



ANÁLISE COMPARATIVA DO DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE GALPÕES PARA USO GERAL COM VIGAS DE ALMA CHEIA E VIGAS CASTELADAS DE AÇO

Comparative structural design analysis of general use sheds with I-beams and castellated steel beams

Tiago Antunes Faria Amaral (1)(P); Washington Batista Vieira (2);
André Luis Riqueira Brandão (2)

(1) Graduando em Engenharia da Mobilidade, Universidade Federal de Itajubá, Itabira - MG, Brasil.

(2) Dr. Prof., Universidade Federal de Itajubá, Itabira - MG, Brasil.

Email para Correspondência: tiagoantunes.fa@gmail.com; vieira@unifei.edu.br (P) Apresentador

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre duas tipologias de pórticos transversais, pórticos de alma cheia e pórticos com vigas casteladas de aço variando-se os vãos livres. Embora este tipo de viga seja utilizado a algumas décadas, o presente estudo se mostra um dos primeiros no Brasil a avaliar o desempenho estrutural de vigas casteladas de aço em relação a vigas de alma cheia em galpões de uso geral. A modelagem e obtenção de esforços foram obtidas utilizando-se o software SAP2000 17. O dimensionamento das vigas de alma cheia foi realizado de acordo com a ABNT NBR 8800:2008, enquanto que no dimensionamento das vigas casteladas foram utilizadas equações disponíveis na literatura. A eficiência do sistema estrutural foi avaliada de acordo com a taxa de consumo de aço e resposta estrutural do mesmo. Os resultados indicam que com o uso das vigas casteladas nos galpões podem reduzir as taxas de consumo de aço em relação às vigas de alma cheia, bem como vencer maiores vãos utilizando perfis mais leves. O presente estudo traz importantes contribuições aos projetistas de estruturas metálicas em relação à escolha de sistemas estruturais mais adequados.

Palavras chaves: casteladas; vigas, galpões; dimensionamento; SAP2000.

Abstract: This work presents a comparative study between two different frame cross sections, frames with I-section and frames with castellated steel cross section, varying the free spans. Although this type of beam is known and used for some decades, the present study is one of the first in Brazil to evaluate the structural performance of castellated steel beams in relation to full soul beams in sheds for general use. For the modeling, analyzing and forces obtained, was used by software SAP2000 17. And the design of the full soul typology was performed according to ABNT NBR 8800:2008. And for the castellated typology was used equations available in the literature. The efficiency of the structural systems was evaluated according to the rate of consumption of steel and the structural answer of the analyzed models. The results indicate that with the use of castellated beams in sheds can reduce the rates of steel consumption in relation to full soul beams, as well to overcome larger free spans using lighter frame sections. The present study brings some contributions to the designers of steel structures in relation to the choice of more adequate structural systems.

Keywords: castellated; beams; sheds; design; SAP2000.

1 INTRODUÇÃO

Devido às vantajosas características da construção metálica, cada vez mais os galpões metálicos de uso geral vêm sendo utilizados em diversos empreendimentos. Este tipo de edificação, geralmente de um único pavimento, é amplamente empregado pela sua versatilidade, economia e sua vasta amplitude de vãos livres, torna-se a escolha ideal para aplicações como fábricas, depósitos, hangares, lojas, ginásios poliesportivos, dentre outros (NOGUEIRA, 2009).

Na busca por sistemas estruturais eficientes economicamente, aliado ao desenvolvimento da indústria, principalmente da solda elétrica e de avanços tecnológicos nas áreas de automação, em especial com o surgimento do comando numérico computadorizado (CNC), a utilização de vigas casteladas de aço tornam uma solução competitiva para a construção de edificações, inclusive de galpões para uso geral.

As vigas casteladas tiveram seu uso pioneiro na Europa no início do século XX, de forma a atender à necessidade por perfis com maior altura do que os perfis laminados existentes na época. As vigas casteladas são obtidas a partir de perfis I ou H de aço laminados, onde é realizado um corte longitudinal na alma do perfil, seguindo um traçado em ziguezague de modo em que as partes obtidas possam ser deslocadas e soldadas, obtendo-se um novo perfil com uma série de aberturas, de igual espaçamento, com uma altura maior do que o perfil original e sem acréscimo significativo de massa.

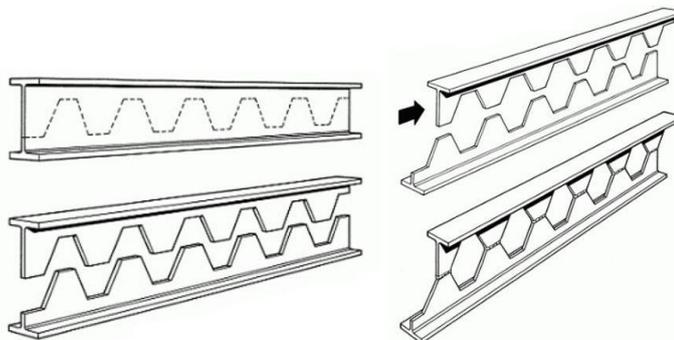


Figura 1. Procedimento para obtenção das vigas casteladas (Grünbauer, 2018).

