



MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS DE VIGAS DE AÇO CASTELADAS E VIGAS CASTELADAS EXPANDIDAS

Bruno Vicente Dias

Sebastião Arthur Lopes de Andrade

brunovdias@aluno.puc-rio.br

andrade@puc-rio.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil

Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

luciano@eng.uerj.br

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Departamento de Estruturas e Fundações, FEN/UERJ, Rio de Janeiro, Brasil

Resumo. As vigas de aço com abertura de alma propiciam a passagem de tubulações de serviços e instalações, fornecendo boa capacidade de resistência aos esforços cortantes. As vigas casteladas e as vigas celulares apresentam limitações de dimensões da abertura que estão ligadas à altura do perfil base, geralmente produzindo-se um perfil 50% maior em altura. Neste trabalho, são estudadas as vigas casteladas expandidas em altura, através da soldagem de uma chapa complementar de alma, de modo a se obter vigas de maior inércia, mais leves e com maiores aberturas. O presente trabalho aborda os resultados obtidos através da modelagem por elementos finitos com análise não linear física e geométrica, com vistas a investigação do comportamento estrutural quanto a resistência da seção transversal e rigidez visando-se a redução de custos de fabricação pela eliminação da soldagem de chapas de reforço na região da abertura.

Palavras-chave: Estruturas de aço, Análise não linear, Vigas com abertura na alma, Vigas Casteladas, Vigas casteladas expandidas.

1 INTRODUÇÃO

A busca por uma construção sustentável tem motivado o uso de soluções econômicas que racionalizem o aproveitamento de espaço, materiais e mão de obra. A construção industrializada presente no Brasil tem buscado a racionalização em vários níveis do processo construtivo.

A fim de se obter um melhor aproveitamento do espaço vertical viabilizando novos aspectos arquitetônicos, ou até mesmo criação de novos pavimentos sem interferir no regulamento de zoneamento urbano, reduzindo o volume e a área total de construção objetivando diminuir os custos de execução e posteriormente, facilitar a manutenção, torna-se necessário a redução do gabarito da edificação. Uma forma convencional de reduzir a altura de edifícios é a execução de aberturas nas vigas para a passagem de tubulações de serviço.

Em vigas de aço e mistas, estas aberturas são executadas na alma do perfil e podem representar um aumento de até 75% em relação a altura original da viga (Figura 1). Contudo, grandes aberturas na alma de vigas de aço podem acarretar penalidades na capacidade da estrutura, mas isto também depende da forma, tamanho e posição das aberturas.



Figura 1 – Vigas mistas com aberturas na alma (steelconstruction.info, 2017)

Frequentemente, são utilizadas aberturas circulares e retangulares, podendo ou não haver reforços, já que muitas vezes a presença de aberturas pode reduzir a capacidade resistente e a rigidez das vigas e também devido a dificuldade para a determinação real dos esforços.

Os cantos das aberturas retangulares são normalmente arredondados a fim de minimizar os efeitos de concentração de tensões.

Vigas celulares (Figura 1) e casteladas (Figura 2) são alguns exemplos de utilização de aberturas. Estas vigas surgiram do desdobramento de perfis de alma cheia I ou H laminados. A principal característica destas vigas é o incremento de resistência no perfil original, com aumento de sua altura, sem alteração do peso.



Figura 2 – Vigamento do estacionamento do Shopping Tijuca, Rio de Janeiro

O processo resulta em vigas mais resistentes e menos sensíveis a deformações, bem como mais leves e indicadas para maiores vãos, permitindo a redução do número de pilares e fundações. Tais aberturas permitem a passagem de tubulações de serviço, reduzindo o espaço estrutural.

2 MODELAGEM COMPUTACIONAL

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver modelos numéricos, através do método dos elementos finitos, de vigas casteladas e vigas casteladas expandidas na alma através de chapa soldada, permitindo, com a colocação de imperfeições geométricas, efetuar uma análise não linear, a fim de simular seu comportamento estrutural, verificando a formação de mecanismos de colapso.

Inicialmente, são calibrados modelos de vigas casteladas com modelos experimentais existentes na literatura e com o modelo calibrado, foram adotadas cinco configurações diferentes para vinte perfis existentes no catálogo da Gerdau Açominas (2016): viga formada com perfil original antes do processo de fabricação; viga castelada, viga de alma cheia com altura equivalente à castelada; viga castelada expandida em altura através de chapa e; viga de alma cheia com altura equivalente à castelada expandida.

Estes modelos foram simulados e estudados com o objetivo de se entender o ganho de resistência, principalmente, nas seções das vigas casteladas e casteladas expandidas.

2.1 Modelo experimental de calibração

A calibração do modelo numérico foi idealizada baseada nos dados experimentais obtidos através de ensaios realizados no trabalho experimental de Zirakian e Showkati (2006) e levando em consideração as premissas do modelo numérico de Ellobody (2012).

Zirakian e Showkati (2006) elaboraram ensaios experimentais utilizando perfis laminados IPE12 e IPE14 com três variações de comprimento para cada perfil a fim de estudar a flambagem lateral por torção de vigas de aço casteladas. Na publicação constam as curvas de carga *versus* deslocamento lateral e carga *versus* deformações de vigas com 3600 mm de comprimento formadas a partir de cada perfil. Na Tabela 1 são indicadas as características geométricas das vigas e na Tabela 2 são apresentadas as propriedades mecânicas do material dos perfis empregados na configuração castelada, obtidas em laboratório.

Tabela 1 – Propriedades geométricas dos protótipos ensaiados (Zirakian e Showkati, 2006)

Perfil Original	Perfil Castelada	h (mm)	b (mm)	t (mm)	s (mm)	r (mm)	L (mm)
IPE12	C180-3600	180	64	6,3	4,4	7	3600
IPE14	C210-3600	210	73	6,9	4,7	7	3600

Tabela 2 – Características físicas dos perfis (Zirakian e Showkati, 2006)

		C180-3600	C210-3600
Mesas	Tensão de escoamento (MPa)	279,31	280,29
	Tensão de ruína (MPa)	894,35	1002,91
Alma	Tensão de escoamento (MPa)	233,93	332,03
	Tensão de ruína (MPa)	892,23	671,16

Para calibração do modelo numérico de vigas casteladas, foi adotado o modelo com perfil C180-3600. Este modelo constitui uma viga castelada simplesmente apoiada submetida a carregamento aplicado no meio do vão.

O carregamento foi feito por uma prensa de 600 kN com um sistema hidráulico e a carga foi aplicada através de um cubo de aço de dimensões 100x100x100 mm no topo da mesa comprimida, sendo este devidamente travado. Devido a influência do cisalhamento entre o cubo e a mesa, as deflexões laterais, torções, rotações no meio do vão e flambagem local devido a concentração dos esforços foram impedidas na mesa superior.

Foram adotados sistemas de travamentos laterais a 165 mm do apoio que incluíam dois membros dos dois lados da viga. Adicionalmente, nos apoios, foram projetados e soldados enrijecedores apropriados na alma e nas duas mesas para garantir que cisalhamento e problemas de instabilidade da alma fossem evitados nestes locais. O arranjo experimental e a configuração das aberturas das vigas casteladas estão ilustrados na Figura 3 e na Figura 4, respectivamente.

E na Figura 5 são expostos o modelo experimental, o ponto de carregamento e a configuração dos travamentos.

