

Study of methods for the design of cellular composite steel and concrete beams

Estudo de metodologias para o dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto com perfil celular

A. BADKE-NETO ^a
augbadke@gmail.com

A. F. G. CALENZANI ^a
afcalenzani@gmail.com

W. G. FERREIRA ^a
walnorio@gmail.com

Abstract

Currently, with the advancement of welding and cutting technology, steel profiles with circular openings, called cellular profiles, have become widely used as beams. The ABNT NBR 8800:2008 and international standards do not address cellular steel beams and cellular composite steel and concrete beams, which contributes to their limited use. A computer program was developed and validated for the design of cellular composite steel and concrete simply supported beams based on two different methods from the literature. The use of this computational tool made possible a parametric study comprising cellular composite beams obtained from two different rolled steel I sections. In this study, the influence of the geometric parameters of the cellular profile and the influence of beam span in the strength and in the failure mode was analyzed. It was concluded that in many situations the use of composite cellular beams is advantageous in relation to original composite beams.

Keywords: cellular composite steel and concrete beams, cellular beams, design.

Resumo

Atualmente, com o avanço da tecnologia de corte e solda, perfis de aço com aberturas sequenciais na forma circular, denominados perfis celulares, vêm sendo bastante utilizadas como vigas de edificações. A ABNT NBR 8800:2008 e as normas estrangeiras não abordam vigas de aço e vigas mistas de aço e concreto com perfil celular, o que contribui para que o seu uso seja limitado. Foi desenvolvido e aferido um programa computacional para o dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto com perfil celular biapoiaadas de acordo com duas metodologias distintas da literatura. Um estudo paramétrico abordando vigas mistas com perfis celulares obtidos de dois perfis I de aço laminados comerciais foi realizado. Nesse estudo, a influência dos parâmetros geométricos do perfil celular e do comprimento do vão da viga na resistência e na forma de colapso foi analisada. Foi possível concluir que em muitas situações o uso de vigas mistas com perfil celular é vantajoso em relação às vigas mistas de alma cheia.

Palavras-chave: vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares, vigas alveolares, dimensionamento.

^a Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

1. Introdução

1.1 Generalidades

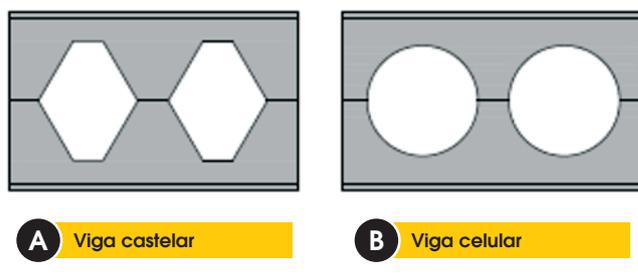
As vigas com aberturas sequenciais na alma foram criadas a partir de necessidades estruturais de redução de peso e atendimento aos critérios de resistência aos esforços solicitantes e são fabricadas a partir de perfis laminados, com aberturas padronizadas na alma. As aberturas são também denominadas alvéolos, motivo pelo qual, em engenharia estrutural, são referenciadas algumas vezes como vigas alveolares. Essas vigas também são referidas na literatura técnica como “vigas de alma expandida”. As aberturas na alma podem ser fabricadas na forma de hexágonos ou círculos, resultando respectivamente, em vigas castelares ou celulares, Figura 1.

As vigas 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, Figura 1.

A busca por uma utilização racional dos recursos no projeto de edifícios de estruturas de aço, muitas vezes, induz a opção por soluções que propiciem a integração das instalações com a estrutura. Nesse sentido, o projeto de vigas de aço com aberturas na alma para passagem de dutos de serviço das edificações tem sido cada vez mais demandado. As vigas celulares são bastante empregadas por possibilitarem a passagem de dutos pelas aberturas, integrando as instalações com o sistema de piso, reduzindo o espaço vertical necessário por pavimento.

A viga celular tem representado uma solução altamente competitiva. Uma de suas grandes vantagens é o fato de com praticamente a mesma quantidade de aço dos perfis originais, possuir uma capacidade resistente ao momento fletor muito superior, por causa da maior altura da seção transversal, sendo assim possível vencer vãos maiores, o que refletirá na redução dos números de pilares e conseqüentemente, em um menor custo e maior velocidade na montagem. Ainda sob o ponto de vista econômico, as operações de fabricação apresentam custo relativamente pequeno, e é compensado pelo aumento da capacidade resistente e da rigidez.

Figura 1 – Vigas de aço com aberturas sequenciais na alma



Em contrapartida às vantagens, as vigas apresentam capacidade resistente reduzida à força cortante, o que pode exigir um reforço na alma, gerando um custo significativo. Ainda são pouco eficientes na resistência aos esforços decorrentes de forças localizadas, sendo mais apropriadas para grandes vãos submetidos a pequenas cargas.

As vigas alveolares podem ser projetadas como mistas quando existir uma conexão de cisalhamento entre o perfil de aço e a laje de concreto, podendo assim vencer vãos ainda maiores que os da viga mista convencional, dado ao aumento de rigidez proporcionado pela geometria do perfil alveolar.

As vigas celulares possuem seu uso muito aquém de suas potencialidades por não constarem na norma nacional de projeto de estruturas de aço, ABNT NBR 8800:2008 [2] e também por serem desconhecidas da maioria dos projetistas.

Esse trabalho de pesquisa tem como objetivo principal desenvolver um programa computacional com as metodologias de Ward [3] e Lawson e Hicks [4] para o dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares a fim de analisar a influência da geometria do perfil celular na carga última e no modo de colapso de uma série de vigas mistas com perfis celulares e laje mista de aço e concreto. Adicionalmente, os resultados obtidos do programa computacional para cada metodologia são comparados entre si e com resultados experimentais da literatura.

Figura 2 – Fabricação das vigas celulares (1)

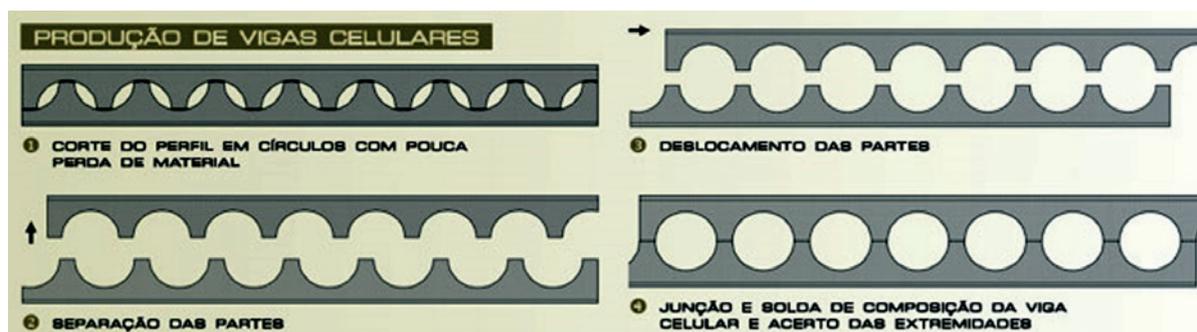
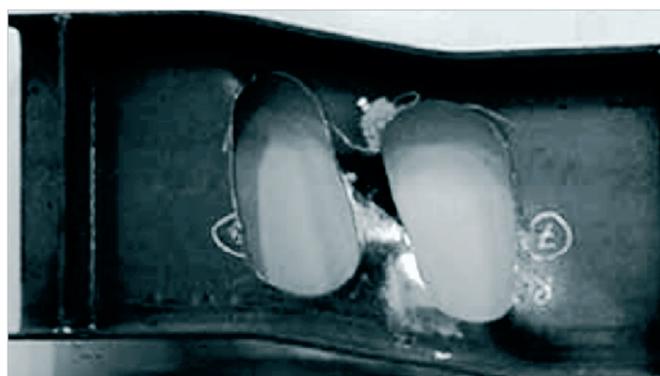
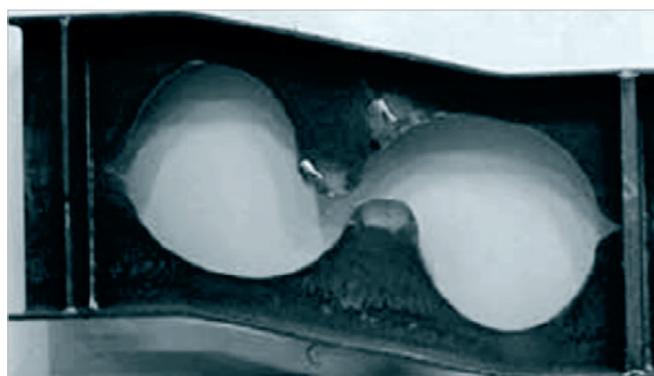


Figura 3 – Modos de colapso (5)