O presente trabalho tem o objetivo de comparar as taxas de consumo de aço e o desempenho estrutural de duas tipologias de pórticos transversais em galpões industriais de uso geral: (a) com vigas de alma cheia e (b) com vigas casteladas de aço.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Galpões industriais de uso geral

No projeto de galpões de uso geral existe uma diversidade de sistemas estruturais nos quais podem ser empregados com boa eficácia, principalmente em relação a sua concepção também relacionado as diversas finalidades a que se destina o projeto (NOGUEIRA, 2009).

Um sistema estrutural muito difundido é composto por pórticos planos transversais que formam a estrutura principal, contendo estruturas secundárias com função de estabilizar a estrutura longitudinalmente (NOGUEIRA, 2009).

Em casos onde há solo com boa capacidade resistente, o ideal é utilizar pórticos com as bases engastadas, permitindo uma adequada redistribuição de esforços na estrutura proporcionando um dimensionamento econômico e uma montagem otimizada. Quando se rotula os pórticos na base acarreta-se em fundações mais econômicas em comparação com as bases engastadas favorecendo solos com baixa capacidade resistente. Em contraponto a isso, as bases rotuladas acarretam em maiores esforços na estrutura fazendo com que a estrutura evidencie maior deslocamento horizontal (CHAVES, 2007).

Quanto a tipologia dos pórticos usuais em galpões de uso geral destaca-se os pórticos de alma cheia e pórticos treliçados. Os pórticos em vigas casteladas são uma alternativa em uso às principais soluções. Nas Figuras 2 e 3 são ilustrados o pórtico de um galpão de uso geral com a tipologia castelada e outro em alma cheia, respectivamente.

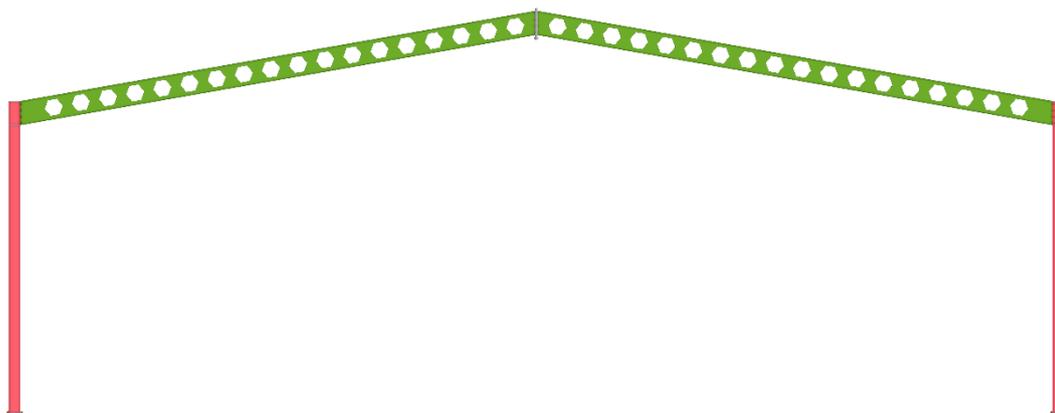


Figura 2. Pórtico com vigas casteladas

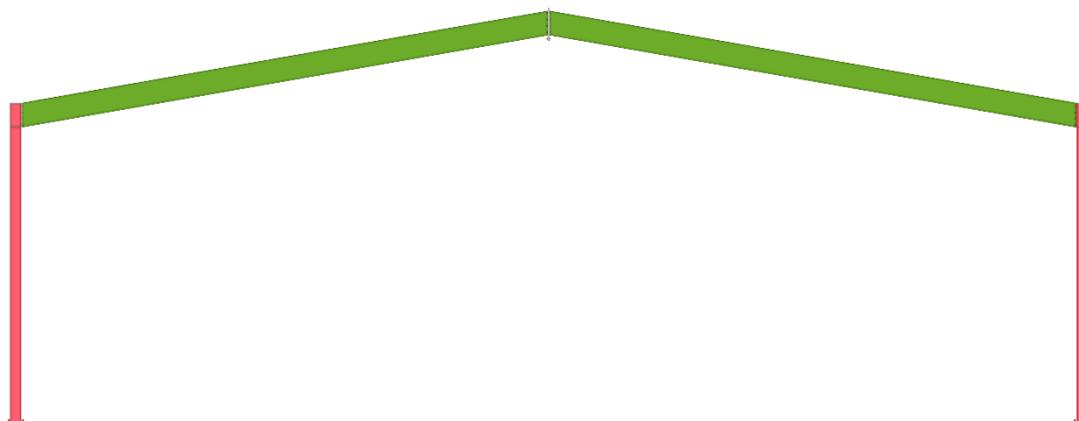


Figura 3. Pórtico com vigas de alma cheia

2.2 Padrões geométricos usuais de vigas casteladas

Com o corte longitudinal realizado na viga pode se produzir vigas casteladas com diversas tipologias de aberturas, variando a distância entre alvéolos e ou seu ângulo de abertura. Três padrões de vigas casteladas tornaram-se mais comuns nos últimos anos, o padrão Anglo-Saxão, o Peiner e o Litzka.

