

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

AUGUSTO BADKE NETO

**ESTUDO DE METODOLOGIAS PARA O DIMENSIONAMENTO DE
VIGAS DE AÇO E VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO COM
PERFIS CELULARES**

VITÓRIA
2015

AUGUSTO BADKE NETO

**ESTUDO DE METODOLOGIAS PARA O DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE
AÇO E VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO COM PERFIS CELULARES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Estruturas.

Orientador: Adenilcia Fernanda Grobério Calenzani.

VITÓRIA
2015

AUGUSTO BADKE NETO

**ESTUDO DE METODOLOGIAS PARA O DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE
AÇO E VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO COM PERFIS CELULARES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Estruturas.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof^a.Dr^a. Adenilcia Fernanda Grobério Calenzani
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora

Prof. Dr. Walnório Graça Ferreira
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador interno

Prof. Dr. Ricardo Azoubel da Mota Silveira
Universidade Federal de Ouro Preto
Examinador externo

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

B136e Badke Neto, Augusto, 1989-.
Estudo de metodologias para o dimensionamento de vigas
de aço e vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares /
Augusto Badke Neto. – 2015.
180 f. : il.

Orientador: Adenilcia Fernanda Grobério Calenzani.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Vigas. 2. Aço – Estruturas. 3. Construção mista. 4. Vigas
de concreto. 5. Programas de computador. 6. Projeto auxiliado
por computador. 7. Automação. I. Calenzani, Adenilcia Fernanda
Grobério. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro
Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

RESUMO

Atualmente, com o avanço da tecnologia de corte e solda, vigas com aberturas sequenciais na forma circular, denominadas vigas celulares, vêm sendo bastante utilizadas como vigas de edificações. 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. A NBR 8800:2008 e as normas internacionais não abordam vigas de aço e vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares, o que contribui para que o seu uso seja limitado, havendo a necessidade de mais pesquisas sobre o comportamento estrutural e dimensionamento dessas vigas. Este trabalho visa apresentar metodologias e desenvolver ferramentas computacionais para o dimensionamento das referidas vigas. A aferição do programa computacional é realizada utilizando exemplos numéricos disponíveis na literatura e as metodologias de dimensionamento foram avaliadas por meio da comparação de seus resultados com resultados experimentais da literatura. Adicionalmente, foi realizado um estudo paramétrico para 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. Como resultado, as metodologias estudadas mostram que a utilização de vigas mistas com perfil de aço celular é vantajosa quando a razão entre vão e altura do perfil original, L/d , é maior que 20.

Palavras chaves: Vigas de Aço Celulares, Vigas Mistas de Aço e Concreto com Perfis Celulares, Programa Computacional, Automação do Projeto.

ABSTRACT

Currently with the advancement of welding and cutting technology, beams with circular openings, called cellular beams, have been widely used. The cellular beams can be designed as composite beams when a shear connection exists between the steel section and the concrete slab, and thus achieve even greater spans than conventional composite beam, given the increased stiffness provided by the alveolar section geometry. The NBR 8800:2008 and international standards do not address cellular steel beams and cellular composite steel and concrete beams, which contributes to its use is limited, there is a need for more research on the structural behavior and design of these beams. This paper presents methodologies and develops computational tools for the design of such beams. The calibration of computational program was carried out using numerical examples available in the literature and design methodologies were evaluated by comparing its results with experimental results from the literature. In addition, a parametric study was performed to evaluate the influence of the cellular beam geometry on the ultimate load and failure mode of a series of composite cellular beams with composite slab. As a result, the methodologies studied show that the use of composite cellular beams is advantageous when the ratio between span and height, L/d , is greater than 20.

Keywords: Cellular Steel Beams, Cellular Composite Steel and Concrete Beams, Computational Program, Automation Design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vigas com aberturas preenchidas com chapas na região do apoio	20
Figura 2 - Esquema de produção de vigas alveolares	21
Figura 3 - Produção de vigas celulares	21
Figura 4 - Inserção de chapas planas no montante da alma	22
Figura 5 - Viga castelada com chapa expansora no montante da alma	22
Figura 6 - Diferentes formas de abertura	23
Figura 7 - Geometria de vigas celulares	25
Figura 8 - Comparação entre viga celular e viga castelada de mesma altura	25
Figura 9 - Vigas celulares de aço e vigas celulares mistas de aço e concreto	27
Figura 10 - Vigas celulares de aço e vigas celulares mistas de aço e concreto	27
Figura 11 - Formação de mecanismo Vierendeel em vigas casteladas	31
Figura 12 - Mecanismo Vierendeel	32
Figura 13 - Colapso da solda entre aberturas	32
Figura 14 - Colapso da solda entre aberturas	33
Figura 15 - Flambagem lateral com torção	33
Figura 16 - Flambagem do montante da alma devido à força cortante	35
Figura 17 - Flambagem do montante da alma de viga mista	35
Figura 18 - Flambagem por compressão do montante da alma	36
Figura 19 - Geometria e notações de vigas celulares.	44
Figura 20 - Valor a ser tomado para emh	46
Figura 21 - Determinação da largura efetiva da laje de concreto.	47
Figura 22 - Esquema de esforços ao redor de uma abertura retangular isolada	52
Figura 23 - Distribuição de tensões plásticas na secção transversal da zona da abertura	53
Figura 24 - Blocos de tensões plásticas em torno da abertura devido ao momento fletor de Vierendeel	59
Figura 25 - Comportamento elástico devido ao momento fletor de Vierendeel em torno da abertura	61
Figura 26 - Efeitos da flexibilidade ao longo da abertura	62
Figura 27 - Equilíbrio de esforços montante da alma entre duas aberturas circulares	64
Figura 28 - Modelo de flambagem do montante da alma para aberturas circulares..	67
Figura 29 - Geometria e notações de vigas celulares	73
Figura 30 - Cortante longitudinal no montante da alma	74
Figura 31 - Forças que atuam na viga mista celular	75
Figura 32 - Distribuição de tensões em vigas mistas celulares sob momento positivo e interação completa	78
Figura 33 - Determinação da seção crítica	82
Figura 34 - Aproximação da viga celular em hexagonal equivalente, válida para $1,08 < s/d_0 < 1,5$	84
Figura 35 - Seções nas quais são calculadas as flechas na viga celular	86
Figura 36 - Interface para entrada de dados no programa	90

Figura 37 - Interface para entrada de dados no programa.....	90
Figura 38 - Interface para entrada de dados no programa.....	91
Figura 39 - Resultados exibidos na interface do programa.....	92
Figura 40 - Propriedades geométricas da viga mista.....	94
Figura 41 - Propriedades geométricas da viga mista.....	110
Figura 42 - Disposição de conectores sobre a viga.....	111
Figura 43 - Características geométricas da viga Ulster <i>Beam A1</i> (dimensões em milímetros).....	126
Figura 44 - Características geométricas da forma de aço incorporada á laje (dimensões em milímetros).....	127
Figura 45 - Características geométricas da viga RWTH <i>Beam 1B</i> (Dimensões em mm).....	128
Figura 46 - Influência do diâmetro das aberturas na diferença percentual da viga mista com perfil celular.....	142
Figura 47 - Influência da altura expandida na diferença percentual entre as cargas últimas da viga mista celular e da viga mista de alma cheia.....	143
Figura 48 - Influência da distância entre aberturas na diferença percentual entre as cargas últimas da viga mista celular e da viga mista de alma cheia.....	146
Figura 49 - Comparação das diferenças percentuais entre as cargas últimas da viga mista celular e da viga mista de alma cheia.....	149
Figura 50 - Influência do diâmetro das aberturas na diferença percentual entre as cargas últimas da viga mista celular e da viga mista de alma cheia.....	151
Figura 51 - Influência da altura expandida na diferença percentual entre as cargas últimas da viga mista celular e da viga mista de alma cheia.....	152
Figura 52 - Influência da distância entre aberturas diferença percentual entre as cargas últimas da viga mista celular e da viga mista de alma cheia.....	154
Figura 53 - Comparação das diferenças percentuais entre as cargas últimas da viga mista celular e da viga mista de alma cheia.....	157
Figura 54 - Comparação entre as metodologias para razão d/d_g igual a 1,3, razão d_o/d igual a 0,8 e razão s/d_o igual a 1,5.....	158
Figura 55 - Comparação entre as metodologias para razão d/d_g igual a 1,3, razão d_o/d igual a 0,6 e razão s/d_o igual a 1,3.....	158
Figura 56 - Comparação entre as metodologias para razão d/d_g igual a 1,4, razão d_o/d igual a 0,7 e razão s/d_o igual a 1,3.....	159

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estados limites últimos e de serviço.....	43
Tabela 2 - Limites geométricos para vigas celulares.....	43
Tabela 3 - Classificação da alma dos tês.....	57
Tabela 4 - Dados do exemplo de Oliveira, T. (2012).....	93
Tabela 5 - Ações permanentes e variáveis.....	94
Tabela 6 - Dados do exemplo de Ward (1990).....	109
Tabela 7 - Ações permanentes e variáveis.....	110
Tabela 8 - Cálculo inicial dos esforços solicitantes que atuam nas aberturas.....	114
Tabela 9 - Cálculo final dos esforços nas aberturas.....	114
Tabela 10 - Esforços internos.....	121
Tabela 11 - Flecha total de cada abertura.....	122
Tabela 12 - Comparação dos resultados obtidos do exemplo de Oliveira, T. (2012) e do programa computacional.....	125
Tabela 13 - Comparação dos resultados obtidos do exemplo de Ward (1990) e do programa computacional.....	125
Tabela 14 - Comparação entre os resultados de Nadjai <i>et al.</i> (2007) e do programa.....	127
Tabela 15 - Comparação entre os resultados de Müller <i>et al.</i> (2006) e do programa.....	129
Tabela 16 - Propriedades geométricas adotadas para o perfil W310x32,7.....	131
Tabela 17 - Propriedades geométricas adotadas para o perfil W530x85.....	135
Tabela 18 - Estado limite e carga máxima para vigas mistas com perfil de alma cheia.....	140
Tabela 19 - Influência do diâmetro das aberturas no estado limite das vigas mistas com perfil celular.....	141
Tabela 20 - Influência da altura expandida no estado limite das vigas mistas com perfil celular.....	143
Tabela 21 - Influência do diâmetro da abertura na flambagem do montante da alma.....	144
Tabela 22 - Influência da distância entre aberturas no estado limite das vigas mistas com perfil celular.....	145
Tabela 23 - Influência da distância entre aberturas na flambagem do montante da alma.....	147
Tabela 24 - Diferença percentual e estado limite predominante nas vigas mistas com perfil celular obtido a partir do perfil W 310x32,7.	147
Tabela 25 - Diferença percentual e estado limite predominante nas vigas mistas com perfil celular obtido a partir do perfil W 530x85.....	148
Tabela 26 - Influência do diâmetro das aberturas na diferença percentual entre as cargas últimas da viga mista celular e da viga mista de alma cheia.....	150
Tabela 27 - Influência do diâmetro das aberturas no estado limite das vigas mistas com perfil celular.....	152

Tabela 28 - Influência da distância entre aberturas no estado limite das vigas mistas com perfil celular	153
Tabela 29 – Diferença percentual e estado limite predominante nas vigas mistas com perfil celular obtido a partir do perfil W 310x32,7	155
Tabela 30 – Diferença percentual e estado limite predominante nas vigas mistas com perfil celular obtido a partir do perfil W 530x85	156

LISTA DE SÍMBOLOS

A_a - área do perfil de aço

A_{cs} - área do conector

A_f - área da mesa do tê

A_s - área da armadura de tração

A_T - área da seção transversal de um tê

A_v - área resistente do concreto

A_w - área da alma do perfil de aço

A_{wT} - área da alma do tê

b - largura efetiva da laje de concreto

b_f - largura da mesa do perfil original

d - altura total da seção expandida

d_g - altura total do perfil original

d_o - diâmetro da abertura

d_T - altura do tê

E_c - módulo de elasticidade do concreto

f_{ck} - resistência característica do concreto

$f_{ctk,inf}$ - resistência à tração direta característica inferior do concreto

F_{hd} - força de cisalhamento de cálculo do sistema misto

f_{ucs} - resistência à ruptura do aço do conector

f_y - tensão de escoamento do aço

h_{ef} - altura efetiva da viga entre os centros de gravidade dos tês

h_t - altura total da laje de concreto

h_{wT} - altura da alma do tê

L_e - comprimento do trecho de momento positivo

l_e - comprimento equivalente da abertura para o mecanismo Vierendeel

l_w - comprimento de flambagem

$M_{b,NV,Rd}$ - momento fletor resistente reduzido do tê inferior para a presença de esforço cortante e axial

$M_{o,Rd}$ - momento fletor resistente plástico da viga alveolar na região da abertura

$M_{t,NV,Rd}$ - momento fletor resistente reduzido do tê superior para a presença de esforço cortante e axial

$M_{vc,Rd}$ - momento fletor resistente local devido à interação do tê superior com a laje de concreto

$M_{wp,Sd}$ - momento fletor resistente a meia altura do montante da alma

$M_{wp,Sd}$ - momento fletor solicitante a meia altura do montante da alma

n_o - número de aberturas na viga celular

$n_{sc,o}$ - número de conectores aplicados diretamente acima da abertura

$N_{bT,Rd}$ - valor do esforço de tração resistente no tê inferior

$N_{bT,Sd}$ - valor do esforço de tração solicitante no tê inferior

$N_{c,Rd}$ - valor do esforço resistente da laje de concreto à compressão

$N_{tT,Rd}$ - valor do esforço de tração resistente no tê superior

$N_{tT,Sd}$ - valor do esforço de tração solicitante no tê superior

Q_{Rd} - valor resistente dos conectores

R - Raio da abertura

R_g - coeficiente para consideração do efeito de atuação de grupos de conectores

R_p - coeficiente para consideração da posição do conector

s - distância entre aberturas adjacentes

s_e - largura da extremidade apoiada da viga celular

s_o - menor largura do montante de alma

t_c - altura da laje de concreto (se houver pré-laje de concreto pré-moldada, é a espessura acima desta pré-laje e, se houver laje com fôrma de aço incorporada, é a espessura acima das nervuras).

t_f - espessura da mesa do perfil original

t_w - espessura da alma do perfil original

$t_{w,ef}$ - espessura reduzida da alma

$V_{bT,Sd}$ - força cortante resistente solicitante no tê inferior

$V_{c,Rd}$ - esforço cortante resistente da laje de concreto

$V_{pl,Rd}$ - esforço cortante resistente de plastificação do perfil de aço na seção da abertura

$V_{wp,Sd}$ - esforço cortante longitudinal solicitante no montante da alma

$V_{wp,Rd}$ - esforço cortante longitudinal resistente do montante da alma

W_{x0} - módulo resistente elástico na seção vazada da viga alveolar

W_t - módulo resistente elástico do tê em relação à borda do alvéolo

z_c - altura de concreto em compressão

z_{pl} - distância entre a linha neutra plástica e a extremidade da mesa de aço

z_T - distância entre a extremidade do banzo e o centro de gravidade do tê

Z_{xo} - módulo resistente plástico na seção da abertura da viga alveolar

δ_a - flecha do perfil de aço no meio do vão

δ_{ad} - flecha adicional no meio do vão devido à presença de aberturas

δ_{dc} - flecha depois da cura do concreto para carregamento de curta duração

δ_{dp} - flecha depois da cura do concreto para carregamento de longa duração

η_i - grau de interação

λ_0 - esbeltez reduzida

λ_1 - esbeltez de referência para determinar a esbeltez reduzida

χ - coeficiente de redução para o modo de flambagem relevante

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Vigas alveolares	19
1.2	Fabricação das vigas alveolares	20
1.3	Configuração das aberturas	22
1.3.1	Padrão Celular	24
1.4	Vantagens e desvantagens das vigas alveolares	26
1.5	Vigas mistas de aço e concreto com perfis de aço celulares	26
1.6	Justificativa	28
1.7	Objetivos	28
1.7.1	Objetivo geral	28
1.7.2	Objetivos específicos	29
1.8	Estrutura da dissertação	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	Introdução	31
2.2	Modos de colapso	31
2.2.1	Formação de mecanismo Vierendeel.....	31
2.2.2	Formação de rótula plástica	32
2.2.3	Ruptura da solda entre as aberturas.....	32
2.2.4	Flambagem lateral com torção.....	33
2.2.5	Colapsos no montante da alma.....	34
2.2.5.1	Flambagem por cisalhamento.....	34
2.2.5.2	Flambagem por compressão	35
2.3	Estado da arte	36
3	DIMENSIONAMENTO DE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO COM PERFIS CELULARES SEGUNDO LAWSON E HICKS (2011)	42
3.1	Introdução	42
3.2	Geometria e estados limites do perfil celular	42
3.3	Vigas mistas com perfil celular	44
3.3.1	Conectores de cisalhamento	44
3.3.2	Largura efetiva da laje de concreto	46
3.3.3	Interação parcial.....	48
3.4	Esforço cortante na abertura	49

3.4.1	Esforço cortante resistente plástico do perfil de aço na seção da abertura	.49
3.4.2	Esforço cortante resistente da laje de concreto	50
3.5	Momento fletor na abertura	52
3.5.1	Linha neutra plástica na laje de concreto: $N_c, R_d \geq N_{bT}, R_d$	53
3.5.2	Linha neutra plástica no tê superior: $N_{bT}, R_d > N_c, R_d$	55
3.6	Mecanismo Vierendeel	55
3.6.1	Classificação da alma do tê	57
3.6.2	Momento fletor resistente plástico	58
3.6.2.1	Redução do momento fletor resistente na presença de esforço axial	59
3.6.2.2	Redução do momento fletor resistente na presença de esforço cortante	60
3.6.3	Momento fletor resistente elástico	60
3.6.3.1	Redução do momento fletor resistente na presença de esforço axial	61
3.6.3.2	Redução do momento fletor resistente na presença de esforço cortante	62
3.6.4	Momento fletor resistente local devido à interação do tê superior com a laje de concreto	62
3.7	Colapsos do montante da alma	63
3.7.1	Esforço cortante longitudinal	64
3.7.2	Flexão	65
3.7.3	Flambagem	66
3.8	Restrição ao esforço cortante para aberturas adjacentes	68
3.8.1	Flexão do montante da alma	69
3.8.2	Flambagem do montante da alma	69
3.9	Estados limites de serviço	70
3.9.1	Flecha	70
4	DIMENSIONAMENTO DE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO COM PERFIS CELULARES DE ACORDO COM WARD (1990)	72
4.1	Introdução	72
4.2	Geometria e estados limites do perfil celular	72
4.3	Esforços solicitantes	73
4.3.1	Viga celular de aço	73
4.3.2	Viga mista celular	74
4.4	Esforço cortante	76
4.5	Momento fletor	77
4.5.1	Vigas celulares de aço	77

4.5.2	Vigas mistas celulares.....	78
4.6	Mecanismo Vierendeel.....	81
4.6.1	Redução da espessura da alma devido ao esforço cortante.....	83
4.6.2	Vigas mistas celulares.....	83
4.7	Flexão e flambagem do montante da alma	83
4.8	Flecha.....	85
4.8.1	Viga mista celular	87
5	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....	88
5.1	Introdução.....	88
5.2	Sobre o programa desenvolvido.....	88
5.2.1	Ferramenta computacional utilizada.....	88
5.2.2	Abrangência e limitações do programa	89
5.3	Apresentação do programa.....	89
5.4	Aferição do programa	92
5.4.1	Exemplo numérico de Oliveira, T. (2012).....	93
5.4.1.1	Propriedades da seção transversal.....	95
5.4.1.2	Classificação da seção transversal.....	95
5.4.1.3	Resistência do conector de cisalhamento.....	96
5.4.1.4	Largura efetiva e força de cisalhamento de cálculo	96
5.4.1.5	Verificação do momento fletor	97
5.4.1.6	Verificação do esforço cortante.....	99
5.4.1.7	Verificação do mecanismo Vierendeel.....	100
5.4.1.8	Verificação à flexão do montante da alma	103
5.4.1.9	Verificação ao esforço cortante longitudinal do montante da alma	103
5.4.1.10	Verificação à flambagem do montante da alma	104
5.4.1.11	Verificação das restrições ao esforço cortante	105
5.4.1.12	Verificação do estado limite de serviço.....	106
5.4.2	Exemplo numérico de Ward (1990).....	108
5.4.2.1	Propriedades da seção transversal.....	110
5.4.2.2	Resistência do conector de cisalhamento.....	111
5.4.2.3	Largura efetiva e força de cisalhamento de cálculo	112
5.4.2.4	Cálculo dos esforços solicitantes	113
5.4.2.5	Verificação ao momento fletor	114

5.4.2.6	Verificação a esforço cortante.....	115
5.4.2.7	Verificação a flexão e a flambagem do montante da alma	116
5.4.2.8	Verificação do mecanismo Vierendeel.....	117
5.4.2.9	Verificação do estado limite de serviço.....	120
5.4.3	Aferição do programa.....	124
5.5	Comprovação experimental	126
5.5.1	Ensaio de Nadjai <i>et al.</i> (2007).....	126
5.5.2	Ensaio de RWTH (2002)	128
6	ESTUDO PARAMÉTRICO.....	130
6.1	Introdução.....	130
6.2	Modelos da parametrização	130
6.3	Metodologia e ferramentas utilizadas	139
6.4	Análise dos resultados	140
6.4.1	Vigas mistas com perfis de alma cheia	140
6.4.2	Metodologia de Lawson e Hicks (2011)	141
6.4.2.1	Influência do diâmetro das aberturas na diferença percentual e no estado limite	141
6.4.2.2	Influência da altura expandida na diferença percentual e no estado limite	142
6.4.2.3	Influência da distância entre aberturas na diferença percentual e no estado limite	144
6.4.2.4	Análise de desempenho da viga mista com perfil celular	147
6.4.3	Metodologia de Ward (1990).....	149
6.4.3.1	Influência do diâmetro das aberturas na diferença percentual e no estado limite	149
6.4.3.2	Influência da altura expandida na diferença percentual e no estado limite	151
6.4.3.3	Influência da distância entre aberturas na diferença percentual e no estado limite	153
6.4.3.4	Análise de desempenho da viga mista com perfil celular	155
6.4.4	Comparação entre as metodologias de Lawson e Hicks (2011) e de Ward (1990)	157
7	CONCLUSÕES.....	160
7.1	Sobre o trabalho realizado	160
7.2	Sugestões para trabalhos futuros	162

8	REFERÊNCIAS	164
	APÊNDICE A – RESULTADOS DO ESTUDO PARAMÉTRICO.....	167

1 INTRODUÇÃO

1.1 Vigas alveolares

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, 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. Essas vigas também são referidas na literatura técnica como “vigas de alma expandida”.