A Mecanismo Vierendeel



B Colapso da solda entre as aberturas

1.2 Modos de colapso

1.2.1 Formação do mecanismo Vierendeel

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

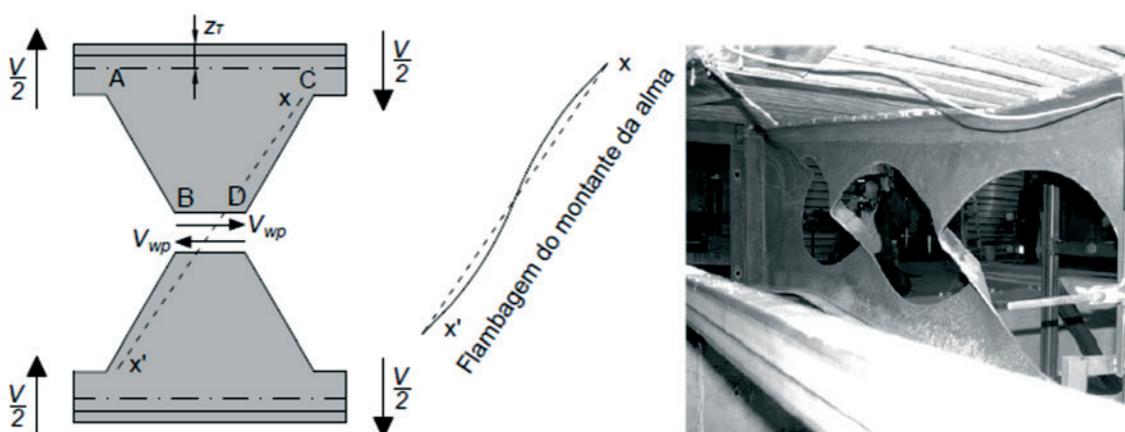
1.2.2 Formação de rótula plástica

Esse 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.

1.2.3 Ruptura da solda entre as aberturas

A ruptura na junção das duas metades do perfil ocorrerá quando o esforço horizontal de cisalhamento nessa região exceder a força resistente da solda (Figura (b)). Esse modo de colapso vai depender do comprimento entre as aberturas. Haverá maior possibilidade de colapso quanto menor for a comprimento entre aberturas.

Figura 4 – Flambagem do montante da alma devido à força cortante (7)



1.2.4 Flambagem lateral com torção

A flambagem lateral com torção é caracterizada por um deslocamento lateral e um giro da seção transversal. De acordo com Kerdal e Nethercot [6], as vigas alveolares e as vigas de alma cheia possuem comportamentos similares quanto à flambagem lateral, porém as propriedades geométricas das vigas alveolares devem ser tomadas no centro das aberturas.

1.2.5 Flambagem do montante da alma por cisalhamento

A força de cisalhamento V_{wp} (Figura), que surge ao longo da junta soldada solicita o montante da alma à flexão, causando esforço de tração no contorno AB e de compressão no contorno CD. Na flambagem do montante da alma a parte comprimida tende a se deslocar para fora do plano longitudinal do perfil enquanto a parte tracionada tende a permanecer na posição inicial. De acordo com Kerdal e Nethercot [6], esse modo de colapso ocorre normalmente em regime inelástico ocorrendo uma significativa plastificação das seções.

1.2.6 Flambagem do montante da alma por compressão

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.

1.3 Metodologias para o dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares

Nessa pesquisa foram utilizadas duas metodologias para o dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares, extraídas dos guias de projeto de Lawson e Hicks [4] e de Ward [3]. Ambos os guias de projeto utilizam as prescrições das normas europeias quando se referem a estados limites e resistências de cálculo já consagradas. As formulações das metodologias citadas foram adaptadas para atenderem os critérios da ABNT NBR 8800:2008. A seguir são descritos, de forma sucinta, os esforços resistentes para cada estado limite último abordado por essas metodologias.

1.3.1 Metodologia de Lawson e Hicks [4]

1.3.1.1 Esforço cortante resistente na seção da abertura

A resistência ao esforço cortante da seção transversal de uma viga mista celular é estabelecida como o esforço cortante resistente do perfil de aço mais o esforço cortante resistente da laje de concreto. O esforço cortante resistente de plastificação do perfil de aço na seção da abertura é igual a:

$$V_{pl,Rd} = \frac{0.6A_w f_y}{\gamma_{a1}} \tag{1}$$

onde A_w é a soma das áreas das almas dos tês superior e inferior, f_y é tensão de escoamento do aço e γ_{a1} é o coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,10.

Se a laje for mista de aço e concreto, o esforço cortante resistente da por unidade de comprimento deve ser obtido segundo a ABNT NBR 8800:2008 [2]. Caso a laje seja maciça de concreto, utiliza-se a ABNT NBR 6118:2014 [8] para o cálculo desse esforço. Em ambos os casos, o valor do esforço cortante por metro é multiplicado por uma da largura efetiva, b_w , dada por $b_w = b_f + 2h_{t,ef}$, onde b_f é a largura da mesa do perfil de aço e $h_{t,ef}$ é a altura efetiva da laje. Independentemente da utilização de forma de aço incorporada, a altura efetiva da laje pode ser considerada como 75% da sua altura total ($0,75h_t$).

1.3.1.2 Momento fletor resistente na abertura

Existem duas situações diferentes para o cálculo do momento fletor resistente plástico. No primeiro caso é considerado que a linha neutra plástica se encontra na laje de concreto, enquanto no segundo admite-se a sua localização no tê superior do perfil de aço. Quando a linha neutra plástica se encontra na laje, o momento fletor resistente é dado por:

$$M_{o,Rd} = N_{bT,Rd} \left(h_{ef} + z_T + h_t - \frac{1}{2} z_c \right) \tag{2}$$

Quando a linha neutra plástica se encontra no tê superior do perfil de aço, o momento fletor resistente é definido como:

$$M_{o,Rd} = N_{bT,Rd} h_{ef} + N_{c,Rd} \left(z_T + h_t - \frac{1}{2} t_c \right) \tag{3}$$

em que $N_{bT,Rd}$ é o esforço axial de tração resistente de projeto do tê inferior, h_{ef} é a altura efetiva da viga entre os centros de gravidade dos tês, h_t é a altura total da laje de concreto, z_T é a distância entre a extremidade da mesa e o centro de gravidade do tê superior, z_c é a altura de concreto em compressão e $N_{c,Rd}$ é o esforço axial de compressão resistente da laje.

1.3.1.3 Verificação do mecanismo Vierendeel

A resistência à flexão de Vierendeel consiste na soma dos momentos fletores locais resistentes dos quatro cantos da abertura com o momento fletor resistente local devido à interação do tê superior com a laje de concreto. O momento fletor resistente de Vierendeel deve ser maior que a diferença dos valores dos momentos fletores solicitantes de cálculo, provocados pelo esforço cortante solicitante, à esquerda e à direita da abertura equivalente, conforme dado por:

$$2M_{b,NV,Rd} + 2M_{t,NV,Rd} + M_{vc,Rd} \geq V_{Sd} l_e \tag{4}$$

em que $M_{b,NV,Rd}$ é o momento fletor resistente reduzido do tê inferior para a presença de esforço cortante e axial, $M_{t,NV,Rd}$ é o momento fletor resistente reduzido do tê superior para a presença

de esforço cortante e axial, $M_{vc,Rd}$ é o momento fletor resistente local devido à interação do t^e superior com a laje de concreto. O valor de V_{sd} é estabelecido, conservadoramente, como o valor de esforço cortante que atua na extremidade da abertura em que o momento fletor solicitante é menor. Nas aberturas circulares, o método de cálculo estabelece uma abertura retangular equivalente, onde a sua altura é designada como $h_{eo} = 0,9d_o$ e o seu comprimento equivalente é dado por $l_e = 0,45d_o$, sendo d_o o diâmetro das aberturas.

1.3.1.4 Esforço cortante longitudinal

O valor de cálculo do esforço cortante longitudinal resistente do montante da alma pode ser estabelecido como:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0.6s_o t_w f_y}{\gamma_{al}} \tag{5}$$

em que s_o é a largura do montante da alma e t_w é a espessura da alma do perfil de aço.

