



Tema: oficial de submissão

ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTO DE PRODUÇÃO DE VIGAS ALVEOLARES DE AÇO EM DIFERENTES PADRÕES

Bruno Gabriel Figueiredo Horta Pereira¹

Marco Antônio Rezende Rodrigues¹

Washington Batista Vieira²

André Luís Riqueira Brandão²

Gustavo de Souza Veríssimo³

Resumo

O custo de fabricação das vigas alveolares está relacionado ao custo do perfil original, acrescido do custo do corte e da soldagem. O custo de corte e de solda está relacionado ao comprimento de corte e de soldagem necessários para a viga, que, por sua vez, está relacionado à tipologia de viga alveolar utilizada. Portanto, além dos aspectos arquitetônicos e estruturais, deve-se analisar o custo de fabricação de cada padrão de viga alveolar, para decidir o mais adequado para a construção. Neste trabalho, apresentam-se o desenvolvimento de equações para o comprimento de corte e de solda das vigas casteladas nos padrões Litzka, Peiner e Anglo-Saxão e para as vigas celulares, em função das propriedades geométricas do perfil original.

Palavras-chave: Vigas alveolares; Custo; Fabricação; Equações.

COMPARATIVE ANALYSIS OF PRODUCTION COST OF ALVEOLAR STEEL BEAMS IN DIFFERENT PATTERNS

Abstract

The cost of manufacture of alveolar beams is related to the cost of the original profile, plus the cost of cut and welding. The cost of cut and welding is related to weld and cutting length required for the beam, which, in turn, is related to the type of used alveolar beam. Therefore, in addition to the architectural and structural aspects, must analyze the manufacturing cost of each beam pattern, to decide the most appropriate for the construction. In this paper, we present the equations development of cut and welding of castellated beams Litzka, Peiner and Anglo-Saxon patterns and for cellular beams, on the basis of the geometric properties of the original profile.

Keywords: Castellated beams; Cost; Fabrication; Equations.

¹ Estudante de Graduação em Engenharia da Mobilidade, Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira, Itabira, Minas Gerais, Brasil.

² Engenheiro Civil, Doutor em Engenharia Civil, Professor Adjunto, Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira, Itabira, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheiro Civil, Doutor em Engenharia de Estruturas, Professor Associado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A construção em aço ganhou um grande impulso na primeira metade do século XX, especialmente após a invenção da solda elétrica. O advento da solda possibilitou uma série de alternativas para elementos estruturais e ligações, destacando as soluções que viabilizam estruturas leves, capazes de vencer grandes vãos, e com rigidez suficiente para manter os deslocamentos dentro dos limites estabelecidos pelas normas vigentes.

Os elementos horizontais das estruturas têm seu desempenho associado fundamentalmente à rigidez e à capacidade resistente à flexão. Dessa forma, quando se trata de desenvolver soluções para vigas, busca-se fazer ajustes na geometria das seções transversais tendo como alvo a maximização da relação inércia/peso, de modo a obter o elemento estrutural com menor custo capaz de resistir aos esforços solicitantes. Por este motivo, é usual adotarem-se vigas de aço com perfis de seção I ou treliçadas.

Em muitos casos, o dimensionamento das peças metálicas à flexão é condicionado por limitações de flecha. Nestes casos, os perfis necessitam mais de rigidez do que de resistência. Com base nessa premissa surgem algumas soluções, dentre as quais se destacam as vigas alveolares.

1.1 Processo de Fabricação

As vigas alveolares de aço surgiram na Europa por volta de 1930, devido à necessidade de perfis com altura superior à dos perfis I produzidos pela indústria da época. São fabricadas usualmente a partir de perfis I laminados, cortados longitudinalmente segundo um traçado próprio que possibilita destacar as duas metades obtidas, desloca-las e soldá-las, formando uma viga com altura superior à do perfil original, com uma sequência de aberturas na alma (Veríssimo *et al.* [1]).

Em função do traçado do corte, as vigas alveolares podem ser produzidas com diversas tipologias de aberturas, sendo mais comuns as casteladas e celulares (Figura 1).

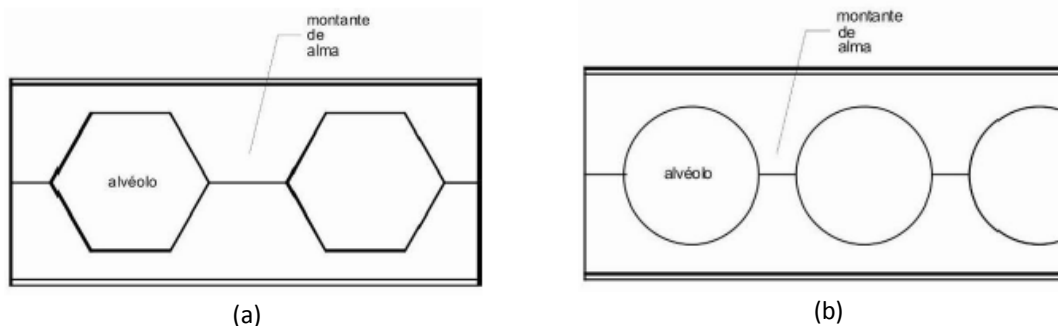


Figura 1 – Vigas alveolares: (a) castelada; (b) celular (Veríssimo *et al.* [1]).

As vigas casteladas (Figura 1a) possuem aberturas (ou alvéolos) com formato hexagonal ou, eventualmente, octogonal, quando se insere uma chapa expansora retangular entre as duas metades cortadas do perfil. Nas vigas casteladas, o espaçamento entre os alvéolos está diretamente relacionado com a geometria do alvéolo. As vigas celulares (Figura 1b) possuem

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

aberturas em formato circular, e, diferentemente das casteladas, o diâmetro dos alvéolos e o espaçamento entre eles não são geometricamente dependentes. Nos últimos anos, a aplicação das vigas celulares tem sido cada vez mais solicitada por arquitetos, devido ao seu apelo estético (Hechler *et al.* [2]).

1.2 Simbologia

Na Figura 2 são apresentadas as propriedades geométricas de uma seção transversal de um perfil I e de um perfil I alveolar.

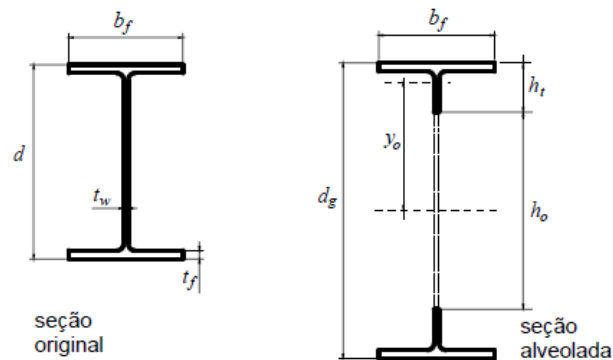


Figura 2 – Elementos geométricos da seção transversal de um perfil I e de um perfil alveolado (Veríssimo, *et al.* [3]).

