

5 Estudo Computacional

Neste capítulo tem-se resultados de uma planilha de cálculo elaborada no software Mathcad, a qual simula os cálculos de dimensionamento sugeridos por Redwood [15]; um estudo em elementos finitos sobre a angulação da abertura hexagonal; assim como o estudo de várias configurações de aberturas para seis diferentes perfis, seguindo os métodos de fabricação citados no item 2.1.

5.1. Abordagem Local de Redwood

Utilizando as fórmulas propostas por Redwood [15], desenvolveu-se uma planilha de cálculo no software Mathcad para a avaliação da diminuição da resistência local de aberturas retangulares. Reproduziu-se e acrescentou-se curvas ao gráfico de resistência do perfil IPE550, apresentada por Redwood na Figura 3.14. Manteve-se a altura da abertura constante em $2h = 50\%$ da altura total “d” do perfil e comprimentos “2a” variando de 1; 1,25; 1,5; 2; 3; e 3,5 vezes esta altura, e posteriormente foram construídas curvas de interação flexão-cisalhamento, como mostra a Figura 5.1.

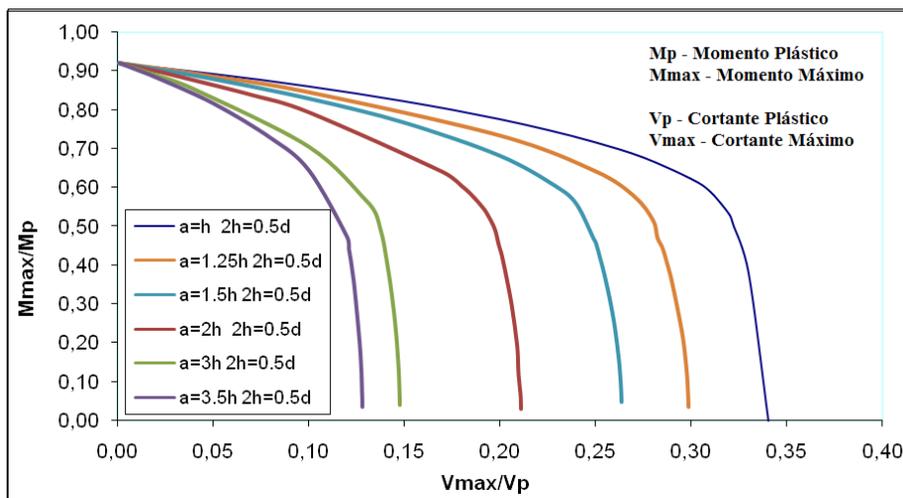


Figura 5.1 - Curva de interação M-V para viga IPE550 com abertura 50% da altura da viga

Para a abertura quadrada com altura de 50% da altura do perfil, o esforço cortante máximo de dimensionamento segundo Redwood é reduzido em 66% se comparado a seção da viga sem abertura. Quando esta abertura toma dimensões de 2:1 (comprimento: altura) a perda é de quase 80%, e quando o comprimento aumenta ainda mais, 3:1, a perda de resistência ao cisalhamento é de 85% da resistência do perfil original.

Nota-se a perda expressiva de resistência ao esforço cortante com o aumento do comprimento, mas se a viga estiver sob esforço de flexão puro, a perda é aceitável como descreve a bibliografia, sugerindo a adoção de aberturas mais compridas em regiões onde atuam esforços de momento fletor sem o esforço cortante.

Para demonstrar o efeito do acréscimo de esforço cortante na taxa momento-cortante, ainda utilizando o mesmo perfil IPE550, obtiveram-se as curvas de flexão-cisalhamento para uma abertura de altura equivalente a 70% da altura e de comprimentos variando de 1; 2 a 3 vezes esta altura, ilustradas na Figura 5.2.

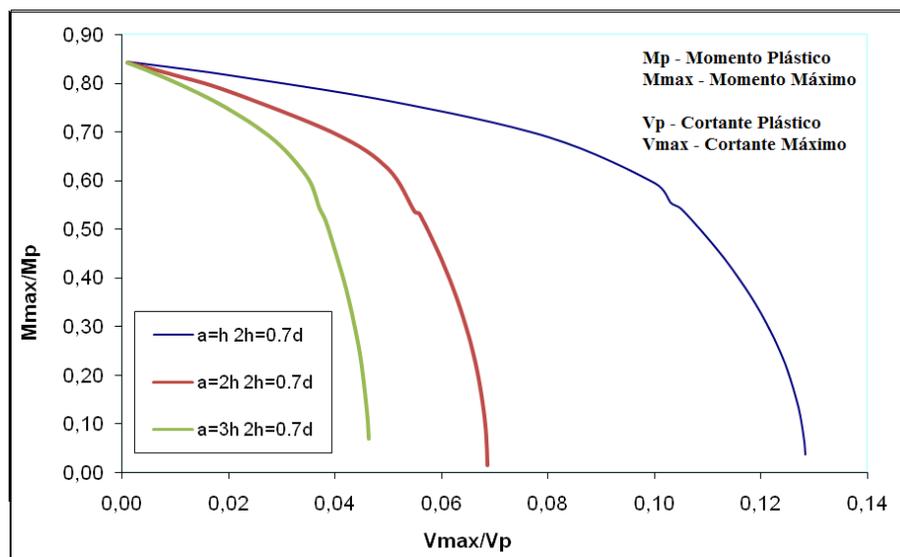


Figura 5.2 - Curva de interação M-V para viga ipe550 com abertura 70% da altura da viga

Nota-se que com a perda de 70% da área subtraída da alma do perfil resistente ao esforço cortante, a queda de resistência ao cisalhamento diminuiu em aproximadamente 87% em uma abertura quadrada, para uma abertura retangular de dimensão 2:1 esta resistência é diminuída em 93% e por último, uma redução de 95% quando se trata de abertura retangular de dimensões 3:1.

Através desta planilha de cálculo foi possível gerar uma maior variedade de curvas de resistência para a mesma viga IPE550 calculada por Redwood [15], o que possibilitou comparações mais detalhadas entre resistência máxima de esforços de momento fletor e esforço cortante à quantidade de material restante na seção da abertura, pela maior gama de comprimentos e a nova altura da abertura com 70% da altura do perfil. Desta maneira foi possível visualizar melhor as penalidades de aberturas em vigas de aço segundo as equações do autor.

Estes resultados comprovam as preocupações de Bower citadas por Redwood [15], e caracterizam as influências das alturas e comprimentos das aberturas nas almas de vigas de aço.

5.2. Estudo Paramétrico

A modelagem “paramétrica” é realizada utilizando parâmetros para o dimensionamento, as dimensões ficam proporcionalizadas e atreladas entre si. Assim quando há a alteração de uma dimensão as demais também sofrerão mudanças proporcionais. Um exemplo seria a distância de uma abertura locada em relação a um apoio, este valor “dist_apoio” pode ser alterado no código de programação APDL e sua aplicação será simples e imediata. Estas dimensões, variáveis paramétricas, podem ser isoladas e controladas dentro de diferentes cenários, possibilitando assim uma investigação numérica ampla.

As formas aqui estudadas foram: a hexagonal com alongamento, sendo isolada ou em trio ao longo da viga e vigas Litzka, com e sem expansão, sendo que nesta última através expansão tem-se a forma octogonal. A abertura hexagonal foi escolhida por mostrar-se relativamente resistente ao mecanismo de cisalhamento duplo como consta na Tabela 3.2, e pela facilidade de fabricação da mesma.

A Figura 5.3 ilustra a geometria das variáveis paramétricas em estudo:

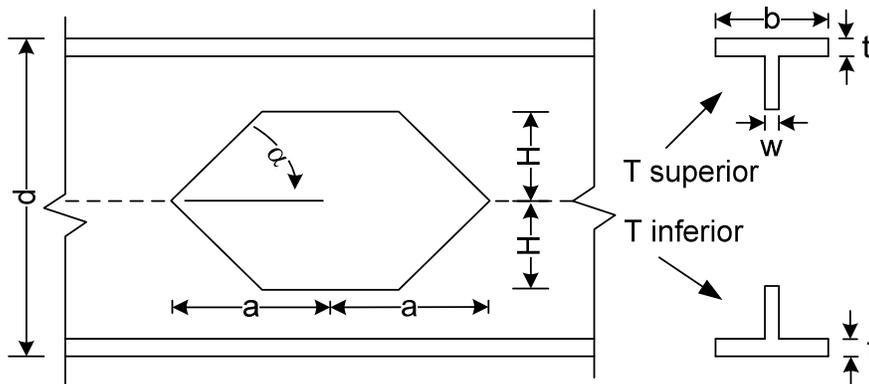


Figura 5.3 - Variáveis utilizadas na presente pesquisa, forma hexagonal alongada

Onde:

α é o ângulo formado pela abertura hexagonal;

$2H$ é a altura vertical da abertura;

$2a$ é o comprimento da abertura;

d é a altura total do perfil;

b é largura da mesa;

w é a espessura da alma;

t é a espessura da mesa;

L é o comprimento da viga;

e chapa é a espessura da chapa de reforço;

h chapa é a altura da chapa de expansão;

N é o número de aberturas (para vigas Litzka).

Outro exemplo da parametrização é o refinamento da malha em elementos finitos, onde, por exemplo, quando a altura da abertura sofre alterações, a mesma se altera proporcionalmente a fim de manter a fidelidade ao modelo original. A malha ao redor da abertura é refinada de acordo com as novas dimensões de cada *input*.

5.2.1. Angulação de Abertura Hexagonal Isolada

Um estudo da abertura hexagonal 2:1 isolada também foi realizado, e para tanto utilizou-se a mesma geometria e materiais do modelo da VIGA3A de Chung *et al* [6], alternando somente a forma da abertura para hexagonal. Assim modelada, alguns ângulos de aberturas foram simulados em três posições com diferentes taxas de momento-cortante.

