

LUIZA BAPTISTA DE OLIVEIRA

**PROCEDIMENTOS PARA DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS
GEOMÉTRICAS DE VIGAS ALVEOLARES DE AÇO PARA
SISTEMAS DE PISO E DE COBERTURA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2012

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

O48p
2012

Oliveira, Luiza Baptista de, 1985-

Procedimentos para definição das características geométricas de vigas alveolares de aço para sistemas de piso e de cobertura / Luiza Baptista de Oliveira. – Viçosa, MG, 2012. x, 134f. : il. ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Gustavo de Souza Veríssimo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 122-124

1. Vigas. 2. Aço - Estruturas. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 624.1772

LUIZA BAPTISTA DE OLIVEIRA

**PROCEDIMENTOS PARA DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS
GEOMÉTRICAS DE VIGAS ALVEOLARES DE AÇO PARA
SISTEMAS DE PISO E DE COBERTURA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 16 de março de 2012

José Luiz Rangel Paes
(Coorientador)

Antônio C. Gonçalves Tibiriçá
(Coorientador)

Ana Lydiá Reis de Castro e Silva

Gustavo de Souza Veríssimo
(Orientador)

Aos meus pais, Soter e Denise.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

Ao amigo e orientador **Professor Gustavo de Souza Veríssimo**, pela oportunidade de desenvolvermos esta pesquisa e pela dedicação em me ajudar a ser uma profissional e uma pessoa melhor.

Ao **Professor José Luiz Rangel Paes**, pelo incentivo, pelos ensinamentos, pela oportunidade de participar da equipe de projetos executivos do REUNI, o que me proporcionou um acréscimo significativo para minha experiência profissional.

À **Professora Aline Werneck B. de Carvalho** e ao **Professor A. C. G. Tibiriçá**, ambos do Programa de Pós-Graduação da Engenharia Civil da UFV, pelos ensinamentos em suas disciplinas, e por serem exemplos de profissionais que me inspiram.

Aos amigos **Giuliana Ferrari**, **Halley Silva** e **Maila Pereira** pelo companheirismo e ensinamentos durante o tempo em que estivemos juntos e em especial à **Eliane G. da Silveira**, que além do companheirismo, compartilhou conhecimentos sobre vigas alveolares, e muito contribuiu para este trabalho.

Ao **Washington** Vieira pela disposição em ler, comentar e propor melhorias para cada assunto abordado neste trabalho. E por me ensinar de forma didática e paciente parte do que ele, como engenheiro e veterano da pós-graduação, sabe sobre as vigas alveolares.

Ao **Prof. José Maria**, pelas discussões e ensinamentos valiosos sobre as vigas alveolares.

Aos meus pais, **Soter** e **Denise**, e aos meus irmãos, **Vitor** e **Júlia**, pela torcida carinhosa que sempre dispensam a mim.

Ao meu noivo **Raphael**, grande incentivador, amigo e companheiro, ao lado do qual os aprendizados são mais intensos e os desafios, divididos, se tornam mais leves.

À **Universidade Federal de Viçosa**, pela oportunidade, à CAPES, via programa **REUNI**, pelo investimento e à CPC Estruturas pela colaboração.

Sou grata a Deus, pelas pessoas com quem convivi e muito aprendi durante esta pesquisa; pela forma bondosa com que ele conduz os meus passos; pela certeza de que ele tem sob seus olhos todas as coisas, e que todas elas cooperam para o bem daqueles que o amam.

SUMÁRIO

Lista de símbolos.....	vii
Resumo	ix
Abstract	x
1 Introdução	1
1.1 Considerações iniciais	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura do documento.....	3
2 Tipologias usuais e propriedades geométricas das vigas alveolares	5
2.1 Tipologias usuais	5
2.2 Propriedades geométricas	6
3 Revisão bibliográfica	8
3.1 Histórico das vigas alveolares	8
3.1.1 A evolução no processo de fabricação das vigas alveolares.....	11
3.2 Geometria dos perfis alveolares	16
3.2.1 Considerações gerais sobre a geometria de vigas alveolares.....	16
3.2.2 Razão de expansão das vigas alveolares.....	17
3.2.2.1 Razão de expansão das vigas casteladas	17
3.2.2.2 Razão de expansão das vigas celulares	24
3.2.3 Parâmetros para o traçado geométrico do perfil alveolar	24
3.2.4 Adequação da geometria do perfil alveolar ao vão de projeto	31
3.3 Padrões geométricos das vigas alveolares	37
3.3.1 Padrões para a tipologia castelada	37
3.3.1.1 O padrão Litzka.....	37
3.3.1.2 O padrão Peiner.....	37
3.3.1.3 O padrão Anglo-Saxão.....	38
3.3.2 A tipologia celular	39

4 Aspectos relacionados à fabricação de vigas alveolares.....	46
4.1 Considerações preliminares	46
4.2 Fabricação a partir da expansão de perfis laminados	47
4.2.1 Vigas com eixo reto.....	53
4.2.2 Vigas com eixo curvo ou com contraflecha	53
4.2.3 Vigas com inércia variável	55
4.3 Fabricação como perfil soldado.....	55
4.4 Considerações finais sobre o processo de fabricação	57
5 Alternativas de aplicação e detalhes construtivos para vigas alveolares.....	58
5.1 Principais campos de aplicação das vigas alveolares	58
5.2 Vigas alveolares para sistemas de piso.....	59
5.2.1 Passagem de instalações técnicas	59
5.2.1.1 Economia de espaço vertical	60
5.2.1.2 Tendência em aumentar a quantidade de instalações técnicas	61
5.2.1.3 Grandes vãos	61
5.2.1.4 Comportamento misto aço-concreto	63
5.3 Vigas alveolares para sistemas de cobertura	64
5.4 Outras aplicações	69
5.4.1 Pontes e passarelas de pedestres	69
5.4.2 Pilares	71
5.4.3 Requalificação de edifícios antigos	72
5.5 Detalhes construtivos.....	74
5.5.1 Aumento do alvéolo para passagem de tubulação	74
5.5.2 Fechamento do alvéolo	75
5.5.3 Ligações rígidas nas extremidades do perfil alveolar.....	76
5.5.4 Reforço dos alvéolos	77
5.5.5 Enrijecimento do montante.....	77
5.5.6 Absorção de cargas concentradas	78
5.5.7 Considerações sobre os detalhes construtivos	78
6 Proposição de procedimentos para pré-dimensionamento de vigas alveolares ...	79
6.1 Considerações gerais	79
6.2 Procedimento para pré-dimensionamento de vigas casteladas.....	80

6.3 Procedimento para pré-dimensionamento de vigas celulares.....	86
6.3.1 Considerações sobre a razão de expansão da viga celular.....	86
6.3.2 Descrição do procedimento para pré-dimensionamento da viga celular	89
6.4 Exemplos de aplicação	92
6.4.1 Pré-dimensionamento de vigas casteladas.....	92
6.4.1.1 Vigas casteladas para sistemas de piso.....	92
6.4.1.2 Vigas casteladas para sistemas de cobertura	98
6.4.2 Pré-dimensionamento de vigas celulares.....	110
6.4.2.1 Vigas celulares para sistemas de piso	110
6.4.2.2 Vigas celulares para sistemas de cobertura	114
7 Conclusões	119
7.1 Conclusões gerais	119
7.2 Conclusões sobre os procedimentos propostos	120
7.3 Sugestões para trabalhos futuros	121
Referências Bibliográficas	122
Apêndice 1	125

LISTA DE SÍMBOLOS

a_o	maior largura do alvéolo poligonal
b	projeção horizontal do lado inclinado do alvéolo hexagonal
b_f	largura da mesa do perfil
b_w	menor largura do montante de alma
b_{we}	largura final do montante de extremidade
d	altura total de um perfil de alma cheia
f_y	tensão de escoamento do aço
h_o	altura do alvéolo poligonal
h_t	altura do tê acima ou abaixo do alvéolo
k	razão de expansão
n	número de alvéolos
n_p	número de passos distribuídos
p	passo = distância entre centros de alvéolos adjacentes ou entre centros de montantes adjacentes
t_f	espessura da mesa do perfil
t_w	espessura da alma do perfil
\bar{y}	posição do C.G. do tê em relação à face externa da mesa (ver Figura 6)
y_o	distância do C.G. do tê ao eixo da viga
z	comprimento residual para o vão de projeto
A_g	área total da seção da viga alveolar
A_t	área da seção transversal do tê acima ou abaixo do alvéolo

C	comprimento do eixo centroidal da viga alveolar curva
C_i	comprimento do eixo centroidal do tê inferior da viga alveolar curva
C_s	comprimento do eixo centroidal do tê superior da viga alveolar curva
D_o	diâmetro do alvéolo circular
I_{0m}	inércia média da seção expandida
I_t	momento de inércia do tê em relação ao seu C.G.
I_{x_o}	maior momento de inércia da seção vazada
L_b	comprimento requerido para o perfil original
L_c	comprimento da viga para o corte
L_d	comprimento útil para distribuição de alvéolos
L_g	comprimento da viga alveolar após fabricação
L_v	vão de projeto arquitetônico
R_o	razão de expansão ótima
R	raio referente ao eixo centroidal da viga alveolar curva
Z_{x_o}	módulo resistente plástico da seção vazada
α	ângulo de abertura da viga alveolar curva
θ	ângulo de castelação ou ângulo interno do alvéolo

RESUMO

OLIVEIRA, Luiza Baptista de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2012. **Procedimentos para definição das características geométricas de vigas alveolares de aço para sistemas de piso e de cobertura.** Orientador: Gustavo de Souza Veríssimo. Coorientadores: José Luiz Rangel Paes e Antônio Cleber Gonçalves Tibiriçá.

A expansão do segmento da construção metálica no Brasil tem sido acompanhada de uma demanda crescente por recursos que subsidiem todo processo de projeto de estruturas de aço, desde sua concepção até sua materialização. Nesse contexto, observa-se o ressurgimento do interesse pelas vigas alveolares, em função das vantagens técnicas e estéticas que esses elementos oferecem, em parte motivado pelo início da produção de perfis I de aço laminados no Brasil, a partir de 2002. Geralmente, as vigas alveolares são fabricadas a partir de perfis I de aço laminados, cortando-se sua alma longitudinalmente, segundo um traçado sinuoso simétrico, de modo que as metades obtidas podem ser deslocadas uma em relação à outra e soldadas, dando origem a uma nova viga com uma série de furos na alma, com praticamente a mesma massa do perfil original, porém com maior rigidez no plano de flexão, apropriada para grandes vãos. Embora as vigas alveolares sejam uma solução antiga, abandonada devido ao aumento dos custos de fabricação em determinada época, mais recentemente voltaram a figurar como uma solução competitiva, devido aos avanços tecnológicos em automação de corte e solda de aço estrutural. Tendo em vista a ampla gama de possibilidades atualmente existente para a fabricação de vigas alveolares, facilitadas pelos recursos de projeto e fabricação assistidos por computador, este trabalho teve como objetivo desenvolver critérios e procedimentos para o pré-dimensionamento de vigas alveolares de aço, em função da carência de prescrições técnicas atualizadas sobre o tema. Ao final, é apresentada uma série de exemplos de aplicação dos critérios e procedimentos propostos, para diversas situações possíveis nas estruturas de edificações estruturadas em aço.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Luiza Baptista de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2012. **Procedures to define the geometric characteristics of alveolar steel beams to floor systems and roof systems.** Adviser: Gustavo de Souza Veríssimo. Co-advisers: José Luiz Rangel Paes and Antônio Cleber Gonçalves Tibiriçá.

The growth of steel construction in Brazil in recent years has naturally been accompanied by an increasing demand for resources that support the entire design process of steel structures, from its conception to its realization. In this context, there has been a resurgence of interest in alveolar beams, due to technical and aesthetic advantages that these elements offer, motivated in part by beginning production of steel rolled I profiles in Brazil, from 2002. Generally, the alveolar beams are manufactured from rolled steel I-profiles, by cutting the web along, according to a sinuous symmetrical line so that the halves so obtained can be displaced relative to one another and welded, originating a new beam with a series of web holes, with the same mass as the original profile, but with greater stiffness in the plane of bending, suitable for large spans. Although the alveolar beams are an old solution, abandoned due to rising manufacturing costs in a given time, most recently returned to appear as a competitive solution, due to technological advances in automation of cutting and welding of structural steel. Given the wide range of possibilities available today for the manufacture of alveolar beams, facilitated by the resources of design and computer aided manufacturing, this study aimed to procedures to define the geometric characteristics of alveolar steel beams to floor systems and roof systems, due to the lack of technical updates on this topic. Finally, we present a series of examples of applying the criteria and procedures proposed for various possible situations in the usual structures.

1

Introdução

1.1 Considerações iniciais

Grande parte dos elementos que integram a estrutura dos edifícios estruturados em aço, constituindo as vigas e pilares, possuem seções tipo I ou H. Os perfis I ou H são geralmente obtidos por laminação, no processo de fabricação siderúrgico (Figura 1).



Figura 1 – Perfil I em processo de laminação (CMC Steel Products).

As vigas alveolares surgiram na Europa por volta dos anos 1930 devido à necessidade de atender as demandas de perfis com altura superior à dos perfis I laminados produzidos pela indústria da época. Elas são montadas cortando-se perfis I longitudinalmente, segundo um traçado próprio que possibilita destacar as duas metades obtidas, deslocá-las certo comprimento e soldá-las de modo a constituir uma viga com altura superior à do perfil original, contendo uma sequência de aberturas na alma (Figura 2).

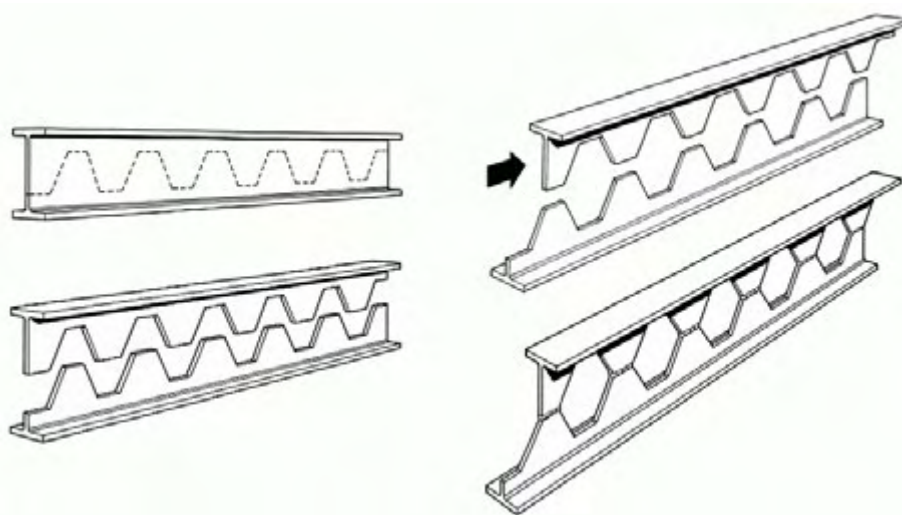


Figura 2 – Processo de obtenção das vigas alveolares
(fonte: <http://www.grunbauer.nl>– acessado em 01/05/2012)

Em geral, a configuração geométrica das vigas alveolares permite maior expressão arquitetônica e confere leveza visual aos ambientes onde as vigas são aplicadas. Sua geometria possibilita a passagem de tubos e dutos através das aberturas e pode atribuir maior resistência ao perfil de aço, o que favorece o vencimento de longos vãos. Estas características contribuem para que as vigas alveolares apresentem diversos campos de aplicação, sendo os principais deles as estruturas para sistemas de piso e de coberturas.

A maior parte dos artigos técnicos sobre vigas alveolares está relacionada a comportamento estrutural, modos de colapso e procedimentos de cálculo. O comportamento estrutural depende de diversos parâmetros, dentre os quais incluem-se o traçado geométrico da viga alveolar e o tipo de uso da edificação no qual a viga será aplicada.

São poucos os trabalhos que tratam sobre a geometria e a aplicação dos perfis alveolares em comparação com a quantidade dos que tratam sobre o comportamento estrutural. Embora haja alguns estudos na literatura americana e europeia, a difusão do uso das vigas alveolares no Brasil demanda pesquisas, uma vez que os aços produzidos atualmente pela indústria siderúrgica brasileira, bem como a geometria das seções dos perfis, possuem características diferentes das que eram correntes em décadas passadas, quando foram desenvolvidos alguns trabalhos de pesquisa sobre vigas alveolares.

Os avanços tecnológicos nas áreas de automação e comando numérico computadorizado (CNC) tem possibilitado a fabricação de vigas alveolares a custos competitivos. No caso particular do Brasil, esse fenômeno coincidiu com o início relativamente recente da produção de perfis laminados, quando a siderúrgica GERDAU AÇOMINAS ativou sua linha de laminação em 2002.

Com a expansão do mercado de construções metálicas no Brasil, têm sido demandadas novas soluções construtivas que possibilitem uma aplicação ampla e racional das estruturas de aço, dentre elas perfis de maior altura, capazes de vencer grandes vãos e, ou, atender aos limites de deslocamentos estabelecidos nas normas técnicas. Nesse sentido, as vigas alveolares constituem uma alternativa muito atraente.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver procedimentos para definição das características geométricas de vigas alveolares para sistemas de piso e de cobertura.

Os objetivos específicos são os seguintes:

- definir correlações entre os parâmetros geométricos das vigas alveolares e as características do projeto arquitetônico;
- estabelecer parâmetros para o pré-dimensionamento de vigas alveolares;
- apresentar, de modo sequencial, as decisões necessárias para aplicar as vigas alveolares no projeto arquitetônico;
- contribuir para a aplicação criteriosa das vigas alveolares pelos arquitetos.

1.3 Estrutura do documento

Após a introdução, no capítulo 2, são apresentadas as tipologias usuais e as propriedades geométricas das vigas alveolares.

Na revisão bibliográfica, apresentada no capítulo 3, comentam-se diversos trabalhos relevantes que de alguma forma tratam da geometria e da aplicação de perfis alveolares. Nesse capítulo, são também apresentadas as características dos padrões geométricos das vigas alveolares considerados neste trabalho.

No capítulo 4 são apresentados diversos aspectos relacionados ao processo de fabricação das vigas alveolares, incluindo um estudo de caso realizado em novembro de 2011, em uma indústria brasileira.

No capítulo 5 são discutidas diversas alternativas de aplicação para as vigas alveolares, bem como detalhes construtivos.

No capítulo 6 são apresentados alguns procedimentos de pré-dimensionamento para vigas alveolares, definidos em função de critérios práticos para o projeto e a fabricação, abrangendo vigas casteladas e celulares. Diversos exemplos de aplicação são descritos passo a passo.

No capítulo 7, são apresentadas as considerações finais e conclusões e, por fim, são registradas as referências bibliográficas e os apêndices.

2

Tipologias usuais e propriedades geométricas das vigas alveolares

2.1 Tipologias usuais

As vigas alveolares podem ser fabricadas em diferentes tipologias, ou seja, com diferentes tipos de alvéolos, sendo as mais usuais as vigas casteladas e as celulares.

As vigas celulares possuem alvéolos em formato circular, como ilustrado na Figura 3.

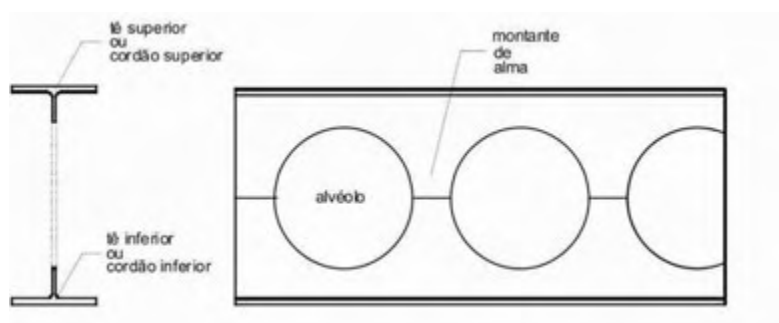


Figura 3 – Viga celular (VERÍSSIMO *et al.*, 2010).

As vigas casteladas têm aberturas hexagonais, como mostrado na Figura 4, ou, havendo a necessidade de aumentar ainda mais a inércia destas vigas, pode-se utilizar chapas expansoras, como apresentado na Figura 5, formando alvéolos octogonais.

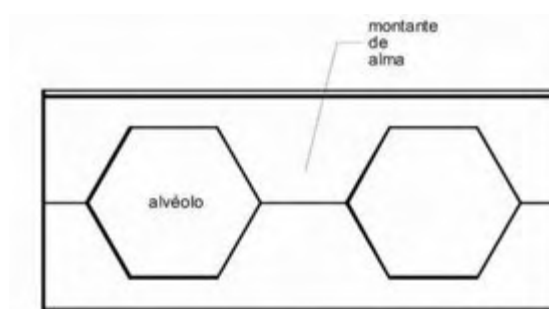


Figura 4 – Viga castelada com alvéolo hexagonal (VERÍSSIMO *et al.*, 2010).

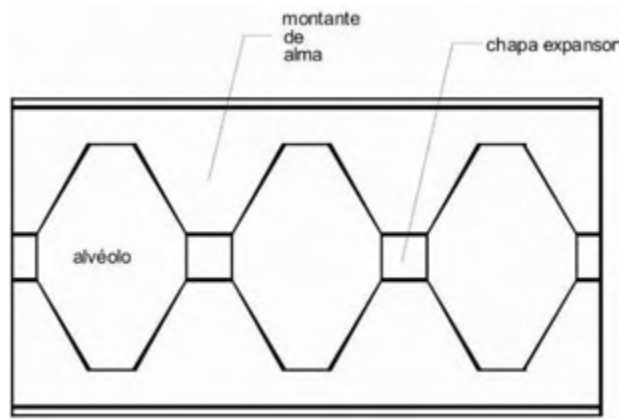


Figura 5 – Viga castelada com chapa expansora: alvéolo octogonal (VERÍSSIMO *et al.*, 2010).

Independentemente das aberturas, as vigas alveolares apresentam determinados elementos comuns, identificados no item 2.2.

2.2 Propriedades geométricas

Os elementos associados à seção transversal das vigas alveolares são apresentados na Figura 6. Na Figura 7 está representada a nomenclatura relacionada às dimensões das aberturas das vigas alveolares.

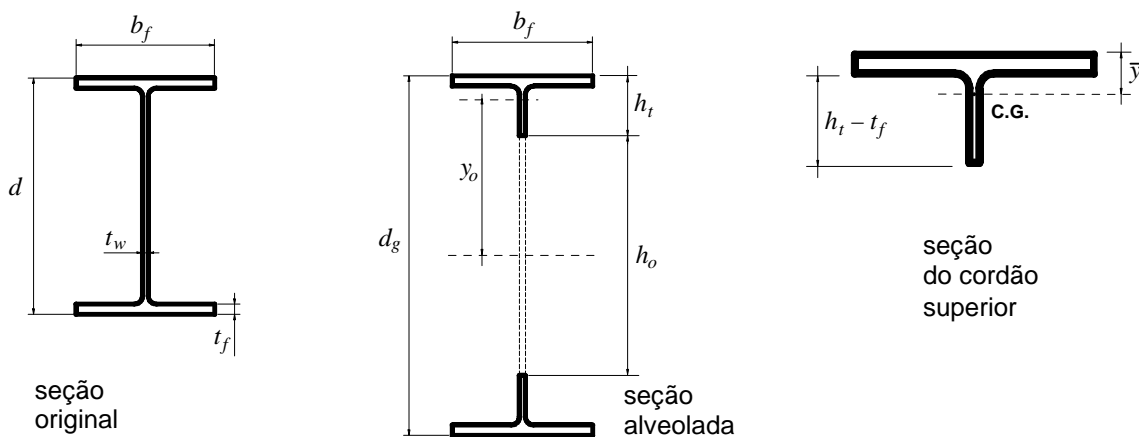


Figura 6 – Propriedades da seção transversal das vigas alveolares (VERÍSSIMO *et al.*, 2010).

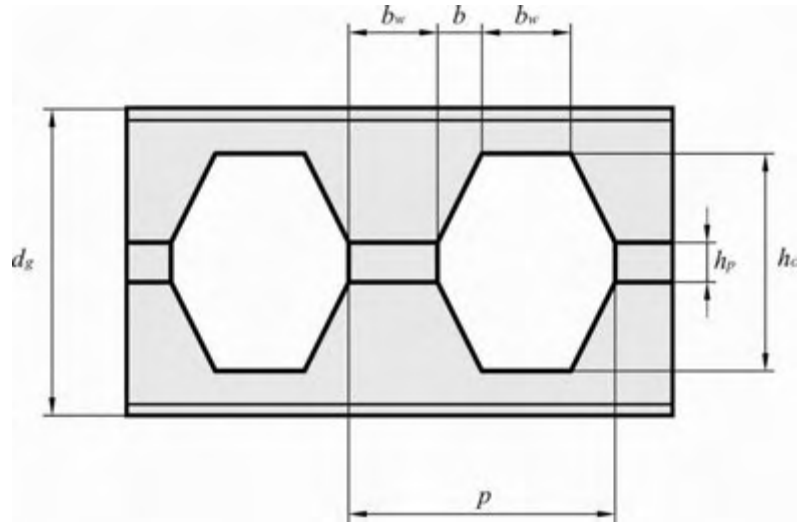


Figura 7 – Nomenclatura dos espaçamentos das aberturas nas vigas alveolares (VERÍSSIMO *et al.*, 2010).

Seguem as expressões para o cálculo das propriedades da seção transversal.

$$d_g = k \cdot d \quad (1)$$

$$h_o = d \quad \text{se } k = 1,5 \quad (2)$$

$$h_t = \frac{d_g - h_o}{2} \quad (3)$$

$$A_t = t_f (b_f - t_w) + \frac{h_o \cdot t_w}{4} \quad (4)$$

$$y_o = \frac{h_o}{2} + h_t - \bar{y} \quad (5)$$

$$\bar{y} = \frac{b_f t_f^2 + h_t^2 t_w - t_f^2 t_w}{2(b_f t_f + h_t t_w - t_f t_w)} \quad (6)$$

$$Z_{x_o} = 2 A_t y_o \quad \text{Módulo resistente plástico da seção vazada} \quad (7)$$

$$I_{x_o} = 2 \left(I_t + A_t y_o^2 \right) \quad \text{Maior momento de inércia da seção vazada} \quad (8)$$

$$I_t = \frac{b_f t_f^3}{12} + b_f t_f \left(\bar{y} - \frac{t_f}{2} \right)^2 + \frac{t_w (h_t - t_f)^3}{12} + t_w (h_t - t_f) \left(\bar{y} - \frac{h_t + t_f}{2} \right)^2 \quad (9)$$

3

Revisão bibliográfica

3.1 Histórico das vigas alveolares

O registro mais antigo encontrado na literatura sobre a aplicação de vigas alveolares menciona vigas com vão de 12 metros, fabricadas no início dos anos 1930 pelas fábricas *Skoda* em *Plzeň*, para a estrutura de uma fábrica em *Doudlevecká*, na República Tcheca (GRÜNBAUER, 2011). O surgimento das vigas alveolares está relacionado ao desenvolvimento da tecnologia de solda na construção metálica, datada do final dos anos 1920.

O primeiro pedido de patente para vigas casteladas foi solicitado em 1937 em nome de Geoffrey Murray Boyd. Em janeiro de 1939, a patente de número 498281 foi concedida a Boyd pelo *British Patent Office*.

O método de construção do perfil castelado ocorreu a Boyd em 1935, em Buenos Aires, na Argentina. Na época, Boyd trabalhava como engenheiro de estruturas para a *British Structural Steel Company*, subsidiária sul-americana da *Dorman Long*. O fato motivador foi o desafio de projetar um perfil para ser utilizado como monotrilha para uma talha. A largura máxima da mesa do perfil era, necessariamente, restringida pela largura de abertura da talha, e os perfis disponíveis que atendiam à restrição de largura da mesa eram insuficientemente rígidos para vencer o vão em questão. Boyd imaginou inicialmente enrijecer um perfil soldando outro abaixo dele. Porém, a solução evoluiu quando visualizou a possibilidade de castelar o perfil de forma a aumentar a sua altura e, conseqüentemente, a sua rigidez. Um experimento com um modelo de papelão mostrou de forma imediata a viabilidade da ideia e, assim, o perfil de Boyd foi inventado.

Por razões diversas, dentre as quais a Segunda Guerra Mundial, a invenção de Boyd não foi explorada comercialmente. Os direitos de sua patente foram atribuídos à *Appleby Frodingham*, subsidiária da *United Steel Companies Limited*, que comercializava perfis

de aço fabricados em conformidade com os princípios de Boyd. Desde então, esses perfis passaram a ser chamados de vigas casteladas. A patente já expirou há muitos anos, o que permitiu que seções casteladas pudessem ser produzidas por qualquer fabricante de estruturas de aço (KNOWLES, 1991).

Em meados do século passado, a indústria da construção metálica teve dificuldades de conseguir manter seus preços competitivos, em parte, devido ao aumento de custo da produção e da montagem da estrutura de aço e, em parte devido ao desenvolvimento de técnicas de pré-fabricação e racionalização. Os perfis laminados de aço de alma cheia concorriam com a construção em concreto apenas em situações especiais (LITZKA, 1960).

As tentativas de produzir estruturas seguras e ao mesmo tempo leves e econômicas remontam aos tempos pré-guerra. As vigas alveolares foram produzidas mesmo naqueles dias mas, para Litzka (1960), obtiveram sucesso limitado no mercado devido ao seu alto custo de produção, posto que até aquele momento as operações de fabricação das vigas casteladas eram feitas manualmente.

Vale ressaltar que inicialmente foram produzidas apenas vigas com furos hexagonais ou octogonais, chamadas de casteladas por apresentarem saliências separadas por intervalos iguais, como as ameias posicionadas na parte superior das muralhas de castelos (Figura 8).



Figura 8 – Ameias na muralha de um castelo (foto: Gustavo Veríssimo).

O primeiro artigo que menciona as vigas celulares (vigas alveolares com furos circulares), foi publicado em 1988 por Jose Monfort Lleonart, arquiteto, professor da Escola Técnica de Arquitetura de Valência na Espanha. O autor apresenta os alvéolos celulares como uma variação do traçado de corte aplicado ao perfil original. Lleonart registrou que naquela época as vigas com furos circulares apresentavam pouca aceitação na prática.

A viga celular foi inventada por Peter A. Walker. A companhia britânica *Wescol Structures Limited* foi cessionária da invenção e é a detentora de patentes destas vigas em todo o mundo. A companhia atua por meio de três empresas subsidiárias. Uma delas, a *Westok Structural Services*, é a responsável por fabricar os perfis celulares com a patente da companhia. Fundada em 1985, a *Westok* é membro da *British Constructional Steelwork Association (BCSA)* e do *Steel Construction Institute (SCI)*. O método de fabricação de vigas celulares recebeu patente de nº 4894898, emitida em 23 de janeiro de 1990. A data de validade desta patente foi estimada até 10 de janeiro de 2009.

O pedido de patente incluiu cinco diferentes tipos de alvéolos circulares conforme ilustrado na Figura 9.

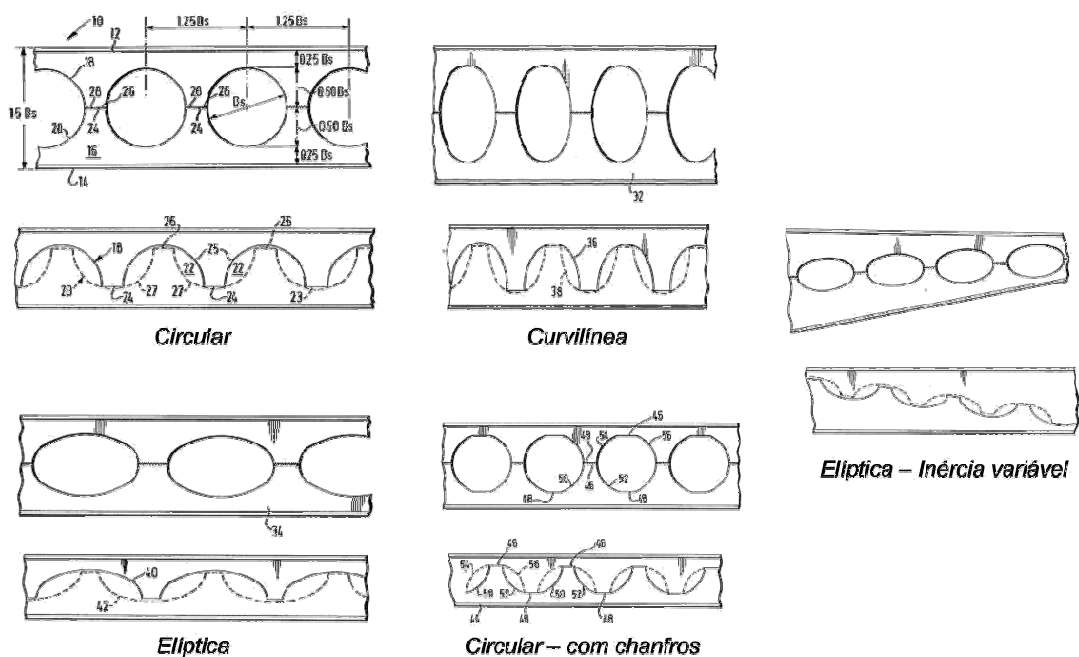


Figura 9 - Vigas celulares da patente nº 4894898.

Nos últimos anos, a aplicação das vigas celulares tem sido cada vez mais solicitada por arquitetos (HECHLER *et al.*, 2006). Além de oferecer as vantagens já conhecidas das vigas casteladas, essas vigas podem ser mais bem exploradas por sua aparência estética.

Os avanços tecnológicos na área de automação possibilitaram o desenvolvimento de novos sistemas para corte automatizado de aço a um custo competitivo. Esse fato, além de contribuir para o ressurgimento do interesse pelas vigas alveolares, por compensar o acréscimo de custo da mão de obra observado em décadas passadas, amplia a gama de possibilidades de cortes possíveis.

3.1.1 A evolução no processo de fabricação das vigas alveolares

De modo geral o processo de fabricação das vigas alveolares compreende três fases:

- a) o corte longitudinal ao longo do perfil original de alma cheia;
- b) o deslocamento e a solda, com ou sem a inserção de chapas expansoras;
- c) corte das laterais remanescente do deslocamento e acabamento.

Até ao final dos anos 1950 essas operações eram realizadas de forma manual. Elas não podiam ser iniciadas até que a linha que iria guiar o corte fosse desenhada na alma da viga. Em seguida, o corte no perfil original era feito ao longo da viga, e na sequência as duas metades eram deslocadas no eixo longitudinal utilizando um gabarito. O uso de gabaritos não garantia uma execução precisa. Diferentes gabaritos eram necessários para cada padrão de corte e de espaçamento dos alvéolos. No caso de vigas longas, os gabaritos eram aplicados e deslocados intermitentemente ao longo do eixo longitudinal.

A empresa *German Constructional Steel Work* desenvolveu uma linha de produção para cortar as vigas de alma cheia em ziguezague, por automação, por meio de maçarico de operação contínua (LITZKA, 1960). Inicialmente, o corte automatizado foi feito com três vigas posicionadas lado a lado numa esteira, utilizando-se maçaricos com acetileno ou hidrogênio que podiam ser adaptados a um conjunto de bicos diferentes. A operação do corte automatizado era supervisionada por um operário.

A partir da operação automatizada, a operação de corte passou a ser realizada com uma velocidade entre 40 e 50 cm por minuto, dependendo da espessura da alma da viga. Como três vigas eram cortadas simultaneamente, a velocidade real do corte era de 1,20 a 1,50 m por minuto. Existia ainda a possibilidade de realizar a operação de corte em cinco vigas simultaneamente. Nesse caso, a velocidade real da operação era de até 2,50 m por minuto. Todavia a utilização de cinco chamas de corte exigia o emprego de um trabalhador adicional.

Após o corte, era necessário inverter, mover e depois soldar as duas metades do perfil original. Durante muito tempo, essas operações foram longas e dispendiosas. Por exemplo, para conectar duas metades de um perfil laminado com 15 m, era necessário contratar dois operários para colocarem as duas metades em suas posições adequadas e a operação levava cerca de três horas e meia.

Os comentários sobre o rendimento do trabalho são pertinentes, pois a fabricação de vigas alveolares implica, naturalmente, em custos mais elevados e, devido aos altos custos de produção, por muito tempo o uso de vigas alveolares foi restrito.

Tendo sido bem sucedida na produção de aparelhos automatizados, a empresa mencionada dominou a questão subsequente quando apresentou novas máquinas automatizadas que reduziram o custo da montagem final para valores ainda mais baixos.

Depois de cortadas em duas metades, as vigas passaram a ser levadas para fora da plataforma de corte com aparelhos hidráulicos de elevação e encaminhadas para uma esteira rolante. As duas metades do perfil eram, então, encaminhadas para dentro de uma máquina, onde eram erguidas e deslocadas com precisão para distâncias apropriadas. No caso das vigas octogonais, as chapas de expansão eram inseridas entre as metades do perfil, também de forma automatizada, já na posição de soldagem, que podia ou não fazer parte da sequência automatizada.

A soldagem era feita após as operações de corte e deslocamento do perfil. Na soldagem automatizada um interruptor de tempo eletrônico regulava o comprimento de parada necessário para fazer a solda, em função do comprimento do cordão de solda e da espessura da alma. Com um soldador e um auxiliar operando a máquina, era possível soldar cerca de 4,50 m por minuto.

As máquinas automatizadas utilizadas no processo de fabricação descrito acima foram patenteadas em alguns países. A primeira linha de produção completamente automatizada, desenvolvida por Litzka, provou ser tão bem-sucedida que por muito tempo as vigas casteladas foram também conhecidas como vigas Litzka (GRÜNBAUER, 2011).

Em 1962, Litzka registrou, como inventor, a patente de número 3066394, em que constam diversos aparatos para a fabricação de vigas casteladas. O objetivo principal da invenção foi proporcionar meios para melhorar o processo de fabricação da viga alveolar. Os aparatos patenteados trabalham de forma conjunta para dinamizar o corte longitudinal da viga, o deslocamento das metades e o alinhamento dos montantes. O inventor propôs equipamentos que trabalhavam em uma ou até quatro vigas simultaneamente (Figura 10).

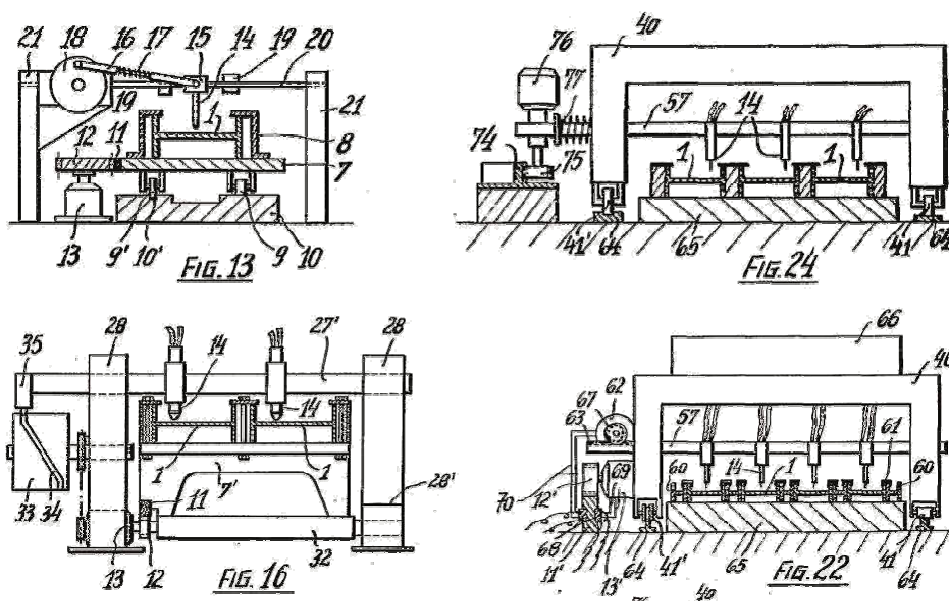


Figura 10 – Esquemas das elevações dos aparatos para corte de vigas alveolares.
(fonte: Patente nº 3066394).

Litzka registrou nesta mesma patente um aparato que tem a função de curvar as metades dos perfis castelados (Figura 11).

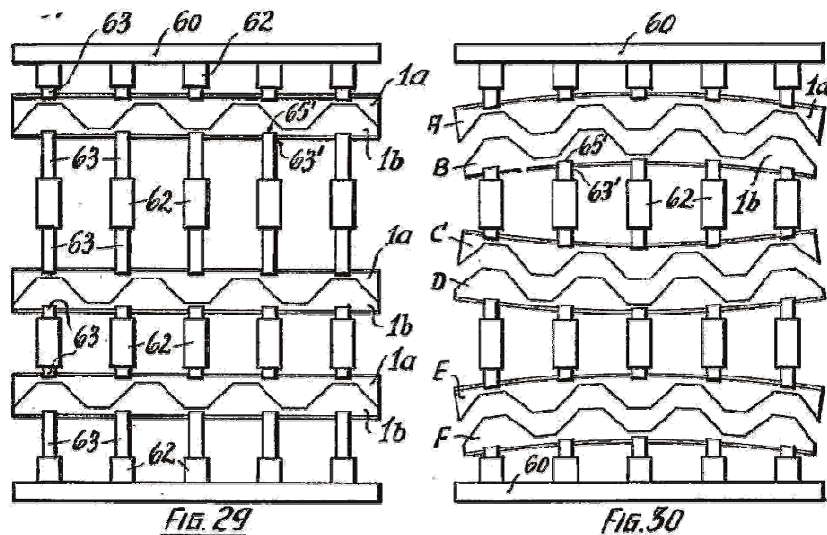


Figura 11 – Aparato para curvar a viga castelada (fonte: Patente nº 3066394).

Num artigo publicado em 1964, Boyer afirma que a fabricação de vigas casteladas consiste numa série de operações relativamente simples quando o manejo das peças é adequado e equipamentos de controle são utilizados. O autor registra que na *Mississippi Valley Structural Steel Company* as vigas estruturais de aço são divididas pelo corte de duas ou mais metades ao mesmo tempo, dependendo de suas alturas.

A divisão do perfil em duas partes é realizada usando um componente do equipamento Litzka mostrado na Figura 12. Esta é uma máquina movida a eletricidade e percorre uma esteira fixa.

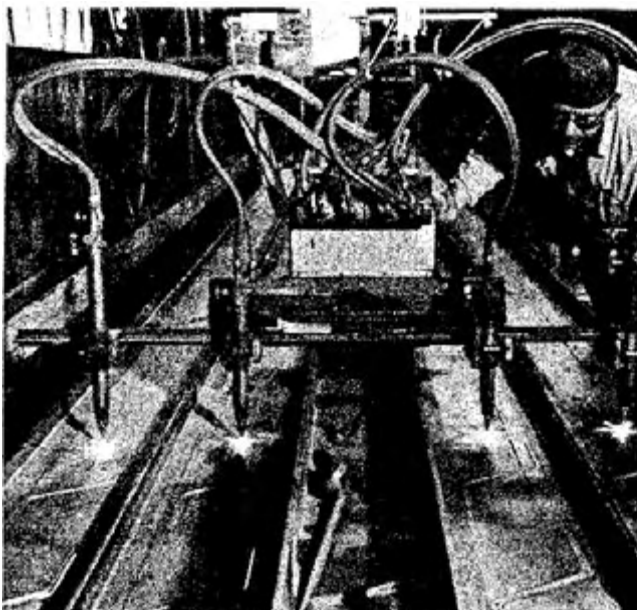


Figura 12 – Vigas sendo divididas com um padrão pré-determinado (BOYER1964).