A partir da altura do perfil original (d) é possível determinar outros parâmetros geométricos das vigas casteladas. A altura do perfil alveolar (d_g) está relacionada com a altura do perfil original pela relação $k = d_g/d$, denominada de razão de expansão.

Outras propriedades geométricas de interesse são apresentadas na Figura 3: b_w é a largura dos montantes de alma intermediários, b_{we} é a largura do montante de extremidade, b é a projeção horizontal do lado inclinado da abertura, a_0 é a largura do alvéolo, p é a distância entre alvéolos (denominada *passo*) e h_0 é a altura do alvéolo.

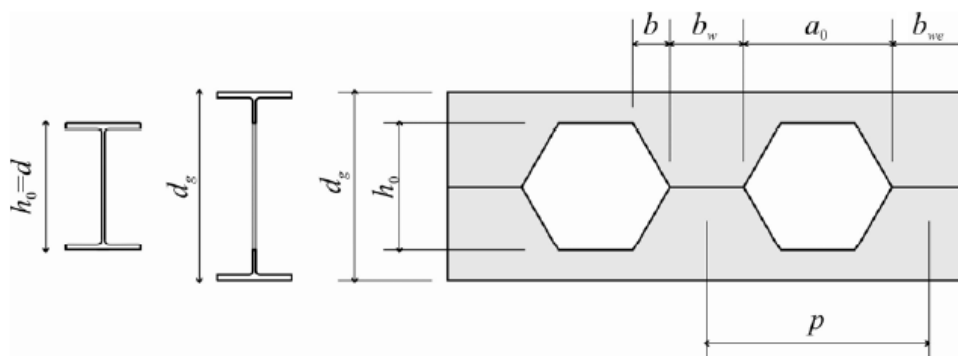


Figura 3 – Parâmetros geométricos das vigas casteladas (Oliveira [4]).

Nas vigas celulares, o diâmetro dos alvéolos é indicado por D_0 . Os demais parâmetros dimensionais são similares aos das vigas casteladas (Figura 4).

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

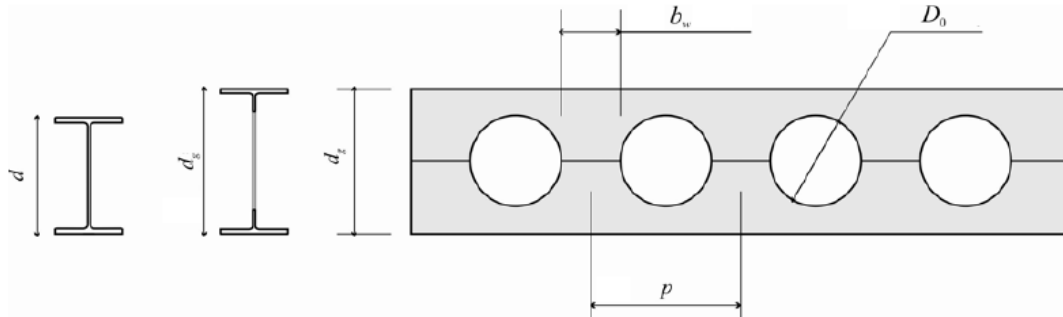


Figura 4 – Parâmetros geométricos das vigas celulares (Oliveira [4]).

1.3 Padrões de vigas alveolares

Ao longo do tempo, três padrões geométricos de vigas casteladas se consolidaram no cenário internacional, a saber, o padrão Anglo-Saxão, o padrão Peiner e o padrão Litzka, cujas características são descritas nos subtópicos a seguir.

1.3.1 Viga castelada padrão Anglo-Saxão

O padrão Anglo-Saxão (Figura 5) é definido geometricamente por aberturas que possuem o segmento inclinado fazendo um ângulo de 60° com a horizontal, a altura total igual a 1,5 vezes a altura da viga original e a distância entre duas aberturas sucessivas igual a 1,08 vezes a altura da abertura. Assim: a relação entre a largura e a altura da abertura é igual a 0,83; a relação entre a largura mínima do montante de alma e a altura das aberturas é igual a 0,25 e a relação entre a projeção horizontal do lado inclinado da abertura e a altura da abertura é igual a 0,29.

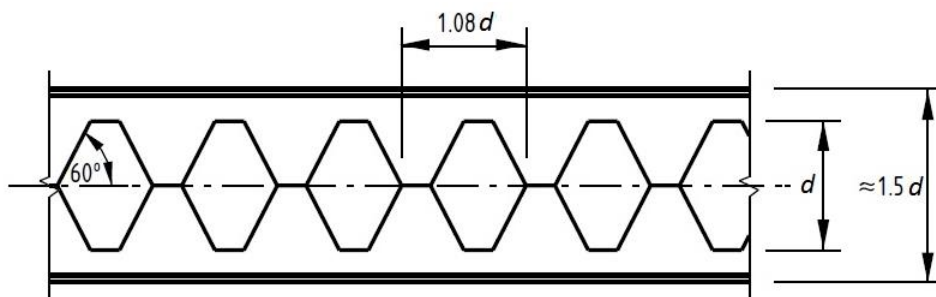


Figura 5 – Viga castelada padrão Anglo-Saxão (BS 5950-1:2000 [5]).

1.3.2 Viga castelada padrão Peiner

O padrão Peiner (Figura 6) é caracterizado pela regularidade dimensional ao longo do corte. A distância entre duas aberturas adjacentes é o triplo da largura mínima do montante ($p/b_w = 3$); a projeção horizontal do lado inclinado da abertura é a metade da largura mínima do montante e a abertura possui largura igual à altura. Assim, o ângulo que o lado inclinado do alvéolo faz com a horizontal é de aproximadamente 63° .