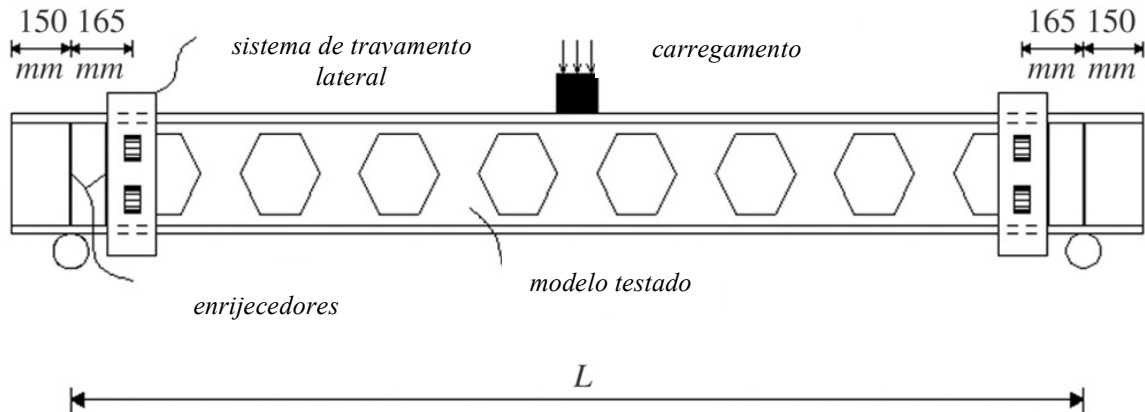


Figura 3 – Arranjo experimental (Zirakian e Showkati, 2006)

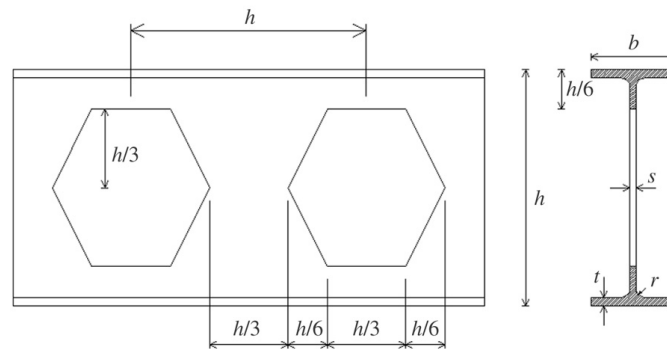


Figura 4 – Configuração das aberturas (Zirakian e Showkati, 2006)



(a) Visão geral

(b) Ponto de carregamento

(c) Travamentos

Figura 5 – Modelo experimental (Zirakian e Showkati, 2006)

A viga foi instrumentada em três diferentes pontos da seção transversal: na mesa inferior, no meio da alma e na mesa superior; de modo a fornecer as deformações, tensões, os deslocamentos laterais e as distorções no meio e a um quarto do vão. As vigas flambaram

lateralmente, mas não foi verificada a flambagem do montante da alma em nenhum dos testes. Devido às diferenças nos deslocamentos laterais, a distorção verificada na alma foi medida.

Ellobody (2012) publicou um trabalho a fim de investigar a concepção e o comportamento de vigas casteladas com variação na resistência dos aços utilizados. Em seu trabalho, foi realizado um estudo paramétrico desenvolvido através de uma análise de elementos finitos partindo dos estudos experimentais de Zirakian e Showkati (2006). O modelo apresenta geometria e propriedades do material para mesa e alma conforme os testes e foram incorporadas imperfeições geométricas iniciais e tensões residuais. Em seu trabalho, foram usados elementos de casca de 4 e 3 nós de segunda ordem com integração reduzida e a escolha da malha de elementos finitos foi definida a fim de obter acurácia nos resultados com mínimo tempo computacional e foi baseada em um estudo de convergência já que a flambagem lateral de vigas casteladas é muito sensível a grandes deformações. Considerou-se também o impedimento dos deslocamentos laterais no ponto de aplicação de carga e a 165 mm do vão conforme os testes realizados em laboratório; a carga foi aplicada em incrementos de carga estática concentrada ao longo do bloco de espraio; e o parâmetro de não linearidade foi incluído de acordo com análise de grandes deslocamentos. Adotou-se uma curva de tensão-deformação para o aço estrutural retirada do Eurocode 3 (BSI, 2005), 200 GPa para o módulo de elasticidade e 0,3 para o coeficiente de Poisson. Antes da aplicação do carregamento, foi definida uma carga inicial para garantir o equilíbrio das tensões residuais. O modelo de elementos finitos proposto é ilustrado na Figura 6.

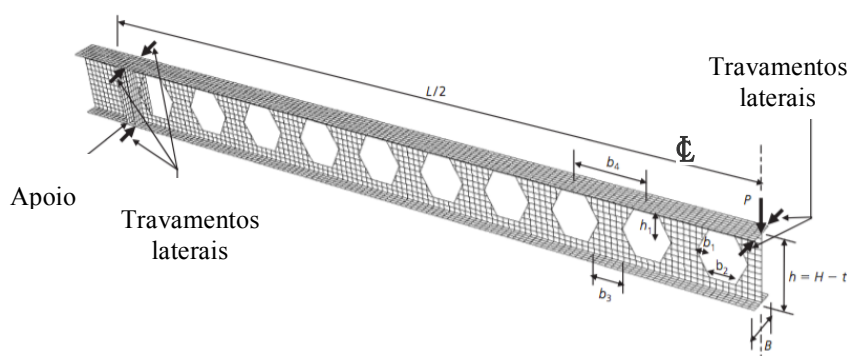


Figura 6 – Modelo de elementos finitos de Ellobody (2012)

2.2 Modelo Numérico

Com base no estudo de Zirakian e Showkati (2006), é proposto no presente trabalho, um modelo de calibração para a viga perfilada com perfil C180-3600. As dimensões, carregamentos, condições de apoio, características do material e tensões de escoamento e ruína utilizadas estão de acordo com os testes realizados.

Os modelos numéricos propostos são constituídos de elementos casca SHELL181 presente na biblioteca do *software* Ansys 15 (2013).

O elemento SHELL181 é adequado para análise de estruturas caracterizadas por cascas que apresentam espessuras finas e médias. Este elemento 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. As formas de deformação são lineares nas duas direções em plano, para o movimento fora

do plano, usa-se uma interpolação mista de componentes de tensores. 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 7, são mostrados os aspectos do elemento SHELL181.

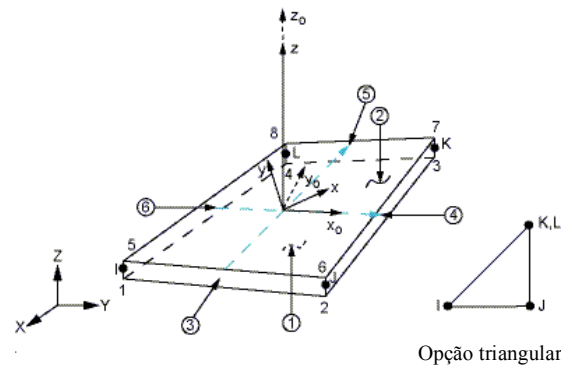


Figura 7 – Elemento SHELL181 (Ansys 15, 2013)

A modelagem da viga C180-3600 foi esquematizada de forma a facilitar o processo de criação de áreas ao redor das aberturas, para isto, foram criados os pontos, linhas e áreas da região com 150 mm que compreende o primeiro apoio da viga e em seguida uma célula que compreende a primeira abertura adjacente a este apoio. Nesta célula, já consta o ponto que dista 165 mm do apoio a fim de facilitar a colocação das restrições posteriormente.

Com este trecho pronto, as linhas da geometria foram divididas de forma a garantir uma malha refinada nesta região e a primeira célula foi replicada longitudinalmente gerando as 20 células que correspondem a 3600 mm de comprimento. Nota-se então, que a medida de uma célula é múltipla de seu comprimento e equivale a altura do perfil da castelada.

Posteriormente, foi criado o restante da viga que compreende o segundo apoio e os enrijecedores verticais de apoio. A criação da região do apoio com a primeira célula e a geometria completa estão ilustrados na Figura 8.