Para ilustrar estas taxas no comprimento da viga de acordo com as posições das aberturas, a Figura 5.4 apresenta o esquema de carregamento e os diagramas de momento fletor e esforço cortante respectivamente. Como os valores se alteram de acordo com o deslocamento da abertura, esta ilustração não possui valores.

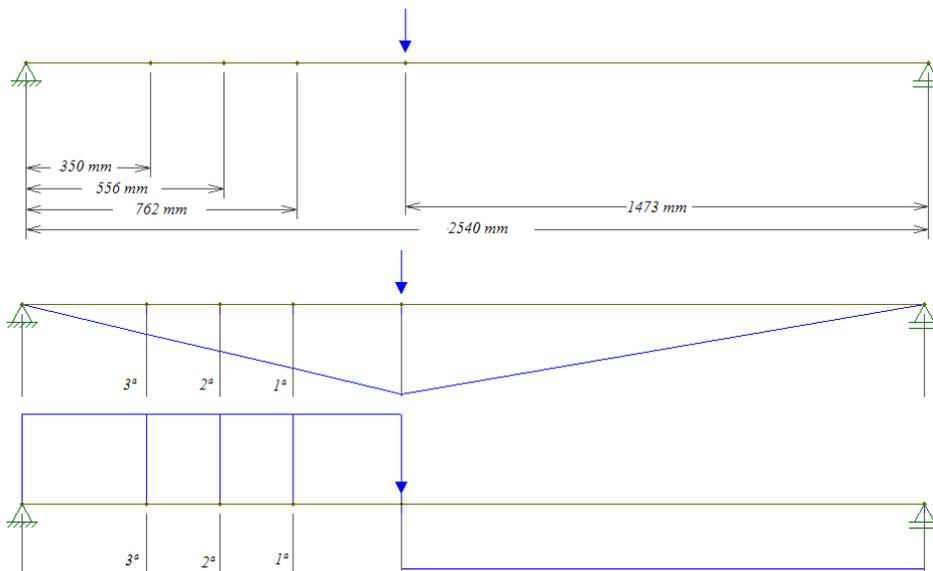


Figura 5.4 - Esboço dos esforços de momento fletor e esforço cortante respectivamente, nas aberturas da VIGA3A

Os ângulos α , demonstrado na Figura 5.3, foram de 33°, 45°, 60°, 63.43° e 90°, sendo que neste último resulta-se em uma abertura retangular 2:1, e o primeiro é o ângulo mínimo onde a geometria do modelo não gera erros de malha.

Os gráficos deste item são construídos com a deflexão no centro do vão (em mm) *versus* o momento no centro de cada abertura (em kNm), seguindo a mesma forma de apresentação de Chung mostrado na Figura 4.9.

Na Figura 5.5 tem-se as curvas de resistência para cinco diferentes ângulos α de aberturas hexagonais, distadas a 762 mm do apoio esquerdo.

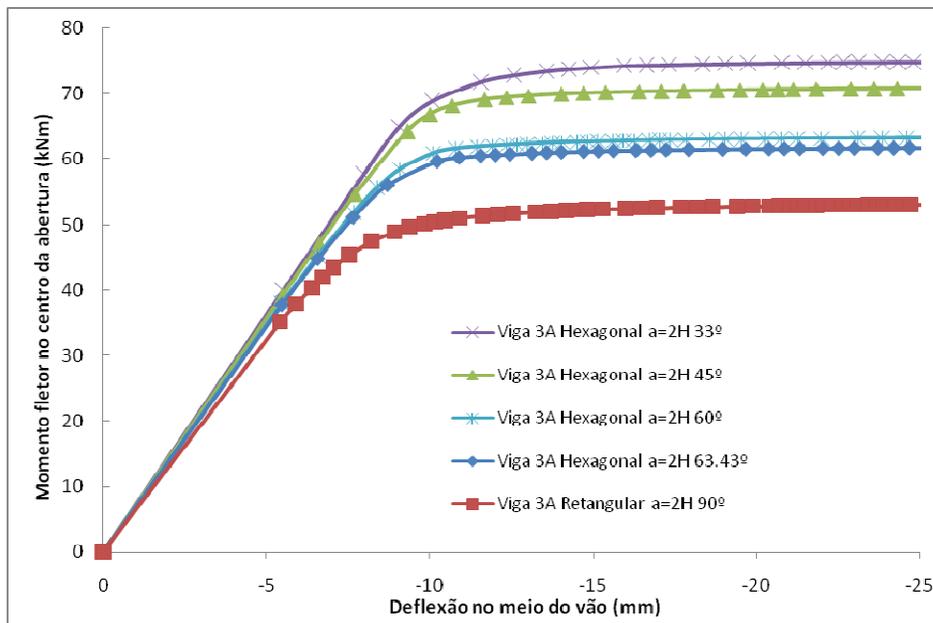


Figura 5.5 - Estudo paramétrico no ângulo de abertura hexagonal 2:1 isolada para o braço de 762mm

A variação dos ângulos α ilustra que a perda de material pelo aumento da abertura é significativa para a resistência. Para o ângulo de 33° a plastificação se restringiu ao local de aplicação do deslocamento, e para o ângulo de 45° houve leve plastificação nas quatro bordas da abertura, sendo maior no local do deslocamento.

A partir dos ângulos de 60° e $63,43^\circ$ ($\tan\alpha = 2$) de fabricação mais comum, a resistência é regida pelas aberturas, que plastificam de acordo com o mecanismo de Vierendeel. A abertura com ângulo de 90° , a qual toma a forma retangular, é a menos resistente como previsto, nela as quatro rótulas plásticas ficam bem caracterizadas.

Os ângulos que mais apresentaram resistência foram os menores, de 33° e 45° , que possuem menos área aberta quando comparadas com os outros ângulos, pois sofreram menos sem plastificações no entorno das aberturas.

Segue Figura 5.6 ilustrando as distribuições de tensões para as aberturas hexagonais em seus respectivos ângulos simulados, centradas a 762 mm do apoio esquerdo e carregadas com deslocamento de 28 mm sobre a alma enrijecida.

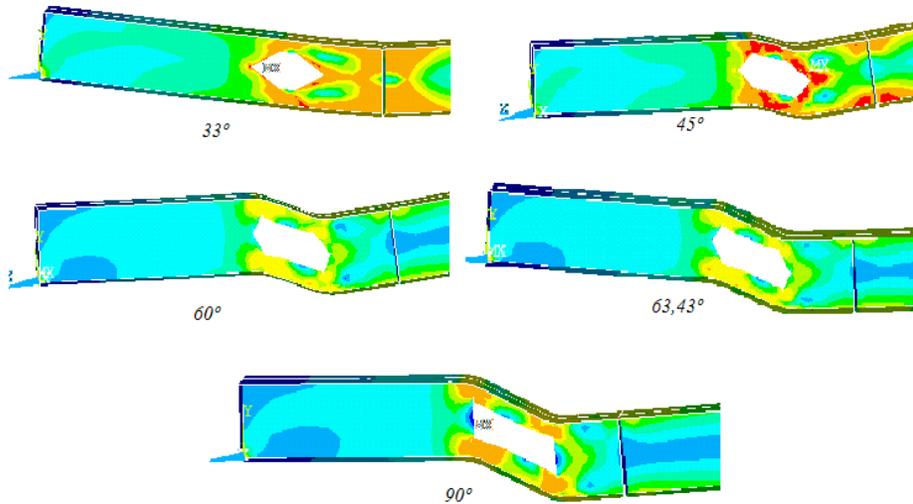


Figura 5.6 – Distribuição de tensões Von Mises para os ângulos simulados das aberturas centradas a 762 mm do apoio esquerdo, com o comprimento total fixo

Aproximando a abertura ao apoio, a 556mm (Figura 5.7), tem-se uma menor taxa de momento-cortante. A menor resistência permanece sendo a da abertura retangular, $\alpha=90^\circ$. Nota-se que as curvas de resistências dos ângulos de 33 e 45° se igualam.

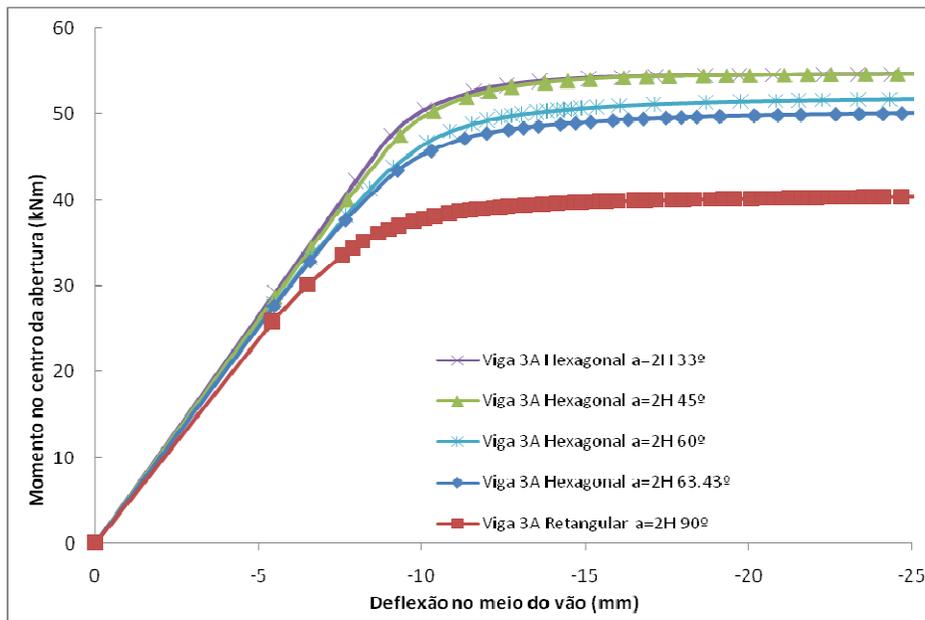


Figura 5.7 - Estudo paramétrico no ângulo de abertura hexagonal 2:1 isolada para o braço de 556 mm

