



## **VISÃO DIDÁTICA DE VIGAS DE AÇO COM ABERTURAS SEQUENCIAIS NA ALMA: CASTELADAS E CELULARES**

**Augusto Badke-Neto** – augbadke@gmail.com

Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Av. Fernando Ferrari, 514, Campus de Goiabeiras

CEP 29075-910 – Vitória - ES

**Adenílcia Fernanda Grobério Calenzani** – afcalenzani@gmail.com

Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Av. Fernando Ferrari, 514, Campus de Goiabeiras

CEP 29075-910 – Vitória - ES

**Walnório Graça Ferreira** – walnorio@gmail.com

Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Av. Fernando Ferrari, 514, Campus de Goiabeiras

CEP 29075-910 – Vitória - ES

**Macksuel Soares de Azevedo** – macksuel.azevedo@gmail.com

Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Av. Fernando Ferrari, 514, Campus de Goiabeiras

CEP 29075-910 – Vitória - ES

**Resumo:** *A construção civil brasileira tradicionalmente emprega o concreto armado como material para os elementos estruturais das edificações. No setor industrial é comum o uso de soluções estruturais em aço, porém nos últimos anos, outros segmentos da construção civil também começaram a adotar estruturas em aço. O aço possui uma resistência muito superior àquela do concreto armado, o que proporciona estruturas mais leves. Além disso, inúmeras são as vantagens relacionadas ao seu uso, como por exemplo, a rapidez de montagem e construção. Correntemente, usam-se, para elementos estruturais em aço, perfis com seções transversais de alma cheia. Este artigo explora uma solução alternativa e inovadora para perfis de aço utilizados em vigas, apresentando uma abordagem didática sobre as vigas castelares e celulares. Essas vigas são fabricadas a partir dos perfis de alma cheia, por meio de um corte longitudinal na alma do perfil, e posterior soldagem das partes separadas, de forma a se obter aberturas, em formato hexagonal – formando as vigas castelares – ou formato circular – formando as vigas celulares. Sem entrar no mérito dos procedimentos de dimensionamento, faz-se uma explanação sobre as vantagens e desvantagens, geometrias, processos de fabricação e comportamento quanto aos modos de flambagem. De maneira clara e didática, apresentam-se informações relevantes sobre as vigas castelares e celulares com o intuito de despertar a motivação e o interesse dos estudantes das engenharias civil e mecânica para novos produtos em aço.*

**Palavras-chave:** *Estruturas de aço, Vigas Alveolares, Vigas castelares, Vigas celulares*



## 1. INTRODUÇÃO

As vigas com aberturas sequenciais na alma foram criadas a partir de necessidades estruturais de redução de peso e atendimento aos critérios de resistência aos esforços solicitantes e são fabricadas a partir de perfis laminados a quente, com aberturas padronizadas na alma, sendo bastante empregadas nos países de primeiro mundo. As aberturas são também denominadas alvéolos, motivo pelo qual, em engenharia estrutural, são referenciadas algumas vezes como vigas alveolares.

Desenvolvidas pelo engenheiro Geoffrey Boyd quando o aço tinha pouca disponibilidade e custos altos, as primeiras vigas de aberturas sequenciais, as vigas casteladas – denominadas em função de sua aparência semelhante às muralhas de um castelo – foram inicialmente chamadas de Vigas Boyd.

No Brasil, elas foram usadas até a década de 1970, enquanto ainda se produziam perfis laminados de abas inclinadas. Entraram em desuso quando se iniciou a produção de perfis soldados, que já vinham com a altura desejada. Mas com a entrada em produção do laminador de perfis de abas paralelas da Gerdau-Açominas, em 2002, voltou a ser empregado o uso de vigas casteladas, ao mesmo tempo em que começaram a ser avaliadas as vantagens de vigas celulares (de aberturas circulares), que tendem a se tornar mais uma opção no segmento de estruturas metálicas.