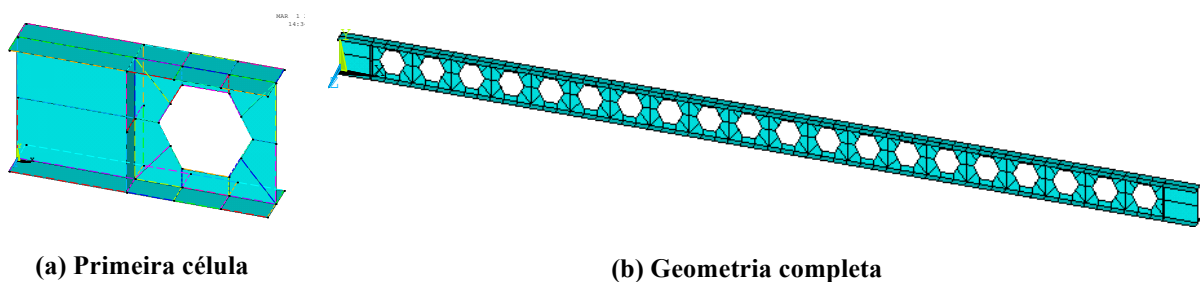


Figura 8 – Geometria do modelo para C180-3600

Uma vez gerada a geometria da viga C180-3600, deu-se início o processo de criação da malha de elementos finitos mostrada na Figura 9-a. A divisão e o esquema das linhas foram cuidadosamente estudados para que a malha ficasse de forma uniforme já que há necessidade de seu refinamento devido a regiões que caracterizam acúmulo de tensões. Com a malha definida, os apoios e o ponto de aplicação de carga das vigas foram simulados através de restrições dos graus de liberdade pertinentes. Para representar os apoios, foi selecionada a linha inferior do enrijecedor vertical de apoio e restringiu-se o deslocamento conforme desejado, ou

seja, na direção X e Y no primeiro apoio e na direção Y para o segundo apoio, de forma que a viga fique com a configuração de simplesmente apoiada, conforme o ensaio. Adicionalmente, selecionou-se pontos na mesa inferior e superior que distam 165 mm dos apoios para dentro do vão da viga e também pontos na mesa superior no meio do vão aonde é aplicada a carga a fim de travar lateralmente a viga para que não ocorresse deslocamento de corpo rígido conforme Figura 9-b.

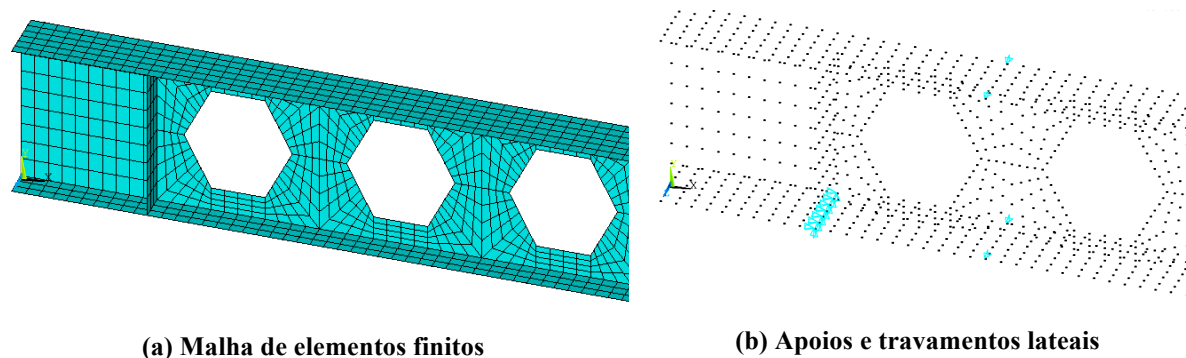


Figura 9 – Malha de condições de contorno para C180-3600

O carregamento foi aplicado diretamente no nó situado no meio do vão no sentido negativo de Y e foram incorporadas imperfeições geométricas através da análise de autovalores. O modo de flambagem correspondente ao primeiro autovalor está indicado na Figura 10-a. O primeiro modo foi adotado para análise por fornecer a deformada equivalente a flambagem lateral caracterizado pelo deslocamento para fora do plano que ocorre no modelo experimental de Zirakian e Showkati (2006). Na Figura 10-b pode ser observada a deformação que ocorreu na alma durante o teste.

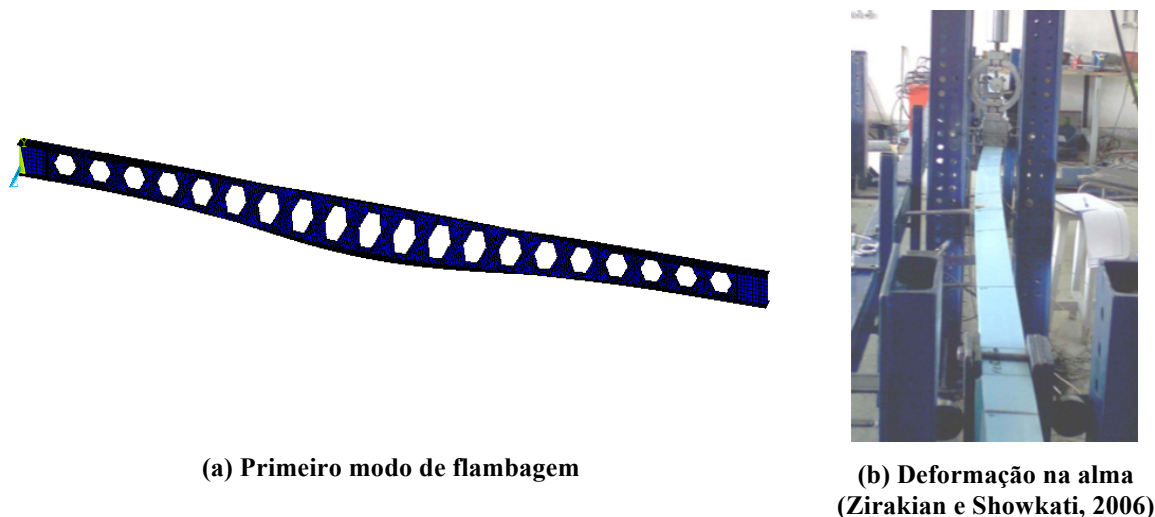


Figura 10 – Estudo do modo de falha da viga C180-3600

2.3 Resultados

A fim de validar o modelo proposto, foram comparadas as curvas de deslocamento lateral no quarto do vão *versus* a carga aplicada conforme Figura 11. As siglas T.7, T.8 e T.9 indicam

respectivamente as leituras dos transdutores de deslocamento no topo, no meio e na base da seção localizada à um quarto do vão da viga testada experimentalmente e as siglas UZ_T, UZ_M, UZ_B indicam respectivamente, os deslocamentos na direção Z para topo, meio e base da mesma seção representada no modelo de elementos finitos.

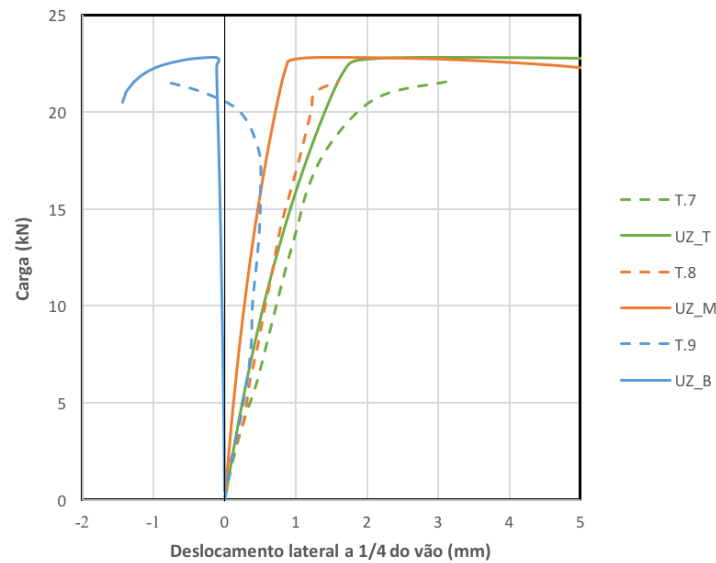


Figura 11 – Deslocamento lateral no quarto do vão versus carga crítica

As tensões de *von Mises* e deformações plásticas no meio do vão para o modelo de elementos finitos da viga C180-3600 estão representados na Figura 12 para uma carga P_o aplicada no meio do vão de 20,48 kN. Observa-se que os valores obtidos através dos modelos numéricos são um pouco mais rígidos, mas o valor de carga máxima é bem próximo do valor obtido no ensaio experimental. Como o escopo deste trabalho é avaliar a capacidade de carga de vigas casteladas, pode-se confirmar que este modelo serve de base para o desenvolvimento de uma análise paramétrica. O comportamento da viga representada no modelo numérico assemelha-se ao comportamento observado na Figura 10-b no teste experimental.