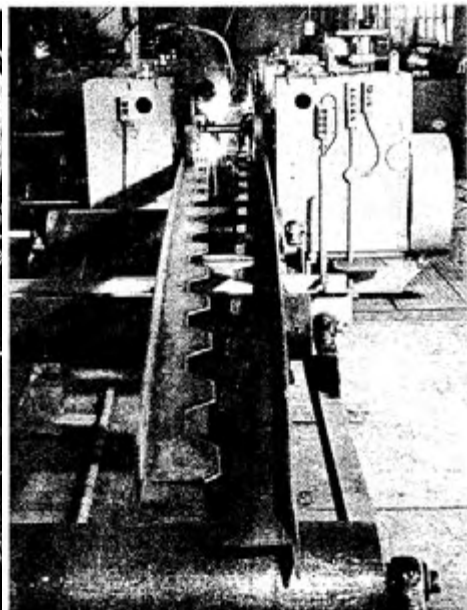


Figura 13 – Perfil na máquina de deslocamento automatizado (BOYER, 1964).

Nessa Companhia, a máquina de chama que executava o corte podia ser ajustada a qualquer padrão de traçado geométrico que ao longo do eixo longitudinal apresentasse sequência nas dimensões dos módulos e para qualquer abertura entre 3 1/8 e 7 7/8 pol.

Os perfis divididos eram levantados da mesa de corte para uma esteira rolante que retrata a sequência proposta por Litzka. Com a alma na horizontal, um perfil de cada vez era encaminhado para a esteira rolante, onde as metades eram erguidas e deslocadas para distâncias apropriadas para receber a solda, como mostrado na Figura 13.

A máquina de deslocar e soldar as metades era formada por um conjunto de rolos pesados que alinhavam as duas metades das vigas em posições adequadas para receberem a solda. Os rolos serviam também para remover a curvatura das seções t \hat{e} , causada pelo corte, e alinhar o perfil castelado em linha reta ou em uma curvatura especificada. O processo de soldagem era feito utilizando eletrodos de CO₂ protegidos por um tubo metálico.

As soldas eram produzidas para a maioria das espessuras de alma das vigas casteladas fabricadas. Na maior parte das vezes essa solda era considerada suficiente.

A viga castelada, já, soldada era movida da máquina por um conjunto de rolos. Em seguida, as operações de fabricação e acabamento, que podem incluir, por exemplo, acerto das extremidades e solda de enrijecedores, eram executadas por métodos convencionais.

No final dos anos 1970, foi introduzido um método de corte por meio de chamas operado mecanicamente e completamente automático. Este método foi seguido por outro que utilizava máquinas de leitura óptica. A vantagem deste último é que o corte podia ser mais flexível.

Com o surgimento dos computadores, a operação de corte ficou ainda mais otimizada. Nos anos recentes o desenvolvimento de novas tecnologias de oxicorte, integradas em máquinas CNC, vem possibilitando diversos padrões de corte e diminuição no tempo de fabricação.

Como as vigas alveolares requerem uma sequência de soldas, muitas vezes essa operação ainda é feita de forma manual. A automação na etapa de soldagem é comum apenas em fábricas que produzem grandes quantidades padronizadas de vigas alveolares.

Na literatura, não há descrições abrangentes acerca dos processos de fabricação das vigas alveolares, além daquele desenvolvido por Litzka. Acredita-se que não há apenas um processo de fabricação adotado pelos fabricantes de vigas alveolares. Ao contrário, o mais provável é que cada fabricante faça adaptações em seus métodos de produção, que podem variar em função do nível de desenvolvimento da empresa, da região em que está localizada, dos recursos de que dispõe e do grau de demanda pelas vigas alveolares.

Embora seja evidente que a viga alveolar em si possibilite economia do aço, é igualmente claro que sua fabricação implica em aumento no custo da produção. Dessa forma, é fácil compreender que há economia maior na fabricação dessas vigas quando se trata de uma produção em larga escala, com traçados geométricos que apresentem padrões determinados.

Com o desenvolvimento das máquinas automáticas de corte, deslocamento e solda, a indústria de engenharia de construção encontra-se cada vez mais equipada para fabricação de vigas alveolares, o que já tem favorecido sua competitividade e, portanto, sua aplicação em novas edificações.

3.2 Geometria dos perfis alveolares

3.2.1 Considerações gerais sobre a geometria de vigas alveolares

A grande vantagem das vigas alveolares é o ganho de inércia em relação ao perfil original, sem consumo adicional de aço. Vigas com maior inércia possibilitam o vencimento de maiores vãos e favorecem ao atendimento de critérios de deslocamentos máximos admissíveis para vigas.

A técnica de castelação permite que haja um significativo aumento na inércia do perfil. No entanto, há um limite até o qual o perfil laminado pode ser expandido.

A maior parte dos artigos consultados na revisão de literatura para este trabalho está relacionada a comportamento estrutural, modos de colapso e a procedimentos de cálculo das vigas alveolares que levem em consideração a influência dos alvéolos na alma das vigas. Sabe-se que o comportamento estrutural depende de diversos parâmetros tais como o valor e o tipo da carga aplicada, o perfil original utilizado, o vão a ser vencido e os detalhes construtivos empregados. Outro parâmetro que influencia nos modos de colapso é o traçado geométrico utilizado para cortar o perfil original.

São poucos os trabalhos que tratam da geometria e da aplicação dos perfis alveolares, em comparação com a quantidade dos que tratam sobre o comportamento estrutural. Nos tópicos seguintes são apresentados trabalhos relevantes, selecionados da revisão de literatura, que, de alguma forma, tratam do assunto.

3.2.2 Razão de expansão das vigas alveolares

Denomina-se *razão de expansão* a relação entre a altura do perfil expandido e a altura do perfil original, conforme representado na Eq. (10).

$$k = \frac{d_g}{d} \quad (10)$$

Há fatores que condicionam a razão de expansão nas vigas casteladas diferentemente do que ocorre nas vigas celulares. Por esta razão cada caso é tratado separadamente nos próximos tópicos.

3.2.2.1 Razão de expansão das vigas casteladas

No caso das vigas casteladas, a razão de expansão pode ser variada numa certa faixa. Historicamente alguns pesquisadores fizeram estudos variando a razão de expansão, com o objetivo de determinar a razão de expansão ótima ou como o desempenho estrutural de uma viga castelada é afetado pela razão de expansão.

Toprac e Cooke (1959) realizaram ensaios em nove vigas casteladas, nos quais a razão de expansão assumia valores de 1,33; 1,42; 1,50; 1,58; 1,67 e 1,78.

Os autores mencionam que em 1952, na Universidade do Texas, três vigas casteladas foram testadas com carregamento em dois pontos. As alturas das vigas ensaiadas eram de 1,33, 1,50 e 1,67 vezes a altura do perfil original. Um método aproximado de análise foi desenvolvido para cada viga. Os resultados e as aplicações anteriores foram analisados por Toprac e Cooke.

Toprac e Cooke (1959) desenvolveram um programa experimental com o objetivo de estudar o comportamento das vigas na fase elástica e na fase plástica, os modos de colapso, a capacidade de carga, bem como comparar os resultados experimentais com os obtidos por modelos analíticos de cálculo. Foram observadas falhas nas vigas por mecanismo de cisalhamento e por flambagem da mesa.

A Tabela 1 apresenta os ganhos de resistência e rigidez relacionados à razão de expansão para as vigas casteladas ensaiadas por Toprac e Cooke (1959), comparados com o perfil de alma cheia original (viga J).

Tabela 1 – Ganhos de resistência e rigidez à flexão para as vigas casteladas ensaiadas por Toprac e Cooke (1959), comparados com o perfil de alma cheia original (viga J).

Nome de Viga	Razão de Expansão	Comprimento de solda (mm)	M_u (kN.m)	$\frac{M_u}{M_u(J)}$	$\frac{I_0}{I_J}$	
					Real	Variação (Eq. 11)
A	1,33	57,2	49,85	1,33	1,81	-3%
B	1,42	57,2	58,55	1,56	1,95	-5%
C	1,50	57,2	57,65	1,54	2,20	-6%
D	1,58	57,2	54,59	1,47	2,36	-6%
E	1,67	57,2	62,84	1,67	2,57	-4%
F	1,50	76,2	57,31	1,53	2,20	-8%
G	1,67	76,2	57,98	1,56	2,57	-13%
H	1,50	38,1	60,47	1,62	2,20	-9%
I	1,78	38,1	49,51	1,35	2,78	-6%
J	1,00	--	37,30	1,00	1,00	1%

M_u = momento último do modelo ensaiado
 $M_{u(J)}$ = momento de inércia da viga J (perfil original)
 I_0 = inércia da viga ensaiada
 I_J = inércia da viga J
 I_{ecal} = inércia de cálculo
 I_{eexp} = inércia experimental
 Variação = Equação (11)

A Eq. (11) apresenta o valor da variação entre a inércia calculada e a inércia obtida a partir de ensaio.

$$\text{Variação} = \frac{I_{e\text{calc}} - I_{e\text{exp}}}{I_{e\text{calc}}} \quad (11)$$

A resistência última observada para as vigas casteladas variou de 1,33 a 1,67 em relação ao perfil original. O momento de inércia calculado para as vigas com alvéolos na alma variou entre 1,81 e 2,78 vezes o da viga original. A flecha máxima observada para o carregamento aplicado correspondeu a uma rigidez aparente 3 a 13% menor do que a rigidez da seção vazada, com variação média de 6%. Dessa forma, reforços na abertura parecem ser necessários nos casos em que as cargas são concentradas, pois as deformações por cisalhamento não são desprezáveis nestes casos. Em pelo menos um dos casos o uso de reforços pode ter ajudado a aumentar a resistência em 18%.

Os resultados dos ensaios indicaram que o momento resistente aumenta com o aumento da expansão da altura da viga. Embora os autores não tenham feito nenhuma recomendação para o valor ótimo de expansão das vigas, observa-se que o ganho em resistência da viga castelada em relação à não castelada é crescente até a razão de expansão igual a 1,5.

Diversos autores de trabalhos experimentais e numéricos têm utilizado a razão de expansão de 1,5 (DEMIRDJIAN, 1999; ZAAROUR e REDWOOD, 1996; BEZERRA, 2010; SILVEIRA, 2011; VIEIRA, 2011). A expansão ótima do perfil foi tratada por Galambos, Hussain e Speirs (1973).

Galambos, Hussain e Speirs (1973) realizaram um estudo com o objetivo de identificar a razão de expansão ótima para vigas alveolares. Utilizaram uma análise numérica computacional, baseada em um processo iterativo, que buscava o carregamento admissível de acordo como os modos de colapso previstos, para diversos incrementos da razão de expansão da viga.

Para a verificação dos resultados, foi realizado um estudo experimental com cinco vigas casteladas, obtidas a partir do perfil W10x15. As vigas apresentavam o vão e a largura do montante constante, variando apenas a razão de expansão (Figura 14).

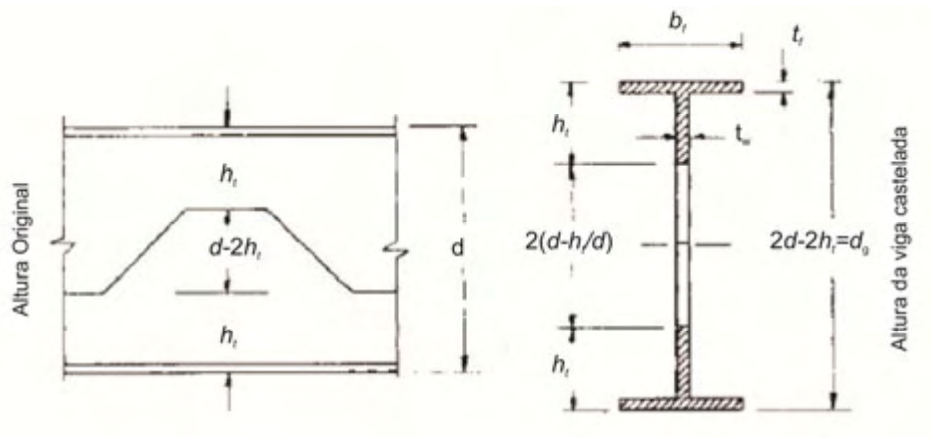


Figura 14 - Relação entre altura acima do alvéolo e altura da viga castelada (GALAMBOS, HUSSAIN e SPEIRS, 1973).

A verificação experimental foi realizada com vigas biapoiadas, com carregamento concentrado no meio do vão. O resultado confirmou a previsão teórica desenvolvida pelos autores que concluíram que a razão de expansão é afetada por fatores como: a) o tipo de análise realizada; b) a geometria do alvéolo da seção castelada; c) o tipo de carregamento a que a viga é submetida; d) o vão vencido pela viga e; e) e as propriedades do perfil original.

Sobre a geometria do alvéolo da seção castelada, os resultados revelam que quando o comprimento de solda é suficiente para evitar que a força cortante na solda seja o esforço determinante, a viga com o menor comprimento de solda tem a maior razão ótima de expansão, k_o , e resiste à maior carga. Sob essas condições, uma vez que a tensão de flexão é dominante, uma mudança no ângulo de castelação θ (Figura 15) tem pouco efeito sobre k_o ou sobre a capacidade de carga da viga. No entanto, quando a força cortante na solda é determinante, a viga com maior comprimento de solda tem maior razão ótima de expansão e resiste à maior carga. Para estes casos, uma mudança no ângulo de castelação pode ter grande efeito, tanto em k_o , quanto na resistência da viga. A viga com maior ângulo θ suporta a maior carga.

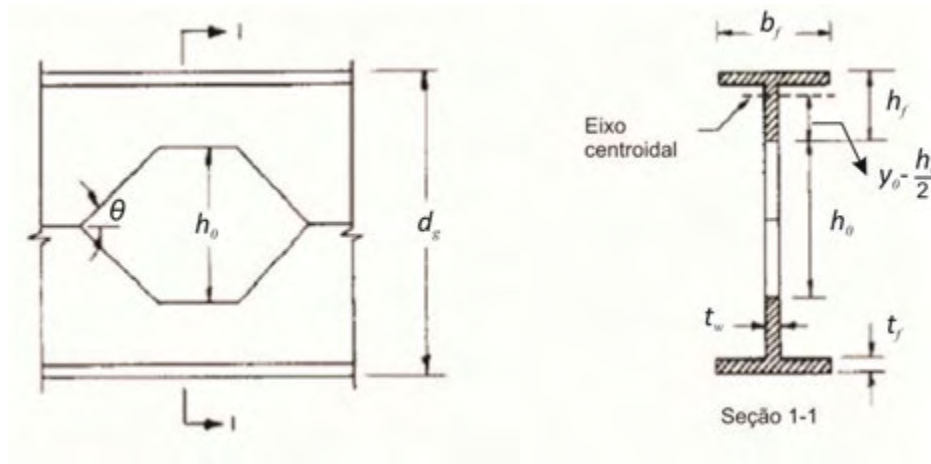


Figura 15 - Propriedades da viga expandida (GALAMBOS, HUSSAIN E SPEIRS, 1973).

O autor define k_o como sendo a razão de expansão ótima.

$$k_o = \frac{\text{altura ótima da viga castelada}}{\text{altura do perfil original}} = 2 \left(1 - \frac{h_t}{d} \right) \quad (12)$$

A razão de expansão ótima para qualquer seção laminada sob flexão pura é obtida de forma aproximada pela Eq. (12), que pode ser usada para calcular a razão de expansão ótima para vigas submetidas também à força cortante, desde que a magnitude deste esforço secundário não seja muito importante.

Os gráficos apresentados na Figura 16, na Figura 17, e na Figura 18 indicam a razão de expansão em que a resistência de uma viga castelada pode ser mais plenamente utilizada. Segundo Galambos Hussain e Speirs (1973), quando esses gráficos forem produzidos para um grande número de perfis laminados, um calculista será capaz de escolher a seção mais econômica para atender a uma determinada demanda simplesmente consultando estes gráficos ou tabelas. A inclusão de uma gama adequada de comprimentos de solda, n , nos gráficos torna possível para o calculista satisfazer exigências estéticas ou práticas e ainda obter a maior resistência de sua viga.

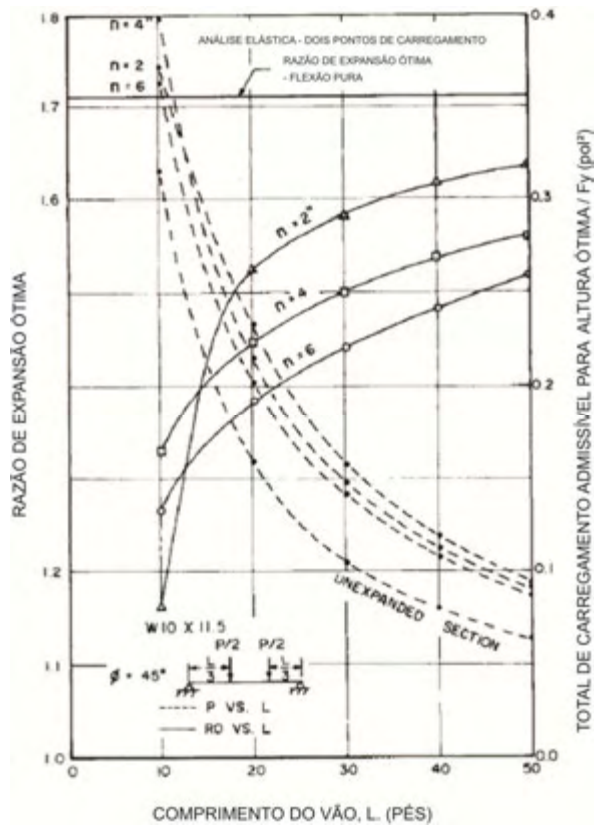


Figura 16 – Curvas de razão de expansão. Caso 1 (GALAMBOS, HUSSAIN e SPEIRS, 1973).

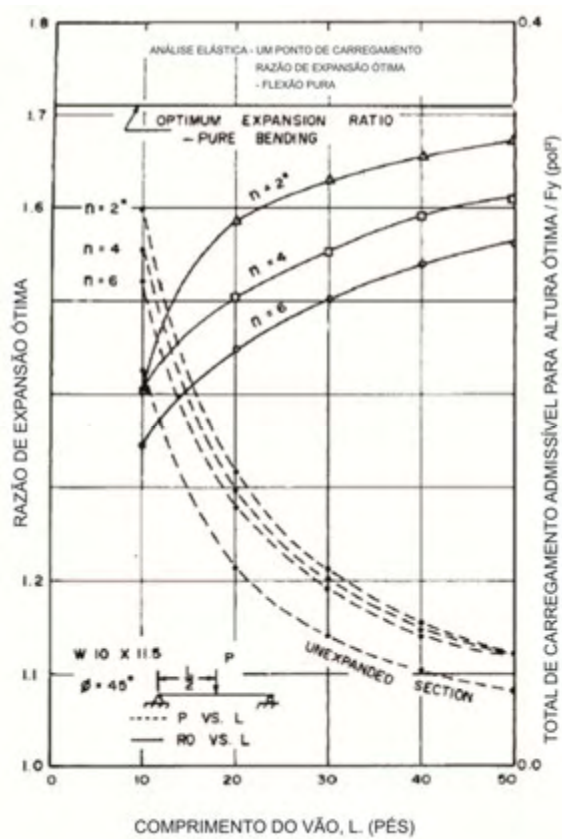


Figura 17 - Curvas de razão de expansão. Caso 2 (GALAMBOS, HUSSAIN e SPEIRS, 1973).

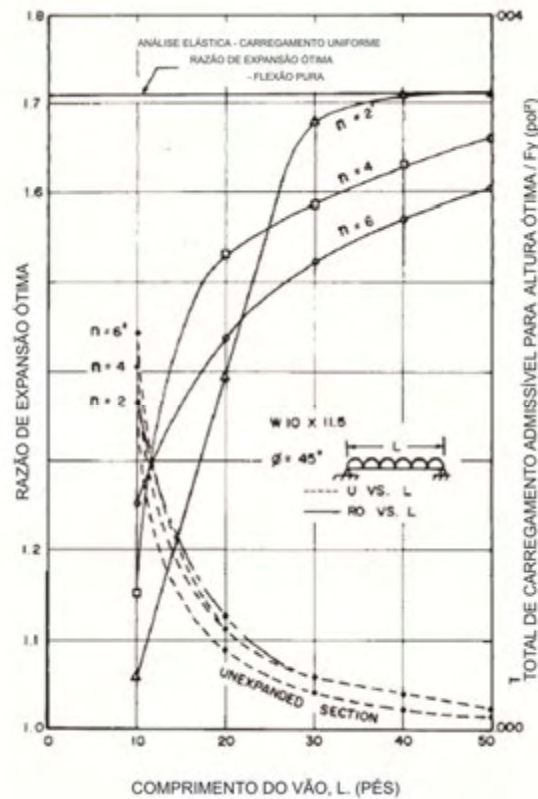


Figura 18 – Curvas de razão de expansão. Caso 3 (GALAMBOS, HUSSAIN e SPEIRS, 1973).

Deve-se mencionar que existem alguns valores aproximados nos gráficos apresentados. Por exemplo, usando o valor k_0 correspondente a um determinado conjunto de θ , n , L (vão a ser vencido pela viga), o perfil castelado resultante não pode conter um número inteiro de passos. No entanto, os autores sugerem que nesses casos um número inteiro de passos seja obtido alterando ligeiramente o ângulo de castelação, θ , pois conforme demonstrado, uma grande mudança em θ apresenta pouco efeito sobre a razão de expansão ótima quando o dimensionamento é governado pelo momento fletor.

As razões de expansão ótimas calculadas por Galambos Hussain e Speirs (1973) estão relacionadas somente com a resistência da viga. Se a flecha for um importante fator no cálculo da viga, o que é comum para grandes vãos, a relação ideal derivada a partir dos gráficos não são aplicáveis. Além da deformação da viga devido ao esforço cortante, outras questões também precisariam ser consideradas, tais como o limite de esbelteza para as vigas alveolares, pois uma viga alveolar é notadamente mais esbelta que o perfil que lhe deu origem, o que pode provocar instabilidade na alma; e ainda um intervalo para valores do ângulo que define a inclinação do montante.

3.2.2.2 Razão de expansão das vigas celulares

As vigas celulares podem ser fabricadas com diversas combinações entre altura da seção transversal, diâmetro da abertura e distância entre centros de aberturas. Segundo Harper (1994) o diâmetro do alvéolo pode variar entre 0,57 e 0,8 da altura da viga celular.

O catálogo *Long Carbon Europe Sections and Merchant Bars: ACB® Vigas Alveolares*, da ArcelorMittal, apresenta combinações diferentes das publicadas por Harper em 1994. Nesse catálogo, as razões de expansão foram definidas em função do tipo de aplicação previsto para a viga alveolar. Para sistemas de piso, o intervalo sugerido para o diâmetro dos alvéolos é de 0,8 a 1,1 da altura do perfil original. A adoção de alvéolos com dimensões neste intervalo acarreta uma razão de expansão de 1,3 a 1,4 vezes a altura do perfil original. Para os sistemas de cobertura, o intervalo sugerido para o diâmetro dos alvéolos é de 1,0 a 1,3 da altura do perfil original. Dessa forma, a razão de expansão da viga alveolar varia entre 1,3 a 1,6 vezes a altura do perfil original.

3.2.3 Parâmetros para o traçado geométrico do perfil alveolar

Um artigo importante para entendimento da geometria dos perfis alveolares foi escrito por Monfort Lleonart em 1988. O autor analisou a influência de alguns parâmetros que poderiam melhorar a capacidade portante das vigas alveolares. Além da análise, o autor desenvolveu gráficos de aplicação para o caso de vigas biapoiadas com carga uniformemente distribuída, situação mais usual na prática.

Lleonart (1988) faz referência às vigas casteladas hexagonais, às octogonais, que são as casteladas com chapas expansoras, e às vigas com furos circulares. O autor afirma que naquela época as vigas celulares apresentavam pouca aceitação na prática e ainda considera que as vigas com furos hexagonais eram mais usuais do que as de alvéolos octogonais que, quando demasiadamente esbeltas, podem apresentar problemas de instabilidade. Na Figura 19 são ilustradas as vigas casteladas com os traçados geométricos considerados usuais pelo autor.

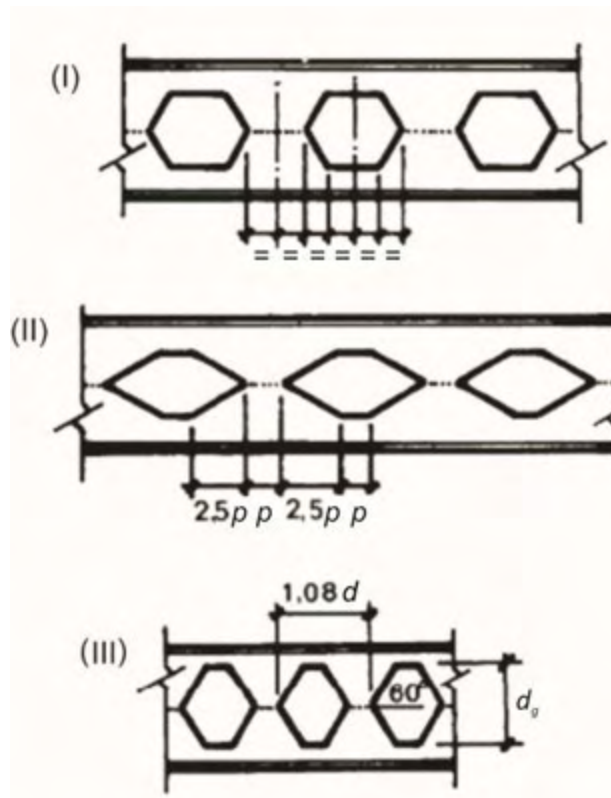


Figura 19 - Traçados geométricos considerados usuais (LLEONART, 1988).

O traçado I refere-se ao padrão conhecido como Litzka, em que os alvéolos são hexágonos regulares; o traçado II foi retirado do Prontuário de Estruturas Metálicas do Centro de Estudos e Experimentação de Obras Públicas de Madri, publicado em 1981. Em relação ao primeiro, este traçado proporciona melhor resistência à viga salvo em caso em que as tensões tangenciais são mais importantes que as normais. O traçado III é conhecido como padrão anglo-saxão, usual no Reino Unido.

A geometria dos traçados era definida em função de considerações construtivas que tinham por intenção normalizar as séries de perfis alveolares obtidos a partir de perfis de alma cheia, de modo que se pudesse realizar o corte nestes perfis utilizando um conjunto reduzido de padrões. No entanto, essa normalização pressupõe desprezar a influência de algumas variáveis que afetam o comportamento resistente do perfil.

Leonart se propôs a estudar o traçado para adequar o comportamento resistente dos perfis alveolares a determinados casos concretos e usuais. Foram considerados os perfis obtidos a partir das séries comerciais IPE e IPN, por serem os de utilização mais frequente.

Para definir o traçado do corte a ser aplicado no perfil original foram inicialmente determinadas as variáveis b_w , b e h_o indicadas na Figura 20.

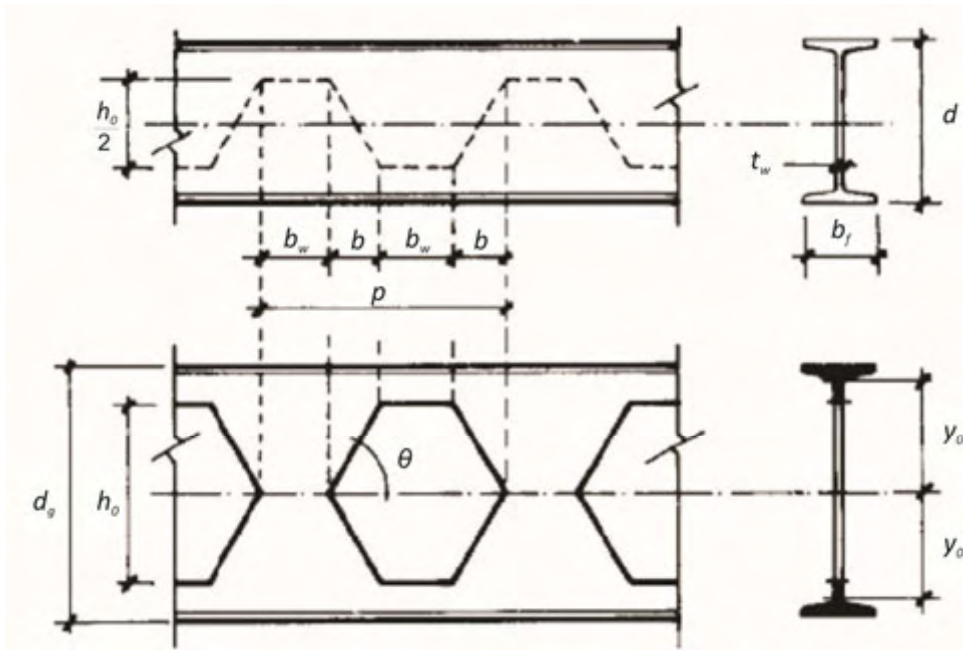


Figura 20 – Variáveis consideradas por Leonart (LLEONART, 1988).

Sendo,

d a altura do perfil original;

t_w a espessura da alma;

d_g a altura do perfil expandido;

p o passo (distância entre alvéolos);

y_o a distância do centro de gravidade do tê ao eixo da viga.

As dimensões dos elementos da viga alveolar foram expressas em função das variáveis independentes e verificações foram realizadas para critérios de resistência, de deformação, de projeto e construtivos.

Para o critério de projeto, foi destacado que o valor máximo admissível para flecha, que depende das necessidades específicas para cada caso, é inversamente proporcional ao momento de inércia médio do perfil alveolar [ver Eq. (12)].

O autor representou graficamente a variação da inércia média em função de h_o para alguns perfis da série IPE. No gráfico mostrado na Figura 21 a curva tracejada superior corresponde ao valor de $h_o = 1,2d$ embora este valor possa aumentar desde que não ultrapasse a altura da viga. Para valores maiores, o tê se torna muito pequeno e as

tolerâncias estabelecidas pela regulamentação para o tamanho dos perfis comerciais pode ser desproporcional. A curva tracejada inferior corresponde aos valores de $h_o = 0,5d$. Abaixo deste valor o aumento do momento de inércia não compensa o custo econômico.

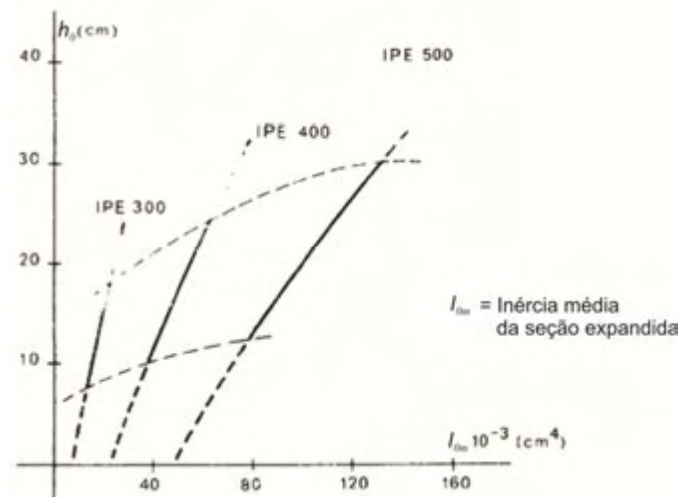


Figura 21 – Relação entre I_{0m} e a variável h_o (LLEONART, 1988).

A princípio, pode parecer que o mais interessante é adotar o maior valor possível para h_o . No entanto, à medida que h_o aumenta, diminui a seção do tê até chegar ao ponto em que não se verificará a condição de resistência. Portanto é preciso levar em consideração também outras restrições para determinar o valor adequado de h_o .

Para a definição geométrica do traçado de corte interessou que os parâmetros de vão e carga não influenciassem, e ainda que a relação entre carga e vão fosse tal que alcançasse o estado limite de deformação da viga. As variáveis b_w e h_o estão relacionadas a um tipo de perfil e à deformação admissível prefixada. A Figura 22 representa graficamente esta relação para um perfil IPE 400 e um critério de flecha máxima permitida igual a $L/250$.

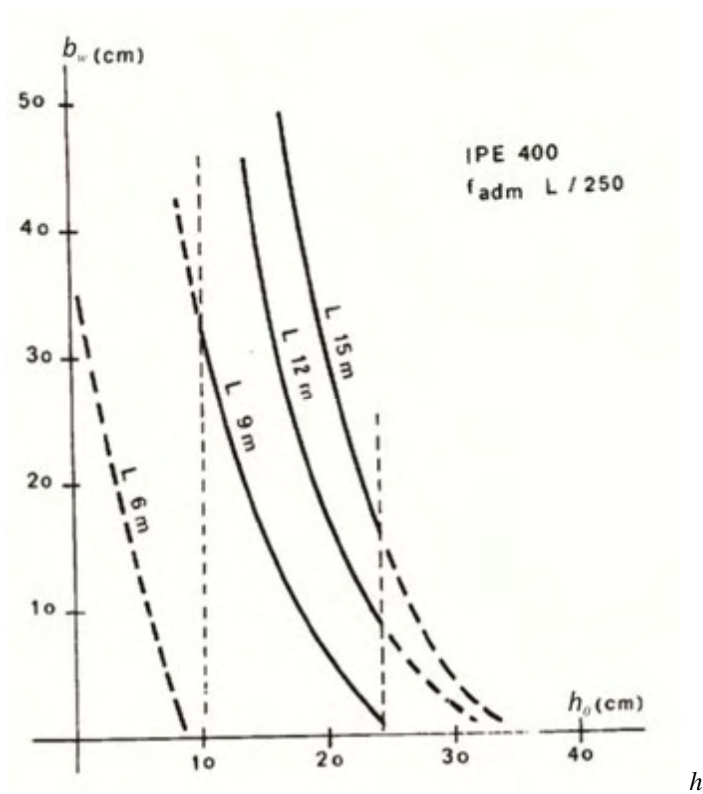


Figura 22 – Relação entre as variáveis b_w e h_o (LLEONART, 1988).

Na Figura 22, verifica-se que h_o aumenta com a diminuição de b_w , o que não é interessante sob o ponto de vista construtivo já que conduz a soluções do tipo ilustrada na Figura 23, o que complica o traçado do tê.

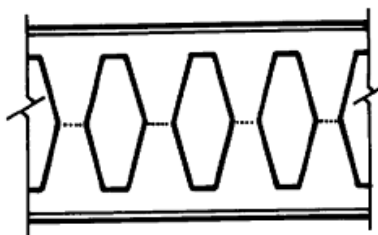


Figura 23 – Viga castelada com ângulo muito aberto (LLEONART, 1988).

Nas considerações realizadas até então, a variável b não interferiu sob o ponto de vista do critério de deformação, posto que a inércia média depende apenas de h_o . No caso de soluções com alvéolos alongados, como mostrado na Figura 24, sob o ponto de vista da resistência do tê a dimensão b seria uma condição restritiva.

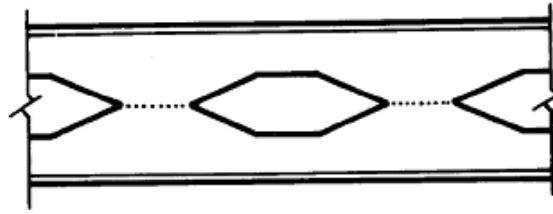


Figura 24 – Viga castelada com ângulo muito agudo (LLEONART, 1988).

Este tipo de solução foi considerado construtivamente inadequado por Lleonart, devido ao fato de os ângulos muito agudos causarem concentração de tensões não favoráveis na região do montante de alma. Desta forma, para assegurar a resistência do montante é preciso considerar as variáveis b_w , h_o e b .

Com a finalidade de facilitar a aplicação dos critérios estabelecidos, foram representados graficamente os resultados correspondentes a todos os perfis comerciais das séries IPN e IPE. Cada gráfico corresponde a uma série de perfis comerciais (IPN e IPE), a um comprimento de viga correspondente a 6, 9, 12 e 15 m, e a um valor de flecha admissível ($L/400$ e $L/250$). À esquerda do gráfico, no eixo das abscissas, encontram-se os valores da inércia média (I_{0m}), necessários para atender às limitações de flecha.

O valor da inércia média é obtido por meio da Eq. (13), que já inclui a deformação devido ao cisalhamento (por isso o valor 5,5 no numerador e não 5,0).

$$I_{0m} = \frac{5,5 q L^4}{384 E f_{adm}} \quad (13)$$

Nos gráficos, a cada curva correspondente a um perfil no quadrante da esquerda se associa outra curva no quadrante da direita. Entra-se com o valor da inércia média no quadrante da esquerda. Na interseção da inércia média com a série de perfis, traça-se uma reta horizontal para obter o valor de h_o . Prolongando no quadrante da direita a horizontal anteriormente utilizada para determinar o valor de h_o , até sua interseção com a curva correspondente ao perfil original de referência, o ponto define, sobre o eixo das abscissas deste quadrante, o valor máximo de b_w para o caso tratado.

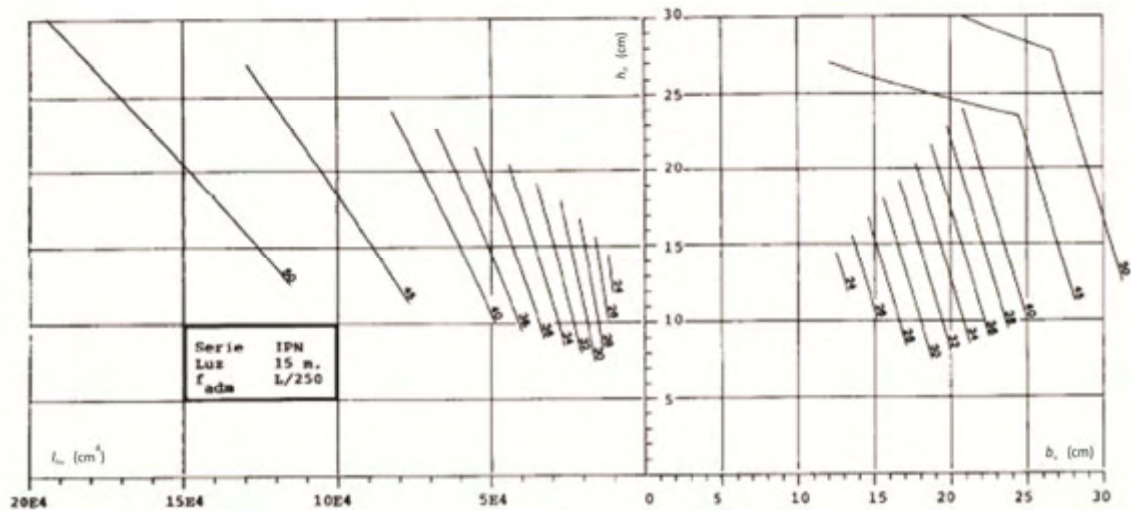


Figura 25 – Aspecto do gráfico proposto por Leonart (1988).

Com a finalidade de garantir que as soluções obtidas aplicando os gráficos fossem consideradas experimentalmente válidas, as proporções do perfil alveolar resultante foram mantidas dentro dos limites correspondentes aos perfis para os quais havia evidências de testes realizados. Desta forma, as limitações estabelecidas foram:

- a) os valores de h_o limitados entre $0,5d$ e $1,2d$;
- b) os valores de b_w e h_o encontrados no gráfico correspondem a um traçado para o qual o perfil suporta uma carga no mínimo igual a cinco vezes o seu peso;
- c) o ângulo θ que define a inclinação do montante deve estar compreendido entre 45° e 60° ;

- d) o valor de b_w terá valor máximo na condição de que o passo do alvéolo seja:

$$p \leq 1,4d_g$$

$$2(b_w+b) \leq 1,4 d_g$$

$$b_w \leq 0,7d - 0,15h_o$$

- e) foram propostas expressões para limitar o valor mínimo de b_w .

A proposta apresentada no trabalho de Leonart é relevante pois possibilita encontrar dimensões dos alvéolos específicas para combinações de vãos, limitações de flecha e tipo do perfil original. Além disso, um conjunto de gráficos que apresente soluções padronizadas para a geometria dos perfis pode ser rápido e eficaz para um pré-dimensionamento a ser utilizado por arquitetos, por exemplo. Outra vantagem de se

obter alvéolos padronizados está relacionada à aparência estética do ambiente onde as vigas serão aplicadas. Um ambiente com vigas cujos alvéolos apresentam um mesmo padrão oferece uma aparência estética mais harmoniosa sob o ponto de vista do usuário. A utilização de geometrias padronizadas pode ser eficiente também para a fase de fabricação da viga, por facilitar a programação de máquinas CNC para corte das vigas.

O tipo de corte definido para a obtenção de vigas alveolares está fortemente relacionado ao custo de fabricação da viga, pois é necessário que haja boa relação entre o aproveitamento máximo da viga original, o grau de complexidade do corte e o acabamento. Outras questões importantes relacionadas ao corte são a redução do comprimento da viga após o reposicionamento das duas metades obtidas, a disposição dos alvéolos e o espaço disponível necessário para a ligação da viga nas extremidades. O item a seguir apresenta algumas considerações práticas relacionadas à fabricação para que a viga original se ajuste às exigências do projeto.

3.2.4 Adequação da geometria do perfil alveolar ao vão de projeto

Blodgett (1966) apresentou aspectos práticos relacionados ao corte do perfil original, para que este se ajuste às definições pretendidas em projeto. Para tanto, considerou duas configurações distintas: uma em que a viga apresenta alvéolos iguais, e outra em que a viga apresenta variação na geometria dos alvéolos.

Considerando a configuração cujos alvéolos são iguais por todo o comprimento da viga, e simétricos em relação ao eixo central da viga, admite-se n como sendo o número de passos e duas formas para representar o passo: (a) de centro a centro de dois montantes consecutivos; (b) de centro a centro de dois alvéolos consecutivos (Figura 26).

A forma e o tamanho das aberturas restantes nas extremidades das vigas serão determinados em função da representação do passo escolhido. Nos dois casos a medida do passo é a mesma, apenas a disposição dos alvéolos muda ao longo do vão.

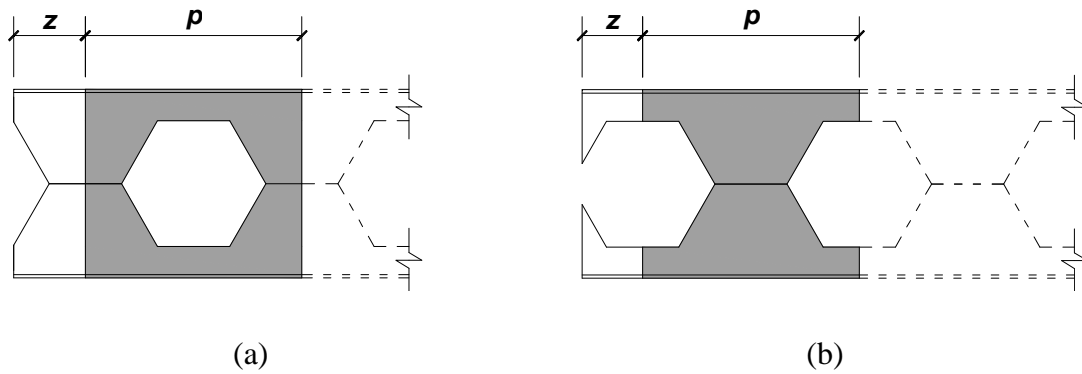


Figura 26 – Diferentes formas de representar o passo: (a) a partir do meio do montante; (b) a partir do meio da abertura (adaptado de BLODGETT, 1966).