Nestes dois ângulos a plastificação é substancial, se não unicamente, no ponto de aplicação do deslocamento, mesas acima e abaixo da alma reforçada, demonstrado na Figura 5.8

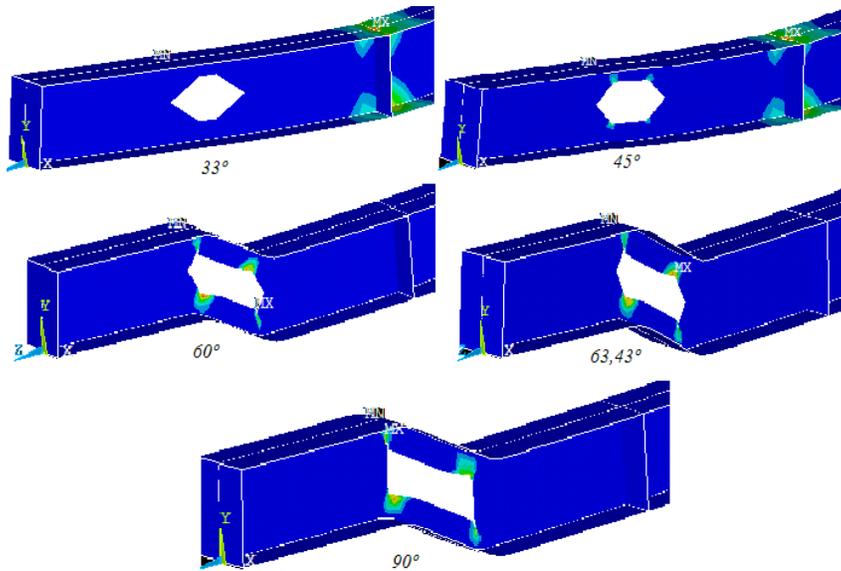


Figura 5.8 - Rótulas plásticas desenvolvidas para cada ângulo simulado, a 556 mm do apoio e com o comprimento total fixo

Esta tendência se repete enquanto aproxima-se a abertura do apoio, diminuindo ainda mais a taxa de momento-cortante. Nota-se uma perda contínua da resistência com a diminuição desta taxa, como previsto pela bibliografia e confirmada pela planilha de cálculo demonstrada no item 5.1.

Na Figura 5.9, na qual a abertura esta a 350 mm do apoio vê-se que diminuindo a taxa de momento-cortante, as curvas tendem a uma resistência comum, a qual se aproxima da mais da abertura retangular de $\alpha=90^\circ$, a mais baixa resistência apresentada.

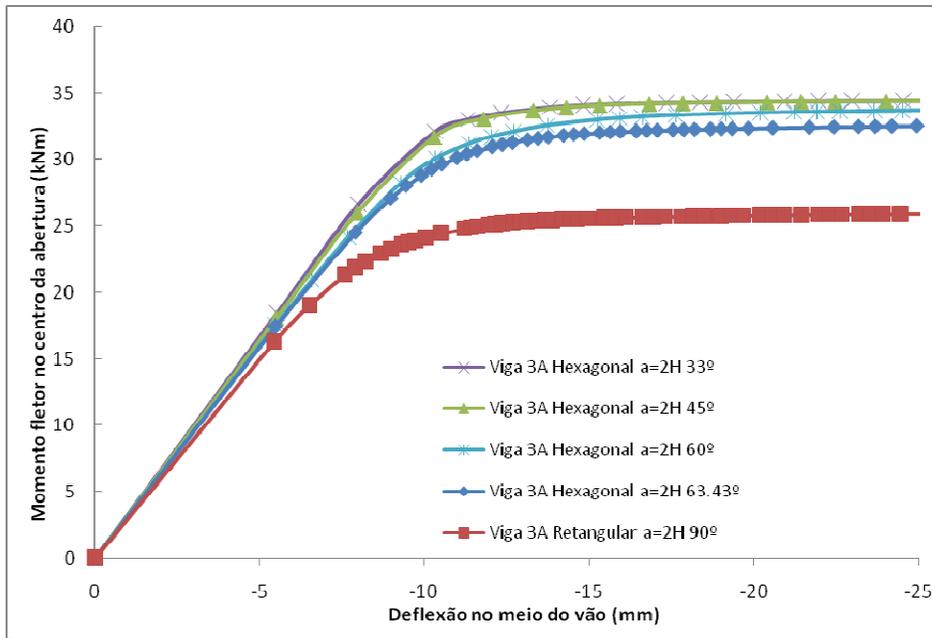


Figura 5.9 - Estudo paramétrico no ângulo de abertura hexagonal 2:1 isolada para o braço de 350mm

Uma nova configuração de modelo foi elaborada mantendo o valor $2a$ (comprimento) fixo com o comprimento total da abertura variável, atrelado ao ângulo α . Esta nova configuração é apresentada pela Figura 5.10.

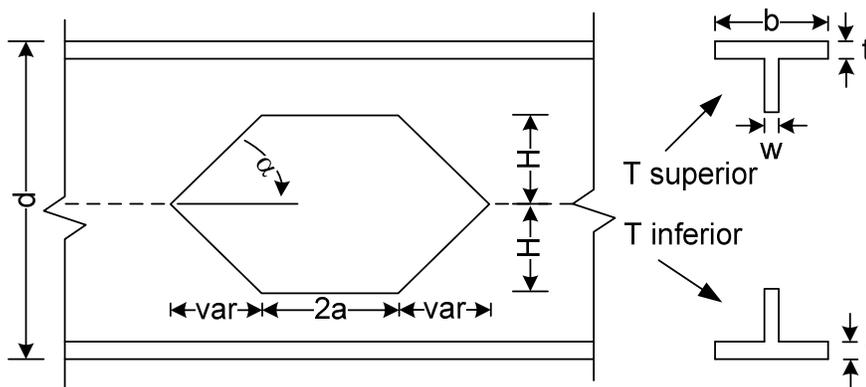


Figura 5.10 - Nova configuração com o comprimento total da abertura

Os mesmos valores do ângulo α foram simulados, exceto o mais baixo que passou a ser de $26,57^\circ$ (complementar ao $\tan\alpha=2$), pois a geometria assim permitiu. Com esta nova configuração tem-se novos comprimentos totais para cada ângulo investigado, como mostra a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Novos comprimentos totais das aberturas

Ângulo da abertura	26,57°	45°	60°	63,43°	90°
Comprimento da abertura (mm)	445,52	334,14	287,06	278,46	222,76
Proporção em relação à altura	4:1	3:1	2,6:1	2,5:1	2:1

Neste último caso com o ângulo de 90° tem-se a mesma abertura retangular 2:1 da primeira configuração onde o comprimento total $2a$ era fixo.

As curvas da Figura 5.11 foram obtidas com o centro da abertura a 762 mm do apoio. Todos os ângulos desenvolveram as quatro rótulas pelo mecanismo de Vierendeel, que foi ocasionado pelos novos comprimentos.

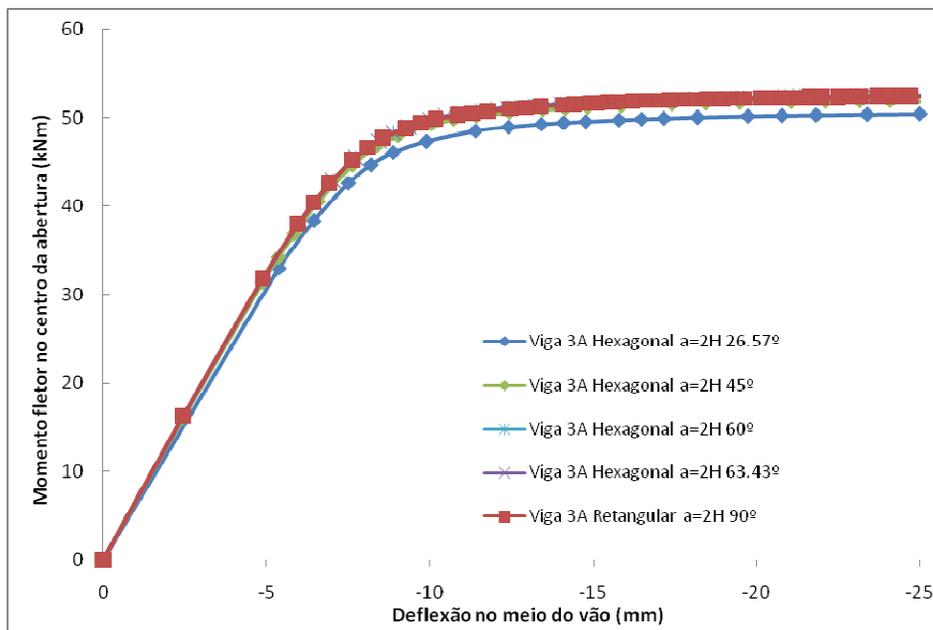


Figura 5.11 - Estudo paramétrico no ângulo de abertura hexagonal 2:1 isolada para o braço de 762 mm com $2a$ fixo

Percebe-se que a abertura de 90° é a mesma que da primeira geometria citada, onde o comprimento total “ $2a$ ” da abertura era fixo, gerando então a mesma curva para o centro da abertura a 762 mm do apoio.

Quanto menor o ângulo, maior é o comprimento total da abertura, neste caso há uma pequena redução extra da resistência para a abertura com o menor ângulo simulado, de 26,57°, onde a abertura passa a ser de 4:1. Para os outros ângulos as curvas coincidiram com a da abertura retangular, mesmo possuindo área maior

que esta. Demonstrando que a abertura hexagonal, se comparada com a retangular é mais eficaz, pois possui maior área relativa de utilização.

As curvas da Figura 5.12 foram obtidas com a abertura mais próxima ao apoio, distante 556 mm do primeiro apoio, portanto com um esforço de momento fletor menor, diminuindo a taxa de momento-cortante.