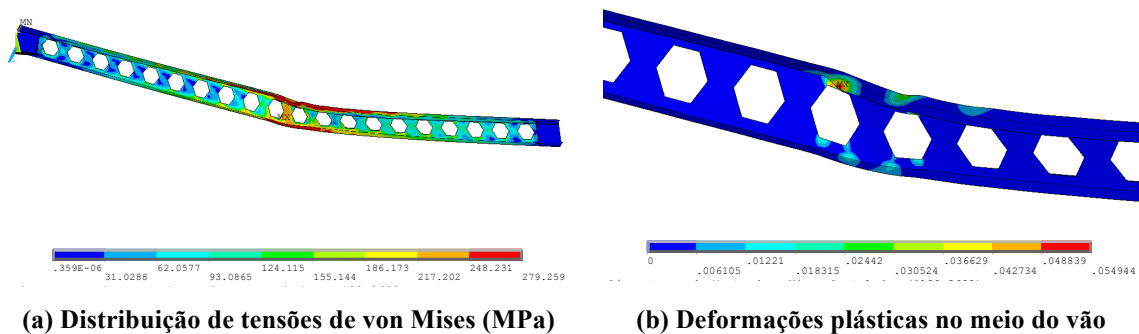


Figura 12 – Resultados gráficos para C180-3600 ($P_o = 20,48$ kN)

3 ESTUDO PARAMÉTRICO

A partir da calibração do modelo de Zirakian e Showkati (2006), foram escolhidos perfis com diferentes bitolas presentes no catálogo da Gerdau Açominas (2016) e para cada perfil considerou-se cinco configurações:

- viga formada com perfil original antes do processo de fabricação;
- viga castelada;
- viga de alma cheia com altura equivalente à castelada;
- viga castelada expandida em altura através de chapa e;
- viga de alma cheia com altura equivalente à castelada expandida.

As vigas de alma cheia com altura equivalente às casteladas e às casteladas expandida possuem as mesmas dimensões das seções transversais das vigas castelada e castelada expandida com as aberturas preenchidas.

Não houve preocupação com a variação do comprimento da viga tendo em vista que o objetivo foi avaliar o comportamento e resistência da seção, então as vigas foram limitadas a no máximo cinco metros e idealizadas de forma que o carregamento pudesse ser colocado no meio do vão, ou seja, vigas com um número par de aberturas.

Foram realizadas duas etapas distintas. Na primeira etapa foram avaliadas cinco seções diferentes com as respectivas variações citadas anteriormente. Na segunda etapa, o escopo foi aumentado para vinte seções diferentes com as variáveis consideradas pertinentes na Etapa 1. Foram avaliados cem modelos na Etapa 2.

3.1 Etapa 1

O primeiro perfil escolhido para a análise realizada na primeira etapa foi o perfil W310x38,7 e para definir o comprimento do vão L da viga, o valor de $1,5d$, onde d é a altura original da viga, foi replicado a quantidade de vezes necessária de forma que se obtivesse um valor inferior a 5 metros com um número par de aberturas, formando assim, uma viga de 4,65 metros com dez aberturas. Com isto, pode-se definir as demais configurações para este perfil.

Com o objetivo de evitar a flambagem local no montante da alma, foram introduzidos enrijecedores transversais no ponto de aplicação de carga já que os perfis IPE12 e IPE14, utilizados no trabalho de Zirakian e Showkati (2006), são bem menores que o perfil W310x38,7. Foram também incorporados travamentos a fim de evitar o deslocamento para fora do plano. A modelagem da geometria da viga castelada foi feita a partir do modelo C180-3600 de calibração. A programação foi organizada de forma parametrizada, facilitando a geração dos demais modelos.

A alma da viga foi expandida em um dos modelos a partir da configuração castelada (configuração castelada expandida). Esta expansão ocorre através de uma chapa de 150 milímetros de altura com mesma espessura da alma. Este modelo da castelada expandida, a chapa corre por toda a viga.

Na Figura 13 são apresentadas as cinco configurações para o perfil W310x38,7. Os cinco modelos foram processados e os resultados obtidos são apresentados na Figura 14 em um

gráfico de momento normalizado *versus* deslocamento no centro do vão. Os valores de momento foram divididos pelo valor do momento de plastificação teórico, M_p , das vigas de alma cheia na configuração original, sendo expressos de forma adimensional para melhor entendimento do ganho de resistência de uma configuração em relação a outra.

Como era de se esperar, a viga na configuração original (VORIG) falha por plastificação completa da seção no meio do vão. E para este perfil, na viga castelada (VCAST) ocorre mecanismo *Vierendell* ilustrado na Figura 15.

O mesmo que ocorreu para os perfis de alma cheia (VORIG) e perfurado (VCAST), ocorre para os perfis de alma cheia e de alma perfurada nas configurações de alma cheia com altura equivalente à castelada (VACCT) e castelada expandida (VCEXP), respectivamente. O fenômeno do mecanismo *Vierendell* que ocorre na VCEXP pode ser observado na Figura 16.

Nota-se que, após a carga última, ocorre uma queda brusca na curva de resistência para a viga de alma cheia com altura equivalente à castelada expandida (VACCE). Observa-se também um ganho considerável de resistência nas vigas expandidas na alma com a chapa.