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

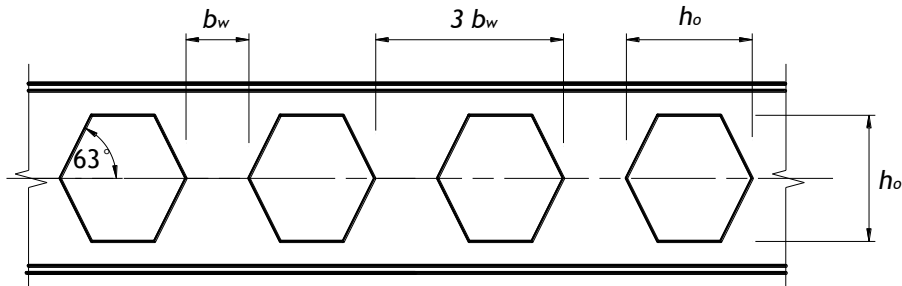


Figura 6 - Padrão Peiner (Vieira [6]).

1.3.3 Viga castelada padrão Litzka

O padrão Litzka (Figura 7) também é caracterizado pela regularidade dimensional ao longo do corte. A distância entre duas aberturas adjacentes é o triplo da largura mínima do montante e a projeção horizontal do lado inclinado da abertura é a metade da largura mínima do montante. Nesse padrão, o alvéolo é um hexágono regular, com o lado inclinado fazendo um ângulo de 60° com a horizontal.

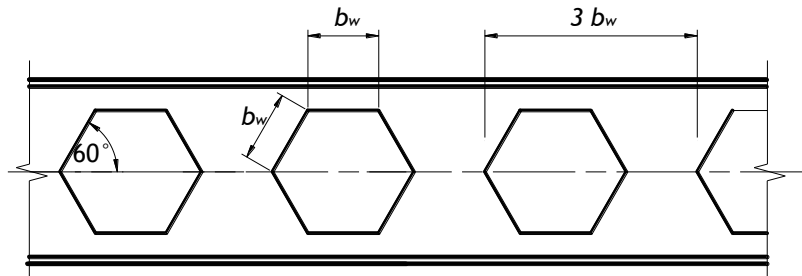


Figura 7 - Padrão Litzka (Vieira [6]).

1.3.4 Viga Celular

Diferentemente das vigas casteladas, a viga celular (Figura 4) não apresenta uma relação dimensional fixa entre a largura do montante e o diâmetro do alvéolo, o que permite certa flexibilidade para variar o espaçamento entre os alvéolos, independente do diâmetro. Fabricar o padrão celular tornou-se possível devido ao desenvolvimento das máquinas CNC (de comando numérico computadorizado), uma vez que demanda de um traçado mais complexo.

2 FABRICAÇÃO

As vigas alveolares normalmente são produzidas a partir de perfis laminados de seção I ou H. O primeiro passo é o corte transversal do perfil original, uma vez que normalmente os perfis possuem tamanho padrão de 12 metros. O corte pode ser realizado por oxicorte, plasma ou laser, e a escolha da tecnologia a ser usada é influenciada pela precisão e velocidade no corte e a espessura da alma a ser cortada.

O início do corte longitudinal da alma deve ser feito a partir de um ponto interno desta, de modo a evitar que as metades cortadas empenem devido às tensões residuais. Após o término do corte, os perfis são transferidos para uma mesa de montagem, onde as extremidades são soltas. Com as duas metades soltas, uma destas é desempenada, alinhada e fixada na mesa de apoio. A outra é alinhada em seguida, soldando-se a emenda dos montantes de alma. Devido à tendência das duas metades fletirem, por influência das tensões residuais presentes no perfil original, é realizada uma pré-montagem com pontos de solda para fixar as metades na posição correta. Em seguida é feito o acabamento final nas extremidades, eliminando-se as partes excedentes resultantes da etapa de alinhamento dos montantes.

Deve ser analisada a necessidade de eventuais detalhes construtivos, tais como enrijecedores de alma ou chapas de preenchimento de alvéolos, que são ponteados na peça. Com isso, tem-se a peça pré-montada que é enviada para a soldagem final.

3 COMPRIMENTOS DE CORTE E SOLDA

A relação entre os parâmetros geométricos difere entre os diferentes padrões de vigas alveolares. Assim, o comprimento de corte e solda para o processo de fabricação das vigas também será diferente e pode ser calculado por meio de expressões desenvolvidas nesse estudo.

Para a obtenção da configuração geométrica da viga, inicialmente define-se sua tipologia: se castelada ou celular. Se castelada deve-se ainda especificar o padrão geométrico escolhido, pois as propriedades de cada padrão são diferentes. Essa definição prévia da tipologia da viga é necessária porque para a viga castelada as dimensões dos alvéolos e dos montantes são interdependentes, ou seja, se modificada a altura do alvéolo, o comprimento do montante também será alterado (Oliveira [4]).

3.1 Vigas casteladas

O traçado do corte das vigas casteladas é o que diferencia os diferentes tipos de padrões existentes. Para cada padrão há parâmetros geométricos que compõem a seção ao longo do corte.

Os parâmetros geométricos podem ser escritos em função da altura do perfil original, como mostrado na Tabela 1.

A altura do perfil alveolar é obtida multiplicando a altura do perfil de alma cheia por uma razão de expansão simbolizada por k . Com base em recomendações da literatura, adota-se a razão de expansão ótima, igual a 1,5 para todas as vigas casteladas deste trabalho (Galambos [7]).

O principal parâmetro do projeto de uma viga castelada é o seu comprimento de projeto, simbolizado por L_v e apresentado na Figura 8. Portanto, é conveniente escrever as equações dos demais parâmetros de projeto e fabricação em função desse valor.

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Tabela 1– Relações geométricas das vigas casteladas (Oliveira [4]).

	Litzka	Peiner	Anglo-Saxão
Passo (p)	$\sqrt{3}d \approx 1,7321d$	$1,5d$	$1,08d$
Largura do montante de alma na altura média da viga (b_w)	$\frac{\sqrt{3}}{3}d \approx 0,5774d$	$0,5d$	$0,25d$
Largura do alvéolo na altura média da viga (a_o)	$\frac{2\sqrt{3}}{3}d \approx 1,155d$	d	$0,83d$
Projeção horizontal do lado inclinado do alvéolo (b)	$b_w/2$	$b_w/2$	$0,29d$

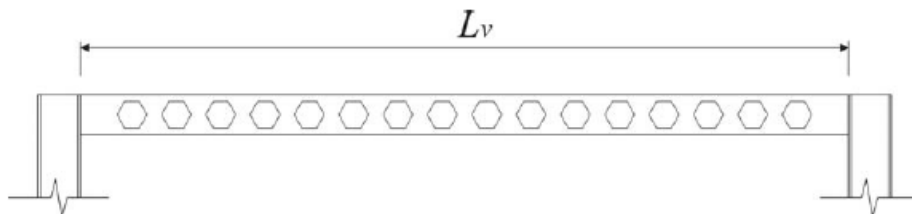


Figura 8 - Comprimento de projeto (Oliveira [4]).