As primeiras vigas com aberturas sequenciais na alma a serem fabricadas foram as vigas casteladas, denominadas dessa forma devido ao seu padrão hexagonal que se assemelha às muralhas de um castelo. Em alguns lugares foram chamadas de vigas colméia, pelo fato de os furos lembrarem os alvéolos de uma colméia. O desenvolvimento dos equipamentos de corte e soldagem dos perfis de aço permitiu o surgimento das vigas celulares, que recebem esse nome em função das aberturas circulares.

As vigas casteladas tiveram seu primeiro pedido de patente em 1937, pelo engenheiro Geoffrey Murray Boyd. A ideia de fabricação do perfil castelado ocorreu à Boyd em 1935, quando trabalhava como engenheiro de estruturas em uma construção em Buenos Aires, na Argentina. Nessa construção era necessário projetar um perfil para ser utilizado como monotrilha para uma talha. A largura da mesa do perfil era restringida pela abertura da talha e nenhum dos perfis disponíveis com a largura da mesa desejada tinham rigidez suficiente para vencer o vão, isso fez com que Boyd tivesse que castelar o perfil de forma a aumentar a sua altura e dessa maneira aumentar sua rigidez (Knowles, 1991).

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, o uso de vigas casteladas voltou a ser empregado, ao mesmo

tempo em que começaram a ser avaliadas as vantagens de vigas celulares (Pinho, 2009).

O processo de expansão da alma, que causa o aumento da altura, concede maior inércia à viga alveolar, o que pode resultar em maior resistência à flexão e maior rigidez aos deslocamentos na direção do plano médio da alma. Entretanto, as aberturas na alma alteram em diversos aspectos o comportamento estrutural se comparado ao perfil original de alma cheia. A presença dos furos na alma não apenas altera a importância relativa dos diferentes modos de colapso possíveis, como também, introduz a possibilidade de novos modos.

Embora as vigas alveolares tenham aberturas regulares, em alguns pontos é necessário inserir enrijecedores (chapas) para aumentar a resistência local quanto ao efeito de forças localizadas, como por exemplo, nas seções que apoiam vigas secundárias ou em seção com elevada carga concentrada, como mostrado a Figura 1. Pode-se também utilizar enrijecedores próximos aos apoios nas regiões de esforço cortante elevado.



Figura 1 - Vigas com aberturas preenchidas com chapas na região do apoio

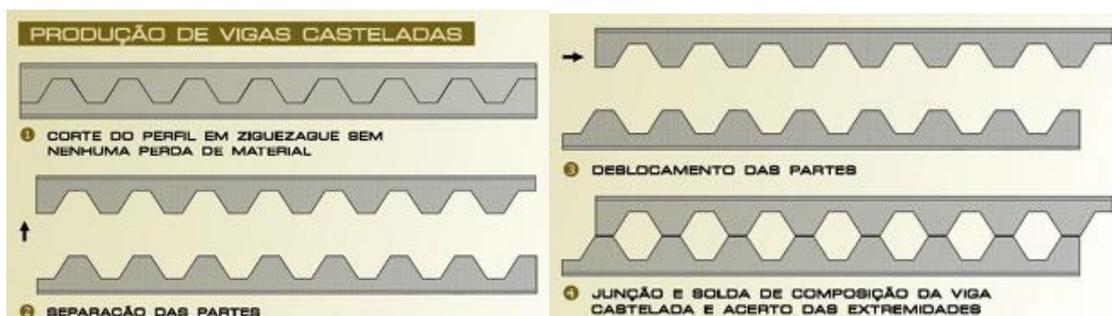
Fonte: Silveira (2011)

1.2 Fabricação das vigas alveolares

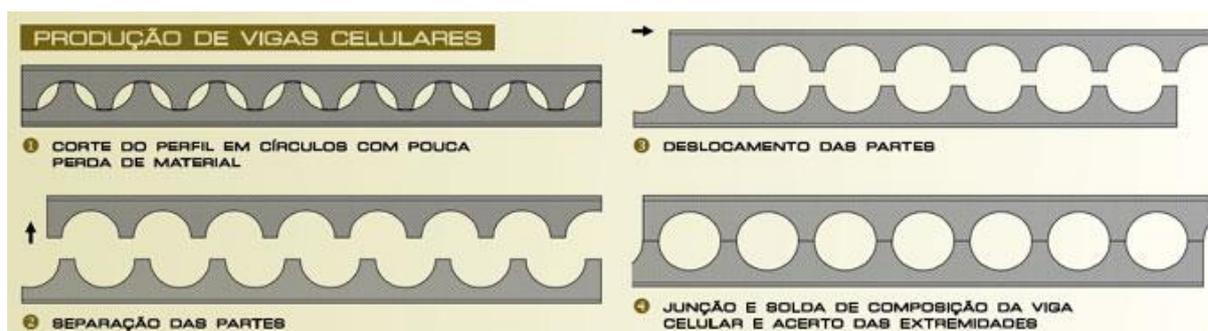
As vigas casteladas e celulares são feitas a partir de perfis de seção I ou H, cuja alma é cortada longitudinalmente no formato desejado. Em seguida, as duas

metades são deslocadas e soldadas pelo eixo, de forma a gerar aberturas em seqüência ao longo da alma e acréscimo na altura da seção transversal. Nas vigas casteladas, o padrão de corte permite que não haja perda de material, já nas vigas celulares há uma pequena perda.

As Figuras 2 e 3 ilustram o processo de fabricação de vigas casteladas e celulares.



(a) Produção de vigas casteladas



(b) Produção de vigas celulares

Figura 2 - Esquema de produção de vigas alveolares

Fonte: Pinho (2009)



Figura 3 - Produção de vigas celulares

Como opção na fabricação de vigas alveolares, pode-se proceder ao acréscimo de chapas planas no montante da alma, de forma a gerar um aumento ainda maior na altura do perfil (Figura 4 e 5).

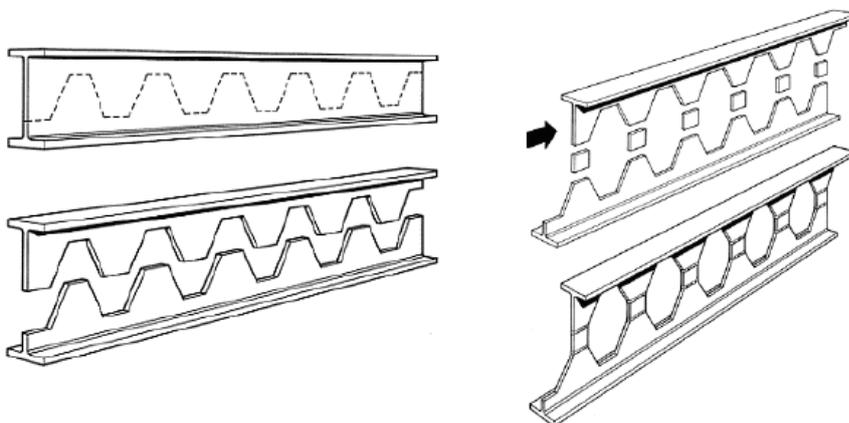


Figura 4 - Inserção de chapas planas no montante da alma

Fonte: Grumbauer (2014)

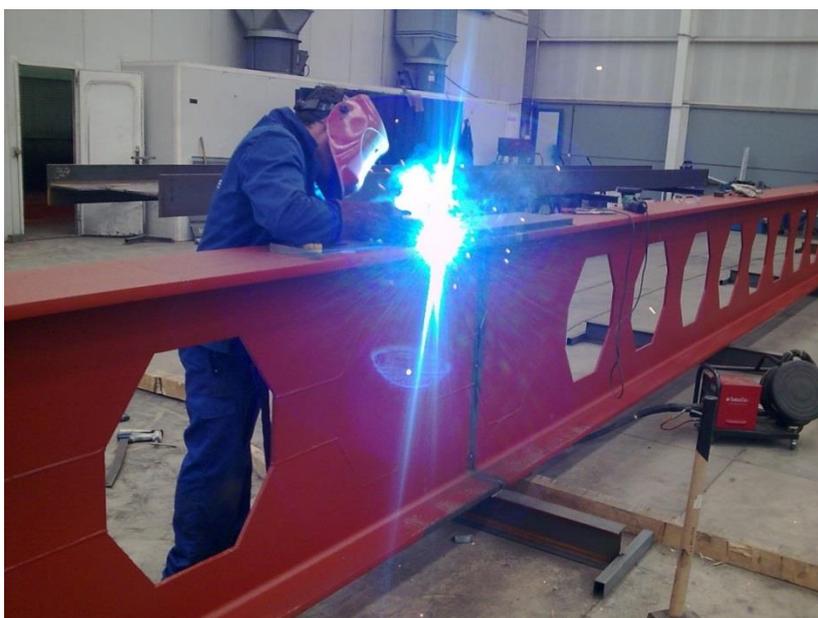


Figura 5 - Viga castelada com chapa expansora no montante da alma

1.3 Configuração das aberturas

Os parâmetros geométricos relacionados às aberturas na alma definem completamente a geometria da viga (Figura 6). 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 três padrões de corte: Padrão Litzka, Padrão Peiner e Padrão Anglo-Saxão (Figura 7). Nada impede que diferentes formas geométricas sejam adotadas, desde que os modos de colapso sejam verificados.

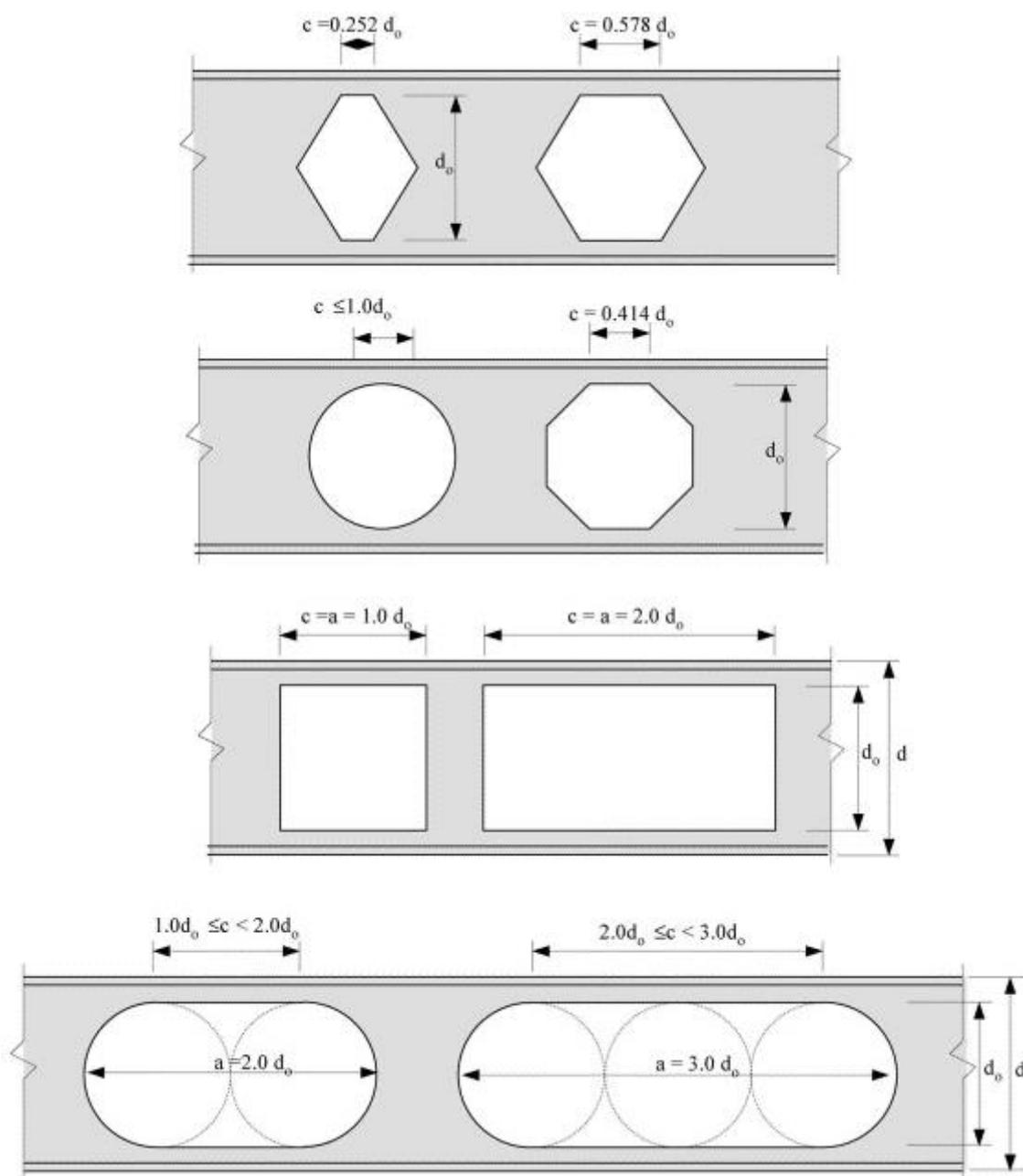


Figura 6 - Diferentes formas de abertura

Fonte: Chung *et al.* (2003)

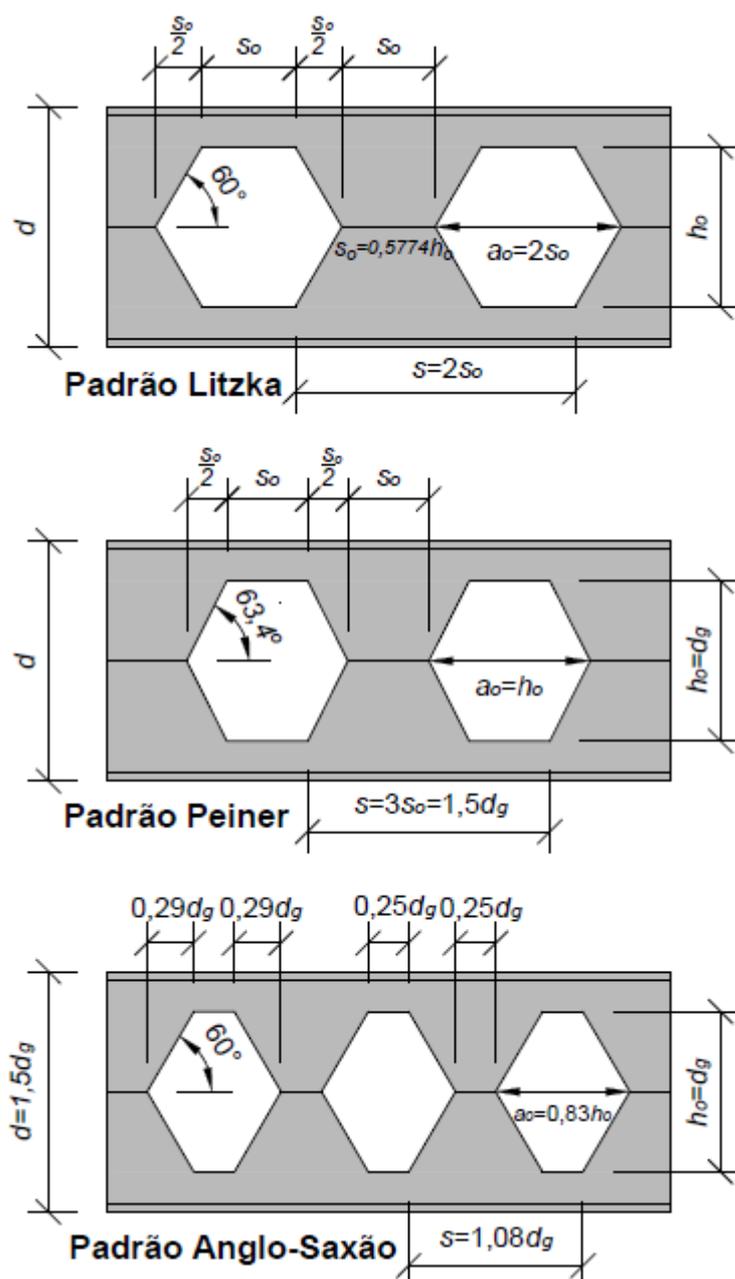


Figura 7 - Padrões tradicionais de corte de vigas casteladas

Fonte: Silveira (2011)

1.3.1 Padrão Celular

As vigas celulares possuem maior flexibilidade para variar o espaçamento entre as aberturas se comparadas às vigas casteladas, pois o traçado do corte para a produção de uma viga celular não implica numa simetria estrita entre a largura do montante da alma e o comprimento horizontal da abertura. Uma combinação consagrada é utilizada na maioria das vezes, Figura 8, de acordo com Harper (1994) *apud* Abreu *et al.* (2010), pois oferece resultados compensadores.