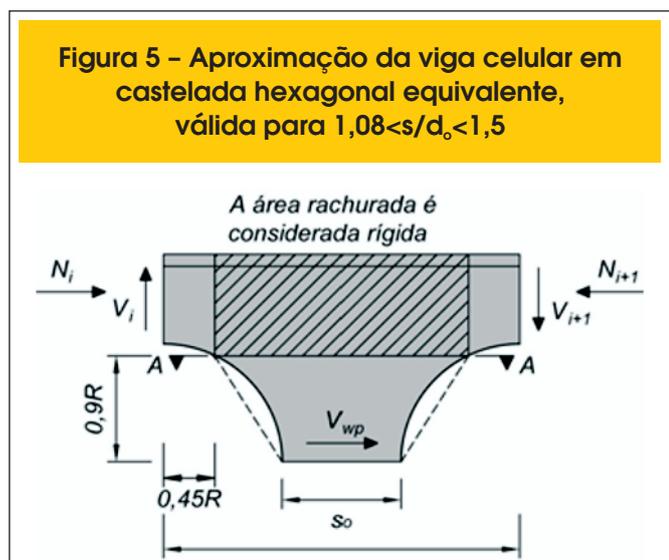
1.3.1.5 Momento fletor resistente do montante da alma

O cálculo do momento fletor resistente de projeto do montante da alma deve ser efetuado utilizando o módulo resistente elástico da seguinte forma:

$$M_{wp,Rd} = \frac{s_o^2 t_w f_y}{6 \gamma_{al}} \tag{6}$$

1.3.1.6 Flambagem do montante da alma

No cálculo do valor de cálculo da resistência à flambagem é ne



cessário determinar o coeficiente de redução (χ) estabelecido na curva de resistência à compressão da ABNT NBR 8800:2008. No entanto, a esbelteza reduzida do montante da alma é calculada como:

$$\lambda_o = \frac{1.75\sqrt{s_o^2 + d_o^2}}{t_w \lambda_1} \tag{7}$$

onde: $\lambda_1 = \pi\sqrt{E/f_y}$, sendo E e f_y o módulo de elasticidade e a tensão de escoamento do aço, respectivamente. O valor da resistência à flambagem para aberturas adjacentes é dado por:

$$N_{wp,Rd} = \chi \frac{s_o t_w f_y}{\gamma_{al}} \tag{8}$$

1.3.2 Metodologia de Ward (1990)

1.3.2.1 Esforço cortante resistente na seção da abertura

O esforço cortante resistente na seção da abertura é tomado igual ao esforço cortante resistente de projeto do perfil de aço, calculado pela Equação (1). Portanto, a resistência ao esforço cortante da laje de concreto é ignorada.

1.3.2.2 Momento fletor na abertura

O momento fletor resistente de uma viga celular mista pode ser determinado utilizando distribuição plástica de tensões de forma semelhante ao descrito na ABNT NBR 8800:2008 [2] para vigas mistas de alma cheia sob momento positivo e interação total. Quando a interação é parcial, o momento resistente da viga mista celular é dado por:

$$M_{Rd} = M_{el} + \eta_i (M_{pl} - M_{el}) \tag{9}$$

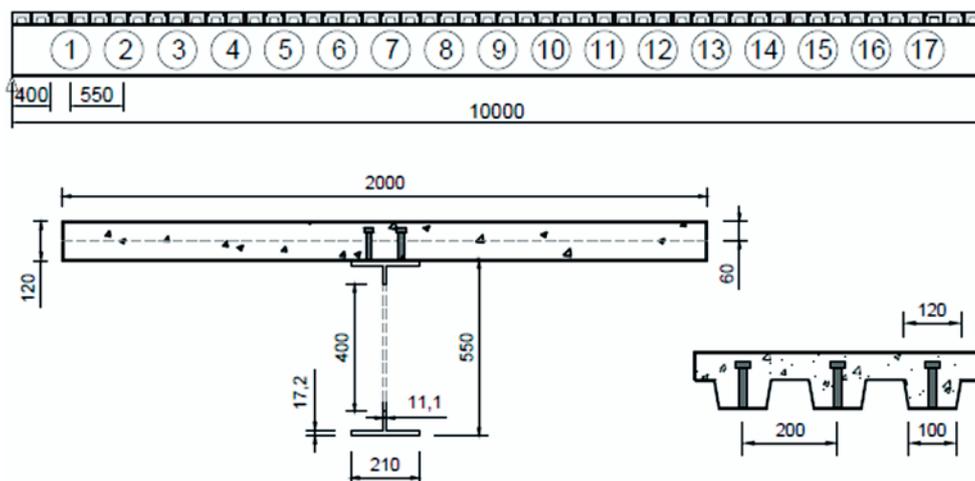
em que M_{el} é o momento resistente elástico do perfil de aço (de ambos os t^{es}), η_i é o grau de interação e M_{pl} é o momento resistente de plastificação da viga mista com interação total.

1.3.2.3 Mecanismo Vierendeel

O mecanismo Vierendeel ocorre devido a formação de rótula plástica em um determinado ângulo da abertura circular, cuja seção a ele associada é denominada seção crítica. A interação de momentos secundários e esforço axial, devido à transferência do esforço cortante e do esforço axial local (causado pela flexão da viga) através da abertura é verificada utilizando a seguinte equação:

$$\frac{N'}{N'_{Rd}} + \frac{M'}{M'_{pl}} \leq 1 \tag{10}$$

Figura 6 - Características geométricas da viga mista de Oliveira (9) (dimensões em milímetros)



em que N' e M' são forças na seção crítica, N'_{Rd} é o produto da área da seção crítica pela tensão de escoamento do aço, f_y , e M'_{pl} é igual ao momento de plastificação na seção crítica para seções compactas e igual ao momento de início de escoamento para as demais seções.

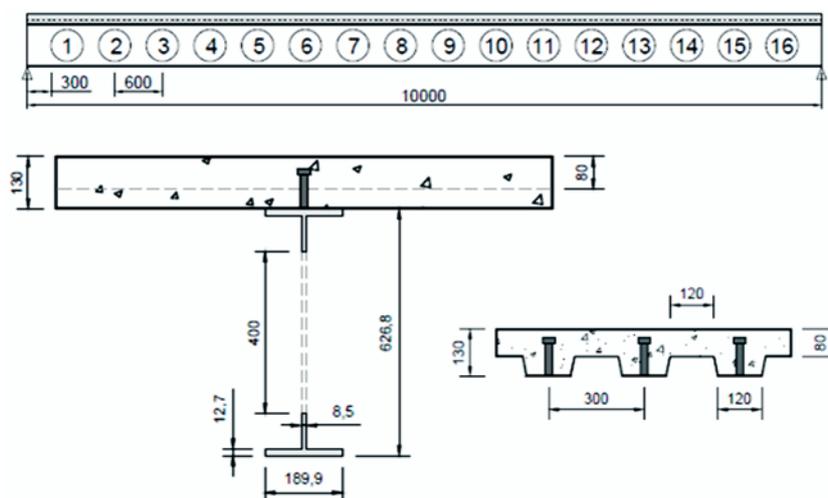
1.3.2.4 Esforço cortante longitudinal

O esforço cortante longitudinal resistente é calculado pela metodologia de Ward [3] da mesma forma como mostrado para a metodologia de Lawson e Hicks[4].

1.3.2.5 Flexão e flambagem do montante da alma

A resistência do montante da alma é governada por dois modos de colapso: o colapso por flexão, causado pela formação de rótula plástica, e a flambagem. O modo de colapso depende da espessura da alma e da relação s/d_o (distância entre aberturas/diâmetro da abertura). Após uma série de análises não-lineares com elementos finitos foram feitas curvas de dimensionamento para o montante da alma, as quais resultaram na seguinte equação de verificação:

Figura 7 - Características geométricas da viga mista de Ward (3) (dimensões em milímetros)



$$\frac{M_{\max}}{M_e} = \left[C_1 \left(\frac{s}{d_o} \right) - C_2 \left(\frac{s}{d_o} \right)^2 - C_3 \right] \quad (11)$$

em que M_{\max} é igual ao momento máximo admissível na seção A-A da Figura , M_e é igual ao momento resistente elástico da seção A-A da Figura e C_1 , C_2 e C_3 são constantes definidas em função do diâmetro das aberturas e espessura da alma do perfil de aço.

2. Metodologia

2.1 Sobre o programa

O programa computacional para o dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto com perfis de aço celulares, denominado DIMCEL, foi desenvolvido em MATLAB (2010) abordando as metodologias de Lawson e Hicks [4] e Ward [3]. O programa verifica a condição de segurança para vigas simplesmente apoiadas com seção mista de aço e concreto composta por perfis de aço celulares simétricos em relação ao plano de flexão, sem enrijecedores na alma e sem preenchimento de aberturas. Também possibilitam a verificação da segurança de vigas de aço celulares, ou seja, sem levar em conta a contribuição da laje de concreto, porém considera contenção lateral contínua. Assim, ambos os tipos de construção podem ser analisados: construção escorada e construção não escorada. Para o caso de construção não escorada, basta fazer a verificação adicional da viga de aço com perfil celular sujeita apenas aos carregamentos de construção.

Dois tipos de laje de concreto são considerados para a viga

mista: a laje maciça de concreto e a laje mista de aço e concreto. Para a conexão de cisalhamento, são abordados apenas os conectores do tipo pino com cabeça. Os carregamentos podem ser distribuídos ao longo do comprimento da viga ou concentrados em locais pré-estabelecidas pelo usuário.