O padrão Anglo-Saxão (Figura 4-a) possui sua geometria com um ângulo de abertura igual a 60° em relação ao eixo longitudinal da viga, a altura da viga castelada é igual a uma vez e meia a altura da viga original e o passo é igual 1,08 vezes a altura da abertura. O padrão Litzka (Figura 4-b) é caracterizado pelas aberturas formando um hexágono regular ao longo do eixo longitudinal sendo o ângulo de abertura em relação a esse eixo igual a 60° e o passo para este padrão é igual ao triplo da largura do montante. O padrão Peiner (Figura 4-c) possui praticamente as mesmas características geométricas do padrão Litzka, porém o ângulo de abertura em relação ao eixo longitudinal é 63° , com a largura do alvéolo igual à sua altura.

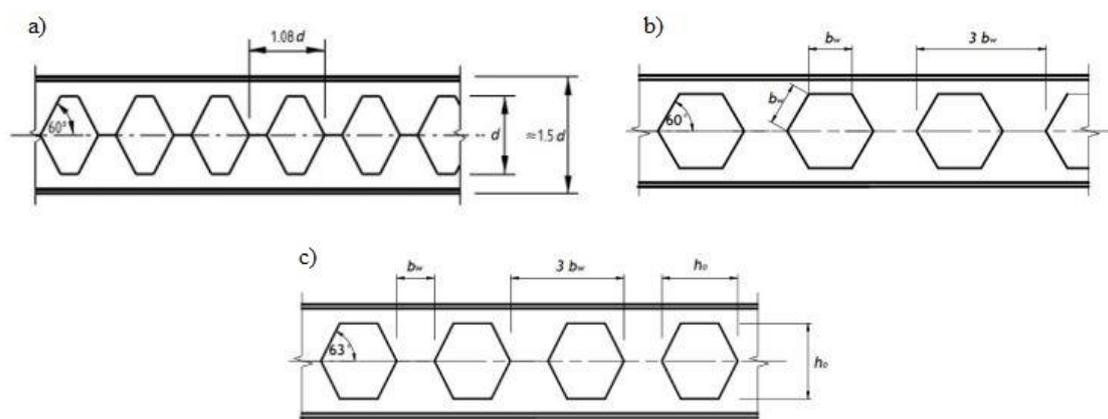


Figura 4. Vigas casteladas em padrão (a) Anglo-Saxão (BS 5950-1:2000) (b) Litzka e (c) Peiner (Vieira, W. B., 2015)

2.3 Modos de colapso em vigas casteladas

Devido a existência dos alvéolos nas vigas casteladas, ocorrem particularidades no comportamento estrutural dessas vigas em comparação com o que é notado nas vigas de alma cheia. Com o processo de fabricação para obtenção da viga castelada tem-se uma viga com uma altura maior que perfil de alma cheia originário e com a mesma espessura produzindo um acréscimo na esbelteza da alma. Além disso, os alvéolos não se apoiam em nenhum outro elemento, ocasionando em uma maior susceptibilidade a efeitos de instabilidade (Vieira, 2015). Os principais modos de colapso observados em vigas casteladas são: a) colapso por plastificação devido ao momento fletor; b) colapso por flambagem lateral com torção devido ao momento fletor; c) colapso por flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMA); d) colapso por plastificação por formação de mecanismo de Vierendeel devido ao efeito combinado do momento fletor e força cortante.



2.4 Modelos analíticos para o Estado Limite Último

Para o dimensionamento no estado limite último (ELU) das vigas casteladas foram utilizados modelos disponíveis na literatura.

2.4.1 Momento fletor resistente à formação do mecanismo plástico

Para a verificação do Estado Limite Último da formação de mecanismo Vierendeel em vigas casteladas o modelo analítico adotado foi desenvolvido por Cimadevila *et al.* (2000), considerando-se a interação momento-cortante ajustada a partir de uma análise de tensões, para um ponto crítico na seção t \bar{e} . Silveira (2011) estendeu a formulação de Cimadevila *et al.* (2000) deduzida a partir do critério de von Mises.