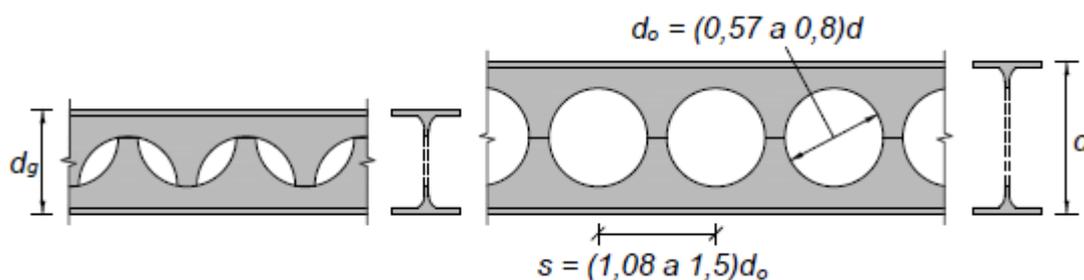


Figura 8 - Geometria de vigas celulares

Fonte: Abreu *et al.* (2010)

As seguintes vantagens são obtidas com a possibilidade de se variar o espaçamento e o tamanho das aberturas em vigas celulares:

- 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.

Comparando uma viga celular com uma castelada no padrão anglo-saxão, ambas com a mesma altura total, como apresentadas na Figura 9, observa-se que a viga celular possui menos aberturas que a castelada e maior largura no montante da alma, o que pode ser vantajoso dependendo das condições de carregamento.

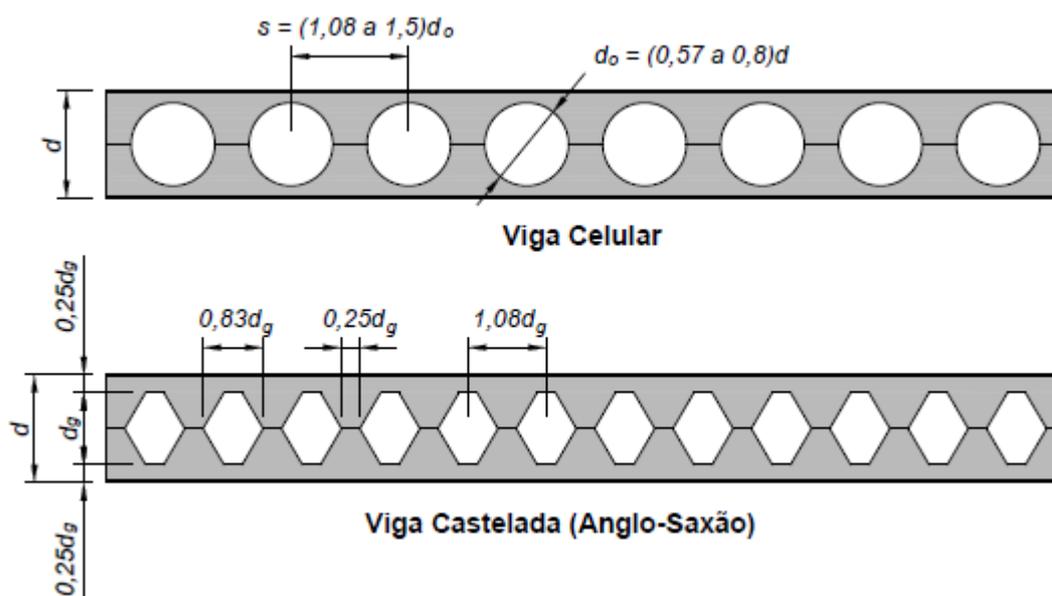


Figura 9 - Comparação entre viga celular e viga castelada de mesma altura

Fonte: Harper (1994) *apud* Oliveira, L. (2012)

1.4 Vantagens e desvantagens das vigas alveolares

As principais vantagens das vigas alveolares são:

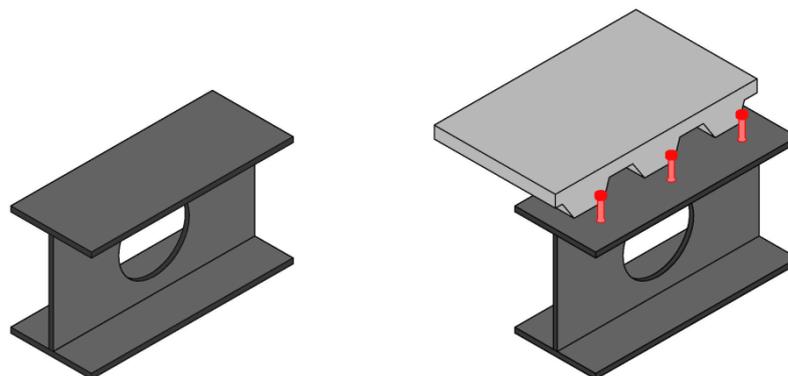
- Podem ter altura total até 60% maior que a do perfil original de alma cheia, o que pode resultar em maior resistência à flexão e maior rigidez aos deslocamentos na direção do plano médio da alma;
- São sempre mais leves que um perfil de alma cheia de mesma altura, dessa forma, permitem redução do peso médio das estruturas;
- Possibilitam vãos livres maiores, reduzindo o número de pilares e fundações, levando a uma montagem mais rápida e mais econômica;
- Permitem redução do espaço estrutural pela passagem de dutos nas aberturas, 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;

Como principais desvantagens, podem ser citadas:

- Menor capacidade resistente ao esforço cortante;
- Alguns casos exigem a inserção de reforço na alma;
- Pouco eficientes na resistência a cargas localizadas;

1.5 Vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares de aço

A viga com perfil de aço celular, assim como a viga de aço de alma cheia é dimensionada considerando apenas a resistência do perfil de aço se não houver ligação mecânica entre a laje de concreto e o perfil de aço (Figura 10a). Quando existe uma ligação mecânica por meio de conectores de cisalhamento entre a laje de concreto e o perfil de aço, a viga de perfil celular pode ser dimensionada como mista, considerando a participação do concreto na resistência à flexão (Figura 10b).



(a) Vigas celulares de aço

(b) Vigas celulares mistas de aço e concreto

Figura 10 - Vigas celulares de aço e vigas celulares mistas de aço e concreto

Fonte: Oliveira, T. (2012)

Adicionando-se o potencial das vigas celulares de aço à construção mista, o efeito na economia de material é ainda mais promissor, pois as vigas mistas de aço e concreto formam o sistema de piso mais eficiente da atualidade, dada ao aumento considerável na rigidez do piso, a redução no peso dos perfis de aço de 20% a 40% e a menor altura da seção viga-laje (Queiroz *et al.*, 2001).

A Figura 11 faz uma comparação entre a viga mista com perfil de alma cheia e a viga mista com perfil celular no que se refere a intervalo de vão e altura da estrutura. Utilizando uma viga mista com perfis celulares se consegue vencer vãos ainda maiores que os da viga mista convencional.

**Viga mista - perfil celular e laje mista**

Figura 11 - Vigas celulares de aço e vigas celulares mistas de aço e concreto

Fonte: Müller e Oppe (2014)

1.6 Justificativa

As vigas celulares são cada vez mais utilizadas no Brasil devido à necessidade do mercado da construção metálica por 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 exigidos nas normas técnicas.

É importante ressaltar que a norma vigente de projeto de estruturas de aço, a ABNT NBR 8800:2008, não aborda o dimensionamento de vigas celulares. E ainda existem poucos estudos específicos sobre vigas alveolares fabricados a partir de perfis brasileiros, o que dificulta o uso dessas vigas em contexto nacional.

Em relação às vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares, essa pesquisa se justifica pelas vantagens já citadas dos sistemas de piso mistos e das vigas celulares, e, também pelo fato da NBR 8800:2008 e das normas internacionais não abordarem esse tipo de viga, o que contribui para que o seu uso seja limitado, havendo a necessidade de mais pesquisas sobre o comportamento estrutural e dimensionamento dessas vigas. Pretende-se dar subsídios à comunidade acadêmica para que em uma próxima revisão da norma brasileira sejam incorporadas prescrições para o dimensionamento de vigas celulares mistas de aço e concreto.

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivo geral

Este trabalho de pesquisa tem como objetivo geral apresentar metodologias e desenvolver ferramentas computacionais para o dimensionamento de vigas de aço e vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares. Estudar a adequação das metodologias de dimensionamento recentes em relação ao comportamento estrutural dessas vigas e aplicá-las em exemplos práticos.

1.7.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos consistem em:

- a) Elaborar um estado da arte das pesquisas mais recentes sobre vigas de aço e vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares, incorporando as metodologias de cálculo existentes para o dimensionamento dessas vigas;
- b) Implementar ferramentas computacionais para o dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares conforme as metodologias estudadas na alínea a;
- c) Verificar a adequação das metodologias de dimensionamento por meio da comparação dos resultados obtidos pela ferramenta computacional com resultados experimentais da literatura;
- d) 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.

1.8 Estrutura da dissertação

O capítulo 1 apresenta uma introdução sobre vigas alveolares, vigas de aço celulares e vigas mistas de aço e concreto celulares, além da justificativa e dos objetivos gerais e específicos.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica, com base em artigos científicos, dissertações de mestrado e teses de doutorado, para a assimilação de conceitos fundamentais ao dimensionamento de vigas celulares e vigas mistas de aço e concreto celulares. É apresentado um estado de arte das pesquisas relacionadas a este assunto.

No capítulo 3 é descrita a metodologia de dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares descrita no guia de projeto europeu SCI: P355 desenvolvido por Lawson e Hicks (2011).

O capítulo 4 apresenta a metodologia de dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares descrita no guia de projeto europeu SCI: P100 desenvolvido por Ward (1990).

No capítulo 5 são discutidos todos os aspectos relevantes à elaboração do programa computacional de dimensionamento das vigas de aço celulares e vigas mistas de aço e concreto celulares. As limitações e as telas principais do programa computacional são discutidas. Também, são implementados dois exemplos numéricos da literatura para aferição do programa desenvolvido. Por fim, as metodologias discutidas nos capítulos 3 e 4 são confrontadas com resultados experimentais da literatura.

O capítulo 6 apresenta um estudo paramétrico de uma série de vigas mistas com perfis celulares de geometria definida conforme os limites das metodologias em estudo, dimensionadas com o programa aferido no capítulo 5. O intuito é estudar os modos de colapso e as variáveis que influenciam a resistência à flexão. Adicionalmente, as metodologias de dimensionamento são comparadas entre si.

O capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho e sugestões para estudos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Nesse capítulo, no item 2.2, são descritos inicialmente os modos de colapsos de vigas de aço celulares. Os estudos recentes e pesquisas científicas sobre vigas de aço e vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares são discutidos no item 2.3.

2.2 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 esforço cortante, os modos de colapso que podem aparecer são apresentados a seguir.

2.2.1 Formação de mecanismo Vierendeel

A presença de altos valores de esforço cortante na viga acarreta a formação do mecanismo Vierendeel (Figura 12). 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 alturas dos “tês” inferior e superior e grande comprimento de solda entre duas aberturas (Vieira, 2011). 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.

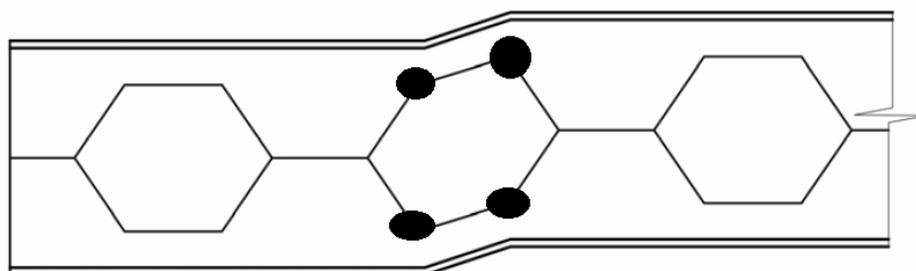


Figura 12 - Formação de mecanismo Vierendeel em vigas casteladas

Fonte: Demirdijian (1999)



Figura 13 - Mecanismo Vierendeel

Fonte: Tsavdaridis e D'mello (2011)

2.2.2 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.

2.2.3 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. Esse modo de colapso depende do comprimento entre as aberturas. Haverá maior possibilidade de colapso quanto menor for a comprimento entre aberturas (Figura 14).

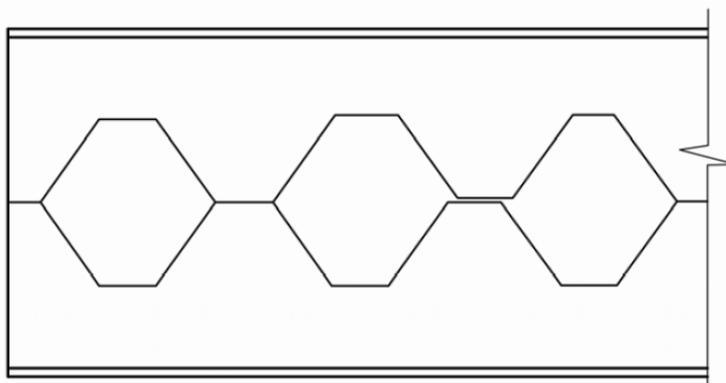


Figura 14 - Colapso da solda entre aberturas

Fonte: Demirdijian (1999)



Figura 15 - Colapso da solda entre aberturas

Fonte: Tsavdaridis e D'mello (2011)

2.2.4 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 (1984), 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.



Figura 16 - Flambagem lateral com torção

Fonte: Erdal *et al.* (2011)

2.2.5 Colapsos no montante da alma

Altas tensões são desenvolvidas no montante da alma devido ao:

- Cisalhamento longitudinal na seção de menor largura;
- Compressão devido à transferência da força cortante.

Segundo Lawson e Hicks (2011), a flambagem do montante da alma é um fenômeno complexo e depende dos seguintes fatores:

- Espaçamento entre aberturas;
- Forma da abertura (se circular ou retangular, por exemplo);
- Esbeltez da alma;
- Assimetria da posição da abertura em relação à altura do perfil da viga.

Dependendo da variação de tais parâmetros, o montante da alma pode sofrer flambagem por cisalhamento ou compressão.

2.2.5.1 Flambagem por cisalhamento

Fazendo o equilíbrio de forças na metade do painel apresentado na Figura 17, obtém-se a força de cisalhamento V_{wp} que surge ao longo da junta soldada. Essa força solicita o montante da alma à flexão, causando esforço de tração no contorno AB e de compressão no contorno CD. Esses esforços podem ocasionar a flambagem do montante da alma (Figura 18), pois 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 (1984), esse modo de colapso ocorre normalmente em regime inelástico ocorrendo uma significativa plastificação das seções.

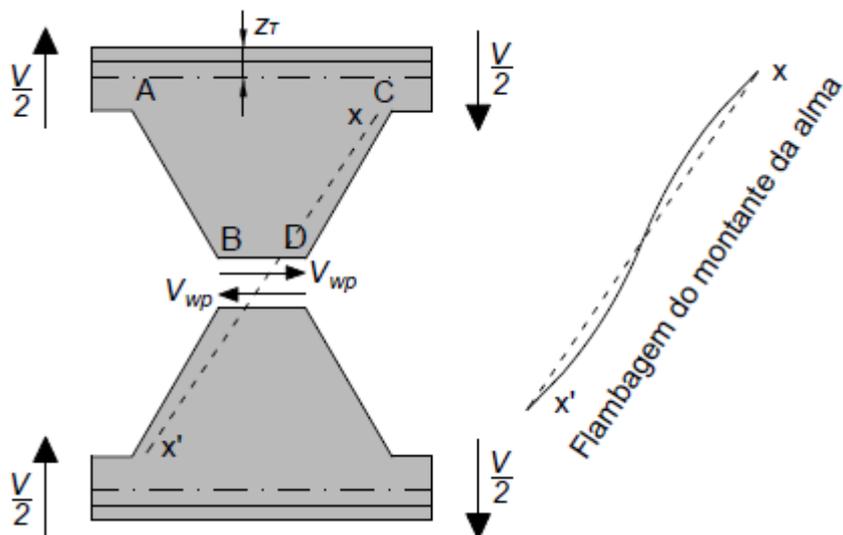


Figura 17 - Flambagem do montante da alma devido à força cortante

Fonte: Kerdal e Nethercot (1984)



Figura 18 - Flambagem do montante da alma de viga mista

Fonte: Nadjai *et al.* (2008) *apud* Silveira (2011)

2.2.5.2 Flambagem por compressão

A flambagem por compressão do montante da alma (Figura 19) 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.



Figura 19 - Flambagem por compressão do montante da alma
Fonte: Erdal *et al.* (2011)

2.3 Estado da arte

O método de fabricação de vigas celulares teve seu pedido de patente em 23 de janeiro de 1990. Peter A. Walker foi o inventor da viga celular, no entanto, a companhia britânica Wescol Structures Limited foi cessionária da invenção e, portanto, é a detentora de patentes dessas vigas em todo o mundo. A data de validade desta patente foi estimada até 10 de janeiro de 2009 (Oliveira L., 2012).

Como a fabricação das vigas celulares teve seu início numa época relativamente recente, existem poucas pesquisas abordando essas vigas. A seguir são apresentados alguns estudos relacionados a esse tema.

Chung *et al.* (2000) desenvolveram um estudo analítico e numérico a respeito da formação do mecanismo Vierendeel em vigas de aço com aberturas circulares. Foram propostas equações e diagramas de interação momento fletor *versus* força cortante para facilitar o dimensionamento. As equações foram validadas a partir de modelos numéricos de vigas com aberturas circulares. Foi observado que nas regiões de baixos valores de momento fletor, o método sugerido resultava em valores até 10% mais baixos que os dos modelos numéricos. Nas regiões com valores mais altos de momento fletor, as equações propostas se mostraram conservadoras.

Abreu *et al.* (2010) propuseram um procedimento para determinação do momento fletor resistente nominal para o estado limite-último de flambagem lateral com torção (FLT) de vigas de aço celulares submetidas à momento uniforme e carga uniformemente distribuída e que possuem vínculo de garfo (empenamento livre e torção impedida) nas extremidades do comprimento destravado. Os autores implementaram uma modelagem numérica pelo Método dos Elementos Finitos para análise não-linear prevendo comportamentos elástico e inelástico e a influência das tensões residuais usando o Programa ABAQUS. O procedimento de verificação da FLT proposto Abreu *et al.* (2010) para vigas celulares utiliza formulação similar à da norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 para vigas de alma cheia, utilizando as propriedades da seção transversal no centro das aberturas, com ajustes nos valores do comprimento destravado correspondente ao início do escoamento e do momento máximo alcançado. Abreu *et al.* (2010) observaram que os resultados obtidos pelo procedimento proposto foram consistentes e apresentaram boa concordância com os valores da análise numérica.

Bake (2010) desenvolveu modelos numéricos no Programa ABAQUS para estudar o comportamento de vigas celulares de aço e de vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares submetidos à temperatura ambiente e à temperatura elevada. O modelo numérico foi validado a partir de resultados experimentais disponíveis na literatura. Foi observado que os modelos numéricos desenvolvidos apresentaram boa concordância com os resultados experimentais.

Erdal *et al.* (2011) fizeram um estudo sobre a capacidade última de carregamento de vigas de aço celulares otimamente dimensionadas. Foram feitos ensaios em protótipos de vigas celulares variando as dimensões dos perfis de aço. Três perfis de aço diferentes foram utilizados na construção dos protótipos, sendo quatro protótipos para cada tipo de perfil, totalizando 12 protótipos. O vão inicial das vigas foi de 3 m e uma carga concentrada foi aplicada no centro da mesa superior. O método de dimensionamento da norma britânica BS 5920 (2000) foi utilizado com o procedimento de otimização da procura harmônica. Adicionalmente, foi usado o método de elementos finitos para simular os resultados experimentais e investigar os modos não lineares de colapso como a flambagem do montante da alma e o mecanismo Vierendeel.