Diversos pesquisadores têm desenvolvido estudos sobre vigas casteladas e celulares. Ward (1994) por meio do Instituto de Construção em Aço (The Steel Construction Intitut- SCI) do Reino Unido, discorre sobre comportamentos e projetos no que diz respeito a projetos de vigas celulares puramente de aço ou mistas aço-concreto, apresentando interessantes exemplos numéricos. Pinho (2009) faz abordagem esclarecedora acerca de vigas casteladas e celulares, pautadas em sua experiência em projetos estruturais, no que diz respeito a edificações estruturadas em aço. Abreu e outros (2009) pesquisaram o carregamento crítico de vigas celulares de aço para a flexão lateral com torção. No campo da pesquisa propriamente dita, Gama (2011) desenvolveu um estudo sobre a estabilidade das vigas casteladas, executando análise numérica e paramétrica. Bezerra (2011) desenvolveu pesquisa para a determinação do momento fletor resistente de vigas casteladas de padrão Peiner e anglo-saxônica para o estado limite último da flambagem lateral com torção. Mônico (2012) apresenta uma sucinta explanação sobre essas vigas, abordando vantagens e desvantagens, configuração das aberturas, processo de fabricação, dentre outras.

O presente trabalho visa cobrir uma lacuna nos programas das disciplinas relacionadas às estruturas de aço, ao apresentar a alternativa de soluções estruturais em vigas alveolares, pois esse assunto não faz parte dos programas dos cursos de engenharia civil e mecânica.

## 2. VIGAS ALVEOLARES MISTAS

As vigas alveolares podem ser utilizadas em conjunto com lajes de concreto, sendo assim denominadas vigas alveolares mistas, podendo atingir vãos maiores que 9 metros, reduzindo a quantidade de pilares, fundações e o tempo de construção.



Hoje é possível projetar edifícios utilizando vigas alveolares mistas de maneira econômica para vãos de até 18 metros. Devido ao grande comprimento da viga sua altura será maior, mas os dutos de serviços podem ser acomodados em suas aberturas, fazendo com que não haja acréscimo significativo na altura total do pavimento.

A viga alveolar mista apresenta maior resistência e rigidez se comparado à alveolar de aço, pois a laje de concreto aumenta a altura efetiva da viga elevando a linha neutra para perto da mesa superior do perfil.

### **3. VANTAGENS E DESVANTAGENS**

A maior vantagem das vigas casteladas e alveolares é permitir uma capacidade resistente muito superior àquela dos perfis originais, com praticamente o mesmo peso de aço, devido à sua maior altura da seção transversal. Ressaltando-se ainda a possibilidade de se inserir chapas planas retangulares entre as duas metades cortadas do perfil original, resultando em uma viga com seção transversal de altura ainda mais elevada. Como a altura da seção transversal aumenta, conseqüentemente a sua rigidez se eleva consideravelmente. Dessa forma, a solução com vigas casteladas e alveolares se torna muito interessante quando se deseja a redução de flechas ou de vibrações excessivas de pisos. Por sua vez o custo é relativamente pequeno, quando comparado ao aumento da rigidez e capacidade resistente. Essas vigas vencem vãos maiores, permitindo a redução de pilares e fundações, conduzindo a uma montagem mais rápida e mais econômica. Em comparação às treliças de cobertura as vigas casteladas apresentam custos menores de montagem, manutenção e fabricação.

Outra vantagem digna de destaque é a possibilidade da passagem de dutos pelas aberturas (Figura 1), evitando-se cortes na alma ou o aumento da altura da construção, visto que, no caso de usarem-se as vigas padrões, sem furos, os dutos devem passar sob as mesmas, havendo necessidade de aumentar o pé-direito dos pavimentos.

Adicionalmente as vigas casteladas possuem o aspecto estético como vantagem. Elas são bastante aplicadas pelos arquitetos, os quais, com frequência, utilizam-nas em locais nos quais ficam visíveis. Eles também valorizam o fato das aberturas proporcionarem maior iluminação e circulação de ar no ambiente.

Apesar das inúmeras vantagens das vigas castelares, elas apresentam também algumas desvantagens. A capacidade resistente à força cortante é reduzida, motivo pelo qual são mais adequadas para grandes vãos submetidos a cargas não elevadas.