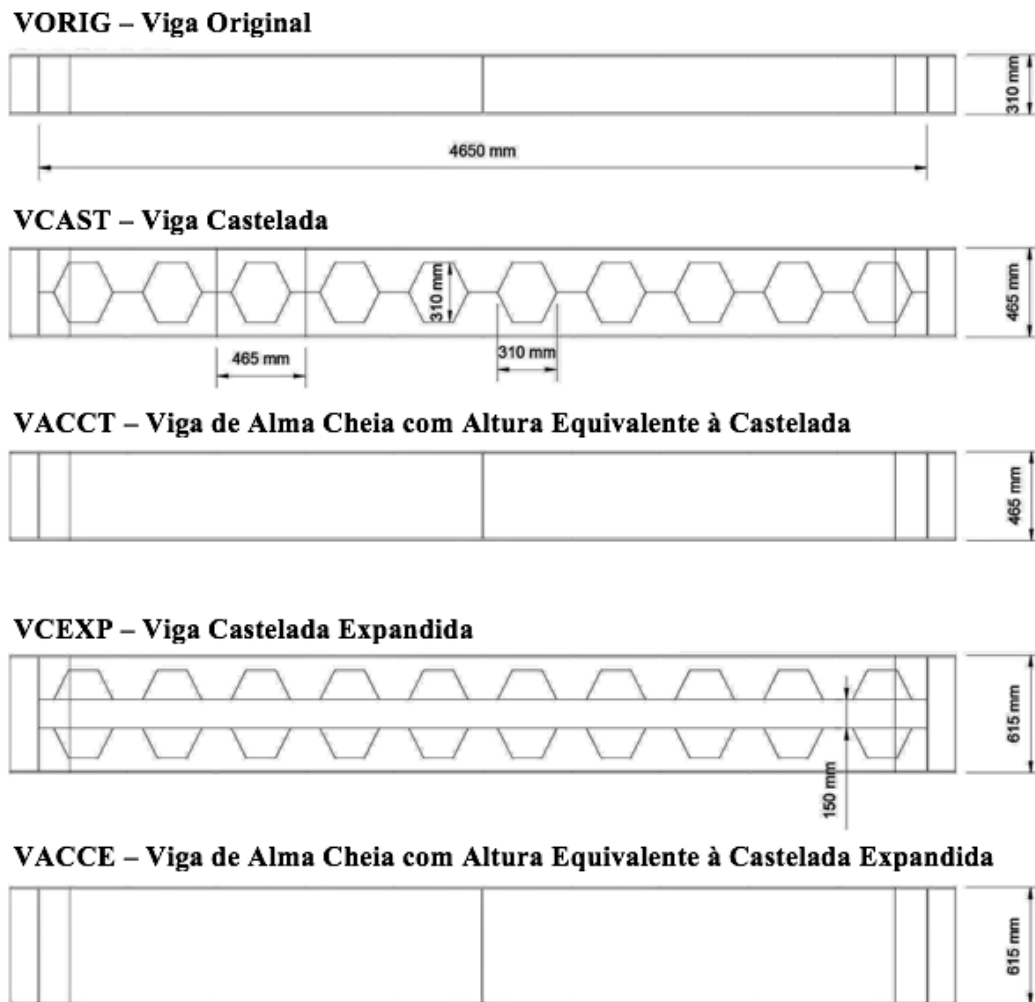


Figura 13 – Configurações para W310x38,7

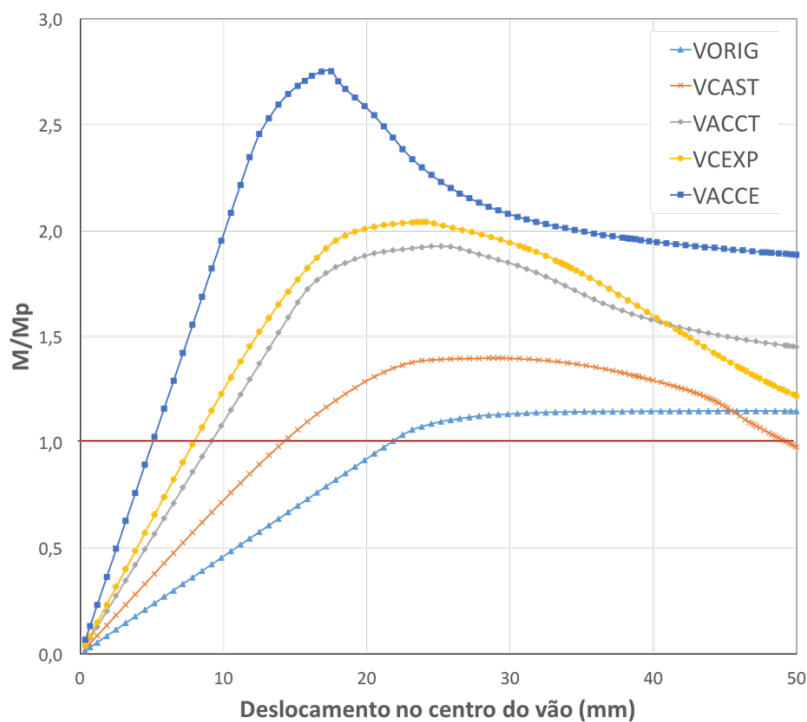
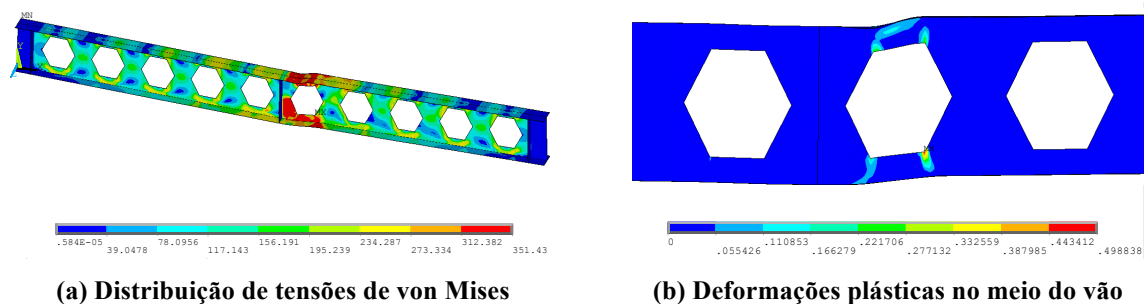


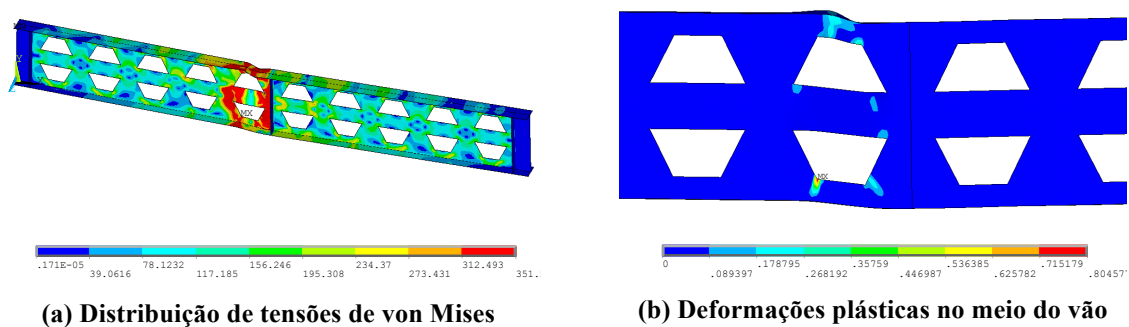
Figura 14 – Carga versus deslocamento para W310x38,7



(a) Distribuição de tensões de von Mises

(b) Deformações plásticas no meio do vão

Figura 15 – Resultados gráficos para W310x38,7 - VCAST



(a) Distribuição de tensões de von Mises

(b) Deformações plásticas no meio do vão

Figura 16 – Resultados gráficos para W310x38,7 - VCEXP

Ainda na primeira etapa, após a análise do comportamento estrutural das vigas de aço castelladas e castelladas com chapa de expansão para o perfil W310x38,7, foram escolhidos outros quatro perfis a fim de variar significativamente o peso do elemento e as dimensões de mesa e alma. Na Tabela 3 são apresentadas as características dos perfis analisados e na Tabela 4 são indicados os valores de carga máxima e carga de escoamento com seus respectivos deslocamentos para os perfis adotados na Etapa 1.

Tabela 3 – Perfis adotados na Etapa 1

Bitola (mm x kg/m)	d (mm)	b (mm)	t _w (mm)	t _f (mm)	L (mm)
W200x35,9 (H)	201	165	6,2	10,2	4824
W310x38,7	310	165	5,8	9,7	4650
W310x44,5	313	166	6,6	11,2	4695
W360x44,0	352	171	6,9	9,8	4224
W410x38,8	399	140	6,4	8,8	4788

Nota-se que, em todos os casos, os perfis de bitolas W310x44,5 e W360x44 apresentam resistências bem próximas e o perfil W410x38,8 apresentou menor ganho de resistência. Isto pode ter ocorrido porque o acréscimo de altura para este perfil deixou a geometria com uma alma muito esbelta e uma mesa muito curta. Com a altura mais elevada, a instabilidade é mais acentuada.

3.2 Etapa 2

Após analisar o comportamento e a resistência da seção para diferentes bitolas com diferentes configurações, foram listados mais quinze perfis além dos cinco adotados na Etapa 1. Esta escolha priorizou inicialmente uma grande variação do comprimento das mesas, já que com a chapa, é possível obter vigas mais esbeltas. A Tabela 5 apresenta as características das diferentes bitolas analisadas.

Como observado anteriormente, as vigas constituídas com o perfil W410x38,8 apresentaram menores resistências que as demais bitolas. Portanto, não se justifica escolher perfis mais pesados que este, mas somente um foi selecionado com uma mesa mais larga objetivando verificar este comportamento.

Os comprimentos das vigas W250x17,9, W250x25,3 e W310x23,8 são bem menores para evitar o efeito de flambagem lateral por torção.

Posteriormente, em termos das resistências máximas atingidas numericamente nos cem modelos desenvolvidos, são apresentados os resultados obtidos avaliando-se o desempenho estrutural, a resistência e o peso da estrutura.