No trabalho de Vieira D. Z. (2015) é apresentada uma discussão onde se avaliam alguns modelos analíticos disponíveis na literatura sobre o mecanismo Vierendeel. O autor conclui que o modelo que desenvolvido por Cimadevila *et al.* (2000) e adaptado por Silveira (2011) apresenta os melhores resultados e é a favor da segurança.

O modelo analítico desenvolvido por Cimadevila *et al.* (2000), adota uma distribuição elástica de tensões cisalhantes no montante, sendo considerada uma prática conservadora, segundo Silveira (2011). Deste modo, Silveira (2011) deduz em seu trabalho, a partir de análises numéricas, a formulação para a verificação do estado limite último de escoamento do montante de alma por cisalhamento, admitindo a hipótese de distribuição plástica de tensões no montante. Ou seja, toda a região do montante é levada a plastificação (Vieira D. Z., 2015).

2.4.2 Força cortante resistente à flambagem do montante de alma

Estudos passados sobre o estado limite de flambagem do montante de alma (FMA) desenvolvidos por Delesques (1968) e Aglan e Redwood (1974) apresentam soluções precisas para a flambagem elástica mas propõem soluções empíricas aproximadas para o problema da FMA em regime inelástico, devido à dificuldade de efetuar uma análise mais refinada com os recursos disponíveis na época (Vieira, W. B., 2015).

Um modelo de cálculo da literatura que apresenta boa concordância com resultados numéricos e experimentais para FMA foi desenvolvido por Vieira, W. B. (2015). Esse modelo apresenta uma análise mais realista da FMA, tanto no regime elástico como no inelástico, propondo curvas de resistência para as vigas casteladas mostrou-se favorável à segurança quando comparado com resultados numéricos e experimentais.

2.4.3 Momento fletor resistente à flambagem lateral com torção

Para obtenção do momento fletor resistente para o estado limite de flambagem lateral com torção (FLT) de vigas casteladas foi utilizado um modelo de cálculo apresentado por Bezerra *et al.* (2010). O modelo tem como base adoção das prescrições da ABNT NBR 8800:2008 para vigas de alma cheia, com adaptações relativas às vigas casteladas, na geometria e nos índices de esbeltez.

2.4.4 Força normal resistente à compressão

Para a determinação da capacidade resistente de perfis castelados submetido a forças axiais em relação ao estado limite último, tem como base o trabalho desenvolvido por Neves (2018), que através de análise numérica e analítica propôs um modelo semiempírico em que apresenta coeficientes de ajuste para a expressão de força axial de compressão resistente de cálculo da vigente norma brasileira ABNT NBR 8800:2008.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Características dos galpões

A seleção de parâmetros para o desenvolvimento do estudo sobre galpões de uso geral pode ser estabelecida, a partir da variação de diversas características que influenciam o comportamento estrutural. Neste trabalho decidiu-se por avaliar a influência dos seguintes parâmetros: a) tipologia do pórtico transversal, b) vão livre do pórtico transversal.

Para as demais características, em todos os modelos admitem-se valores adotados em projetos dos galpões usuais de um só pavimento:

- inclinação da cobertura – 10%;
- altura da coluna – 6 metros;
- espaçamento entre pórticos transversais – 6 metros;
- velocidade básica de vento – 35 m/s;
- comprimento total do galpão – 54 metros;
- espaçamento entre terças – 2,54 metros.
 - Para as tipologias casteladas foram realizados ajustes nos espaçamentos entre terças para garantir que todas as terças fiquem posicionadas sobre os montantes de alma.

Para a avaliação do desempenho estrutural para galpões de uso geral, neste trabalho, consideram-se:

- quatro tipologias de pórticos transversais:
 - AC – Pórtico de alma cheia;
 - VA – Pórtico com viga castelada padrão Anglo-Saxão;
 - VL – Pórtico com viga castelada padrão Litzka;
 - VP - Pórtico com viga castelada padrão Peiner;
- cinco vãos livres (15 m, 20 m, 25 m, 30 m e 35 m).

Em função da variação de parâmetros proposta, gera-se 20 modelos de galpões de um só pavimento como base para a avaliação das soluções estruturais.

Para todas as tipologias admite-se colunas compostas por perfis de alma cheia e que a ligação entre a coluna e a viga de cobertura é rígida e as colunas estão engastadas na base. As terças de cobertura possuem mãos francesas, que servem de contenção lateral para as vigas de cobertura.

A Figura 5 apresenta uma visão geral de um galpão de uso geral modelado utilizando a metodologia BIM (Building Information Modeling) com auxílio do software Tekla Structures.