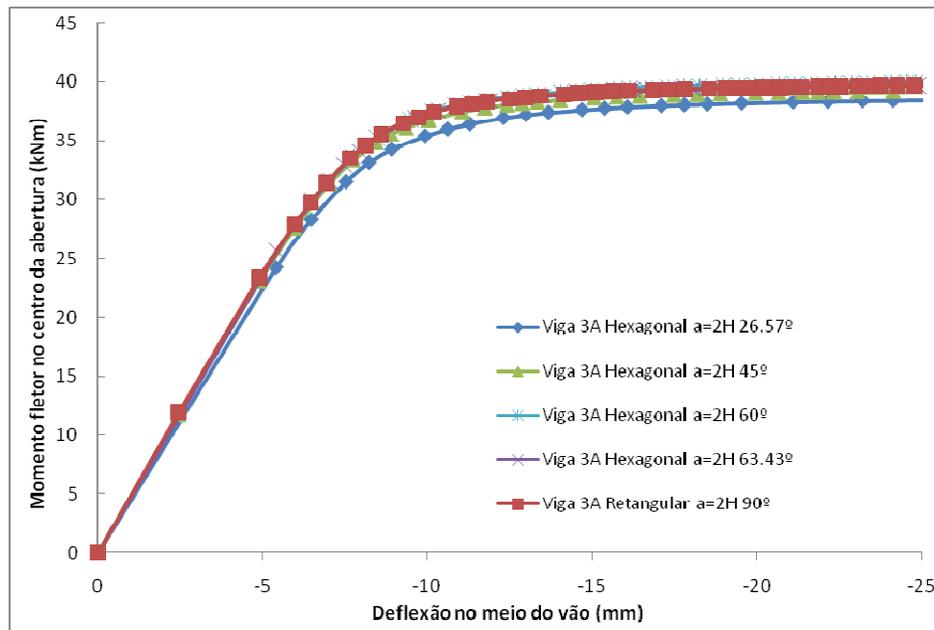


Figura 5.12 - Estudo paramétrico no ângulo de abertura hexagonal 2:1 isolada para o braço de 556 mm com 2a fixo

Percebe-se que a abertura de 90° é a mesma que da primeira geometria citada, também de comprimento total “2a” da abertura fixo, gerando então a mesma curva para o centro da abertura distante 556 mm do apoio.

Com a abertura mais próxima ao apoio, Figura 5.13, além de uma redução geral em todos os ângulos simulados pela plastificação no entorno das aberturas, percebe-se que além do ângulo de 26,57°, o ângulo de 45° também sofre uma leve redução extra na resistência em relação aos ângulos maiores. Presume-se que seja pelo mecanismo de Vierendeel, acrescido de uma menor taxa de momento-cortante, influenciando nas aberturas de comprimentos maiores.

A Figura 5.13 demonstra as curvas obtidas para estas aberturas centradas a 350 mm do apoio esquerdo.

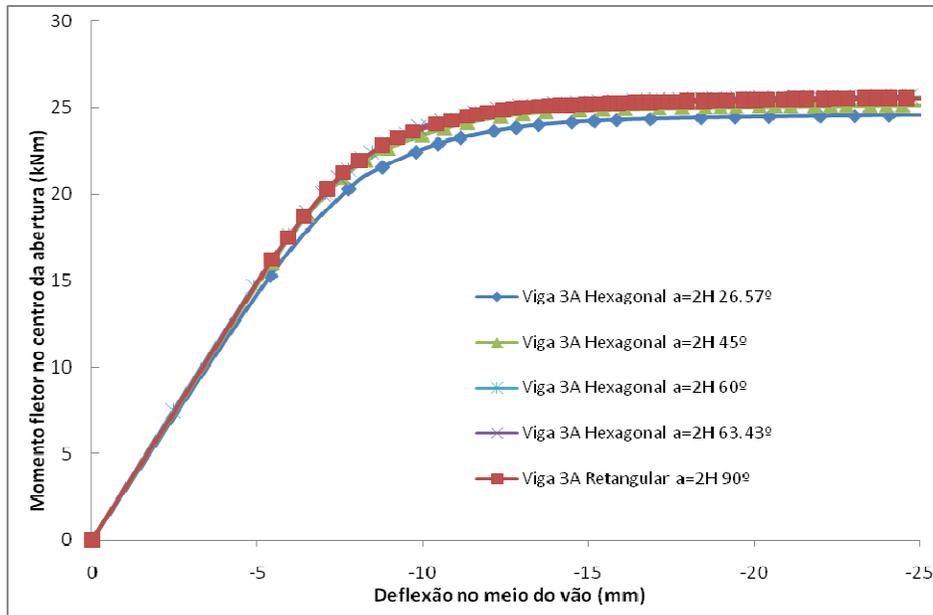


Figura 5.13 - Estudo paramétrico no ângulo de abertura hexagonal 2:1 isolada para o braço de 350mm com 2a fixo

Outra leve redução de resistência é notada quando se aproxima a abertura ainda mais do apoio (350 mm). A Figura 5.14 demonstra as rótulas plásticas desenvolvidas no entorno das aberturas, para os ângulos simulados com todas centradas a 350 mm do apoio esquerdo.

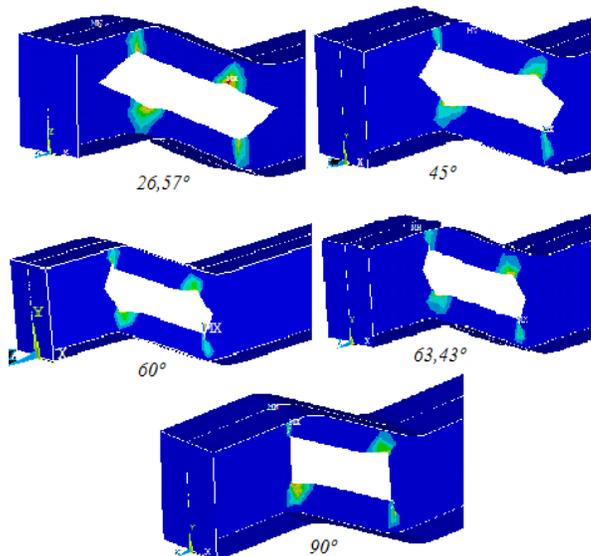


Figura 5.14 – Rótulas plásticas desenvolvidas para cada ângulo simulado, a 350 mm do apoio e com o comprimento total variável

O que demonstra que os ângulos utilizados pela literatura (60 e 63,43°) são plausíveis, pois as áreas geradas por estes ângulos aumentam substancialmente a área total de passagem de dutos se comparada à abertura retangular, sem perdas de resistência.

Este estudo da angulação da abertura hexagonal em três diferentes taxas de momento-cortante com diferentes comprimentos confirmou o efeito das dimensões de alturas e comprimentos em aberturas nas almas. Comprovando também que ângulos intermediários são mais eficazes de forma generalizada, mas quando sob esforço exclusivo de flexão podem ser dimensionadas com uma angulação menor, possibilitando um comprimento total maior da abertura.

5.2.2. Estudo de Perfis

Na Tabela 5.2 têm-se a descrição dos perfis estudados na presente dissertação, assim como quais chapas foram utilizadas para as respectivas expansões e suas alturas resultantes. Estes perfis foram escolhidos por suas dimensões, visando a aplicação de perfis representativos dos projetos de pisos em edifícios de construção civil.

Tabela 5.2 - Perfis estudados

PERFIL	W200	W250	W310	W360	W410	W460
peso Kg/m	35,9	38,5	38,7	44	46,1	52
d	201	262	310	352	403	450
b	165	147	165	171	140	152
w	6,2	6,6	5,8	6,9	7	7,6
t	10,2	11,2	9,7	9,8	11,2	10,8
altura chapa	100	125	150	150	150	150
espessura chapa	6,3	8	6,3	8	8	9,5
peso chapa Kg/m	4,95	7,85	7,42	9,42	9,42	11,19
d Expandido	301	387	460	502	553	600
d Litzka	301,5	393	465	528	604,5	675
d Litzka expandida	401,5	518	615	678	754,5	825
peso com chapa Kg/m	40,85	46,35	46,12	53,42	55,52	63,19

Para a modelagem das vigas Litzka utilizou-se, no máximo, dos comprimentos originais das vigas sem aberturas, resultando então em comprimentos ligeiramente menores que estas; devido às sobras pelo método de

fabricação das vigas casteladas. Na Tabela 5.3 constam as informações sobre os ângulos simulados; quantidade de aberturas; comprimentos de cada viga, original sem abertura e os necessários para a fabricação da viga Litzka; e o comprimento final da viga Litzka para cada perfil estudado.

Tabela 5.3 - Configurações das Vigas Litzka

PERFIL	Ângulo α	Quantidade de aberturas	Comprimento original	Comprimento necessário	Comprimento final
W200	60°	27	9000	8711,03	8560,28
W250	63,43°	24	10000	9628,50	9432,00
W310	60°	24	12000	11967,99	11735,49
W360	60°	24	14000	13589,46	13325,46
W410	63,43°	24	15000	14810,25	14508,00
W460	60°	21	16000	15243,46	14905,96

Com estas opções de dois diferentes ângulos para a fabricação conseguiu-se aproximar o comprimento final da viga Litzka ao da viga original, visando menos perdas no processo. Pois comprimentos maiores são alcançados quando o ângulo das aberturas hexagonais é mais agudo, nestes casos quando o ângulo é de 60° se comparado com o de 63,43° ($\tan \alpha = 2$). O dente de cada abertura foi fixado como sendo $\frac{h}{2}$, respeitando esta proporção demonstrada na Figura 2.10. Algumas pequenas alterações destas proporções ocorrem ao se utilizar o ângulo de 60°, uma delas é o comprimento total maior pelo fato de cada abertura ter um ligeiro acréscimo em seus comprimentos.

A mediação de deslocamento máximo é feito no nó da parte inferior e central do vão da viga. Todas as vigas foram simuladas com deslocamento simétrico, ou seja, de igual valor em cada terço, mas este deslocamento se alterou de acordo com a resistência das vigas. Os deslocamentos permaneceram entre 150 a 400 mm para cada ponto de aplicação, sendo maiores para as vigas originais sem aberturas e menores para as vigas Litzka expandidas. As curvas de resistência geradas atingiram o patamar plástico para cada viga simulada.