2.2 Validação do programa

Para a validação do programa, foram selecionados dois exemplos numéricos disponíveis na literatura. O exemplo de Oliveira [9] foi utilizado na validação da metodologia de Lawson e Hicks [4] e a metodologia de Ward [3] foi validada com o exemplo contido no seu guia de dimensionamento.

O exemplo de Oliveira [9] corresponde a uma viga mista de aço e concreto com perfil celular biapoiada, as características geométricas da viga mista são mostradas na Figura . O perfil de aço celular foi obtido de um perfil IPE 550. O aço do perfil é o S235. Antes da cura do concreto o peso próprio da viga é de 7,35 kN/m, depois da cura o peso próprio é de 7,11 kN/m, a carga permanente é de 3 kN/m e a sobrecarga de 15 kN/m. A resistência do concreto à compressão é de 30 MPa. A distância entre a viga estuda e as vigas adjacentes é de 2 m. Foram utilizados conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça (*Stud Bolt*) com diâmetro de 19 mm e disposição de dois conectores por nervura.

O exemplo de Ward [3] corresponde a uma viga mista de aço e concreto com perfil celular biapoiada, as características geométricas da viga mista são mostradas na Figura . O perfil de aço celular foi obtido de um perfil UB 457x67. O aço do perfil é o S355. Antes da cura do concreto o peso próprio da viga é de 2,38 kN/m², depois da cura o peso próprio é de 2,24 kN/m², a carga permanente é de 0,5 kN/m² e a sobrecarga de 6 kN/m². A resistência do concreto à compressão é de 30 MPa. A distância entre a viga estuda

Tabela 1 – Comparação dos resultados obtidos do exemplo de Oliveira (9) e do programa computacional

	Momento fletor na abertura (kNm)				Força cortante na abertura (kN)		Mecanismo Vierendeel (kNm)		Cortante longitudinal (kN)	
	M_{Sd}	M_{Rd}	$N_{ab,Sd}$	$N_{ab,Rd}$	V_{Sd}	V_{Rd}	$M_{v,Sd}$	$M_{v,Rd}$	$V_{wp,Sd}$	$V_{wp,Rd}$
Exemplo ¹	451,86	691,51	722,03	1104,97	162,31	390,74	29,22	58,95	131,8	225,9
Programa ²	451,88	625,05	726,21	1004,52	162,31	282,47	29,22	55,11	131,81	213,42
Diferença (%)	0,00	9,61	-0,58	9,09	0,00	27,71	0,00	6,51	-0,01	5,52

	Flexão do montante da alma (kN)		Flambagem do montante da alma (kN)		Restrição ao esforço cortante (kN)			Flecha (mm)
					Flambagem		Flexão	
	$M_{wp,Sd}$	$M_{wp,Rd}$	$N_{wp,Sd}$	$N_{wp,Rd}$	V_{Sd}	V_{Rd}	V_{Rd}	
Exemplo ¹	0	9,78	131,8	302,97	149,11	228,38	368,58	22,33
Programa ²	0	8,89	131,81	284,56	149,12	301,61	330,93	18,2
Diferença (%)	0,00	9,10	-0,01	6,08	-0,01	-32,06	10,21	18,50

¹ Exemplo de Oliveira (9); ² Programa desenvolvido neste estudo.

Tabela 2 – Comparação dos resultados obtidos do exemplo de Ward (3) e do programa computacional

	Momento fletor na abertura (kNm)		Força cortante no apoio (kN)		Força cortante na abertura (kN)		Cortante horizontal (kN)		Resistência do montante da alma (kNm)	
	M_{Sd}	M_{Rd}	V_{Sd}	V_{Rd}	V_{Sd}	$V_{o,Rd}$	$V_{o,Sd}$	$V_{o,Rd}$	M_{AA}	M_{max}
Exemplo ¹	504	808	201,6	1135	181,4	370	139	326	25	45,13
Programa ²	474,54	792,09	190,5	1031,7	171,45	373,29	131,14	329,18	23,61	41,02
Diferença (%)	5,85	1,97	5,51	9,10	5,49	-0,89	5,65	-0,98	5,56	9,11

	Mecanismo Vierendeel	Deflection (mm)
	$\frac{N_{f,Sd}}{N_{f,Rd}} + \frac{M_{sd}}{M_{pl}}$	
Exemplo ¹	0,84	20,6
Programa ²	0,95	20,23
Diferença (%)	-13,10	1,80

¹ Exemplo de Ward (3); ² Programa desenvolvido neste estudo.

e as vigas adjacentes é de 3 m. Foram utilizados conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça (*Stud Bolt*) com diâmetro de 19 mm e disposição de um conector por nervura.

A Tabela 1 compara os resultados do programa com os do exemplo numérico de Oliveira [9], que trata da metodologia de Lawson e Hicks [4] e a Tabela 2 compara os resultados do programa com

os da metodologia de Ward [3]. A aferição do programa foi comprovada porque foi verificado que as diferenças percentuais entre os resultados do programa e dos exemplos numéricos devem-se exclusivamente aos critérios normativos adotados, uma vez que o programa utiliza a ABNT NBR 8800:2008 enquanto os exemplos foram resolvidos de acordo com normas europeias.

Figura 8 – Características geométricas da viga Ulster Beam A1 (dimensões em milímetros)

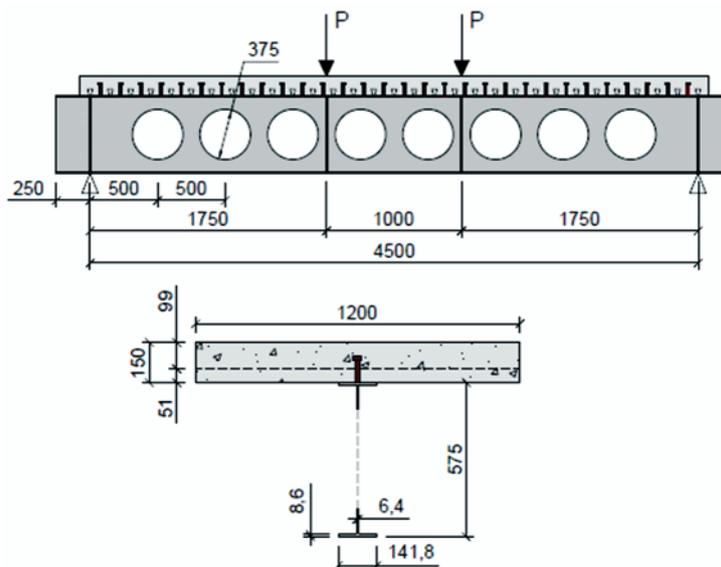


Tabela 3 – Comparação entre os resultados de Nadjai et al. (10) e do programa

	Carga de colapso (kN)	Diferença percentual $(P_p^* - P_e)/P_e \times 100$
Experimental (P_e)	370	-
Lawson e Hicks (4)	310	-16%
Ward (3)	276	-25%

(*) P_p = Carga de colapso obtida pelo programa

Tabela 4 – Comparação entre os resultados de Müller et al. (11) e do programa

	Carga de colapso (kN)	Diferença percentual $(P_p^* - P_e)/P_e \times 100$
Experimental (P_e)	843,7	-
Lawson e Hicks (4)	692	-18%
Ward (3)	556	-34%

(*) P_p = Carga de colapso obtida pelo programa

2.3 Comprovação experimental

2.3.1 Ensaio de Nadjai et al. [10]

A viga mista de aço e concreto com perfil celular, denominada *Ulster Beam A1*, foi ensaiada por Nadjai et al. [10] e corresponde a uma viga biapoiada com carga concentrada aplicada em dois pontos. Na Figura , as características geométricas do modelo experimental são apresentadas: vão de 4500 mm entre apoios, altura expandida igual a 575 mm, diâmetro das aberturas igual a 375 mm e distância entre centros das aberturas de 500 mm. A viga celular de aço foi fabricada a partir de um perfil UB 406×140×39. O aço do perfil é o S355.

A laje mista de aço e concreto possui largura de 1200 mm e altura total de 150 mm, sendo 99 mm de altura da capa de concreto e 51 mm de altura da nervura da forma de aço incorporada, com concreto de densidade normal. A resistência do concreto à compressão foi avaliada por meio de três amostras cúbicas durante a

realização do ensaio, as quais forneceram um valor médio de 35 MPa. À laje de concreto foi incorporada uma tela de aço soldada tipo A142 (barras com 7 mm de diâmetro espaçadas a cada 200 mm), com resistência ao escoamento de 500 MPa.

O estado limite último que levou a viga *Ulster Beam A1* ao colapso foi a flambagem do montante da alma. Para fins de comparação, foi calculada pelo programa a carga de colapso relacionada a esse estado limite por ambas às metodologias, de Lawson e Hicks [4] e Ward [3]. Pela Tabela 3, pode-se notar que ambas as metodologias estão a favor da segurança e que a metodologia de Lawson e Hicks [4] mostrou-se mais adequada na previsão da carga de colapso relacionada ao estado limite em questão.