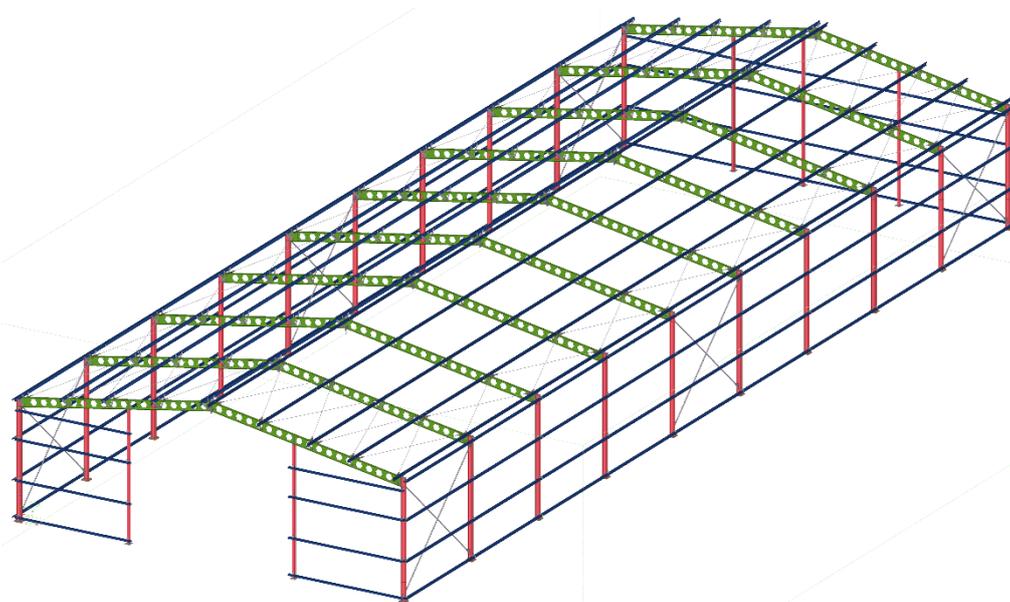


Figura 5. Visão geral de um galpão industrial utilizando pórticos com vigas casteladas.

3.2 Análise estrutural e dimensionamento dos pórticos transversais

Considerando que o estudo paramétrico deste trabalho se concentra na avaliação dos pórticos transversais das tipologias propostas e tendo em vista que os elementos estruturais secundários (terças, travessas, contraventamentos, etc.) são os mesmos para todas as tipologias, optou-se pela utilização de modelos de pórticos planos para avaliação do comportamento estrutural.

A avaliação das ações sobre os pórticos transversais foi feita com base na ABNT NBR 8800:2008 e ABNT NBR6123:1988. Para análise estrutural dos modelos propostos utilizou-se o programa computacional SAP2000.

3.2.1 Ações

As ações permanentes correspondem ao peso próprio dos elementos da estrutura. Além do peso próprio dos elementos do pórtico adotou-se uma ação permanente igual a $0,15 \text{ kN/m}^2$, correspondente aos demais elementos, como telhas, terças e elementos secundários.

Em relação as ações variáveis, sobrecarga de cobertura, foi adotado o estabelecido pelo Anexo B da ABNT NBR 8800:2008, para coberturas comuns, a saber, o valor de 0,25 kN/m².

As ações devidas ao vento foram determinadas com a ABNT NBR 6123:1988, considerando velocidade básica igual a 35m/s (valor que abrange grande parte do país, tornando este trabalho representativo para boa parte do território brasileiro). O galpão tem finalidade industrial, com baixo fator de ocupação, está localizado em uma região com terreno fracamente acidentado, com cota média do topo dos obstáculos igual a 3 m. Admite-se ainda que os galpões possuirão quatro faces igualmente permeáveis ao vento.

As combinações de ações foram realizadas de acordo com a ABNT NBR 8800:2008, sendo que a combinação crítica para todos os 20 casos foi a combinação que leva em consideração apenas forças gravitacionais. Na Figura 3 é apresentado um esquema de carregamento no pórtico transversal.

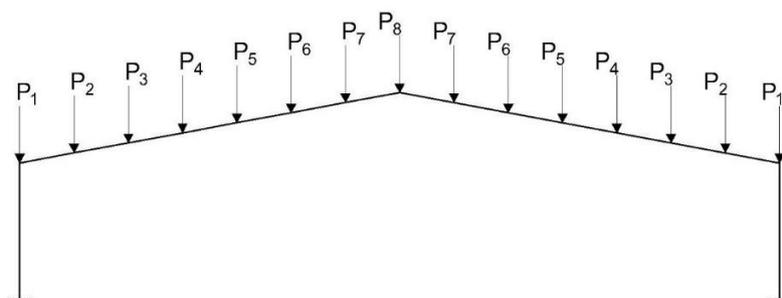


Figura 6. Esquema de carregamento

Os valores dos esforços da Figura 6 representam os valores da combinação crítica, com apenas as ações gravitacionais. A Tabela 1 apresenta os valores destes esforços para todas as tipologias tratadas neste trabalho, bem como os esforços solicitantes de cálculo para o pórtico.