Em cada extremidade da viga deve-se manter um montante com largura de no mínimo a largura dos montantes intermediários (Eq. 1), pois essa região deve resistir ao esforço cortante que é crítico. Esta limitação não leva em consideração as dimensões de cantoneiras de ligação nos montantes de extremidade, que, em caso de vigas com baixa altura de seção transversal pode ser maior que a largura b_w dos montantes de alma.

$$b_{w\min} = b_w \quad (1)$$

Define-se uma propriedade denominada comprimento útil (L_d) que é o comprimento ao longo da viga em que os alvéolos serão distribuídos. Este parâmetro é definido pela Eq. (2).

$$L_d \leq L_v - 2 \left(b_{w\min} - \frac{b_w}{2} \right) \quad (2)$$

A quantidade de alvéolos de uma viga será, portanto, a parte inteira da divisão do comprimento útil pelo passo da viga castelada, conforme a Eq. (3).

$$n = INT\left(\frac{L_d}{p}\right) \quad (3)$$

Os alvéolos devem ser distribuídos ao longo da viga de forma simétrica em relação ao centro do vão. Se o número de alvéolos for par, o centro da viga coincidirá com o centro de um montante; se for ímpar, coincidirá com o centro de um alvéolo. Devido a esse arredondamento do número de alvéolos, e de sua distribuição ao longo da viga, a largura do montante de extremidade pode não ser igual à largura mínima do montante ($b_{we,min}$) e deve ser calculada conforme a Eq. (4).

$$b_{we} = \frac{L_v - n \cdot p}{2} + b_{we,min} - \frac{b_w}{2} \quad (4)$$

Com a definição da distribuição dos alvéolos, é possível determinar o traçado do corte do perfil original e o comprimento de corte L_c da viga original (Eq. 5), necessário para produzir uma viga castelada com comprimento de projeto L_v (Figura 9). Esse valor é sempre maior que o vão de projeto e isso ocorre devido a uma perda no comprimento no momento de soldagem entre as duas partes da viga após o corte.

$$L_c = L_v + \frac{p}{2} \quad (5)$$

Padrão: Litzka
 $L_v = 6000 \text{ mm}$

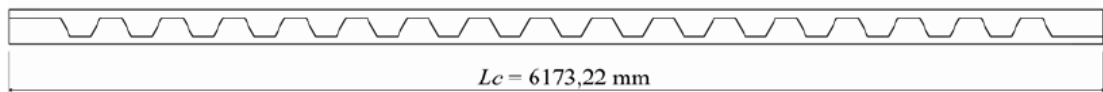


Figura 9 – Comprimento do vão necessário para corte em um vão de 6000 mm (Oliveira [4]).

Todas as equações para determinar os parâmetros geométricos apresentados podem ser definidas em função de apenas duas variáveis, sendo elas a altura do perfil original (d) e o vão de projeto (L_v). Isto é feito escrevendo cada um dos parâmetros em função da altura e do vão de projeto nas equações acima.

O comprimento de corte e o comprimento de solda de uma viga castelada qualquer podem ser dados pelas Equações (6) e (7), respectivamente.

$$C_{corte} = 2b_{we} + n \left(2b_w + 2 \sqrt{\left(\frac{h_0}{2}\right)^2 + (b)^2} \right) \quad (6)$$

$$C_{solda} = 2b_{we} + n.b_w \quad (7)$$

Dessa forma, é possível encontrar equações gerais para o comprimento de corte e solda das vigas casteladas, reescrevendo as equações para cada padrão, como apresentado a seguir.

3.1.1 Comprimentos de corte e solda para o padrão Litzka

Aplicando as relações geométricas do padrão Litzka (Tabela 1) e as relações geométricas apresentadas nas Equações (1) a (5) nas Equações (6) e (7), obtém-se os comprimentos de corte e de solda da fabricação de uma viga castelada em padrão Litzka, escrito em função do comprimento de projeto e da altura da seção transversal do perfil original, conforme as expressões a seguir.

$$C_{corte} = L_v + d \frac{\sqrt{3}}{3} (1 + n) \quad (8)$$

$$C_{solda} = 1,5L_v + d \frac{\sqrt{3}}{6} (1 - 7n) \quad (9)$$

onde

$$n = \text{int} \left(\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{L_v}{d} - \frac{1}{3} \right) \quad (10)$$

3.1.2 Comprimentos de corte e solda para o padrão Peiner

Aplicando as relações geométricas do padrão Peiner (Tabela 1) e as relações geométricas apresentadas nas Equações (1) a (5) nas Equações (6) e (7), obtém-se os comprimentos de corte e de solda para a fabricação de uma viga castelada padrão Peiner, escrito em função do comprimento de projeto e da altura da seção transversal do perfil original, conforme as expressões a seguir.

$$C_{corte} = L_v + \frac{nd}{2} \left(\frac{1}{n} + \sqrt{5} - 1 \right) \quad (11)$$

$$C_{solda} = 1,5L_v + d(0,368 - 1,75.n) \quad (12)$$

onde

$$n = \text{int}\left(\frac{2L_v}{3d} - \frac{1}{3}\right) \quad (13)$$

3.1.3 Comprimentos de corte e solda para o padrão Anglo-Saxão

Aplicando as relações geométricas do padrão anglo-saxão (Tabela 1) e as relações geométricas apresentadas nas Equações (1) a (5) nas Equações (6) e (7), obtém-se os comprimentos de corte e de solda para fabricação de uma viga castelada em padrão anglo-saxão, escrito em função do comprimento de projeto e da altura da seção transversal do perfil original, conforme as expressões a seguir.

$$C_{\text{corte}} = L_v + \frac{nd}{4} \left(\frac{1}{n} + 0,3587 \right) \quad (14)$$

$$C_{\text{solda}} = 1,5L_v + d(0,452 - 1,366n) \quad (15)$$

onde

$$n = \text{int}\left(\frac{0,928L_v}{d} - 0,232\right) \quad (16)$$

3.2 Vigas Celulares

O diâmetro dos alvéolos de uma viga celular, D_0 é determinado pela Eq. (17), em que o parâmetro h_{e0} é apresentado na Figura 10.

$$D_0 = \frac{4h_{e0}^2 + p^2}{2p} \quad (17)$$

$$r = \frac{D_0}{2} \quad (18)$$

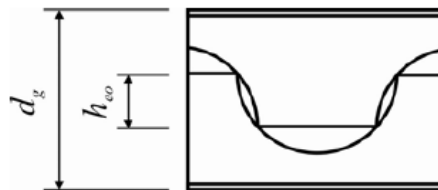


Figura 10 - Parâmetro h_{e0} da viga celular (Oliveira [4])

