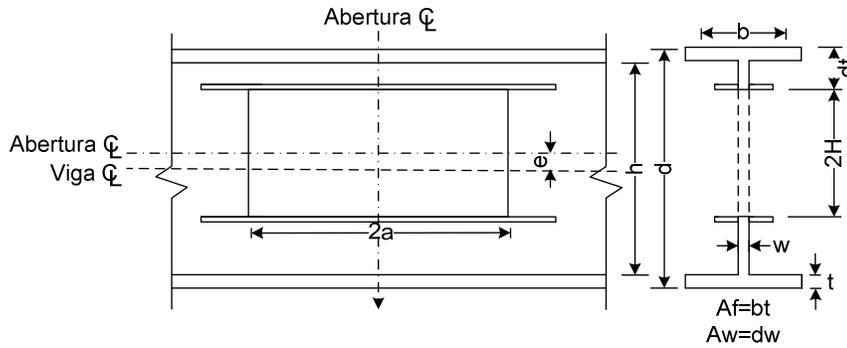
$\alpha_2$  é uma variável auxiliar.

Para aberturas circulares de raio  $R$ , as equações 2-38 a 2-41 devem ser usadas com o comprimento  $2a$  e a altura  $2H$  tomados como  $2a = 0,9R$  e  $2H = 1,8R$ . Na equação 2-37 a altura da abertura,  $2H$ , deve ser tomada como sendo  $2R$ .

### 3.4.2. Aberturas Reforçadas

Ainda no artigo de Redwood e Shrivastava [17], adicionalmente as suas restrições gerais aqui já citadas, tem-se que a taxa largura-espessura das placas de reforço não devem exceder  $\frac{145}{\sqrt{F_y}}$ , onde  $F_y$  tem unidades em megapascals.

A Figura 3.16 ilustra para melhor entendimento, algumas variáveis e reforço horizontal:



**Figura 3.16 - Detalhes e notações da abertura na alma utilizadas por Redwood e Shrivastava [17]**

Para o aumento da resistência na região da abertura através do uso de barras horizontais, o artigo mostra que estas devem atender a estabilidade checada como no processo anteriormente citado; estarem próximas às extremidades da abertura; possuírem a mesma área  $A_r$  acima e abaixo da abertura; assim como estarem simétricas ao plano da alma. Como nas equações seguintes:

$$\text{a. } V_f \leq V_1 \quad \text{b. } \frac{V_f}{V_r} \leq 1 - \left( \frac{2H}{d} \right) \quad \text{eq. 3-42a 2-42b}$$

$$\text{a. } M_f \leq M_0 - \frac{(M_0 - M_1)V_f}{V_1} \quad \text{b. } M_f \leq M_r \quad \text{eq. 3-43a 2-43b}$$

$$\left( \frac{M_0}{M_r} \right)_a = 1 + \frac{\frac{A_r}{A_f} \left( \frac{2H}{d} \right) - \frac{A_w}{4A_f} \left[ \left( \frac{2H}{d} \right)^2 + 4 \left( \frac{2H}{d} \right) \left( \frac{2e}{d} \right) - 4 \left( \frac{2e}{d} \right)^2 \right]}{1 + \frac{A_w}{4A_f}}$$

$$p/ \left| \frac{e}{d} \right| \leq \frac{A_r}{A_w} \quad \text{eq. 3-44a}$$

$$\left( \frac{M_0}{M_r} \right)_b = \left( \frac{M_0}{M_r} \right)_a - \frac{\frac{A_w}{A_f} \left[ \frac{e}{d} - \frac{A_r}{A_w} \right]^2}{1 + \frac{A_w}{4A_f}} p/ \left| \frac{e}{d} \right| > \frac{A_r}{A_w} \quad \text{eq. 2-44b}$$

$$\frac{M_1}{M_r} = \frac{1 + \frac{A_r}{A_f}}{1 + \frac{A_w}{4A_f}} \quad \text{eq. 3-45}$$

$$\frac{V_1}{V_r} = \sqrt{3} \left( \frac{d}{a} \right) \left( \frac{A_r}{A_w} \right) \left( 1 - \frac{2H}{d} \right) \quad \text{eq. 3-46}$$

$$A_r \leq A_f \quad \text{eq. 3-47}$$

Onde  $V_r$  é baseado em uma análise plástica e a excentricidade,  $e$ , sempre positiva.