5.2.2.1. Vigas Originais

Na Figura 5.15 ilustra-se a aplicação simétrica de deslocamento no primeiro e segundo terço de cada viga, apenas para demonstrar como foram simuladas, portanto sem valores. Neste exemplo a viga tem 12 m de vão.

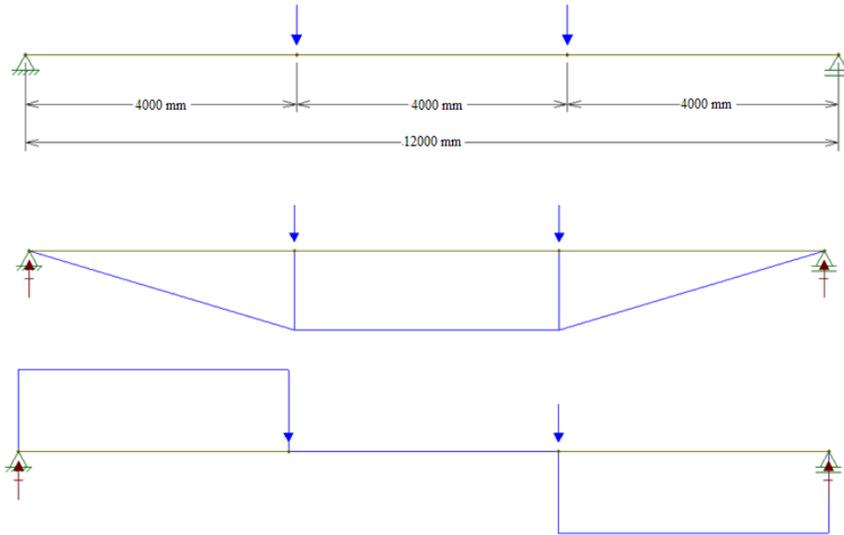


Figura 5.15 - Aplicação de deslocamentos nos terços e esforços

Cada perfil foi simulado inicialmente em sua forma original sem aberturas, para servir de padrão comparativo. Os gráficos de resistência gerados relacionam o momento fletor máximo da viga em kNm *versus* a deflexão máxima no centro da viga em mm. Para estes perfis originais construiu-se o gráfico da Figura 5.16.

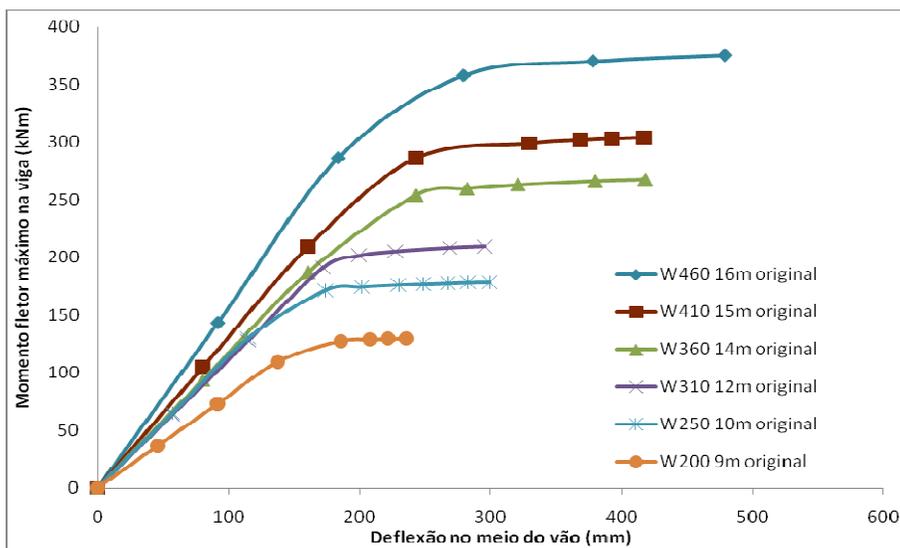


Figura 5.16 – Curvas de resistência dos perfis originais, sem aberturas

Estas curvas serão posteriormente utilizadas para comparação de resistência dos mesmos perfis, mas com diferentes processos de fabricação de aberturas e também com e sem reforço através de uma chapa de expansão na altura das mesmas.

5.2.2.2. Viga Original com Três Aberturas

A opção pelo estudo de viga com três aberturas é a praticidade de poderem-se utilizar tubulações em toda a extensão da laje, lembrando que há uma continuidade das vigas devido aos descarregamentos das vigas na outra direção. Estando estas aberturas em cada terço do comprimento, possibilita-se a passagem de tubulações em toda a área da estrutura.

Orientando-se pela análise do AISC e de Veríssimo [24] que posteriormente foi adicionado a norma NBR 8800 (ver Figura 3.18), procurou-se posicionar estas três aberturas de modo a distanciá-las de esforços de deslocamentos e das reações de apoios, dentro de cada terço da viga em questão, assim como se respeitou o espaçamento entre elas.

Os perfis citados na Tabela 5.2 foram simulados com três aberturas hexagonais alongadas, cada qual em determinadas posições ao longo dos terços das vigas. Estas vigas apresentaram a menor resistência entre as aqui estudadas, pelo efeito das aberturas, onde nos três primeiros perfis estas aberturas têm suas alturas próximas a 50% da altura do perfil e principalmente pelo comprimento de 2 a 4 vezes esta altura.

A abertura central esta exclusivamente sob esforço de momento fletor, possibilitando um comprimento de abertura maior, sem penalidade excessiva.

Neste caso o método de fabricação das aberturas seria por esforço de punção. Na Figura 5.17 tem-se a viga de perfil W200 modelada de forma a simular esta viga.

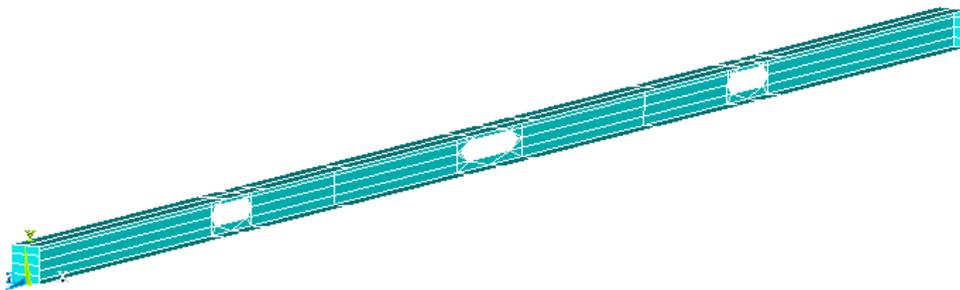


Figura 5.17 - Modelo da viga W200 com três aberturas, representação das áreas

No intuito de aumentar a área útil da abertura central o ângulo é menor, de 33° alongando o comprimento total, já nas aberturas próximas aos apoios o ângulo é de 60°, para otimizar a área e a resistência sob simultâneo esforço cisalhante e momento fletor. Os comprimentos, ângulos e as distâncias do apoio esquerdo ao centro para cada uma das aberturas estão citadas na Tabela 5.4, denominada de configuração 1.

Tabela 5.4 - Configuração um, para vigas com três aberturas

	Abertura1			Abertura 2			Abertura 3		
	comp	ângulo	centro	comp	Ângulo	centro	comp	ângulo	centro
W200	300	60	2000	400	33	4500	300	60	7000
W250	300	60	2000	400	33	5000	300	60	8000
W310	300	60	3000	400	33	6000	300	60	9000
W360	300	60	3000	400	33	7000	300	60	11000
W410	300	60	3000	400	33	7500	300	60	12000
W460	300	60	3500	400	33	8000	300	60	12500

A Figura 5.18 apresenta as curvas para estas configurações. Essas curvas demonstram um aumento diretamente proporcional ao aumento das dimensões dos perfis.

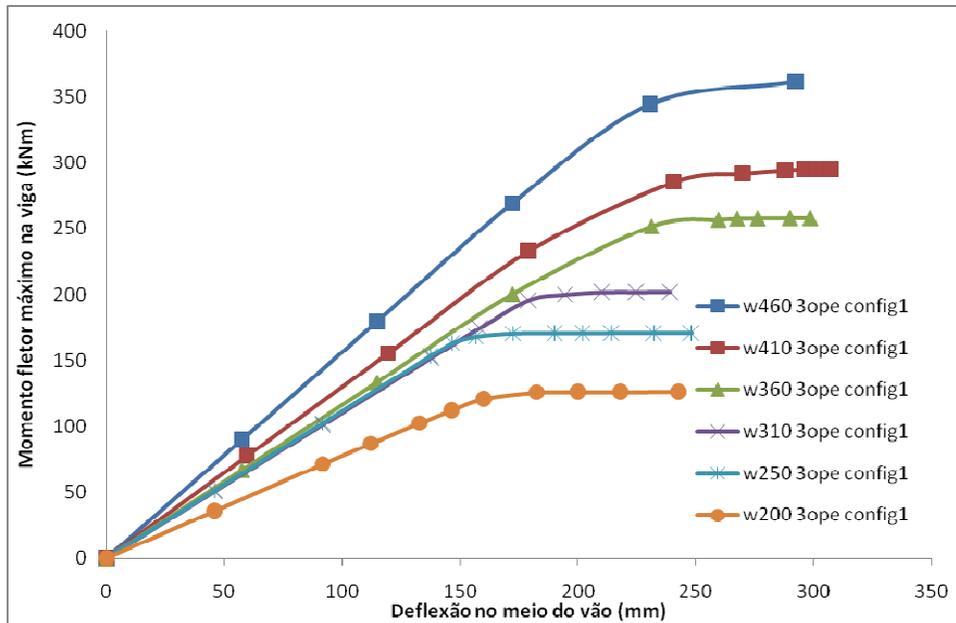


Figura 5.18 – Curvas de resistência dos perfis originais com três aberturas para a tabela de configuração 1

As figuras de tensões e deformações plásticas aqui representadas estarão em um ângulo que possibilita à visualização de ambas as mesas e das aberturas nas almas, lembrando que as aberturas são simétricas no comprimento da viga.