Os parâmetros de largura do montante (b_w), largura do montante de extremidade (b_{we}) e valor mínimo da largura do montante de extremidade ($b_{we,\min}$), todos ao longo do eixo da viga, são determinados pelas equações a seguir. O valor de $b_{we,\min}$ é recomendação do catálogo de vigas alveolares da ArcelorMittal (*apud* Oliveira [4])

$$b_w = p - D_0 \quad (19)$$

$$b_{we} = \frac{L_v - n p + b_w}{2} \quad (20)$$

$$b_{we,\min} = p - r \quad (21)$$

O comprimento de corte L_c para fabricação da viga celular é dado pela Eq. (2) e a quantidade de alvéolos é determinada pela Eq. (3). O comprimento útil para distribuição dos alvéolos, L_d é definido pela Eq. (22).

$$L_d = L_v - 2b_{we,\min} + b_w \quad (22)$$

Por fim, o arco de circunferência no corte da parte complementar do alvéolo a ser preenchido por uma chapa de aço (Figura 11) é determinado pela Equação (23).

$$\alpha = \arcsen\left(\frac{h_{e0}}{r}\right) \quad (23)$$

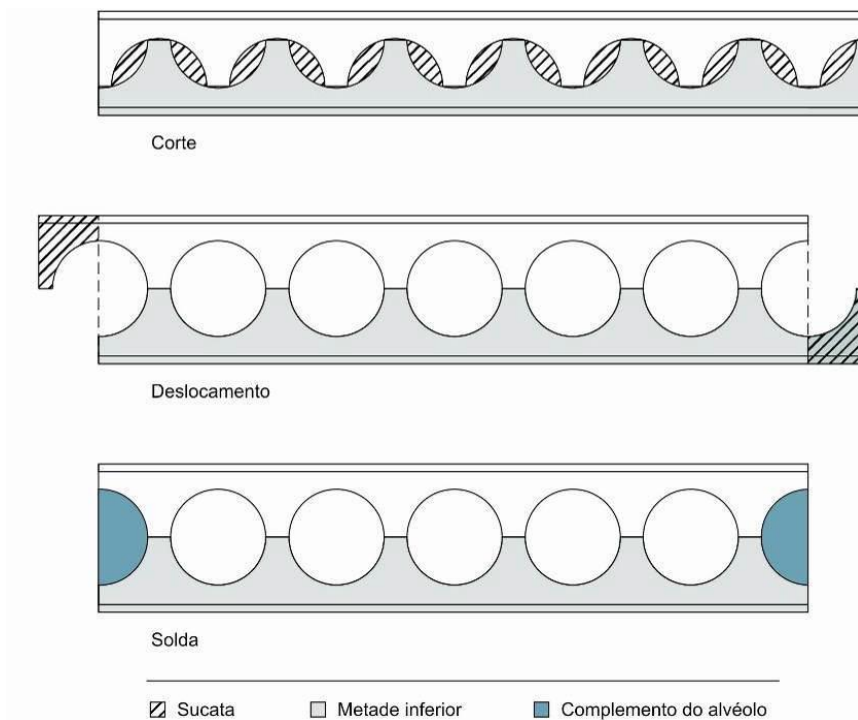


Figura 11 - Montagem de uma viga celular e alvéolo a ser preenchido (Oliveira [4])

Com o auxílio de representações gráficas foram obtidas expressões de comprimento de corte e solda apresentadas nas Equações (24) e (25), com α em radianos.

$$C_{corte} = 2b_{we} + 2nb_w + h_{e0} + 2\pi nr + 2\alpha r \quad (24)$$

$$C_{solda} = b_{we} + nb_w + 2b_{we} - p + 2\alpha r \quad (25)$$

3.2.1 Vigas celulares genéricas

Para uma viga celular qualquer, em que os parâmetros d_g e h_{e0} são dados respectivamente pelas Equações (26) e (27), os comprimentos de corte e de solda podem ser escritos conforme as equações (28) e (29), respectivamente.

$$d_g = kd \quad (26)$$

$$h_{e0} = (k-1)d \quad (27)$$

$$C_{corte} = \frac{\left[(1 - 2k + k^2)(2,283nd^2 + 2\alpha d^2) - dp(1 - k) + 2d^2k(2 - k) + 0,5p^2(1 + \alpha + 3,142n) + L_v p \right]}{p} \quad (28)$$

$$C_{solda} = - \frac{\left[(1 - 2k + k^2)(2d^2n + 3d^2 + 2d^2\alpha) + p^2(0,25 + n + 0,5\alpha) - 1,5L_v p \right]}{p} \quad (29)$$

onde

$$n = \text{int} \left(\frac{L_v}{p} - 1 \right) \quad (30)$$

$$\alpha = \arcsen \left(\frac{dp(k - 1)}{0,25p^2 + d^2(k - 1)^2} \right) \quad (31)$$

3.2.2 Vigas celulares correspondentes a padrões de vigas casteladas

Neste artigo são utilizadas as denominações para padrões celulares, definidas como Celular-Peiner e Celular-Litzka, que são vigas celulares com características geométricas (razão de expansão e passo) semelhantes às vigas casteladas nos padrões Peiner e Litzka, respectivamente.

3.2.2.1 Padrão Celular-Peiner

Substituindo os parâmetros geométricos das vigas Celular-Peiner nas as equações **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, são obtidas as equações de comprimento de corte e solda para este padrão conforme apresentadas a seguir:

$$C_{corte} = L_v + 2,191d + 2,737d.n \quad (32)$$

$$C_{solda} = 1,5L_v + 0,399d - 1,833d.n \quad (33)$$

onde

$$n = \text{int} \left(\frac{2}{3} \frac{L_v}{d} - 1 \right) \quad (34)$$

3.2.2.2 Padrão Celular-Litzka

Substituindo os parâmetros geométricos das vigas Celular-Litzka nas as equações **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, são obtidas as equações de comprimento de corte e solda para este padrão conforme apresentadas a seguir:

$$C_{corte} = L_v + 2,287d + 3,051d.n \quad (35)$$

$$C_{solda} = 1,5L_v + 0,343d - 2,021d.n \quad (36)$$

onde

$$n = \text{int} \left(\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{L_v}{d} - 1 \right) \quad (37)$$

4 ANÁLISE COMPARATIVA

Com as equações apresentadas, é possível obter os valores de comprimento de corte e solda para qualquer vão e qualquer perfil original para as tipologias e padrões de vigas alveolares analisados. A seguir são apresentados resultados obtidos com as equações desenvolvidas para fins de comparação de custo de fabricação das vigas nos diferentes padrões.