Tabela 4 – Comparação entre os perfis adotados na Etapa 1

Bitola (mm x kg/m)	Configuração	Valores Máximos		Valores de Escoamento	
		Carga (kN)	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	Deslocamento (mm)
W200x35,9 (H)	VORIG	134,38	50,00	128,32	38,50
	VCAST	179,08	37,17	170,28	29,17
	VACCT	222,99	49,58	203,77	25,17
	VCEXP	306,11	34,50	283,70	20,50
	VACCE	373,63	29,17	346,33	18,50
W310x38,7	VORIG	219,34	46,50	209,65	25,17
	VCAST	266,91	29,17	250,03	20,50
	VACCT	367,82	25,17	337,22	16,50
	VCEXP	389,86	23,83	365,91	17,17
	VACCE	525,97	17,50	505,34	14,50
W310x44,5	VORIG	255,46	47,83	240,42	24,50
	VCAST	311,31	30,50	304,87	23,17
	VACCT	429,53	27,83	398,26	17,17
	VCEXP	455,00	27,83	440,72	19,17
	VACCE	617,97	19,17	584,89	14,50
W360x44,0	VORIG	279,38	36,50	253,18	17,17
	VCAST	326,37	26,12	314,97	17,49
	VACCT	477,67	19,94	431,02	12,50
	VCEXP	458,85	23,72	440,48	15,28
	VACCE	666,49	14,50	606,52	10,50
W410x38,8	VORIG	258,25	32,06	233,81	19,50
	VCAST	311,66	27,24	295,49	16,57
	VACCT	449,25	19,63	433,40	16,00
	VCEXP	418,48	22,45	384,58	14,12
	VACCE	604,53	14,25	573,22	12,25

Tabela 5 – Perfis adotados para Etapa 2

Bitola (mm x kg/m)	d (mm)	b (mm)	t _w (mm)	t _f (mm)	L (mm)
W150x18,0	153,0	102,0	5,8	7,1	4590
W150x22,5 (H)	152,0	152,0	5,8	6,6	4560
W200x15,0	200,0	100,0	4,3	5,2	4800
W200x31,3	210,0	134,0	6,4	10,2	4410
W200x35,9 (H)	201,0	165,0	6,2	10,2	4824
W200x46,1 (H)	203,0	203,0	7,2	11,0	4872
W250x17,9	251,0	101,0	4,8	5,3	3765
W250x25,3	257,0	102,0	6,1	8,4	3855
W250x32,7	258,0	146,0	6,1	9,1	4644
W250x73,0 (H)	253,0	254,0	8,6	14,2	4554
W310x23,8	305,0	101,0	5,6	6,7	3660
W310x38,7	310,0	165,0	5,8	9,7	4650
W310x44,5	313,0	166,0	6,6	11,2	4695
W310x97,0 (H)	308,0	305,0	9,9	15,4	4620
W360x32,9	349,0	127,0	5,8	8,5	4188
W360x44,0	352,0	171,0	6,9	9,8	4224
W360x64,0	347,0	203,0	7,7	13,5	4164
W360x91,0 (H)	353,0	254,0	9,5	16,4	4236
W410x38,8	399,0	140,0	6,4	8,8	4788
W410x53,0	403,0	177,0	7,5	10,9	4836

3.3 Análise dos Resultados

Avaliação do desempenho estrutural. O incremento do módulo resistente da seção transversal em relação ao perfil original torna-se importante à medida que permite utilizar perfis mais leves para resistir ao mesmo momento fletor. Na Figura 17 é ilustrado este ganho.

Observa-se que com a chapa de expansão pode-se obter um ganho significativo em relação ao perfil original, mas ainda assim, a configuração castelada possui um incremento maior.

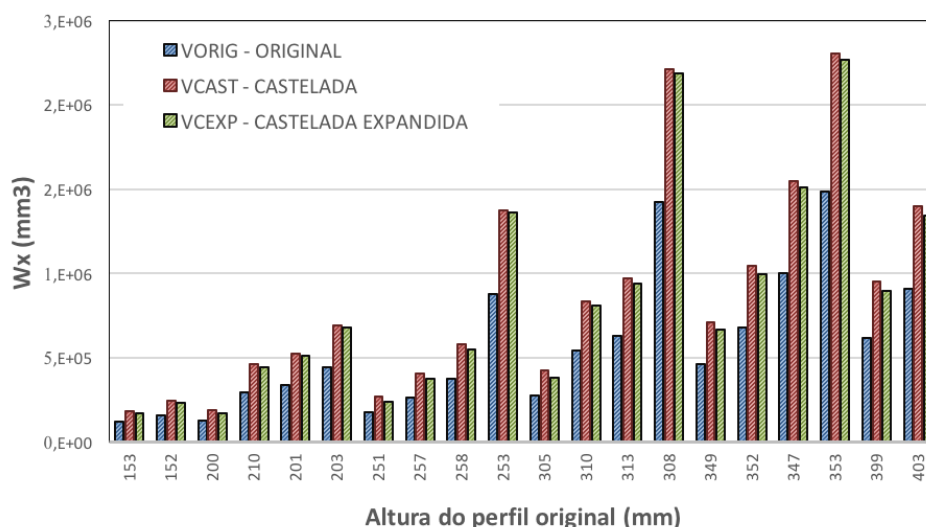


Figura 17 – Incremento do módulo resistente elástico

Observa-se que com a chapa de expansão pode-se obter um ganho significativo em relação ao perfil original, mas ainda assim, a configuração castelada possui um incremento maior. O ganho de rendimento à flexão das vigas casteladas pode ser analisado sob o ponto de vista da resistência através da Eq. (1) ou da deformação com a Eq. (2).

$$R_R = \frac{W_x}{A} \quad (1)$$

$$R_D = \frac{I_x}{A} \quad (2)$$

Na Tabela 6 são indicados os ganhos de rendimento à flexão para as vigas na configuração castelada (VCAST) e castelada expandida (VCEXP) do ponto de vista da resistência e da deformação em relação a configuração original.

É possível observar que as vigas casteladas apresentam um ganho mínimo de 72% do rendimento estrutural à flexão do ponto de vista da resistência, enquanto o ganho mínimo para as casteladas expandidas é de 17% em relação a configuração original.

Do ponto de vista da deformação, o valor mínimo de incremento do rendimento estrutural à flexão é de 158% para a configuração castelada e de 170% para as vigas casteladas expandida. Isto demonstra que estas vigas são mais competitivas nos casos em que a deformação, ou seja, o estado limite de serviço é o fator condicionante do dimensionamento.

Avaliação da resistência. A fim de verificar o ganho de resistência das configurações estudadas em relação a configuração original, na Figura 18 é mostrada uma nuvem de pontos que relaciona os momentos máximos obtidos através do método dos elementos finitos com os momentos teóricos. Para isto, foi necessário estabelecer uma relação momento-curvatura para as vigas.

Tabela 6 – Incremento percentual do rendimento à flexão

Perfil	Castelada		Expandida	
	Resistência	Deformação	Resistência	Deformação
W 150 x 18,0	85%	178%	17%	190%
W 150 x 22,5 (H)	78%	167%	26%	214%
W 200 x 15,0	94%	192%	23%	176%
W 200 x 31,3	80%	170%	35%	199%
W 200 x 35,9 (H)	75%	163%	39%	213%
W 200 x 46,1 (H)	73%	160%	42%	218%
W 250 x 17,9	105%	207%	29%	170%
W 250 x 25,3	97%	195%	33%	176%
W 250 x 32,7	85%	177%	39%	190%
W 250 x 73,0 (H)	72%	158%	48%	210%
W 310 x 23,8	109%	213%	37%	174%
W 310 x 38,7	84%	175%	46%	190%
W 310 x 44,5	83%	175%	46%	190%
W 310 x 97,0 (H)	73%	159%	51%	199%
W 360 x 32,9	98%	198%	46%	183%
W 360 x 44,0	90%	186%	48%	186%
W 360 x 64,0	80%	170%	50%	190%
W 360 x 91,0 (H)	76%	165%	52%	192%
W 410 x 38,8	102%	203%	52%	184%
W 410 x 53,0	93%	189%	53%	186%

As seções das vigas foram classificadas de acordo com a norma canadense CAN/CSA-S16-09. Então, foi considerado os valores de M_{MEF}/M_{pl} para vigas de classes 1 ou 2 e M_{MEF}/M_y para vigas de classes 3 ou 4 de cada perfil estudado em cada configuração proposta. Onde M_{MEF} é o momento máximo obtidos através dos modelos numéricos, M_{pl} é o momento de plastificação e o M_y momento de início de escoamento.