Tabela 1. Carregamentos e esforços

Tipologia	P1 (kN)	P2 (kN)	P3 (kN)	P4 (kN)	P5 (kN)	P6 (kN)	P7 (kN)	P8 (kN)	Colunas			Vigas		
									M _{Sd} (kN.m)	V _{Sd} (kN)	N _{Sd} (kN)	M _{Sd} (kN.m)	V _{Sd} (kN)	N _{Sd} (kN)
AC-15	4,3	8,6	8,6	4,3	-	-	-	-	54,9	16,0	30,0	55,4	20,6	19,8
AC-20	4,3	8,6	8,6	8,6	4,3	-	-	-	88,46	24,8	40,3	88,46	28,8	30,23
AC-25	4,3	8,6	8,6	8,6	8,6	4,3	-	-	147,2	44,4	51,9	147,2	36,4	51,5
AC-30	4,3	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	4,3	-	207,7	43,3	63,8	207,7	44,4	75,3
AC-35	4,3	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	4,3	278,4	92,3	76,3	278,4	51,4	101,9
VA-15	4,4	8,5	8,5	4,4	-	-	-	-	54,9	16,0	30,0	55,4	20,6	19,8
VA-20	4,2	8,6	8,9	8,6	4,2	-	-	-	88,46	24,8	40,3	88,46	28,8	30,23
VA-25	4,4	8,6	8,5	8,5	8,6	4,4	-	-	147,2	44,4	51,9	147,2	36,4	51,5
VA-30	3,8	8,2	8,7	8,7	8,7	8,8	4,5	-	207,7	43,3	63,8	207,7	44,4	75,3
VA-35	4,0	8,4	8,8	8,8	8,8	8,8	8,4	4,0	278,4	92,3	76,3	278,4	51,4	101,9
VL-15	3,9	9,0	9,0	3,9	-	-	-	-	54,9	16,0	30,0	55,4	20,6	19,8
VL-20	4,1	8,6	8,9	8,6	4,1	-	-	-	88,46	24,8	40,3	88,46	28,8	30,23
VL-25	3,9	8,4	9,0	9,0	8,4	3,9	-	-	147,2	44,4	51,9	147,2	36,4	51,5
VL-30	4,1	8,8	9,3	9,3	8,2	7,6	4,1	-	207,7	43,3	63,8	207,7	44,4	75,3
VL-35	3,8	8,5	9,4	9,4	9,4	8,2	7,3	3,8	278,4	92,3	76,3	278,4	51,4	101,9



VP-15	4,2	8,7	8,7	4,2	-	-	-	-	54,9	16,0	30,0	55,4	20,6	19,8
VP-20	4,4	8,2	8,5	9,0	4,3	-	-	-	88,46	24,8	40,3	88,46	28,8	30,23
VP-25	4,2	8,8	9,1	8,5	8,1	4,2	-	-	147,2	44,4	51,9	147,2	36,4	51,5
VP-30	4,3	8,3	8,1	8,1	9,1	9,3	4,3	-	207,7	43,3	63,8	207,7	44,4	75,3
VP-35	4,3	8,4	8,2	9,2	9,2	8,2	8,4	4,3	278,4	92,3	76,3	278,4	51,4	101,9

3.2.2 Dimensionamento

O dimensionamento dos elementos estruturais dos galpões com vigas de alma cheia foi realizado de acordo com as prescrições da ABNT NBR 8800:2008. No entanto, como não há prescrições nas normas de cálculo nacionais para o dimensionamento de vigas casteladas, esses elementos foram dimensionados com os modelos analíticos da seção 2.4.

As vigas inclinadas dos galpões estão sujeitas à combinação de esforços de flexão e compressão. Como os modelos analíticos da literatura não estabelecem critérios para o cálculo de elementos sujeitos a esforços combinados, foi adotada a equação de interação da ABNT NBR 8800:2008 como equação de interação para as vigas casteladas.

Na Tabela 2 são apresentados os perfis obtidos do dimensionamento. Para a tipologia castelada foi apresentado o perfil original de alma cheia que posteriormente deu origem ao perfil castelado indicado com a letra “C”.