Sweedan (2011) fez uma análise numérica da estabilidade lateral de vigas celulares. O estudo foi feito usando modelos tridimensionais de vigas celulares em elementos de casca, shell 181, no ANSYS 12. Os modelos eram simplesmente apoiados com diferentes seções transversais, comprimento de vãos e configurações de aberturas. A análise da estabilidade foi feita para os carregamentos de momento constante, carga aplicada no meio do vão e carga distribuída. A análise numérica revelou que excetuando o caso de vigas de alma cheia, o fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme, C_b , é significativamente influenciado pela geometria e esbelteza da viga. Além disso, o fator C_b de vigas celulares depende da configuração da abertura. Nessa pesquisa foi proposta uma fórmula empírica para o fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme, C_b , de vigas celulares por meio de ajuste dos resultados numéricos. Esse fator permite determinar o momento crítico de flambagem lateral considerando modos torcionais e distorcionais.

Segundo Lawson e Saverirajan (2011), os princípios da análise rígido-plástica podem ser invalidados para vigas mistas muito assimétricas ou para vigas mistas celulares com grandes aberturas, pois o eixo neutro se situa mais embaixo na seção transversal fazendo com que o concreto possa exceder o limite de deformação de 3,5‰ antes do bloco de tensões plásticas ser desenvolvido, conduzindo a uma redução da resistência à flexão em alto nível de deformação. Adicionalmente, na construção não escorada, existem deformações iniciais na seção de aço, o que significa que a resistência plástica da viga mista é desenvolvida em maiores deformações do que na construção escorada.

Lawson e Saverirajan (2011) propuseram um estudo analítico elásto-plástico simplificado para vigas celulares mistas. O equilíbrio da seção transversal da viga mista foi estabelecido em função da distribuição das deformações. Diagrama parábola-retângulo foi utilizado para o concreto com redução de resistência em deformações acima de 3,5‰. A resistência à flexão da viga mista é expressa como uma função da deformação da mesa inferior e é comparada a resistência de projeto do EN 1994:2004 e da AISC LRFD. O efeito de vários parâmetros no momento resistente plástico da viga foi observado, como a assimetria do perfil de aço, a resistência do aço, a influência do tipo de construção (escorada ou não escorada) e a redução da resistência do concreto em alto nível de deformação. Um momento de

95% do momento de plastificação foi obtido quando a deformação na mesa inferior chegou a 6 vezes a deformação de escoamento do aço para vigas mistas não escoradas. Vigas mistas celulares assimétricas alcançaram seu momento resistente plástico em deformações maiores que vigas mistas de alma cheia de mesmas dimensões.

Silveira (2011) fez uma análise numérica para avaliar o comportamento de vigas alveolares de aço com ênfase nos modos de colapso por plastificação. A análise foi feita no ABAQUS 6.9 utilizando elementos quadrilaterais do tipo casca com quatro nós e integração reduzida (S4R). Para a validação do modelo foram utilizados os resultados experimentais de Toprac e Cooke (1959) *apud* Silveira (2011). Com o modelo calibrado e validado foram desenvolvidos modelos numéricos para vigas alveolares obtidas a partir de perfis brasileiros, para a observação dos modos de colapso e do carregamento último. De acordo com Silveira (2011) os resultados da análise numérica permitiram identificar situações para as quais foi possível modificar algumas expressões de cálculo ou propor novas expressões para a verificação do desempenho estrutural de vigas casteladas e celulares.

Tsavidaridis e D'Mello (2011) fizeram um estudo do comportamento e da resistência de vigas de aço com diferentes tipos de aberturas sequenciais na alma. Foram testados sete protótipos incluindo duas vigas celulares convencionais e cinco vigas com diferentes tipos de aberturas sequenciais na alma com o objetivo de investigar os modos de colapsos e a resistência do montante da alma. Quatorze modelos numéricos foram analisados pelo método de elementos finitos e os resultados foram comparados com os experimentais. O efeito da relação do tamanho da abertura sobre a espessura da alma também foi estudado para verificar a estabilidade (esbeltez) do montante da alma submetido ao esforço cortante vertical. Análises elasto-plásticas foram realizadas para propor uma fórmula empírica com o objetivo de determinar a resistência última ao cisalhamento vertical do montante da alma formado por aberturas de formatos particulares.

Yost *et al.* (2012) fizeram uma investigação da distribuição de tensões em vigas celulares no estado limite de serviço usando análise de elementos finitos e ensaios experimentais. Duas vigas celulares de seções diferentes foram estudadas e para cada tipo de viga foram feitos quatro protótipos iguais. As vigas eram simplesmente

apoiadas e foram submetidas a cargas uniformemente distribuídas. A análise numérica foi feita usando modelos tridimensionais em elementos hexaédricos de 20 nós, brick, no ANSYS 7. Os dados experimentais foram comparados com os resultados numéricos e analíticos de Blodgett (1996) *apud* Yost *et al.* (2012), obtendo-se assim o nível de precisão dos métodos analíticos. Yost *et al.* (2012) concluíram que a magnitude e a localização das tensões críticas calculadas tiveram boa aproximação com os resultados experimentais.

Durif *et al.* (2013) realizaram ensaios experimentais e modelagem numérica de vigas celulares com aberturas sinusoidais. Três protótipos em escala real com diferentes tamanhos de aberturas foram ensaiados para determinar os modos de colapso e os valores últimos de resistência. Nessa pesquisa foram observados dois modos de colapsos. Nas aberturas com grande altura o colapso ocorreu pela formação de quatro rótulas plásticas nos cantos da seção crítica (mecanismo Vierendeel). No caso de aberturas pequenas, o colapso ocorreu por instabilidade do painel da alma fora das aberturas sinusoidais. Durif *et al.* (2013) desenvolveram um modelo numérico calibrado com os resultados experimentais. Esse modelo foi usado na análise do comportamento da seção crítica incluindo a distribuição de tensões. Os resultados experimentais forneceram informações qualitativas e quantitativas úteis para entender o comportamento de vigas celulares com aberturas sinusoidais. O modelo numérico mostrou boa precisão para prever os resultados experimentais e pode ser usado como uma ferramenta para gerar resultados complementares e desenvolver um modelo analítico.

Ferrari (2013) avaliou o comportamento estrutural de vigas casteladas e celulares mistas de aço e concreto, obtidas a partir de perfis laminados, utilizando o Método dos Elementos Finitos. O modelo numérico foi desenvolvido no ABAQUS, considerando-se a não linearidade de material e geométrica. Para a laje de concreto, foram utilizados elementos sólidos lineares de oito nós, três graus de liberdade por nó, com integração reduzida (C3D8R). Para a viga de aço foram utilizados elementos de casca fina com quatro nós, seis graus de liberdade por nó e integração reduzida (S4R). Para validação do modelo numérico foram analisados cinco modelos experimentais de vigas alveolares mistas de aço e concreto, com aberturas simétricas, cujos resultados de ensaio estão disponíveis na literatura. Segundo Ferrari (2013) o modelo numérico desenvolvido foi capaz de representar

adequadamente o comportamento estrutural de vigas alveolares mistas de aço e concreto, tanto no que se refere à capacidade última dos elementos estruturais, como no que se refere aos modos de colapso identificados.

Vieira *et al.* (2013) implementaram uma análise não linear pelo Método dos Elementos Finitos para avaliar o comportamento de vigas de aço celulares em relação à flambagem do montante da alma. Foram desenvolvidos modelos numéricos no programa ABAQUS, utilizando elementos de casca retangulares de quatro nós, com integração reduzida (S4R) não estruturados e com seis graus de liberdade por nó (três de translação e três de rotação). Foram analisados três casos de esbeltez de alma, utilizando os perfis laminados W310x21, W310x28 e W310x52 fabricados no Brasil pela Gerdau Açominas. As vigas biapoiadas foram submetidas a uma carga concentrada no meio do vão e possuíam contenções laterais de modo a evitar a flambagem lateral. Os autores observaram o aparecimento do acoplamento de modos de colapsos em diversos modelos, principalmente nos modelos em que o diâmetro e o espaçamento dos alvéolos são menores que os valores recomendados por Harper (1994) *apud* Vieira *et al.* (2013).

Panedpojaman *et al.* (2014) propuseram equações para determinar a capacidade resistente à flambagem do montante da alma por cisalhamento de vigas celulares simétricas e assimétricas. Foram desenvolvidos modelos numéricos no ANSYS 11 usando elementos de casca de quatro nós, shell 181. O modelo numérico foi validado a partir de resultados experimentais disponíveis na literatura. Foi observado que o procedimento de cálculo proposto subestima a capacidade resistente de vigas com aberturas pequenas e montantes da alma estreitos e superestima a capacidade resistente de vigas de perfis laminados com pequenas esbeltez de alma. Contudo, o procedimento de cálculo é mais preciso e menos conservador do que outros apresentados na literatura.

3 DIMENSIONAMENTO DE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO COM PERFIS CELULARES SEGUNDO LAWSON E HICKS (2011)

3.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada a metodologia de dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares descrita no guia de projeto europeu SCI: P355 desenvolvido por Lawson e Hicks (2011). O guia utiliza as prescrições das normas europeias quando se refere a estados limites e resistências de cálculo já consagradas. Para a utilização da metodologia de Lawson e Hicks (2011) com as prescrições normativas da ABNT NBR 8800:2008 foi necessário fazer uma adaptação no decorrer deste capítulo.

O item 3.2 apresenta as limitações geométricas do perfil celular para a aplicação dessa metodologia e os estados limites últimos e de serviço aplicáveis às vigas de aço ou mista celulares. Os procedimentos para determinação da resistência dos conectores de cisalhamento, do grau de interação e da largura efetiva da laje de concreto são descritos no item 3.3.

Nos itens 3.4 a 3.6 são descritos, respectivamente, os procedimentos para o cálculo da resistência aos estados limites últimos de plastificação por esforço cortante vertical, plastificação por momento fletor e formação do mecanismo Vierendeel. No item 3.7 é apresentado o procedimento de cálculo dos esforços resistentes dos estados limites últimos que ocorrem no montante da alma, tais como plastificação por esforço cortante longitudinal, flambagem e flexão.

O método para o cálculo do esforço cortante resistente limitado pela flexão e pela flambagem do montante da alma é descrito no item 3.8. No item 3.9 é apresentado o procedimento de cálculo para a determinação da flecha.

3.2 Geometria e estados limites do perfil celular

A Tabela 1 apresenta os estados limites últimos e os estados limites de serviço aplicáveis às vigas de aço ou mistas celulares simplesmente apoiadas com cargas uniformemente distribuídas e/ou pontuais. Os perfis de aço têm a particularidade de serem simétricos com aberturas centradas em relação à altura do perfil e com

espessura uniforme da alma. A laje de concreto pode ser considerada como maciça ou mista com nervuras transversais ao vão da viga.

Apesar deste capítulo descrever essencialmente o processo de cálculo de vigas mistas celulares, a verificação de uma viga de aço celular também pode ser feita segundo este modelo de dimensionamento. No entanto, é necessário ignorar a contribuição da laje de concreto e prever contenção lateral contínua para a viga, evitando assim a possibilidade de ocorrer o colapso por flambagem lateral com torção. A principal diferença entre a viga mista e a viga de aço é que o tê superior da viga de aço tem que resistir à compressão quando sujeito à flexão e, como consequência, ela fica menos eficiente para resistir ao mecanismo Vierendeel e ao esforço cortante.

Tabela 1 - Estados limites últimos e de serviço

Estados Limites Últimos	Estados Limites de Serviço
<p>Momento fletor</p> <p>Esforço cortante vertical</p> <p>Mecanismo Vierendeel</p> <p>Montante da alma (flambagem, flexão e esforço cortante longitudinal)</p>	<p>Flecha</p>

Para que o dimensionamento de vigas celulares possa ser estabelecido através dessa metodologia, algumas limitações geométricas são definidas na Tabela 2.

Tabela 2 - Limites geométricos para vigas celulares

Parâmetros	Limites
Diâmetro máximo da abertura (d_o)	$\leq 0,8d$
Altura mínima dos tês (d_T)	$\geq t_f + 30 \text{ mm}$
Largura mínima do montante da alma (s_o)	$\geq 0,3d_o$
Largura mínima da extremidade apoiada (s_e)	$\geq 0,5d_o$

O dimensionamento é definido para vigas com aberturas circulares, onde as grandezas geométricas fundamentais podem ser observados na Figura 20.

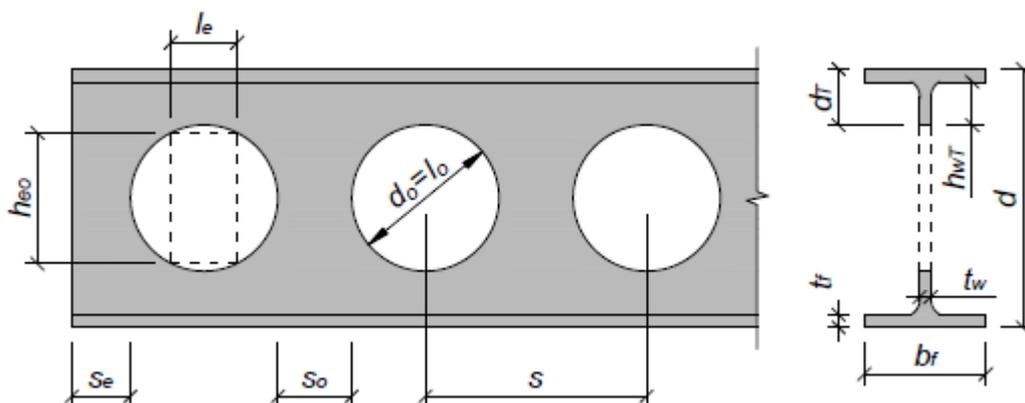


Figura 20 - Geometria e notações de vigas celulares.

3.3 Vigas mistas com perfil celular

Similarmente às vigas mistas de alma cheia, é necessário fazer uma avaliação do tipo de conexão entre o perfil de aço e a laje de concreto e proceder à verificação da laje escolhida, maciça ou mista. A verificação da laje não faz parte do escopo deste trabalho.

3.3.1 Conectores de cisalhamento

Para que os dois materiais, aço e concreto, trabalhem em conjunto deve haver uma conexão de cisalhamento entre o perfil de aço e a laje de concreto. É necessário garantir que a conexão de cisalhamento possua resistência total ou parcial em relação às tensões de cisalhamento longitudinais existentes na interface dos dois materiais.

Os conectores normalmente usados são os de pinos com cabeça e devem respeitar as dimensões geométricas e regras de espaçamento entre si, apresentadas pela ABNT NBR 8800:2008. A força resistente de cálculo dos conectores é dada como o menor valor entre:

$$Q_{Rd} = \frac{1}{2} \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}} \quad (1)$$

e

$$Q_{Rd} = \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}} \quad (2)$$

em que:

γ_{cs} é o coeficiente de ponderação da resistência do conector, igual a 1,25 para combinações últimas de ações normais, especiais ou de construção e igual a 1,10 para combinações especiais;

A_{cs} é área do conector;

E_c é o módulo de elasticidade do concreto;

f_{ck} é a resistência característica do concreto;

f_{ucs} é a resistência à ruptura do aço do conector;

R_g é o coeficiente para consideração do efeito de atuação de grupos de conectores;

R_p é o coeficiente para consideração da posição do conector.

O comportamento de conectores colocados dentro de nervuras das fôrmas de aço é muito mais complexo do que os colocados em lajes maciças, sendo influenciado por diversos fatores. Esses fatores podem provocar uma redução da resistência nominal dos conectores, daí a necessidade de incorporação dos coeficientes R_p e R_g na segunda fórmula.

Deve-se tomar para o coeficiente R_g os seguintes valores:

- a) 1,00, para um conector soldado em uma nervura de fôrma de aço perpendicular ao perfil de aço; para qualquer número de conectores em uma linha soldados diretamente no perfil de aço; para qualquer número de conectores em uma linha soldados através de uma fôrma de aço em uma nervura paralela ao perfil de aço e com relação b_f/h_f igual ou superior a 1,5;
- b) 0,85, para dois conectores soldados em uma nervura de fôrma de aço perpendicular ao perfil de aço; para qualquer número de conectores soldados através de uma fôrma de aço em uma nervura paralela ao perfil de aço e com relação b_f/h_f inferior a 1,5;

- c) 0,7, para três ou mais conectores soldados em uma nervura de fôrma de aço perpendicular ao perfil de aço.

R_p deve ter os seguintes valores :

- a) 1,00 para conectores soldados diretamente no perfil de aço; havendo nervuras paralelas ao perfil, pelo menos 50% da mesa deve ter contato com concreto;
- b) 0,75 para conectores soldados em laje mista com nervuras perpendiculares ao perfil e $e_{mh} \geq 50mm$. Para conectores soldados em uma forma com nervuras paralelas ao perfil;
- c) 0,60 para conectores soldados em laje mista com nervuras perpendiculares ao perfil e $e_{mh} < 50mm$.

Sendo e_{mh} a distância da borda do fuste do conector à alma da nervura da fôrma de aço, medida à meia altura da nervura e no sentido da força cortante que atua no conector, conforme Figura 21.

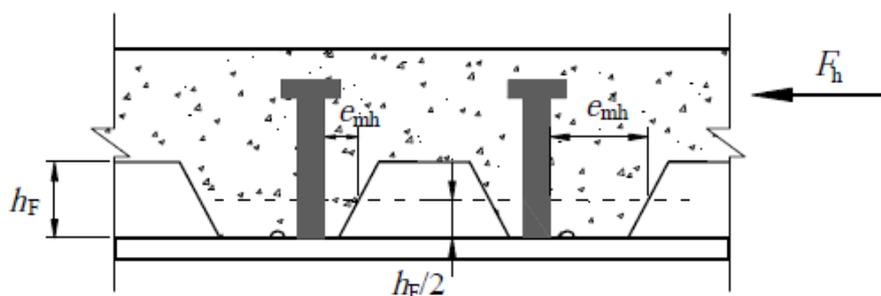


Figura 21 - Valor a ser tomado para e_{mh} .

Fonte: ABNT NBR 8800:2008

3.3.2 Largura efetiva da laje de concreto

O sistema de piso com vigas mistas consiste essencialmente de uma série de vigas T paralelas com mesa larga e delgada. A associação entre vigas e laje, por meio de conectores de cisalhamento, ocasiona uma transmissão de tensões de cisalhamento concentradas ao longo da conexão, sendo esta responsável pelo aumento de tensões normais na laje naquela região. Estas tensões diminuem gradativamente para ambos os lados.

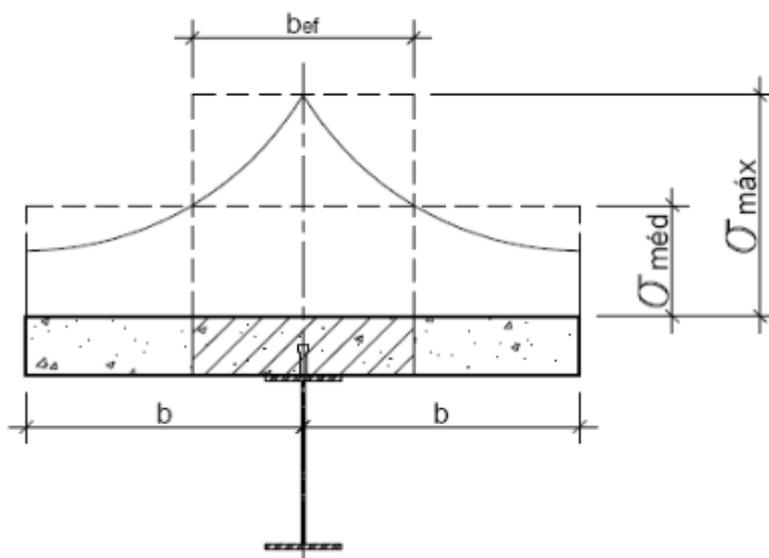


Figura 22 - Determinação da largura efetiva da laje de concreto.