Para aberturas circulares de raio  $R$ , devem ser usados com o comprimento  $2a$  e a altura  $2H$  tomados como  $2a = 0,9R$  e  $2H = 1,8R$ , e a altura da abertura,  $2H$ , deve ser tomada como sendo  $2R$ .

De acordo com os autores, o reforço pode ser colocado em apenas um dos lados da abertura (reforço assimétrico) em seções de classe 1, se as seguintes condições forem satisfeitas:

$$A_r \leq 0,333A_f; \quad \text{eq. 3-48}$$

$$M_f \leq 20V_f d \text{ na linha central da abertura;} \quad \text{eq. 3-49}$$

$$\frac{a}{H} \leq 2,5; \quad \text{eq. 3-50}$$

$$\frac{d_t}{w} \leq \frac{370}{\sqrt{F_y}} \text{ sendo } F_y \text{ em megapascals.} \quad \text{eq. 3-51}$$

Com a observação de que se a abertura possuir excentricidade deve-se tomar  $d_t$  como a maior das duas possibilidades.

Dentro do comprimento da abertura, a resistência fatorada das soldas conectando o reforço a alma devem ser de no mínimo duas vezes a resistência a tensão fatorada da área relevante de reforço exceto quando não precise exceder

$\frac{2awF_y}{\sqrt{3}}$ . A solda deve ser contínua, e o filete pode ser feito em apenas um dos

lados do reforço. Se o filete de solda é locado no lado da barra voltado para a abertura, será necessário deslocar a barra de modo a se ter um espaço mínimo para a mesma.

A resistência fatorada das soldas ancorando o reforço antes e após a abertura deve ser no mínimo igual à resistência a tensão fatorada da barra de reforço, e a capacidade fatorada a esforço cortante da alma ao longo destas soldas não deve ser excedido. O comprimento de solda irá depender da escolha do tamanho das soldas e da resistência da alma, mas é recomendado que seja de no mínimo a um quarto do comprimento da abertura.

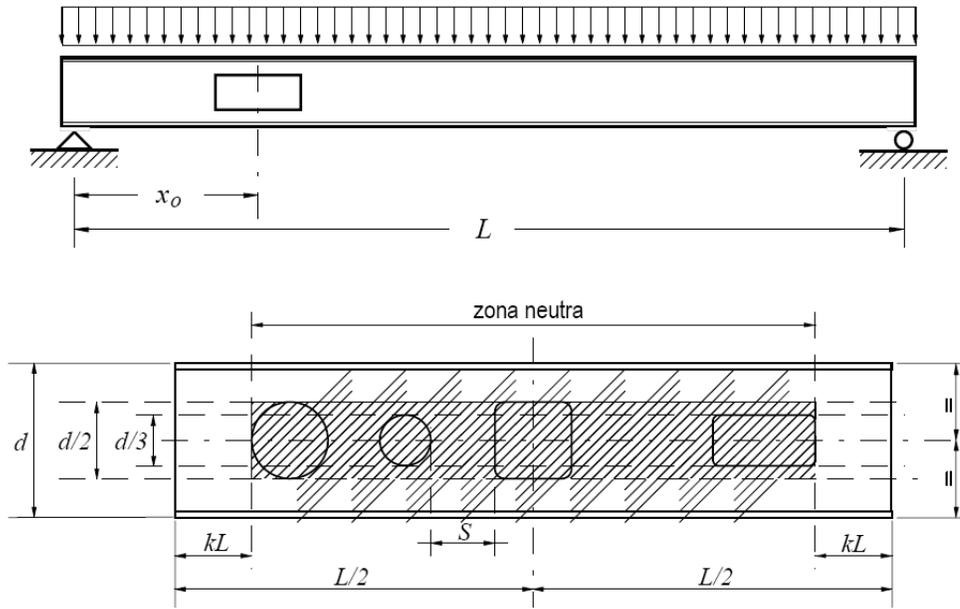
### 3.5. Normas

Nesta seção tem-se um breve histórico de normas relacionadas a aberturas. As primeiras recomendações européias que cobriam aberturas nos *girders* foram desenvolvidas por Höglund e Johanson dentro do projeto ECCS e publicado em 1977 [23]. Ambas as recomendações lidaram com aberturas não-reforçadas e reforçadas. Essas e outras informações formaram a base para o Anexo N do ENV 1993-1-1 [9].