Nas regiões em que ocorrem simultaneamente altos valores de força cortante e momento fletor, as vigas casteladas não são eficientes, pois podem exigir reforço na alma, como é o caso de vigas em balanço e vigas contínuas.

Em edificações que necessitam de rigorosos critérios de resistência contra incêndios, as vigas casteladas podem não ser competitivas, pois podem necessitar de materiais de proteção ao fogo de ordem de 20% superior às vigas de alma cheia.

No caso de cargas localizadas, em especial, quando atuam em uma ou duas mesas comprimindo a alma, as vigas casteladas podem exigir reforços, em virtude de não terem uma adequada eficiência às cargas localizadas.

### **4. CONFIGURAÇÃO DAS ABERTURAS**

Os parâmetros geométricos relacionados às aberturas na alma definem completamente a geometria da viga (Figura 1). Tais aberturas dependem de seu processo de fabricação e da finalidade para o qual são projetadas.

Para as vigas casteladas, em função de antigas limitações dos métodos de produção, tradicionalmente utilizam-se dois padrões de corte: *Padrão Peiner* e *Padrão Anglo-Saxônico*. Nada impede que diferentes formas geométricas sejam adotadas, desde que os modos de colapso sejam verificados.

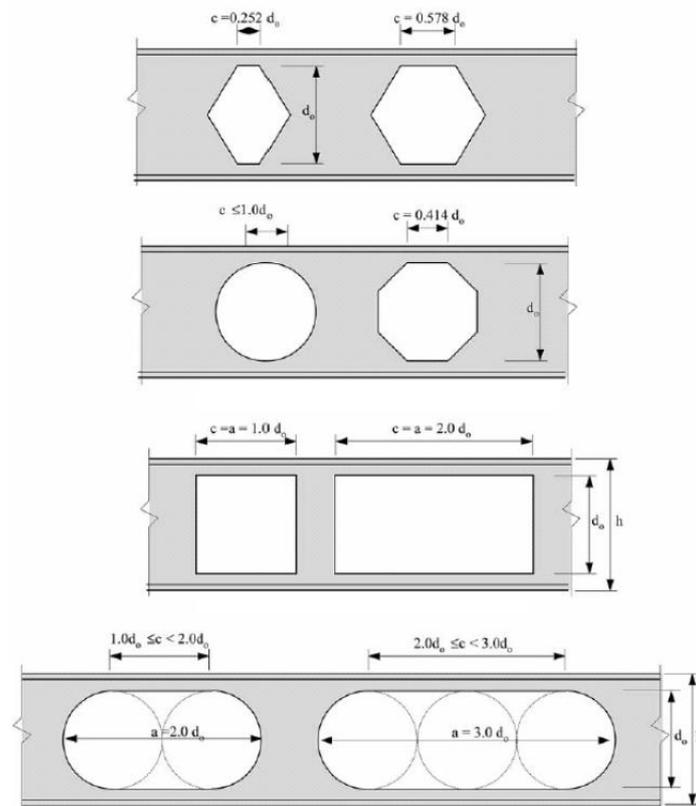


Figura 1 – Diferentes formas de abertura

#### 4.1. Padrão Peiner

Utilizado tradicionalmente na Europa, possui as características (Figura 2):

- Relação entre alturas da viga castelada e da viga original igual a 1,5;
- Deslocamento que uma metade sofre em relação à outra (lance) igual à altura da viga castelada;
- Ângulo de corte dos lados inclinados da abertura igual a  $63,5^\circ$ .