Para avaliar a rigidez efetiva das vigas de aço e determinar os valores das tensões máximas, e utilizar as expressões da teoria de flexão geral, é comum recorrer ao artifício de considerar vigas mistas equivalentes, com banzos de largura reduzida.

$$b_{ef} = \frac{\sigma_{med}}{\sigma_{max}} b \quad (3)$$

A determinação real da distribuição das tensões normais na mesa de concreto seria muito laboriosa. Pesquisas baseadas na teoria da elasticidade mostraram que a relação b_{ef}/b é muito complexa e depende da relação de b com o vão L , do tipo de carregamento, das condições de contorno, da posição da seção ao longo do vão, entre outras variáveis.

Por isso, as normas fornecem expressões simplificadas para o cálculo da largura efetiva.

A largura efetiva da mesa de concreto, de cada lado da linha de centro da viga, deve ser igual ao menor dos seguintes valores:

- a) 1/8 do vão da viga mista, considerado entre linhas de centro dos apoios;
- b) metade da distância entre a linha de centro da viga analisada e a linha de centro da viga adjacente;
- c) distância da linha de centro da viga à borda de uma laje em balanço.

3.3.3 Interação parcial

Na interação total, os conectores são capazes de resistir à totalidade da força de cisalhamento de cálculo F_{hd} do sistema misto, calculada pela teoria plástica como o menor dos dois valores:

$$F_{hd} = 0,85f_{cd}bt_c \quad (4)$$

e

$$F_{hd} = A_a f_{yd} \quad (5)$$

em que:

A_a é a área do perfil de aço;

b é a largura efetiva da laje de concreto;

t_c é a altura da laje de concreto (se houver pré-laje de concreto pré-moldada, é a espessura acima desta pré-laje e, se houver laje com fôrma de aço incorporada, é a espessura acima das nervuras).

A interação parcial surge quando o número de conectores utilizados na viga mista não é suficiente para garantir a interação total, ou seja, a força resistente da conexão é menor que a força de cisalhamento de cálculo F_{hd} .

O grau de interação é definido como:

$$\eta_i = \frac{\sum Q_{Rd}}{F_{hd}} \quad (6)$$

Um grau mínimo de interação deve ser estabelecido para assegurar um comportamento dúctil da seção mista, que é calculado para um perfil de aço simétrico como:

$$\eta_i = 1 - \frac{E}{578f_y} (0,75 - 0,03L_e) \geq 0,4 \text{ para } L_e \leq 25m \quad (7)$$

$$\eta_i = 1 \text{ para } L_e > 25m \quad (8)$$

Sendo L_e o comprimento do trecho de momento positivo, em m.

Nas aberturas próximas dos apoios é necessário garantir um bom funcionamento da seção mista. Desta forma, deve-se garantir na seção transversal da abertura que o esforço resistente da laje de concreto à compressão seja igual ou superior a 40% do esforço de tração desenvolvido no tê inferior, ou seja:

$$N_{c,Rd} \geq 0,4N_{bT,Sd} \quad (9)$$

em que:

$N_{bT,Sd}$ é o valor do esforço de tração solicitante no tê inferior;

$N_{c,Rd}$ é o valor do esforço resistente da laje de concreto à compressão;

No caso de não ser verificada a expressão (9), é fundamental adicionar conectores de cisalhamento nas zonas críticas do vão ou, por outro lado, proceder-se a uma análise do momento fletor resistente da seção sem a contribuição da laje de concreto. Também convém ressaltar que quando não for conhecida a posição correta dos conectores é comum adotar-se que estes não estejam colocados nos últimos 300 mm do vão.

3.4 Esforço cortante na abertura

A verificação do estado limite último relativo ao esforço cortante é estabelecida de forma simplificada e conservadora para um carregamento uniformemente distribuído, considerando o esforço cortante solicitante em todo o comprimento da abertura equivalente como o valor mais elevado dentre os que atuam nas suas extremidades.

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.

3.4.1 Esforço cortante resistente plástico do perfil de aço na seção da abertura

Nas vigas de aço e mistas celulares, devido à presença de grandes aberturas ao longo do vão, ocorre uma redução bastante significativa da sua resistência ao

esforço cortante. O esforço cortante resistente de plastificação do perfil de aço na seção da abertura é igual a:

$$V_{pl,Rd} = \frac{0,6A_w f_y}{\gamma_{a1}} \quad (10)$$

em que:

A_w é a soma das áreas das almas dos tês superior e inferior;

f_y é tensão de escoamento do aço;

γ_{a1} é o coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,10.

A resistência ao esforço cortante das seções tê é limitada pelo mecanismo Vierendeel, onde a necessidade de determinar uma distribuição de esforço cortante nos tês compatível com o mecanismo Vierendeel, pode levar a um processo de cálculo iterativo. Lawson *et al.* (2006) afirmam que na maioria dos casos, a parcela de esforço cortante resistida pelo tê inferior varia entre 10% a 40% do esforço cortante total, dependendo da simetria da seção transversal, e pode ser considerado 20% como ponto de partida. No entanto, para vigas celulares com aberturas centradas na alma, a distribuição de esforço cortante pode ser de 50% em cada um dos tês, desde que o esforço cortante no tê inferior não exceda o limite máximo, ou seja:

$$V_{bT,Sd} \leq 2M_{b,NV,Rd}/l_e \quad (11)$$

em que:

l_e é o comprimento equivalente da abertura para o mecanismo Vierendeel;

$M_{b,NV,Rd}$ é o momento fletor resistente reduzido do tê inferior devido a presença de esforço cortante e axial.

3.4.2 Esforço cortante resistente da laje de concreto

O esforço cortante resistente da laje de concreto por unidade de comprimento pode ser definido conforme a ABNT NBR 8800:2008, como:

$$V_{c,Rd} = \frac{1000\tau_{Rd}k_v(1,2 + 40\rho)A_v}{b_n} \quad (12)$$

em que:

$$\rho = \frac{A_s}{A_v} \leq 0,02; \quad (12-a)$$

$$\tau_{Rd} = 0,25f_{ctd}; \quad (12-b)$$

$$f_{ctd} = \eta f_{ctk,inf} / \gamma_c; \quad (12-c)$$

$$\eta = 0,3 + 0,7(\rho_c / 2400); \quad (12-d)$$

k_v é um coeficiente que tem os seguintes valores:

- $(1,6 - d/1000) \geq 1,0$, caso haja armadura longitudinal de tração que se estenda a não menos que $d + \ell_{b,nec}$ além da seção considerada;
- 1,0, para os demais casos;

A_s é a área da armadura de tração;

A_v é a área resistente de concreto;

$\ell_{b,nec}$ é o comprimento de ancoragem necessário, dado na ABNT NBR 6118 para concreto de densidade normal;

$f_{ctk,inf}$ é a resistência à tração direta característica inferior do concreto igual a $0,21f_{ck}^{2/3}$, com $f_{ctk,inf}$ e f_{ck} expressas em megapascal (Mpa);

ρ_c é a massa específica do concreto.

Para calcular o esforço cortante resistente na largura efetiva da laje de concreto é utilizado o modelo de Lawson e Hicks (2011), que depende da altura efetiva da laje ($h_{t,ef}$). O valor da largura efetiva, para efeito de força cortante, é determinado através da expressão (13). A altura efetiva da laje, independentemente da utilização de forma de aço incorporada, pode ser considerada como 75% da sua altura total ($0,75h_t$).

$$b_w = b_f + 2h_{t,ef} \quad (13)$$

3.5 Momento fletor na abertura

A presença de aberturas na viga faz necessária a verificação da resistência a momento fletor no centro da abertura, onde algumas simplificações são adotadas com o objetivo de facilitar o processo de cálculo pelos métodos analíticos. A Figura 23 ilustra o esquema de esforços solicitantes considerados ao redor de uma abertura.

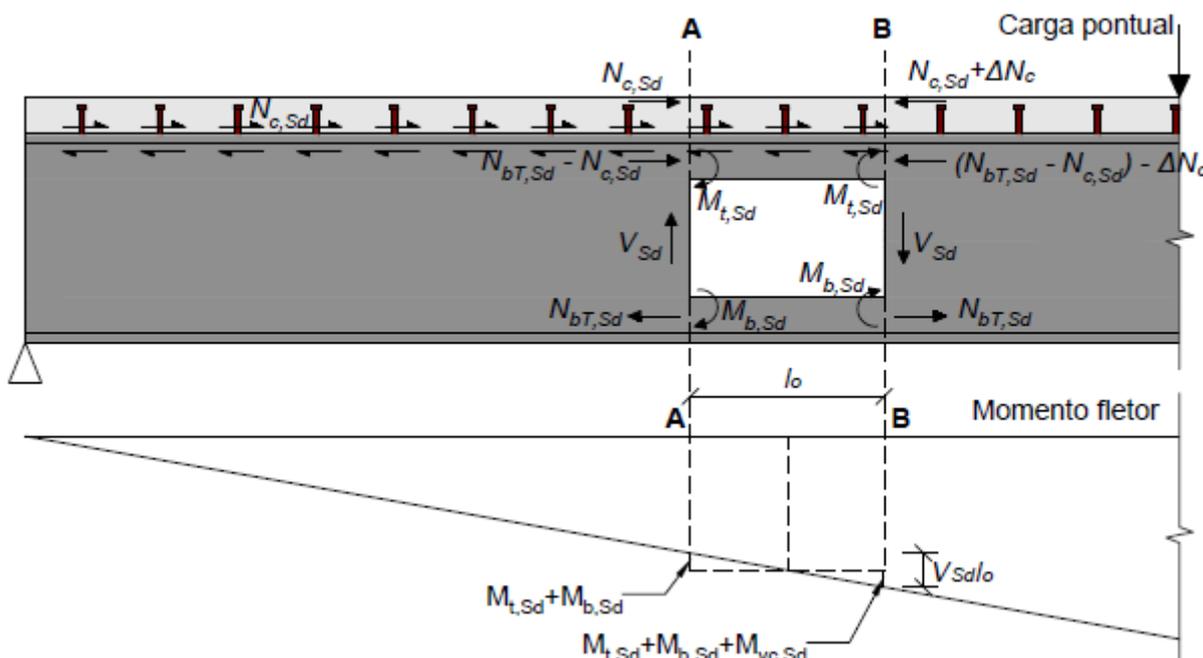


Figura 23 - Esquema de esforços ao redor de uma abertura retangular isolada

O equilíbrio de esforços permanece numa viga alveolar simplesmente apoiada através da formação de um esforço de tração no tê inferior, compensado com esforços de compressão na laje de concreto e no tê superior. No entanto, dependendo das proporções da laje e dos tês, o esforço de compressão no tê superior pode ser ignorado. O esforço de compressão na laje de concreto depende do número de conectores soldados no perfil de aço, que normalmente são distribuídos uniformemente ao longo da viga, enquanto o esforço de tração no tê inferior é mantido constante ao longo do comprimento da abertura.

O momento fletor resistente na abertura depende do grau de interação e da esbeltez dos componentes do tê superior, mas normalmente pode ser determinado com base na teoria dos blocos retangulares de tensão plástica. Por meio do equilíbrio de esforços no centro da 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. Na Figura 24 é possível observar os dois diferentes casos.

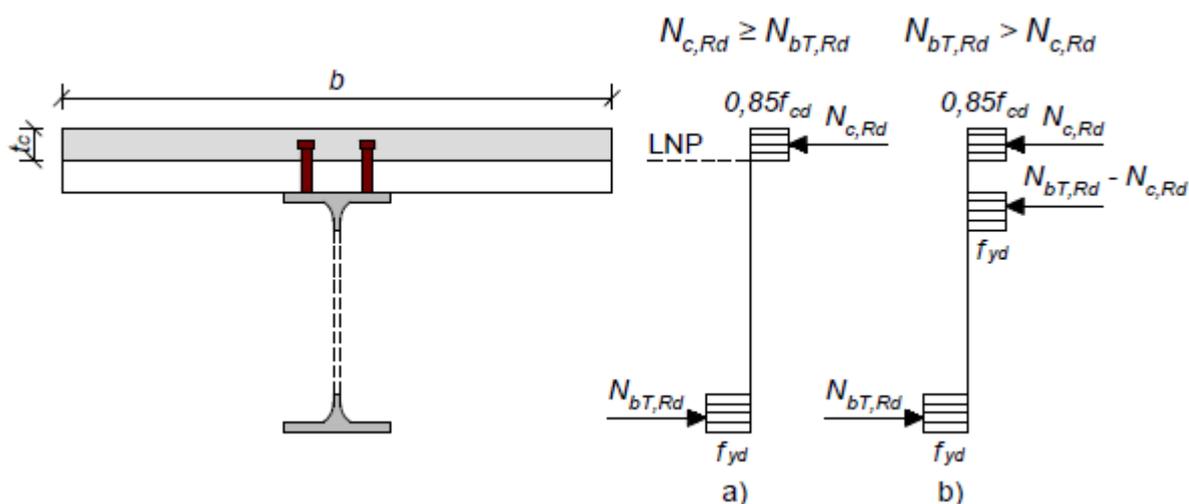


Figura 24 - Distribuição de tensões plásticas na secção transversal da zona da abertura: a) linha neutra plástica na laje mista; b) linha neutra plástica no tê superior

3.5.1 Linha neutra plástica na laje de concreto: $N_{c,Rd} \geq N_{bT,Rd}$

Considera-se que a linha neutra plástica se encontra na laje de concreto, para uma determinada altura acima da qual todo o concreto desenvolva uma tensão de $0,85f_{cd}$, quando o esforço de compressão resistente da laje de concreto ($N_{c,Rd}$) é superior ao esforço de tração resistente do tê inferior ($N_{bT,Rd}$). Nessa situação, é adotado que o esforço de tração solicitante no tê superior é nulo.

O esforço axial de compressão resistente da laje na abertura depende do grau de interação e pode ser calculado através do número de conectores existentes, desde o apoio mais próximo ao centro da abertura. No entanto, se o valor da força resistente dos conectores for superior ao valor da força resistente do concreto para interação total, este último deve ser considerado nos cálculos.

$$N_{c,Rd} = \min\{0,85f_{cd}bt_c; n_{sc}Q_{Rd}\} \quad (14)$$

Por sua vez, o valor do esforço axial de tração resistente de projeto do tê inferior é definido como:

$$N_{bT,Rd} = \frac{A_{bT}f_y}{\gamma_{a1}} \quad (15)$$

em que:

A_{bT} é a área do tê inferior.

Por meio do equilíbrio de forças, é possível determinar o valor do momento fletor resistente plástico na zona da abertura:

$$M_{o,Rd} = N_{bT,Rd} \left(h_{ef} + z_T + h_t - \frac{1}{2}z_c \right) \quad (16)$$

em que:

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, dada como:

$$z_c = \frac{N_{c,Rd}}{0,85f_{cd}b} \leq t_c \quad (17)$$

Conseqüentemente, o esforço axial de tração solicitante no tê inferior pode ser calculado:

$$N_{bT,Sd} = \frac{M_{Sd}}{h_{ef} + z_T + h_t - \frac{1}{2}z_c} \quad (18)$$

sendo:

M_{Sd} o momento fletor solicitante.

Como simplificação do processo de cálculo manual, o parâmetro z_c pode ser substituído pelo valor de cálculo de t_c na expressão (18).

3.5.2 Linha neutra plástica no tê superior: $N_{bT,Rd} > N_{c,Rd}$

Quando o esforço de tração resistente do tê inferior é superior ao esforço de compressão resistente da laje, é possível considerar que a posição da linha neutra plástica se encontra no tê superior. Nesse caso, se o esforço de tração solicitante é superior à capacidade resistente do concreto, o equilíbrio entre os esforços axiais ao redor da abertura tem de ser mantido através da formação de um esforço de compressão no tê superior. Conservadoramente, adota-se que o tê superior é sujeito a um carregamento uniforme e que a sua capacidade resistente seja: $N_{tT,Rd} = N_{bT,Rd} - N_{c,Rd}$

Fazendo o equilíbrio de esforços no centro de gravidade do tê superior, o valor de cálculo do momento fletor resistente plástico pode ser calculado:

$$M_{o,Rd} = N_{bT,Rd} h_{ef} + N_{c,Rd} \left(z_T + h_t - \frac{1}{2} t_c \right) \quad (19)$$

O esforço de tração atuante no tê inferior pode ser determinado em primeiro lugar através da equação (18), onde a compressão no tê superior é ignorada. No entanto, se o valor proveniente dessa equação for superior ao esforço resistente de compressão na laje de concreto ($N_{bT,Sd} > N_{c,Rd}$), o esforço de tração no tê inferior deve ser então calculado da seguinte forma:

$$N_{bT,Sd} = \frac{M_{Sd} - N_{c,Rd} \left(z_T + h_t - \frac{1}{2} t_c \right)}{h_{ef}} \quad (20)$$

Consequentemente, o esforço solicitante de compressão gerado no tê superior é estabelecido por um valor de cálculo igual a:

$$N_{tT,Sd} = N_{bT,Sd} - N_{c,Rd} \quad (21)$$

3.6 Mecanismo Vierendeel

Nas vigas mistas celulares, devido à ação mista local desenvolvida entre a laje e o perfil de aço, o valor do momento resistente de Vierendeel é superior ao das vigas de aço equivalentes, originando a possibilidade da criação de aberturas com diâmetros maiores. 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 t \hat{e} superior com a laje de concreto.

Contudo, o momento fletor resistente de Vierendeel não deve ser inferior à diferença dos valores dos momentos fletores solicitantes de cálculo, provocados pelo esforço cortante, à esquerda e à direita da abertura equivalente.

$$2M_{b,NV,Rd} + 2M_{t,NV,Rd} + M_{vc,Rd} \geq V_{sd}l_e \quad (22)$$

em que:

$M_{b,NV,Rd}$ é o momento fletor resistente reduzido do t \hat{e} inferior para a presença de esforço cortante e axial;

$M_{t,NV,Rd}$ é o momento fletor resistente reduzido do t \hat{e} superior para a presença de esforço cortante e axial;

$M_{vc,Rd}$ é o momento fletor resistente local devido à interação do t \hat{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 determinado com a seguinte equação:

$$l_e = 0,45d_o \quad (23)$$

Na verificação do momento fletor resistente de Vierendeel pela equação (22), a tensão de encruamento do aço nos cantos da abertura não é levada em conta, ocasionando uma abordagem conservadora da resistência à flexão de Vierendeel.

A resistência à flexão de Vierendeel depende do momento fletor resistente dos t \hat{e} s superior e inferior que, por sua vez, dependem da sua esbeltez. Desta forma, é permitida uma análise dos t \hat{e} s com base no seu comportamento plástico ou elástico.

3.6.1 Classificação da alma do tê

A classificação da alma do tê é feita em função da altura da alma do tê (h_{wT}) e do comprimento efetivo da abertura ($l_{o,ef}$). O comprimento efetivo leva em consideração a condição em que os têes estão submetidos a esforços de compressão. Seu valor para aberturas circulares é estabelecido como:

$$l_{o,ef} = 0,7d_0 \quad (24)$$

A Tabela 3, mostra os limites para a classificação da alma do tê. Para almas classificadas como classe 4, deve ser usado o valor limite h_{wT} de classe 3 no cálculo das propriedades elásticas efetivas da seção transversal.