Tabela 2. Perfis dimensionados

Tipologia	Perfil	
	Colunas	Vigas
AC-15	W 200 x 26,6	W 200 x 19,3
AC-20	W 200 x 31,3	W 250 x 28,4
AC-25	W 310 x 38,7	W 360 x 32,9
AC-30	W 360 x 51,0	W 360 x 44,0
AC-35	W 360 x 57,8	W 460 x 52,0
VA-15	W 200 x 26,6	W 250 x 17,9 - C
VA-20	W 200 x 31,3	W 310 x 23,8 - C
VA-25	W 310 x 38,7	W 250 x 32,7 - C
VA-30	W 360 x 51,0	W 410 x 38,8 - C
VA-35	W 360 x 57,8	W 410 x 46,1 - C
VL-15	W 200 x 26,6	W 250 x 17,9 - C
VL-20	W 200 x 31,3	W 310 x 23,8 - C
VL-25	W 310 x 38,7	W 250 x 32,7 - C
VL-30	W 360 x 51,0	W 410 x 38,8 - C
VL-35	W 360 x 57,8	W 410 x 46,1 - C
VP-15	W 200 x 26,6	W 250 x 17,9 - C
VP-20	W 200 x 31,3	W 310 x 23,8 - C
VP-25	W 310 x 38,7	W 250 x 32,7 - C



VP-30 W 360 x 51,0 W 410 x 38,8 - C

VP-35 W 360 x 57,8 W 410 x 46,1 - C

3.3 Validação do dimensionamento

Para o dimensionamento de vigas de alma cheia é necessário a verificação do comportamento estrutural das mesmas quando submetidas a flexo-compressão. Para as vigas casteladas o mesmo deve ser feito, porém na literatura não se encontra trabalhos relacionados a flexo-compressão em vigas casteladas de aço. Dito isso, foram adotadas as equações de interação da ABNT NBR 8800:2008 que são especificamente para a verificação de vigas de alma cheia, para a verificação das vigas casteladas. Como no dimensionamento das vigas casteladas foi utilizado estas equações, se faz necessário a verificação destas. Para isso foram modeladas algumas vigas, utilizando-se do Método dos Elementos Finitos para comprovar se o uso das equações interação para vigas de alma cheia quando usadas para vigas casteladas se obtém valores aceitáveis.

3.3.1 Modelo numérico

A análise numérica foi realizada pelo Método dos Elementos Finitos, com auxílio do *software* Abaqus, considerando-se as não-linearidades geométrica e material e as imperfeições geométricas iniciais associadas a uma análise de autovalores. Adotou-se um modelo geométrico tridimensional, formado por elementos de casca fina do tipo deformável e o carregamento foi aplicado como uma força pontual nas direções vertical e horizontal, no eixo da viga, na posição exata das terças. Foi modelado apenas uma viga da tesoura de modo que as condições de contorno adotadas pudessem representar o comportamento estrutural de um pórtico plano transversal. Utilizou-se um modelo constitutivo elastoplástico perfeito para o aço, com as propriedades mecânicas reais. Foram utilizados elementos finitos de casca fina, do tipo S4R do Abaqus com elementos de largura igual a 20 mm. A análise foi realizada utilizando o algoritmo Riks modificado do Abaqus. Foi considerada na análise uma imperfeição geométrica inicial igual a 1/1000 do comprimento da viga e tensões residuais na seção de forma simplificada, conforme recomendado por Vieira *et al.* (2015).

3.3.2 Resultados do modelo numérico

Foram ensaiadas numericamente as vigas dos pórticos VA-15, VL-15, VP-15, VA-35, VL-35 e VP-35, após o dimensionamento, para verificar se os modelos não atingiriam o colapso para o dimensionamento realizado com os modelos da literatura e a equação de interação da ABNT NBR 8800:2008.

Para todos os casos analisados, verificou-se que o colapso ocorreria para uma carga superior ao valor de cálculo das ações aplicadas, demonstrando que o dimensionamento realizado é seguro.

Apesar disso é necessário que se avalie de forma mais profunda o comportamento estrutural de vigas casteladas sujeitas a flexo-compressão através de ensaios numéricos e

experimentais para que se obtenha equações específicas de interação para esta tipologia de viga, de forma a ter um modelo seguro e econômico.

3.4 Comparativo da taxa de consumo de aço

Como dito anteriormente, este trabalho tem como objetivo principal na avaliação dos pórticos transversais das tipologias propostas e tendo em conta que os elementos estruturais secundários (terças, travessas, contraventamentos, etc.) são os mesmos para todas as tipologias, optou-se por apenas comparar a taxa de consumo de aço dos pórticos transversais do galpão. Na Figura 7 são apresentados os valores da taxa de consumo de aço para cada tipologia variando-se os vãos livres.