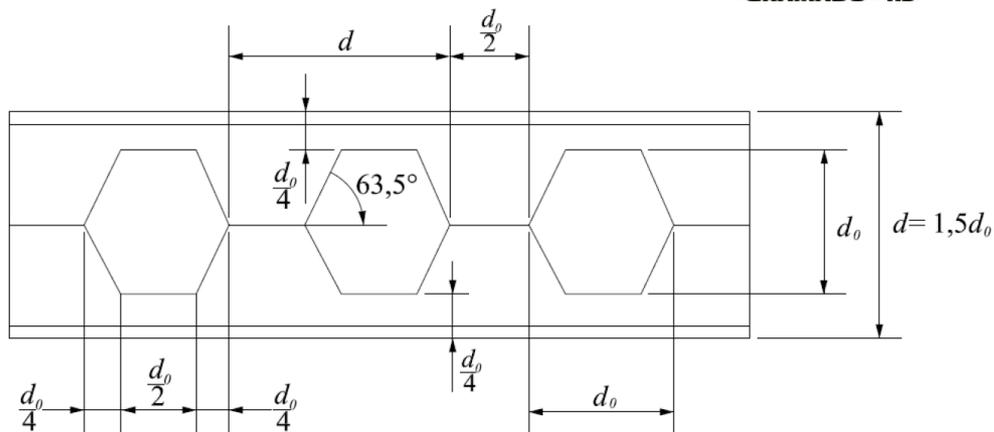


Figura 2 – Parâmetros do padrão Peiner

#### 4.2. Padrão Anglo-Saxônico

Utilizado tradicionalmente nos Estados Unidos, Canadá e Inglaterra, possui as seguintes características (Figura 3):

- Relação entre alturas da viga castelada e da viga original igual a 1,5;
- Deslocamento que uma metade sofre em relação à outra (lance) igual a 1,08 vezes a altura da viga;
- Ângulo de corte dos lados inclinados da abertura igual a  $60^\circ$

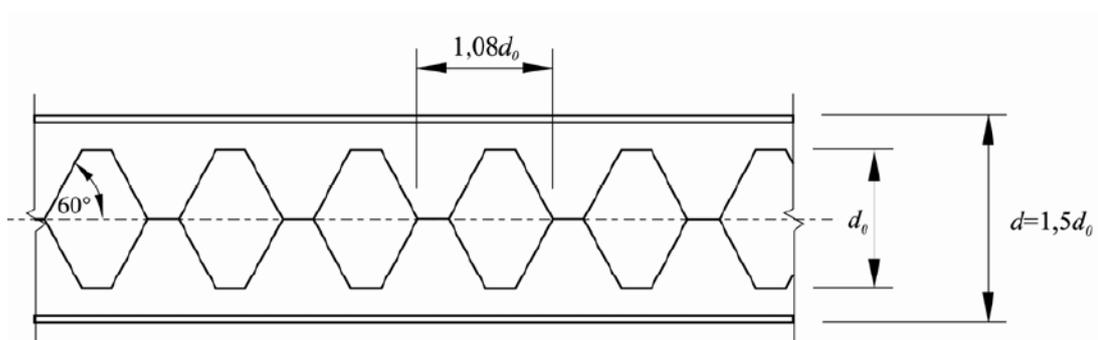


Figura 3 – Parâmetros do padrão Anglo-Saxônico

### 5. PROCESSO DE FABRICAÇÃO

As vigas casteladas e celulares são feitas a partir de perfis de seção I ou H, cuja alma é cortada longitudinalmente no formato desejado. Em seguida, as duas metades são deslocadas e soldadas pelo eixo, de forma a gerar aberturas em sequência ao longo da alma e acréscimo na altura da seção transversal.

As Figuras 4 e 5 a seguir ilustram o processo de fabricação de vigas casteladas e celulares.