Tabela 3 - Classificação da alma dos têes da viga mista celular

Classe	$l_{o,ef} \leq 32\epsilon t_w$	$32\epsilon t_w < l_{o,ef} \leq 36\epsilon t_w$	$l_{o,ef} > 36\epsilon t_w$
2	Sem limite	$h_{wT} \leq \frac{10\epsilon t_w}{\sqrt{1 - \left(\frac{32\epsilon t_w}{l_{o,ef}}\right)^2}}$	
3	Sem limite		$h_{wT} \leq \frac{14\epsilon t_w}{\sqrt{1 - \left(\frac{36\epsilon t_w}{l_{o,ef}}\right)^2}}$
4	Sem limite		

Uma viga celular de aço submetida à flexão está sujeita a esforços significativos de compressão no tê superior, portanto, a Tabela 3 não deve ser utilizada. Nesse caso, a classificação da alma do tê deve ser feita de acordo com a Tabela F.1 da NBR 8800:2008. Contudo, tanto nas vigas mistas como nas vigas de aço, a presença de esforços axiais de tração no tê inferior, melhora a classificação da seção transversal. Considerando a presença de esforço axial de tração no tê inferior, as almas dos têes de classe 3 podem ser estudadas como classe 2, se os blocos retangulares de tensões plásticas não excederem os valores de $10\epsilon t_w$, para a altura da alma em compressão. Isto pode ser verificado como:

$$\frac{N_{bT,sd}}{A_{bT}f_y/\gamma_{a1}} \geq 1 - \frac{20\epsilon t_w^2}{A_{bT}} \quad (25)$$

em que,

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (26)$$

As almas dos tês de classe 4 na presença de esforço de tração podem ser consideradas de classe 3, conforme:

$$h_{wT} \leq \frac{14\varepsilon' t_w}{\sqrt{1 - \left(\frac{36\varepsilon' t_w}{l_{o,ef}}\right)^2}} \quad (27)$$

em que,

$$\varepsilon' \leq \frac{\varepsilon}{\left(1 - \frac{N_{bT,sa}}{A_b f_y / \gamma_{a1}}\right)^{0,5}} \quad (28)$$

Para o cálculo do momento fletor resistente de Vierendeel, quando a mesa do tê é compacta, pode-se admitir uma redução da altura da alma de classe 3 para um valor correspondente ao limite de classe 2. Dessa forma, é possível calcular o momento fletor resistente de Vierendeel com base na teoria dos blocos retangulares de tensão plástica. A classificação da mesa pode ser feita de acordo com a Tabela F.1 da NBR 8800:2008.

3.6.2 Momento fletor resistente plástico

Quando os tês são de classe 2, o cálculo do momento fletor resistente plástico pode ser efetuado a partir do uso dos blocos de tensões plásticas, como mostra a Figura 25.

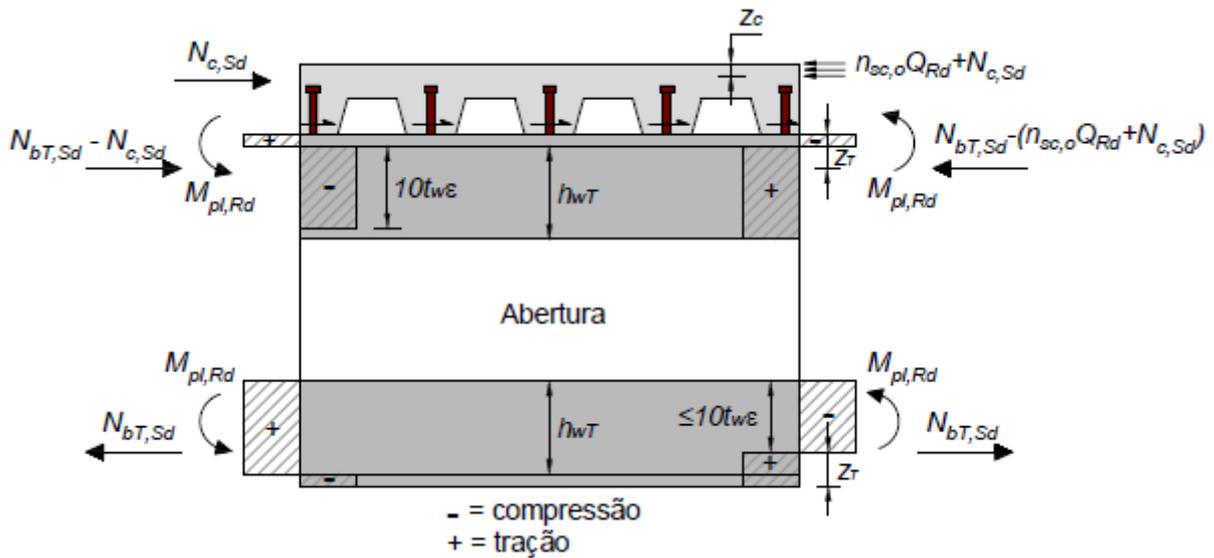


Figura 25 - Blocos de tensões plásticas em torno da abertura devido ao momento fletor de Vierendeel

Considerando a linha neutra plástica da seção tê na sua mesa superior, o valor de cálculo do momento fletor resistente plástico do tê pode ser estabelecido, na ausência de esforços axiais.

$$M_{pl,Rd} = \frac{A_{wT} f_y}{\gamma_{a1}} \left(\frac{1}{2} h_{wT} + t_f - z_{pl} \right) + \frac{A_f f_y}{\gamma_{a1}} \left(\frac{1}{2} t_f - z_{pl} + \frac{z_{pl}^2}{t_f} \right) \quad (29)$$

em que:

A_f é a área da mesa do tê;

A_{wT} é a área da alma do tê;

e a distância entre a linha neutra plástica e a extremidade da mesa de aço, z_{pl} , é dada como:

$$z_{pl} = \frac{A_f + A_{wT}}{2b_f} \quad (30)$$

3.6.2.1 Redução do momento fletor resistente na presença de esforço axial

A presença de esforços axiais de compressão ou tração provoca uma redução da resistência plástica à flexão da seção tê, onde para seções compactas o seu valor de cálculo reduzido pode ser obtido através da seguinte equação:

$$M_{pl,N,Rd} = M_{pl,Rd} \left(1 - \left(\frac{N_{sd}}{N_{pl,Rd}} \right)^2 \right) \quad (31)$$

em que:

N_{sd} é o esforço axial solicitante no tê;

$N_{pl,Rd}$ é o esforço axial resistente plástico da seção tê

3.6.2.2 Redução do momento fletor resistente na presença de esforço cortante

É necessário realizar uma redução da espessura alma quando o valor de esforço cortante solicitante é superior à metade do valor de esforço cortante resistente, ou seja, $\rho = V_{sd}/V_{Rd} > 0,5$. O valor da espessura reduzida da alma pode ser calculado como:

$$t_{w,ef} = t_w(1 - (2\rho - 1)^2) \quad (32)$$

Conseqüentemente, o valor de cálculo obtido da espessura reduzida da alma deve ser substituído na expressão (29) em função da dimensão t_w , onde posteriormente a expressão (31) deve ser usada para determinar o momento fletor resistente plástico reduzido da seção tê na presença de esforços cortante e axial, $M_{pl,N,Rd}$.

3.6.3 Momento fletor resistente elástico

O cálculo do momento fletor resistente elástico (Figura 26) deve ser efetuado nas seções tê de classe 3 e nas seções de classe 4, utilizando o valor limite h_{wT} de classe 3 no cálculo das propriedades elásticas efetivas da seção transversal.

3.6.3.2 Redução do momento fletor resistente na presença de esforço cortante

Para o cálculo elástico do momento fletor resistente dos tês, o efeito do esforço cortante pode ser ignorado desde que seja verificada a segurança para o esforço cortante na abertura.

3.6.4 Momento fletor resistente local devido à interação do tê superior com a laje de concreto

Um dos elementos que contribui para o momento fletor resistente de Vierendeel surge devido à interação do tê superior com a laje de concreto através de conectores. Este elemento depende não só da força de compressão desenvolvida pelo número de conectores aplicados diretamente acima de cada abertura (ΔN_c), assim como de um fator de redução que permita a flexibilidade da viga na seção da abertura de forma controlada, k_o .

O efeito de flexibilidade nas grandes aberturas ocorre devido aos esforços de tração desenvolvidos nos conectores e à necessidade de controlar a flecha ao longo da abertura (Figura 27), de forma evitar a fissuração do concreto e o possível colapso por esforço cortante.

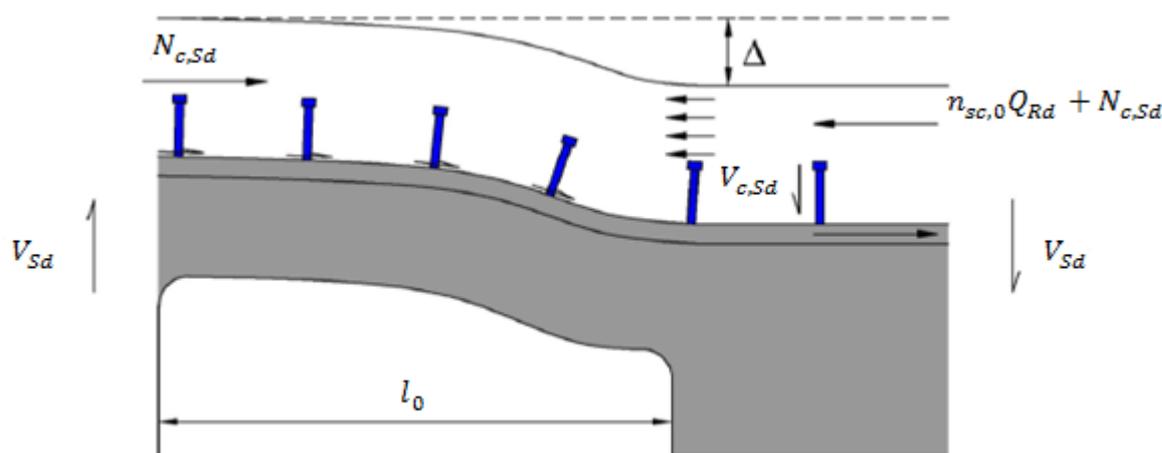


Figura 27 - Efeitos da flexibilidade ao longo da abertura

O valor do fator de redução k_o é definido como:

$$k_o = 1 - \frac{l_o}{25d_T} \quad (36)$$

No entanto, se $l_o \leq 5d_T$ pode-se considerar $k_o = 1,0$.

O momento fletor resistente local devido à interação do tê superior com a laje de concreto pode ser calculado da seguinte forma:

$$M_{vc,Rd} = \Delta N_c \left(z_T + h_t - \frac{1}{2} t_c \right) k_o \quad (37)$$

em que:

$$\Delta N_c = n_{sc,o} Q_{Rd} \quad (38)$$

sendo:

$n_{sc,o}$ o número de conectores aplicados diretamente acima da abertura.

No cálculo da força de compressão desenvolvida pelos conectores acima das aberturas circulares, deve-se considerar o comprimento da abertura retangular equivalente dado pela expressão (23).

Nos casos em que não é conhecida a posição exata dos conectores sobre a abertura, recomenda-se que seja utilizado o valor exato (ao invés do valor inteiro aproximado) da razão l_e sobre o espaçamento dos conectores no cálculo de $n_{sc,o}$. Também, de forma conservadora, pode ser feita a verificação do mecanismo Vierendeel sem levar em consideração a contribuição na resistência dada pela interação do tê superior com a laje de concreto.

3.7 Colapsos do montante da alma

A verificação da segurança do montante da alma é complexa pela possibilidade de ocorrer flambagem devido à interação entre todos os efeitos a que está sujeita (Figura 28), tais como: o esforço cortante longitudinal, compressão derivada do esforço cortante e flexão de Vierendeel.

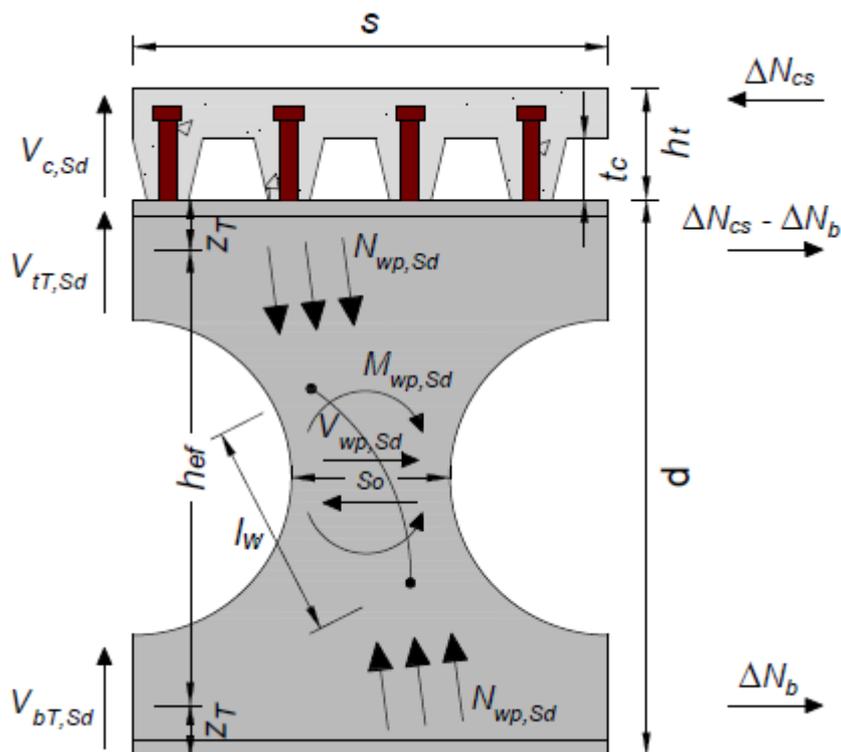


Figura 28 - Equilíbrio de esforços montante da alma entre duas aberturas circulares

3.7.1 Esforço cortante longitudinal

A formação de um esforço de tração no tê inferior permite determinar o valor do esforço cortante longitudinal solicitante no montante da alma ($V_{wp,sd}$), onde duas situações são consideradas. No primeiro caso, e como primeira aproximação, é estabelecido que o grau de interação é total, de modo que é formado um esforço axial na laje análogo ao esforço incremental desenvolvido no tê inferior entre os eixos das aberturas adjacentes ($V_{wp,sd} = \Delta N_b = \Delta N_{cs}$). Realizando o equilíbrio de forças na laje de concreto, o esforço cortante longitudinal solicitante no montante da alma é determinado da seguinte forma:

$$V_{wp,sd} = \frac{V_{sd}s}{h_{ef} + z_T + h_t - 0,5t_c} \quad (39)$$

em que:

s é o espaçamento entre eixos das aberturas;

V_{sd} é o esforço cortante solicitante no centro do montante da alma.

A segunda situação remete para a interação parcial, onde o valor de cálculo obtido na equação (39) é superior ao esforço incremental desenvolvido pelos conectores aplicados entre os centros das aberturas ($V_{wp,Sd} > \Delta N_{cs} = n_{sc,o} P_{Rd}$). Dessa forma o valor do esforço cortante longitudinal solicitante pode ser calculado com a seguinte expressão:

$$V_{wp,Sd} = \frac{V_{SdS} - \Delta N_{cs}(z_T + h_t - 0,5t_c)}{h_{ef}} \quad (40)$$

Apesar do estado complexo de tensões existente localmente na alma, o valor de cálculo do esforço cortante longitudinal resistente do montante da alma pode ser estabelecido como:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,6s_o t_w f_y}{\gamma_{a1}} \quad (41)$$

em que:

s_o é a largura do montante da alma.

3.7.2 Flexão

Nas vigas de aço simétricas, o valor do momento fletor solicitante a meia altura do montante da alma é igual a zero ($M_{wp,Sd} = 0$), onde os esforços cortantes solicitantes resistidos pelos tês superior e inferior têm valores análogos, resultando em momentos fletores opostos e iguais a $V_{wp,Sd} d_o / 2$, que atuam nas zonas superior e inferior do montante da alma.

Normalmente, nas vigas mistas celulares, a distribuição de esforço cortante adotada faz com que as seções tê e laje de concreto sejam sujeitas a valores diferentes, originando um momento fletor na meia altura do montante da alma. No entanto, é permitido adotar uma distribuição de esforço cortante qualquer para que o momento fletor na meia altura seja minimizado, desde que a equação (11) seja verificada. Nas zonas em que o esforço cortante solicitante toma valores baixos, a verificação do momento fletor no montante da alma pode ser ignorada.

Analisando as seções do montante da alma separadamente, o equilíbrio da seção inferior é garantido pelo desenvolvimento de um momento fletor na meia altura estabelecido como:

$$M_{wp,Sd} = -V_{bT,Sd}s + V_{wp,Sd} \frac{h_{ef}}{2} \quad (42)$$

Na seção superior do montante da alma, o equilíbrio é sustentado por um esforço incremental de compressão desenvolvido pelos conectores, onde o momento fletor solicitante pode ser escrito como:

$$M_{wp,Sd} = (V_{c,Sd} + V_{tT,Sd})s - V_{wp,Sd} \frac{h_{ef}}{2} - \Delta N_{cs}(z_T + h_t - 0,5t_c) \quad (43)$$

em que:

$V_{bT,Sd}$ é o esforço cortante solicitante no tê inferior;

$V_{tT,Sd}$ é o esforço cortante solicitante no tê superior;

$V_{c,Sd}$ é o esforço cortante solicitante na laje de concreto.

Somando as expressões (42) e (43) e considerando $V_{tT,Sd} = V_{Sd} - V_{c,Sd} - V_{bT,Sd}$, é obtido o valor do momento fletor solicitante na meia altura do montante da alma:

$$M_{wp,Sd} = \frac{(V_{Sd} - V_{bT,Sd})s}{2} - \frac{\Delta N_{cs}}{2}(z_T + h_t - 0,5t_c) \quad (44)$$

O valor de cálculo do momento fletor resistente do montante da alma deve ser efetuado com base no seu valor elástico e pode ser calculado da seguinte forma:

$$M_{wp,Rd} = \frac{s_o^2 t_w}{6} \frac{f_y}{\gamma_{a1}} \quad (45)$$

3.7.3 Flambagem

A verificação da resistência à flambagem do montante da alma é feita com base num modelo equivalente de escoras, com um comprimento de flambagem definido pelas dimensões da abertura e do próprio montante da alma (Figura 29), onde pode ser expressa como $N_{wp,Rd} \geq N_{wp,Sd}$.

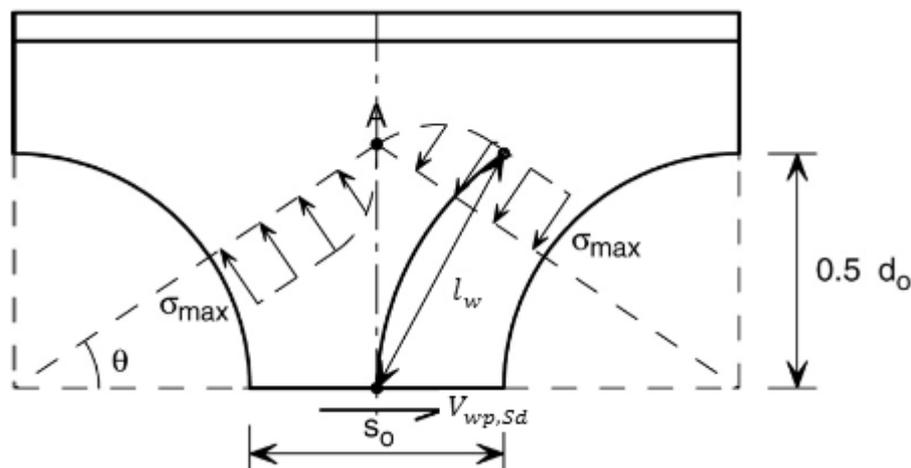


Figura 29 - Modelo de flambagem do montante da alma para aberturas circulares

A verificação da flambagem é diferente para aberturas adjacentes e aberturas distantes, onde no primeiro caso, a largura total do montante da alma adjacente resiste ao esforço de compressão derivado do esforço cortante longitudinal. Na segunda situação, o esforço de compressão considerado é resistido por uma largura efetiva da alma, onde a possibilidade de flambagem é independente do espaçamento das aberturas. De uma forma simplificada, pode-se considerar aberturas adjacentes quando o espaçamento entre elas é igual ou inferior ao comprimento da abertura. Naturalmente, as aberturas em que a largura do montante da alma é superior ao seu comprimento denominam-se de aberturas distantes.

A capacidade resistente do montante da alma à flambagem, como descrito anteriormente, depende do comprimento de flambagem e da geometria da abertura. O comprimento de flambagem é difícil de estabelecer devido ao estado de tensões existente em volta da abertura, mas para aberturas circulares, é adotado um limite para evitar a flambagem montante da alma na meia altura, onde a variação de tensões é considerada.