2.3.2 Ensaio de Müller et al. [11]

A viga mista de aço e concreto com perfil celular, denominada *RWTH Beam 1B*, foi ensaiada por Müller et al. [11] e corresponde a uma viga biapoiada com carga concentrada aplicada em quatro pontos. Na Figura , as características geométricas do modelo

Figura 9 – Características geométricas da viga RWTH Beam 1B (dimensões em mm)

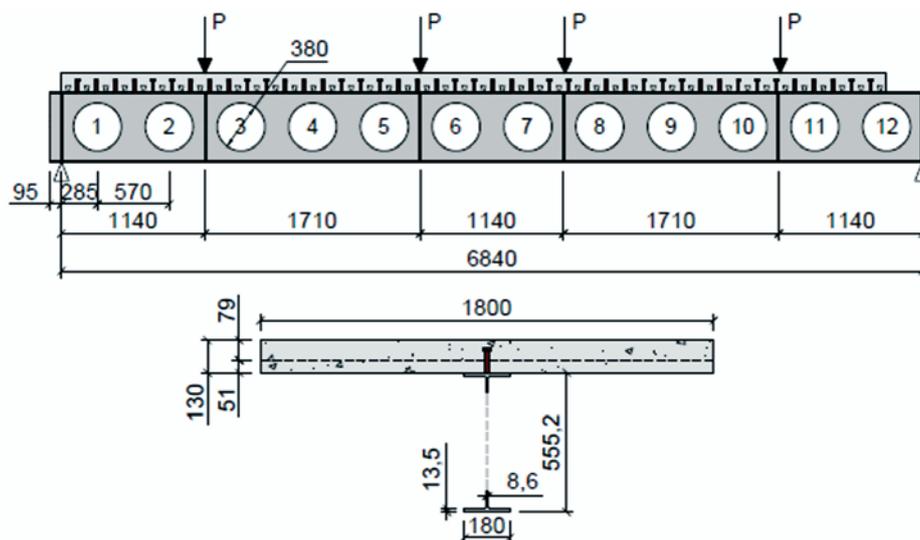


Tabela 5 – Padrões geométricos adotados para o perfil W 310x32,7

d	d _o	s	L _{/dg}
1,3d _g	0,6d	1,3d _o , 1,4d _o and 1,5d _o	10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40
	0,7d	1,3d _o , 1,4d _o and 1,5d _o	10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40
	0,8d	1,3d _o , 1,4d _o and 1,5d _o	10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40
1,4d _g	0,63d	1,3d _o	10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40
	0,7d	1,3d _o , 1,4d _o and 1,5d _o	10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40
	0,8d	1,3d _o , 1,4d _o and 1,5d _o	10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40
1,5d _g	0,73d	1,3d _o	10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40
	0,8d	1,3d _o , 1,4d _o and 1,5d _o	10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40
1,57d _g	0,8d	1,3d _o	10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40

experimental são apresentadas: vão de 6840 mm entre apoios, altura expandida igual a 555,2 mm, diâmetro das aberturas igual a 380 mm e distância entre centros das aberturas de 570 mm. A viga celular de aço foi fabricada a partir de um perfil IPE 400. O aço do perfil é o S355.

Müller *et al.* [11] considerou interação completa entre aço e concreto. Essa interação foi assegurada com a utilização de conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça (*Stud Bolt*), com diâmetro de 19 mm e disposição de um conector por nervura da forma de aço incorporada à laje. As características geométricas da forma de aço incorporada são as mesmas daquela utilizada no modelo Ulster-A1.

A laje mista de aço e concreto possui largura de 1800 mm e altura total de 130 mm, sendo 79 mm de altura da capa de concreto e 51 mm de altura da nervura da forma de aço incorporada, com concreto de densidade normal. Na laje de concreto foi utilizada uma taxa de armadura de 0,4% nas direções transversal e longitudinal, sendo esta malha localizada a 20 mm da face superior da laje.

A viga mista de aço e concreto com perfil celular *RWTH Beam 1B* foi ensaiada com as aberturas 11 e 12 preenchidas. O estado limite último que levou a viga *RWTH Beam 1B* ao colapso foi a flambagem do montante da alma entre as aberturas 1 e 2. Pelo resultado

do programa de cálculo, o colapso deveria ser governado pelo mecanismo Vierendeel, em uma carga 21% menor que a experimental de acordo com a metodologia de Lawson e Hicks [4] e 42% menor que a experimental segundo a metodologia de Ward [3].

A Tabela 4 mostra a comparação entre os resultados experimental e os do programa computacional para cada metodologia considerando o estado limite de flambagem do montante da alma que governou o colapso experimental. Pode-se notar que ambas as metodologias estão a favor da segurança e que a metodologia de Lawson e Hicks [4] mostrou-se mais adequada na previsão da carga de colapso relacionada ao estado limite em questão.

3. Resultados e discussões

O estudo paramétrico de vigas mistas com perfil de aço celular foi realizado considerando vigas obtidas a partir de dois perfis I laminados, W 310x32,7 e W 530x85. O estudo foi feito para vigas simplesmente apoiadas, submetidas a um carregamento uniformemente distribuído, considerando construção escorada. O aço dos perfis é o ASTM A572 (Grau 50).

A laje estudada é mista de aço e concreto com forma de aço incorporada de nervuras de altura igual a 75 mm, paralelas ao vão

Tabela 6 – Padrões geométricos adotados para o perfil W 530x85

d	d _o	s	L _{/dg}
1,3d _g	0,6d	1,3d _o , 1,4d _o and 1,5d _o	10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40
	0,7d	1,3d _o , 1,4d _o and 1,5d _o	10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40
	0,8d	1,3d _o , 1,4d _o and 1,5d _o	10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40
1,4d _g	0,63d	1,3d _o	10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40
	0,7d	1,3d _o , 1,4d _o and 1,5d _o	10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40
	0,8d	1,3d _o , 1,4d _o and 1,5d _o	10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40
1,5d _g	0,73d	1,3d _o	10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40
	0,8d	1,3d _o , 1,4d _o and 1,5d _o	10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40
1,57d _g	0,8d	1,3d _o	10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40

Tabela 7 – Estado limite e carga máxima para vigas mistas com perfil de alma cheia

L/d _g	W 310x32.1		W 530x85	
	q _{max} (kN/m)	Estado limite	q _{max} (kN/m)	Estado limite
10	168,3	Plastificação por Momento	208,65	Plastificação por Momento
15	85,7	Plastificação por Momento	98,7	Flecha excessiva
20	43,3	Flecha excessiva	45,4	Flecha excessiva
25	23,55	Flecha excessiva	24,1	Flecha excessiva
30	14,25	Flecha excessiva	13,95	Flecha excessiva
35	9,3	Flecha excessiva	8,8	Flecha excessiva
40	6,4	Flecha excessiva	5,9	Flecha excessiva

da viga e composta por concreto com resistência característica à compressão de 30 MPa. A altura total da laje foi de 13 cm. Foi considerada uma distância de 3 m entre a viga estudada e as adjacentes. Conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça (*Stud Bolt*) com diâmetro de 19 mm foram adotados. Inicialmente, a quantidade de conectores foi calculada considerando interação completa entre aço e concreto nas vigas mistas com os perfis de alma cheia que derem origem as vigas mistas de perfis celulares estudadas. O mesmo número de conectores de cisalhamento foi adotado para as vigas mistas com perfis celulares.

As metodologias de Ward [3] e Lawson e Hicks [4] apresentam limites diferentes para a definição da geometria de vigas celulares. Nesse estudo, os parâmetros geométricos das vigas foram definidas atendendo aos limites de ambas as metodologias. As tabelas 5 e 6 mostram respectivamente os parâmetros e a razão L/d_g (comprimento do vão/altura expandida) adotados para o perfil W310x32,7 e W530x85. A altura do perfil de origem foi designada por d_g, o diâmetro das aberturas por d_o e a distância centro a centro das aberturas por s.

Inicialmente, as vigas mistas foram calculadas com o perfil de aço original, para determinação da sua carga última (P_{VM}) e do estado limite associado ao colapso. Em seguida, utilizou-se o programa aqui desenvolvido para o cálculo das vigas mistas com perfil de aço

celular e obtenção da carga última (P_{VC}). Dessa forma, a diferença percentual entre as cargas últimas da viga mista com perfil celular e da viga mista com perfil de alma cheia pode ser calculada como:

$$\delta = (P_{VC} - P_{VM}) / P_{VM} \times 100 (\%) \quad (12)$$

Se a diferença percentual for menor do que zero, significa que a viga mista de alma cheia resiste melhor ao carregamento aplicado do que a viga mista com perfil celular, caso contrário, a viga mista com perfil celular apresenta um melhor desempenho.