No trabalho desenvolvido por Blodgett, o comprimento de viga necessário para vencer determinado vão foi designado como comprimento de projeto (L_g). Em função do comprimento de projeto define-se o número de aberturas inteiras que podem ser distribuídas simetricamente a partir do meio do vão. Em alguns casos, para completar o comprimento de projeto restam comprimentos residuais que correspondem a frações do passo. Dessa forma, n_p representa o número de passos distribuídos e z o comprimento residual para o vão de projeto. Dessa forma, z pode ser definido pela Eq. (14) e o vão de projeto pela Eq. (15):

$$z = \frac{L_g - n_p p}{2} \quad (14)$$

$$L_g = n_p p + 2z \quad (15)$$

No processo de corte é necessário prever que o comprimento do perfil original deverá ser maior que o comprimento de projeto, dado o deslocamento de meio passo que uma das metades sofre para o processo de soldagem e obtenção da viga alveolar. Dessa forma, para obter a viga alveolar com o comprimento de projeto, é necessário partir de um perfil original com um comprimento requerido (L_b) definido da seguinte forma:

$$L_b = \left(n_p + \frac{1}{2} \right) p + 2z \quad (16)$$

Assim, exige-se um comprimento mínimo excedente equivalente a meio passo.

$$L_b - L_g = \frac{P}{2} \quad (17)$$

Na Figura 27 e na Figura 28 são apresentados os esquemas de corte e soldagem de acordo com cada uma das duas formas de considerar o passo.

Passo (a): de centro a centro de dois montantes consecutivos

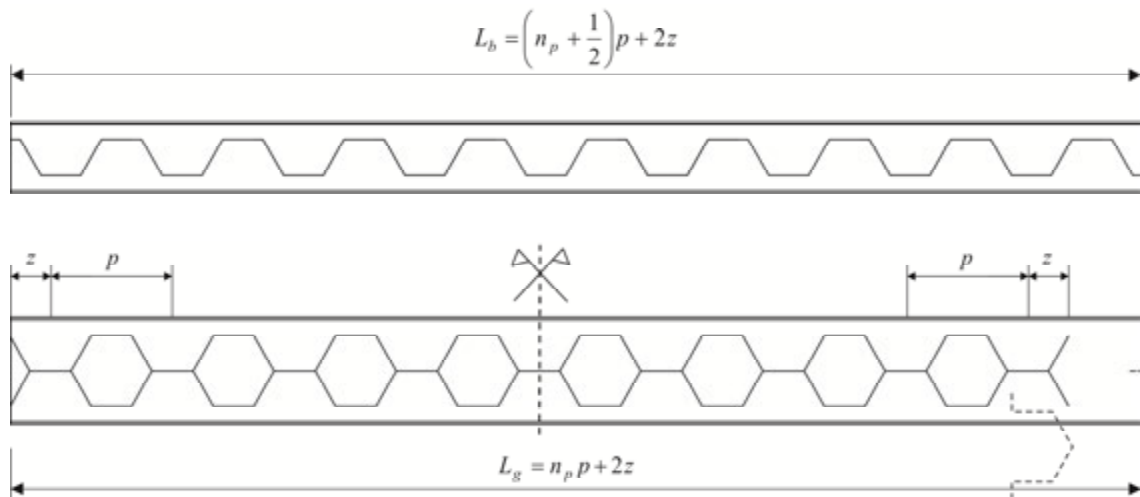


Figura 27 – Esquema de corte e soldagem de viga alveolar com o passo considerado a partir do meio do montante (BLODGETT, 1966).

Passo (b): de centro a centro de dois alvéolos consecutivos

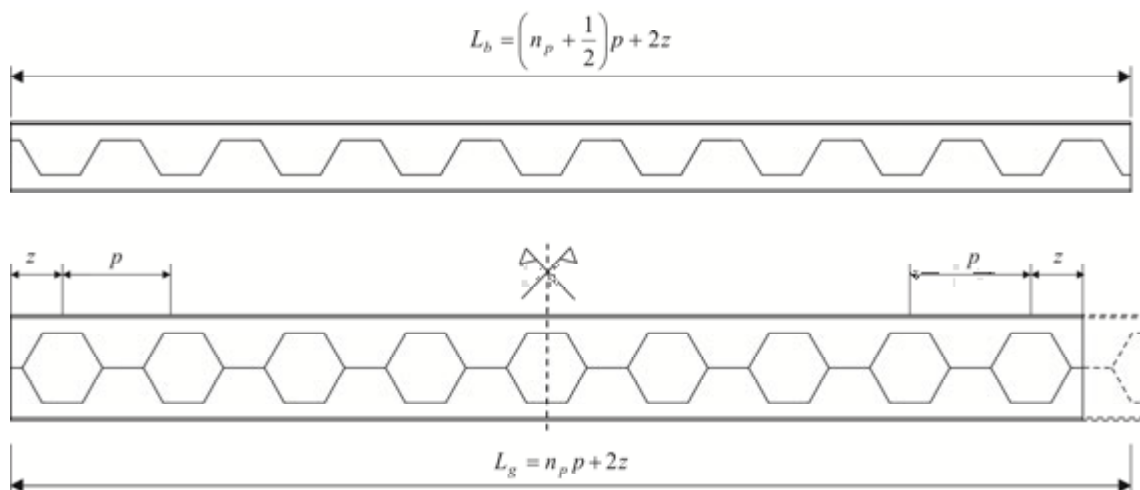


Figura 28 – Esquema de corte e soldagem de viga alveolar com o passo considerado a partir do meio das aberturas (BLODGETT, 1966).

Em alguns casos, uma parte dos alvéolos localizados nas extremidades da viga deve ser preenchida com chapas de aço a serem soldadas no contorno dos alvéolos.

Caso os alvéolos sejam do mesmo tamanho, mas a viga não necessite ser simétrica em relação ao eixo central, recomenda-se, iniciar uma das extremidades da viga com o passo, pois dessa forma, apenas uma extremidade da viga será preenchida com chapa de aço (Figura 29).

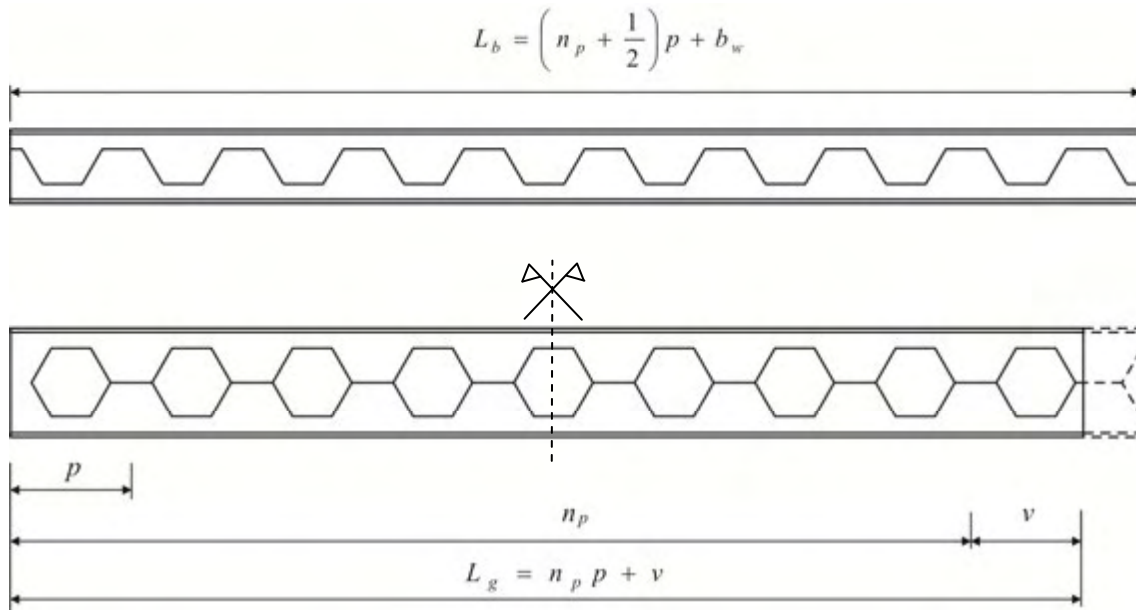


Figura 29 – Esquema de corte e soldagem de viga alveolar com o passo iniciado em uma das extremidades da viga, onde v é o complemento do passo (BLODGETT, 1966).

Pode-se ajustar a largura do montante (b_w) de modo que os passos se encaixem exatamente no comprimento de vigas casteladas (L_g) que não tenham um padrão geométrico previamente definido (Figura 30).

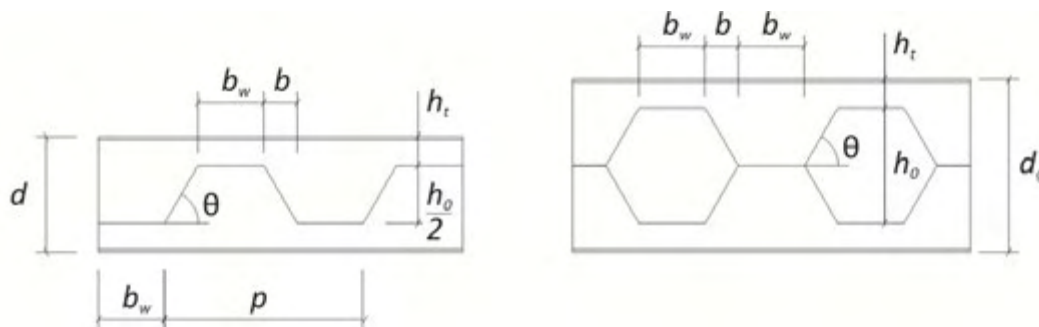


Figura 30 – Propriedades da seção dos perfis original e alveolar (BLODGETT, 1966).

Considerando que $b = \frac{h_o}{2 \operatorname{tg}(\theta)}$ e o passo pode ser escrito como $p = 2b + 2b_w$, pode-se escrever a expressão do comprimento final da viga alveolar como:

$$L_g = n \times p + b_w$$

$$L_g = n \frac{h_o}{\operatorname{tg}(\theta)} + b_w(2n + 1) \quad (18)$$

Resolvendo a Eq. (18) para n chega-se à expressão do número de passos, conforme a Eq. (19):

$$n = \frac{L_g - b_w(2n + 1)}{h_o} \cdot \operatorname{tg}(\theta) \quad (19)$$

Resolvendo-se a Eq. 19 para b_w , encontra-se o valor requerido para a largura do montante:

$$b_w = \frac{L_g - \frac{n \cdot h_o}{\operatorname{tg}(\theta)}}{2n + 1} \quad (20)$$

O autor apresenta restrições para os valores mínimo e máximo da largura do montante para que este não influencie negativamente o comportamento estrutural da viga.

Blodget (1966) apresenta significativa contribuição quanto às formas de antever a disposição dos alvéolos ao longo do comprimento de projeto e suas implicações em etapas do processo de fabricação, tais como o deslocamento, o comprimento residual e o fechamento na região dos apoios. Entretanto, as formulações do autor não estão relacionadas a uma geometria específica, nem a uma razão de expansão previamente definida. Também não há análise comparativa quanto ao processo de fabricação tendo em vista as diferentes possibilidades de dispor os alvéolos.

Outra adequação da geometria do perfil alveolar ao comprimento de projeto está relacionada a recomendações a respeito dos limites para a largura do montante da extremidade das vigas alveolares. Leonart (1988) propõe que os painéis na extremidade das vigas casteladas devem ser 50% maiores que os painéis subsequentes, como mostrado na Figura 31.

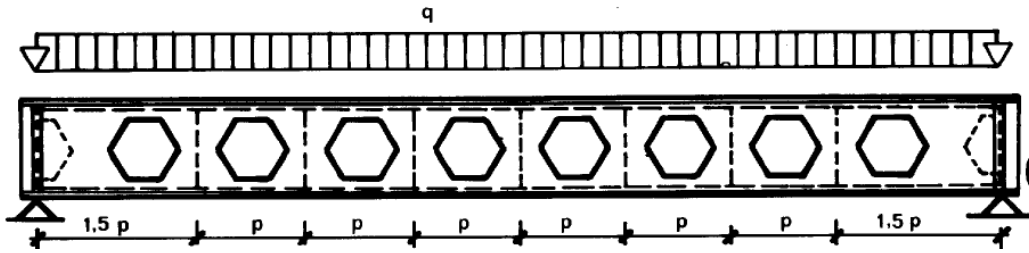


Figura 31 – Configuração da extremidade da viga castelada proposta por Lleonart (1988).

Quanto à viga celular, o catálogo de vigas celulares da ArcelorMittal estabelece que desde a concepção estrutural deve haver um cuidado especial no posicionamento dos alvéolos para evitar o preenchimento dos alvéolos nas imediações de ligações com chapas de aço de forma desnecessária. A proposta da ArcelorMittal é que inicialmente as vigas sejam otimizadas sob o ponto de vista estrutural, e que num segundo momento seja ajustada a distância entre alvéolos de modo que as extremidades da viga sejam formadas pela parte maciça da viga e não por alvéolos.

Sendo p , L e d_o as variáveis indicadas na Figura 32, e n o número de alvéolos, a distância entre alvéolos numa viga celular pode ser obtida a partir da Eq. (21).

$$p = \frac{L + d_o}{n + 1} \quad (21)$$

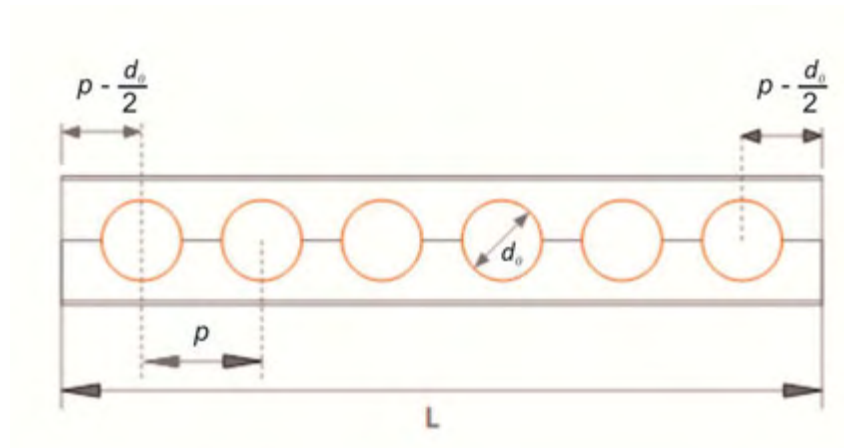


Figura 32 – Elementos geométricos para vigas celulares (fonte: Catálogo ACB®, ArcelorMittal).

3.3 Padrões geométricos das vigas alveolares

3.3.1 Padrões para a tipologia castelada

Determinados padrões de vigas casteladas foram consagrados pelo uso nos mercados europeu e americano em décadas passadas. De modo geral, os diversos padrões representam uma busca por geometrias ótimas de acordo com os equipamentos de corte e os perfis oferecidos na época, e com as considerações dos modos de colapso feitas até então.

3.3.1.1 O padrão Litzka

O padrão representado na Figura 33 foi desenvolvido por Hubert Litzka. Caracteriza-se por apresentar aberturas hexagonais regulares e proporções relacionadas com o passo, que é dividido em seis partes iguais. O ângulo interno do alvéolo no padrão Litzka é de 60° e a razão de expansão usual é de 1,5.

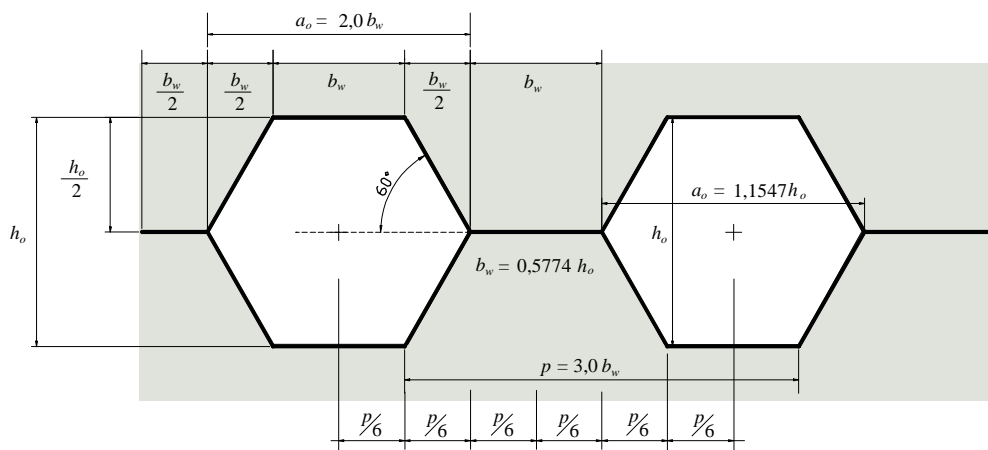


Figura 33 – Geometria do padrão Litzka (VERÍSSIMO *et al.*, 2010).

3.3.1.2 O padrão Peiner

O padrão Peiner (Figura 34) é similar ao Litzka, porém o alvéolo não é um hexágono regular. No padrão Peiner, o alvéolo possui largura (a_o) igual à altura (h_o), padrão que resulta em um ângulo interno de $63,4^\circ$. Semelhantemente ao Litzka, as dimensões dos montantes e alvéolos podem ser relacionadas ao passo, sempre dividindo-o em seis partes iguais.

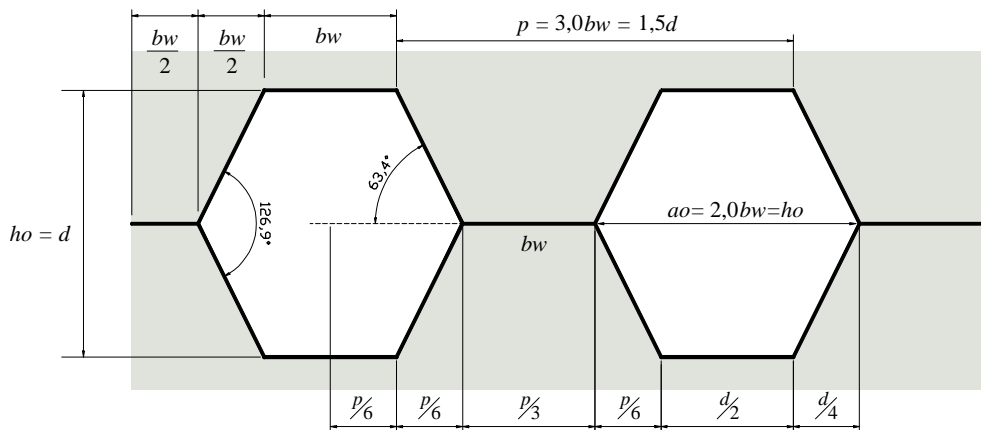


Figura 34 – Geometria do padrão Peiner (VERÍSSIMO *et al.*, 2010).

3.3.1.3 O padrão Anglo-Saxão

O padrão Anglo-Saxão apresenta um ângulo interno de aproximadamente 60° e as proporções das aberturas são tomadas de forma que o passo tenha um valor ótimo de $1,08 d$ (Figura 35). Este padrão foi difundido no Reino Unido e é especificado na BS 5950:2000.

De acordo com Dougherty (1993 *apud* Demirdjian, 1999), o valor do passo no padrão Anglo-Saxão foi ajustado de modo que a largura do montante seja suficiente para que não ocorra o rompimento da região soldada e, ao mesmo tempo, reduzida para evitar a formação de mecanismo plástico nos cordões.

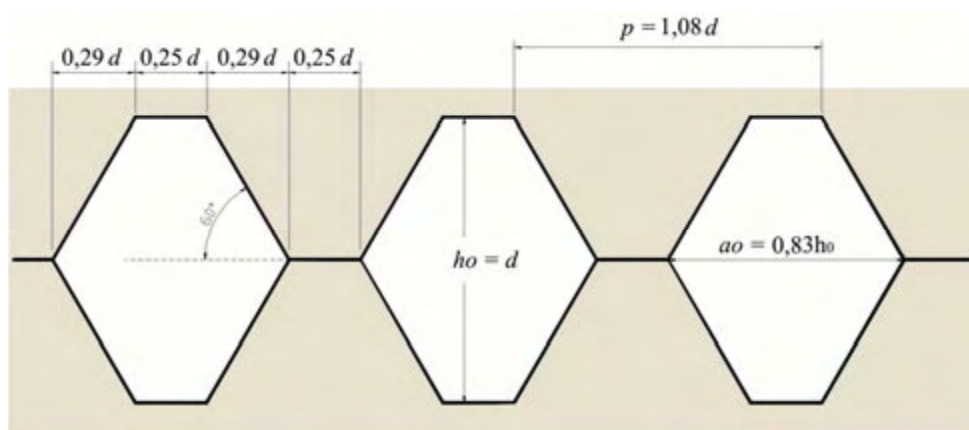


Figura 35 – Geometria do padrão Anglo-Saxão (VERÍSSIMO *et al.*, 2010).

3.3.2 A tipologia celular

Como visto no item 3.1, o padrão celular surgiu mais recentemente, possibilitado pelos avanços na área de automação, já que o traçado do corte é complexo para ser executado sem comando computadorizado (Figura 36).

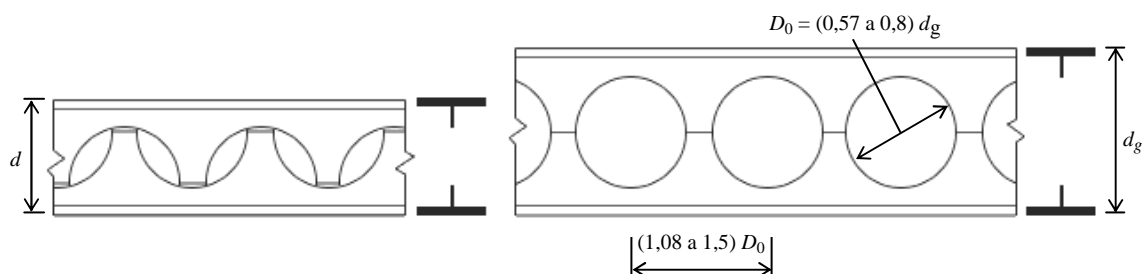


Figura 36 – Corte das vigas celulares e faixas de variação do passo e do diâmetro dos alvéolos (ABREU, 2010).

Diferentemente do que ocorre nas vigas casteladas, o traçado do corte para a produção de uma viga celular não implica numa simetria estrita entre a largura do montante e o comprimento do lado horizontal do alvéolo. Por essa razão, nas vigas celulares tem-se alguma flexibilidade para variar o espaçamento entre alvéolos, independentemente do seu diâmetro. Na Figura 36 estão expressas as faixas de variação tanto do diâmetro como do espaçamento dos alvéolos.

A possibilidade de variar o tamanho dos alvéolos, bem como seu espaçamento, traz algumas vantagens interessantes para as vigas celulares, como:

- maior flexibilidade para sua aplicação, permitindo configurar vigas mais apropriadas para coberturas ou para sistemas de piso;
- maior liberdade de projeto possibilitando definir a posição dos alvéolos de modo a reduzir os detalhes associados às ligações com outras vigas.

Nas vigas casteladas, as relações entre os elementos geométricos são estritas, o que reduz a flexibilidade de projeto. Na Figura 37 são apresentadas duas vigas alveolares equivalentes, uma celular e a outra castelada. Pode-se observar que para a mesma altura total, e para a mesma altura dos cordões, a viga celular possui menos alvéolos do que a castelada no padrão anglo-saxão e maior largura do montante de alma, o que pode ser interessante dependendo das condições de carregamento.

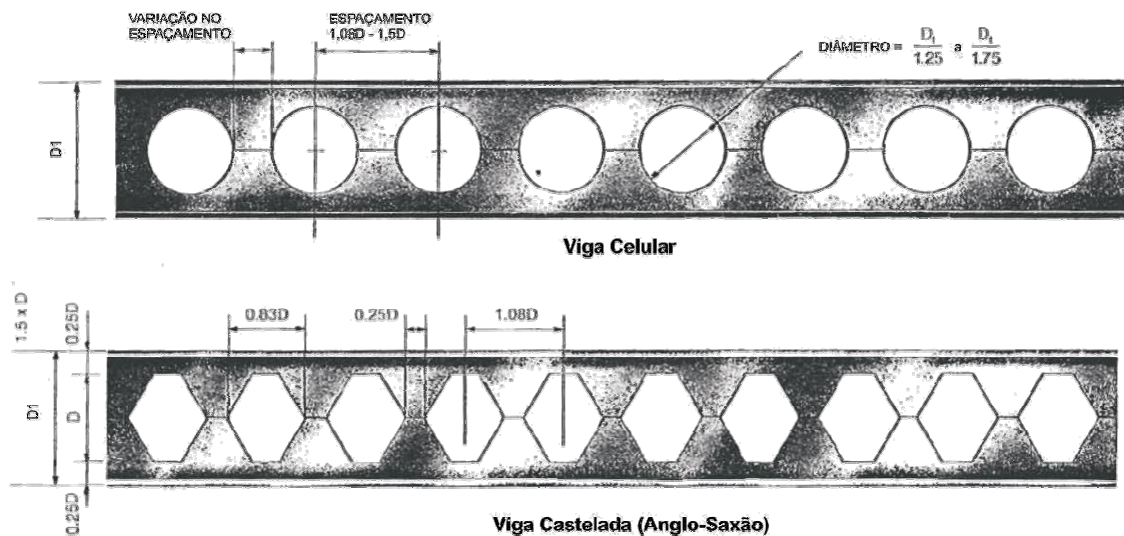


Figura 37 – Variações no diâmetro e no espaçamento entre alvéolos da viga celular (HARPER, 1994).

Para o corte de vigas celulares a partir de um perfil original existe uma extensa gama de combinações possíveis de diâmetros e de distância entre alvéolos. De modo geral, a escolha pela combinação mais adequada leva em conta dois principais critérios de otimização: a relação entre a altura final e o peso da viga alveolar e a relação entre o carregamento e o peso da viga alveolar. Em ambos os casos, o ajuste final de alguns milímetros de distância entre eixos dos alvéolos permite que as extremidades das vigas sejam obtidas com alma cheia, sem aberturas, facilitando as ligações nessa região.

O catálogo de vigas celulares da ArcelorMittal (ACB[®]) apresenta a otimização da relação entre a altura final e o peso da viga alveolar. Na Figura 38 é mostrada uma viga celular com alta relação inércia/peso, com configuração mais adequada para sistemas de cobertura. Observa-se que os alvéolos são maiores e, portanto, os montantes são menos espaçados e os tês são menores.

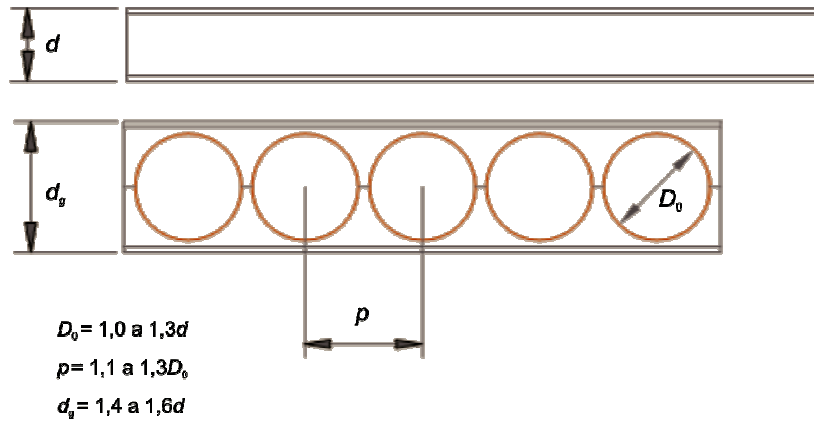


Figura 38 – Viga celular com alvéolos menos espaçados (fonte: Catálogo ACB®, ArcelorMittal).

Quando os alvéolos são pouco espaçados, a viga celular assume um comportamento análogo ao de uma viga Viereendeel, e uma formulação de cálculo baseada nessa hipótese fornece bons resultados.

Há significativa diferença no desempenho estrutural requerido da viga alveolar para sua aplicação em coberturas ou em sistemas de piso. Quando aplicadas em sistemas de cobertura, as vigas celulares podem ser projetadas com maior razão de expansão (alvéolos maiores) e com os alvéolos pouco espaçados, pois nesses sistemas a sobrecarga é, geralmente, muito pequena, os vãos são grandes e a deformação é o elemento condicionante do dimensionamento.

Na Figura 39, ilustra-se uma aplicação de uma viga alveolar de cobertura com as características descritas acima.



Figura 39 – Viga celular para um sistema de cobertura (fonte: www.arcelormittal.com – acessado em 04/10/11).

No catálogo de vigas celulares da ArcelorMittal também é apresentada uma série de vigas com configuração de corte adequada principalmente para sistemas de piso. Neste caso, os alvéolos são menores e, portanto, os montantes são mais espaçados e os tês são maiores, conforme ilustrado na Figura 40.

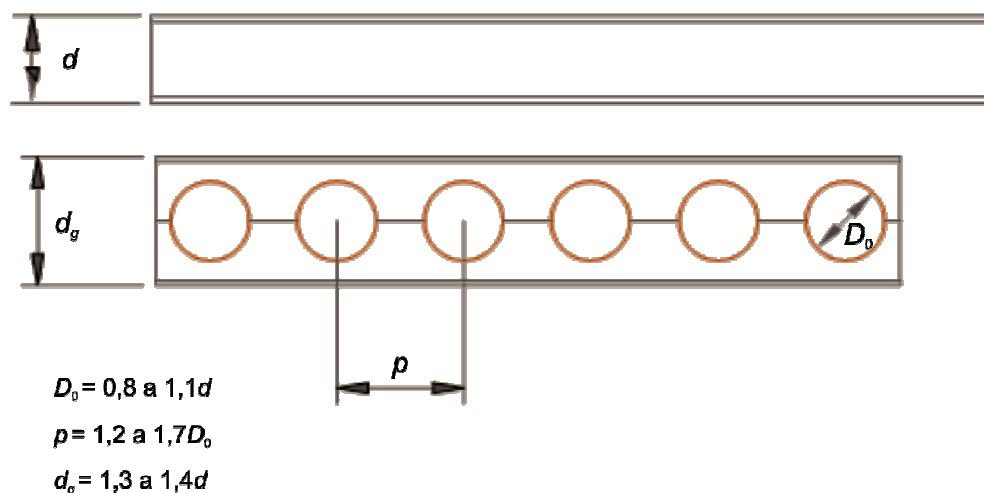


Figura 40 – Viga celular com alvéolos mais espaçados (fonte: Catálogo ACB®, ArcelorMittal).

Quanto mais espaçados forem os alvéolos, mais o comportamento estrutural da viga alveolar irá se assemelhar ao comportamento estrutural de uma viga de alma cheia. Vigas com alvéolos mais espaçados são comumente empregadas em sistema de piso e apresentam menor razão de expansão. Na Figura 41 é ilustrada uma aplicação da viga celular em sistema de piso, onde pode ser verificado um maior espaçamento entre alvéolos e menor razão de expansão do que os adotados para vigas aplicadas em sistemas de cobertura. Na Figura 42 são apresentados os limites geométricos para o espaçamento entre alvéolos em vigas celulares.

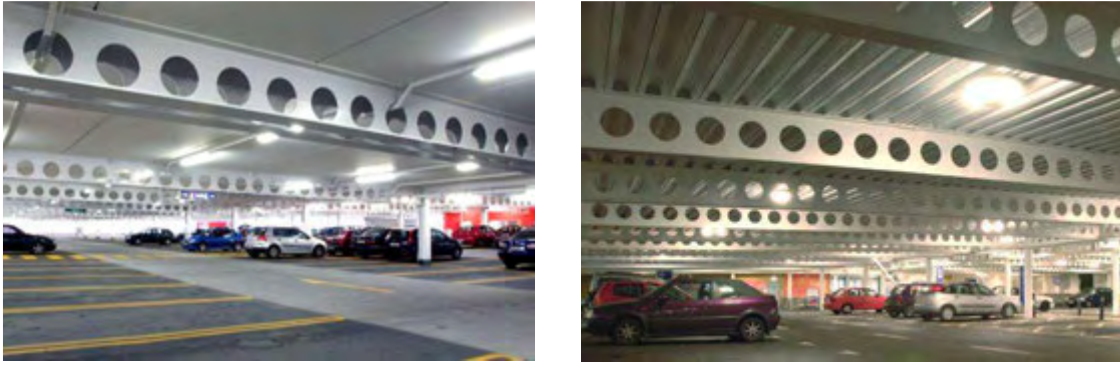


Figura 41 – Vigas celulares aplicadas em sistemas de piso
(fonte: www.westok.co.uk – acessado em 11/05/2011).

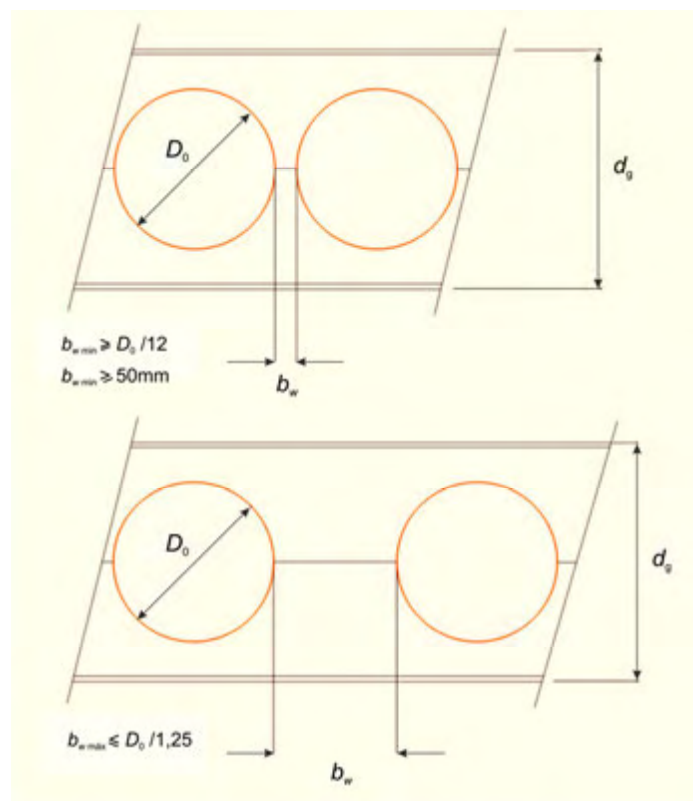


Figura 42 – Limites geométricos para as distâncias entre alvéolos nas vigas celulares.

No catálogo de vigas celulares da ArcelorMittal é definida uma largura mínima do montante com a finalidade de garantir uma montagem adequada da viga e evitar o enfraquecimento excessivo de algumas regiões. A largura máxima recomendada resulta tanto de considerações de custo e fabricação, quanto do comportamento estrutural das vigas.

Uma desvantagem da viga celular em relação à castelada é a perda de material devido ao tipo de corte para obtenção do formato circular do alvéolo. Na Figura 43 é ilustrada a perda de material mencionada. Outra desvantagem relacionada ao processo de fabricação das vigas celulares é o fato de que o caminho percorrido pela máquina de corte precisa ser duplo, o que consome aproximadamente o dobro do tempo gasto no corte de uma viga castelada.

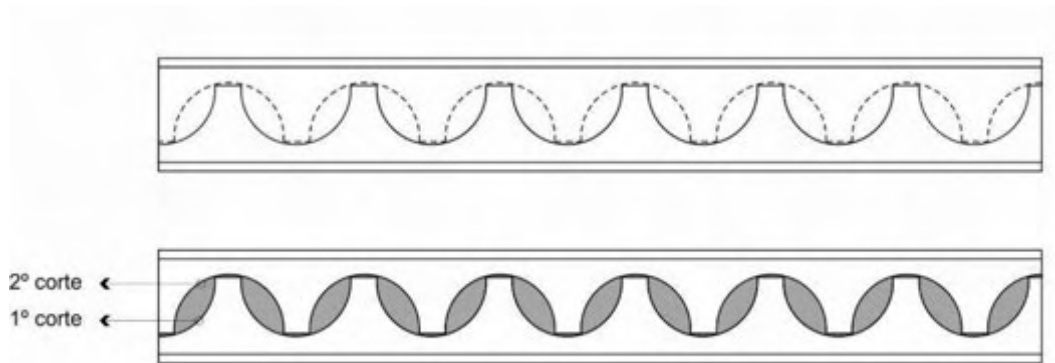


Figura 43 – Dupla trajetória da máquina de corte para obtenção do alvéolo circular e perda de aço devido ao tipo de corte.

Em agosto de 2001 foi publicada a patente de nº WO 01/59229, em que os inventores propuseram um método de corte alternativo para perfis laminados de aço a fim de obter vigas celulares (Figura 44).

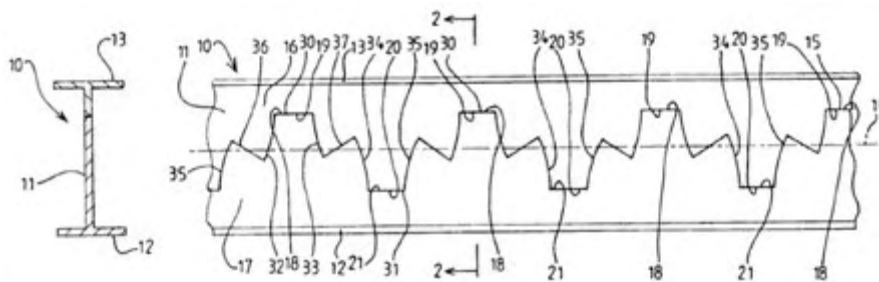


Figura 44 – Método alternativo de corte para viga celular (Patente nº WO 01/59229 A1).

Depois de deslocar e alinhar as metades, soldam-se os montantes conforme ilustrado na Figura 45.

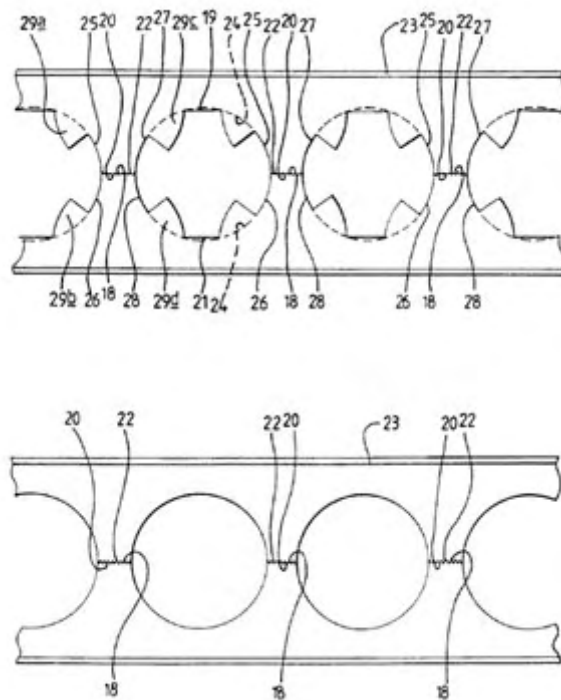


Figura 45 – Deslocamento, solda e reparos nos alvéolos para obtenção da viga celular com método de corte alternativo (Patente nº WO 01/59229 A1).

Esta proposta difere da mencionada anteriormente porque nela a máquina de corte percorre o eixo longitudinal da viga apenas uma vez. Entretanto, demanda reparos no interior dos alvéolos para obtenção da configuração circular final.

4

Aspectos relacionados à fabricação de vigas alveolares

4.1 Considerações preliminares

Embora, como visto no Capítulo 1, as vigas alveolares tenham surgido originalmente em função da necessidade de perfis com altura superior à dos perfis I laminados, atualmente outros fatores, além desse, motivam a fabricação de vigas alveolares, laminadas ou soldadas.

Atualmente, no Brasil, a Gerdau Açominas produz 88 diferentes perfis I laminados de abas paralelas, com altura total da seção variando de 150 mm a 610 mm, o que possibilita a fabricação de vigas casteladas e celulares com altura de até cerca de 915 mm. Havendo necessidade de seções com altura superior a esse limite, podem-se fabricar vigas alveolares soldadas.

Na primeira metade do século XX, quando a ideia surgiu, o processo de expansão da seção da viga era viabilizado por um corte sinuoso constituído por uma sequência de segmentos retos. Décadas mais tarde, os avanços nas áreas de automação e de processos de corte de metais ampliaram as possibilidades, de modo que atualmente podem-se fabricar vigas alveolares com múltiplos traçados de corte.

Com a utilização intensiva da computação ao longo de toda a cadeia de produção, desde o desenho até à fabricação, em muitos ambientes fabris as etapas de projeto e fabricação são integradas, por meio de tecnologias de CAD, CAE e CAM.

4.2 Fabricação a partir da expansão de perfis laminados

As vigas casteladas e as celulares geralmente são fabricadas a partir de perfis laminados de seção I ou H, embora também possam ser fabricadas como perfis soldados (ver 4.3).

O primeiro passo é cortar o perfil original transversalmente, no comprimento de projeto da viga, já que os perfis geralmente são fornecidos com comprimento padrão de 12 m (Figura 46).



Figura 46 – Corte do perfil laminado vindo de fábrica (foto: Washington Vieira)

O corte da alma do perfil laminado original pode ser feito com oxicorte, plasma ou laser (Figura 47). A opção pela tecnologia de corte é do fabricante e pode ser influenciada pela precisão desejada, pela velocidade e pela espessura de chapa a ser cortada. De modo geral, qualquer uma das três tecnologias citadas pode ser utilizada. A perda de material (aço) no corte e o acabamento final são gradativamente melhores na sequência: oxicorte, plasma e laser.



Figura 47 – Corte a oxicorte e corte a laser.

A fim de assegurar a precisão do corte da alma, é importante iniciá-lo a partir de um ponto interno à alma, como mostrado na Figura 48, de modo a impedir a separação imediata das duas metades. Esse cuidado é necessário para evitar que as metades cortadas empenem devido às tensões residuais de tração na mesa do perfil.