A utilização dos perfis mais baixos transformados em vigas casteladas (VCAST) ou casteladas expandidas (VCEXP) apresentam melhores ganhos de resistência à flexão justamente por apresentarem alturas reduzidas inicialmente e chegarem a um perfil maior com

uma altura que se adapte melhor. Nota-se também que a solução VCEXP sempre apresenta um ganho em relação as VCAST, mesmo que em alguns casos, não ocorra ganho em relação a um perfil de alma cheia com a mesma altura da castelada (VACCT), na configuração castelada equivalente. Tendo em vista isto, na Figura 19 é ilustrado o mesmo gráfico, mas dessa vez, além de relacionar as configurações VCAST e VCEXP com a original (VORIG), foi relacionada também VCEXP com VACCT.

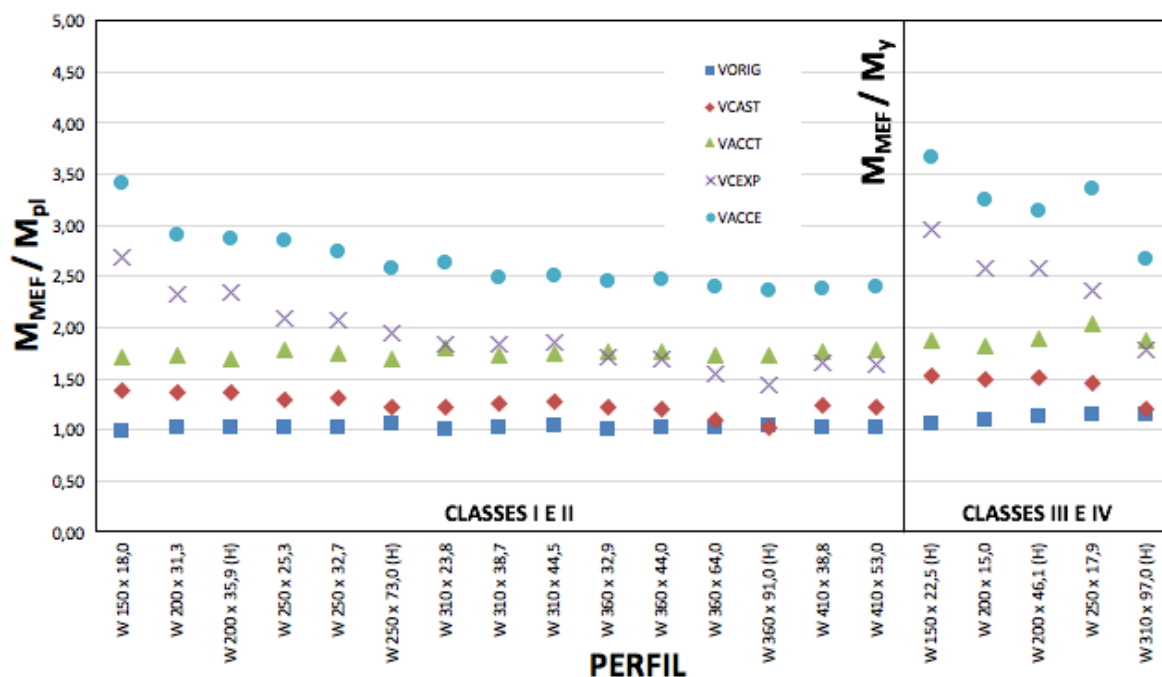


Figura 18 – Momento resistente

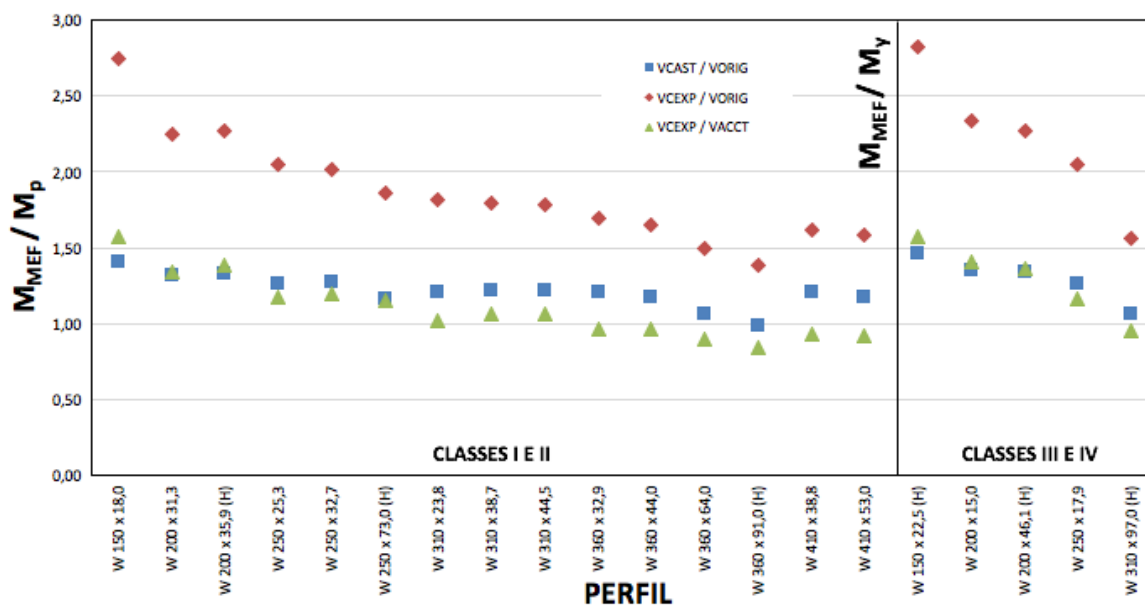


Figura 19 – Relação entre as configurações

Pode-se observar que o ganho da configuração castelada expandida (VCEXP) em relação a viga de alma cheia com altura equivalente à castelada (VACCT) é bem próximo ao ganho da viga castelada (VCAST) em relação a viga original (VORIG), confirmando a vantagem da utilização das vigas casteladas expandidas.

Avaliação do peso da estrutura. Como a VCEXP possui uma resistência bem próxima da VACCT, mas com um peso reduzido, foram verificados o incremento de peso no elemento estrutural de acordo com sua configuração. Na Figura 20 é apresentado uma relação entre a variação de peso com o incremento de resistência em relação a configuração VORIG para as vigas VCAST, VACCT e VCEXP e na Figura 21 é apresentada a variação do peso das VCEXP em relação às VACCT.