Para determinação da carga última em ambas as vigas, com perfil de alma cheia e celular, uma rotina foi desenvolvida no programa computacional capaz de incrementar o valor da carga até ser atingida a carga de colapso da viga e, em seguida, escrever o valor da carga última e o modo de colapso em uma planilha. A verificação dos estados limites últimos foi feita considerando todo o carregamento aplicado (cargas permanente e variável) multiplicado por 1,4. Para a verificação do estado limite de serviço de flecha excessiva, foi considerado que 40% do carregamento total era permanente e, portanto, utilizou-se essa parcela de carregamento para o cálculo

Tabela 8 – Carga última e estado limite associado para vigas mistas com perfil celular obtido a partir do perfil W 310x32,7

L/d _g	δ(%)	Designação	Estado limite
10	-29%	VC 310-1,3-0,6-1,5-10	Mecanismo Vierendeel
15	-20%	VC 310-1,3-0,6-1,5-15	Plastificação por momento fletor
20	-8%	VC 310-1,5-0,73-1,3-20	Flambagem do montante da alma
25	13%	VC 310-1,5-0,73-1,3-25	Plastificação por momento fletor
30	32%	VC 310-1,5-0,73-1,3-30	Plastificação por momento fletor
35	48%	VC 310-1,5-0,73-1,3-35	Plastificação por momento fletor
40	66%	VC 310-1,5-0,73-1,3-40	Plastificação por momento fletor

(*) Diferença percentual

Tabela 9 - Carga última e estado limite associado para vigas mistas com perfil celular obtido a partir do perfil W 530x85

L/d_g	$\delta(\%)$	Designação	Estado limite
10	-19%	VC 530-1,3-0,6-1,5-10	Mecanismo Vierendeel
15	-8%	VC 530-1,3-0,6-1,5-15	Plastificação por momento fletor
20	20%	VC 530-1,4-0,63-1,3-20	Plastificação por cortante longitudinal
25	52%	VC 530-1,5-0,73-1,3-25	Plastificação por momento fletor
30	82%	VC 530-1,6-0,8-1,3-30	Flambagem do montante da alma
35	105%	VC 530-1,6-0,8-1,3-35	Flecha excessiva
40	103%	VC 530-1,6-0,8-1,3-40	Flecha excessiva

(*) Diferença percentual

da flecha de longa duração. A carga variável foi tomada como 60% do valor do carregamento total, sendo então a determinada a respectiva flecha de curta duração.

3.1 Viga mista com perfil de alma cheia dimensionada pela ABNT NBR 8800:2008

A Tabela 7 apresenta o estado limite que governa o dimensionamento das vigas mistas com perfil de alma cheia para cada razão L/d_g (vão/altura do perfil original) e as respectivas cargas máximas associadas.

3.2 Viga mista com perfil celular dimensionada metodologia de Lawson e Hicks [4]

No estudo paramétrico, a simbologia para identificação das vigas

mistas com perfil celular foi dada pela designação: VC $d_g - d/d_g - d_o/d - s/d_o - L/d_g$, onde VC indica viga mista celular e as variáveis d_g , d , d_o , s e L são os parâmetros geométricos. Por exemplo, VC 310-1,3-0,6-1,3-10 significa uma viga mista celular com 310 mm de altura do perfil laminado original, d_g , razão entre a altura final e a altura do perfil original, d/d_g , igual a 1,3, razão entre o diâmetro da abertura e a altura final, d_o/d , igual a 0,6, razão entre a distância entre aberturas e o diâmetro da abertura, s/d_o , igual a 1,3 e por último, a razão entre o vão e a altura do perfil original igual a 10. A Tabela 8 apresenta as vigas mistas com perfil celular obtidas a partir do perfil W 310x32,7 que apresentaram o melhor desempenho (maior resistência ou menor flecha, dependendo do estado limite que governa) em relação às vigas mistas com perfil de alma cheia. O estado limite que governou o dimensionamento é mencionado na tabela.

Tabela 10 - Relação entre a geometria da mista com perfil de aço celular obtida a partir do perfil W 310x32,7 e os modos de colapso

Estado limite	Características geométricas
Plastificação por cortante longitudinal	$L/d_g \leq 15$, $d_o \leq 0,63d$ e $s \leq 1,4d_o$
	$L/d_g \leq 15$, $d_o = 0,7d$ e $s = 1,3d_o$
Flambagem do montante da alma	$L/d_g = 20$, $d_o \leq 0,63d_o$ e $s = 1,3d_o$
	$15 \leq L/d_g \leq 20$, $d = 1,5d_g$ e $d_o = 0,73d$
Mecanismo Vierendeel	$20 \leq L/d_g \leq 25$ e $d = 1,57d_g$
	$L/d_g \leq 15$ e $d_o \geq 0,7d$, com exceção dos casos onde ocorreu cortante longitudinal
Flecha excessiva	$L/d_g = 20$ e $d_o = 0,8d$
	$L/d_g = 40$ e $d = 1,3d_g$
	$L/d_g = 40$ e $d = 1,4d_g$ e $s \leq 1,4d_o$
	$L/d_g = 35$ e $d = 1,3d_g$ e $d_o = 0,6d$
Plastificação por momento fletor	$L/d_g = 35$ e $d = 1,3d_g$ e $d_o = 0,7d$ e $s = 1,3d_o$
	$L/d_g \geq 25$, com exceção dos casos onde ocorreu flecha excessiva
	$L/d_g = 20$ e $d_o \leq 0,7d$, com exceção dos casos onde ocorreu cortante longitudinal
	$L/d_g = 15$, $d_o = 0,6d$ e $s = 1,5d_o$

Tabela 11 - Relação entre a geometria da mista com perfil de aço celular obtida a partir do perfil W 530x85 e os modos de colapso

Estado limite	Características geométricas
Plastificação por cortante longitudinal	$L/d_g \leq 15$, $d_o \leq 0,63d$ e $s \leq 1,4d_o$
	$L/d_g = 15$, $d_o = 0,7d$ e $s = 1,3d_o$
	$L/d_g = 20$, $d_o \leq 0,63d$ e $s = 1,3d_o$
Flambagem do montante da alma	$L/d_g \leq 20$, $d = 1,4d_g$, $d_o = 0,7d$, $s = 1,3d_o$
	$L/d_g \leq 20$, $d = 1,5d_g$ e $d_o = 0,73d$
	$20 \leq L/d_g \leq 25$, $d = 1,5d_g$, $d_o = 0,8d$, $s = 1,3d_o$
	$20 \leq L/d_g \leq 25$ e $d = 1,6d_g$
Mecanismo Vierendeel	$L/d_g \leq 15$ e $d_o \geq 0,7d$, com exceção dos casos onde ocorreu cortante longitudinal
	$L/d_g = 20$ e $d_o = 0,8d$
Plastificação por momento fletor	$L/d_g = 15$, $d = 1,3d_g$, $d_o = 0,6d$ e $s = 1,5d_o$
	$L/d_g = 20$, $d_o \leq 0,7d$ e $s \geq 1,4d_o$
	$L/d_g = 25$, $d_o \geq 0,7d$
	$L/d_g = 30$, $d = 1,4d_g$, $d_o = 0,8d$ e $s = 1,5d_o$
	$L/d_g = 30$, $d = 1,5d_g$ e $d_o = 0,8d$
Flecha excessiva	$L/d_g >= 35$
	$L/d_g = 30$ e $d_o \leq 0,73d$
	$L/d_g = 30$, $d_o = 0,8d$ e $d \leq 1,4d_g$
	$L/d_g = 25$ e $d_o \leq 0,63d$

Pela Tabela 8, pode-se notar que a utilização de vigas mistas com perfil celular obtido a partir do perfil W 310x32 é vantajosa para razão L/d_g igual ou superior a 25, quando o estado limite da viga mista de perfil de alma cheia é governado pela flecha excessiva e, portanto, as tensões de serviços são relativamente baixas. Pode-se observar também que a geometria mais adequada para as vigas mistas com perfil celular nesse caso é aquela com altura final igual a 1,5 vezes a altura do perfil original, diâmetro das aberturas igual a 0,73 vezes a altura final e distância entre as aberturas iguais a 1,3 vezes o diâmetro das aberturas.