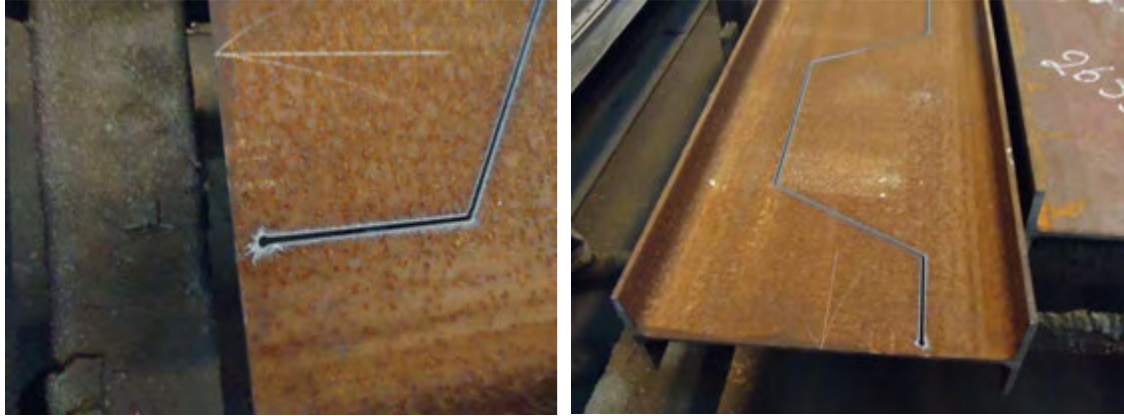


Figura 48 – Detalhe do início do corte na alma de um perfil laminado (foto: Washington Vieira)

Na Figura 49 apresenta-se, em três dimensões, a distribuição de tensões residuais na seção transversal de um perfil I laminado. Essas tensões decorrem do processo de fabricação, devido às diferentes velocidades de resfriamento após a laminação.

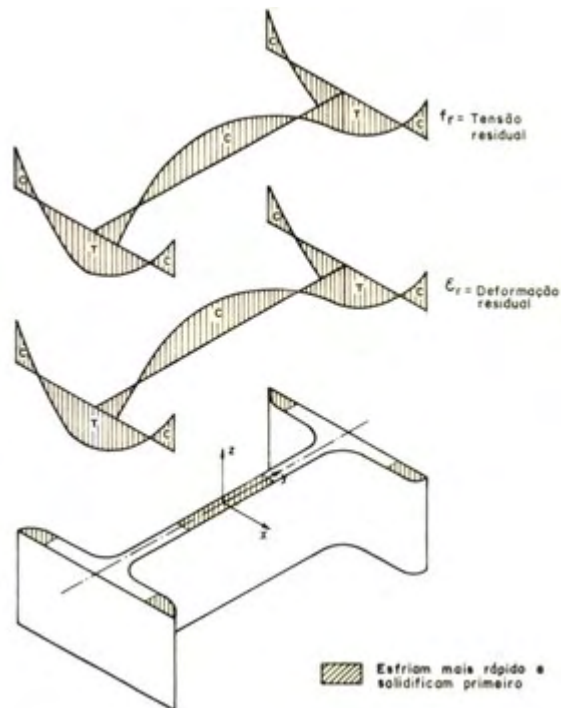


Figura 49 – Distribuição aproximada de tensões e deformações residuais em um perfil I laminado.

Observando a Figura 49, nota-se que nas mesas prevalecem tensões de tração e na alma tensões de compressão. Após o corte da alma, as tensões de tração na mesa superam as tensões de compressão na metade da alma, provocando a flexão das metades conforme mostrado na Figura 50.



Figura 50 – Empenamento da metade de um perfil I laminado, após o corte, devido às tensões residuais (foto: Washington Vieira).

Se a viga possui um comprimento muito grande, pode ser necessário programar o corte de modo a deixar alguns pontos ao longo do traçado sem cortar, para evitar a flexão das metades do perfil.

Após o corte, a viga é transferida para uma mesa de montagem, com as metades ainda presas nas extremidades da viga. Após soltar as metades com um maçarico, o perímetro do corte é preparado com uma ferramenta apropriada para eliminar eventuais rebarbas resultantes do processo de corte e deixar a superfície preparada para receber a solda (Figura 51).

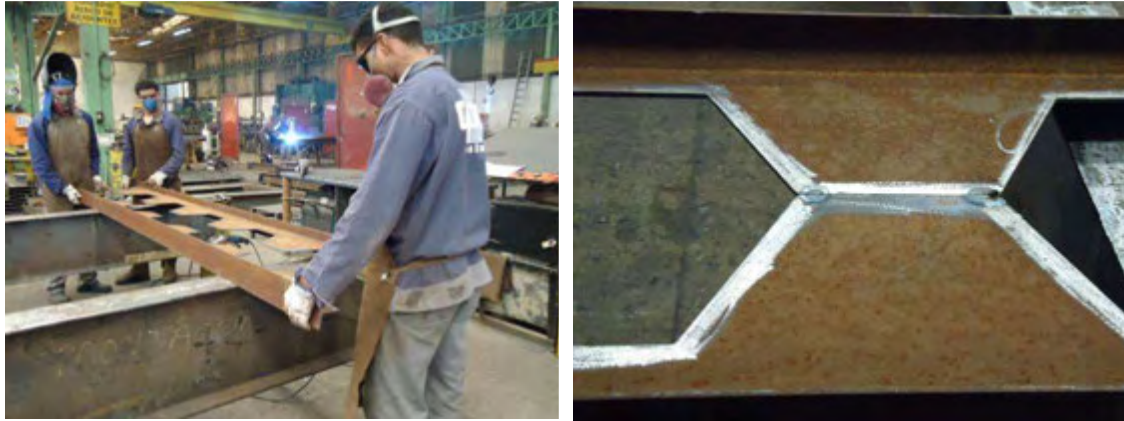


Figura 51 – Posicionamento das metades e preparação do perímetro do corte (foto: Washington Vieira).

Uma das metades é desempenada, alinhada e fixada sobre a mesa de apoio. Em seguida, aproxima-se a outra metade e alinham-se os montantes (Figura 52). Devido à tendência de cada metade fletir, devido às tensões residuais, uma é presa à outra por pontos de solda, numa fase de pré-montagem.



Figura 52 – Junção das metades e alinhamento dos montantes (foto: Washington Vieira).

Após pontear com solda todos os montantes, é dado o acabamento final em cada extremidade da viga alveolar a fim de eliminar as partes excedentes geradas na etapa de deslocamento para alinhar os montantes (Figura 53).



Figura 53 – Corte das porções excedentes da viga (foto: Washington Vieira).

Caso a viga necessite de detalhes construtivos, tais como enrijecedores de alma ou chapas de preenchimento em algum alvéolo, esses elementos também são fixados em suas posições por meio de pontos de solda, como mostrado na Figura 54. Assim, tem-se a peça pré-montada, pronta para a soldagem final. A viga mostrada na Figura 54 é um protótipo para ensaio, com comprimento limitado e enrijecedores de alma nos pontos de introdução de carga.



Figura 54 – Viga castelada após pré-montagem, aguardando soldagem final (foto: Washington Vieira).

Na etapa final do processo de fabricação, é completada a soldagem das metades da viga alveolar, bem como dos enrijecedores e chapas complementares. Na Figura 55 é mostrado o aspecto da ligação com solda MIG. O processo de soldagem MIG (sigla de *Metal Inert Gas*) consiste na formação de um arco elétrico entre a peça e um eletrodo

não revestido, fornecido por um alimentador contínuo, protegido da atmosfera por um fluxo de gás inerte. Por meio desse processo, realiza-se a união das metades da viga metálica pelo aquecimento e fusão do eletrodo e do metal base na junta soldada.



Figura 55 – Aspecto da viga após a soldagem final (foto: Gustavo Veríssimo).

Após a soldagem final a peça deve ser jateada antes de ser pintada. O jateamento pode ser feito com granalha de ferro. Neste processo, as partículas de ferro são projetadas sobre o aço num ângulo que possibilita a limpeza da superfície e a formação de uma pequena rugosidade que favorece a aderência da tinta. Na Figura 56 são apresentadas imagens de vigas alveolares na fase final de fabricação, após jateamento e pintura.

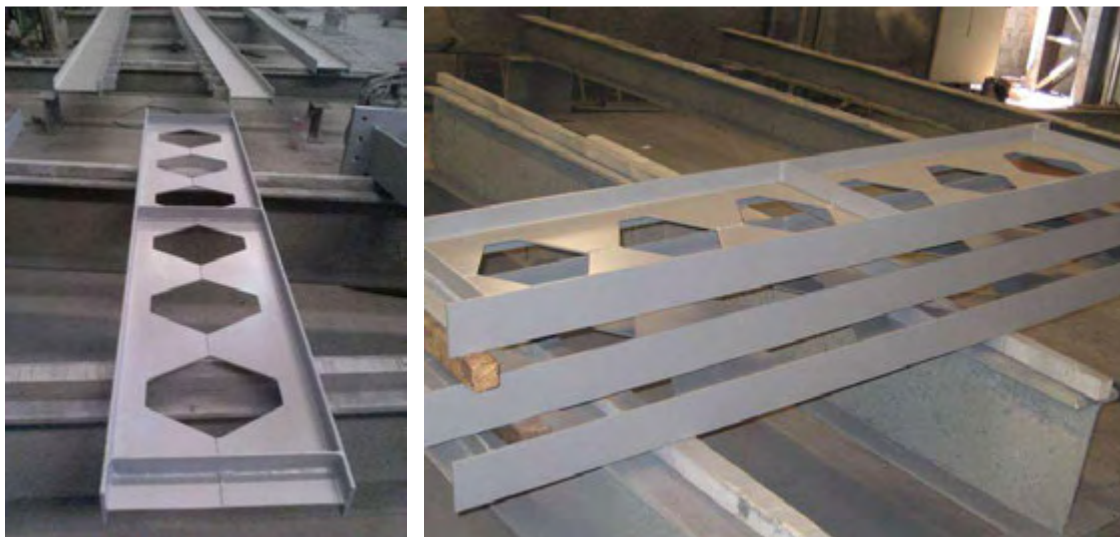


Figura 56 – Vigas casteladas após jateamento e pintura (foto: CPC Estruturas).

4.2.1 Vigas com eixo reto

As vigas alveolares com eixo reto são as que apresentam o processo de fabricação mais simples. Elas são obtidas pela sequência de corte longitudinal, deslocamento e solda conforme ilustrado na Figura 57.

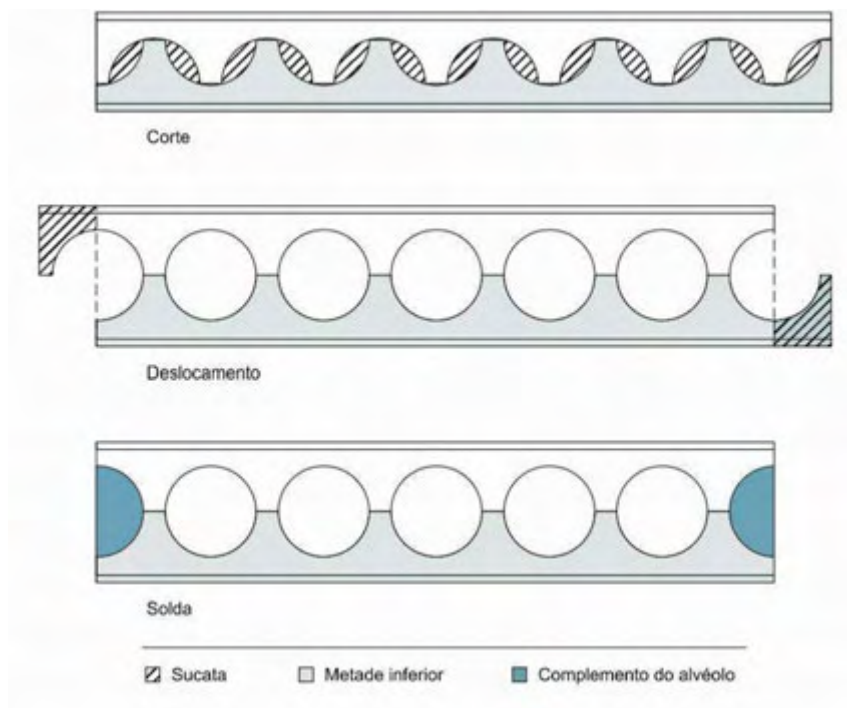


Figura 57 – Viga celular com eixo reto.

4.2.2 Vigas com eixo curvo ou com contraflecha

Podem-se obter vigas alveolares de eixo curvo cortando-se dois perfis originais com alvéolos de tamanhos ligeiramente diferentes. As metades do perfil com alvéolos maiores irão constituir os dois tês superiores de duas vigas curvas, e as metades do perfil com alvéolos menores irão constituir os dois tês inferiores dessas mesmas vigas. Para o corte em cada um dos perfis é necessário considerar o raio de curvatura da viga alveolar, bem como as implicações da curvatura no traçado dos cordões superior e inferior.

Na Figura 58 ilustra-se o esquema de fabricação da viga celular curva a partir de dois perfis originais: um para compor a metade superior e outro para compor metade inferior da viga alveolar.

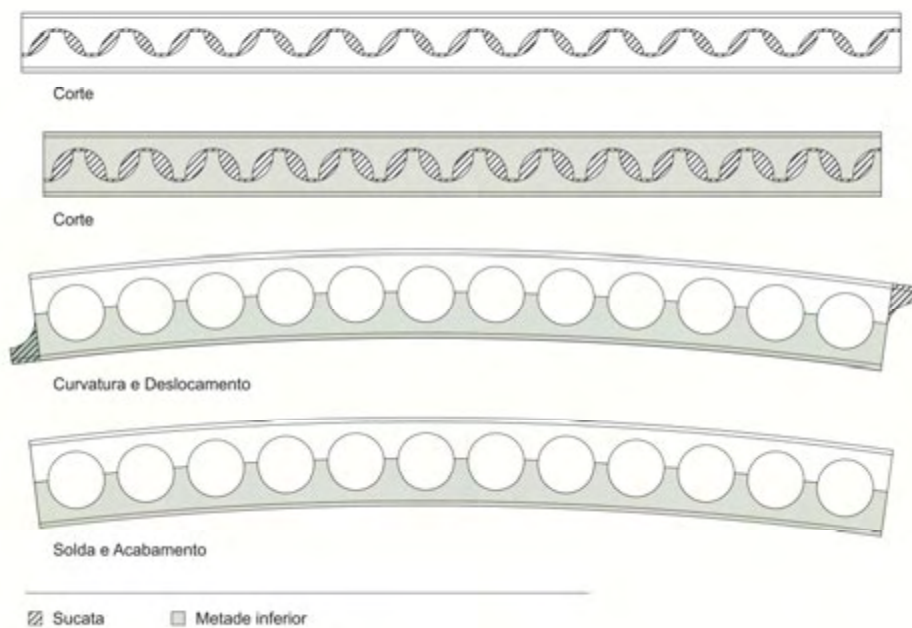


Figura 58 – Viga celular com eixo curvo.

Na Figura 59 ilustra-se a fabricação de uma viga castelada curva.



Figura 59 – Fabricação da viga castelada curva
(fonte: <http://www.steelssalg.com> – acessado em 10/12/2011).

A curvatura das vigas alveolares pode ser necessária por dois motivos:

- exigência arquitetônica dos elementos de cobertura;
- compensação da flecha devido ao peso próprio.

4.2.3 Vigas com inércia variável

Com um pequeno ajuste no alinhamento do traçado do corte é possível fabricar uma viga alveolar de inércia variável. Estabelecendo um alinhamento que faça um pequeno ângulo com o eixo do perfil original, pode-se cortá-lo em diagonal e girar uma das metades em relação à outra, obtendo uma viga de seção variável, conforme ilustrado na Figura 60.

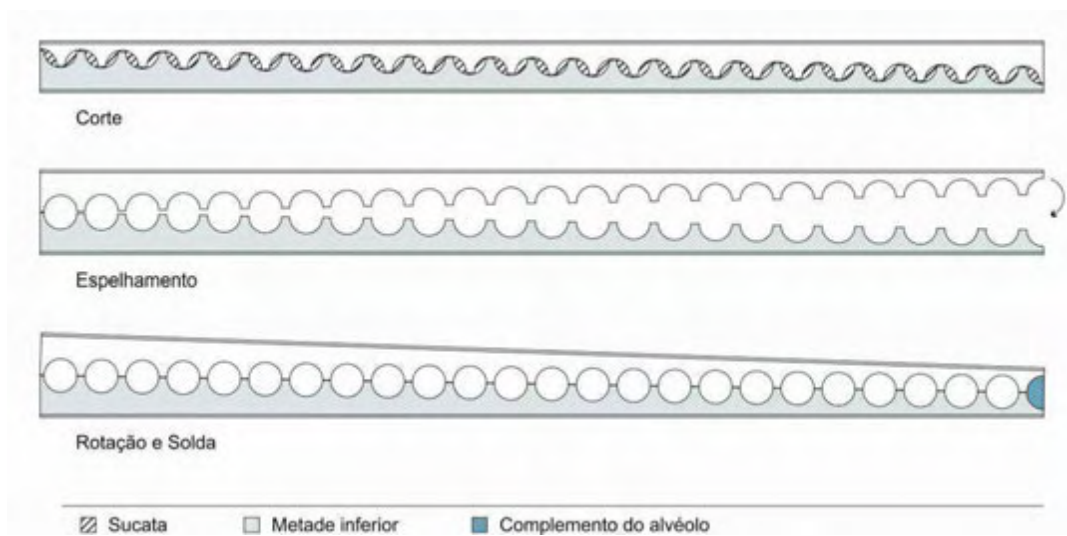


Figura 60 – Viga alveolar de inércia variável.

4.3 Fabricação como perfil soldado

É possível fabricar vigas alveolares, também, soldando-se tiras de chapas de aço, de modo análogo ao que é feito para os perfis I soldados de alma cheia (Figura 61). Esse método traz vantagens e desvantagens, tais como:

- maior perda de material devido à maior porção de aço cortada da chapa original na região dos alvéolos;
- a configuração dos alvéolos é mais livre, uma vez que não se depende do corte simétrico (o espaçamento e o tamanho dos alvéolos pode ser variável);
- pode-se fabricar vigas mais altas do que as que se consegue a partir de perfis laminados.



Figura 61 – Vigas alveolares soldadas

(fonte: <http://www.fabsec.co.uk> – acessado em 22/02/2012).

Eventualmente, requisitos arquitetônicos podem exigir vigas com uma geometria tal que somente possam ser obtidas como vigas soldadas, como no caso mostrado na Figura 62.



Figura 62 – Vigas alveolares soldadas com geometria especial

(fonte: <http://www.metalica.com.br/edificio-sede-bruning-tecnometal> – acessado em 22/02/2012).

4.4 Considerações finais sobre o processo de fabricação

As vigas alveolares possuem altura da seção cerca de 1,5 vezes maior que a do perfil original de alma cheia e, portanto, são mais resistentes e menos sensíveis a deformações. As vigas mais altas apresentam maior inércia, podendo receber cargas 10% a 50% maiores que as vigas de alma cheia originais, para um mesmo vão, e/ou atingir vãos livres mais extensos com flechas admissíveis e sem aumentar o peso da viga.

As vigas alveolares são sempre mais leves que um perfil de alma cheia de mesma altura, devido às aberturas na alma. E sendo mais leves, permitem redução do peso médio das estruturas. Embora seja evidente que a viga alveolar em si apresente economia do aço, é igualmente claro que sua fabricação implica em aumento no custo da produção.

Segundo informação da Gerdau Açominas, o custo das vigas alveolares chega a ser 40% maior que o custo do perfil laminado original, por conta dos processos de corte, solda e da mão-de-obra. Evidentemente, há maior economia na fabricação destas vigas quando se trata de uma produção em larga escala, com equipamentos automatizados que substituam a mão de obra (TÉCHNE, 2010).

É preciso avaliar o custo final das opções: o perfil laminado original, mais pesado, mas que está pronto para ser usado; a treliça, no caso de coberturas, que é leve, mas apresenta o processo de montagem demorado; e a viga alveolar, mais leve, mas que exigirá tempo adicional de produção.

Como as aberturas podem enfraquecer um pouco a alma das vigas, é ainda mais compensatório quando as vigas alveolares são fabricadas para grandes vãos e carregamento uniforme. Dessa forma, a viga alveolar se torna mais competitiva quando comparada com as treliças do que quando comparada com as vigas de alma cheia.

Existe ainda outro fator que influencia na escolha das vigas alveolares e que, de certa forma, independe dos custos: o apelo estético.

Com o desenvolvimento das construções com estrutura de aço tem se observado um interesse crescente na utilização de vigas alveolares, com o objetivo de explorar o efeito estético que elas causam no ambiente.

5

Alternativas de aplicação e detalhes construtivos para vigas alveolares

5.1 Principais campos de aplicação das vigas alveolares

O campo de aplicação das vigas alveolares é bastante amplo, envolvendo estruturas com grandes vãos e pequenas cargas, ou que demandem aberturas nas vigas para a passagem de dutos, ou ainda como solução para atender a exigências do partido arquitetônico, pela questão estética ou de extensão dos vãos.

Em supermercados e grandes lojas, por exemplo, como as coberturas têm sempre grandes vãos livres e cargas pequenas, as vigas alveolares são uma alternativa interessante. O mesmo ocorre em vigas de coberturas e pisos de estações rodoviárias e ferroviárias. Já em edifícios-garagem, projetados com vãos sempre muito maiores do que um prédio convencional de escritórios, por exemplo, essas vigas possibilitam um espaço que facilita manobras dos veículos e otimiza o número de vagas. Quando aplicadas na cobertura de galpões industriais, resultam em vigas leves pela redistribuição dos momentos. Como componente de pórticos apresentam bom desempenho, pois para um mesmo momento de inércia são sempre mais leves do que as vigas de alma cheia. Em virtude desse conjunto de características, as vigas alveolares podem ser empregadas em diversos contextos, sendo os mais recorrentes os sistemas de piso e de cobertura.

Em geral, a configuração geométrica das vigas alveolares permite maior expressão arquitetônica e confere maior leveza visual para os ambientes onde são aplicadas.

As vigas alveolares destinadas aos sistemas de piso são utilizadas, muitas vezes, para acomodação de instalações técnicas como sistema elétrico, hidráulico, ar-condicionado,

entre outros, e também para vencer grandes vãos, como é o caso dos edifícios do tipo garagem (Figura 63).



Figura 63 – Whitehall Road, Leeds, 18,5 m; e Cambridge Car Park, 16 m (fonte: www.westok.co.uk – acessado em 11/05/2011).

O uso das vigas alveolares para suporte de coberturas permite que grandes vãos sejam vencidos com a intervenção de menos pilares, e com uma mesma quantidade de aço, o que pode ser vantajoso sob o ponto de vista econômico. Além disso, ter menos pilares favorece a funcionalidade do ambiente, por torná-lo menos limitado ao posicionamento da estrutura. A escolha de vigas alveolares para vencer grandes vãos pode ocorrer em função de requisitos estruturais, como é o caso dos edifícios garagem ou até mesmo por uma questão estética.

5.2 Vigas alveolares para sistemas de piso

5.2.1 Passagem de instalações técnicas

Uma importante vantagem das vigas celulares é a possibilidade da passagem dos dutos de instalações através das aberturas, evitando corte na alma ou aumento da altura da construção, que ocorre necessariamente quando os dutos passam sob as vigas. A passagem das instalações por dentro das aberturas tem duas implicações: a economia de espaço vertical e a melhor adaptação das edificações à tendência de abrigar uma quantidade cada vez maior de instalações.

5.2.1.1 Economia de espaço vertical

Em edificações com vigas sem aberturas, a passagem de dutos consome parte da altura útil do pé-direito da edificação (Figura 64), o que muitas vezes gera a necessidade de aumentar o pé-direito total do pavimento. A redução do espaço vertical proporcionada pelas vigas alveolares permite menores alturas entre pavimentos, o que pode, em alguns casos, viabilizar mais pavimentos no mesmo gabarito.

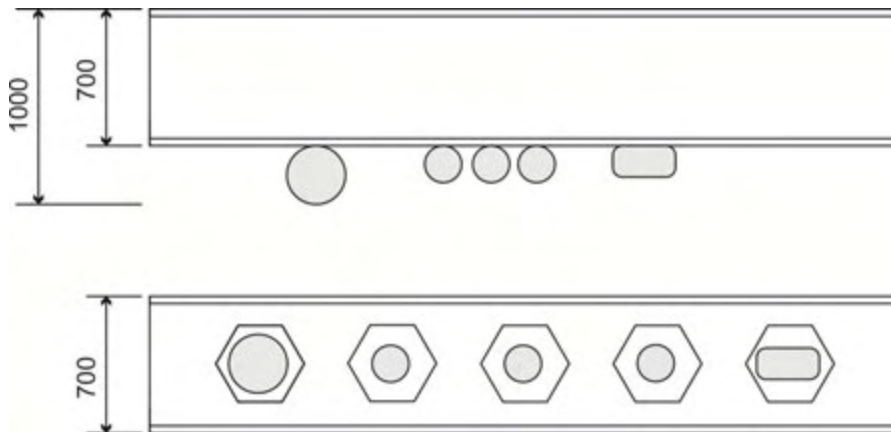


Figura 64 – Passagem de dutos de serviços por dentro dos alvéolos.

Para visualizar a economia e altura útil do pé-direito, a título de exemplo, suponha-se uma edificação de 12 pavimentos, com pé-direito de 3 m e gabarito final 30 m, em que são utilizadas vigas alveolares no lugar das vigas de alma cheia (Figura 65a). Neste caso tem-se a possibilidade de passar a tubulação através dos alvéolos e assim economizar cerca de 30 cm em cada pavimento. Com esta economia surgem duas possibilidades: manter o valor do gabarito final de 45 m e aumentar de 12 para 13 o número de pavimentos na edificação (Figura 65b); ou, manter a edificação com 12 andares e economizar o equivalente a um pavimento em material de construção, mão de obra de execução, acabamento, custos de fachada, estrutura, circulação vertical, etc., conforme ilustrado na Figura 65c.

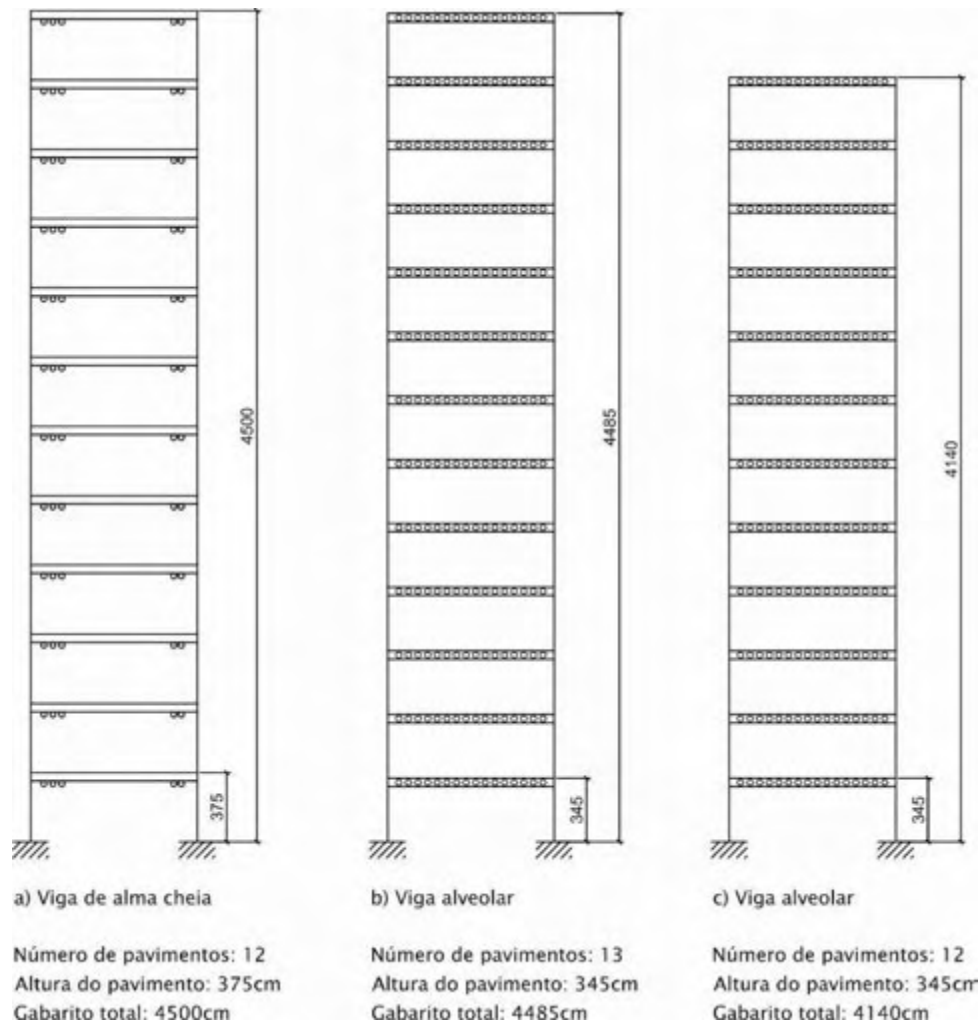


Figura 65 – Exemplo comparativo: alternativas com viga alveolar e viga de alma cheia.

5.2.1.2 Tendência em aumentar a quantidade de instalações técnicas

O outro aspecto relacionado ao aumento do interesse por vigas alveolares é o aumento do número de edificações que exigem a acomodação de um número cada vez maior de instalações técnicas como sistemas elétrico, hidráulico, sanitário, ar-condicionado, segurança, automação e outros. As edificações que geralmente demandam um número maior de instalações são as de escritório, hospitalares e de laboratórios.

5.2.1.3 Grandes vãos

5.2.1.3.1 Maior flexibilidade para o leiaute do pavimento

Além de permitir a passagem de instalações pelos alvéolos, as vigas alveolares facilitam a criação de grandes espaços, com vãos que podem chegar a 18 m, quando se considera uma relação $L/d_g = 20$. Na Figura 66 ilustra-se a comparação entre vãos vencidos por

vigas alveolares e vigas de alma cheia. Comparativamente, o fato de a viga alveolar vencer grandes vãos reduz o número de pilares no pavimento, o que além de representar até 30% de economia no peso da estrutura (de acordo com os fabricantes ArcelorMittal e CMC Steel Products) permite que o ambiente seja menos limitado ao posicionamento do sistema estrutural, portanto mais flexível quanto à disposição do leiaute. Essa flexibilidade constitui-se numa vantagem arquitetônica muito interessante para modificações não previstas no uso da edificação.

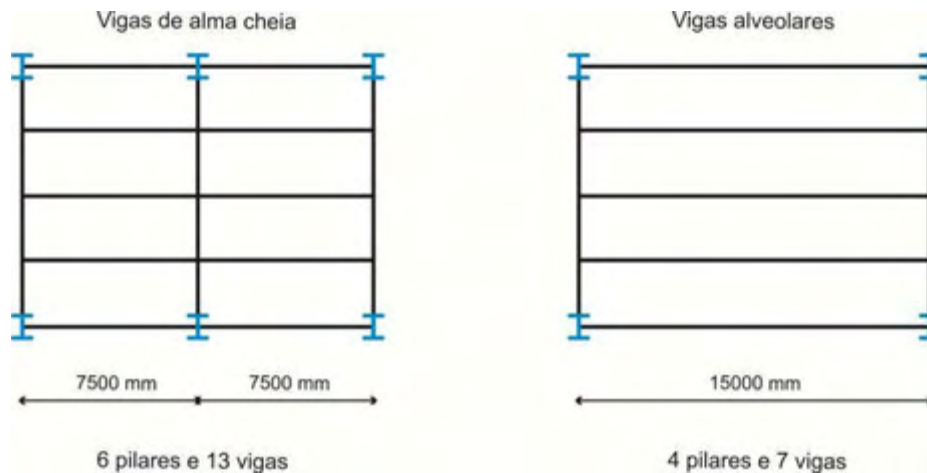


Figura 66 – Comparação do número de peças estruturais entre pavimentos com viga de alma cheia e com viga alveolar.

As vigas alveolares são uma alternativa viável também para edifícios destinados a estacionamento, pois os vãos usuais para este tipo de edificação, entre 15 e 16 m, estão entre os vãos típicos da viga alveolar aplicada em sistemas de piso. A utilização de vigas alveolares com contraflecha nesse tipo de edifício possibilita a construção de painéis de piso com ligeiro caimento, facilitando a drenagem.

5.2.1.3.2 Competitividade

Utilizando como base a comparação formulada pela *CMC Steel*, ilustrada na Figura 67, pode-se observar que a solução com vigas alveolares conduz quase à mesma quantidade de aço que a com vigas de alma cheia. No entanto, a redução do número de pilares e fundações pode conduzir a uma economia de até 30% no custo da estrutura. Um aspecto que não pode deixar de ser levado em conta na análise da viabilidade das vigas alveolares é que vãos maiores significam menos pilares e menos pontos de fundação, o que, conseqüentemente, diminui custos com materiais e mão de obra de execução.

Numa obra é preciso buscar o conjunto vão livre/número de bases de melhor desempenho para a edificação.

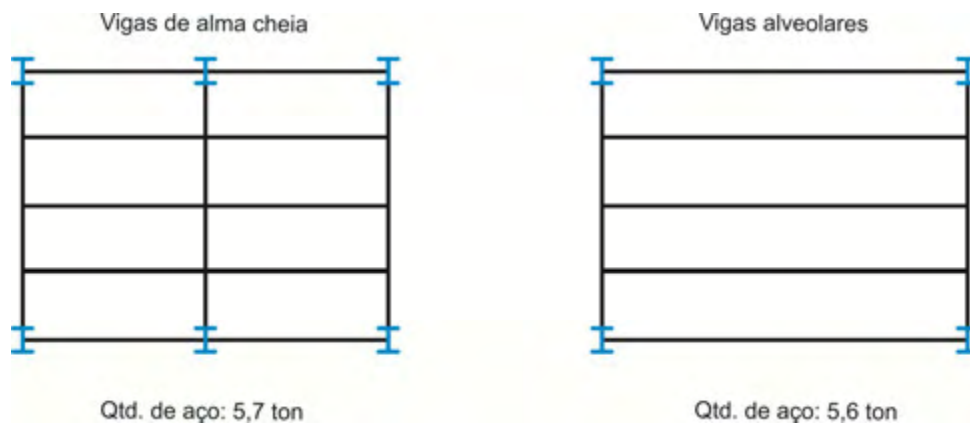


Figura 67 – Comparação do consumo de aço entre pavimentos com viga de alma cheia e com viga alveolar.

5.2.1.4 Comportamento misto aço-concreto

As vigas alveolares de sistemas de piso também podem trabalhar solidárias às lajes de concreto, formando vigas mistas. O comportamento estrutural é análogo ao já bem conhecido para as vigas mistas envolvendo perfis I de alma cheia. Neste caso, a diferença principal para a viga isolada é que a linha neutra plástica se desloca para a posição do baricentro da seção mista, e a seção do perfil alveolar fica sujeita em grande parte, ou totalmente, à tração. Há que se dar atenção a dois outros estados limites, que não ocorrem para as vigas de alma cheia, quais sejam: a flambagem do montante de alma (Figura 68) e a formação de mecanismo plástico por efeito Vierendeel.



Figura 68 – Aspecto da flambagem do montante de alma numa viga alveolar mista (foto: ArcelorMittal).

Da mesma forma como acontece nas vigas mistas com perfis de alma cheia, a mesa superior do perfil é menos solicitada. Assim, tendo em vista seu processo de fabricação, no caso de vigas alveolares a serem empregadas em sistemas de piso misto pode ser interessante fabricar vigas com seção assimétrica, como as mostradas na Figura 69. A metade superior da viga é obtida de um perfil com mesa menor e a metade inferior é obtida de outro perfil com mesa maior.

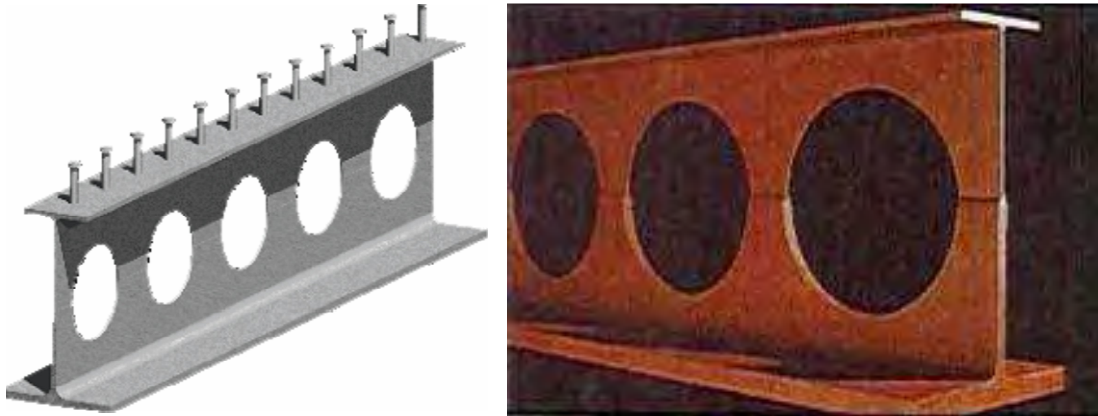


Figura 69 – Perfil alveolar assimétrico (fontes: www.arcelormittal.com – acessado em 04/10/2011 e www.streamrice.com - acessado em 29/02/2012).

Para obtenção das vigas alveolares assimétricas é necessário que sejam utilizados dois perfis originais diferentes, sendo um perfil destinado para confecção de dois cordões superiores e outro perfil destinado à confecção de dois cordões inferiores.

5.3 Vigas alveolares para sistemas de cobertura

As vigas alveolares aplicadas em coberturas além de possibilitarem o vencimento de grandes vãos, oferecem aos arquitetos e engenheiros uma gama maior de possibilidades para conceitos criativos e favorecem a concepção de sistemas estruturais que tiram partido da sua estética, tanto para composição de fachadas quanto para ambientação interna (Figura 70).



Figura 70 – Holmes Place Fitness Club, Merton (fonte: www.westok.co.uk – acessado em 11/05/2011); e concessionária com viga alveolar com dupla curvatura (fonte: <http://www.cmcsteelproducts.com> – acessado em 11/05/2011).

O uso das vigas alveolares como elementos de cobertura é vantajoso em relação ao uso da treliça devido ao fato de a primeira ser constituída por menos peças, o que reduz seu tempo de fabricação e permite que sejam transportadas para a obra já montadas, reduzindo gastos com mão de obra. De acordo com o fabricante das ACB (*Arcelor Celular Beams*), a utilização dessas vigas para cobertura permite vencer vãos de aproximadamente 40 m (ARCELORMITTAL, 2011). Essa medida pode variar, dentre outros fatores, de acordo com o formato adotado para a viga, a saber: reto, de inércia variável e curvo.

A aplicação mais usual para as vigas de eixo reto é na composição de sistemas de piso. Todavia, em alguns sistemas de cobertura se utilizam vigas alveolares de eixo reto, como, por exemplo, em galpões e ginásios cobertos (Figura 71).



Figura 71 – Cabines DIY Preston, 21 m, e Piscina Fulham Broadway, 26,5 m (fonte: www.westok.co.uk – acessado em 11/05/2011).

As vigas alveolares com formato curvo são comumente utilizadas em coberturas de ginásios esportivos, estações ferroviárias, concessionárias de automóveis, academias, supermercado, praças de alimentação e centros de convenções. (Figura 72).



Figura 72 – Academia Liverpool FC, 44 m, e South Mimms Services - M25 (fonte: www.westok.co.uk – acessado em 11/05/2011).

No Brasil, há um centro de eventos no edifício WTC, em São Paulo, em que foram empregadas vigas alveolares curvas na cobertura, fabricadas pela Gerdau Açominas. A opção pelas vigas alveolares se deu em função da montagem, pois a posição do edifício dificultava o uso de guindaste. Segundo o engenheiro responsável, a estrutura precisava ser o mais leve possível e resistente. A cobertura é em formato de abóbada e os vãos chegam a 50 m. A configuração curva dessa viga foi obtida pela junção de vários segmentos retos.

Nessa obra, com o uso de vigas alveolares foi possível obter resistência equivalente à de uma viga de 900 mm de altura com o peso de uma viga de 600 mm (Figura 73).



Figura 73 – Centro de eventos no edifício WTC (fonte: Revista Técnica, nº 164, 2010).

Outro exemplo de aplicação das vigas alveolares no Brasil pode ser visto na expansão da Linha 1 do Metrô de Porto Alegre, na região do Vale dos Sinos, com projeto datado de janeiro de 2009 e término da obra previsto para o primeiro semestre de 2012.

A estação apresenta 4.881 m² de área, e é dividida em dois pavimentos e elevada do solo, assim como todo o trajeto da expansão. Na cobertura, com 170 m de comprimento por 17 m de largura, a equipe responsável pelo projeto arquitetônico tirou partido da forma curva, estruturando-a com segmentos retos de vigas alveolares de aço. As vigas sustentam telhas metálicas galvanizadas do tipo sanduíche. Os acessos são constituídos por pórticos, também em estrutura metálica, com fechamento em painéis pré-fabricados de concreto.

A definição estrutural do projeto, utilizando basicamente a estrutura metálica associada a elementos em concreto armado, visou fazer uso otimizado dos materiais, ao permitir que fossem aproveitadas as características de resistência mecânica do aço e do concreto (TÉCHNE, 2010).

A Estação Liberdade, assim como todas as estações desta expansão, enfatiza a iluminação zenital, aliando-a a um sistema de adequação da iluminação, controlando o desligamento e o acendimento das luzes, gerando, assim, economia de energia. Neste caso, o uso da viga alveolar auxilia na leveza visual e na passagem de iluminação para o interior da estação (Figura 74).



Figura 74 – Projeto e obra da expansão da Estação Liberdade do metrô que corta o Vale dos Sinos – RS (fonte: www.cbca-iabr.org.br – acessado em 11/05/11).

Quanto maior a extensão do vão a ser vencido, maior é a economia das vigas alveolares com formato curvo em relação às vigas alveolares retas (Figura 75).



Figura 75 – Concessionária Audi UK (fonte: www.westok.co.uk – acessado em 11/05/2011).

As vigas com seção variável são projetadas para oferecer resistência às cargas solicitantes em todos os pontos da viga, de modo proporcional, e ao longo do vão. São comumente utilizadas para suporte de coberturas em balanço, como é comum em arquibancadas de estádios esportivos (Figura 76), podendo possuir alvéolos com diâmetro constante ou variável. São também usadas como viga para pórticos de galpões (Figura 77).



Figura 76 – Hull KC Stadium, 29 m, e Harlequins Rugby Club, 12 m (fonte: www.westok.co.uk – acessado em 11/05/2011).



Figura 77 – Viga alveolar de inércia variável (fotos: Olivier Vassart).

5.4 Outras aplicações

Os perfis alveolares são também utilizados para outros fins, além dos sistemas de piso e de cobertura. Eles podem ainda ser utilizados como pilares, como vigas de pontes, como elementos para a composição de fachadas ou para reabilitação de edificações antigas, por apresentarem maior leveza visual e, portanto, menor interferência na estética da edificação. Os itens a seguir ilustram outras aplicações para as vigas alveolares que não as de sistemas de piso e de cobertura.

5.4.1 Pontes e passarelas de pedestres

Segundo informações da empresa *Westok Structural Services*, a utilização de vigas alveolares em pontes é compensatória para vãos maiores do que 15 m, quando comparada aos perfis laminados de alma cheia (Figura 78).



Figura 78 – Ponte rodoviária em viga castelada mista – Nova Zelândia
(fonte: www.latteycivil.co.nz – acessado em 22/02/2012).

Além de muito adequadas para vencer grandes vãos, as vigas celulares aplicadas em pontes apresentam uma área relativamente menor para resistência ao vento, reduzindo o empuxo horizontal e, conseqüentemente, a solicitação nos apoios.