A Figura 5.19 é a representação das tensões no modelo da viga W200 com três aberturas para a primeira configuração, a escala de cores mostram os valores em MPa, notam-se acumulação de tensões nos cantos das aberturas e nas mesas acima e abaixo das aberturas que possuem esforço cisalhante.

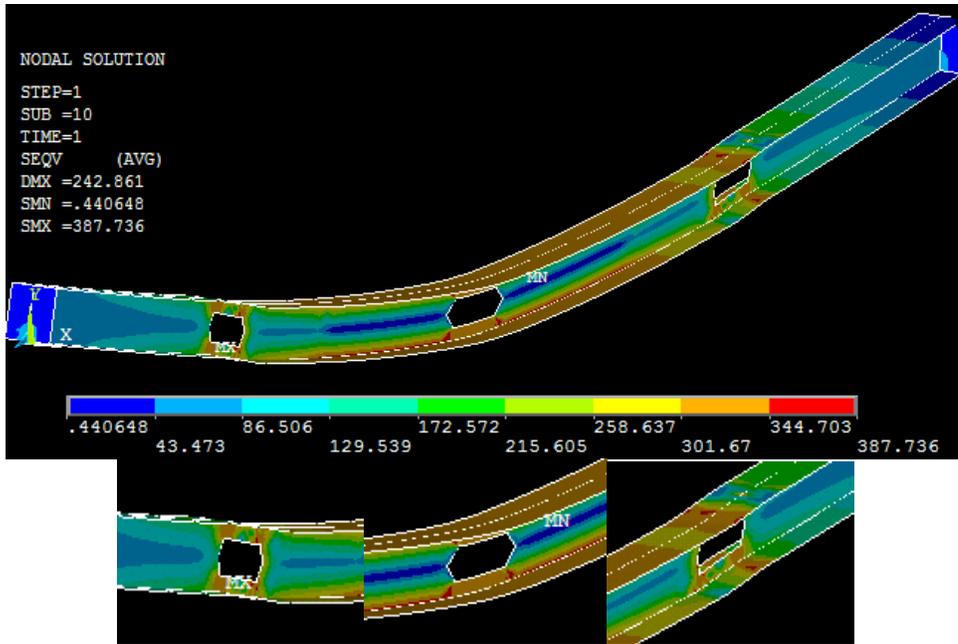


Figura 5.19 - Viga W200 com três aberturas, tensão Von Mises em MPa, configuração 1

A Figura 5.20 mostra a formação de rótulas plásticas para a viga da figura anterior, percebem-se quatro rótulas se formando nos cantos das aberturas onde há esforço cortante e nas mesas da abertura de esforço exclusivamente de momento fletor, propagando-se para a alma acima e abaixo desta mesma abertura.

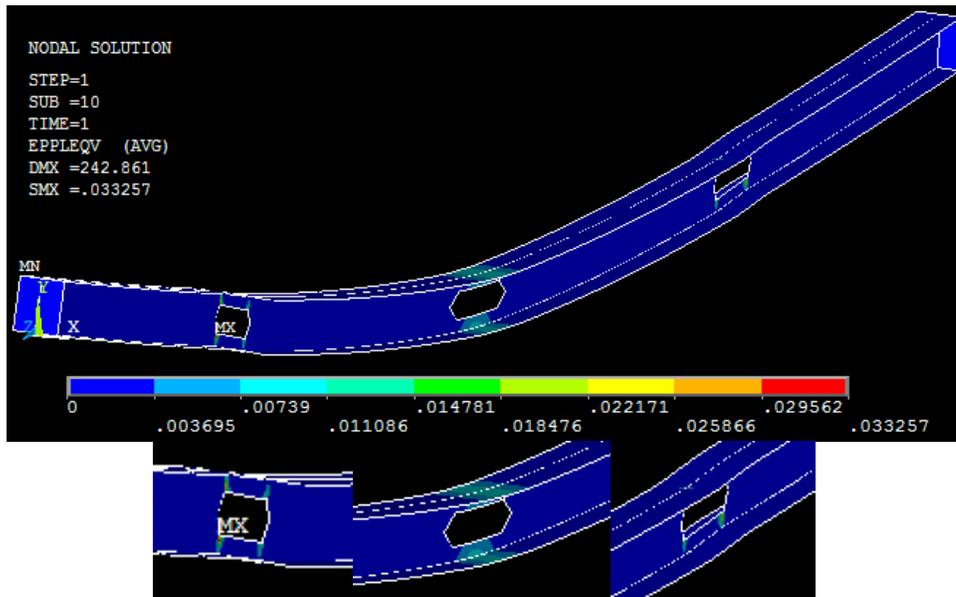


Figura 5.20 - Viga W200 com três aberturas, deformação plástica Von Mises, configuração 1

A deformação plástica para a viga de perfil W460 está ilustrada na Figura 5.21, nota-se que a proporção das aberturas em relação à altura do perfil é muito menor, assim como que a plastificação se restringe às mesas no terço central da viga, com início de propagação para a abertura central.

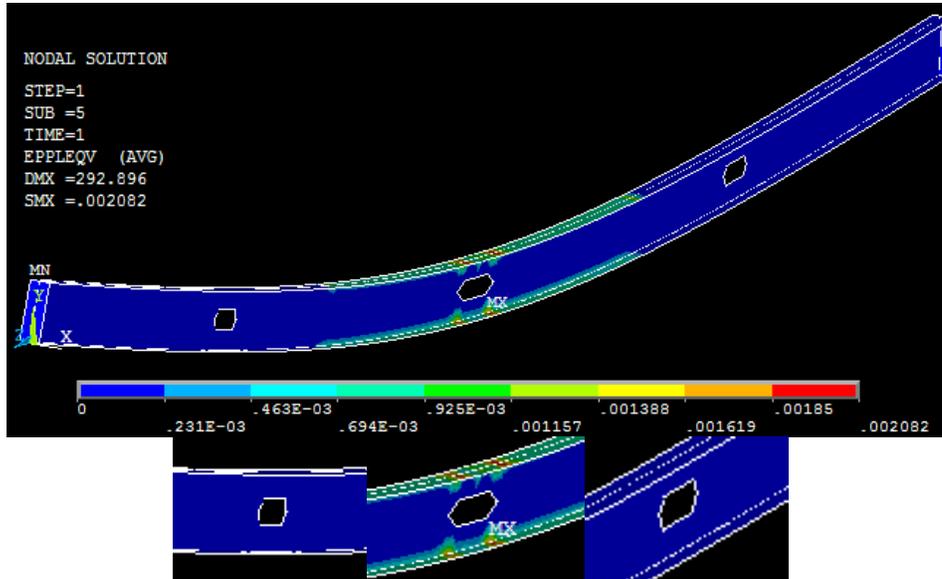


Figura 5.21 - Viga W460 com três aberturas, Von Mises Strain-Plastic, configuração 1

A curva de resistência para esta viga não sofre alteração se comparada com o perfil original sem aberturas, pois estas aberturas são relativamente menores.

Criou-se uma segunda Tabela 5.5 com novas configurações, simulando aberturas com dimensões exageradas, para se poder visualizar as penalidades que as mesmas causam em diferentes perfis.

Tabela 5.5 - Configuração dois, para vigas com três aberturas

	Abertura 1			Abertura 2			Abertura 3		
	comp	ângulo	centro	comp	ângulo	centro	comp	ângulo	centro
W200	600	60	2000	800	33	4500	600	60	7000
W250	600	60	2000	800	33	5000	600	60	8000
W310	600	60	3000	800	33	6000	600	60	9000
W360	600	60	3000	800	33	7000	600	60	11000
W410	600	60	3000	800	33	7500	600	60	12000
W460	600	60	3500	800	33	8000	600	60	12500

Com estas configurações exageradas tem-se o comprimento de 4 a 8 vezes a altura da abertura, gerando falhas pelo mecanismo de Vierendeel previstas na literatura.

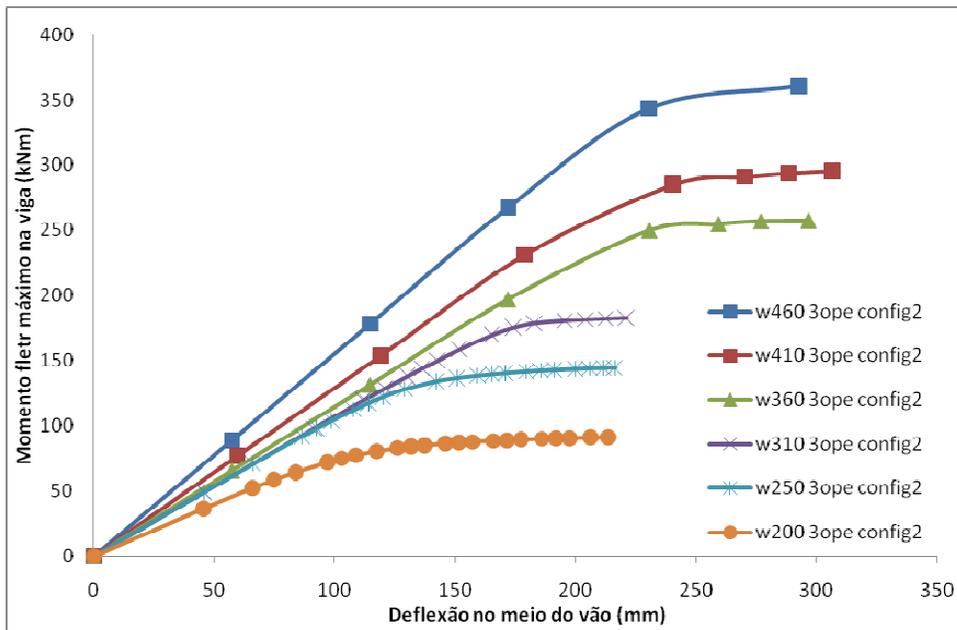


Figura 5.22 – Curvas de resistência dos perfis originais com três aberturas para a tabela de configuração 2

Para os primeiros perfis os pontos críticos foram as duas aberturas próximas aos apoios, onde interagem esforço cortante e momento fletor simultaneamente, e quatro rótulas plásticas formaram-se conforme a literatura.