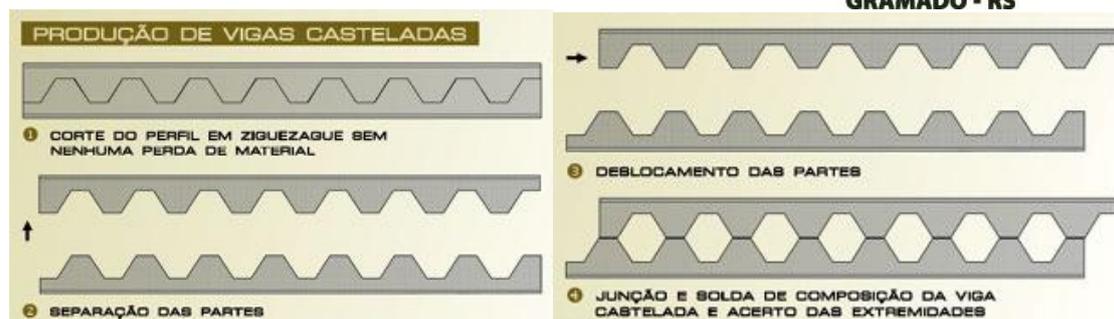


Figura 4 – Esquema de produção de vigas casteladas

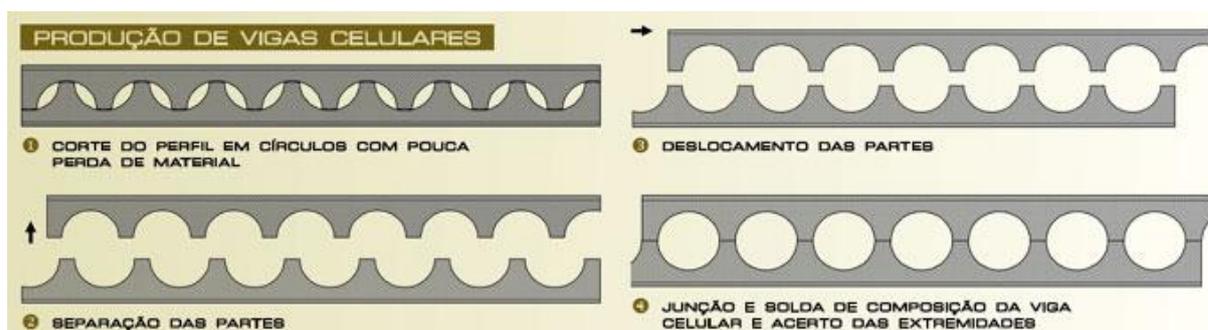


Figura 5 – Esquema de produção de vigas celulares

Em opção, pode-se fazer o acréscimo de chapas planas no montante da alma, de forma a gerar um acréscimo ainda maior na altura do perfil (Figuras 6, 7 e 8).