O uso das vigas alveolares em pontes e passarelas de pedestres aumenta a possibilidade de o arquiteto explorar este elemento além de sua função estrutural e funcional, tirando partido de sua aparência estética, que muitas vezes pode ser mais interessante do que um perfil de alma cheia ou até mesmo uma treliça. Na Figura 79 ilustra-se a aplicação de vigas celulares em duas passarelas esteticamente simples e na Figura 80 pode-se observar uma passarela de pedestres com vigas casteladas.



Figura 79 – Passarela Ivinghoe Scraper e Passarela sobre Rio Brodogue.
(fonte: www.westok.co.uk – acessado em 11/05/2011).



Figura 80 – Passarela de pedestres com estrado de madeira suportado por vigas casteladas com chapa expansora (fonte: <http://www.modernsteel.com> – acessado em 29/02/2012).

5.4.2 Pilares

Perfis alveolares podem ser utilizados com a função de pilares quando estes estão submetidos a baixas cargas axiais. Por isso, observa-se ser mais comum sua aplicação em estruturas simples e leves, tais como galpões e pavilhões de armazenamento.

Os pilares alveolares são particularmente interessantes para aplicação em galpões altos e pavilhões de armazenamento, pois o ganho de inércia em relação perfil de alma cheia é desejável para assegurar a estabilidade lateral do pilar. Em pilares de menor altura a opção por perfis alveolares está associada mais à estética do que ao comportamento estrutural ou à economia.

Observa-se que tanto na construção em concreto quanto em aço, alguns pilares são projetados com a seção variável, muitas vezes por questão estética. Segundo a *Westok*, uma vez estabelecido no projeto que o pilar terá seção variável, o perfil alveolar será a solução mais econômica.

Na Figura 81 são ilustradas duas aplicações dos perfis alveolares com a função de pilares. Nelas, verifica-se o uso da tipologia de galpões mencionada como mais adequada para pilares alveolares e, especificamente na Porsche Liverpool, observa-se que o projetista tirou proveito da estética do perfil alveolar no partido arquitetônico.



Figura 81 – Churchill Court, Manchester, 44 m; e Porsche Liverpool
(fonte: www.westok.co.uk – acessado em 11/05/2011).

5.4.3 Requalificação de edifícios antigos

As vigas alveolares são também utilizadas na requalificação ou na modernização de edifícios antigos, onde se tem a intenção de preservar o patrimônio arquitetônico. Sua escolha se deve à leveza visual dessas vigas, que provoca uma interferência menos brusca entre a estrutura nova e a antiga (Figura 82).



Figura 82 – Viga celular aplicada em reabilitação de edifícios
(fonte: www.arcelormittal.com – acessado em 13/12/2011)

A fabricante ArcelorMittal apresentou recentemente o uso das vigas celulares na restauração do Convento Bernardino, do século XVI. O projeto de restauração, assinado pelo arquiteto Jean Michel Wilmotte, é emblemático pela proposta de substituição total do piso e da estrutura de madeira, necessária devido à completa reabilitação elaborada para o edifício. Após deixar de ser convento, a edificação foi sede do Quartel de Bombeiros, posteriormente foi utilizada como escola e, por fim, foi destinada ao Centro de Conferências Diocesano. Essa última mudança no uso exigiu que o espaço interno fosse reestruturado para dar lugar a um auditório.

Os pisos originais com as vigas e pilares de madeira foram substituídos por uma estrutura mista, composta por vigas celulares apoiadas sobre a alvenaria das paredes originais. As vigas celulares, reforçadas por vigas menores, agem conjuntamente com a laje mista. Além das vigas reforço e da laje mista, as vigas celulares, com vão de 24 m cada, suportam dois tirantes que mantêm a laje do primeiro pavimento suspensa. Este arranjo foi proposto para evitar a distribuição de cargas sobre a estrutura histórica do Convento Bernardino.

Na Figura 83 ilustra-se a estrutura de madeira sendo desmanchada e as vigas celulares que suportam os tirantes, juntamente com o detalhe de apoio da viga sobre as paredes de alvenaria.



Figura 83 – Antiga estrutura de madeira e nova estrutura em aço
(fonte: www.constructalia.com – acessado em 13/12/2011).

O uso das vigas alveolares na laje e na estrutura do convento permitiu solucionar a passagem de instalações demandadas e a regularidade das aberturas garante que caso haja aumento no número de instalações, elas possam ser acrescentadas sem afetar o cotidiano das atividades.

O piso R+1, indicado no desenho mostrado na Figura 84, está suspenso a partir da viga celular no segundo pavimento para evitar a distribuição de cargas nas abóbadas de pedra da construção original do século XVI.

A numeração no desenho corresponde sucessivamente a:

1. nova viga celular;
2. tirante;
3. piso suspenso.

Na Figura 84 é ilustrado o trabalho realizado no sótão. Nela está em evidência a nova estrutura da cobertura e o piso em fase de conclusão. Os caibros da estrutura suportam as placas de madeira que funcionam como o acabamento tradicional das telhas. O sistema de piso foi recoberto de grades de aço para apoiar o auditório.

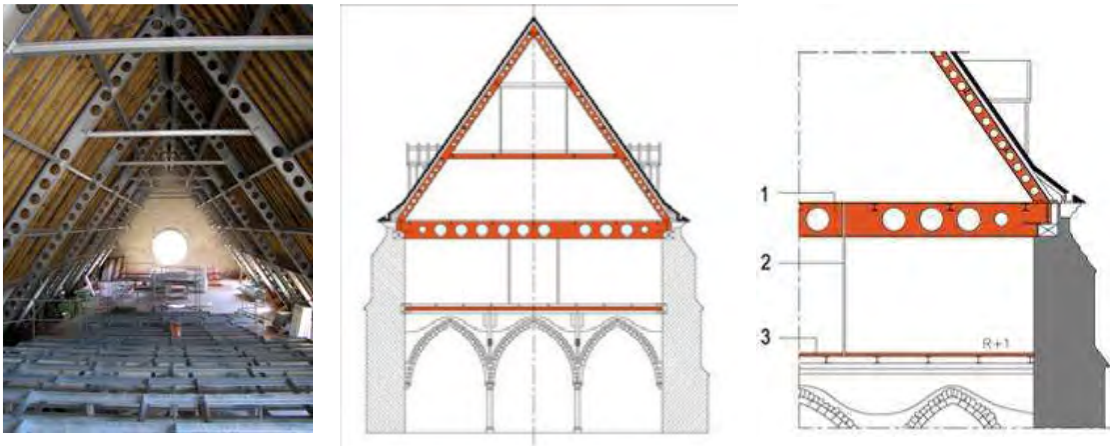


Figura 84 – Elevação do edifício principal e os detalhes do apoio da nova estrutura (fonte: www.constructalia.com – acessado em 13/12/2011).

Observa-se que no processo de readequação do Convento Bernardino o uso das vigas celulares foi fundamental para obter o desempenho estrutural e arquitetônico esperado.

5.5 Detalhes construtivos

Algumas situações em que as vigas alveolares são aplicadas exigem soluções específicas quanto à disposição dos alvéolos e dos montantes. Os itens abaixo apresentam as situações e suas respectivas soluções mais usuais.

5.5.1 Aumento do alvéolo para passagem de tubulação

Às vezes é necessário eliminar o montante entre dois alvéolos para dar espaço à passagem de tubulações. Esta solução pode ser prevista e resolvida ainda na fase de projeto, o que proporciona maior agilidade na fase de instalação das tubulações de serviços. Na Figura 85, nota-se que outros montantes entre dois alvéolos, além dos que foram utilizados para passagem de tubulações, foram também eliminados, provavelmente para a passagem de mais instalações.

Na medida do possível, deve-se eliminar o montante entre dois alvéolos na região mais próxima do meio do vão, pois nessa região o perfil está sujeito a um menor esforço de cisalhamento. Quando não é possível fazer o aumento do alvéolo na região central do vão, e este fica, portanto, mais próximo dos apoios da viga, muitas vezes é necessário acrescentar uma placa para enrijecer a extremidade da viga.



Figura 85 – Alongamento do alvéolo para passagem de tubulação
(fonte: www.westok.co.uk – acessado em 11/05/2011).

5.5.2 Fechamento do alvéolo

Em alguns casos, devido à magnitude da força cortante na região próxima aos apoios, ou por outro requisito de dimensionamento, como no caso de incêndio, pode ser necessário realizar o fechamento completo de alguns alvéolos, preenchendo-os com uma chapa compatível com a chapa da alma do perfil (Figura 86).



Figura 86 – Fechamento do alvéolo (fonte: www.arcelormittal.com – acessado em 13/12/2011).

Há casos em que não é necessário realizar o fechamento total do alvéolo, mas sim parcial (Figura 87). Esta solução é geralmente utilizada para propiciar condições de ligação entre vigas principais e secundárias.

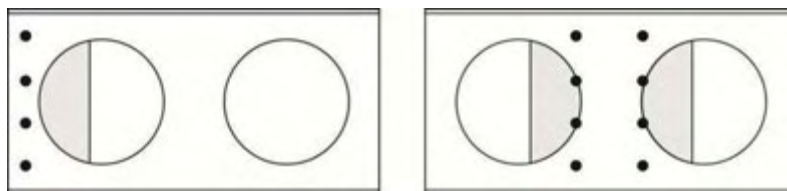


Figura 87 – Fechamento parcial dos alvéolos.

No caso de vigas celulares, é possível definir, na fase de projeto, a distância pretendida entre alvéolos e o espaçamento entre os alvéolos de extremidade em relação aos apoios da viga. Essa flexibilidade permite adequar a posição dos montantes e dos alvéolos em função da necessidade de ligações intermediárias ocasionada pelo encontro entre duas vigas, geralmente principal com secundária. O fechamento parcial do alvéolo para facilitar ligações (Figura 87) é mais simples e econômico que o fechamento total dos alvéolos.

5.5.3 Ligações rígidas nas extremidades do perfil alveolar

Em casos especiais de pórticos que suportam coberturas com grandes vãos, pode ser interessante utilizar vigas alveolares rigidamente ligadas a perfis de alma cheia de inércia variável, um em cada extremidade da viga, como mostrado na Figura 88. Esse artifício favorece a redistribuição de momentos fletores, possibilitando à viga alveolar vencer um vão maior do que quando está apenas apoiada nas extremidades.



Figura 88 – Viga alveolar rigidamente ligada a perfis de alma cheia nas extremidades (fonte: www.westok.co.uk – acessado em 11/05/2011).

5.5.4 Reforço dos alvéolos

Há casos em que devido à magnitude da força cortante na região próxima aos apoios, é necessário reforçar os alvéolos, mas por algum requisito de projeto não é possível realizar o fechamento completo dos alvéolos. Nessas situações pode-se reforçar a seção introduzindo um aro soldado ao longo do contorno da abertura para aumentar a sua rigidez (Figura 89).

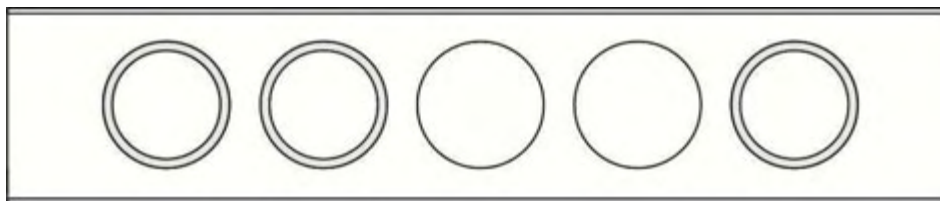


Figura 89 – Reforço com aro soldado ao longo do alvéolo.

Na Figura 90 pode-se observar um caso em que esse tipo de reforço foi utilizado numa viga castelada. Evidentemente este detalhe onera a fabricação da viga e somente é utilizado quando estritamente necessário.



Figura 90 – Fábrica do Trabalho 747 TDB Projetos
(fonte: www.tdbprojetos.com.br – acessado em 12/05/2011).

5.5.5 Enrijecimento do montante

Um dos estados limites últimos que as vigas alveolares estão sujeitas é a flambagem do montante de alma. Eventualmente, quando da verificação do dimensionamento pode-se identificar a necessidade de enrijecimento de algum dos montantes da viga.

Análises experimentais e numéricas têm demonstrado a eficácia de alternativas como a aplicação de enrijecedores no montante identificado como crítico ou a utilização de segmentos de aros como enrijecedor aplicados na borda do alvéolo, como mostrado na Figura 91.

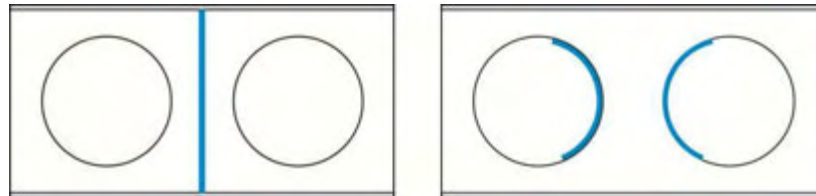


Figura 91 – Enrijecedores no montante e no alvéolo.

5.5.6 Absorção de cargas concentradas

O aparecimento de plastificação junto a um alvéolo qualquer pode ser evitado com a aplicação de enrijecedores horizontais em ambos os lados do alvéolo. Essa situação pode ocorrer para alvéolos isolados próximos a cargas concentradas ou junto a seções submetidas a solicitações máximas (Figura 92).

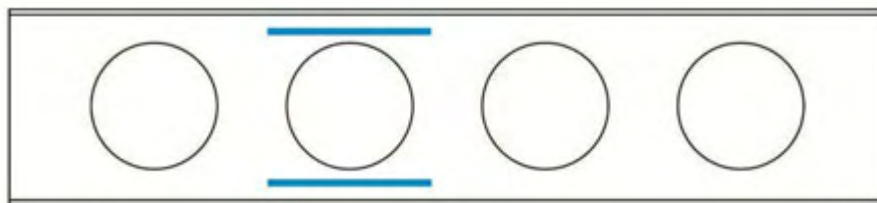


Figura 92 – Reforço nos tês para absorção de cargas pontuais.

5.5.7 Considerações sobre os detalhes construtivos

Os detalhes construtivos estão diretamente relacionados às decisões de projeto e dependem em grande parte do cálculo estrutural de cada viga. As soluções são muito específicas para cada caso e devem ser analisadas de modo a garantir um custo competitivo e principalmente a exequibilidade do detalhe.

6

Proposição de procedimentos para pré-dimensionamento de vigas alveolares

6.1 Considerações gerais

O pré-dimensionamento de uma viga alveolar depende de uma série de requisitos geométricos e estruturais, mas principalmente dos requisitos geométricos, pois dele depende toda a análise estrutural feita posteriormente.

Neste trabalho foi sistematizado um procedimento para a definição dos parâmetros geométricos que determinam a configuração final de uma viga alveolar, tendo em vista uma série de critérios estabelecidos a partir da investigação teórico-experimental.

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. Já no caso das vigas celulares, o diâmetro do alvéolo não tem relação direta com a largura do montante, de modo que elas proporcionam maior flexibilidade do projeto.

Nos tópicos a seguir são apresentados os procedimentos para a definição dos parâmetros geométricos necessários para o pré-dimensionamento de vigas casteladas e celulares. Os procedimentos consistem basicamente na aplicação de um conjunto de critérios em uma sequência lógica que permite definir completamente a geometria da viga.

6.2 Procedimento para pré-dimensionamento de vigas casteladas

a) Comprimento de projeto (L_v)

Os parâmetros geométricos da viga são estabelecidos em função do comprimento de projeto arquitetônico (L_v), conforme ilustrado na Figura 93. Vale ressaltar que o vão de projeto arquitetônico L_v não corresponde ao vão estrutural, usualmente tomado como a distancia de eixo a eixo dos pilares ou vigas de apoio.

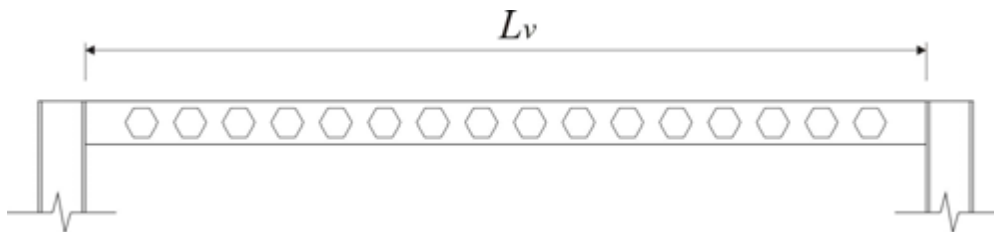


Figura 93 – Comprimento de projeto arquitetônico (L_v).

b) Razão de expansão (k)

Para os três padrões da tipologia castelada abordados neste trabalho adotou-se a razão de expansão $k=1,5$ por ser o valor que conduz ao maior ganho de resistência para o perfil alveolar.

c) Altura do perfil de alma cheia original (d)

Para a determinação da altura do perfil original, pode-se partir de relações vão/altura (L/d), conhecidas como, por exemplo:

- $L/d = 20$, utilizada para o pré-dimensionamento de viga de aço de alma cheia para sistemas de piso;
- $L/d = 25$, utilizada para o pré-dimensionamento de treliça de aço para sistemas de cobertura.

Dessa forma, para uma viga castelada com razão de expansão de $k=1,5$ pode-se chegar à altura do perfil original a partir do seguinte raciocínio:

Para sistemas de piso:

$$\frac{L_v}{d_g} = 20 \quad \text{e} \quad d_g = 1,5d \quad (22)$$

$$\text{Assim: } \frac{L_v}{1,5d} = 20 \quad \therefore \quad d = \frac{L_v}{20 \times 1,5} = \frac{L_v}{30}$$

Para sistemas de cobertura

$$\frac{L_v}{d_g} = 25 \quad \text{e} \quad d_g = 1,5d \quad (23)$$

$$\text{Assim: } \frac{L_v}{1,5d} = 25 \quad \therefore \quad d = \frac{L_v}{25 \times 1,5} = \frac{L_v}{37,5}$$

Caso o valor obtido de d não coincida com uma das alturas disponíveis no mercado, deve-se adotar a altura mais próxima.

d) Altura do perfil alveolar (d_g)

A altura do perfil alveolar será, portanto, a altura do perfil original multiplicada pela razão de expansão. Assim, por exemplo, supondo $d = 410$ mm, tem-se:

$$d_g = 410 \times 1,5 = 615 \text{ mm} \quad (24)$$

e) Parâmetros geométricos

Com base na altura do perfil original (d), definem-se os parâmetros geométricos da viga, tais como o passo (p), a largura do alvéolo (a_o) e a largura do montante (b_w), de acordo com o padrão de castelação adotado, seja Litzka (Figura 33), Peiner (Figura 34) ou Anglo-Saxão (Figura 35), cujas relações estão indicadas na Tabela 2. Em seguida, define-se a largura mínima do montante de extremidade, $b_{we \text{ min}}$, (Figura 94).

Tabela 2 – Parâmetros geométricos para vigas casteladas.

	Litzka	Peiner	Anglo-Saxão
p	$1,7322d$	$1,5d$	$1,08d$
b_w	$0,5774d$	$0,5d$	$0,25d$
a_0	$1,155d$	d	$0,83d$
b	$b_w / 2$	$b_w / 2$	$0,29d$

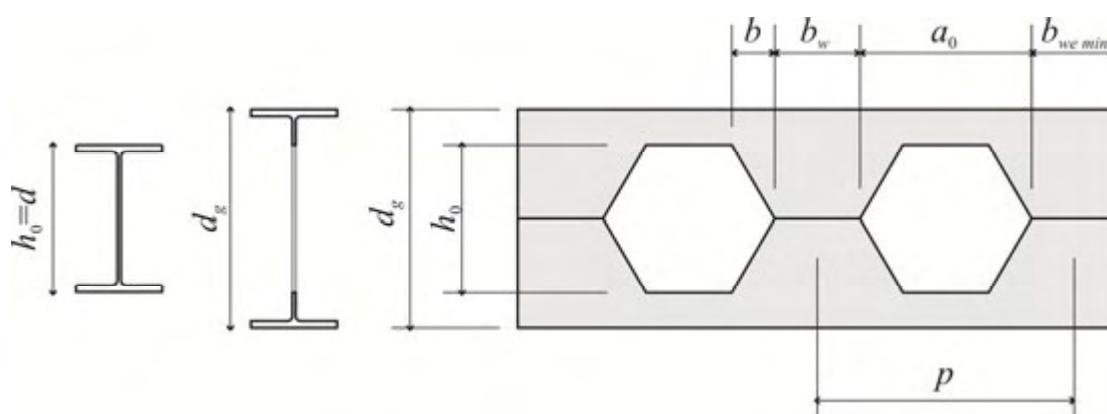


Figura 94 – Parâmetros geométricos da viga castelada.

f) Largura mínima do montante de extremidade ($b_{we \min}$)

Deve-se resguardar uma largura mínima para o montante de extremidade, de modo que seja possível executar a ligação da viga com o restante da estrutura e garantir, pelo menos, a mesma largura dos montantes intermediários, para não suceder que o montante extremo fique menos resistente exatamente numa região em que a solicitação por força cortante é crítica.

Neste trabalho as larguras dos montantes de extremidade foram resguardadas em função de dois fatores:

1. As dimensões de uma cantoneira de ligação, soldada ou parafusada, compatível com a capacidade resistente da seção do perfil (BAIÃO FILHO e SILVA, 2010).

– Para os perfis das séries W150 à W460 a cantoneira recomendada é de 76 mm.

$$b_{we \min} \geq 76 \text{ mm} \quad (25)$$

- Para os perfis das séries W530 à W610 a cantoneira recomendada é de 102 mm.

$$b_{we \min} \geq 102 \text{ mm} \quad (26)$$

2. Montante crítico

A largura mínima do montante de extremidade deve ser pelo menos igual à largura dos montantes intermediários (b_w).

$$b_{we \min} \geq b_w \quad (27)$$

A largura mínima do montante de extremidade deve atender, simultaneamente, aos dois critérios acima.

g) Comprimento útil para distribuição dos alvéolos (L_d)

Tendo sido definida a largura mínima do montante de extremidade ($b_{we \min}$), pode-se calcular o comprimento útil no qual serão distribuídos os alvéolos.

$$L_d \leq L_v - 2 \left(b_{we \min} - \frac{b_w}{2} \right) \quad (28)$$

h) Número de alvéolos (n)

Em seguida calcula-se o número de alvéolos, n , em função dos valores de L_d e do passo (p), sendo n arredondado para o número inteiro inferior mais próximo.

$$n = \text{INT} \left(\frac{L_d}{p} \right) \quad (29)$$

i) Distribuição dos alvéolos em L_d

A distribuição dos alvéolos ao longo de L_d inicia-se no centro do vão. Quando n for par, o centro da viga coincidirá com o centro de um montante (Figura 95), e quando n ímpar, coincidirá com o centro de um alvéolo (Figura 96).

Com esta proposta, a posição dos alvéolos na viga será sempre simétrica, o que é interessante sob o ponto de vista do projeto arquitetônico.

Número de alvéolos (n) = 16
 Vão de projeto (L_v) = 6000 mm
 Padrão: Litzka

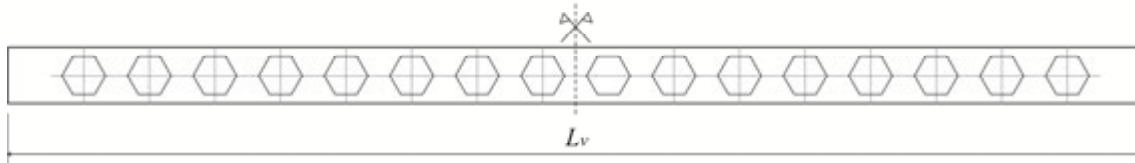


Figura 95 – Número par de alvéolos: centro do montante no centro da viga.

Número de alvéolos (n) = 15
 Vão de projeto (L_v) = 10000 mm
 Padrão: Litzka

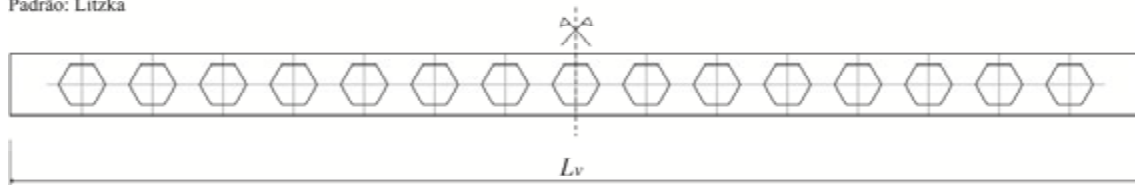


Figura 96 – Número ímpar de alvéolos: centro do alvéolo no centro da viga.

j) Largura final do montante de extremidade (b_{we})

Devido ao arredondamento do número de alvéolos, e à distribuição destes ao longo do vão L_d , a largura final do montante de extremidade pode não ser igual a $b_{we \text{ min}}$. Desta forma pode-se calcular a largura final do montante de extremidade (b_{we}).

$$b_{we} = \frac{L_v - n \times p}{2} + b_{we \text{ min}} - \frac{b_w}{2} \quad (30)$$

k) Comprimento da viga para corte (L_c)

Após a distribuição dos alvéolos em L_d é possível definir o traçado do corte no perfil original para obtenção da viga alveolar. Pode-se então, virtualmente, manter a metade inferior da viga e deslocar a metade superior até provocar o encaixe entre as metades (Figura 97). Esta proposta leva em consideração o custo benefício no consumo de aço e no emprego da mão-de-obra para fabricação das vigas. Na maior parte dos casos é necessário aparar, nas duas metades, as sobreposições ocasionadas pelo deslocamento da metade superior. Com este procedimento obtém-se o comprimento do perfil original a ser utilizado, L_c .

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

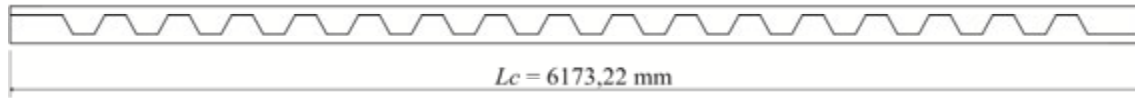


Figura 97 – Traçado do corte no perfil original.

Em função do deslocamento de meio passo é possível prever o comprimento do perfil original necessário para o corte adequado e a montagem final da viga alveolar. O comprimento de corte do perfil original é dado por:

$$L_c = L_v + \frac{P}{2} \quad (31)$$

A relação L_c/L_v fornece o valor em porcentagem, de quanto o perfil original precisará ser maior do que o vão de projeto para a obtenção da configuração final da viga.

1) Configuração final da viga

Para finalização da fabricação os espaços resultantes nas extremidades da viga são preenchidos com chapas de aço conforme representado na Figura 98.

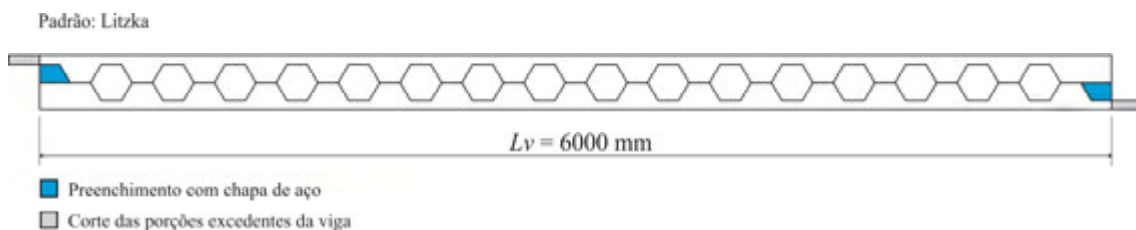


Figura 98 – Configuração final da viga alveolar.

Nos casos em que a largura do montante de extremidade b_{we} apresenta o mesmo valor da largura dos montantes intermediários b_w , não há área a ser aparada e, portanto, não há área a ser preenchida com chapa de aço.

6.3 Procedimento para pré-dimensionamento de vigas celulares

6.3.1 Considerações sobre a razão de expansão da viga celular

O catálogo de vigas celulares da ArcelorMittal apresenta diferentes razões de expansão para sistemas de cobertura e para sistemas de piso, e apresenta também as relações D_o/d e p/D_o referentes a cada um desses sistemas.

Na Tabela 3 são apresentadas as razões de expansão e as relações D_o/d e p/D_o propostas pela ArcelorMittal para sistemas de piso e para sistemas de cobertura.

Tabela 3 – Razões de expansão e relações D_o/d e p/D_o propostas pela ArcelorMittal para vigas celulares.

	Sistemas de Piso	Sistemas de Cobertura
k	1,3 a 1,4	1,4 a 1,6
D_o/d	0,8 a 1,1	1,0 a 1,3
p/D_o	1,2 a 1,7	1,1 a 1,3

As diferentes combinações propostas no catálogo da ArcelorMittal foram verificadas por meio de desenho digital, tendo-se observado que algumas combinações entre as razões de expansão e as relações D_o/d e p/D_o apresentam limitações geométricas.

No desenvolvimento dessa pesquisa, as relações k , D_o/d e p/D_o propostas pela ArcelorMittal foram utilizadas como base, porém, tendo em vista as limitações geométricas identificadas, concluiu-se que algumas combinações se mostram inviáveis sob o ponto de vista da fabricação da viga alveolar segundo os procedimentos propostos nesse trabalho (Figura 99). Outras combinações podem acarretar uma perda maior de aço devido ao perfil original utilizado para a fabricação (Figura 100).

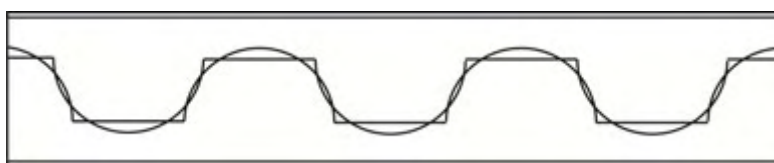


Figura 99 - Exemplo de um caso inviável sob o ponto de vista da fabricação.

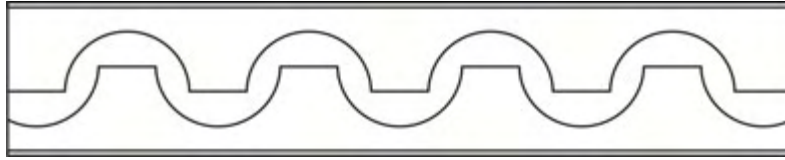


Figura 100 - Exemplo de um caso com perda maior de aço na fabricação.

Para garantir que as combinações de k , D_o/d e p/D_o resultem em situações passíveis de fabricação a partir dos procedimentos propostos nesse trabalho considerou-se o raciocínio descrito a seguir.

Na Figura 101 estão indicadas as dimensões de h_{e0} e d_g . A variável h_{e0} representa uma condição ótima para o traçado das duas metades da viga alveolar no perfil de alma cheia.

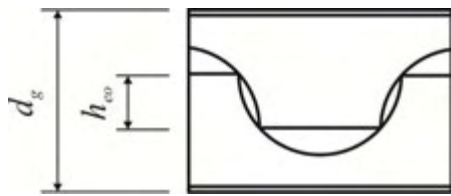


Figura 101 - Indicação de h_{e0} .

Sendo:

$$d_g = d + h_{e0} = k d \quad (32)$$

$$h_{e0} = k d - d \quad (33)$$

$$h_{e0} = (k - 1) d \quad (34)$$

Na Figura 102 são ilustradas as posições consideradas para as variáveis f , w e r .

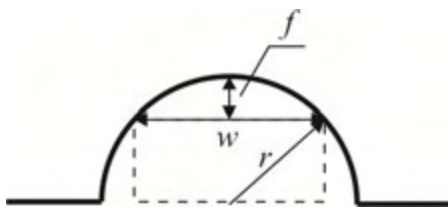


Figura 102 - Indicação de f , w e r .

Sendo:

$$r = \frac{D_o}{2} \quad (35)$$

$$f = \frac{D_o}{2} - h_{e0} \quad (36)$$

$$w = b_w = p - D_o \quad (37)$$

A relação entre as variáveis da Figura 102 utilizadas nessa dedução é dada pela equação matemática da Eq. (38), apresentada a seguir:

$$f = r - \frac{1}{2} \sqrt{4r^2 - w^2} \quad (38)$$

Substituindo as equações (35), (36) e (37) na equação (38), tem-se:

$$\frac{D_o}{2} - h_{eo} = \frac{D_o}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{4 \left(\frac{D_o}{2} \right)^2 - (p - D_o)^2} \quad (39)$$

Desenvolvendo a Eq. (39), obtém-se:

$$h_{eo} = \frac{D_o}{2} \sqrt{\left(\frac{2p}{D_o} - \frac{p^2}{D_o^2} \right)} \quad (40)$$

Para simplificação das expressões, foram consideradas as seguintes variáveis:

$$\eta = \frac{p}{D_o} \quad (41)$$

$$\rho = \sqrt{2\eta - \eta^2} \quad (42)$$

$$\mu = \frac{D_o}{d} \quad (43)$$

Aplicando (33) em (40), tem-se:

$$(k-1)d = \frac{D_o}{2} \sqrt{\left(\frac{2p}{D_o} - \frac{p^2}{D_o^2} \right)} \quad (44)$$

Substituindo (41), (42) e (43) em (44), obtém-se:

$$k-1 = \frac{\mu \rho}{2} \quad (45)$$

Resolvendo a Eq. (45) para k , μ e ρ , tem-se os seguintes valores limites:

$$k = \frac{\mu \rho}{2} + 1 \quad (46)$$

$$\mu = \frac{2(k-1)}{\rho} \quad (47)$$

$$\rho = \frac{2(k-1)}{\mu} \quad (48)$$

As relações descritas acima foram implementadas no *Matchcad* 14 de modo a tornar prática a verificação dos critérios e procedimentos para pré-dimensionamento propostos.

6.3.2 Descrição do procedimento para pré-dimensionamento da viga celular

a) Vão de projeto (L_v)

Os parâmetros geométricos da viga são estabelecidos em função do vão de projeto (L_v).

b) Razão de expansão (k)

As vigas celulares diferem das casteladas por permitirem flexibilidade na escolha dos valores da largura do montante e do diâmetro do alvéolo.

As relações k , D_o/d e p/D_o propostas para sistemas de piso são apresentadas na Tabela 4 e na Tabela 5 as mesmas relações para sistemas de cobertura.

Tabela 4 – Relações propostas para vigas celulares adequadas para sistemas de piso.

Sistemas de Piso							
K	1,3				1,4		
D_o/d	0,8	0,9	1,0	1,1	0,9	1,0	1,1
p/D_o	1,2 a 1,6	1,2 a 1,7			1,2 a 1,4	1,2 a 1,6	

Tabela 5 – Relações propostas para vigas celulares adequadas para sistemas de cobertura.

Sistemas de Cobertura								
k	1,4				1,5			1,6
D_o/d	1,0	1,1	1,2	1,3	1,1	1,2	1,3	1,3
p/D_o	1,1 a 1,3				1,1 a 1,3			1,1 a 1,3

Os valores encontrados para as limitações das relações propostas neste trabalho, bem como a dedução utilizada para estabelecer as limitações geométricas encontram-se no Apêndice 1.

c) Altura do perfil original (d)

No caso das vigas celulares, para a determinação da altura do perfil original é necessário estabelecer preliminarmente as relações k e L/d .

No caso das vigas celulares, diferentemente do que foi proposto para as vigas casteladas, fixou-se a relação $L/d = 20$ e a altura do perfil original é obtida considerando-se a razão de expansão adequada para o caso em questão.

$$d \cong \frac{L}{20} \times \frac{1}{1,3} = \frac{L_v}{26} \quad (\text{para razão de expansão igual a 1,3}) \quad (49)$$

$$d \cong \frac{L}{20} \times \frac{1}{1,4} = \frac{L_v}{28} \quad (\text{para razão de expansão igual a 1,4}) \quad (50)$$

$$d \cong \frac{L}{20} \times \frac{1}{1,5} = \frac{L_v}{30} \quad (\text{para razão de expansão igual a 1,5}) \quad (51)$$

$$d \cong \frac{L}{20} \times \frac{1}{1,6} = \frac{L_v}{32} \quad (\text{para razão de expansão igual a 1,6}) \quad (52)$$

Caso o valor obtido de d não coincida com uma das alturas disponíveis no mercado, adota-se a altura mais próxima.

d) Altura do perfil alveolar (d_g)

A altura do perfil alveolar será, portanto, a altura do perfil original multiplicada pela razão de expansão. Assim, por exemplo, supondo $d = 460$ mm, tem-se:

$$d_g = 460 \times 1,4 = 644 \text{ mm} \quad (53)$$

e) Propriedades geométricas

Com base na altura do perfil original (d) definem-se os parâmetros geométricos da viga, tais como o passo (p), o diâmetro do alvéolo (D_o) e a largura do montante (b_w). Na Figura 103 ilustram-se os parâmetros gerais para as vigas celulares.

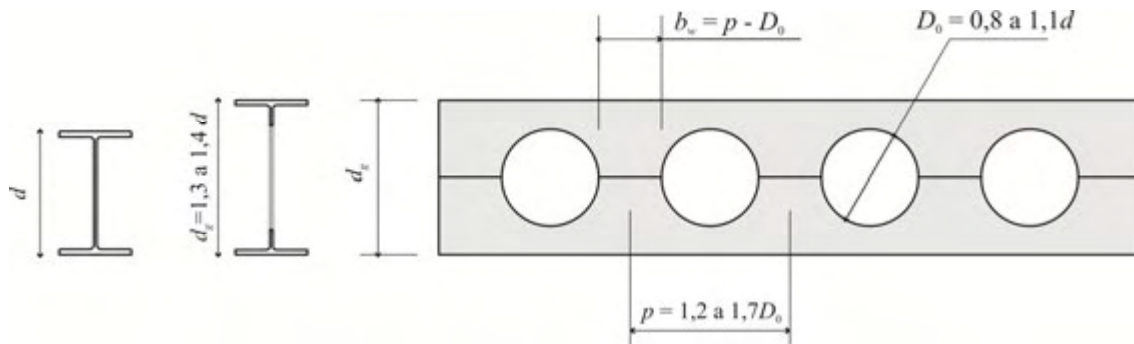


Figura 103 – Parâmetros geométricos da viga celular com vistas à aplicação em sistemas de piso.

No caso das vigas celulares os critérios considerados para a definição dos parâmetros geométricos são diferentes para os sistemas de piso e de cobertura. Em ambas as aplicações devem ser observados os limites geométricos para a medida dos montantes. Neste trabalho consideraram-se os limites sugeridos no catálogo de vigas celulares da ArcelorMittal. São eles:

$$- b_{w \min} \geq \begin{cases} \frac{D_o}{12} \\ 50 \text{ mm} \end{cases} \quad (54)$$

$$- b_{w \max} \leq \frac{D_o}{1,25} \quad (55)$$

f) Largura mínima do montante de extremidade ($b_{we \min}$)

Segundo o catálogo de vigas celulares da ArcelorMittal, a largura mínima do montante de extremidade deve atender à seguinte relação:

$$b_{we \min} \geq p - \frac{D_o}{2} \quad (56)$$

Os itens seguintes, quais sejam:

- g) o comprimento útil para distribuição dos alvéolos (L_d);
- h) o número de alvéolos (n);
- i) a distribuição dos alvéolos em L_d ;
- j) a largura final do montante de extremidade (b_{we});
- k) o comprimento da viga para corte (L_c);

podem ser definidos de forma idêntica ao proposto para a tipologia castelada.

6.4 Exemplos de aplicação

6.4.1 Pré-dimensionamento de vigas casteladas

Na aplicação dos parâmetros para o desenho da viga castelada serão apresentados seis exemplos com objetivo de abranger os três padrões de vigas casteladas considerados neste trabalho, aplicadas nos sistemas de piso e de cobertura. Dessa forma, os exemplos se diferenciam quanto ao padrão geométrico escolhido para a viga e quanto ao sistema de aplicação. Os exemplos para sistema de piso apresentam vão de projeto igual a 12 m, e os exemplos para sistema de cobertura apresentam vão de projeto igual a 20 m. No caso das vigas casteladas, em todos os exemplos, a razão de expansão é igual a 1,5.

6.4.1.1 Vigas casteladas para sistemas de piso

Padrão Litzka

Na Figura 104 são ilustrados os parâmetros geométricos do padrão Litzka utilizados no pré-dimensionamento da viga:

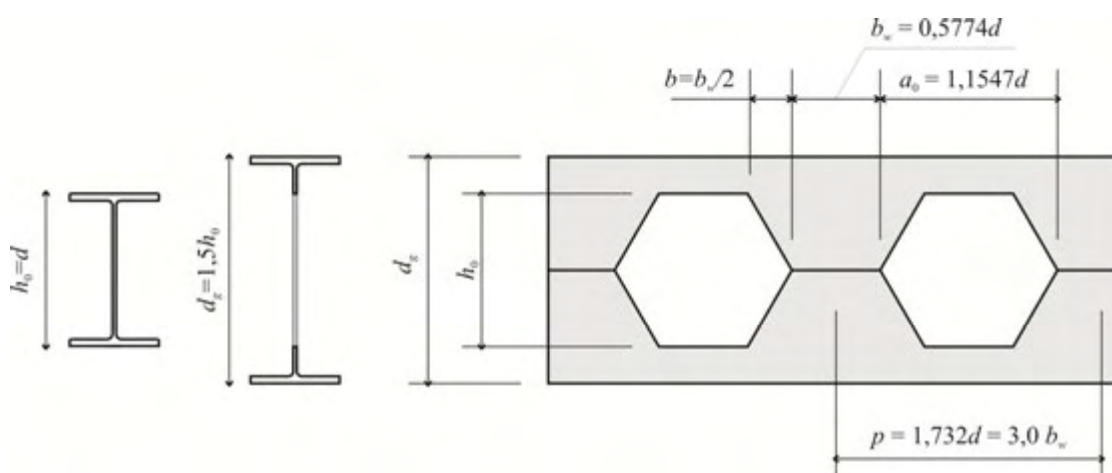


Figura 104 – Parâmetros geométricos do padrão Litzka utilizados no pré-dimensionamento da viga.