Chung [6] comenta que Olander e Sahmel desenvolveram um método de projeto explícito de vigas com várias aberturas circulares, no AISC de 1990 que posteriormente foi adicionado ao Anexo N do Eurocode3.

Este instituto norte-americano AISC dispõe de um guia de dimensionamento denominado “*Steel and Composite Beams with Web Openings*” pertencente ao *Steel Design Guide Series 2*, que rege o dimensionamento de vigas de aço e mistas com aberturas na alma.

Na Figura 3.7 é apresentado o critério de zona neutra, apresentado por Veríssimo [24] e adaptado na NBR-8800/2008 Anexo “I” [3], delimitando áreas onde aberturas não agravariam perda de resistência para a viga.



**Figura 3.17 - Ilustração da “zona neutra” segundo Veríssimo [24]**

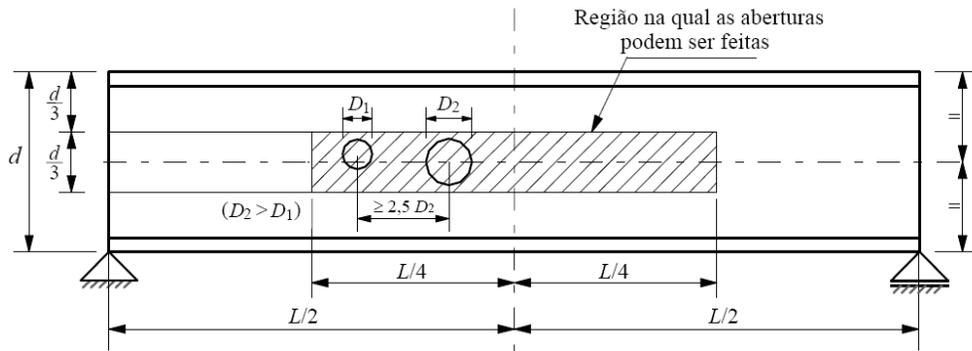
Mais contribuições para o desenvolvimento de regras de dimensionamento podem ser encontradas no relatório do *Research Fund for Coal and Steel* [19]. Quando se converteu ENV - Eurocodes para EN excluiu-se o Anexo N no intuito de limitar o volume do EC3 e de não prolongar-se com detalhes de dimensionamento. Este fundo de pesquisa citado acima realizou um projeto com objetivo de atualizar e melhorar as regras do Anexo N, assim como aumentar o escopo com *girders* compósitos.

A Norma brasileira que aborda o assunto é a NBR 8800/2008 [3], especificamente no Anexo I (Aberturas em almas de vigas - antigo Anexo K desta mesma norma). Ela cita que o método utilizado deve se basear em princípios reconhecidos da engenharia de estruturas, e dispensando cálculos quando:

- O carregamento for uniformemente distribuído;
- Aberturas estarem dentro do terço médio da altura e nos quartos centrais do vão;
- A distância entre aberturas adjacentes for no mínimo de 2,5 vezes o diâmetro da maior das aberturas;
- A força cortante solicitante nos apoios seja menor que 50% da resistente de cálculo.

- A relação altura da alma e sua espessura seja no máximo  $3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$  ;
- Largura da mesa comprimida e sua espessura,  $\frac{b_{fc}}{2t_{fc}}$ , de no máximo  $0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ .

A Figura 3.18 ilustra a área em que as aberturas circulares podem ser executadas segundo a norma brasileira.



**Figura 3.18 - Condições para execução de aberturas circulares [3]**

Para casos mais específicos que exigem cálculos fora destas restrições, a norma cita três autores como referência. Portanto, outras formas mais complexas e de dimensões maiores não são contempladas diretamente.