A Tabela 9 apresenta as vigas mistas com perfil celular obtidas a partir do perfil W 530x85 que apresentaram o melhor desempenho em relação às vigas mistas com perfil de alma cheia. O estado limite que governou o dimensionamento é mencionado na tabela. Pela Tabela 9, pode-se notar que a utilização de vigas mistas com perfil celular obtido a partir do perfil W 530x85 é vantajosa para razão L/d_g igual ou superior a 20, quando o estado limite da viga mista de perfil de alma cheia é governado pela flecha excessiva. Pode-se observar também que a geometria mais adequada para as vigas mistas com perfil celular nesse caso é aquela com altura

Tabela 12 - Carga última e estado limite associado para vigas mistas com perfil celular obtido a partir do perfil W 310x32,7

L/d_g	δ^c	Designação	Estado limite
10	-42%	VC 310-1,3-0,6-1,5-10	Mecanismo Vierendeel
15	-28%	VC 310-1,3-0,6-1,5-15	Mecanismo Vierendeel
20	-12%	VC 310-1,3-0,6-1,5-20	Mecanismo Vierendeel
25	7%	VC 310-1,5-0,73-1,3-25	Flexão e flambagem do montante da alma
30	20%	VC 310-1,5-0,73-1,3-30	Flecha excessiva
35	20%	VC 310-1,57-0,8-1,3-35	Flecha excessiva
40	19%	VC 310-1,57-0,8-1,3-35	Flecha excessiva
(*) Diferença percentual			

Tabela 13 - Carga última e estado limite associado para vigas mistas com perfil celular obtido a partir do perfil W 530x85

L/d_g	δ^o	Designação	Estado limite
10	-41%	VC 530-1,3-0,6-1,5-10	Flexão e flambagem do montante da alma
15	-8%	VC 530-1,3-0,6-1,5-15	Mecanismo Vierendeel
20	17%	VC 530-1,3-0,6-1,5-20	Flecha excessiva
25	41%	VC 530-1,5-0,73-1,3-25	Flecha excessiva
30	52%	VC 530-1,6-0,8-1,3-30	Flecha excessiva
35	52%	VC 530-1,6-0,8-1,3-35	Flecha excessiva
40	53%	VC 530-1,6-0,8-1,3-40	Flecha excessiva

(*) Diferença percentual

final igual a 1,5 vezes a altura do perfil original, diâmetro das aberturas igual a 0,73 vezes a altura final e distância entre as aberturas iguais a 1,3 vezes o diâmetro das aberturas.

A análise das Tabelas 8 e 9 também mostra uma maior vantagem econômica no emprego de vigas mistas com perfil celular de maior altura, pois a diferença percentual entre a carga última da viga mista celular e a de alma cheia, d , é maior para o perfil W 530 x 85 em todas as razões L/d_g . Também, observa-se que quando maior a razão L/d_g , maior a diferença percentual, chegando a passar dos 100% para as vigas VC 530-1,6-0,8-1,3-35 e VC 530-1,6-0,8-1,3-40, ou seja, essas vigas possuem mais que o dobro da carga última de suas correspondentes vigas de alma cheia para razões L/d_g igual a 35 e 40.

A Tabela 10 apresenta a relação entre a geometria da viga mista com perfil de aço celular obtida a partir do perfil W 310x32,7 e os modos de colapso. Pode-se observar que a plastificação por esforço cortante horizontal ocorre em vãos pequenos a médios (razão L/d_g igual a 10, 15 e 20) em vigas com pequena largura do montante da alma, ou seja, nos casos onde a razão s/d_o é menor

que 1,4 e a razão d_o/d_g é menor que 0,63. O Mecanismo Vierendeel governou o dimensionamento nos casos de vãos pequenos a médios (razão L/d_g igual a 10, 15 e 20) e a razão d_o/d_g igual a 0,8, ou seja, quando a largura do montante da alma era maior. Para os vãos médios (razão L/d_g igual a 20 e 25), houve predominância da flambagem do montante da alma apenas para maiores valores da altura final, ou seja, razão d/d_g igual a 1,5 e 1,57. Para vãos grandes (razão L/d_g igual a 30, 35 e 40), os estados limites críticos foram a plastificação por momento fletor e flecha excessiva, sendo que a flecha excessiva não ocorreu na razão L/d_g igual a 30.

A Tabela 11 apresenta a relação entre a geometria da viga mista com perfil de aço celular obtida a partir do perfil W 530x85 e os modos de colapso. Pode-se observar que a plastificação por esforço cortante horizontal ocorre em vãos pequenos a médios (razão L/d_g igual a 10, 15 e 20) em vigas com pequena largura do montante da alma, ou seja, nos casos onde a razão s/d_o é menor que 1,4 e a razão d_o/d_g é menor que 0,63. O Mecanismo Vierendeel governou o dimensionamento nos casos de vãos pequenos a médios (razão L/d_g igual a 10,

Tabela 14 - Relação entre a geometria da mista com perfil de aço celular obtida a partir do perfil W 310x32,7 e os modos de colapso

Estado limite	Características geométricas
Flambagem e flexão do montante da alma	$L/d_g \leq 20$, $d_o \leq 0,7d$ e $s = 1,3d_o$
	$L/d_g \leq 20$, $d_o = 0,6d$ e $s = 1,4d_o$
	$L/d_g \leq 25$, $d_o \leq 0,73d$ e $s = 1,3d_o$
Mecanismo Vierendeel	$L/d_g \leq 25$, $d_o = 0,8d$
	$L/d_g \leq 20$, $d_o = 0,7$ e $s \geq 1,4d_o$
Flecha excessiva	$L/d_g = 30$, $d_o = 0,8$ e $d \geq 1,4d_o$
	$L/d_g = 25$, $d = 1,3d_g$, $d_o \leq 0,7d$ e $s \geq 1,4d_o$
	$L/d_g = 25$, $d = 1,3d_g$, $d_o = 0,7d$ e $s = 1,3d_o$
	$L/d_g = 25$, $d = 1,4d_g$, $d_o = 0,7d$ e $s = 1,4d_o$
	$L/d_g = 30$ e $d_o \leq 0,73d$
	$L/d_g = 30$, $d_o = 0,8d$ e $d = 1,3d_g$
	$L/d_g \geq 35$

Tabela 15 - Relação entre a geometria da mista com perfil de aço celular obtida a partir do perfil W 530x85 e os modos de colapso

Estado limite	Características geométricas
Flambagem e flexão do montante da alma	$L/d_g \leq 20, d_o \leq 0,7d$ e $s = 1,3d_o$
	$L/d_g \leq 20, d_o = 0,6d$ e $s = 1,4d_o$
	$L/d_g = 10, d_o = 0,6d$ e $s = 1,5d_o$
Mecanismo Vierendeel	$L/d_g \leq 25, d_o = 0,8d$
	$L/d_g \leq 20, d_o = 0,7$ e $s \geq 1,4d_o$
Flecha excessiva	$L/d_g = 20, d_o = 0,6d$ e $s = 1,5d_o$
	$L/d_g = 25, d_o \leq 0,7d$
	$L/d_g \geq 30$

15 e 20) e a razão d_o/d_g igual a 0,8, ou seja, quando a largura do montante da alma era maior. A flambagem do montante da alma ocorre em vãos pequenos a grandes (razão L/d_g igual a 10, 15, 20, 25 e 30), principalmente em vigas com maiores valores da altura final, ou seja, razão d/d_g maior ou igual a 1,5. A plastificação por momento fletor governou o dimensionamento, principalmente, em vão médios (razão L/d_g igual a 25), em vigas com menores valores de alturas finais, ou seja, razão d/d_g menor do que 1,5, e com razão d_o/d maior que 0,63. Em vãos grandes (razão L/d_g igual a 35 e 40) o estado limite de flecha excessiva sempre governou o dimensionamento.

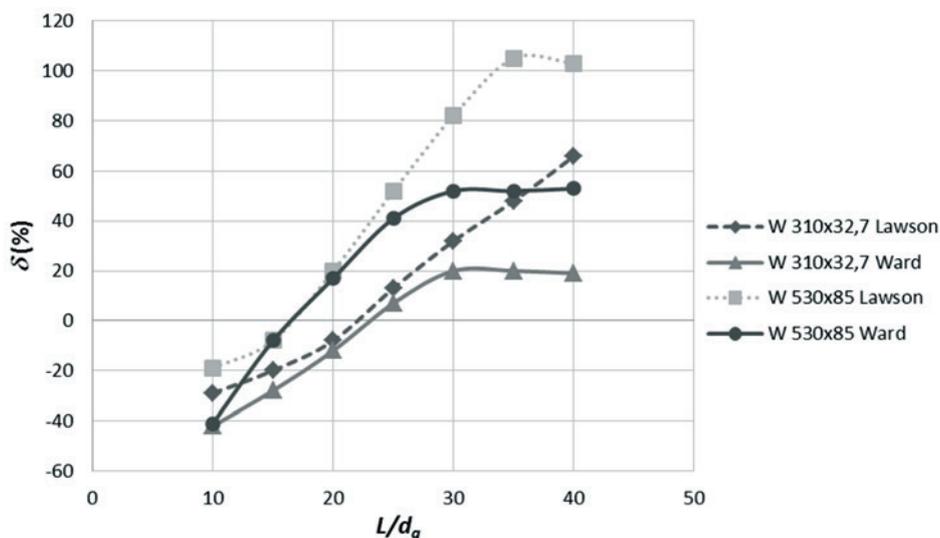
3.3 Viga mista com perfil celular dimensionada pela Metodologia de Ward [3]

A Tabela 12 apresenta as vigas mistas com perfil celular obtidas a

partir do perfil W 310x32,7 que apresentaram o melhor desempenho em relação às vigas mistas com perfil de alma cheia. O estado limite que governou o dimensionamento é mencionado na tabela. Pela Tabela 12, pode-se notar que a utilização de vigas mistas com perfil celular obtido a partir do perfil W 310x32 é vantajosa para razão L/d_g igual ou superior a 25. Pode-se observar também que a geometria mais adequada para as vigas mistas com perfil celular nesse caso é aquela com altura final variando entre 1,5 ou 1,57 vezes a altura do perfil original. O diâmetro das aberturas variando de 0,73 e 0,8 vezes da altura final e a distância entre as aberturas de 1,3, vezes o diâmetro dessas.