Sistema de aplicação: Piso	Tipologia/ padrão: Castelada/ Litzka
<p>a) Vão de projeto (L_v) $L_v = 12 \text{ m}$</p> <p>b) Razão de expansão (k) $k = 1,5$</p> <p>c) Altura do perfil original (d) $d \cong \frac{L}{20} \times \frac{1}{1,5} = \frac{L_v}{30}$ Assim: $d \cong \frac{L_v}{30} = 400 \text{ mm}$ Valor mais próximo disponível no catálogo de perfis laminados Gerdau Açominas. $d = 410 \text{ mm}$</p> <p>d) Altura do perfil alveolar (d_g) $d_g = k d = 1,5 \times 410 = 615 \text{ mm}$</p> <p>e) Parâmetros geométricos $p = 1,7322d = 710,2 \text{ mm}$ $b_w = 0,5774d = 236,7 \text{ mm}$ $a_0 = 1,155d = 473,4 \text{ mm}$ $b = \frac{b_w}{2} = 118,4 \text{ mm}$</p> <p>f) Largura mínima do montante de extremidade ($b_{we \text{ min}}$) $b_{we \text{ min}} \geq \begin{cases} 76 \text{ mm} \\ b_w \end{cases}$ Opção mais conservadora para este caso: $b_{we \text{ min}} = 236,7 \text{ mm}$</p>	<p>g) Comprimento útil para distribuição dos alvéolos (L_d) $L_d \leq L_v - 2 \left(b_{we \text{ min}} - \frac{b_w}{2} \right)$ $L_d \leq 12000 - 2 \left(236,7 - \frac{236,7}{2} \right) \text{ mm}$ $L_d \leq 11763,3 \text{ mm}$</p> <p>h) Número de alvéolos (n) $n = \text{INT} \left(\frac{L_d}{p} \right)$ $n = \text{INT} \left(\frac{11763,3}{710,2} \right) = \text{INT}(16,6) = 16$</p> <p>i) Distribuição dos alvéolos em (L_d) Número par de alvéolos: centro do montante no centro da viga (Figura 105).</p> <p>j) Largura final do montante de extremidade (b_{we}) $b_{we} = \frac{L_v - n \times p}{2} + \frac{b_w}{2}$ $b_{we} = \frac{12000 - 16 \times 710,202}{2} + \frac{236,734}{2} \text{ mm}$ $b_{we} = 436,8 \text{ mm}$</p> <p>k) Comprimento da viga para corte (L_c) $L_c = L_v + \frac{p}{2}$ $L_c = 12000 + 355,1 = 12355,1 \text{ mm}$ $L_c = 1,03 L_v \text{ (Figura 106).}$</p> <p>l) Configuração final da viga Ver Figura 107.</p>

Padrão: Litzka

Número de alvéolos (n) = 16

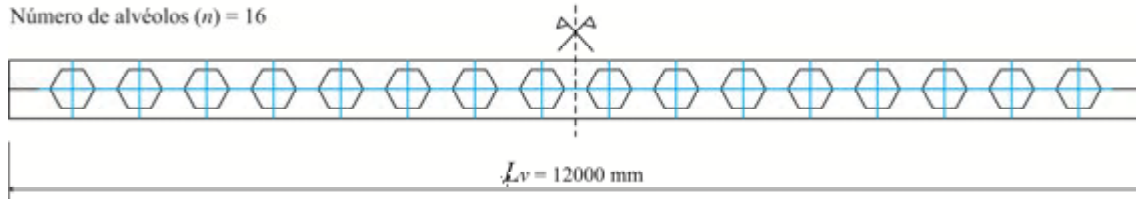


Figura 105 – Distribuição dos alvéolos em L_d para viga com padrão Litzka com $L_v = 12000$ mm.

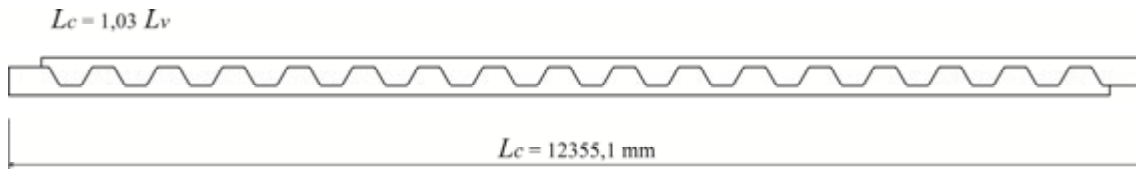
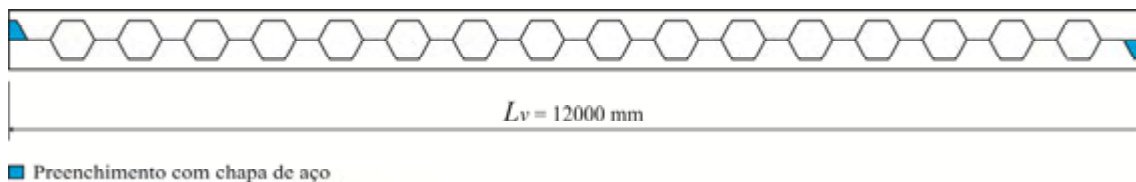


Figura 106 – Traçado de corte para viga com padrão Litzka com $L_v = 12000$ mm.



■ Preenchimento com chapa de aço

Figura 107 – Configuração final para viga com padrão Litzka com $L_v = 12000$ mm.

Padrão Peiner

Na Figura 108 são ilustrados os parâmetros geométricos do padrão Peiner utilizados no pré-dimensionamento da viga:

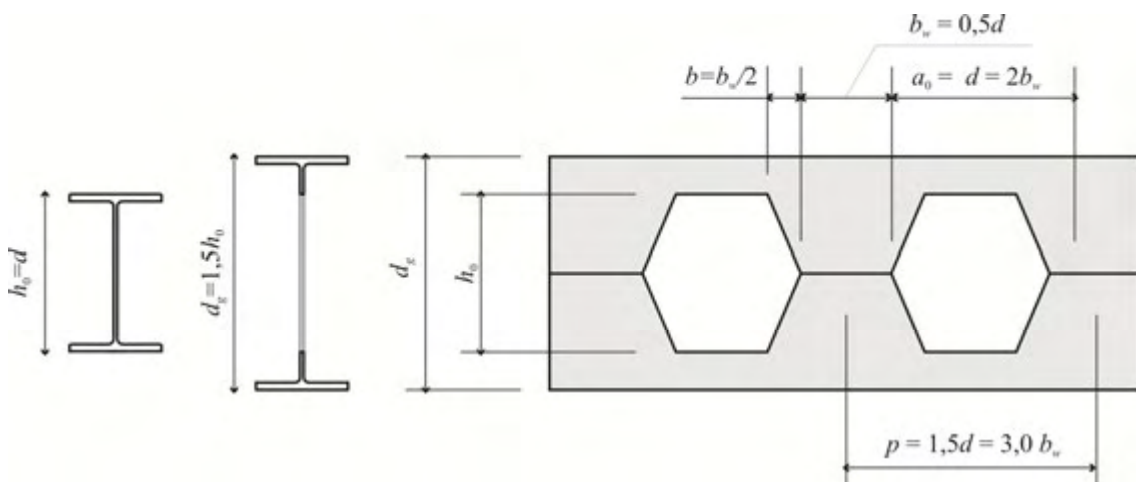


Figura 108 – Parâmetros geométricos do padrão Peiner utilizados no pré-dimensionamento da viga.

Sistema de aplicação: Piso	Tipologia/ padrão: Castelada/ Peiner
<p>a) Vão de projeto (L_v) $L_v = 12 \text{ m}$</p> <p>b) Razão de expansão (k) $k = 1,5$</p> <p>c) Altura do perfil original (d) $d \cong \frac{L}{20} \times \frac{1}{1,5} = \frac{L_v}{30}$ Assim: $d \cong \frac{L_v}{30} = 400 \text{ mm}$ Valor mais próximo disponível no catálogo de perfis laminados Gerdau Açominas. $d = 410 \text{ mm}$</p> <p>d) Altura do perfil alveolar (d_g) $d_g = k d = 1,5 \times 410 = 615 \text{ mm}$</p> <p>e) Parâmetros geométricos $p = 1,5d = 615,0 \text{ mm}$ $b_w = 0,5d = 205,0 \text{ mm}$ $a_0 = d = 410,0 \text{ mm}$ $b = \frac{b_w}{2} = 102,5 \text{ mm}$</p> <p>f) Largura mínima do montante de extremidade ($b_{we \text{ min}}$) $b_{we \text{ min}} \geq \begin{cases} 76 \text{ mm} \\ b_w \end{cases}$ Opção mais conservadora para este caso: $b_{we \text{ min}} = 205 \text{ mm}$</p>	<p>g) Comprimento útil para distribuição dos alvéolos (L_d) $L_d \leq L_v - 2 \left(b_{we \text{ min}} - \frac{b_w}{2} \right)$ $L_d \leq 12000 - 2 \left(205 - \frac{205}{2} \right) \text{ mm}$ $L_d \leq 11795,0 \text{ mm}$</p> <p>h) Número de alvéolos (n) $n = \text{INT} \left(\frac{L_d}{p} \right)$ $n = \text{INT} \left(\frac{11795}{615} \right) = \text{INT}(19,2) = 19$</p> <p>i) Distribuição dos alvéolos em L_d Número ímpar de alvéolos: centro do montante no centro da viga (Figura 109).</p> <p>j) Largura final do montante de extremidade (b_{we}) $b_{we} = \frac{L_v - n \times p}{2} + \frac{b_w}{2}$ $b_{we} = \frac{12000 - 19 \times 615}{2} + \frac{205}{2} \text{ mm}$ $b_{we} = 260,0 \text{ mm}$</p> <p>k) Comprimento da viga para corte (L_c) $L_c = L_v + \frac{p}{2}$ $L_c = 12000 + 307,5 = 12307,5 \text{ mm}$ $L_c = 1,03 L_v \quad (\text{Ver Figura 110}).$</p> <p>l) Configuração final da viga Ver Figura 111.</p>

Padrão: Peiner

Número de alvéolos (n) = 19

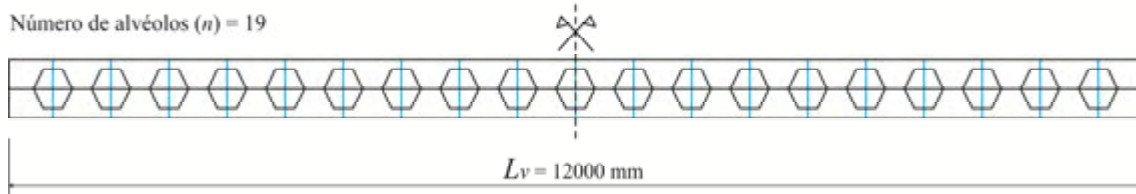


Figura 109 – Distribuição dos alvéolos em L_d para viga com padrão Peiner com $L_v = 12000$ mm.

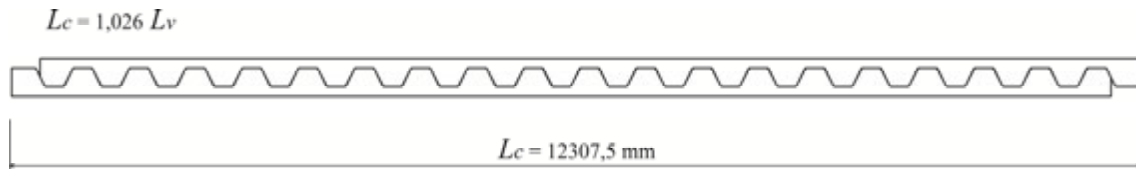
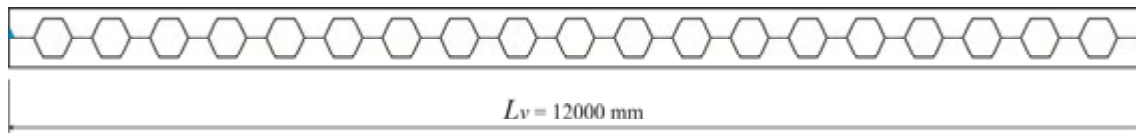


Figura 110 – Traçado de corte para viga com padrão Peiner com $L_v = 12000$ mm.



■ Preenchimento com chapa de aço

Figura 111 – Configuração final para viga com padrão Peiner com $L_v = 12000$ mm.

Padrão Anglo-Saxão

Na Figura 112 são ilustrados os parâmetros geométricos do padrão Anglo-Saxão utilizados no pré-dimensionamento da viga.

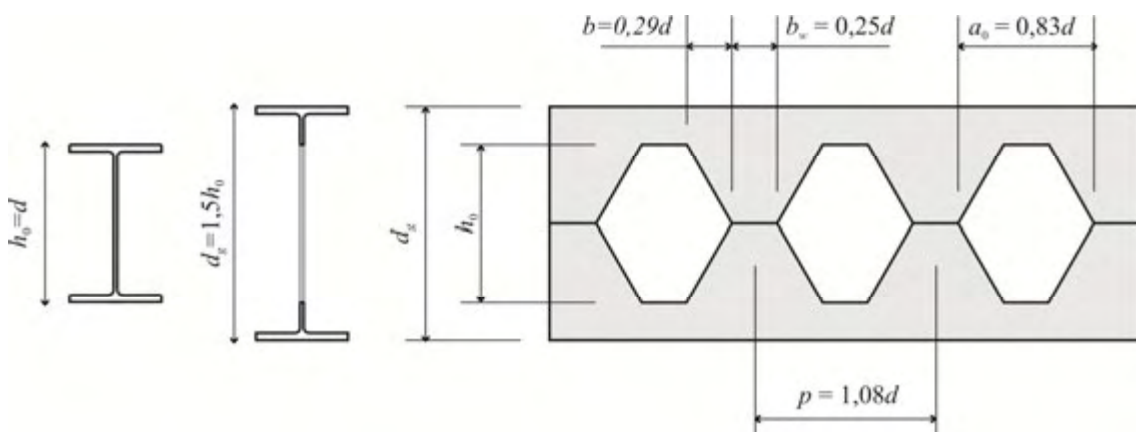


Figura 112 – Parâmetros geométricos do padrão Anglo-Saxão utilizados no pré-dimensionamento da viga.

Sistema de aplicação: Piso	Tipologia/ padrão: Castelada/ Anglo-Saxão
<p>a) Vão de projeto (L_v) $L_v = 12 \text{ m}$</p> <p>b) Razão de expansão (k) $k = 1,5$</p> <p>c) Altura do perfil original (d) $d \cong \frac{L}{20} \times \frac{1}{1,5} = \frac{L_v}{30}$ Assim: $d \cong \frac{L_v}{30} = 400 \text{ mm}$</p> <p>Valor mais próximo disponível no catálogo de perfis laminados Gerdau Açominas. $d = 410 \text{ mm}$</p> <p>d) Altura do perfil alveolar (d_g) $d_g = k d = 1,5 \times 410 = 615 \text{ mm}$</p> <p>e) Parâmetros geométricos $p = 1,08d = 442,8 \text{ mm}$ $b_w = 0,25d = 102,5 \text{ mm}$ $a_0 = 0,83d = 340,3 \text{ mm}$ $b = 0,29d = 118,9 \text{ mm}$</p> <p>f) Largura mínima do montante de extremidade ($b_{we \text{ min}}$) $b_{we \text{ min}} \geq \begin{cases} 76 \text{ mm} \\ b_w \end{cases}$ <p>Opção mais conservadora para este caso: $b_{we \text{ min}} = 102,5 \text{ mm}$</p> </p>	<p>g) Comprimento útil para distribuição dos alvéolos (L_d) $L_d \leq L_v - 2 \left(b_{we \text{ min}} - \frac{b_w}{2} \right)$ $L_d \leq 12000 - 2 \left(102,5 - \frac{102,5}{2} \right) \text{ mm}$ $L_d \leq 11897,5 \text{ mm}$</p> <p>h) Número de alvéolos (n) $n = \text{INT} \left(\frac{L_d}{p} \right)$ $n = \text{INT} \left(\frac{11897,5}{442,8} \right) = \text{INT}(26,9) = 26$</p> <p>i) Distribuição dos alvéolos em L_d Número par de alvéolos: centro do montante no centro da viga (Figura 113).</p> <p>j) Largura final do montante de extremidade (b_{we}) $b_{we} = \frac{L_v - n \times p}{2} + \frac{b_w}{2}$ $b_{we} = \frac{12000 - 26 \times 442,8}{2} + \frac{102,5}{2} \text{ mm}$ $b_{we} = 294,8 \text{ mm}$</p> <p>k) Comprimento da viga para corte (L_c) $L_c = L_v + \frac{p}{2}$ $L_c = 12000 + 221,4 = 12221,4 \text{ mm}$ $L_c = 1,02 L_v \text{ (Ver Figura 114).}$</p> <p>l) Configuração final da viga Ver Figura 115.</p>

Padrão: Anglo-Saxão

Número de alvéolos (n) = 26

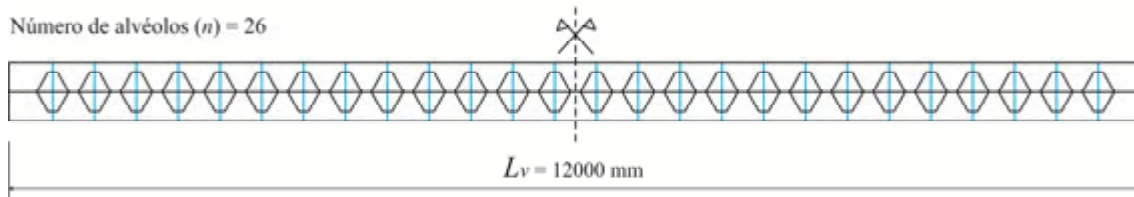


Figura 113 – Distribuição dos alvéolos em L_d para viga com padrão Anglo-Saxão com $L_v = 12000$ mm.

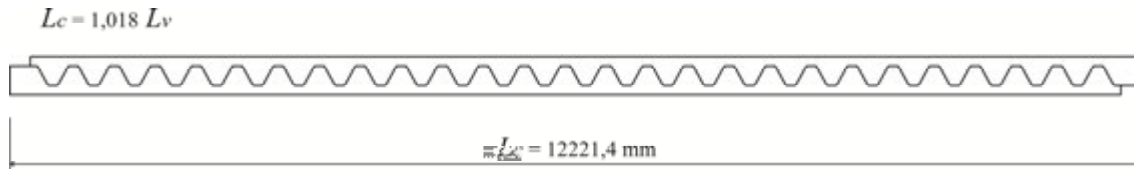


Figura 114 – Traçado de corte para viga com padrão Anglo-Saxão com $L_v = 12000$ mm.

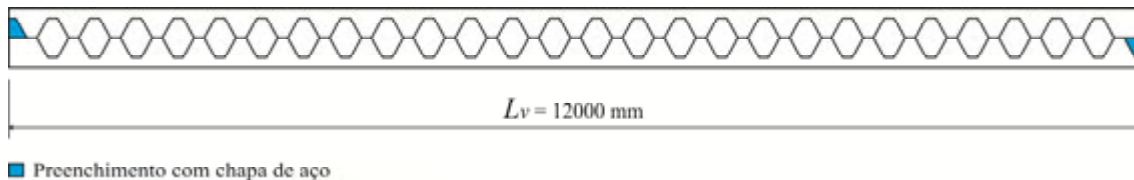


Figura 115 – Configuração final para viga com padrão Anglo-Saxão com $L_v = 12000$ mm.

6.4.1.2 Vigas casteladas para sistemas de cobertura

6.4.1.2.1 Viga castelada com eixo reto

Os sistemas de cobertura diferem dos sistemas de piso na relação vão/altura (L/d). Para os sistemas de cobertura foi utilizada a relação vão/altura igual a 25.

Para vigas casteladas com razão de expansão $k = 1,5$ o perfil original é definido a partir da relação $L/37,5$ apresentada na Eq. (23).

Sistema de aplicação: Cobertura	Tipologia/ padrão: Castelada/ Litzka
<p>a) Vão de projeto (L_v) $L_v = 20 \text{ m}$</p> <p>b) Razão de expansão (k) $k = 1,5$</p> <p>c) Altura do perfil original (d) $d \cong \frac{L}{25} \times \frac{1}{1,5} = \frac{L_v}{37,5}$ Assim, $d \cong \frac{L_v}{37,5} = 533,3 \text{ mm}$ Valor mais próximo disponível no catálogo de perfis laminados Gerdau Açominas. $d = 530 \text{ mm}$</p> <p>d) Altura do perfil alveolar (d_g) $d_g = k d = 1,5 \times 530 = 795 \text{ mm}$</p> <p>e) Parâmetros geométricos $p = 1,7322d = 918,1 \text{ mm}$ $b_w = 0,5774d = 306,0 \text{ mm}$ $a_0 = 1,155d = 612,0 \text{ mm}$ $b = \frac{b_w}{2} = 153,0 \text{ mm}$</p> <p>f) Largura mínima do montante de extremidade ($b_{we \text{ min}}$) $b_{we \text{ min}} \geq \begin{cases} 102 \text{ mm} \\ b_w \end{cases}$ Opção mais conservadora para este caso: $b_{we \text{ min}} = 306,0 \text{ mm}$</p>	<p>g) Comprimento útil para distribuição dos alvéolos (L_d) $L_d \leq L_v - 2 \left(b_{we \text{ min}} - \frac{b_w}{2} \right)$ $L_d \leq 20000 - 2 \left(306,0 - \frac{306,0}{2} \right) \text{ mm}$ $L_d \leq 19694,0 \text{ mm}$</p> <p>h) Número de alvéolos (n) $n = \text{INT} \left(\frac{L_d}{p} \right)$ $n = \text{INT} \left(\frac{19694,0}{918,1} \right) = \text{INT}(21,5) = 21$</p> <p>i) Distribuição dos alvéolos em L_d Número ímpar de alvéolos: centro do alvéolo no centro da viga (Figura 116).</p> <p>j) Largura final do montante de extremidade (b_{we}) $b_{we} = \frac{L_v - n \times p}{2} + \frac{b_w}{2}$ $b_{we} = \frac{20000 - 21 \times 918,066}{2} + \frac{306,022}{2} \text{ mm}$ $b_{we} = 513,3 \text{ mm}$</p> <p>k) Comprimento da viga para corte (L_c) $L_c = L_v + \frac{p}{2}$ $L_c = 20000 + 459,0 = 20459,0 \text{ mm}$ $L_c = 1,02 L_v \quad (\text{Ver Figura 117}).$</p> <p>l) Configuração final da viga Ver Figura 118.</p>

Padrão: Litzka

Número de alvéolos (n) = 21

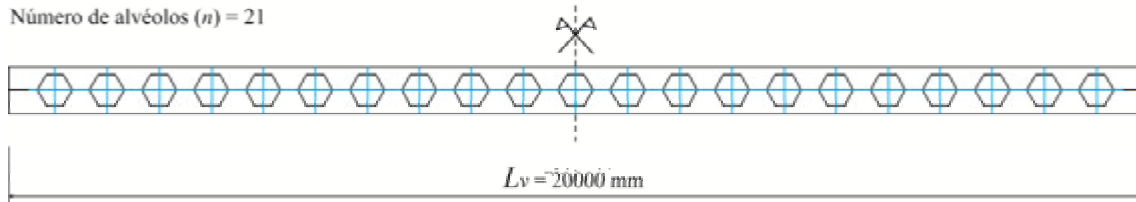


Figura 116 – Distribuição dos alvéolos em L_d para viga com padrão Litzka com $L_v = 20000$ mm.

$$L_c = 1,023 L_v$$

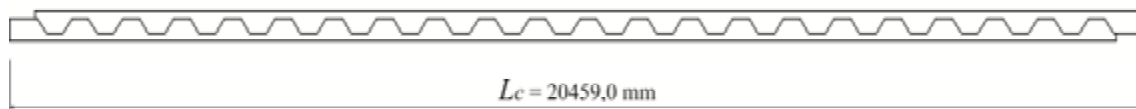


Figura 117 – Traçado de corte para viga com padrão Litzka com $L_v = 20000$ mm.

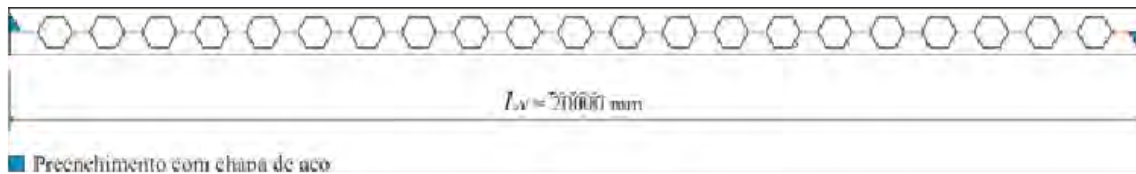


Figura 118 – Configuração final para viga com padrão Litzka com $L_v = 20000$ mm.

Sistema de aplicação: Cobertura	Tipologia/ padrão: Castelada/ Peiner
<p>a) Vão de projeto (L_v) $L_v = 20 \text{ m}$</p> <p>b) Razão de expansão (k) $k = 1,5$</p> <p>c) Altura do perfil original (d) $d \cong \frac{L}{25} \times \frac{1}{1,5} = \frac{L_v}{37,5}$ Assim: $d \cong \frac{L_v}{30} = 533,3 \text{ mm}$ Valor mais próximo disponível no catálogo de perfis laminados Gerdau Açominas. $d = 530 \text{ mm}$</p> <p>d) Altura do perfil alveolar (d_g) $d_g = k d = 1,5 \times 410 = 795 \text{ mm}$</p> <p>e) Parâmetros geométricos $p = 1,5d = 795,0 \text{ mm}$ $b_w = 0,5d = 265,0 \text{ mm}$ $a_0 = d = 530,0 \text{ mm}$ $b = \frac{b_w}{2} = 132,5 \text{ mm}$</p> <p>f) Largura mínima do montante de extremidade ($b_{we \text{ min}}$) $b_{we \text{ min}} \geq \begin{cases} 102 \text{ mm} \\ b_w \end{cases}$ Opção mais conservadora para este caso: $b_{we \text{ min}} = 265,0 \text{ mm}$</p>	<p>g) Comprimento útil para distribuição dos alvéolos (L_d) $L_d \leq L_v - 2 \left(b_{we \text{ min}} - \frac{b_w}{2} \right)$ $L_d \leq 12000 - 2 \left(265,0 - \frac{265,0}{2} \right) \text{ mm}$ $L_d \leq 19735,0 \text{ mm}$</p> <p>h) Número de alvéolos (n) $n = \text{INT} \left(\frac{L_d}{p} \right)$ $n = \text{INT} \left(\frac{19735,0}{795,0} \right) = \text{INT}(24,8) = 24$</p> <p>i) Distribuição dos alvéolos em L_d Número par de alvéolos: centro do montante no centro da viga (Figura 119).</p> <p>j) Largura final do montante de extremidade (b_{we}) $b_{we} = \frac{L_v - n \times p}{2} + \frac{b_w}{2}$ $b_{we} = \frac{20000 - 24 \times 795}{2} + \frac{265}{2} \text{ mm}$ $b_{we} = 592,5 \text{ mm}$</p> <p>k) Comprimento da viga para corte (L_c) $L_c = L_v + \frac{p}{2}$ $L_c = 20000 + 397,5 = 20397,5 \text{ mm}$ $L_c = 1,02 L_v \text{ (Ver Figura 120).}$</p> <p>l) Configuração final da viga Ver Figura 121.</p>

Padrão: Peiner

Número de alvéolos (n) = 24

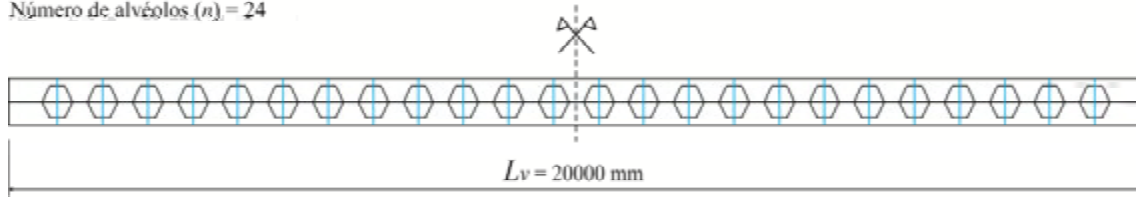


Figura 119 – Distribuição dos alvéolos em L_d para viga com padrão Peiner com $L_v = 20000$ mm.

$$L_c = 1,02 L_v$$

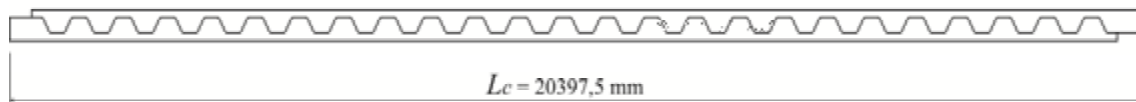
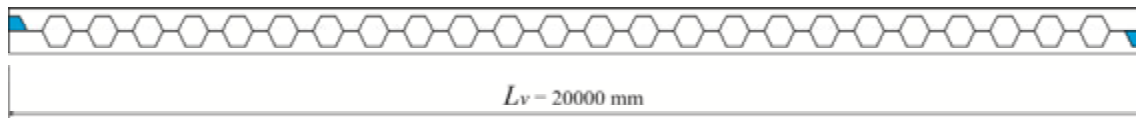


Figura 120 – Traçado de corte para viga com padrão Peiner com $L_v = 20000$ mm.



■ Preenchimento com chapa de aço

Figura 121 – Configuração final para viga com padrão Peiner com $L_v = 20000$ mm.

Sistema de aplicação: Cobertura	Tipologia/ padrão: Castelada/ Anglo-Saxão
<p>a) Vão de projeto (L_v) $L_v = 20 \text{ m}$</p> <p>b) Razão de expansão (k) $k = 1,5$</p> <p>c) Altura do perfil original (d) $d \cong \frac{L}{25} \times \frac{1}{1,5} = \frac{L_v}{37,5}$ Assim: $d \cong \frac{L_v}{30} = 533,3 \text{ mm}$ Valor mais próximo disponível no catálogo de perfis laminados Gerdau Açominas. $d = 530 \text{ mm}$</p> <p>d) Altura do perfil alveolar (d_g) $d_g = 1,5 \times 530 = 795 \text{ mm}$</p> <p>e) Parâmetros geométricos $p = 1,08d = 572,4 \text{ mm}$ $b_w = 0,25d = 132,5 \text{ mm}$ $a_0 = 0,83d = 439,9 \text{ mm}$ $b = 0,29d = 153,7 \text{ mm}$</p> <p>f) Largura mínima do montante de extremidade ($b_{we \text{ min}}$) $b_{we \text{ min}} \geq \begin{cases} 102 \text{ mm} \\ b_w \end{cases}$ Opção mais conservadora para este caso: $b_{we \text{ min}} = 132,5 \text{ mm}$</p>	<p>g) Comprimento útil para distribuição dos alvéolos (L_d) $L_d \leq L_v - 2 \left(b_{we \text{ min}} - \frac{b_w}{2} \right)$ $L_d \leq 20000 - 2 \left(132,5 - \frac{132,5}{2} \right) \text{ mm}$ $L_d \leq 19867,5 \text{ mm}$</p> <p>h) Número de alvéolos (n) $n = \text{INT} \left(\frac{L_d}{p} \right)$ $n = \text{INT} \left(\frac{19867,5}{572,4} \right) = \text{INT}(34,7) = 34$</p> <p>i) Distribuição dos alvéolos em L_d Número par de alvéolos: centro do montante no centro da viga (Figura 122).</p> <p>j) Largura final do montante de extremidade (b_{we}) $b_{we} = \frac{L_v - n \times p}{2} + \frac{b_w}{2}$ $b_{we} = \frac{20000 - 34 \times 572,4}{2} + \frac{132,5}{2} \text{ mm}$ $b_{we} = 335,4 \text{ mm}$</p> <p>k) Comprimento da viga para corte (L_c) $L_c = L_v + \frac{p}{2}$ $L_c = 20000 + 286,2 = 20286,2 \text{ mm}$ $L_c = 1,01 L_v \text{ (Ver Figura 123).}$</p> <p>l) Configuração final da viga Ver Figura 124.</p>

Padrão: Anglo_Saxão

Número de alvéolos (n) = 34

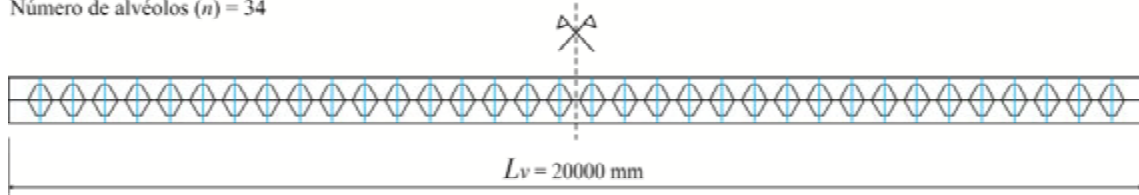


Figura 122 – Distribuição dos alvéolos em L_d para viga com padrão Anglo-Saxão com $L_V = 20000$ mm.

$$L_c = 1,014 L_V$$

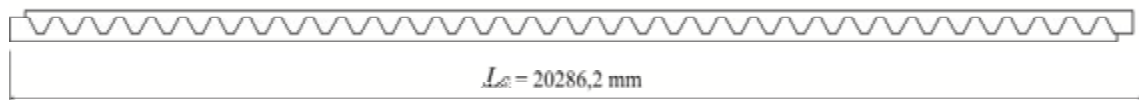
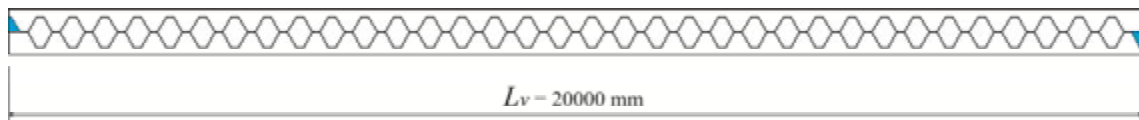


Figura 123 – Traçado de corte para viga com padrão Anglo-Saxão com $L_V = 20000$ mm.



■ Preenchimento com chapa de aço

Figura 124 – Configuração final para viga com padrão Anglo-Saxão com $L_V = 20000$ mm.

6.4.1.2.2 Viga castelada com eixo curvo

O procedimento para definição da geometria da viga com eixo curvo é semelhante ao procedimento para vigas aplicadas em sistemas de cobertura. É acrescido, porém, de variáveis relacionadas às características da seção da viga e à distorção aplicada na geometria das metades inferior e superior do alvéolo para que, após a curvatura, o alvéolo final apresente configuração de acordo com o padrão de castelação pretendido.

A composição geométrica das vigas casteladas de eixo curvo é baseada no comprimento dos arcos descritos pelo centróide da viga alveolar (C), e pelos centróides dos tês inferior (C_i) e superior (C_s). Na Figura 125 ilustra-se a posição dos centróides na seção do perfil alveolar e na conformação da viga curva.

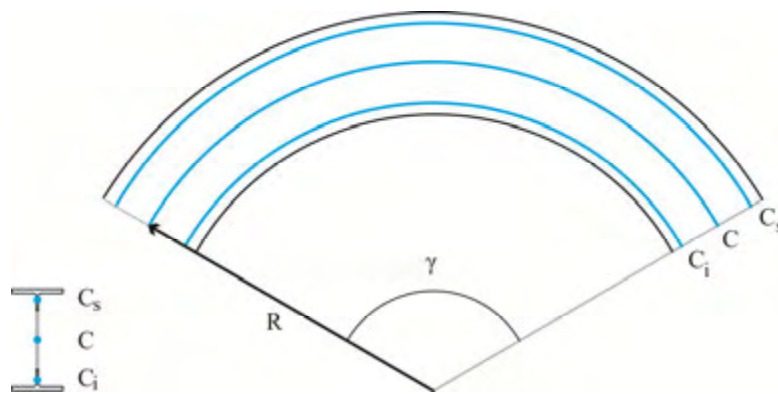


Figura 125 – Posição esquemática dos centróides na seção do perfil alveolar e na conformação da viga curva.

A aplicação do procedimento proposto foi desenvolvida em função do comprimento do vão de projeto (L_v) e da flecha (f) relacionada com o arco em questão (Figura 126).

$$\text{arc} = f(L, f) \quad (57)$$

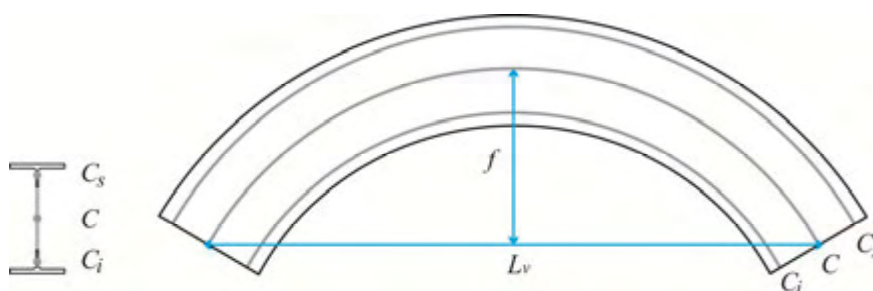


Figura 126 – Vão de projeto (L_v) e flecha (f) associada numa viga alveolar com eixo curvo.

O comprimento do eixo centroidal do t \hat{e} superior da viga alveolar curva (C_s) \acute{e} definido em fun \tilde{c} o do raio referente ao eixo central (R) e da dist \tilde{a} ncia do C.G. do t \hat{e} ao eixo da viga (y_0). Ver Figura 127.

$$C_s = f (R + y_0) \quad (58)$$

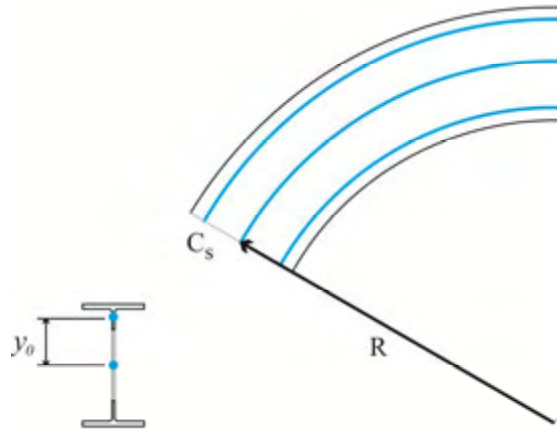


Figura 127 – Comprimento do eixo centroidal do t \hat{e} superior da viga alveolar curva (C_s), raio referente ao eixo central (R) e dist \tilde{a} ncia do C.G. do t \hat{e} ao eixo da viga (y_0).

O raio referente ao eixo central pode ser obtido por meio da Eq. (59):

$$R = \frac{f}{2} + \frac{L_v^2}{2R} \quad (59)$$

O raio referente eixo centroidal do t \hat{e} superior da viga alveolar curva \acute{e} ent \tilde{a} o dado por:

$$R_{inf} = R - y_0 \quad (60)$$

O \hat{a} ngulo γ \acute{e} calculado por meio da Equa \tilde{c} o :

$$\gamma = 2\arcsen\left(\frac{L_v}{2R}\right) \quad (61)$$

O comprimento do arco se relaciona com seu raio de curvatura e o \hat{a} ngulo interno em radianos, segundo a equa \tilde{c} o:

$$C = \gamma \times R \quad (62)$$

Na Figura 126, C_s \acute{e} o comprimento do eixo centroidal do t \hat{e} superior da viga, e C_i o do t \hat{e} inferior. A diferen \tilde{c} a entre o comprimento do eixo centroidal dos t \hat{e} s e o comprimento do eixo centroidal da viga pode ser escrita como:

$$\Delta C = C_s - C = C - C_i \quad (63)$$

Como a largura dos montantes não pode variar, a diferença de comprimento ΔC é distribuída na largura da projeção do lado inclinado do alvéolo. Como cada alvéolo tem dois lados inclinados, o acréscimo (na parte superior) e o decréscimo (na parte inferior) são dados pela Eq. (64), em que n é o número de alvéolos. Na Figura 128 ilustram-se as variações na largura da projeção horizontal do lado inclinado do alvéolo, b , no traçado geométrico das metades inferior e superior.

$$\Delta b = \frac{\Delta C}{2n} \quad (64)$$

Tem-se que (Figura 128):

$$\begin{aligned} b_s &= b + \Delta b \\ b_i &= b - \Delta b \end{aligned} \quad (65)$$

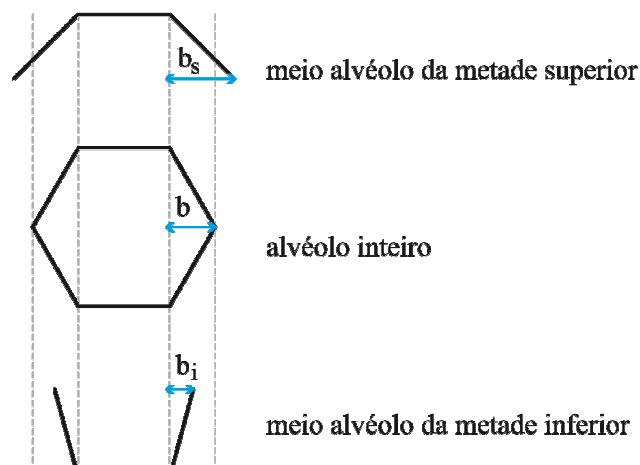


Figura 128 – Configuração dos alvéolos para fabricação de uma viga castelada de eixo curvo.

A seguir, apresenta-se um exemplo de aplicação do procedimento proposto para a definição da geometria de uma viga castelada de eixo curvo.

Sistema de aplicação: Cobertura	Tipologia/ padrão: Castelada/ Litzka
<p>a) Vão de projeto (L_v) e flecha (f) $L_v = 20 \text{ m}$ $f = 2 \text{ m}$</p> <p>b) Razão de expansão (k) $k = 1,5$</p> <p>c) Altura do perfil original (d) $d \cong \frac{L}{25} \times \frac{1}{1,5} = \frac{L_v}{37,5}$ Assim, $d \cong \frac{L_v}{37,5} = 533,3 \text{ mm}$ Valor mais próximo no catálogo de perfis laminados Gerdau Açominas. $d = 530 \text{ mm}$</p> <p>d) Altura do perfil alveolar (d_g) $d_g = k d = 1,5 \times 530 = 795 \text{ mm}$</p> <p>e) Parâmetros geométricos $p = 1,7322 d = 918,1 \text{ mm}$ $b_w = 0,5774 d = 306,0 \text{ mm}$ $a_o = 1,155 d = 612,0 \text{ mm}$ $b = \frac{b_w}{2} = 153,0 \text{ mm}$ $h_o = d = 530 \text{ mm}$ $h_t = \frac{d_g - h_o}{2} = 132,5 \text{ mm}$ $\bar{y} = \frac{b_f t_f^2 + h_t^2 t_w - t_f^2 t_w}{2(b_f t_f + h_t t_w - t_f t_w)}$ $y_o = \frac{h_o}{2} + h_t - \bar{y}$ $R = \frac{f}{2} + \frac{L_v^2}{8f} = 26,0 \text{ m}$ $R_{\text{inf}} = R - y_o = 25,626 \text{ m}$ $\gamma = 2 \arcsen \left(\frac{L_v}{2R} \right) = 0,79 \text{ rad}$</p>	<p>$C = R \gamma = 20529,1 \text{ mm}$ $C_s = (R + y_o) \gamma = 20843,0 \text{ mm}$ $C_i = (R - y_o) \gamma = 20215,3 \text{ mm}$ $\Delta C = C_s - C = 314 \text{ mm}$</p> <p>f) Largura mínima do montante de extremidade ($b_{we \text{ min}}$) $b_{we \text{ min}} \geq \begin{cases} 102 \text{ mm} \\ b_w \end{cases}$ Opção mais conservadora para este caso: $b_{we \text{ min}} = 306,0 \text{ mm}$</p> <p>g) Comprimento útil para distribuição dos alvéolos (C_d) $C_d \leq C - 2 \left(b_{we \text{ min}} - \frac{b_w}{2} \right)$ $C_d \leq 20223 \text{ mm}$</p> <p>h) Número de alvéolos (n) e Δb $n = \text{INT} \left(\frac{C_d}{p} \right) = \text{INT} \left(\frac{20223}{918,1} \right) = 22$ $\Delta b = \frac{\Delta C}{2n} = 7,14 \text{ mm}$</p> <p>i) Distribuição dos alvéolos em L_d Número par de alvéolos: centro do montante no centro da viga. (Figura 129).</p> <p>j) Largura final do montante de extremidade (b_{we}) $b_{we} = \frac{C - n \times p}{2} + \frac{b_w}{2}$ $b_{we} = 318,4 \text{ mm}$</p> <p>k) Comprimento da viga para corte (L_c) $L_{ci} = C_i + \frac{p}{2} = 20685,9 \text{ mm}$ (Figura 130). $L_{cs} = C_s + \frac{p}{2} + 2n(\Delta b) = 21290,2 \text{ mm}$</p> <p>l) Configuração final da viga (Figura 131).</p>

Padrão: Litzka

Número de alvéolos (n) = 22

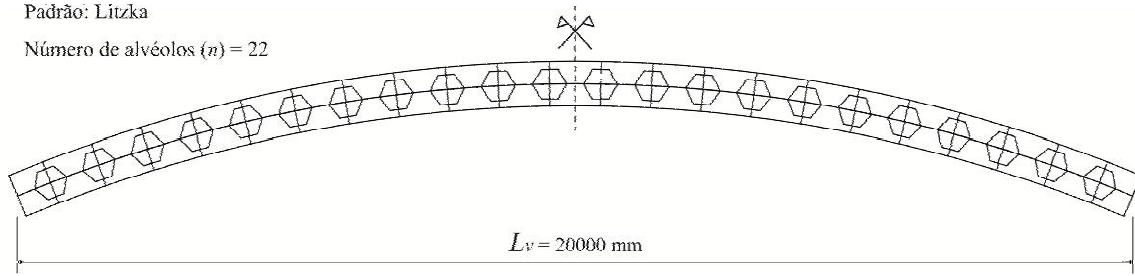
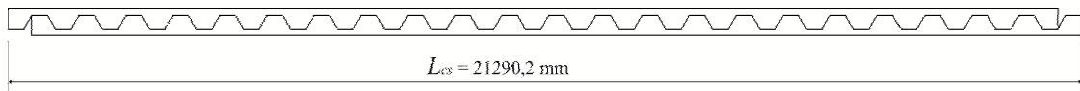


Figura 129 – Distribuição dos alvéolos em C_d para viga curva com $L_v = 20000$ mm e $f = 2000$ mm.