4.1 Vigas Casteladas

Na Figura 12 são apresentados os resultados de comprimento de corte de vigas casteladas nos padrões Litzka, Peiner e Anglo-Saxão, variando-se o vão de projeto e mantendo a altura do perfil original constante. Na Figura 13 apresentam-se os resultados de comprimento de corte das vigas casteladas nos três padrões para um vão de projeto fixo variando-se a altura do perfil original. Observa-se que o comprimento de corte cresce na seguinte ordem de padrões: Anglo-Saxão, Litzka, Peiner.

Observa-se que o comprimento de corte de fabricação da viga castelada é influenciado diretamente pelo comprimento da viga. No entanto observa-se que não sofre influência da altura do perfil (Figura 13), pois à medida que se aumenta a altura, há um aumento da largura dos alvéolos (Tabela 1), mas, por outro lado, há também uma redução do número de alvéolos, como pode ser visto nas equações que determinam a quantidade de alvéolos.

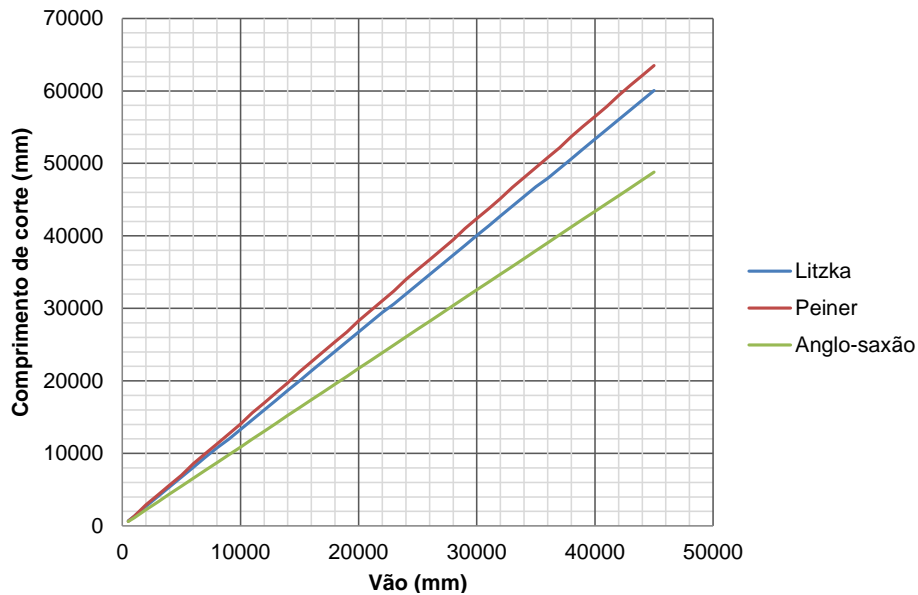


Figura 12 - Comprimento de corte por vão de projeto para altura do perfil original de 300 mm

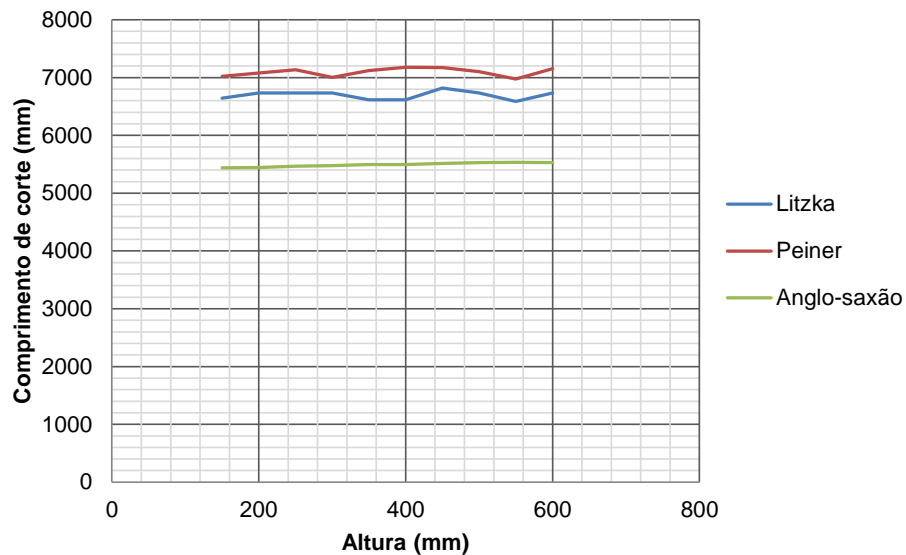


Figura 13 - Comprimento de corte por altura do perfil original para um vão de 5000 mm

Na Figura 14 são apresentados os resultados de comprimento de solda das vigas casteladas nos padrões analisados, variando-se o vão de projeto e mantendo a altura do perfil original constante. Na Figura 15 são apresentados os resultados para um vão de projeto fixo variando-se a altura do perfil original. Observa-se que o comprimento de solda é menor no padrão anglo-saxão que nos outros dois padrões.

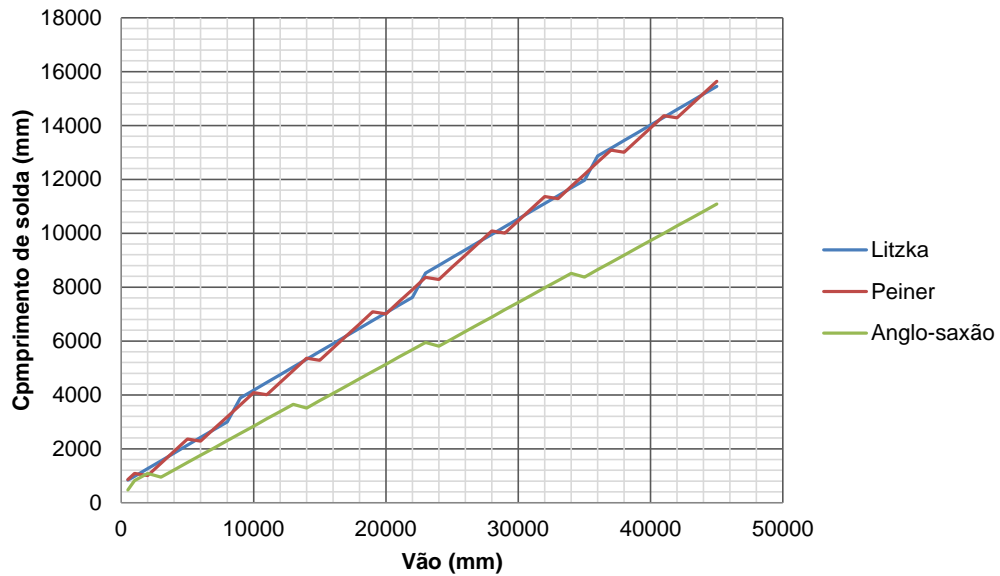


Figura 14 – Comprimento de solda por vão de projeto para altura do perfil original de 300 mm