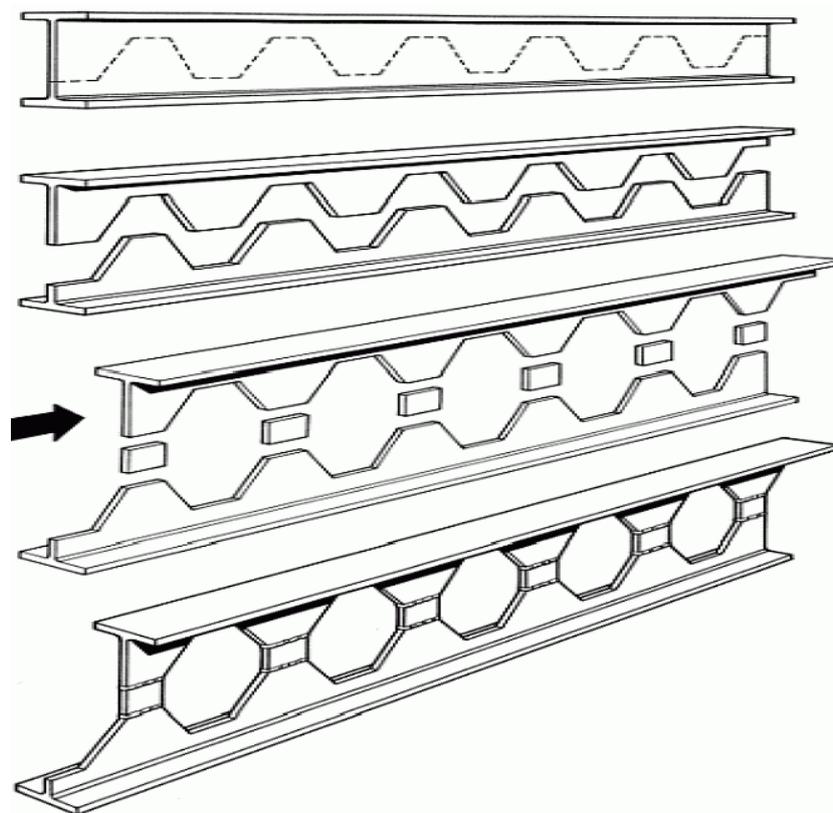


Figura 6 - Inserção de chapas planas no montante da alma

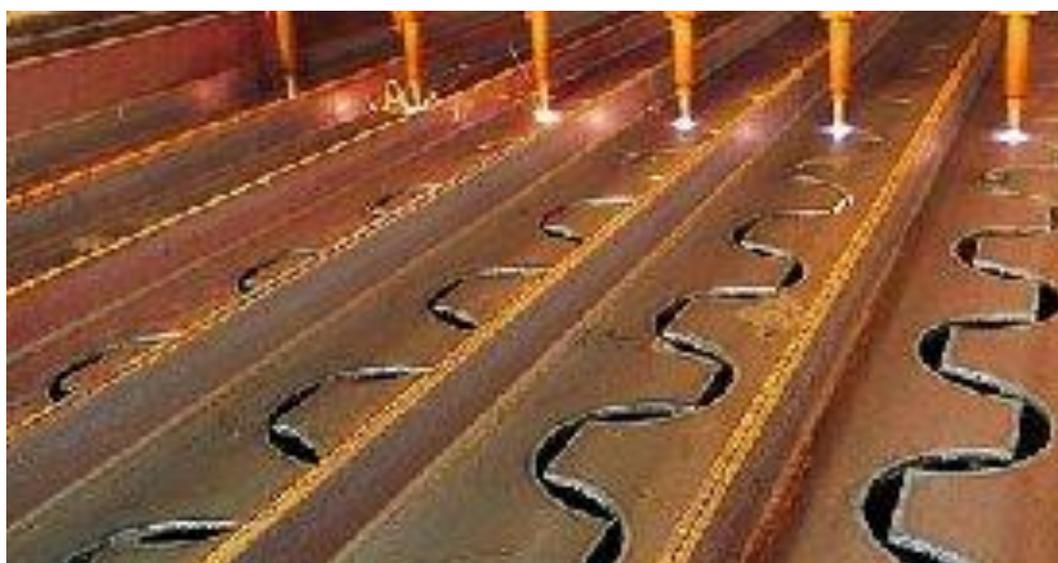


Figura 7 - Produção de vigas celulares



Figura 8 - Produção de viga castelada

## 6. MODOS DE COLAPSO

Além de alguns modos de colapso de vigas de alma cheia serem potencializados, como, por exemplo, a flambagem lateral com torção, as aberturas na alma da viga possibilitam o aparecimento de novos modos.

Se considerado um carregamento que produza momento fletor e força cortante, os modos de colapso que podem aparecer são apresentados a seguir.

### 6.1. Formação de mecanismo Vierendel ou de cisalhamento

A presença de altos valores de força cortante na viga acarreta a formação de mecanismo Vierendel (Figura 9). Ocorrerá o surgimento de rótulas plásticas nos cantos das aberturas, deformando a viga em forma de paralelograma. Esse fenômeno está propenso a ocorrer nas vigas de pequenos vãos com pequenas aberturas dos “tês” inferior e superior e grande comprimento de solda entre duas aberturas. O colapso acontecerá na abertura em que a máxima força cortante estiver atuando. No vão de abertura com mesma força cortante, esse colapso ocorrerá na abertura em que atuar o maior momento.

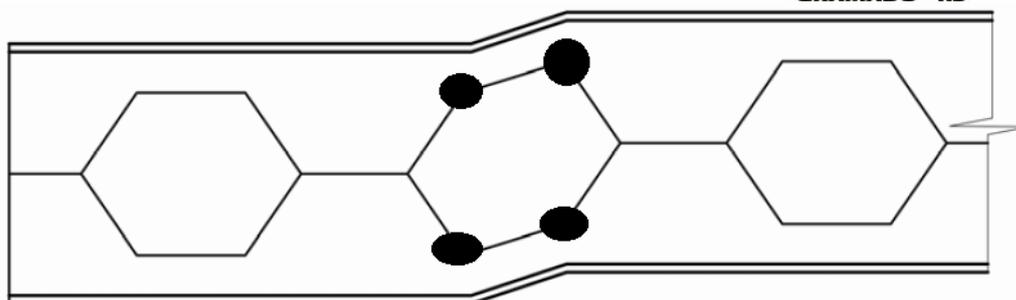


Figura 9 - Formação de mecanismo Vierendel em vigas casteladas

### 6.2. Formação de rótula plástica

Esse tipo de modo de colapso ocorre quando a ação do momento fletor faz os “tês” superior e inferior escoarem por tração e compressão (binário de forças longitudinais). O momento resistente é igual ao momento de plastificação no centro da abertura.