Metades superiores de duas vigas curvas



Metades inferiores de duas vigas curvas

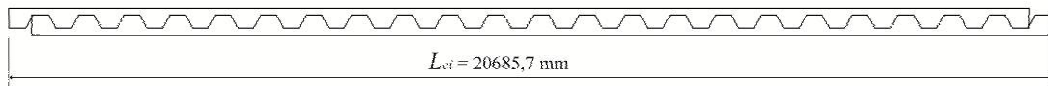


Figura 130 – Traçado de corte para viga curva com $L_v = 20000$ mm e $f = 2000$ mm.

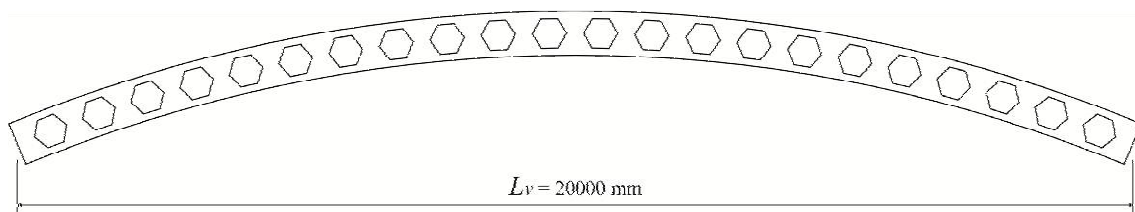


Figura 131 - Configuração final para viga curva com $L_v = 20000$ mm e $f = 2000$ mm.

6.4.2 Pré-dimensionamento de vigas celulares

Neste item são apresentados quatro exemplos para as vigas celulares. Os dois primeiros para sistemas de piso e os seguintes em sistemas de cobertura.

As aplicações exemplificadas neste trabalho são resultado das combinações limites para vigas celulares, conforme indicado na Tabela 6 para sistema de piso, e na Tabela 7 para sistema de cobertura.

Tabela 6 – Relações limites para vigas celulares adequadas para sistemas de piso.

Sistema de Piso		
k	1,3	1,4
D_o/d	0,8	1,1
p/D_o	1,2	1,6

Tabela 7 – Relações limites para vigas celulares adequadas para sistemas de cobertura.

Sistema de Cobertura		
k	1,4	1,6
D_o/d	1,0	1,3
p/D_o	1,1	1,3

6.4.2.1 Vigas celulares para sistemas de piso

O exemplo a seguir apresenta os parâmetros geométricos de vigas celulares aplicadas a sistemas de piso Figura 132.

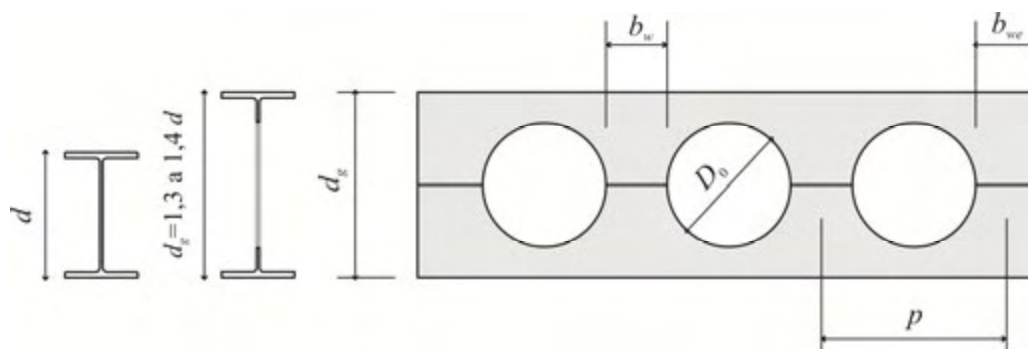


Figura 132 – Parâmetros geométricos de vigas celulares aplicadas a sistemas de piso.

Sistema de aplicação: Piso	Tipologia: Celular $k=1,3$; $D_0=0,8h_0$; $p=1,2D_0$
<p>a) Vão de projeto (L_v) $L_v = 12 \text{ m}$</p> <p>b) Razão de expansão (k) $k = 1,3$</p> <p>c) Altura do perfil original (d) $d \cong \frac{L}{20} \times \frac{1}{1,3} = \frac{L_v}{26}$ Assim: $d \cong \frac{L_v}{26} = 461,5 \text{ mm}$ Valor mais próximo disponível no catálogo de perfis laminados Gerdau Açominas. $d = 460 \text{ mm}$</p> <p>d) Altura do perfil alveolar (d_g) $d_g = k d = 1,3 \times 460 = 598 \text{ mm}$</p> <p>e) Parâmetros geométricos $D_0 = 0,8d = 368,0 \text{ mm}$ $p = 1,2D_0 = 441,6 \text{ mm}$ $b_w = p - D_0 = 73,6 \text{ mm}$</p> <p>f) Largura mínima do montante de extremidade ($b_{we \text{ min}}$) $b_{we \text{ min}} \geq p - \frac{D_0}{2}$ $b_{we \text{ min}} \geq 441,6 - \frac{368,0}{2} = 257,6 \text{ mm}$ Verificação das larguras mínima e máxima para os montantes de extremidade segundo as Eqs. (54) e (55): Ok!</p>	<p>g) Comprimento útil para distribuição dos alvéolos (L_d) $L_d \leq L_v - 2 \times b_{we \text{ min}} + b_w$ $L_d \leq L_v - 2 \times 257,6 + 73,6 \text{ mm}$ $L_d \leq 11558,4 \text{ mm}$</p> <p>h) Número de alvéolos (n) $n = \text{INT} \left(\frac{L_d}{p} \right) = \text{INT} \left(\frac{11558,4}{441,6} \right) = 26$</p> <p>i) Distribuição dos alvéolos em L_d Número par de alvéolos: centro do montante no centro da viga (Figura 133).</p> <p>j) Largura final do montante de extremidade (b_{we}) $b_{we} = \frac{L_v - n \times p}{2} + \frac{b_w}{2}$ $b_{we} = \frac{12000 - 26 \times 441,6}{2} + \frac{73,6}{2} \text{ mm}$ $b_{we} = 296,0 \text{ mm}$</p> <p>k) Comprimento da viga para corte (L_c) $L_c = L_v + \frac{p}{2}$ $L_c = 12000 + 220,8 = 12220,8 \text{ mm}$ $L_c = 1,02 L_v$ Ver Figura 134.</p> <p>l) Configuração final da viga Ver Figura 135.</p>

Número de alvéolos (n) = 26

$k = 1,3$

$D_s = 0,8h_s$

$p = 1,2D_s$

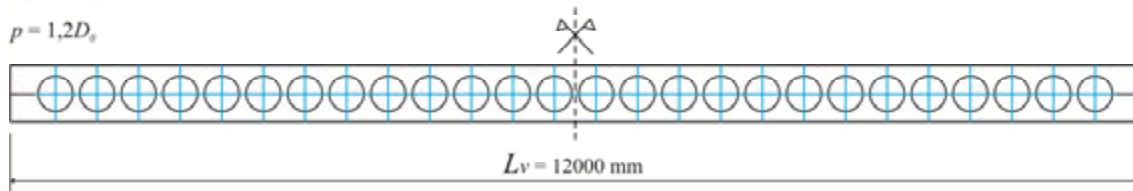


Figura 133 – Distribuição dos alvéolos em L_d para viga celular aplicada a sistemas de piso com $k = 1,3$ e $L_v = 12000$ mm.

$L_c = 1,018 L_v$

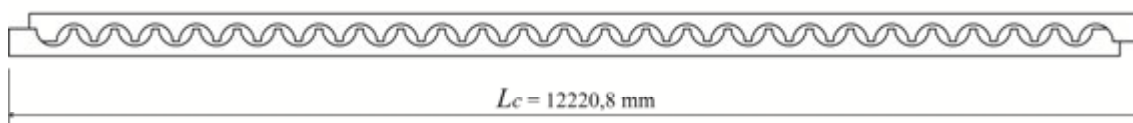
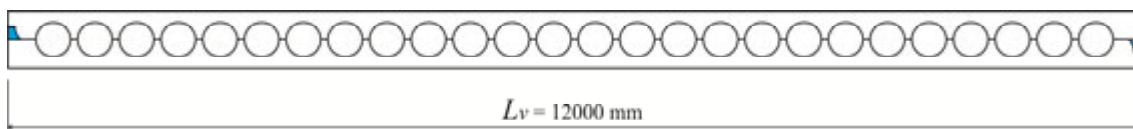


Figura 134 – Traçado de corte para viga celular aplicada a piso com $k = 1,3$ e $L_v = 12000$ mm.



■ Preenchimento com chapa de aço

Figura 135 – Configuração final para viga celular aplicada a sistemas de piso com $k = 1,3$ e $L_v = 12000$ mm.

Sistema de aplicação: Piso	Tipologia: $k=1,4$; $D_0=1,1h_0$; $p=1,6D_0$
<p>a) Vão de projeto (L_v) $L_v = 12 \text{ m}$</p> <p>b) Razão de expansão (k) $k = 1,4$</p> <p>c) Altura do perfil original (d) $d \cong \frac{L}{20} \times \frac{1}{1,4} = \frac{L_v}{28}$ Assim: $d \cong \frac{L_v}{28} = 428,571 \text{ mm}$ Valor mais próximo disponível no catálogo de perfis laminados Gerdau Açominas. $d = 410 \text{ mm}$</p> <p>d) Altura do perfil alveolar (d_g) $d_g = k d = 1,4 \times 410 = 574 \text{ mm}$</p> <p>e) Parâmetros geométricos $D_o = 1,1d = 451,0 \text{ mm}$ $p = 1,6D_o = 721,6 \text{ mm}$ $b_w = p - D_o = 270,6 \text{ mm}$</p> <p>f) Largura mínima do montante de extremidade ($b_{we \text{ min}}$) $b_{we \text{ min}} \geq p - \frac{D_o}{2}$ $b_{we \text{ min}} \geq 721,6 - \frac{451,0}{2} = 496,1 \text{ mm}$ Verificação das larguras mínima e máxima para os montantes de extremidade segundo as Eqs. (54) e (55): Ok!</p>	<p>g) Comprimento útil para distribuição dos alvéolos (L_d) $L_d \leq L_v - 2 \times b_{we \text{ min}} + b_w$ $L_d \leq L_v - 2 \times 496,1 + 270,6 \text{ mm}$ $L_d \leq 11278,4 \text{ mm}$</p> <p>h) Número de alvéolos (n) $n = \text{INT} \left(\frac{L_d}{p} \right) = \text{INT} \left(\frac{11278,4}{721,6} \right) = 15$</p> <p>i) Distribuição dos alvéolos em L_d Número ímpar de alvéolos: centro do alvéolo no centro da viga (Figura 136).</p> <p>j) Largura final do montante de extremidade (b_{we}) $b_{we} = \frac{L_v - n \times p}{2} + \frac{b_w}{2}$ $b_{we} = \frac{12000 - 15 \times 721,6}{2} + \frac{270,6}{2} \text{ mm}$ $b_{we} = 723,3 \text{ mm}$</p> <p>k) Comprimento da viga para corte (L_c) $L_c = L_v + \frac{p}{2}$ $L_c = 12000 + 360,8 = 12360,8 \text{ mm}$ $L_c = 1,03 L_v \text{ (Ver Figura 137).}$</p> <p>l) Configuração final da viga Ver Figura 138.</p>

Número de alvéolos (n) = 15

$k = 1,4$

$D_0 = 1,1h_0$

$p = 1,6D_0$

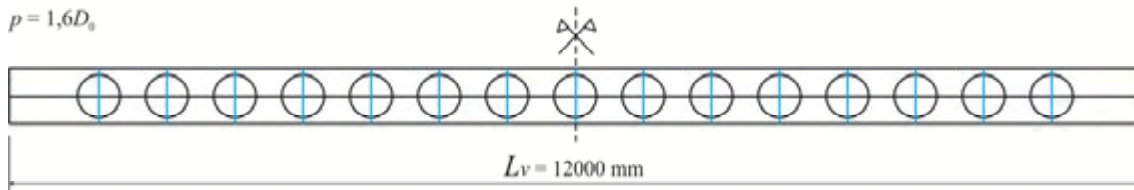


Figura 136 – Distribuição dos alvéolos em L_d para viga celular aplicada a sistemas de piso, com $k = 1,4$ e $L_v = 12000$ mm.

$L_c = 1,03 L_v$

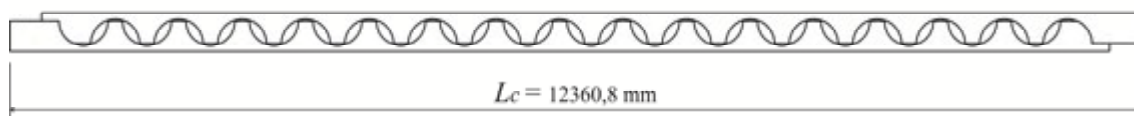
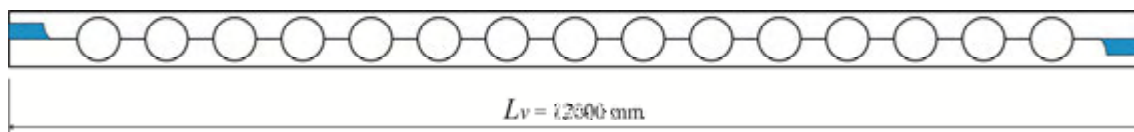


Figura 137 – Traçado de corte para viga aplicada a sistemas de piso com $k = 1,4$ e $L_v = 12000$ mm.



■ Preenchimento com chapa de aço

Figura 138 – Configuração final para viga celular aplicada a sistemas de piso com $k = 1,4$ e $L_v = 12000$ mm.

6.4.2.2 Vigas celulares para sistemas de cobertura

Na Figura 139 são ilustrados os parâmetros geométricos de vigas celulares com vistas à aplicação em sistemas de cobertura.

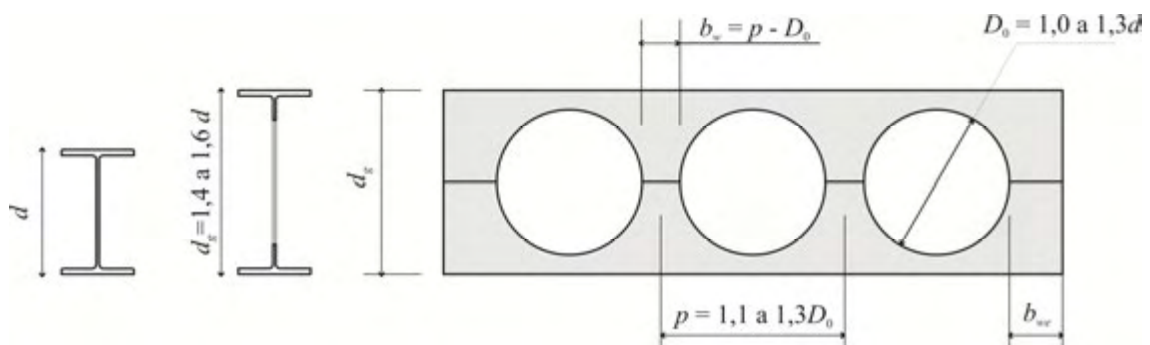


Figura 139 – Parâmetros geométricos de vigas celulares aplicadas a sistemas de cobertura.

Sistema de aplicação: Cobertura	Tipologia: Celular $k=1,4$; $D_0=1,0h_0$; $p=1,1D_0$
<p>a) Vão de projeto (L_v) $L_v = 17 \text{ m}$</p> <p>b) Razão de expansão (k) $k = 1,4$</p> <p>c) Altura do perfil original (d) $d \cong \frac{L}{20} \times \frac{1}{1,4} = \frac{L_v}{28}$ Assim: $d \cong \frac{L_v}{28} = 607,1 \text{ mm}$ Valor mais próximo disponível no catálogo de perfis laminados Gerdau Açominas. $d = 610 \text{ mm}$</p> <p>d) Altura do perfil alveolar (d_g) $d_g = k d = 1,4 \times 610 = 854 \text{ mm}$</p> <p>e) Parâmetros geométricos $D_o = 1,0d = 610,0 \text{ mm}$ $p = 1,1D_o = 671,0 \text{ mm}$ $b_w = p - D_o = 61,0 \text{ mm}$</p> <p>f) Largura mínima do montante de extremidade ($b_{we \text{ min}}$) $b_{we \text{ min}} \geq p - \frac{D_o}{2}$ $b_{we \text{ min}} \geq 671 - \frac{610}{2} = 366,0 \text{ mm}$ Verificação das larguras mínima e máxima para os montantes de extremidade segundo as Eqs. (54) e (55): Ok!</p>	<p>g) Comprimento útil para distribuição dos alvéolos (L_d) $L_d \leq L_v - 2 \times b_{we \text{ min}} + b_w$ $L_d \leq 17000 - 2 \times 366,0 + 61,0 \text{ mm}$ $L_d \leq 16329,0 \text{ mm}$</p> <p>h) Número de alvéolos (n) $n = \text{INT} \left(\frac{L_d}{p} \right) = \text{INT} \left(\frac{16329,0}{671,0} \right) = 24$</p> <p>i) Distribuição dos alvéolos em L_d Número par de alvéolos: centro do montante no centro da viga (Figura 140).</p> <p>j) Largura final do montante de extremidade (b_{we}) $b_{we} = \frac{L_v - n \times p}{2} + \frac{b_w}{2}$ $b_{we} = \frac{17000 - 24 \times 671,0}{2} + \frac{61}{2} \text{ mm}$ $b_{we} = 478,5 \text{ mm}$</p> <p>k) Comprimento da viga para corte (L_c) $L_c = L_v + \frac{p}{2}$ $L_c = 12000 + 335,5 = 12335,5 \text{ mm}$ $L_c = 1,02 L_v$ Ver Figura 141.</p> <p>l) Configuração final da viga Ver Figura 142.</p>

Número de alvéolos (n) = 24

$k = 1,4$

$D_0 = 1,0d$

$p = 1,1D_0$

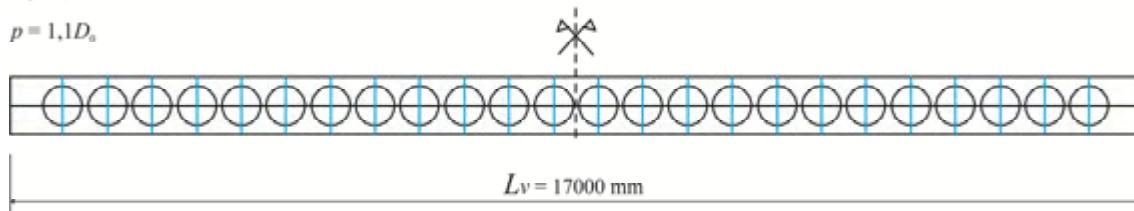


Figura 140 – Distribuição dos alvéolos em L_d para viga celular aplicada a sistemas de cobertura com $k = 1,4$ e $L_v = 17000$ mm.

$L_c = 1,02 L_v$

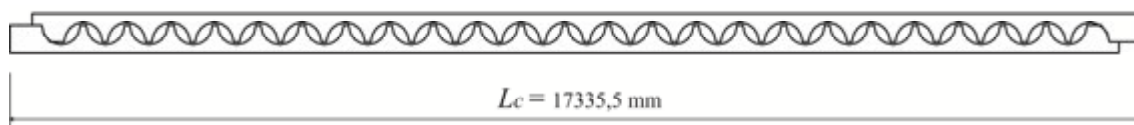
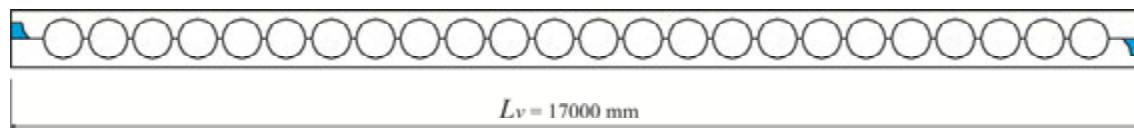


Figura 141 – Traçado de corte para viga celular aplicada a sistemas de cobertura com $k = 1,4$ e $L_v = 17000$ mm.



■ Preenchimento com chapa de aço

Figura 142 – Configuração final para viga celular aplicada a sistemas de cobertura com $k = 1,4$ e $L_v = 17000$ mm.

Sistema de aplicação: Cobertura	Tipologia: Celular $k=1,6$; $D_0=1,3h_0$; $p=1,3D_0$
<p>a) Vão de projeto (L_v) $L_v = 18 \text{ m}$</p> <p>b) Razão de expansão (k) $k = 1,6$</p> <p>c) Altura do perfil original (d) $d \cong \frac{L}{20} \times \frac{1}{1,6} = \frac{L_v}{32}$ Assim: $d \cong \frac{L_v}{32} = 562,5 \text{ mm}$ Valor mais próximo disponível no catálogo de perfis laminados Gerdau Açominas. $d = 530 \text{ mm}$</p> <p>d) Altura do perfil alveolar (d_g) $d_g = k d = 1,6 \times 530 = 848 \text{ mm}$</p> <p>e) Parâmetros geométricos $D_0 = 1,3d = 689,0 \text{ mm}$ $p = 1,3D_0 = 895,7 \text{ mm}$ $b_w = p - D_0 = 206,7 \text{ mm}$</p> <p>f) Largura mínima do montante de extremidade ($b_{we \text{ min}}$) $b_{we \text{ min}} \geq p - \frac{D_0}{2}$ $b_{we \text{ min}} \geq 895,7 - \frac{689}{2} = 551,2 \text{ mm}$ Verificação das larguras mínima e máxima para os montantes de extremidade segundo as Eqs. (54) e (55): Ok!</p>	<p>g) Comprimento útil para distribuição dos alvéolos (L_d) $L_d \leq L_v - 2 \times b_{we \text{ min}} + b_w$ $L_d \leq L_v - 2 \times 551,2 + 206,7 \text{ mm}$ $L_d \leq 17104,3 \text{ mm}$</p> <p>h) Número de alvéolos (n) $n = \text{INT} \left(\frac{L_d}{p} \right) = \text{INT} \left(\frac{17104,3}{895,7} \right) = 19$</p> <p>i) Distribuição dos alvéolos em L_d Número ímpar de alvéolos: centro do alvéolo no centro da viga (Figura 143).</p> <p>j) Largura final do montante de extremidade (b_{we}) $b_{we} = \frac{L_v - n \times p}{2} + \frac{b_w}{2}$ $b_{we} = \frac{18000 - 19 \times 895,7}{2} + \frac{206,7}{2} \text{ mm}$ $b_{we} = 594,2 \text{ mm}$</p> <p>k) Comprimento da viga para corte (L_c) $L_c = L_v + \frac{p}{2}$ $L_c = 18000 + 447,9 = 18447,9 \text{ mm}$ $L_c = 1,02 L_v$ Ver Figura 144.</p> <p>l) Configuração final da viga Ver Figura 145.</p>

Número de alvéolos (n) = 19

$k = 1,6$

$D_0 = 1,3d$

$p = 1,3D_0$

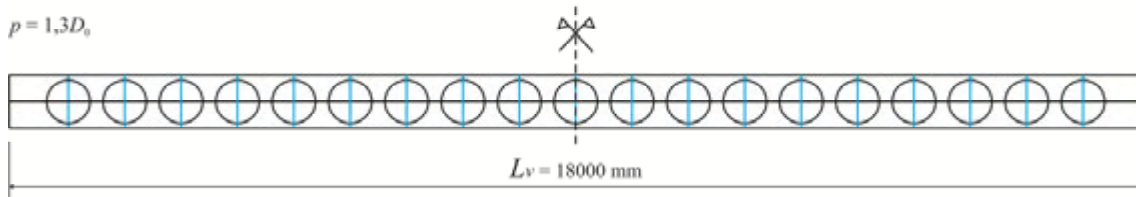


Figura 143 – Distribuição dos alvéolos em L_d para viga celular aplicada a sistemas de cobertura com $k = 1,6$ e $L_v = 18000$ mm.

$L_c = 1,025 L_v$

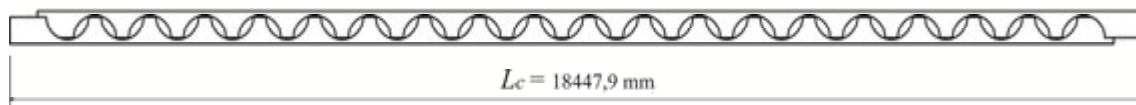
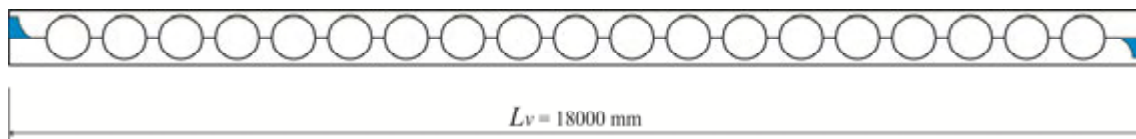


Figura 144 – Traçado de corte para viga celular aplicada a sistemas de cobertura com $k = 1,6$ e $L_v = 18000$ mm.



■ Preenchimento com chapa de aço

Figura 145 – Configuração final para viga celular aplicada a sistemas de cobertura com $k = 1,6$ e $L_v = 18000$ mm.

7

Conclusões

7.1 Conclusões gerais

Durante a etapa de revisão de literatura verificou-se que a maior parte dos artigos técnicos sobre vigas alveolares está relacionada ao seu comportamento estrutural. Embora a abordagem recorrente seja de extrema importância para o domínio e o uso dessas vigas, observa-se que as discussões relacionadas à geometria e à aplicação podem contribuir para elaboração de um conjunto de estratégias que possibilitam o uso destas vigas com os perfis laminados no Brasil.

Ao investigar os padrões geométricos, constata-se que determinados padrões foram consagrados pelo uso na Europa e nos Estados Unidos, e que as propriedades geométricas e a nomenclatura correta desses padrões precisam ser fixadas com maior clareza no mercado brasileiro, como forma de padronizar a comunicação entre projetistas e a indústria.

O estudo de caso do processo de fabricação da viga alveolar na CPC Estruturas, em Brasília, evidenciou a necessidade de adequação por parte das empresas brasileiras em geral, adotando equipamentos automatizados que diminuam o emprego da mão de obra direta na fabricação, como alternativa para desonerar o custo dessas vigas, tornando-as mais competitivas. Embora as vigas alveolares representem economia de aço, sua fabricação envolve custos adicionais em relação ao perfil de alma cheia.

A investigação acerca das aplicações das vigas alveolares em sistemas de piso e de cobertura demonstra que, na maior parte dos casos, essas vigas são aplicadas em grandes vãos de projeto. Nos grandes vãos, tira-se maior proveito do custo benefício do aumento da altura da seção da viga alveolar, que a torna mais resistente e menos sensível a deformações. As vigas mais altas apresentam maior momento de inércia em

relação ao plano de flexão, podendo receber cargas de 10% a 50% maiores e/ou atingir vãos livres mais extensos atendendo aos limites de deslocamento máximo admissível, sem acréscimo de aço.

Um importante critério que demanda perfis com maior altura é o deslocamento máximo admissível para as vigas, estabelecido pelas normas técnicas para estruturas de aço. No Brasil, aplicando-se o método de cálculo estabelecido pela ABNT NBR 8800:2008 (Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios), muitas vezes o dimensionamento de peças submetidas à flexão é condicionado por limitações de flecha. Nesses casos, os perfis metálicos de alma cheia trabalham sob tensões relativamente baixas, o que pressupõe um desperdício de material. Como as flechas são inversamente proporcionais à inércia da seção, a forma mais econômica de aumentar a inércia, e assim reduzir as deformações, é aumentar a altura do perfil sem acrescentar sua massa. O aumento da inércia do perfil alveolar, comparado ao perfil de alma cheia original, representa, portanto, uma redução da flecha de peças submetidas à flexão com melhores taxas de consumo de aço.

Uma evidência identificada no estudo das aplicações das vigas alveolares é que existe outro fator para a escolha da viga alveolar que independe dos custos: o apelo estético. Observa-se uma preferência de mercado por utilizar as vigas alveolares ou até as vigas com furos, pela intenção em explorar o efeito visual que essas vigas provocam no ambiente.

Outra tendência observada em projetos arquitetônicos com vigas alveolares é sua aplicação na requalificação ou modernização de edifícios antigos, onde se tem a intenção de preservar o patrimônio arquitetônico. Sua escolha geralmente se deve à leveza visual, que provoca uma interferência menos brusca entre a estrutura nova e a antiga.

7.2 Conclusões sobre os procedimentos propostos

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver procedimentos para definição das características geométricas de vigas alveolares para sistemas de piso e de cobertura.

O procedimento para definir as características geométricas da viga alveolar é estabelecido em função dos parâmetros geométricos da viga e do vão de projeto. Inicialmente define-se se a viga será aplicada em sistema de cobertura ou de piso. Em ambos os casos, é preciso definir se a tipologia da viga é castelada ou celular.

A partir da definição prévia do tipo de aplicação (piso ou cobertura), da tipologia da viga e do vão de projeto arquitetônico, pode-se obter, por meio do procedimento proposto, os parâmetros geométricos necessários para obter a configuração final da viga no vão, bem como o traçado do corte no perfil original para sua fabricação.

O procedimento proposto neste trabalho constitui uma ferramenta útil para a escolha, definição e projeto de vigas alveolares de aço, auxiliando na tomada de decisões do projeto arquitetônico, no pré-dimensionamento estrutural e na orientação do processo de fabricação. Espera-se que ele contribua para a difusão do uso das vigas alveolares no cenário da construção metálica no Brasil.

7.3 Sugestões para trabalhos futuros

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram levantadas questões que demandam investigações importantes que não constituem o foco desta pesquisa, a citar:

- elaboração de ábacos de pré-dimensionamento para vigas alveolares com vistas à aplicação em sistemas de piso e de coberturas;
- realização de um estudo que aborde de forma abrangente as implicações do comportamento da viga alveolar mista nos parâmetros para pré-dimensionamento;
- desenvolvimento de um software para pré-dimensionamento das vigas alveolares em função não somente dos dados do projeto arquitetônico, mas também as informações relacionadas ao desempenho estrutural específico para os perfis laminados disponíveis no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

ABREU, L. M. P.; FAKURY, R. H.; CASTRO E SILVA, A. L. R. Determinação do momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas de aço celulares. **Mecânica Computacional**. Buenos Aires, Argentina, v. XXIX, n. 73, p. 7255-7271, 2010.

ARCELORMITTAL: Catálogo - Long Carbon Europe Sections and Merchant Bars. ACB® Vigas Alveolares. Disponível em: <www.arcelormittal.com/sections> acessado em 04/10/2011.

ARCELORMITTAL. Disponível em <<http://arcelormittal.com/sections>> acessado em 30/04/2012.

BAIÃO FILHO, O. T., SILVA, A. C. V. **Ligações para Estruturas de Aço**, Guia Prático para Estruturas com Perfis Laminados. 2ª Edição, Perfis Gerdau Açominas, 2010.

BEZERRA, E. M., FAKURY, R. H., SILVA, A. L. R. C., CALDAS, R. B.; **Bending moment resistance for lateral torsional buckling of castellated steel beams**, XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, San Juan, Argentina, 2010.

BLODGETT, O. W. **Welded Steel Structures**. James F. Lincoln Arc Welding Foundation, Cleveland, 1966.

BOYER, J. P. Castellated beams - New developments; **Engineering Journal American Institute of Steel Construction**, 1 (1964), pp.104-108.

BRITISH STANDARD (BS) 5950-1:2000. Structural Use of Steelwork in Building - Part 1: Code of Practice for Design – Rolled and Welded Sections. Incorporating Corrigendum No. 1.

CENTRO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO EM AÇO. Disponível em <<http://www.cbca-iabr.org.br>> acessado em 30/04/2012.

CMC STEEL PRODUCTS. Disponível em: <http://www.cmcsteelproducts.com> acessado em 30/04/2012.

CONSTRUCTALIA. Disponível em: <http://constructalia.com> acessado em 30/04/2012.

DEMIRDJIAN, S.; **Stability of castellated beam webs**, Master Thesis, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal, Canada (1999).

GALAMBOS, A. R., HOSAIN, M. U., SPEIRS, W. G. **Optimum expansion ratio of castellated steel beams**; International Symposium of Optimization in Civil Engineering, Liverpool; 1973.

GRÜNBAUER, J. <http://www.grunbauer.nl> acessado em 30/04/2012.

HARPER, C.S. **Design in steel 4: Castellated & cellular beams**, *British Steel Publications*, 1994.

HECHLER, O. *et al.* “**Investigations on beams with multiple regular web openings**”, Architectural Engineering Conference: USA: 2006.

KNOWLES, P.R. “**Castellated Beams - Structural and Building Board**”, Structural and Building Board, Proc. Instn. Civ. Engrs. Part 1, 1991, 90, June, pp. 521-536.

LITZKA, H. “**La production automatique de poutres a âme évidée de tous types et de toutes dimensions**”, *Acier-Stahl-Steel*, No.11; 1960.

LLEONART, J. M. Geometria de los perfiles alveolares, **Informes de La Construcción**, v. 40, 1988, p. 51-64

Patente de nº 3.066.394; Franz Litzka, dezembro de 1962.

Patente de nº 4894898; Peter A. Walker, janeiro de 1990.

Patente de nº WO 01/59229 A1; POTAGE, Alan, Vitor, agosto de 2001.

QUEIROZ, G. *Elementos das estruturas mistas aço-concreto*. Editora O Lutador; 2001.

SILVEIRA, E. G.; **Estudo de vigas alveolares com ênfase nos modos de colapso com formação de rótulas plásticas**, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UFV, Viçosa, 2011.

Steel SSalg Engineering Inc.; <http://www.steelssalg.com> acessado em 30/04/2012.

STREAM RICE CO., LTD. Cellular Beam (Thailand); <<http://www.streamrice.com/>> acessado em 30/04/2012.

TDB PROJETOS; <http://tdbprojetos.com.br> acessado em 30/04/2012.

Téchne, edição nº164. São Paulo: PINI Editora, 2010.

TOPRAC, A. A., COOKE, B. R.; “**An experimental investigation of open-web beams**”, Welding Research Council Bulletin Series, No.47; New York, 1959.

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. Registro FAPEMIG: TEC-APQ-01429-08. Registro UFV: 30157258412. Outubro de 2010.

VIEIRA, W. B. “**Simulação numérica do comportamento estrutural de vigas casteladas de aço com ênfase na flambagem do montante de alma**”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UFV, Viçosa, 2011.

WESTOK. <<http://www.westok.co.uk>> acessado em 30/04/2012.

Zaarour, W., Redwood, R.; Web buckling in thin-webbed castellated beams; Journal of Structural Engineering, Vol.122, No.8 (1996); paper 11030

APÊNDICE 1

O Apêndice 1 contém as planilhas utilizadas na aplicação dos critérios e procedimentos para pré-dimensionamento das vigas alveolares propostos. A partir dos dados contidos nas planilhas é possível gerar os desenhos virtuais da configuração final da viga alveolar e do traçado do corte no perfil de alma cheia.

Observações:

- As linhas em destaque correspondem aos exemplos aplicados no item 6.4.
- Nos casos em que $b_w \text{ min}$ e $b_w \text{ max}$ forem verificados como “*NÃO OK*”, deve-se alterar os parâmetros geométricos que definem a configuração final da viga alveolar, a começar pelo vão de projeto (L_v).