A Tabela 13 apresenta as vigas mistas com perfil celular obtidas a partir do perfil W 530x85 que apresentaram o melhor desempenho em relação às vigas mistas com perfil de alma cheia. O estado limite que governou o dimensionamento é mencionado na tabela.

Figura 10 - Comparação entre as cargas últimas das vigas mistas celulares obtidas pelas metodologias de Ward (3) e de Lawson e Hicks (4)



Pela Tabela 13, pode-se notar que a utilização de vigas mistas com perfil celular obtido a partir do perfil W 530x32 é vantajosa para razão L/d_g igual ou superior a 20. Pode-se observar também que a geometria mais adequada para as vigas mistas com perfil celular nesse caso é aquela com altura final variando entre 1,3, 1,5 ou 1,6 vezes a altura do perfil original. O diâmetro das aberturas variando de 0,6, 0,73 e 0,8 vezes da altura final e a distância entre as aberturas variando entre 1,3, e 1,5 vezes o diâmetro dessas.

A análise das Tabelas 12 e 13 também mostra uma maior vantagem econômica no emprego de vigas mistas com perfil celular de maior altura, pois a diferença percentual entre a carga última da viga mista celular e a de alma cheia, d , é maior para o perfil W 530 x 85 em todas as razões L/d_g . Também, observa-se que quando maior a razão L/d_g , maior a diferença percentual, chegando a passar dos 50% para as vigas VC 530-1,6-0,8-1,3-35 e VC 530-1,6-0,8-1,3-40.

A Tabela 14 apresenta a relação entre a geometria da viga mista com perfil de aço celular obtida a partir do perfil W 310x32,7 e os modos de colapso. Pode-se observar que a flambagem e flexão do montante da alma ocorre em vãos pequenos a médios (razão L/d_g igual a 10, 15, 20 e 25) em vigas com pequena largura do montante da alma, ou seja, nos casos onde a razão s/d_o é menor que 1,4 e a razão d_o/d_g é menor que 0,63. O Mecanismo Vierendeel governou o dimensionamento nos casos de vãos pequenos a grandes (razão L/d_g igual a 10, 15, 20, 25 e 30) e a razão d_o/d_g igual a 0,8, ou seja, quando a largura do montante da alma era maior. Para vãos grandes (razão L/d_g igual a 30, 35 e 40), o estado limite crítico foi a flecha excessiva.

A Tabela 15 apresenta a relação entre a geometria da viga mista com perfil de aço celular obtida a partir do perfil W 530x85 e os modos de colapso. Pode-se observar que a flambagem e flexão do montante da alma ocorre em vãos pequenos a médios (razão L/d_g igual a 10, 15, 20) em vigas com pequena largura do montante da alma, ou seja, nos casos onde a razão s/d_o é menor que 1,4 e a razão d_o/d_g é menor que 0,73. O Mecanismo Vierendeel governou o dimensionamento nos casos de vãos pequenos a grandes (razão L/d_g igual a 10, 15, 20, 25 e 30) e a razão d_o/d_g igual a 0,8, ou seja, quando a largura do montante da alma era maior. Para vãos grandes (razão L/d_g igual a 30, 35 e 40), os estado limite crítico foi a flecha excessiva.

3.4 Comparação das metodologias

O gráfico da Figura mostra a comparação entre as cargas últimas das vigas mistas com perfil celular obtidas por ambas as metodologias que apresentaram o melhor desempenho (maior resistência ou menor flecha, dependendo do estado limite que governa) em relação às vigas mistas com perfil de alma cheia. A análise do gráfico da Figura 15 mostra que na maioria dos casos estudados a metodologia de Ward [3] apresenta resultados mais conservadores.

4. Conclusões

Duas metodologias de dimensionamento de vigas de aço e vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares foram estudadas, a metodologia de Ward [3] e a metodologia de Lawson e Hicks [4]. Ambas as metodologias utilizavam as prescrições das normas europeias quando se refere a estados limites e resistências de cálculo já consagradas. Nesse trabalho, procedeu-se a adaptação

das metodologias de acordo com a ABNT NBR 8800:2008 [2].

Foi desenvolvido no MATLAB (2010) um programa computacional para o dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto com perfis de aço celulares abordando ambas as metodologias supracitadas. A aferição do programa computacional foi feita por meio de dois exemplos numéricos disponíveis na literatura.

Após a validação do programa, a adequação das metodologias foi verificada por meio de comprovação experimental, comparando os resultados do programa computacional com resultados de ensaios experimentais disponíveis na literatura, a saber, os resultados de Nadjai *et al.* [10] e de Müller *et al.* [11]. Foi observado que tanto a metodologia de Lawson e Hicks [4], quanto a metodologia de Ward [3], apresentaram resultados um pouco conservadores, sendo que a metodologia de Lawson e Hicks [4] mostrou-se mais adequada na previsão da carga de colapso.

Por fim, foi realizado um estudo paramétrico de vigas mistas com perfil de aço celular obtidas a partir de dois perfis laminados, W 310x32,7 e W 530x85. O estudo foi feito para ambas as metodologias apresentadas, de onde foi possível obter uma série de conclusões sobre os procedimentos de cálculo:

- Ambas as metodologias mostraram que a utilização de vigas mistas com perfil de aço celular é vantajosa quando a razão entre vão e altura, L/d , é maior ou igual a 20. Isso era esperado, uma vez que nesses casos, quem governa o dimensionamento de vigas mistas com perfil de alma cheia é flecha excessiva e, as vigas celulares possuem maior inércia. Vale observar que, na prática, as vigas mistas são utilizadas para vencer vãos maiores $L/d \geq 25$;
- Ambas as metodologias mostraram uma maior vantagem econômica no emprego de vigas mistas com perfil celular de maior altura, visto que a diferença percentual entre as cargas últimas da viga mista celular e da viga mista de alma cheia, d , foi maior para o perfil W 530x85 em todas as razões L/d ;
- Os procedimentos propostos por Ward [3] para a verificação da flambagem e flexão do montante da alma, do mecanismo Vierendeel e da flecha excessiva geraram resultados mais conservadores, o que fez com que a metodologia de Lawson e Hicks [4] fornecesse cargas últimas maiores em todos os casos analisados.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, FAPES e PPGE/UFES, pelo apoio para a realização desta pesquisa.

6. Referências bibliográficas

- [1] PINHO, F. O. Vigas casteladas e celulares. Estruturas metálicas com mais resistência, menos deformação e redução de peso. www.arcorweb.com.br. 2009.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- [3] WARD, J. K. Design of composite and non-composite cellular beams, The Steel Construction Institute, 1990.
- [4] LAWSON, R. M.; HICKS, S. J. P355: Design of composite beams with large web openings: in accordance with Eurocodes and the UK National Annexes. Steel Construction Institute, 2011.

- [5] TSAVDARIDIS, K.D.; D'MELLO, C. Behavior and Strength of Perforated Steel Beams with Novel Web Opening Shapes. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 67, p. 1605-1620, 2011.
- [6] KERDAL, D.; NETHERCOT D.A. Failure modes for castellated beams. *Journal of Constructional Steel Research*, p. 295-315, 1984.
- [7] SILVEIRA, E. G. Avaliação do comportamento estrutural de vigas alveolares de aço com ênfase nos modos de colapso por plastificação. Dissertação de Mestrado, Viçosa: UFV, 2011
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- [9] OLIVEIRA, T. C. P. Vigas alveoladas: metodologias de dimensionamento. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2012.
- [10] NADJAI, A.; VASSART, O.; ALI, F.; TALAMONA, D.; ALLAM, A.; HAWES, M. Performance of cellular composite floor beams at elevated temperatures, *Fire Safety Journal*, v. 42, p. 489-497, 2007.
- [11] MÜLLER, C.; HECHLER, O.; BUREAU, A.; BITAR, D.; JOYEUX, D.; CAJOT, L. G.; DEMARCO, T.; LAWSON, R. M.; HICKS, S.; DEVINE, P.; LAGERQVIST, O.; HEDMAN-PÉTURSSON, E.; UNOSSON, E.; FELDMANN, M. Large web openings for service integration in composite floors. *Technical steel research*, 2006.