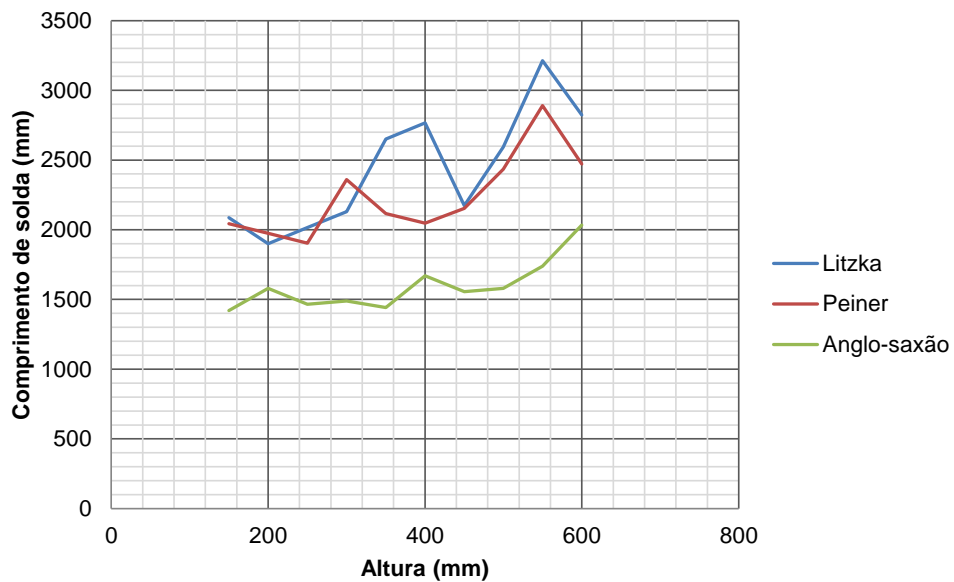


Figura 15 - Comprimento de solda por altura do perfil original para um vão de 5000 mm

Observa-se que o comprimento de solda na viga castelada é influenciado diretamente pelo comprimento da viga, porém não sofre influência da altura do perfil (Figura 15), pois à medida que se aumenta a altura, há um aumento da largura dos alvéolos (Tabela 1), mas a quantidade de alvéolos diminui.

4.2 Vigas celulares

Na Figura 16 são apresentados os resultados de comprimento de corte das vigas celulares nos padrões analisados (Celular-Peiner e Celular-Litzka) variando-se o vão de projeto e mantendo a altura do perfil original constante. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** são apresentados os resultados para um vão de projeto fixo variando-se a altura do perfil original. Observa-se que o comprimento de corte é maior para o padrão Celular-Peiner. De igual modo às vigas casteladas, observa-se que o comprimento de corte varia com o comprimento da viga, mas não possui influência significativa da altura do perfil.

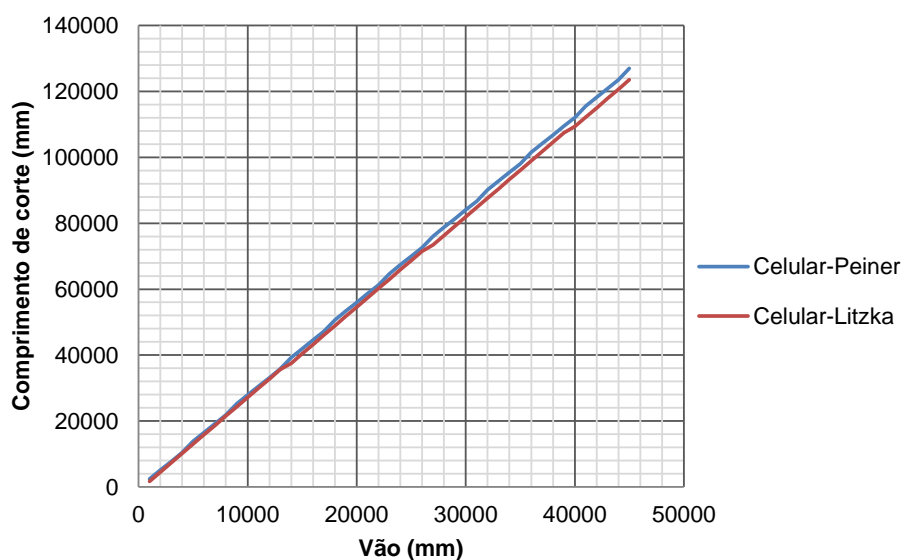


Figura 16 - Comprimento de corte por vão de projeto para altura do perfil original de 300 mm

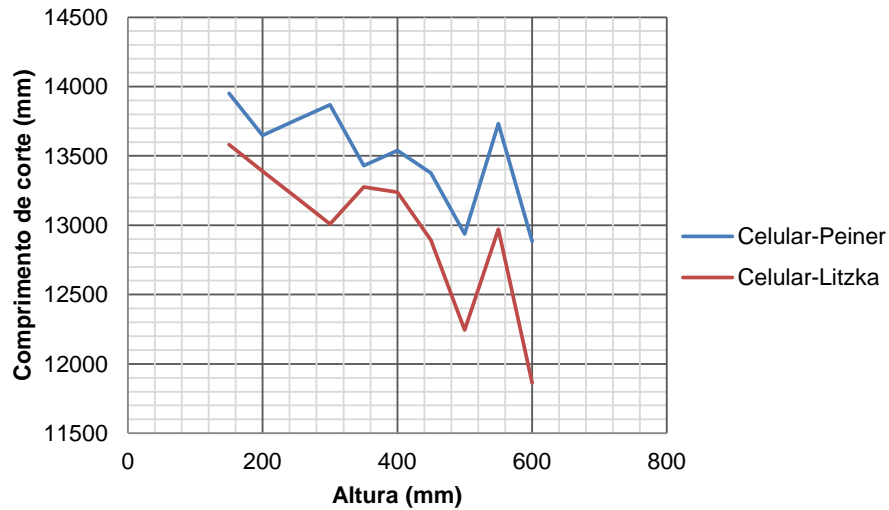


Figura 17- Comprimento de corte por altura do perfil original para um vão de 5000 mm

Na Figura 18 são apresentados os resultados de comprimento de solda das vigas celulares nos padrões analisados (Celular-Peiner e Celular-Litzka), variando-se o vão de projeto e mantendo a altura do perfil original constante. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** são apresentados os resultados para um vão de projeto fixo variando-se a altura do perfil original. Observa-se que o comprimento de solda é menor no padrão Celular-Peiner que no Celular-Litzka. De igual modo às vigas casteladas, observa-se que o comprimento de corte varia com o comprimento da viga, mas não possui influência significativa da altura do perfil.