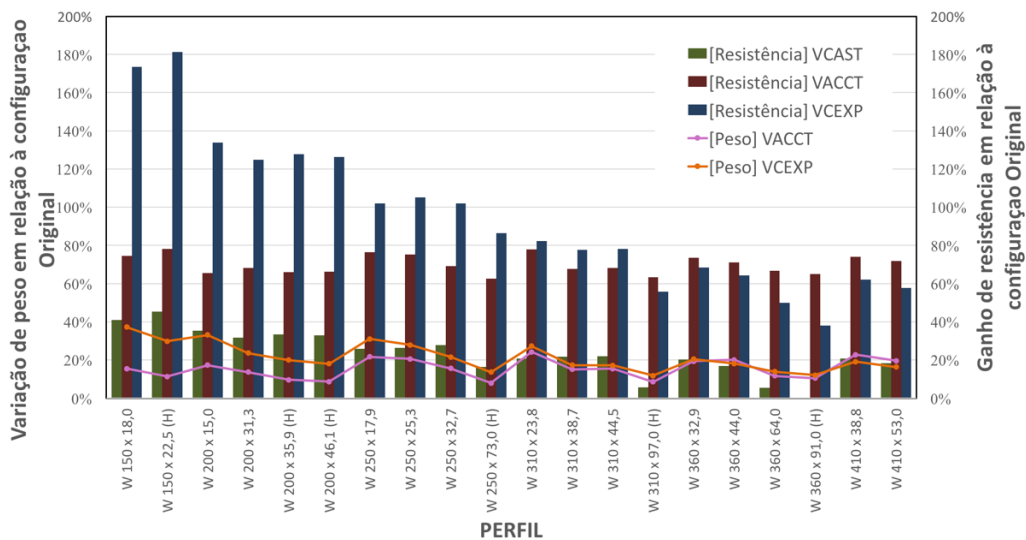


Figura 20 – Incremento de peso e resistência em relação à configuração original

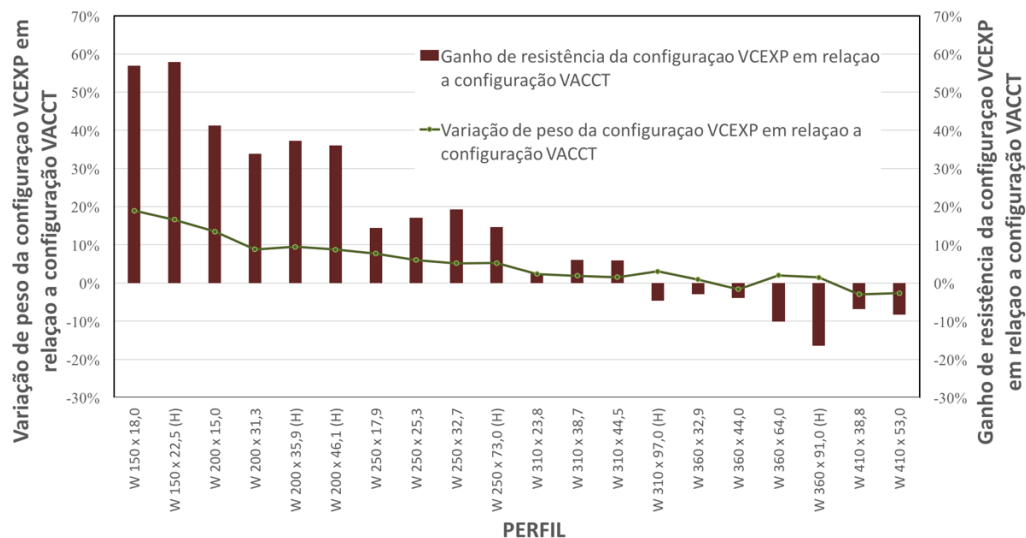


Figura 21 – Incremento de peso e resistência para as vigas casteladas expandidas em relação às vigas casteladas equivalentes.

Em todos os casos, como já observado anteriormente, as VCAST e VCEXP apresentam ganho considerável em resistência em relação a configuração VORIG, mas no caso de seções mais altas, este incremento diminui. As VCEXP apresentam também este ganho na maioria dos perfis em relação as VACCT, com exceção dos perfis muito altos. É possível notar que a configuração VCEXP apresenta um aumento de peso muito baixo em relação as VACCT de alma cheia. Para alguns perfis esta configuração é mais leve.

Quando comparados o incremento de peso com o ganho de resistência das vigas nas suas diferentes variações em relação à configuração VORIG (Figura 20), pode-se perceber que nos perfis mais leves o aumento da resistência é mais significativo, e isto pode ser caracterizado ao analisar cada conjunto de bitolas, onde sempre os menores perfis de cada grupo apresentam maiores variações no incremento de peso e resistências mais elevadas. Este incremento varia de 20% a 40% para as VCEXP em relação a configuração VORIG.

Entre os perfis W150x18 e W310x44,5 o ganho de resistência é maior para as vigas na configuração VCEXP e para os demais perfis esse incremento é mais elevado para as VACCT enquanto que para a configuração VCAST este ganho é baixo, sendo nulo para a bitola W360x91(H).

As VCEXP em relação as VACCT (Figura 21) também apresentam variações mais significativas para o incremento de resistência em bitolas que possuam alturas menores inicialmente, ou seja, perfis mais leves. Enquanto é possível diminuir o peso na ordem de 20%, a resistência pode ser elevada em cerca de 60%. Mas quando a variação do peso da viga tende a nulidade, ocorre queda significativa no ganho de resistência, podendo chegar a uma perda de 20%.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou um estudo sobre o comportamento estrutural de vigas de aço casteladas e casteladas expandidas na alma através de uma chapa. Inicialmente foi elaborado um modelo com base no trabalho de Zirakian e Showkati (2006) para vigas casteladas e feito isto foi realizado um estudo paramétrico com diferentes bitolas presentes no catálogo da Gerdau Açominas.

Foram escolhidos perfis que variavam significativamente o peso do elemento e as dimensões da mesa e alma em duas etapas. A primeira mostrou que para perfis muito altos, não vale a pena o processo de fabricação de vigas casteladas, muito menos a soldagem de chapa por já possuírem uma altura muito elevada. Após analisar este comportamento, a segunda etapa priorizou a variação do comprimento da mesa.

Para avaliar o desempenho estrutural, foi observado inicialmente, que no ponto de vista da deformação, o incremento do rendimento à flexão demonstra que as vigas casteladas expandidas são mais competitivas quando a deformação – estado limite de serviço – é uma condicionante no dimensionamento.

A fim de verificar o ganho de resistência das configurações estudadas em relação a configuração original, é exposta uma nuvem de pontos que relacionam os momentos máximos obtidos através dos modelos realizados com o método dos elementos finitos. E nota-se que o ganho de resistência para os perfis mais baixos é mais notável justamente por possuírem alturas menores inicialmente e ganharem com este incremento.

A solução com vigas casteladas expandidas sempre apresenta um ganho em relação as vigas casteladas e na maioria dos casos, esta configuração é mais vantajosa que a utilização de uma seção de alma cheia com a altura da castelada.

Com isto, foi observado que o ganho da configuração castelada expandida em relação a viga de alma cheia com altura equivalente à viga castelada é bem próximo ao ganho da castelada em relação a configuração original, confirmando a vantagem da utilização destas vigas.

Por fim, como foi observado que a viga expandida possui uma resistência bem próxima da viga de alma cheia com a altura da viga castelada, mas com peso reduzido, então foram verificados o incremento de peso e o ganho de resistência do elemento estrutural de acordo com sua configuração. A variação de peso das vigas casteladas expandidas em relação as vigas de alma cheia com altura da castelada é muito baixa e ao relacionar isto com o ganho de resistência, pode-se confirmar a vantagem da utilização destes perfis, com exceção das seções muito esbeltas.

A utilização da configuração castelada expandida então é vantajosa pois apresenta uma redução considerável de peso com ganho em altura para resistir melhor os momentos e ainda apresenta aberturas que facilitam a passagem de tubulações de serviço; e por apresentarem aberturas excêntricas e paralelas podem garantir inclinação destes elementos caso necessário.

REFERÊNCIAS

Ansys 15.0 ®, 2013. *ANSYS - Inc. Theory Reference*.

Canadian Standard Association, 2009. *CAN/CSA-S16-09: Design of Steel Structures*.

Ellobody, E, 2012. Behaviour of normal and high-strength castellated steel beams. *Structures and Buildings*, Tanta, 165, n. 1000054. pp. 529-542.

Gerda Acominas. Tabela de Bitolas. Disponível em:
www.gerdau.com.br/perfisgerdauacominas. Acessado em agosto de 2016.

Steelconstruction.Info. Long-span Beams, 2016. Disponível em:
www.steelconstruction.info/Long-span_beams. Acessado em fevereiro de 2017.

Zirakian, T.; Showkati, H, 2006. Distortional buckling of castellated beams. *Journal of Construction Steel Research*. Elsevier, p. 863-871.