A Figura 5.23 ilustra as deformações plásticas para a viga de perfil W200 com estas novas dimensões das aberturas pela tabela de configuração dois. Mesmo possuindo um comprimento maior a abertura central, esta não participou da causa da falha, que se deu pelo mecanismo de Vierendeel nas aberturas onde há esforços cortantes e de momento fletor simultaneamente, atingindo plastificação Von Mises maiores de 10%. Os deslocamentos são apresentados em uma escala maior para melhor visualização.

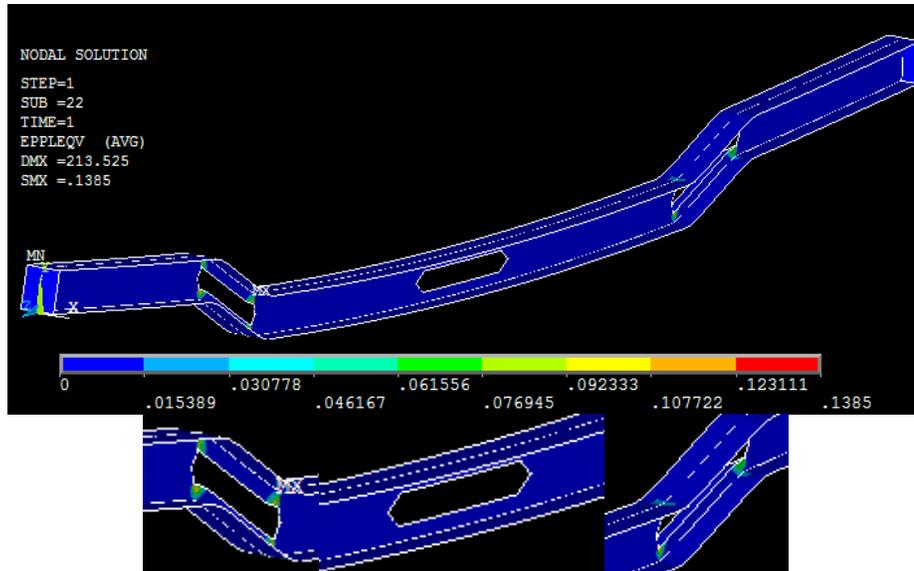


Figura 5.23 - Formação de rótulas plásticas para a viga W200 com três aberturas para a configuração 2

À medida que perfis de maiores dimensões são simulados, como no caso do perfil W460, os esforços cortantes e de momento fletor afetam menos as aberturas laterais e tem-se um novo ponto crítico nas mesas acima e abaixo da abertura central, onde se formam seis rótulas plásticas ao longo do comprimento da abertura exagerada, propagando-se para a alma devido a um extremo esforço de momento fletor. Situação visualizável na Figura 5.24.

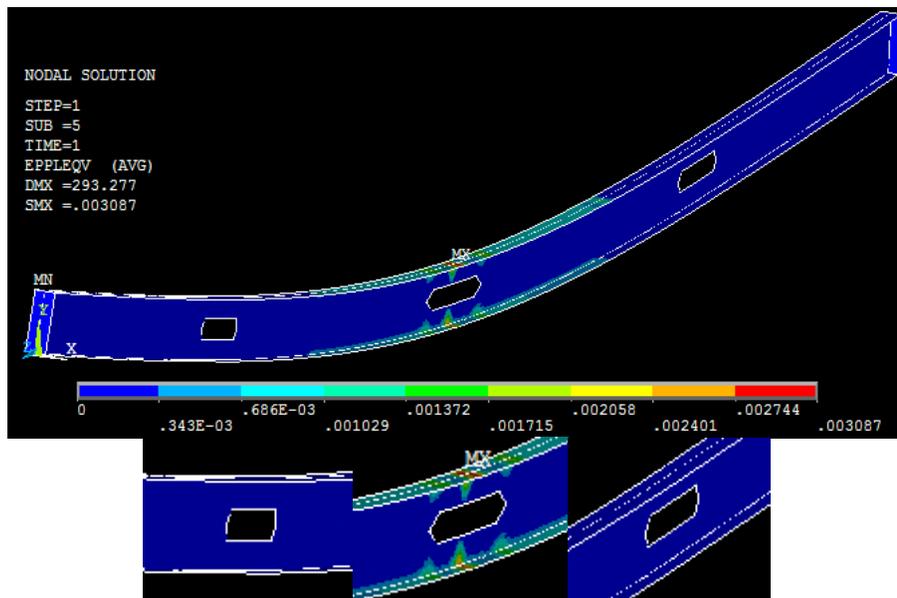


Figura 5.24 - Formação de rótulas plásticas para a viga W460 com três aberturas, configuração 2

5.2.2.3. Viga Expandida com Três Aberturas

As mesmas duas tabelas de configurações de aberturas, Tabela 5.4 e Tabela 5.5, foram utilizadas para se modelar vigas expandidas em altura utilizando os mesmos perfis supracitados. Este processo de fabricação foi explicado no item 2.1.3, e uma representação das áreas do modelo com a placa de expansão pode ser visualizada nas Figura 5.25 e Figura 5.26.

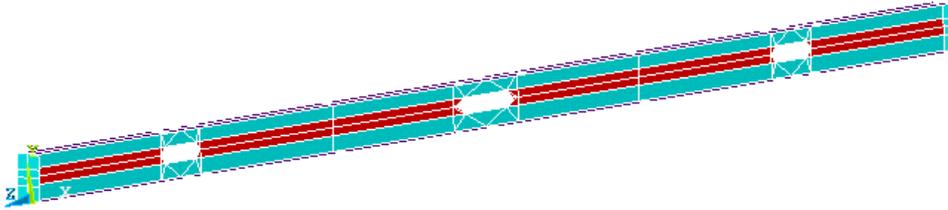


Figura 5.25 - Representação da chapa de expansão em vermelho com outra espessura

A chapa de expansão acrescenta uma inércia à viga, devido a sua própria altura e ao distanciamento das mesas da linha neutra por ela ocasionado. Esta inércia resulta em um perfil mais resistente, e o corte na chapa para fabricação das aberturas é relativamente simples e sem perdas, como demonstrado no processo.

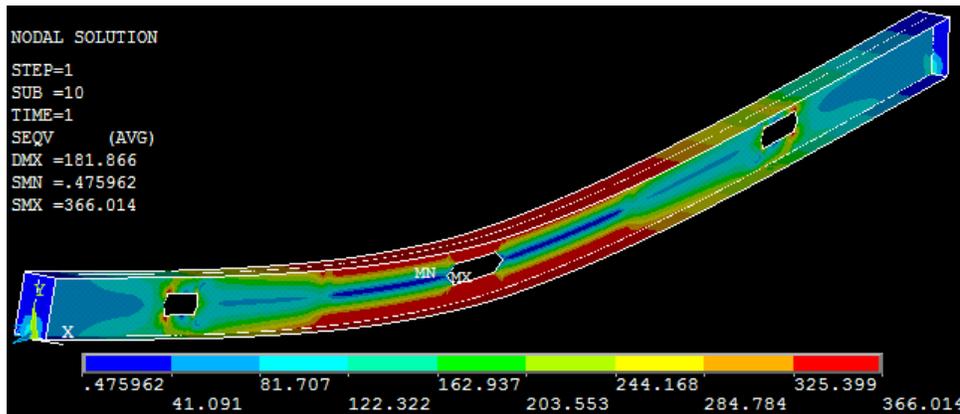


Figura 5.26 - Simulação da viga W200 + chapa de 100 mm, com três aberturas, Von Mises Stress

Para a configuração número um com chapas de expansão e três aberturas, tem-se as seguintes curvas de resistência da Figura 5.27.

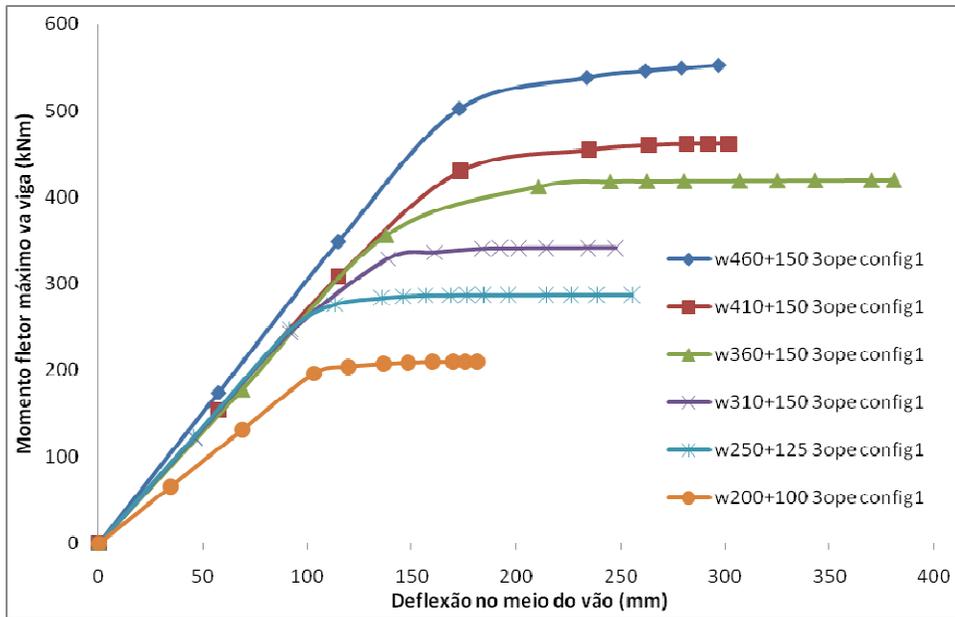


Figura 5.27 – Curvas de resistência dos perfis com chapa de expansão e três aberturas para a configuração 1

Os comprimentos e alturas das aberturas desta configuração não acarretaram em falha, sendo todas devido a deformações plásticas nas mesas.