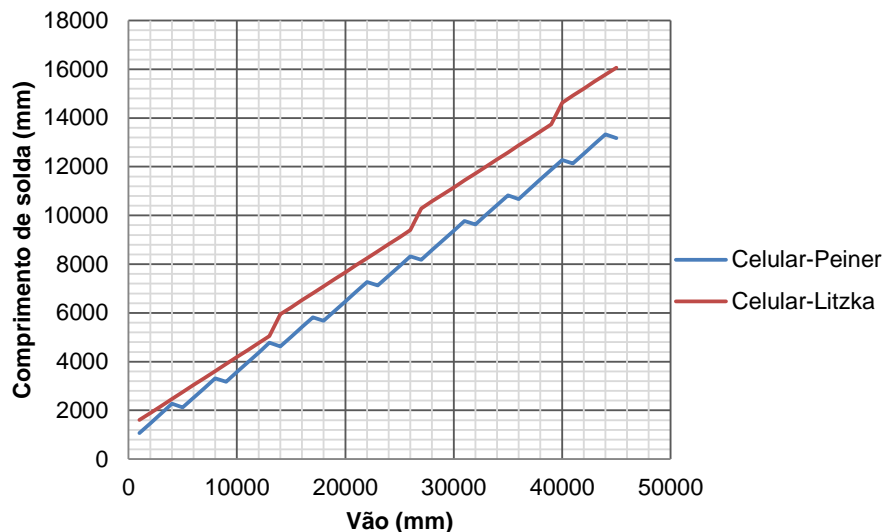


Figura 18 - Comprimento de solda por vão de projeto para altura do perfil original de 300 mm

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

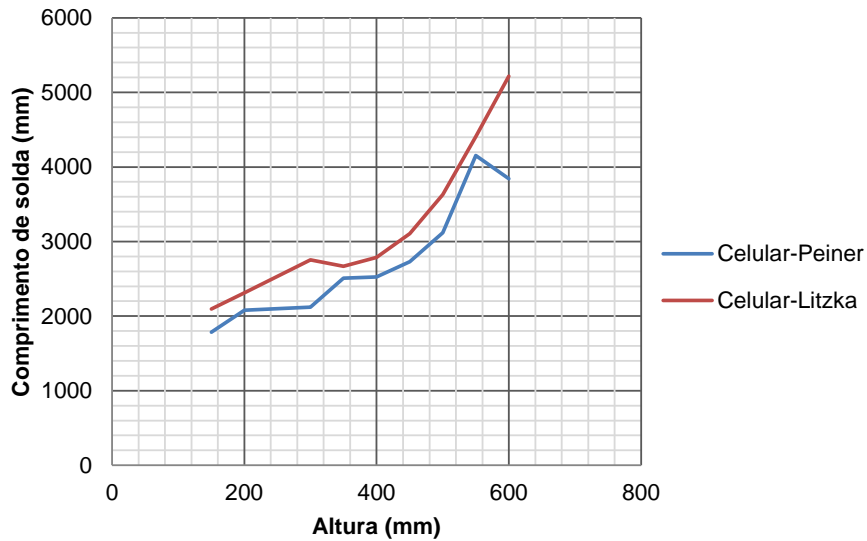


Figura 19 - Comprimento de solda por altura do perfil original para um vão de 5000 mm

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi apresentar o desenvolvimento de equações para o cálculo do comprimento de corte e de solda das vigas casteladas nos padrões Litzka, Peiner e Anglo-Saxão e para as vigas celulares, em função das propriedades geométricas do perfil original.

Em análises comparativas entre os padrões de vigas casteladas e celulares pode-se verificar que o custo de fabricação das vigas alveolares, com corte e solda varia com o padrão adotado e pode ser escrito em função da altura do perfil original e do vão de projeto da viga alveolar.

Conclui-se que o padrão Anglo-Saxão, definido pela norma britânica é o padrão mais econômico tanto com custo de corte quanto com custo de solda.

As equações propostas podem ser úteis para a contabilização dos custos de fabricação das vigas alveolares relacionados ao corte e à solda e colabora para a escolha das vigas na construção do ponto de vista econômico e deve ser utilizado em associação à análise da capacidade resistente da viga e aos critérios arquitetônicos do projeto.

Agradecimentos

Os autores agradecem à UNIFEI por possibilitar a realização da pesquisa, ao CNPq pela concessão de bolsas e à FAPEMIG por auxílio financeiro.



REFERÊNCIAS

- 1 Veríssimo, G. S.; Vieira, W. B.; Silveira, E. G.; Ribeiro, J. C. L; Paes, J. L. R.; Bezerra, E. M.; Silva, A. L. R. C.; Fakury, R. H.; Dimensionamento de vigas alveolares de aço. CONSTRUMETAL 2012: Congresso Latino-Americano da Construção Metálica. São Paulo: 2012.
- 2 Hechler, O.; Müller, C.; Sedlacek, G. Investigations on Beams with Multiple Regular Web Openings. Composite Construction in Steel and Concrete. V: pp. 270-281; 2006.
- 3 Veríssimo, G. S.; Paes, J. L. R.; Fakury, R. H.; Rodrigues, F. C. Estudo de vigas de aço alveolares fabricadas a partir de perfis laminados brasileiros. Relatório de Pesquisa. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa; 2010.
- 4 Oliveira, L. B. Procedimentos para definição das características geométricas de vigas alveolares de aço para sistemas de piso e de cobertura [Dissertação de Mestrado]. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa; 2012.
- 5 BS 5950-1:2000: Structural use of steelwork in building – Part 1: Code of practice for design – Rolled and welded sections. London: British Standards; 2000.
- 6 Vieira, W. B. Estudo numérico-experimental da flambagem do montante de alma em vigas casteladas de aço [Tese de Doutorado]. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa; 2015.
- 7 Galambos, A. R.; Hosain, M. U.; Speirs, W. G. Optimum expansion ratio of castellated steel beams. Engineering Optimization, 1973; Vol. 1:213-225.