### 6.3. Ruptura da solda entre as aberturas

A ruptura entre duas aberturas ocorrerá quando a tensão horizontal de cisalhamento exceder a capacidade resistente da solda entre as aberturas. Esse modo de colapso vai depender do comprimento entre as aberturas. Haverá maior possibilidade de colapso quanto menor for a comprimento entre aberturas (Figura 10).

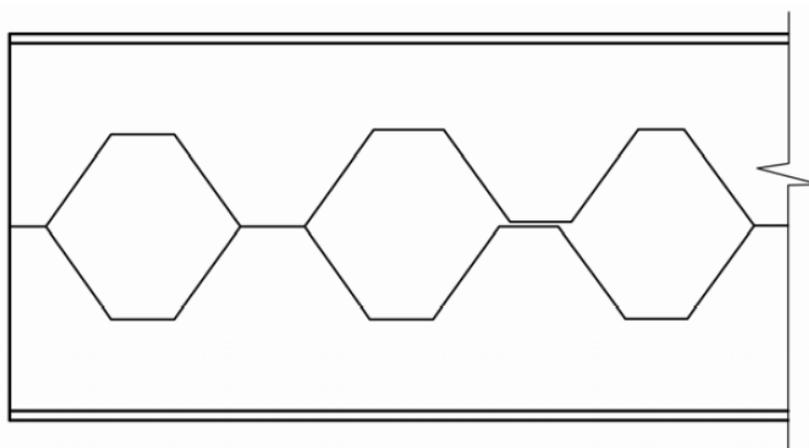


Figura 10 Colapso da solda entre aberturas

### 6.4. Flambagem do montante da alma devido à força cortante em viga castelada

A força cortante horizontal atuando ao longo da solda, produz um momento no montante da alma, que é equilibrado pela força cortante  $V/2$ , conforme mostra a Figura 11. Assim, a face AB fica tracionada e a face CD comprimida, podendo flambar.

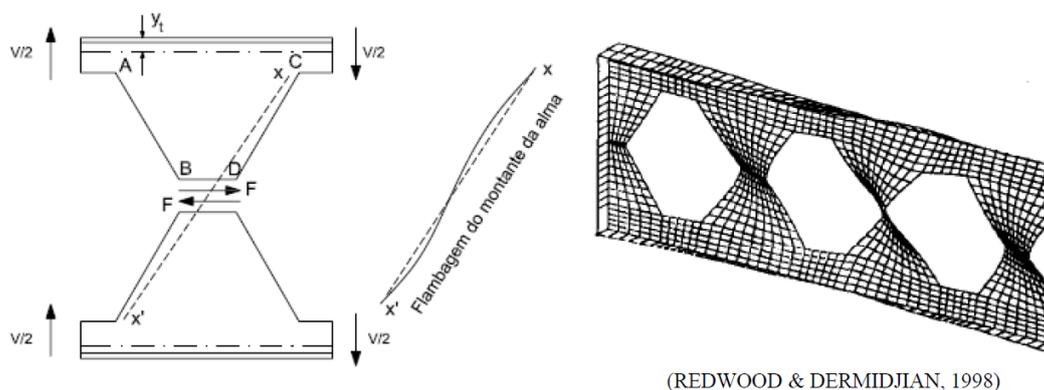


Figura 11 - Flambagem do montante da alma devido à força cortante

### 6.5. Flambagem por compressão do montante da alma

A flambagem por compressão do montante da alma ocorre pela presença de cargas localizadas ou reações de apoios aplicados diretamente no montante da alma. Ela é semelhante à flambagem por flexão de barras axialmente comprimidas.