Os resultados das simulações das vigas com chapas de expansão para a segunda configuração, a de aberturas com comprimentos exagerados, podem ser vistos na Figura 5.28.

Para esta configuração apenas o menor perfil, W200, teve falha devido às aberturas onde há a interação de momento fletor e esforço cortante, desenvolvendo as quatro rótulas plásticas do mecanismo de Vierendeel.

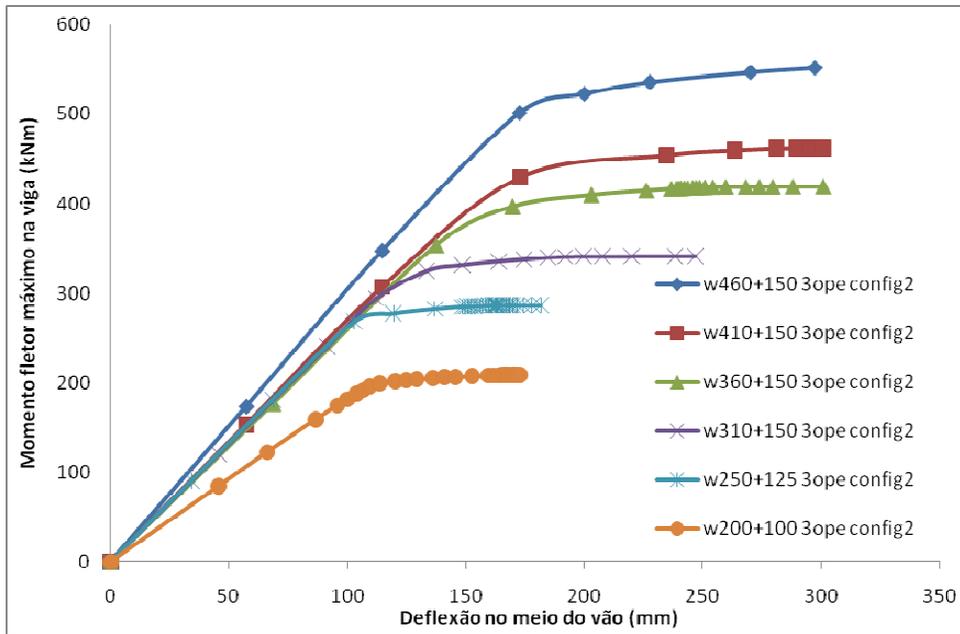


Figura 5.28 – Curvas de resistência dos perfis mais chapa de expansão com três aberturas para a configuração 2

O perfil W250 desenvolveu duas rótulas apenas nos lados de menor momento (LMS) das aberturas, mas com falha nas mesas, como mostra a Figura 5.29.

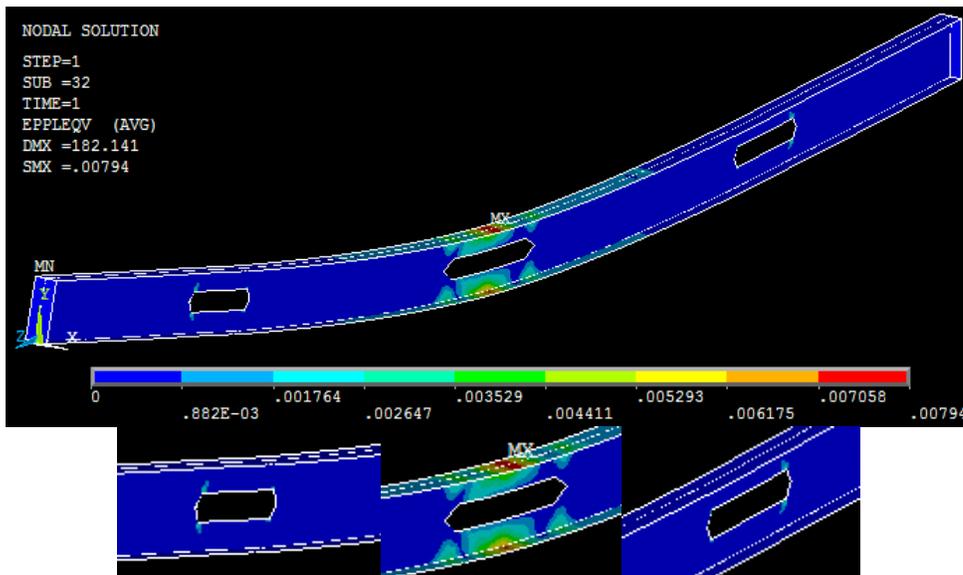


Figura 5.29 - Plastificação no lado de menor momento para perfil W250 para configuração 2

Os demais perfis tiveram falha nas mesas, com propagação plástica através da alma para a abertura central.

Nas duas configurações, um e dois, vemos que a resistência sofre pouca alteração mesmo possuindo comprimentos bem diferentes, sugerindo que comprimentos maiores podem ser utilizados quando devidamente estudados.

5.2.2.4. Viga Litzka

Conforme geometria ilustrada pela Figura 2.10, as vigas Litzka foram modeladas utilizando-se dos comprimentos das vigas originais, portanto, resultando em um comprimento final ligeiramente menor, pelas sobras que resultam do processo de fabricação em questão. A ilustração de um modelo de viga Litzka é visualizada na Figura 5.30.

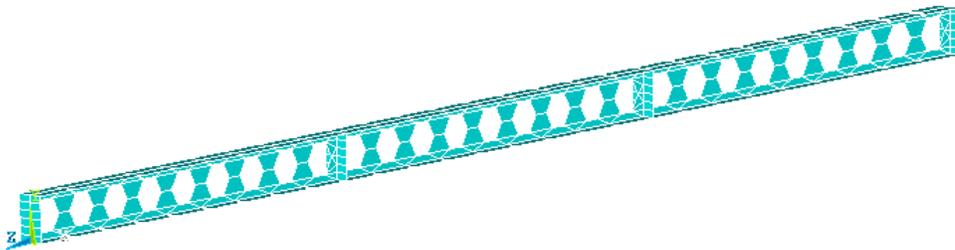


Figura 5.30 - Modelo de viga Litzka W200 (áreas), com 27 aberturas

A Figura 5.31 mostra a resistências de cada uma dessas vigas modeladas conforme a fabricação descrita, assim como ângulos utilizados e quantidade de aberturas para cada perfil. Estas vigas ficam caracterizadas pela baixa ductilidade, que é notada pela linearidade brusca após o escoamento do regime elástico.

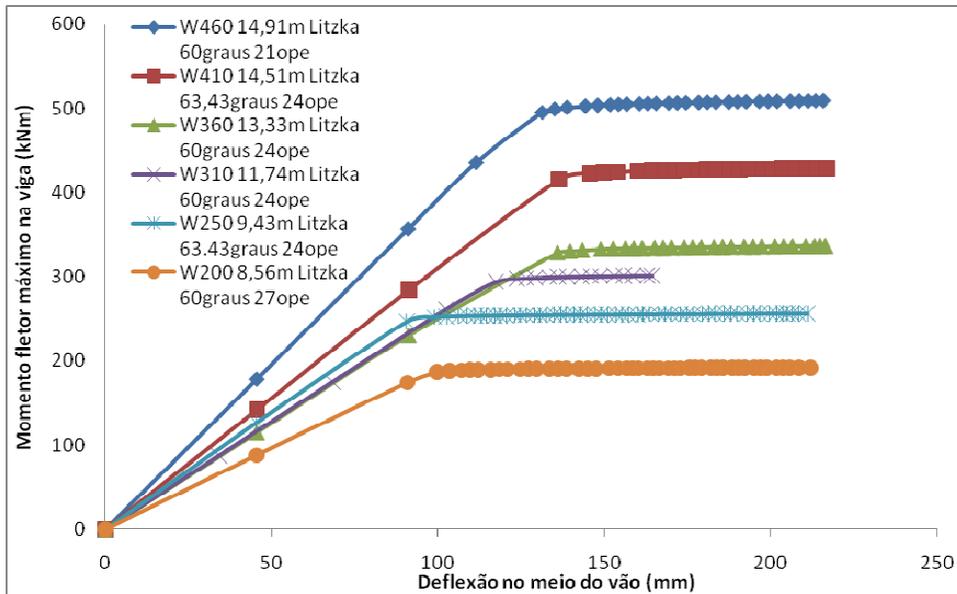


Figura 5.31 – Curvas de resistência dos perfis em forma de viga Litzka

Percebe-se uma constância no aumento de resistência com o aumento das dimensões dos perfis, com exceção do perfil W250 que possui mesas e alma mais espessas que o perfil W310, características que melhoraram seu desempenho na fase elástica em relação ao próximo perfil em ordem crescente.

Este estudo comprovou a penalidade das aberturas em vigas sem expansão, as quais desenvolveram quatro rótulas plásticas do mecanismo de Vierendeel na maioria dos perfis menores onde a altura da abertura era aproximadamente 50% da altura do perfil, quando adicionado a comprimentos de até quatro vezes essa altura. Já para as os perfis maiores, também sem a chapa de expansão, a falha ocorreu nas mesas.

Pelos modelos expandidos por chapa terem a relação entre altura da abertura e altura total do perfil diminuída, o efeito das aberturas sobre as vigas foi amenizado. A maioria das falhas ocorreram no terço médio, por esforços exagerados de momento fletor.

As vigas com abertura de comprimentos exagerados falharam pelo mecanismo de Vierendeel como previsto pelo dimensionamento de Chung *et al* [5], [6] e Redwood [15].

As vigas Litzka, na forma original, atingiram valores de resistência semelhantes as das vigas com chapa da expansão, mas demonstraram ter a ductilidade reduzida, sugerindo reforços nas aberturas mais críticas.