A ação do esforço cortante longitudinal na meia altura do montante da alma provoca esforços de compressão e tração nas suas seções superior e inferior. O esforço de compressão solicitante, para situações em que o momento fletor na meia altura é igual a zero, resulta na igualdade com o esforço cortante longitudinal. No entanto, através do equilíbrio de forças e adotando algumas simplificações, o valor do esforço de compressão solicitante pode ser calculado como:

$$N_{wp,Sd} = V_{wp,Sd} + \frac{|M_{wp,Sd}|}{\frac{d_o}{2}} \quad (46)$$

O comprimento de flambagem para as aberturas circulares é estabelecido como

$$l_w \geq 0,5 \sqrt{s_o^2 + d_o^2} \quad (47)$$

No cálculo do valor de cálculo da resistência à flambagem é necessário determinar o coeficiente de redução para o modo de flambagem relevante (χ), estabelecido na NBR 8800:2008. No entanto, a esbeltez reduzida do montante da alma é expressa de acordo com os comprimentos de flambagem, onde segundo Lawson et al. (2006) é estipulada como:

$$\lambda_0 = \frac{\sqrt{12} l_w t_w}{\lambda_1} \quad (48)$$

Reformulando a expressão (48), obtém-se a esbeltez reduzida para aberturas circulares:

$$\lambda_0 = \frac{1,75 \sqrt{s_o^2 + d_o^2}}{t_w \lambda_1} \quad (49)$$

onde o valor de λ_1 é estabelecido de acordo como:

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (50)$$

O valor da resistência à flambagem para aberturas adjacentes é definido como:

$$N_{wp,Rd} = \chi \frac{s_o t_w f_y}{\gamma_{a1}} \quad (51)$$

3.8 Restrição ao esforço cortante para aberturas adjacentes

Quando o dimensionamento de vigas celulares é limitado pela resistência do montante da alma à flexão e à flambagem, algumas restrições ao esforço cortante devem ser efetuadas, onde por meio da reformulação das equações de equilíbrio referidas anteriormente, é possível obter equações aproximadas para o valor máximo de esforço cortante resistente do montante da alma.

3.8.1 Flexão do montante da alma

Considerando o esforço cortante transferido para o tê inferior como o seu valor máximo devido ao momento fletor de Vierendeel, equação (11), e o momento fletor no montante da alma como a sua resistência elástica à flexão ($M_{wp, Rd} = M_{wp, Rd}$), o esforço cortante resistente limitado pela flexão do montante da alma, no caso de interação parcial, pode ser calculado conforme a seguinte equação:

$$V_{Rd} = \frac{2M_{wp, Rd}}{s} + \frac{4M_{b, NV, Rd}}{l_o} + \frac{\Delta N_{cs}}{s} (z_T + h_t - 0,5t_c) \quad (52)$$

Na situação de interação total, é considerado o valor de $V_{wp, Rd}$ como esforço de compressão, onde reescrevendo as equações anteriores é possível estabelecer o esforço cortante resistente.

$$V_{Rd} = \left(\frac{2M_{wp, Rd}}{s} + \frac{4M_{b, NV, Rd}}{l_o} \right) \frac{h_{ef} + h_t - 0,5t_c}{h_{ef}} \quad (53)$$

No caso do esforço cortante resistente obtido pelas equações anteriores, considerando $M_{wp, Rd} = 0$, ser superior ou igual ao esforço cortante solicitante, pode-se admitir que não é necessário considerar momento fletor solicitante na meia altura do montante da alma para manter a sua estabilidade.

3.8.2 Flambagem do montante da alma

Análogo à seção anterior e utilizando um valor apropriado de $N_{wp, Rd}$, a força cortante resistente limitada pela flambagem do montante da alma pode ser calculada da mesma maneira para aberturas circulares.

Para interação parcial, a resistência ao esforço cortante pode ser estipulada pela seguinte equação:

$$V_{Rd} = \frac{N_{wp, Rd}(d_o/s) + 4M_{b, NV, Rd}/l_o}{1 + d_o/h_{ef}} + \frac{\Delta N_{cs}}{s} (z_T + h_t - 0,5t_c) \quad (54)$$

No que diz respeito à interação total, pode ser determinado conforme a seguinte expressão:

$$V_{Rd} = (N_{wp,Rd}(d_o/s) + 4M_{b,NV,Rd}/l_o) \frac{h_{ef} + h_t - 0,5t_c}{h_{ef} + d_o} \quad (55)$$

3.9 Estados limites de serviço

A verificação ao estado limite de serviço de vigas mistas celulares consiste no controle da flecha, fissuração na laje e minimização das vibrações, assim como nas vigas de seção cheia. Contudo, para este modelo de vigas é criada uma flecha adicional devido à perda de rigidez de flexão e ao efeito de Vierendeel nas aberturas.

A NBR 8800:2008 estipula a verificação dos estados limites de serviço de vigas mistas com base na análise elástica, onde um conjunto de efeitos, tais como: *shear lag*, fluência, retração, fissuração, processo construtivo e interação parcial, devem ser considerados.

3.9.1 Flecha

Para vigas simplesmente apoiadas, a verificação da deformação se resume essencialmente ao cálculo da flecha no meio do vão. Por meio de uma análise elástica da seção equivalente homogeneizada é possível calcular a flecha no meio do vão através das seguintes expressões:

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{qL^4}{EI} \quad \text{para carga uniformemente distribuída} \quad (56)$$

$$\delta = \frac{1}{48} \frac{qL^3}{EI} \quad \text{para carga concentrada no meio do vão} \quad (57)$$

O cálculo da flecha nas vigas mistas depende do processo construtivo, onde na situação de construção não escorada, o perfil de aço suporta o peso próprio dos elementos. No que diz respeito às ações variáveis é a viga mista que é solicitada a resistir. Na construção escorada, a viga mista suporta na totalidade as cargas permanentes e variáveis.

O modelo de cálculo da flecha adicional por causa das aberturas abrange dois métodos semelhantes. No primeiro método é calculado uma aproximação do

momento de inércia na abertura que, posteriormente, é aplicado de forma independente ao cálculo das flechas adicionais provocadas pela flexão e pelo esforço cortante. Já no segundo método, é feita uma análise da flecha adicional por flexão pura devido à perda de rigidez nas aberturas, através de uma fórmula empírica. Essa aproximação também é verificada para a presença de esforço cortante, onde o valor obtido é mais conservador para aberturas pequenas, porque a flecha provocada pela ação de Vierendeel é menor.

No caso de múltiplas aberturas, a combinação de efeitos da distribuição de momento fletor e esforço cortante ao longo da viga, é representada pelo fator 0,7, onde o valor da flecha adicional pode ser considerado como:

$$\frac{\delta_{add}}{\delta} = 0,7n_o k_o \left(\frac{I_o}{L}\right) \left(\frac{d_o}{d}\right) \quad (58)$$

em que:

n_o é o número de aberturas na viga celular;

k_o é igual a 1,5.

Geralmente, nas vigas alveolares com múltiplas aberturas, o valor da flecha adicional devido à perda de rigidez nas aberturas, corresponde entre 12% a 15% do valor da flecha para uma viga de seção cheia com as mesmas dimensões.

4 DIMENSIONAMENTO DE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO COM PERFIS CELULARES DE ACORDO COM WARD (1990)

4.1 Introdução

Nesse capítulo é apresentada a metodologia de dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares descrita no guia de projeto europeu SCI: P100 desenvolvido por Ward (1990). O guia trata de vigas de aço e vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares construídas com aço grau 50 e utiliza as prescrições das normas europeias quando se refere a estados limites e resistências de cálculo já consagradas. Para a utilização da metodologia de Ward (1990) com as prescrições normativas da ABNT NBR 8800:2008 foi necessário fazer uma adaptação adotada no decorrer desse item.

O item 4.2 apresenta as limitações geométricas do perfil celular para a aplicação dessa metodologia e os estados limites últimos e de serviço aplicáveis às vigas de aço ou mista celulares. Os procedimentos para determinação dos esforços solicitantes que atuam nas vigas de aço e mistas celulares são descritos no item 4.3.

Nos item 4.4 a 4.7 são descritos, respectivamente, os procedimentos para o cálculo da resistência aos estados limites últimos de plastificação por esforço cortante, plastificação por momento fletor, formação do mecanismo Vierendeel e flexão e flambagem do montante da alma. No item 4.8 é apresentado o procedimento de cálculo para a determinação da flecha.

4.2 Geometria e estados limites do perfil celular

A Figura 30 mostra a geometria básica, as notações usadas para vigas celulares e os limites para a relação s/d_o , sendo s a distância entre as aberturas e d_o o diâmetro das mesmas.

- $1,08 < s/d_o < 1,5$
- $1,25 < d/d_o < 1,75$

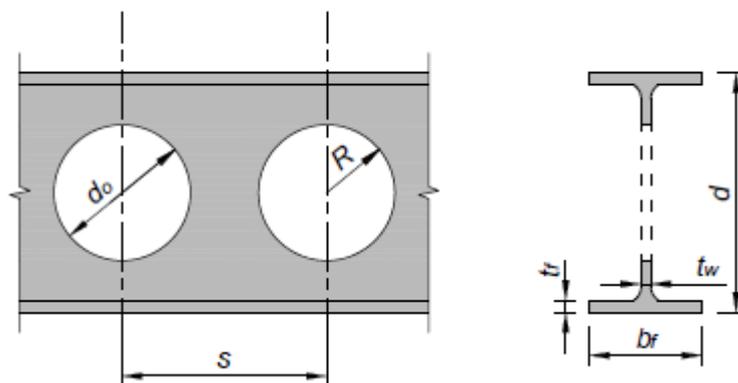


Figura 30 - Geometria e notações de vigas celulares

Os seguintes estados limites últimos devem ser verificados para seções celulares simétricas:

- Esforço cortante;
- Momento fletor;
- Flambagem lateral com torção;
- Mecanismo Vierendeel;
- Flexão e flambagem do montante da alma.

4.3 Esforços solicitantes

Antes de iniciar a verificação dos estados limites é importante determinar os esforços solicitantes que atuam na viga celular. Nas vigas celulares, além do momento fletor e do esforço cortante, é importante também determinar o esforço axial nos tês e esforço cortante longitudinal nos montantes da alma.

4.3.1 Vigas celulares de aço

Numa viga celular de aço simplesmente apoiada, o equilíbrio de esforços permanece através da formação de um esforço de tração no tê inferior, compensado com esforço de compressão no tê superior, os quais são calculados da seguinte forma:

$$N_{T,sd} = \frac{M_{sd}}{h_{ef}} \quad (59)$$

em que:

M_{sd} é o momento solicitante de cálculo na abertura;

h_{ef} é a distância entre os centroides dos tês superior e inferior.

O esforço cortante longitudinal no montante da alma pode ser determinado por meio da diferença entre os esforços axiais solicitantes que atuam em aberturas subsequentes, conforme mostrado na Figura 31, ou seja:

$$V_{wp,sd} = N_{T,sdi+1} - N_{T,sdi} \quad (60)$$

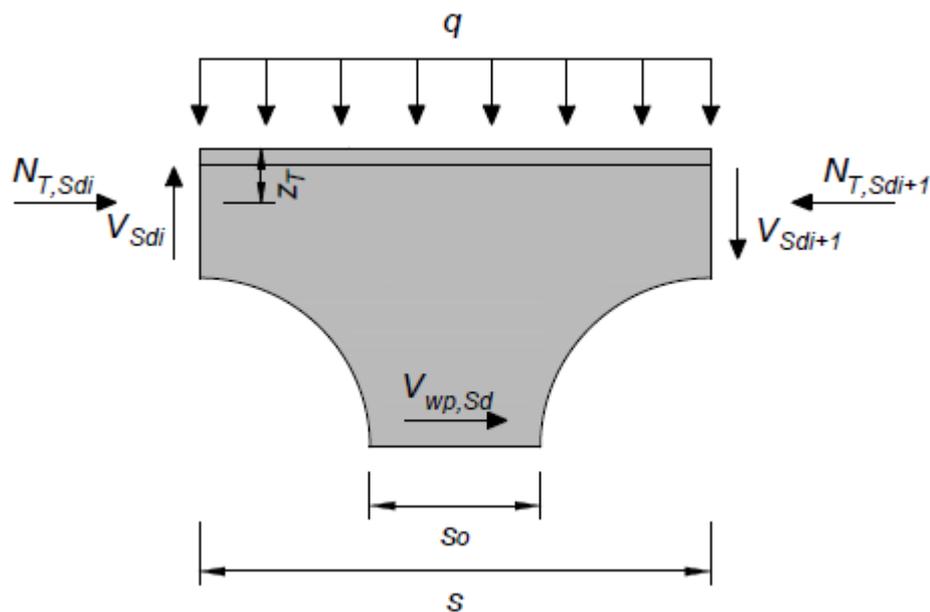


Figura 31 - Cortante longitudinal no montante da alma

4.3.2 Vigas celulares mistas

Numa viga mista celular simplesmente apoiada, a condição de equilíbrio ocorre por meio da formação de um esforço de tração no tê inferior, compensado com esforço de compressão na laje de concreto, como mostrado na Figura 32. No entanto, dependendo da resistência da conexão entre o apoio e o ponto do vão analisado, um esforço axial no tê superior também pode ocorrer.

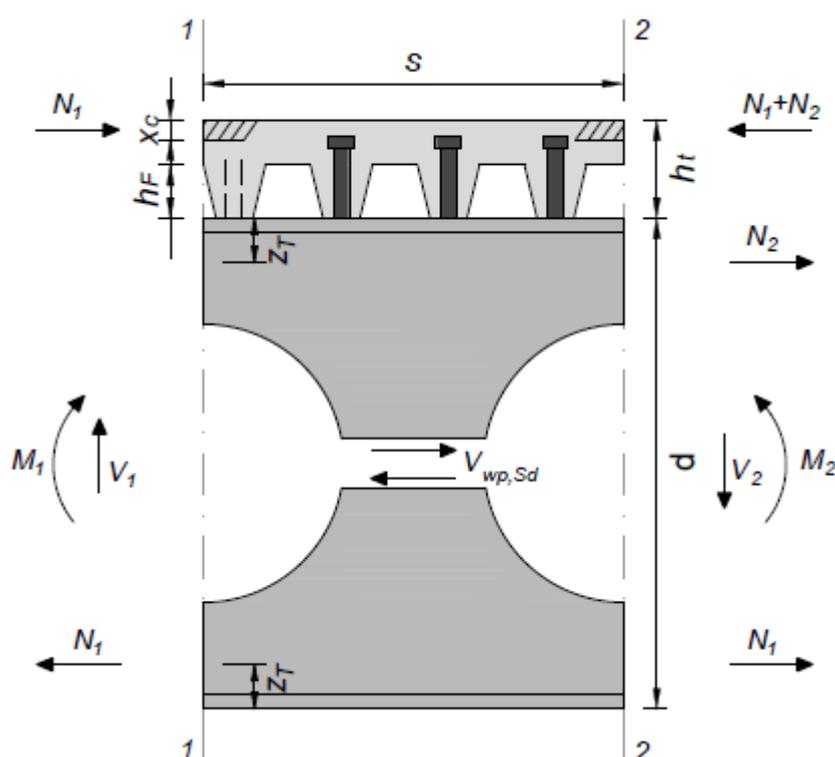


Figura 32 - Forças que atuam na viga mista celular

Se a resistência da conexão de cisalhamento entre o apoio e o ponto no vão em consideração for suficiente para desenvolver uma força axial no tê inferior dada pela equação (61), a interação é adequada.

$$N_{bT,Sd} = \frac{M_{Sd}}{(d - z_T + h_t - 0,5x_c)} \quad (61)$$

Neste caso, é considerado que o esforço axial atuante no tê superior é nulo, como pode ser visto na seção 1-1 da Figura 32.

Na equação (61), a altura da laje, x_c , solicitada pelo esforço $N_{bT,Sd}$ é dada pela equação (62).

$$x_c = \frac{N_{bT,Sd} t_c}{R_{cd}} \quad (62)$$

em que:

d é a altura total do perfil de aço;

z_T é a distância entre a extremidade da mesa e o centro de gravidade do tê superior;

h_t é a altura total da laje;

t_c é a espessura acima da nervura da laje com forma de aço incorporada;

R_{cd} é a resistência do concreto à compressão.

Quando a resistência da conexão ($n_{sc}Q_{Rd}$) é inferior ao esforço de tração solicitante no tê inferior, dado pela equação (61), o equilíbrio entre os esforços axiais ao redor da abertura é mantido por meio de um esforço axial adicional desenvolvido no tê superior, como pode ser visto na seção 2-2 da Figura 32.

Inicialmente, o esforço de tração atuante no tê inferior, calculado pela equação (61) é utilizado na equação (63) para determinar o esforço axial no tê superior.

$$N_{tT,Sd} = M_{Sd} \frac{(1 - n_{sc}Q_{Rd}/N_{bT,Sd})}{h_{ef}} \quad (63)$$

em que:

n_{sc} é o número de conectores entre o apoio mais próximo e o centro da abertura analisada;

Q_{Rd} é a resistência do conector.

A força axial no tê inferior deve ser revisada de acordo com a equação (64).

$$N_{bT,Sd} = n_{sc}Q_{Rd} + N_{tT,Sd} \quad (64)$$

É sugerido que $N_{tT,Sd} < 0,5n_{sc}Q_{Rd}$ e $N_{bT,Sd} \leq N_{bT,Rd}$.

O esforço cortante longitudinal no montante da alma pode ser determinado de acordo com a equação (65).

$$V_{wp,Sd} = N_{bT,Sdi+1} - N_{bT,Sdi} \quad (65)$$

4.4 Esforço cortante

A verificação do esforço cortante deve ser feita nos centros das aberturas e nos montantes da alma. O esforço cortante resistente na região da abertura é dado pela soma da resistência à plastificação por escoamento dos tê. O esforço cortante longitudinal resistente do montante da alma é calculado na região do montante com menor largura.

O esforço cortante vertical resistente na região da abertura é dado por:

$$V_{Rd} = 2 \frac{0,6A_{wT}f_y}{\gamma_{a1}} \quad (66)$$

em que:

A_{wT} é a área da alma tê;

f_y é a tensão de escoamento do aço;

γ_{a1} é o coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,10.

O esforço cortante longitudinal resistente do montante da alma é calculado como:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,6s_o t_w f_y}{\gamma_{a1}} \quad (67)$$

em que:

s_o é a distância entre aberturas;

t_w é a espessura da alma.

A verificação do esforço cortante para vigas celulares mistas é feita da mesma forma que para vigas celulares de aço, uma vez que a resistência ao esforço cortante da laje de concreto é ignorada.

4.5 Momento fletor

O momento fletor resistente é determinado calculando o momento de plastificação da seção transversal na região da abertura.

4.5.1 Vigas celulares de aço

O momento de plastificação na região da abertura é calculado pela equação (68).

$$M_{Rd} = \frac{Z_{xo}f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{A_T h_{ef} f_y}{\gamma_{a1}} \quad (68)$$

em que:

A_T é a área do tê.

4.5.2 Vigas celulares mistas

O momento fletor resistente de uma viga celular mista pode ser avaliado utilizando distribuição plástica de tensões, de forma semelhante ao descrito na ABNT NBR 8800:2008 para a determinação do momento fletor resistente de vigas mistas de alma cheia sob momento positivo e interação total. A linha neutra plástica usualmente cai na laje de concreto, mas também pode cair no tê superior, em sua mesa ou na alma, como mostrado na Figura 33.