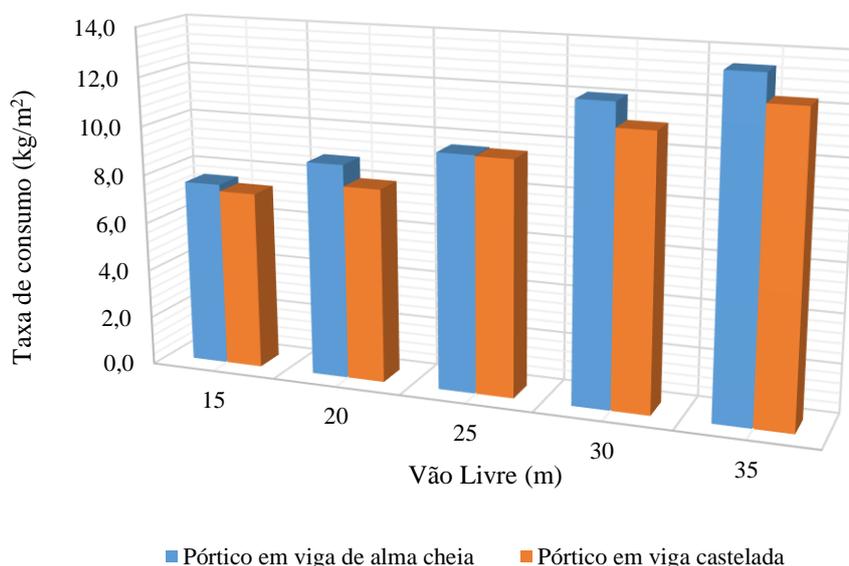


Figura 7. Comparativo da taxa de consumo de aço

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado o estudo comparativo do comportamento estrutural e do consumo de aço em galpões de uso geral utilizando pórticos transversais com vigas de alma cheia e pórticos transversais com vigas casteladas de aço em três padrões, Anglo-Saxão, Litzka e Peiner.

A tipologia proposta que utiliza pórticos transversais com vigas casteladas, quando comparado a pórticos transversais com vigas de alma cheia apresenta resultados favoráveis a tipologia castelada. Apontando-se uma viável solução para sistemas estruturais de galpões industriais. Podendo ser uma alternativa econômica apresentando uma redução de até 11% na taxa de consumo de aço. Apesar desta economia na taxa de consumo de aço, deve ser levado em consideração o custo de fabricação das vigas



casteladas fazendo com que em algumas situações a tipologia castelada tenha seu custo final onerado pela fabricação.

A metodologia utilizada neste trabalho para as verificações de estados limites de serviço em vigas casteladas apresenta bons resultados. A partir dos ensaios numéricos realizados os modelos analíticos utilizados mostraram-se adequados.

Deste modo acredita-se que este trabalho possa servir de contribuição para engenheiros e arquitetos, oferecendo uma viável tipologia de pórticos transversais com vigas casteladas para a escolha de sistemas estruturais mais adequados em galpões de uso geral.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UNIFEI, ao Grupo de Pesquisa de Materiais para Indústria da Construção Civil e Mecânica (MATCIME) a UFV pela disponibilização do *software* Abaqus e a Trimble Brasil pela disponibilização do *software* Tekla Structures.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, 2008. NBR 8800. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, 1988. NBR 6123. Forças devidas ao vento em edificações.

Aglan, A. A., Redwood, R. G., 1974. Web buckling in castellated beams. *Procedure Institution of Civil Engineers*, Part 2, Vol. 57: 307-320.

Bezerra, E. M., Fakury R.H., Castro e Silva A.L.R., Caldas R.B., 2010. Determinação do momento fletor resistente a flambagem lateral com torção de vigas de aço casteladas. *XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*.

BRITISH STANDARDS. BS 5950-1, 2000. Structural use of steelwork in building – Part 1, Code of practice for design – Rolled and welded sections.

Cimadevilla, J. E., Gutiérrez, E. M., Rodríguez, J. A. V., 2000. Vigas Alveoladas. *A Coruna: Biblioteca Técnica Universitária*.

Chaves, M. R., 2007. Avaliação do desempenho de soluções estruturas para galpões leves. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

DELESQUES, R. Stabilité des montants de poutres ajourées, 1968. *Construction Métallique*. 3: 26-33.

Grünbauer, J. What are castellated beams? Grünbauer BV, 2018. Disponível em: <<http://www.grunbauer.nl/eng/wat.htm>>.

Neves, P. A. C., 2018. Avaliação do desempenho estrutural de perfis castelados de aço sob compressão axial. 109 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.



Nogueira, G. S., 2011. Avaliação de soluções estruturais para galpões compostos por perfis de aço formados a frio. 111f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

Silveira, E.G., 2011. Avaliação do comportamento de vigas alveolares de aço com ênfase nos modos de colapso por plastificação. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

Vieira, D. Z., 2015. Validação de uma formulação para a verificação da capacidade resistente de vigas casteladas. 132 f. TCC (Graduação). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG.

Vieira, W.B.; Veríssimo, G.S.; Ribeiro, J.C.L., Paes, J.L.R., 2015. Simulação numérica do comportamento estrutural de vigas casteladas de aço com ênfase na flambagem do montante de alma. *Ciência & Engenharia*, v. 24, n. 1, p. 105-113.

Vieira, W. B., 2015. Estudo numérico-experimental da flambagem do montante de alma em vigas casteladas de aço. 105 f. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.