## 7. CONCLUSÃO

Este artigo apresenta de forma didática, uma visão geral sobre as vigas casteladas e celulares, também conhecidas como vigas alveolares. Ao longo do texto são apresentadas as vantagens e desvantagens de seu uso nesse tipo de solução estrutural para vigas, as configurações das aberturas, as quais se destacam os padrões Peiner e anglo-saxônicos. Há um importante esclarecimento sobre o processo de fabricação e, mais importante ainda, os modos de colapso. A abordagem é didática e qualitativa, traduzindo-se em uma leitura leve e informativa, visando despertar o interesse de estudantes de engenharia civil e mecânica, com mais esta alternativa de solução estrutural para edificações estruturadas em aço.

Na busca constante de soluções de engenharia mais econômicas e eficientes, como vencer vãos livres maiores, redução de espaço estrutural, menor sensibilidade a deformações e redução de peso médio das estruturas, as vigas alveolares são uma opção competitiva em termos de estruturas metálicas.

O uso das vigas alveolares no Brasil está muito aquém de suas potencialidades por não constarem na norma de projeto de estruturas de aço, ABNT NBR 8800:2008, e por serem desconhecidas da maioria dos projetistas estruturais. O presente trabalho tem por objetivo apresentar uma visão geral sobre as vigas alveolares, pois são elementos estruturais com grande potencial de aplicação em estruturas de piso e sistemas de cobertura em edificações em aço, cobrindo assim uma lacuna nos programas dos cursos de engenharia civil e mecânica, no que diz respeito a opções de soluções em vigas.

### *Agradecimentos*

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES).



## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, L. M. P.; FAKURY, R. H.; SILVA, A. L. R. C.; CALENZANI, A. F. G. . Análise elástica da flambagem lateral com torção de vigas celulares. In: CILAMCE 2009, Búzios. Anais do CILAMCE 2009. Rio de Janeiro: UFRJ, 2009. v. 1. p. 01-13.
- 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.
- BEZERRA, Eduardo Matos. Determinação do Momento Fletor Resistente à Flambagem Lateral com Torção de Vigas de Aço Castelladas. Belo Horizonte, 2011.
- GAMA, Felipe Ozório Monteiro da. Avaliação Numérica de Estabilidade Lateral de Vigas Castelladas. Rio de Janeiro, 2011.
- MÔNICO, J. M. R., Visão geral de vigas de aço com aberturas sequenciais na alma: casteladas e celulares, Nota técnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFES, 2012.
- PINHO, F. O., Vigas casteladas e celulares. Estruturas metálicas com mais resistência, menos deformação e redução de peso. [www.arcorweb.com.br](http://www.arcorweb.com.br). 2009.
- PINHO, F. O., Vigas casteladas e celulares. [www.metalica.com.br](http://www.metalica.com.br). 2010.
- WARD, J. K., Design of composite and non-composite cellular beams, SCI Publication 100, 1994.

### **DIDACTIC OVERVIEW OF STEEL BEAMS WITH SEQUENTIAL OPENINGS IN THE WEB: CASTELLATED AND CELLULAR**

**Abstract:** *The Brazilian civil construction traditionally employs reinforced concrete as the material for the structural elements of buildings. However, in the industrial sector is common the use of structural steel solutions and, in recent years, other segments of the civil construction also began to adopt steel structures. The steel has higher resistance than reinforced concrete and for this reason it provides lighter structures. In addition, several advantages are related to its use, for example, the speed of erection and construction. Currently, rolled and welded I profiles are more used as structural elements. This article explores an alternative and innovative solution for steel beams, presenting a didactic approach about the castellated and cellular beams. These beams are made from rolled profiles, by means of a longitudinal cut in web, and subsequent welding of the separated parts in order to obtain hexagonal openings - forming beams castellated - or circular openings - forming cellular beams. Without focusing on design procedures, this article presents an explanation about the advantages and disadvantages, geometries, manufacturing processes and behavior with respect to buckling modes. In a clear and didactic, this article presents relevant information about the castellated and cellular beams in order to stimulate the interest and motivation of civil and mechanical engineering students in new steel products. This document presents detailed instructions.*

**Key-words:** *Steel Structures, Castellated Bemas, Cellular Beams*