TIPOLOGIA CASTELADA

SISTEMA DE PISO

Padrão Litzka													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>p</i>	<i>bw</i>	<i>a0</i>	<i>b</i>	<i>bwe min</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
6000	200,0	200,0	300,0	346,4	115,5	230,9	57,7	115,5	5884,5	16	286,2	6173,2	1,03
7000	233,3	250,0	375,0	433,1	144,4	288,7	72,2	144,4	6855,7	15	324,3	7216,5	1,03
7500	250,0	250,0	375,0	433,1	144,4	288,7	72,2	144,4	7355,7	16	357,8	7716,5	1,03
8000	266,7	250,0	375,0	433,1	144,4	288,7	72,2	144,4	7855,7	18	174,7	8216,5	1,03
9000	300,0	310,0	465,0	537,0	179,0	358,0	89,5	179,0	8821,0	16	293,6	9268,5	1,03
10000	333,3	310,0	465,0	537,0	179,0	358,0	89,5	179,0	9821,0	18	256,7	10268,5	1,03
11000	366,7	360,0	540,0	623,6	207,9	415,7	103,9	207,9	10792,1	17	303,4	11311,8	1,03
12000	400,0	410,0	615,0	710,2	236,7	473,4	118,4	236,7	11763,3	16	436,8	12355,1	1,03
13000	433,3	410,0	615,0	710,2	236,7	473,4	118,4	236,7	12763,3	17	581,7	13355,1	1,03
14000	466,7	460,0	690,0	796,8	265,6	531,2	132,8	265,6	13734,4	17	359,9	14398,4	1,03
15000	500,0	530,0	795,0	918,1	306,0	612,0	153,0	306,0	14694,0	16	308,5	15459,0	1,03
16000	533,3	530,0	795,0	918,1	306,0	612,0	153,0	306,0	15694,0	17	349,4	16459,0	1,03
17000	566,7	530,0	795,0	918,1	306,0	612,0	153,0	306,0	16694,0	18	390,4	17459,0	1,03
18000	600,0	610,0	915,0	1056,6	352,2	704,4	176,1	352,2	17647,8	16	723,0	18528,3	1,03

Padrão Peiner													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>p</i>	<i>bw</i>	<i>a0</i>	<i>b</i>	<i>bwe min</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
6000	200,0	200,0	300,0	300,0	100,0	200,0	50,0	100,0	5900,0	19	200,0	6150,0	1,03
7000	233,3	250,0	375,0	375,0	125,0	250,0	62,5	125,0	6875,0	18	187,5	7187,5	1,03
7500	250,0	250,0	375,0	375,0	125,0	250,0	62,5	125,0	7375,0	19	250,0	7687,5	1,03
8000	266,7	250,0	375,0	375,0	125,0	250,0	62,5	125,0	7875,0	21	125,0	8187,5	1,02
9000	300,0	310,0	465,0	465,0	155,0	310,0	77,5	155,0	8845,0	19	160,0	9232,5	1,03
10000	333,3	310,0	465,0	465,0	155,0	310,0	77,5	155,0	9845,0	21	195,0	10232,5	1,02
11000	366,7	360,0	540,0	540,0	180,0	360,0	90,0	180,0	10820,0	20	190,0	11270,0	1,02
12000	400,0	410,0	615,0	615,0	205,0	410,0	102,5	205,0	11795,0	19	260,0	12307,5	1,03
13000	433,3	410,0	615,0	615,0	205,0	410,0	102,5	205,0	12795,0	20	452,5	13307,5	1,02
14000	466,7	460,0	690,0	690,0	230,0	460,0	115,0	230,0	13770,0	19	560,0	14345,0	1,02
15000	500,0	530,0	795,0	795,0	265,0	530,0	132,5	265,0	14735,0	18	477,5	15397,5	1,03
16000	533,3	530,0	795,0	795,0	265,0	530,0	132,5	265,0	15735,0	19	580,0	16397,5	1,02
17000	566,7	530,0	795,0	795,0	265,0	530,0	132,5	265,0	16735,0	21	285,0	17397,5	1,02
18000	600,0	610,0	915,0	915,0	305,0	610,0	152,5	305,0	17695,0	19	460,0	18457,5	1,03

Padrão Anglo-Saxão													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>p</i>	<i>bw</i>	<i>a0</i>	<i>b</i>	<i>bwe min</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
6000	200,0	200,0	300,0	216,0	50,0	166,0	58,0	76,0	5898,0	27	109,0	6108,0	1,02
7000	233,3	250,0	375,0	270,0	62,5	207,5	72,5	76,0	6910,5	25	156,3	7135,0	1,02
7500	250,0	250,0	375,0	270,0	62,5	207,5	72,5	76,0	7410,5	27	136,3	7635,0	1,02
8000	266,7	250,0	375,0	270,0	62,5	207,5	72,5	76,0	7910,5	29	116,3	8135,0	1,02
9000	300,0	310,0	465,0	334,8	77,5	257,3	89,9	77,5	8922,5	26	186,3	9167,4	1,02
10000	333,3	310,0	465,0	334,8	77,5	257,3	89,9	77,5	9922,5	29	184,2	10167,4	1,02
11000	366,7	360,0	540,0	388,8	90,0	298,8	104,4	90,0	10910,0	28	101,8	11194,4	1,02
12000	400,0	410,0	615,0	442,8	102,5	340,3	118,9	102,5	11897,5	26	294,8	12221,4	1,02
13000	433,3	410,0	615,0	442,8	102,5	340,3	118,9	102,5	12897,5	29	130,7	13221,4	1,02
14000	466,7	460,0	690,0	496,8	115,0	381,8	133,4	115,0	13885,0	27	350,7	14248,4	1,02
15000	500,0	530,0	795,0	572,4	132,5	439,9	153,7	132,5	14867,5	25	411,2	15286,2	1,02
16000	533,3	530,0	795,0	572,4	132,5	439,9	153,7	132,5	15867,5	27	338,8	16286,2	1,02
17000	566,7	530,0	795,0	572,4	132,5	439,9	153,7	132,5	16867,5	29	266,4	17286,2	1,02
18000	600,0	610,0	915,0	658,8	152,5	506,3	176,9	152,5	17847,5	27	182,4	18329,4	1,02

TIPOLOGIA CASTELADA

SISTEMA DE COBERTURA

Padrão Litzka													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>p</i>	<i>bw</i>	<i>a0</i>	<i>b</i>	<i>bwe min</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
10000	266,7	250,0	375,0	433,1	144,4	288,7	72,2	144,4	9855,7	22	308,6	10216,5	1,02
11000	293,3	310,0	465,0	537,0	179,0	358,0	89,5	179,0	10821,0	20	219,7	11268,5	1,02
12000	320,0	310,0	465,0	537,0	179,0	358,0	89,5	179,0	11821,0	22	182,7	12268,5	1,02
13000	346,7	360,0	540,0	623,6	207,9	415,7	103,9	207,9	12792,1	20	368,0	13311,8	1,02
14000	373,3	360,0	540,0	623,6	207,9	415,7	103,9	207,9	13792,1	22	244,4	14311,8	1,02
15000	400,0	410,0	615,0	710,2	236,7	473,4	118,4	236,7	14763,3	20	516,3	15355,1	1,02
16000	426,7	410,0	615,0	710,2	236,7	473,4	118,4	236,7	15763,3	22	306,1	16355,1	1,02
17000	453,3	460,0	690,0	796,8	265,6	531,2	132,8	265,6	16734,4	21	266,3	17398,4	1,02
18000	480,0	460,0	690,0	796,8	265,6	531,2	132,8	265,6	17734,4	22	367,9	18398,4	1,02
19000	506,7	530,0	795,0	918,1	306,0	612,0	153,0	306,0	18694,0	20	472,4	19459,0	1,02
20000	533,3	530,0	795,0	918,1	306,0	612,0	153,0	306,0	19694,0	21	513,3	20459,0	1,02
21000	560,0	530,0	795,0	918,1	306,0	612,0	153,0	306,0	20694,0	22	554,3	21459,0	1,02
22000	586,7	610,0	915,0	1056,6	352,2	704,4	176,1	352,2	21647,8	20	609,7	22528,3	1,02
23000	613,3	610,0	915,0	1056,6	352,2	704,4	176,1	352,2	22647,8	21	581,4	23528,3	1,02

Padrão Peiner													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>p</i>	<i>bw</i>	<i>a0</i>	<i>b</i>	<i>bwe min</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
10000	266,7	250,0	375,0	375,0	125,0	250,0	62,5	125,0	9875,0	26	187,5	10187,5	1,02
11000	293,3	310,0	465,0	465,0	155,0	310,0	77,5	155,0	10845,0	23	230,0	11232,5	1,02
12000	320,0	310,0	465,0	465,0	155,0	310,0	77,5	155,0	11845,0	25	265,0	12232,5	1,02
13000	346,7	360,0	540,0	540,0	180,0	360,0	90,0	180,0	12820,0	23	380,0	13270,0	1,02
14000	373,3	360,0	540,0	540,0	180,0	360,0	90,0	180,0	13820,0	25	340,0	14270,0	1,02
15000	400,0	410,0	615,0	615,0	205,0	410,0	102,5	205,0	14795,0	24	222,5	15307,5	1,02
16000	426,7	410,0	615,0	615,0	205,0	410,0	102,5	205,0	15795,0	25	415,0	16307,5	1,02
17000	453,3	460,0	690,0	690,0	230,0	460,0	115,0	230,0	16770,0	24	335,0	17345,0	1,02
18000	480,0	460,0	690,0	690,0	230,0	460,0	115,0	230,0	17770,0	25	490,0	18345,0	1,02
19000	506,7	530,0	795,0	795,0	265,0	530,0	132,5	265,0	18735,0	23	490,0	19397,5	1,02
20000	533,3	530,0	795,0	795,0	265,0	530,0	132,5	265,0	19735,0	24	592,5	20397,5	1,02
21000	560,0	530,0	795,0	795,0	265,0	530,0	132,5	265,0	20735,0	26	297,5	21397,5	1,02
22000	586,7	610,0	915,0	915,0	305,0	610,0	152,5	305,0	21695,0	23	630,0	22457,5	1,02
23000	613,3	610,0	915,0	915,0	305,0	610,0	152,5	305,0	22695,0	24	672,5	23457,5	1,02

Padrão Anglo-Saxão													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>p</i>	<i>bw</i>	<i>a0</i>	<i>b</i>	<i>bwe min</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
10000	266,7	250,0	375,0	270,0	62,5	207,5	72,5	76,0	9910,5	36	171,3	10135,0	1,01
11000	293,3	310,0	465,0	334,8	77,5	257,3	89,9	77,5	10922,5	32	182,0	11167,4	1,02
12000	320,0	310,0	465,0	334,8	77,5	257,3	89,9	77,5	11922,5	35	179,8	12167,4	1,01
13000	346,7	360,0	540,0	388,8	90,0	298,8	104,4	90,0	12910,0	33	129,8	13194,4	1,01
14000	373,3	360,0	540,0	388,8	90,0	298,8	104,4	90,0	13910,0	35	241,0	14194,4	1,01
15000	400,0	410,0	615,0	442,8	102,5	340,3	118,9	102,5	14897,5	33	245,1	15221,4	1,01
16000	426,7	410,0	615,0	442,8	102,5	340,3	118,9	102,5	15897,5	35	302,3	16221,4	1,01
17000	453,3	460,0	690,0	496,8	115,0	381,8	133,4	115,0	16885,0	33	360,3	17248,4	1,01
18000	480,0	460,0	690,0	496,8	115,0	381,8	133,4	115,0	17885,0	36	115,1	18248,4	1,01
19000	506,7	530,0	795,0	572,4	132,5	439,9	153,7	132,5	18867,5	32	407,8	19286,2	1,02
20000	533,3	530,0	795,0	572,4	132,5	439,9	153,7	132,5	19867,5	34	335,4	20286,2	1,01
21000	560,0	530,0	795,0	572,4	132,5	439,9	153,7	132,5	20867,5	36	263,0	21286,2	1,01
22000	586,7	610,0	915,0	658,8	152,5	506,3	176,9	152,5	21847,5	33	206,0	22329,4	1,01
23000	613,3	610,0	915,0	658,8	152,5	506,3	176,9	152,5	22847,5	34	376,7	23329,4	1,01

TIPOLOGIA CELULAR

SISTEMA DE PISO

Tipologia celular com $k = 1,3$; $D0=0,8d$; $p=1,2D0$													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>D0</i>	<i>P</i>	<i>bw</i>	<i>bwe min</i>	<i>Verif.</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
6000	230,8	250,0	325,0	200,0	240,0	40,0	140,0	-	5760,0	24	140,0	6120,0	1,02
7000	269,2	250,0	325,0	200,0	240,0	40,0	140,0	-	6760,0	28	160,0	7120,0	1,02
7500	288,5	310,0	403,0	248,0	297,6	49,6	173,6	-	7202,4	24	203,6	7648,8	1,02
8000	307,7	310,0	403,0	248,0	297,6	49,6	173,6	-	7702,4	25	304,8	8148,8	1,02
9000	346,2	360,0	468,0	288,0	345,6	57,6	201,6	OK	8654,4	25	208,8	9172,8	1,02
10000	384,6	360,0	468,0	288,0	345,6	57,6	201,6	OK	9654,4	27	363,2	10172,8	1,02
11000	423,1	410,0	533,0	328,0	393,6	65,6	229,6	OK	10606,4	26	416,0	11196,8	1,02
12000	461,5	460,0	598,0	368,0	441,6	73,6	257,6	OK	11558,4	26	296,0	12220,8	1,02
13000	500,0	530,0	689,0	424,0	508,8	84,8	296,8	OK	12491,2	24	436,8	13254,4	1,02
14000	538,5	530,0	689,0	424,0	508,8	84,8	296,8	OK	13491,2	26	428,0	14254,4	1,02
15000	576,9	610,0	793,0	488,0	585,6	97,6	341,6	OK	14414,4	24	521,6	15292,8	1,02
16000	615,4	610,0	793,0	488,0	585,6	97,6	341,6	OK	15414,4	26	436,0	16292,8	1,02

Tipologia celular com $k = 1,3$; $D0=0,8d$; $p=1,6D0$													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>D0</i>	<i>P</i>	<i>bw</i>	<i>bwe min</i>	<i>Verif.</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
6000	230,8	250,0	325,0	200,0	320,0	120,0	220,0	OK	5680,0	17	340,0	6160,0	1,03
7000	269,2	250,0	325,0	200,0	320,0	120,0	220,0	OK	6680,0	20	360,0	7160,0	1,02
7500	288,5	310,0	403,0	248,0	396,8	148,8	272,8	OK	7103,2	17	451,6	7698,4	1,03
8000	307,7	310,0	403,0	248,0	396,8	148,8	272,8	OK	7603,2	19	304,8	8198,4	1,02
9000	346,2	360,0	468,0	288,0	460,8	172,8	316,8	OK	8539,2	18	439,2	9230,4	1,03
10000	384,6	360,0	468,0	288,0	460,8	172,8	316,8	OK	9539,2	20	478,4	10230,4	1,02
11000	423,1	410,0	533,0	328,0	524,8	196,8	360,8	OK	10475,2	19	612,8	11262,4	1,02
12000	461,5	460,0	598,0	368,0	588,8	220,8	404,8	OK	11411,2	19	516,8	12294,4	1,02
13000	500,0	530,0	689,0	424,0	678,4	254,4	466,4	OK	12321,6	18	521,6	13339,2	1,03
14000	538,5	530,0	689,0	424,0	678,4	254,4	466,4	OK	13321,6	19	682,4	14339,2	1,02
15000	576,9	610,0	793,0	488,0	780,8	292,8	536,8	OK	14219,2	18	619,2	15390,4	1,03
16000	615,4	610,0	793,0	488,0	780,8	292,8	536,8	OK	15219,2	19	728,8	16390,4	1,02

Tipologia celular com $k = 1,3$; $D0=1,1d$; $p=1,2D0$													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>D0</i>	<i>P</i>	<i>bw</i>	<i>bwe min</i>	<i>Verif.</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
6000	230,8	250,0	325,0	275,0	330,0	55,0	192,5	OK	5670,0	17	222,5	6165,0	1,03
7000	269,2	250,0	325,0	275,0	330,0	55,0	192,5	OK	6670,0	20	227,5	7165,0	1,02
7500	288,5	310,0	403,0	341,0	409,2	68,2	238,7	OK	7090,8	17	305,9	7704,6	1,03
8000	307,7	310,0	403,0	341,0	409,2	68,2	238,7	OK	7590,8	18	351,3	8204,6	1,03
9000	346,2	360,0	468,0	396,0	475,2	79,2	277,2	OK	8524,8	17	500,4	9237,6	1,03
10000	384,6	360,0	468,0	396,0	475,2	79,2	277,2	OK	9524,8	20	287,6	10237,6	1,02
11000	423,1	410,0	533,0	451,0	541,2	90,2	315,7	OK	10458,8	19	403,7	11270,6	1,02
12000	461,5	460,0	598,0	506,0	607,2	101,2	354,2	OK	11392,8	18	585,8	12303,6	1,03
13000	500,0	530,0	689,0	583,0	699,6	116,6	408,1	OK	12300,4	17	611,7	13349,8	1,03
14000	538,5	530,0	689,0	583,0	699,6	116,6	408,1	OK	13300,4	19	412,1	14349,8	1,02
15000	576,9	610,0	793,0	671,0	805,2	134,2	469,7	OK	14194,8	17	722,9	15402,6	1,03
16000	615,4	610,0	793,0	671,0	805,2	134,2	469,7	OK	15194,8	18	820,3	16402,6	1,03

TIPOLOGIA CELULAR

SISTEMA DE PISO

Tipologia celular com $k = 1,3$; $D0=1,1d$; $p=1,7D0$													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>D0</i>	<i>p</i>	<i>bw</i>	<i>bwe min</i>	<i>Verif.</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
6000	230,8	250,0	325,0	275,0	440,0	165,0	302,5	OK	5560,0	12	442,5	6220,0	1,04
7000	269,2	250,0	325,0	275,0	440,0	165,0	302,5	OK	6560,0	14	502,5	7220,0	1,03
7500	288,5	310,0	403,0	341,0	545,6	204,6	375,1	OK	6954,4	12	578,7	7772,8	1,04
8000	307,7	310,0	403,0	341,0	545,6	204,6	375,1	OK	7454,4	13	555,9	8272,8	1,03
9000	346,2	360,0	468,0	396,0	633,6	237,6	435,6	OK	8366,4	13	500,4	9316,8	1,04
10000	384,6	360,0	468,0	396,0	633,6	237,6	435,6	OK	9366,4	14	683,6	10316,8	1,03
11000	423,1	410,0	533,0	451,0	721,6	270,6	496,1	OK	10278,4	14	584,1	11360,8	1,03
12000	461,5	460,0	598,0	506,0	809,6	303,6	556,6	OK	11190,4	13	889,4	12404,8	1,03
13000	500,0	530,0	689,0	583,0	932,8	349,8	641,3	OK	12067,2	12	1078,1	13466,4	1,04
14000	538,5	530,0	689,0	583,0	932,8	349,8	641,3	OK	13067,2	14	645,3	14466,4	1,03
15000	576,9	610,0	793,0	671,0	1073,6	402,6	738,1	OK	13926,4	12	1259,7	15536,8	1,04
16000	615,4	610,0	793,0	671,0	1073,6	402,6	738,1	OK	14926,4	13	1222,9	16536,8	1,03

Tipologia celular com $k = 1,4$; $D0=0,9d$; $p=1,2D0$													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>D0</i>	<i>p</i>	<i>bw</i>	<i>bwe min</i>	<i>Verif.</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
6000	214,3	200,0	280,0	180,0	216,0	36,0	126,0	-	5784,0	26	210,0	6108,0	1,02
7000	250,0	250,0	350,0	225,0	270,0	45,0	157,5	-	6730,0	24	282,5	7135,0	1,02
7500	267,9	250,0	350,0	225,0	270,0	45,0	157,5	-	7230,0	26	262,5	7635,0	1,02
8000	285,7	310,0	434,0	279,0	334,8	55,8	195,3	OK	7665,2	22	345,1	8167,4	1,02
9000	321,4	310,0	434,0	279,0	334,8	55,8	195,3	OK	8665,2	25	342,9	9167,4	1,02
10000	357,1	360,0	504,0	324,0	388,8	64,8	226,8	OK	9611,2	24	366,8	10194,4	1,02
11000	392,9	410,0	574,0	369,0	442,8	73,8	258,3	OK	10557,2	23	444,7	11221,4	1,02
12000	428,6	410,0	574,0	369,0	442,8	73,8	258,3	OK	11557,2	26	280,5	12221,4	1,02
13000	464,3	460,0	644,0	414,0	496,8	82,8	289,8	OK	12503,2	25	331,4	13248,4	1,02
14000	500,0	530,0	742,0	477,0	572,4	95,4	333,9	OK	13427,6	23	465,1	14286,2	1,02
15000	535,7	530,0	742,0	477,0	572,4	95,4	333,9	OK	14427,6	25	392,7	15286,2	1,02
16000	571,4	610,0	854,0	549,0	658,8	109,8	384,3	OK	15341,2	23	478,7	16329,4	1,02
17000	607,1	610,0	854,0	549,0	658,8	109,8	384,3	OK	16341,2	24	649,3	17329,4	1,02
18000	642,9	610,0	854,0	549,0	658,8	109,8	384,3	OK	17341,2	26	490,5	18329,4	1,02

Tipologia celular com $k = 1,4$; $D0=0,9d$; $p=1,4D0$													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>D0</i>	<i>p</i>	<i>bw</i>	<i>bwe min</i>	<i>Verif.</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
6000	214,3	200,0	280,0	180,0	306,0	126,0	216,0	OK	5694,0	18	309,0	6153,0	1,03
7000	250,0	250,0	350,0	225,0	382,5	157,5	270,0	OK	6617,5	17	327,5	7191,3	1,03
7500	267,9	250,0	350,0	225,0	382,5	157,5	270,0	OK	7117,5	18	386,3	7691,3	1,03
8000	285,7	310,0	434,0	279,0	474,3	195,3	334,8	OK	7525,7	15	540,4	8237,2	1,03
9000	321,4	310,0	434,0	279,0	474,3	195,3	334,8	OK	8525,7	17	566,1	9237,2	1,03
10000	357,1	360,0	504,0	324,0	550,8	226,8	388,8	OK	9449,2	17	431,6	10275,4	1,03
11000	392,9	410,0	574,0	369,0	627,3	258,3	442,8	OK	10372,7	16	610,8	11313,7	1,03
12000	428,6	410,0	574,0	369,0	627,3	258,3	442,8	OK	11372,7	18	483,5	12313,7	1,03
13000	464,3	460,0	644,0	414,0	703,8	289,8	496,8	OK	12296,2	17	662,6	13351,9	1,03
14000	500,0	530,0	742,0	477,0	810,9	333,9	572,4	OK	13189,1	16	679,8	14405,5	1,03
15000	535,7	530,0	742,0	477,0	810,9	333,9	572,4	OK	14189,1	17	774,3	15405,5	1,03
16000	571,4	610,0	854,0	549,0	933,3	384,3	658,8	OK	15066,7	16	725,8	16466,7	1,03
17000	607,1	610,0	854,0	549,0	933,3	384,3	658,8	OK	16066,7	17	759,1	17466,7	1,03
18000	642,9	610,0	854,0	549,0	933,3	384,3	658,8	OK	17066,7	18	792,5	18466,7	1,03

TIPOLOGIA CELULAR

SISTEMA DE PISO

Tipologia celular com $k = 1,4$; $D0=1,1d$; $p=1,2D0$													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>D0</i>	<i>p</i>	<i>bw</i>	<i>bwe min</i>	<i>Verif.</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
6000	214,3	200,0	280,0	220,0	264,0	44,0	154,0	-	5736,0	21	250,0	6132,0	1,02
7000	250,0	250,0	350,0	275,0	330,0	55,0	192,5	OK	6670,0	20	227,5	7165,0	1,02
7500	267,9	250,0	350,0	275,0	330,0	55,0	192,5	OK	7170,0	21	312,5	7665,0	1,02
8000	285,7	310,0	434,0	341,0	409,2	68,2	238,7	OK	7590,8	18	351,3	8204,6	1,03
9000	321,4	310,0	434,0	341,0	409,2	68,2	238,7	OK	8590,8	20	442,1	9204,6	1,02
10000	357,1	360,0	504,0	396,0	475,2	79,2	277,2	OK	9524,8	20	287,6	10237,6	1,02
11000	392,9	410,0	574,0	451,0	541,2	90,2	315,7	OK	10458,8	19	403,7	11270,6	1,02
12000	428,6	410,0	574,0	451,0	541,2	90,2	315,7	OK	11458,8	21	362,5	12270,6	1,02
13000	464,3	460,0	644,0	506,0	607,2	101,2	354,2	OK	12392,8	20	478,6	13303,6	1,02
14000	500,0	530,0	742,0	583,0	699,6	116,6	408,1	OK	13300,4	19	412,1	14349,8	1,02
15000	535,7	530,0	742,0	583,0	699,6	116,6	408,1	OK	14300,4	20	562,3	15349,8	1,02
16000	571,4	610,0	854,0	671,0	805,2	134,2	469,7	OK	15194,8	18	820,3	16402,6	1,03
17000	607,1	610,0	854,0	671,0	805,2	134,2	469,7	OK	16194,8	20	515,1	17402,6	1,02
18000	642,9	610,0	854,0	671,0	805,2	134,2	469,7	OK	17194,8	21	612,5	18402,6	1,02

Celular com razão de expansão $k = 1,4$; $D0=1,1d$; $p=1,6D0$													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>D0</i>	<i>p</i>	<i>bw</i>	<i>bwe min</i>	<i>Verif.</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
6000	214,3	200,0	280,0	220,0	352,0	132,0	242,0	OK	5648,0	16	250,0	6176,0	1,03
7000	250,0	250,0	350,0	275,0	440,0	165,0	302,5	OK	6560,0	14	502,5	7220,0	1,03
7500	267,9	250,0	350,0	275,0	440,0	165,0	302,5	OK	7060,0	16	312,5	7720,0	1,03
8000	285,7	310,0	434,0	341,0	545,6	204,6	375,1	OK	7454,4	13	555,9	8272,8	1,03
9000	321,4	310,0	434,0	341,0	545,6	204,6	375,1	OK	8454,4	15	510,3	9272,8	1,03
10000	357,1	360,0	504,0	396,0	633,6	237,6	435,6	OK	9366,4	14	683,6	10316,8	1,03
11000	392,9	410,0	574,0	451,0	721,6	270,6	496,1	OK	10278,4	14	584,1	11360,8	1,03
12000	428,6	410,0	574,0	451,0	721,6	270,6	496,1	OK	11278,4	15	723,3	12360,8	1,03
13000	464,3	460,0	644,0	506,0	809,6	303,6	556,6	OK	12190,4	15	579,8	13404,8	1,03
14000	500,0	530,0	742,0	583,0	932,8	349,8	641,3	OK	13067,2	14	645,3	14466,4	1,03
15000	535,7	530,0	742,0	583,0	932,8	349,8	641,3	OK	14067,2	15	678,9	15466,4	1,03
16000	571,4	610,0	854,0	671,0	1073,6	402,6	738,1	OK	14926,4	13	1222,9	16536,8	1,03
17000	607,1	610,0	854,0	671,0	1073,6	402,6	738,1	OK	15926,4	14	1186,1	17536,8	1,03
18000	642,9	610,0	854,0	671,0	1073,6	402,6	738,1	OK	16926,4	15	1149,3	18536,8	1,03

TIPOLOGIA CELULAR
SISTEMA DE COBERTURA

Tipologia celular com $k = 1,4$; $D0=1,0d$; $p=1,1D0$													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>D0</i>	<i>p</i>	<i>bw</i>	<i>bwe min</i>	<i>Verif.</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
6000	214,3	200,0	280,0	200,0	220,0	20,0	120,0	-	5780,0	26	150,0	6110,0	1,02
7000	250,0	250,0	350,0	250,0	275,0	25,0	150,0	-	6725,0	24	212,5	7137,5	1,02
7500	267,9	250,0	350,0	250,0	275,0	25,0	150,0	-	7225,0	26	187,5	7637,5	1,02
8000	285,7	310,0	434,0	310,0	341,0	31,0	186,0	-	7659,0	22	264,5	8170,5	1,02
9000	321,4	310,0	434,0	310,0	341,0	31,0	186,0	-	8659,0	25	253,0	9170,5	1,02
10000	357,1	360,0	504,0	360,0	396,0	36,0	216,0	-	9604,0	24	266,0	10198,0	1,02
11000	392,9	410,0	574,0	410,0	451,0	41,0	246,0	-	10549,0	23	334,0	11225,5	1,02
12000	428,6	410,0	574,0	410,0	451,0	41,0	246,0	-	11549,0	25	383,0	12225,5	1,02
13000	464,3	460,0	644,0	460,0	506,0	46,0	276,0	-	12494,0	24	451,0	13253,0	1,02
14000	500,0	530,0	742,0	530,0	583,0	53,0	318,0	OK	13417,0	23	322,0	14291,5	1,02
15000	535,7	530,0	742,0	530,0	583,0	53,0	318,0	OK	14417,0	24	530,5	15291,5	1,02
16000	571,4	610,0	854,0	610,0	671,0	61,0	366,0	OK	15329,0	22	649,5	16335,5	1,02
17000	607,1	610,0	854,0	610,0	671,0	61,0	366,0	OK	16329,0	24	478,5	17335,5	1,02
18000	642,9	610,0	854,0	610,0	671,0	61,0	366,0	OK	17329,0	25	643,0	18335,5	1,02

Tipologia celular com $k = 1,4$; $D0=1,0d$; $p=1,3D0$													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>D0</i>	<i>p</i>	<i>bw</i>	<i>bwe min</i>	<i>Verif.</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
6000	214,3	200,0	280,0	200,0	260,0	60,0	160,0	OK	5740,0	22	170,0	6130,0	1,02
7000	250,0	250,0	350,0	250,0	325,0	75,0	200,0	OK	6675,0	20	287,5	7162,5	1,02
7500	267,9	250,0	350,0	250,0	325,0	75,0	200,0	OK	7175,0	22	212,5	7662,5	1,02
8000	285,7	310,0	434,0	310,0	403,0	93,0	248,0	OK	7597,0	18	419,5	8201,5	1,03
9000	321,4	310,0	434,0	310,0	403,0	93,0	248,0	OK	8597,0	21	315,0	9201,5	1,02
10000	357,1	360,0	504,0	360,0	468,0	108,0	288,0	OK	9532,0	20	374,0	10234,0	1,02
11000	392,9	410,0	574,0	410,0	533,0	123,0	328,0	OK	10467,0	19	498,0	11266,5	1,02
12000	428,6	410,0	574,0	410,0	533,0	123,0	328,0	OK	11467,0	21	465,0	12266,5	1,02
13000	464,3	460,0	644,0	460,0	598,0	138,0	368,0	OK	12402,0	20	589,0	13299,0	1,02
14000	500,0	530,0	742,0	530,0	689,0	159,0	424,0	OK	13311,0	19	534,0	14344,5	1,02
15000	535,7	530,0	742,0	530,0	689,0	159,0	424,0	OK	14311,0	20	689,5	15344,5	1,02
16000	571,4	610,0	854,0	610,0	793,0	183,0	488,0	OK	15207,0	19	558,0	16396,5	1,02
17000	607,1	610,0	854,0	610,0	793,0	183,0	488,0	OK	16207,0	20	661,5	17396,5	1,02
18000	642,9	610,0	854,0	610,0	793,0	183,0	488,0	OK	17207,0	21	765,0	18396,5	1,02

Tipologia celular com $k = 1,4$; $D0=1,3d$; $p=1,1D0$													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>D0</i>	<i>p</i>	<i>bw</i>	<i>bwe min</i>	<i>Verif.</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
6000	214,3	200,0	280,0	260,0	286,0	26,0	156,0	-	5714,0	19	296,0	6143,0	1,02
7000	250,0	250,0	350,0	325,0	357,5	32,5	195,0	-	6642,5	18	298,8	7178,8	1,03
7500	267,9	250,0	350,0	325,0	357,5	32,5	195,0	-	7142,5	19	370,0	7678,8	1,02
8000	285,7	310,0	434,0	403,0	443,3	40,3	241,8	-	7556,7	17	252,1	8221,7	1,03
9000	321,4	310,0	434,0	403,0	443,3	40,3	241,8	-	8556,7	19	308,8	9221,7	1,02
10000	357,1	360,0	504,0	468,0	514,8	46,8	280,8	-	9485,2	18	390,2	10257,4	1,03
11000	392,9	410,0	574,0	533,0	586,3	53,3	319,8	OK	10413,7	17	543,1	11293,2	1,03
12000	428,6	410,0	574,0	533,0	586,3	53,3	319,8	OK	11413,7	19	456,8	12293,2	1,02
13000	464,3	460,0	644,0	598,0	657,8	59,8	358,8	OK	12342,2	18	609,7	13328,9	1,03
14000	500,0	530,0	742,0	689,0	757,9	68,9	413,4	OK	13242,1	17	592,3	14379,0	1,03
15000	535,7	530,0	742,0	689,0	757,9	68,9	413,4	OK	14242,1	18	713,4	15379,0	1,03
16000	571,4	610,0	854,0	793,0	872,3	79,3	475,8	OK	15127,7	17	625,1	16436,2	1,03
17000	607,1	610,0	854,0	793,0	872,3	79,3	475,8	OK	16127,7	18	688,9	17436,2	1,03
18000	642,9	610,0	854,0	793,0	872,3	79,3	475,8	OK	17127,7	19	752,8	18436,2	1,02

TIPOLOGIA CELULAR

SISTEMA DE PISO

Tipologia celular com $k = 1,4$; $D0=1,3d$; $p=1,3D0$													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>D0</i>	<i>p</i>	<i>bw</i>	<i>bwe min</i>	<i>Verif.</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
6000	214,3	200,0	280,0	260,0	338,0	78,0	208,0	OK	5662,0	16	335,0	6169,0	1,03
7000	250,0	250,0	350,0	325,0	422,5	97,5	260,0	OK	6577,5	15	380,0	7211,3	1,03
7500	267,9	250,0	350,0	325,0	422,5	97,5	260,0	OK	7077,5	16	418,8	7711,3	1,03
8000	285,7	310,0	434,0	403,0	523,9	120,9	322,4	OK	7476,1	14	393,2	8262,0	1,03
9000	321,4	310,0	434,0	403,0	523,9	120,9	322,4	OK	8476,1	16	369,3	9262,0	1,03
10000	357,1	360,0	504,0	468,0	608,4	140,4	374,4	OK	9391,6	15	507,2	10304,2	1,03
11000	392,9	410,0	574,0	533,0	692,9	159,9	426,4	OK	10307,1	14	729,7	11346,5	1,03
12000	428,6	410,0	574,0	533,0	692,9	159,9	426,4	OK	11307,1	16	536,8	12346,5	1,03
13000	464,3	460,0	644,0	598,0	777,4	179,4	478,4	OK	12222,6	15	759,2	13388,7	1,03
14000	500,0	530,0	742,0	689,0	895,7	206,7	551,2	OK	13104,3	14	833,4	14447,9	1,03
15000	535,7	530,0	742,0	689,0	895,7	206,7	551,2	OK	14104,3	15	885,6	15447,9	1,03
16000	571,4	610,0	854,0	793,0	1030,9	237,9	634,4	OK	14969,1	14	902,6	16515,5	1,03
17000	607,1	610,0	854,0	793,0	1030,9	237,9	634,4	OK	15969,1	15	887,2	17515,5	1,03
18000	642,9	610,0	854,0	793,0	1030,9	237,9	634,4	OK	16969,1	16	871,7	18515,5	1,03

Tipologia celular com $k = 1,5$; $D0=1,1d$; $p=1,1D0$													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>D0</i>	<i>p</i>	<i>bw</i>	<i>bwe min</i>	<i>Verif.</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
6000	200,0	200,0	300,0	220,0	242,0	22,0	132,0	-	5758,0	23	228,0	6121,0	1,02
7000	233,3	250,0	375,0	275,0	302,5	27,5	165,0	-	6697,5	22	186,3	7151,3	1,02
7500	250,0	250,0	375,0	275,0	302,5	27,5	165,0	-	7197,5	23	285,0	7651,3	1,02
8000	266,7	250,0	375,0	275,0	302,5	27,5	165,0	-	7697,5	25	232,5	8151,3	1,02
9000	300,0	310,0	465,0	341,0	375,1	34,1	204,6	-	8624,9	22	391,0	9187,6	1,02
10000	333,3	310,0	465,0	341,0	375,1	34,1	204,6	-	9624,9	25	328,3	10187,6	1,02
11000	366,7	360,0	540,0	396,0	435,6	39,6	237,6	-	10564,4	24	292,6	11217,8	1,02
12000	400,0	410,0	615,0	451,0	496,1	45,1	270,6	-	11503,9	23	317,4	12248,1	1,02
13000	433,3	410,0	615,0	451,0	496,1	45,1	270,6	-	12503,9	25	321,3	13248,1	1,02
14000	466,7	460,0	690,0	506,0	556,6	50,6	303,6	OK	13443,4	24	346,1	14278,3	1,02
15000	500,0	530,0	795,0	583,0	641,3	58,3	349,8	OK	14358,7	22	474,8	15320,7	1,02
16000	533,3	530,0	795,0	583,0	641,3	58,3	349,8	OK	15358,7	23	654,2	16320,7	1,02
17000	566,7	530,0	795,0	583,0	641,3	58,3	349,8	OK	16358,7	25	512,9	17320,7	1,02
18000	600,0	610,0	915,0	671,0	738,1	67,1	402,6	OK	17261,9	23	545,4	18369,1	1,02

Tipologia celular com $k = 1,5$; $D0=1,1d$; $p=1,3D0$													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>D0</i>	<i>p</i>	<i>bw</i>	<i>bwe min</i>	<i>Verif.</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
6000	200,0	200,0	300,0	220,0	286,0	66,0	176,0	OK	5714,0	19	316,0	6143,0	1,02
7000	233,3	250,0	375,0	275,0	357,5	82,5	220,0	OK	6642,5	18	323,8	7178,8	1,03
7500	250,0	250,0	375,0	275,0	357,5	82,5	220,0	OK	7142,5	19	395,0	7678,8	1,02
8000	266,7	250,0	375,0	275,0	357,5	82,5	220,0	OK	7642,5	21	287,5	8178,8	1,02
9000	300,0	310,0	465,0	341,0	443,3	102,3	272,8	OK	8556,7	19	339,8	9221,7	1,02
10000	333,3	310,0	465,0	341,0	443,3	102,3	272,8	OK	9556,7	21	396,5	10221,7	1,02
11000	366,7	360,0	540,0	396,0	514,8	118,8	316,8	OK	10485,2	20	411,4	11257,4	1,02
12000	400,0	410,0	615,0	451,0	586,3	135,3	360,8	OK	11413,7	19	497,8	12293,2	1,02
13000	433,3	410,0	615,0	451,0	586,3	135,3	360,8	OK	12413,7	21	411,5	13293,2	1,02
14000	466,7	460,0	690,0	506,0	657,8	151,8	404,8	OK	13342,2	20	497,9	14328,9	1,02
15000	500,0	530,0	795,0	583,0	757,9	174,9	466,4	OK	14242,1	18	766,4	15379,0	1,03
16000	533,3	530,0	795,0	583,0	757,9	174,9	466,4	OK	15242,1	20	508,5	16379,0	1,02
17000	566,7	530,0	795,0	583,0	757,9	174,9	466,4	OK	16242,1	21	629,5	17379,0	1,02
18000	600,0	610,0	915,0	671,0	872,3	201,3	536,8	OK	17127,7	19	813,8	18436,2	1,02

TIPOLOGIA CELULAR

SISTEMA DE PISO

Tipologia celular com $k = 1,5$; $D0=1,3d$; $p=1,1D0$													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>D0</i>	<i>p</i>	<i>bw</i>	<i>bwe min</i>	<i>Verif.</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
6000	200,0	200,0	300,0	260,0	286,0	26,0	156,0	-	5714,0	19	296,0	6143,0	1,02
7000	233,3	250,0	375,0	325,0	357,5	32,5	195,0	-	6642,5	18	298,8	7178,8	1,03
7500	250,0	250,0	375,0	325,0	357,5	32,5	195,0	-	7142,5	19	370,0	7678,8	1,02
8000	266,7	250,0	375,0	325,0	357,5	32,5	195,0	-	7642,5	21	262,5	8178,8	1,02
9000	300,0	310,0	465,0	403,0	443,3	40,3	241,8	-	8556,7	19	308,8	9221,7	1,02
10000	333,3	310,0	465,0	403,0	443,3	40,3	241,8	-	9556,7	21	365,5	10221,7	1,02
11000	366,7	360,0	540,0	468,0	514,8	46,8	280,8	-	10485,2	20	375,4	11257,4	1,02
12000	400,0	410,0	615,0	533,0	586,3	53,3	319,8	OK	11413,7	19	456,8	12293,2	1,02
13000	433,3	410,0	615,0	533,0	586,3	53,3	319,8	OK	12413,7	21	370,5	13293,2	1,02
14000	466,7	460,0	690,0	598,0	657,8	59,8	358,8	OK	13342,2	20	451,9	14328,9	1,02
15000	500,0	530,0	795,0	689,0	757,9	68,9	413,4	OK	14242,1	18	713,4	15379,0	1,03
16000	533,3	530,0	795,0	689,0	757,9	68,9	413,4	OK	15242,1	20	455,4	16379,0	1,02
17000	566,7	530,0	795,0	689,0	757,9	68,9	413,4	OK	16242,1	21	576,5	17379,0	1,02
18000	600,0	610,0	915,0	793,0	872,3	79,3	475,8	OK	17127,7	19	752,8	18436,2	1,02

Tipologia celular com $k = 1,5$; $D0=1,3d$; $p=1,3D0$													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>D0</i>	<i>p</i>	<i>bw</i>	<i>bwe min</i>	<i>Verif.</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
6000	200,0	200,0	300,0	260,0	338,0	78,0	208,0	OK	5662,0	16	335,0	6169,0	1,03
7000	233,3	250,0	375,0	325,0	422,5	97,5	260,0	OK	6577,5	15	380,0	7211,3	1,03
7500	250,0	250,0	375,0	325,0	422,5	97,5	260,0	OK	7077,5	16	418,8	7711,3	1,03
8000	266,7	250,0	375,0	325,0	422,5	97,5	260,0	OK	7577,5	17	457,5	8211,3	1,03
9000	300,0	310,0	465,0	403,0	523,9	120,9	322,4	OK	8476,1	16	369,3	9262,0	1,03
10000	333,3	310,0	465,0	403,0	523,9	120,9	322,4	OK	9476,1	18	345,4	10262,0	1,03
11000	366,7	360,0	540,0	468,0	608,4	140,4	374,4	OK	10391,6	17	398,8	11304,2	1,03
12000	400,0	410,0	615,0	533,0	692,9	159,9	426,4	OK	11307,1	16	536,8	12346,5	1,03
13000	433,3	410,0	615,0	533,0	692,9	159,9	426,4	OK	12307,1	17	690,3	13346,5	1,03
14000	466,7	460,0	690,0	598,0	777,4	179,4	478,4	OK	13222,6	17	481,8	14388,7	1,03
15000	500,0	530,0	795,0	689,0	895,7	206,7	551,2	OK	14104,3	15	885,6	15447,9	1,03
16000	533,3	530,0	795,0	689,0	895,7	206,7	551,2	OK	15104,3	16	937,8	16447,9	1,03
17000	566,7	530,0	795,0	689,0	895,7	206,7	551,2	OK	16104,3	17	989,9	17447,9	1,03
18000	600,0	610,0	915,0	793,0	1030,9	237,9	634,4	OK	16969,1	16	871,7	18515,5	1,03

Tipologia celular com $k = 1,6$; $D0=1,3d$; $p=1,1D0$													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>D0</i>	<i>p</i>	<i>bw</i>	<i>bwe min</i>	<i>Verif.</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
6000	187,5	200,0	320,0	260,0	286,0	26,0	156,0	-	5714,0	19	296,0	6143,0	1,02
7000	218,8	200,0	320,0	260,0	286,0	26,0	156,0	-	6714,0	23	224,0	7143,0	1,02
7500	234,4	250,0	400,0	325,0	357,5	32,5	195,0	-	7142,5	19	370,0	7678,8	1,02
8000	250,0	250,0	400,0	325,0	357,5	32,5	195,0	-	7642,5	21	262,5	8178,8	1,02
9000	281,3	310,0	496,0	403,0	443,3	40,3	241,8	-	8556,7	19	308,8	9221,7	1,02
10000	312,5	310,0	496,0	403,0	443,3	40,3	241,8	-	9556,7	21	365,5	10221,7	1,02
11000	343,8	360,0	576,0	468,0	514,8	46,8	280,8	-	10485,2	20	375,4	11257,4	1,02
12000	375,0	360,0	576,0	468,0	514,8	46,8	280,8	-	11485,2	22	360,6	12257,4	1,02
13000	406,3	410,0	656,0	533,0	586,3	53,3	319,8	OK	12413,7	21	370,5	13293,2	1,02
14000	437,5	460,0	736,0	598,0	657,8	59,8	358,8	OK	13342,2	20	451,9	14328,9	1,02
15000	468,8	460,0	736,0	598,0	657,8	59,8	358,8	OK	14342,2	21	623,0	15328,9	1,02
16000	500,0	530,0	848,0	689,0	757,9	68,9	413,4	OK	15242,1	20	455,4	16379,0	1,02
17000	531,3	530,0	848,0	689,0	757,9	68,9	413,4	OK	16242,1	21	576,5	17379,0	1,02
18000	562,5	530,0	848,0	689,0	757,9	68,9	413,4	OK	17242,1	22	697,5	18379,0	1,02
19000	593,8	610,0	976,0	793,0	872,3	79,3	475,8	OK	18127,7	20	816,7	19436,2	1,02
19500	609,4	610,0	976,0	793,0	872,3	79,3	475,8	OK	18627,7	21	630,5	19936,2	1,02

TIPOLOGIA CELULAR

SISTEMA DE PISO

Tipologia celular com $k = 1,6$; $D0=1,3d$; $p=1,3D0$													
<i>Lv</i>	<i>Lv/x</i>	<i>d</i>	<i>dg</i>	<i>D0</i>	<i>p</i>	<i>bw</i>	<i>bwe min</i>	<i>Verif.</i>	<i>Ld</i>	<i>n</i>	<i>bwe</i>	<i>Lc</i>	<i>Lc/Lv</i>
6000	187,5	200,0	320,0	260,0	338,0	78,0	208,0	OK	5662,0	16	335,0	6169,0	1,03
7000	218,8	200,0	320,0	260,0	338,0	78,0	208,0	OK	6662,0	19	328,0	7169,0	1,02
7500	234,4	250,0	400,0	325,0	422,5	97,5	260,0	OK	7077,5	16	418,8	7711,3	1,03
8000	250,0	250,0	400,0	325,0	422,5	97,5	260,0	OK	7577,5	17	457,5	8211,3	1,03
9000	281,3	310,0	496,0	403,0	523,9	120,9	322,4	OK	8476,1	16	369,3	9262,0	1,03
10000	312,5	310,0	496,0	403,0	523,9	120,9	322,4	OK	9476,1	18	345,4	10262,0	1,03
11000	343,8	360,0	576,0	468,0	608,4	140,4	374,4	OK	10391,6	17	398,8	11304,2	1,03
12000	375,0	360,0	576,0	468,0	608,4	140,4	374,4	OK	11391,6	18	594,6	12304,2	1,03
13000	406,3	410,0	656,0	533,0	692,9	159,9	426,4	OK	12307,1	17	690,3	13346,5	1,03
14000	437,5	460,0	736,0	598,0	777,4	179,4	478,4	OK	13222,6	17	481,8	14388,7	1,03
15000	468,8	460,0	736,0	598,0	777,4	179,4	478,4	OK	14222,6	18	593,1	15388,7	1,03
16000	500,0	530,0	848,0	689,0	895,7	206,7	551,2	OK	15104,3	16	937,8	16447,9	1,03
17000	531,3	530,0	848,0	689,0	895,7	206,7	551,2	OK	16104,3	17	989,9	17447,9	1,03
18000	562,5	530,0	848,0	689,0	895,7	206,7	551,2	OK	17104,3	19	594,2	18447,9	1,02
19000	593,8	610,0	976,0	793,0	1030,9	237,9	634,4	OK	17969,1	17	856,3	19515,5	1,03
19500	609,4	610,0	976,0	793,0	1030,9	237,9	634,4	OK	18469,1	17	1106,3	20015,5	1,03

Comentários Gustavo

1. Nas Figs 29, 30 e 31 as vigas foram desenhadas com linhas muito finas; verificar a possibilidade de engrossar essas linhas.
2. Parece haver um problema com a Fig. 31.
3. Na Figura 44 parece haver uma inversão de bw_{min} com bw_{max} .
4. Na Fig. 97 o pedaço a aparar não é o que foi suprimido no desenho?
5. O parágrafo que sucede a Fig. 97 parece estranho. Qual deslocamento dado?