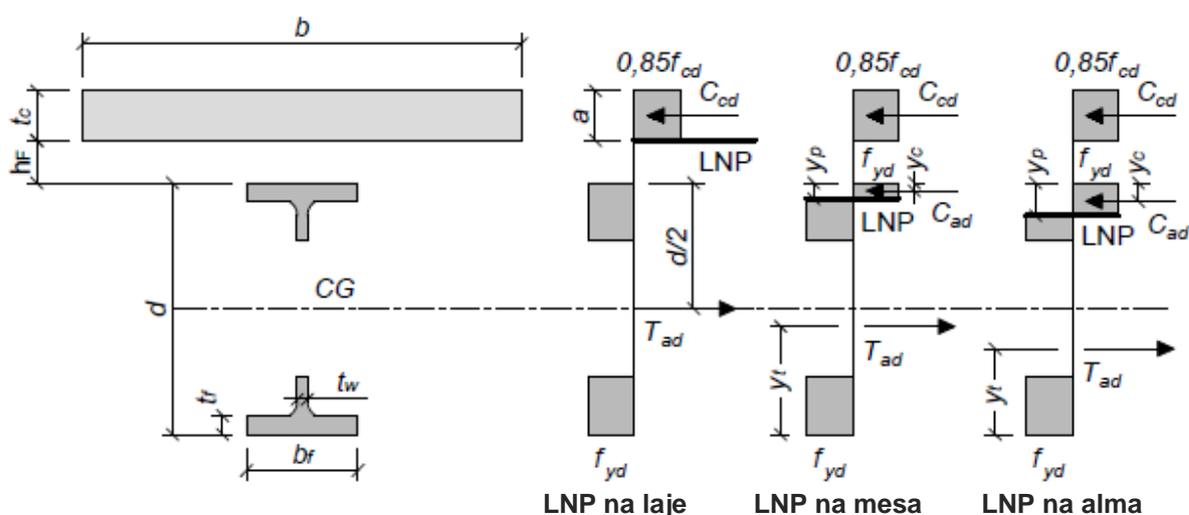


Figura 33 - Distribuição de tensões em vigas mistas celulares sob momento positivo e interação completa

Linha neutra plástica na laje de concreto: $0,85f_{cd}bt_c > A_a f_{yd}$

A linha neutra plástica se encontra na laje de concreto quando a resistência do concreto à compressão é maior que a resistência ao escoamento do perfil de aço.

A posição da linha neutra plástica na laje pode ser calculada pela equação (69).

$$a = \frac{A_a f_{yd}}{0,85f_{cd}b} \leq t_c \quad (69)$$

e o momento fletor resistente é dado pela equação (70).

$$M_{Rd} = T_{ad} \left(\frac{d}{2} + h_t - \frac{a}{2} \right) \quad (70)$$

Linha neutra plástica no tê superior: $A_a f_{yd} \geq 0,85 f_{cd} b t_c$

A linha neutra plástica ocorre no tê superior de aço quando a resistência ao escoamento do perfil de aço é maior que a resistência do concreto à compressão. Neste caso, a linha neutra plástica pode cair na mesa ou na alma do tê superior, como mostrado na Figura 33.

O valor da força de compressão da laje de concreto é definido como na equação (71).

$$C_{cd} = 0,85 f_{cd} b t_c \quad (71)$$

O valor da força de compressão no perfil de aço é igual a:

$$C_{ad} = \frac{1}{2} (A_a f_{yd} - C_{cd}) \quad (72)$$

E a força de tração no perfil de aço se torna:

$$T_{ad} = C_{cd} + C_{ad} \quad (73)$$

Linha neutra plástica na mesa superior: $C_{ad} < A_a f_{yd}$

A posição da linha neutra plástica na mesa superior do perfil de aço, em relação à extremidade da mesa superior, é determinada conforme equação (74).

$$y_p = \frac{C_{ad}}{A_f f_{yd}} t_f \quad (74)$$

em que:

A_f é a área da mesa do perfil de aço.

E o centro de gravidade da seção do perfil de aço comprimida, em relação à extremidade da mesa superior, é dado pela equação (75).

$$y_c = \frac{y_p}{2} \quad (75)$$

O centro de gravidade da seção tracionada do perfil de aço, em relação à extremidade da mesa inferior, é calculado pela equação (76).

$$y_t = \frac{A_T z_{Tt} + A_{Tt}(d - z_{Tt} - y_p)}{A_T + A_{Tt}} \quad (76)$$

A área da seção tracionada do tê superior é determinada conforme equação (77).

$$A_{Tt} = h_{wT} t_w + b_f (t_f - y_p) \quad (77)$$

O centro de gravidade da seção tracionada do tê superior, em relação à posição da linha neutra plástica, é dada pela equação (78).

$$z_{Tt} = \frac{\frac{b_f (t_f - y_p)^2}{2} + h_{wT} t_w \left(\frac{h_{wT}}{2} + t_f - y_p \right)}{A_{Tt}} \quad (78)$$

O momento fletor resistente é calculado conforme equação (79).

$$M_{Rd} = C_{ad}(d - y_t - y_c) + C_{cd} \left(\frac{t_c}{2} + h_F + d - y_t \right) \quad (79)$$

Linha neutra plástica na alma: $C_{ad} \geq A_{af} f_{yd}$

A posição da linha neutra plástica na alma do perfil de aço, em relação à extremidade da mesa superior, é determinada conforme a equação (80).

$$y_p = t_f + h_w \left(\frac{C_{ad} - A_{af} f_{yd}}{A_w f_{yd}} \right) \quad (80)$$

em que:

A_w é a soma das áreas das almas dos tê superior e inferior do perfil de aço.

E o centro de gravidade da seção do perfil de aço comprimida, em relação à extremidade da mesa superior, é dado pela equação (81).

$$y_c = \frac{\frac{b_f t_f^2}{2} + (y_p - t_f) t_w \left(\frac{y_p + t_f}{2} \right)}{A_{Tc}} \quad (81)$$

O centro de gravidade da seção tracionada do perfil de aço, em relação à extremidade da mesa inferior, é calculado pela equação (82).

$$y_t = \frac{A_T z_T + A_w(d - d_T/2 - y_p/2)}{A_T + A_{wt}} \quad (82)$$

A área da seção tracionada do tê superior é dada pela equação (83).

$$A_{wt} = (d_T - y_p)t_w \quad (83)$$

A área da seção comprimida do tê superior é determinada conforme equação (84).

$$A_{Tc} = b_f t_f + (y_p - t_f)t_w \quad (84)$$

O momento fletor resistente é calculado pela equação (79).

Se a interação é parcial, o momento resistente da viga mista celular pode ser determinado pela equação (85).

$$M_{Rd} = M_{el} + \eta_i(M_{pl} - M_{el}) \quad (85)$$

em que:

M_{el} é o momento resistente elástico do perfil de aço (de ambos os tês).

η_i é o grau de interação;

M_{pl} é o momento resistente de plastificação da viga mista com interação total.

4.6 Mecanismo Vierendeel

O mecanismo Vierendeel ocorre devido à formação de rótulas plásticas nos cantos da abertura. A formação da rótula plástica é governada pela 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.

Como as aberturas circulares não possuem cantos, a posição da rótula plástica em vigas celulares não é claramente definida. Outras metodologias sugerem que a posição da rótula plástica em aberturas circulares seja determinada com base em uma abertura retangular equivalente, porém, segundo Ward (1990), análises de elementos finitos em vigas celulares mostraram que essa simplificação pode levar a resultados muito conservadores.

A rótula plástica ocorre em um determinado ângulo da abertura circular, cuja seção transversal a ele associada é denominada seção crítica. Essa seção varia em função da relação entre momento fletor e o esforço cortante atuando na viga, portanto, para cada abertura da viga celular é necessário determinar a seção crítica.

Dois métodos podem ser utilizados para encontrar a seção crítica: o método de Olander (1953) *apud* Ward (1990) e o método de Sahmel (1969) *apud* Ward (1990). Ambos os métodos são usados para calcular o momento fletor e a força axial que atuam numa seção curva do tê. Sahmel (1969) *apud* Ward (1990) utiliza uma seção linear através do tê, enquanto Olander (1953) *apud* Ward (1990) utiliza uma seção circular, como mostrado na Figura 34. Os dois métodos geram resultados similares tanto para a posição da seção crítica, quanto para a resistência última dos tês.

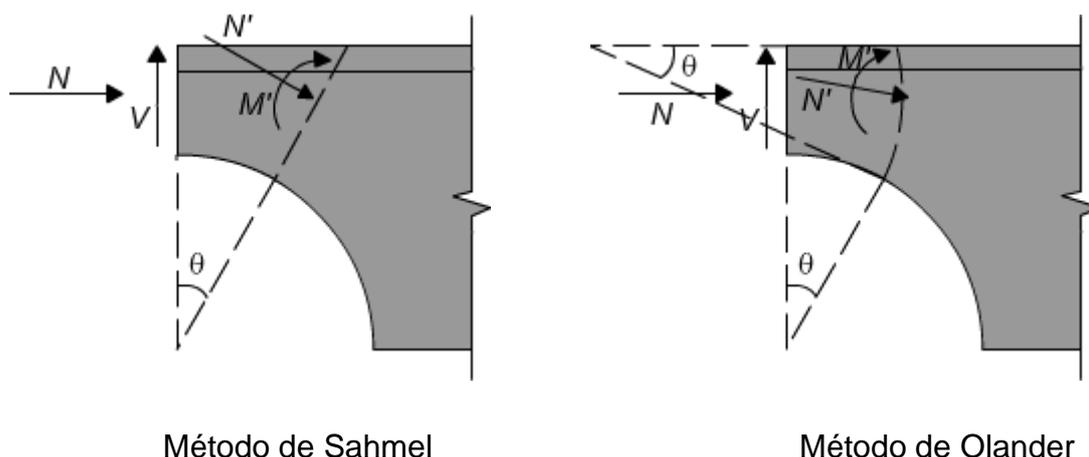


Figura 34 - Determinação da seção crítica

A interação entre o momento de Vierendeel e o esforço axial é determinada utilizando a seguinte equação de interação linear:

$$\frac{N'}{N'_{Rd}} + \frac{M'}{M'_{pl}} \leq 1 \quad (86)$$

em que:

N' e M' são forças na seção crítica como mostrado na Figura 34;

N'_{Rd} é área da seção crítica x f_y ;

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.

4.6.1 Redução da espessura da alma devido ao esforço cortante

A redução da espessura da alma devido ao esforço cortante é feita de forma similar a metodologia de Lawson (2011), item 3.6.2.2.

4.6.2 Vigas celulares mistas

Na verificação do mecanismo Vierendeel, em vigas celulares mistas, pode-se ignorar a resistência ao esforço cortante da laje de concreto, o que gera resultados mais conservadores. No entanto, a resistência ao esforço cortante da laje pode ser considerada e essa deve ser determinada da mesma forma como mostrado no item 3.4.2. A resistência da laje deve ser utilizada para reduzir o esforço cortante solicitante que atua nos tês.

Em vigas mistas celulares, a laje de concreto resiste à maior parte do esforço axial de compressão, portanto, dependendo da resistência da conexão de cisalhamento, o esforço axial no tê superior pode ser nulo, o que resulta em diferentes solicitações nos tês. Como o mecanismo Vierendeel ocorre devido à interação de esforços, a quantidade de esforço cortante transferida para o tê inferior depende da magnitude do esforço axial que atua nele. Dessa forma, é necessário determinar a distribuição do esforço cortante entre os tês, o que pode levar a um processo iterativo.

Para dividir o esforço cortante entre os tês superior e inferior, pode ser considerado, como primeira aproximação, que todo o esforço cortante solicitante é resistido pelo tê superior. Assim, se a verificação do mecanismo Vierendeel não for satisfeita parte do esforço cortante pode ser transferida para o tê inferior e então a verificação pode ser feita novamente.

4.7 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 equação (87) de verificação.

$$\frac{M_{max}}{M_e} = \left[C_1 \left(\frac{s}{d_o} \right) - C_2 \left(\frac{s}{d_o} \right)^2 - C_3 \right] \quad (87)$$

em que:

M_{max} = momento máximo admissível na seção A-A da Figura 35.

M_e = momento resistente elástico da seção A-A da Figura 35.

s = distância entre as aberturas (mm)

d_o = diâmetro da abertura (mm)

E C_1 , C_2 e C_3 são constantes dadas pelas equações (88) a (90).

$$C_1 = 5,097 + 0,1464 \left(\frac{d_o}{t_w} \right) - 0,00174 \left(\frac{d_o}{t_w} \right)^2 \quad (88)$$

$$C_2 = 1,441 + 0,0625 \left(\frac{d_o}{t_w} \right) - 0,000683 \left(\frac{d_o}{t_w} \right)^2 \quad (89)$$

$$C_3 = 3,645 + 0,0853 \left(\frac{d_o}{t_w} \right) - 0,00108 \left(\frac{d_o}{t_w} \right)^2 \quad (90)$$

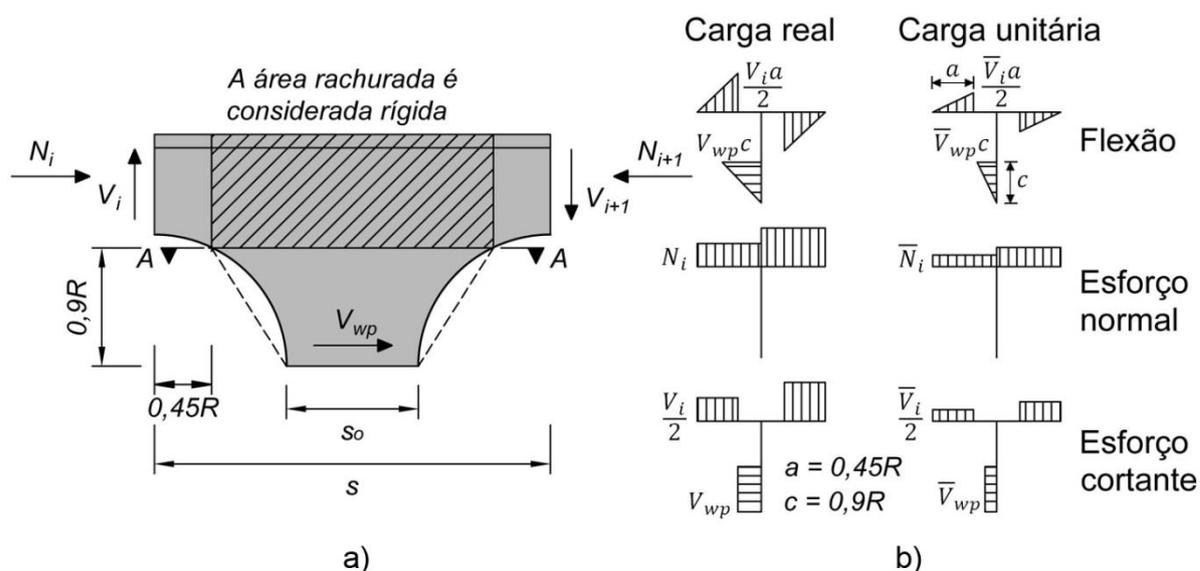


Figura 35 - Aproximação da viga celular em castelada hexagonal equivalente, válida para $1,08 < s/d_o < 1,5$

4.8 Flecha

No cálculo da flecha em vigas celulares, as flechas secundárias que ocorrem nas aberturas devem ser somadas com as flechas primárias devido à flexão da viga.

A flecha em qualquer ponto é encontrada aplicando uma carga unitária nesse ponto. As cargas unitárias produzem esforços internos de cortante vertical, axial e cortante horizontal, $\bar{V}_i/2$, \bar{N}_i , \bar{V}_{wp} , respectivamente, mostrados nos diagramas da Figura 35 (b). Usando o teorema dos trabalhos virtuais é possível calcular a deflexão devido à atuação desses esforços em uma abertura.

Para uma única abertura, a deflexão total é calculada considerando a área delimitada na Figura 35 (a), ou seja, a deflexão total na abertura é quatro vezes a deflexão de um tê mais duas vezes a deflexão de metade do montante da alma.

A flecha devido à flexão no tê é dada pelas equações (91) e (92).

$$y_1 = \frac{4}{EI_{xT}} \int_0^{0,45R} \frac{V_i x}{2} \frac{\bar{V}_i x}{2} dx \quad (91)$$

$$y_1 = \frac{0,091R^3}{3EI_{xT}} (V_i \bar{V}_i) \quad (92)$$

A flecha devido à flexão no montante da alma é dada pelas equações (93) e (94).

$$y_2 = \frac{2}{EI_x} \int_0^{0,9R} \frac{V_{wpz}}{2} \frac{\bar{V}_{wpz}}{2} dz \quad (93)$$

$$y_2 = \frac{13,145}{Et_w} \left[\log_e \left(\frac{s - 0,9R}{s - 2R} \right) + 2 \left(\frac{s - 2R}{s - 0,9R} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{s - 2R}{s - 0,9R} \right)^2 - \frac{3}{2} \right] V_{wp} \bar{V}_{wp} \quad (94)$$

A flecha devido ao esforço axial no tê é dada pelas equações (95) e (96).

$$y_3 = \frac{4}{EA_T} \int_0^{\frac{s}{2}} N_i \bar{N}_i dx \quad (95)$$

$$y_3 = \frac{2s}{EA_T} N_i \bar{N}_i \quad (96)$$

A flecha devido ao cisalhamento no tê é dada pelas equações (97) e (98).

$$y_4 = \frac{4}{GA_T} \frac{A_T}{A_{wT}} \int_0^{0,45R} \frac{V_i \bar{V}_i}{4} dx \quad (97)$$

$$y_4 = \frac{0,45R}{GA_{wT}} V_i \bar{V}_i \quad (98)$$

A flecha devido ao cisalhamento no montante da alma é dada pelas equações (99) e (100).

$$y_5 = \frac{2}{GA_z} \chi \int_0^{0,9R} \frac{V_{wp} \bar{V}_{wp}}{2} dz \quad (99)$$

Onde χ é o fator de forma do montante de alma

$$y_5 = \frac{1,636}{Gt_w} \chi \log_e \left(\frac{s - 0,9R}{s - 2R} \right) V_{wp} \bar{V}_{wp} \quad (100)$$

Finalmente, a flecha de cada abertura é a soma das flechas y_1 à y_5 . A flecha total da viga é dada pela soma da flecha de todas as aberturas mais duas vezes as flechas da seção final e da metade da primeira abertura, conforme Figura 36.

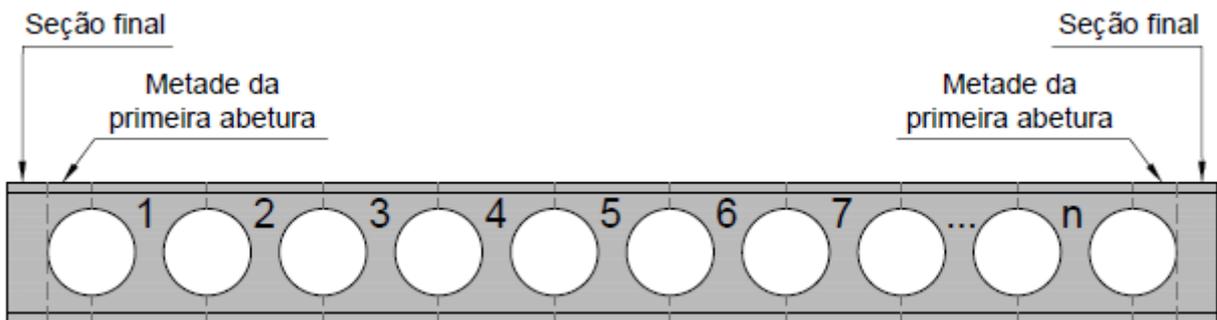


Figura 36 - Seções nas quais são calculadas as flechas na viga celular

A flecha total da viga é dada pela equação (101).

$$\delta_t = 2x\delta_{sf} + 2x\delta_{pa} + \sum_1^n \delta_i \quad (101)$$

onde a flecha na seção final é calculada como:

$$\delta_{sf} = \int \frac{M_i \bar{M}_i}{EI_x} \quad (102)$$

e a flecha na metade da primeira abertura é igual a:

$$\delta_{pa} = \frac{y_1 + y_3 + y_4}{2} \quad (103)$$

4.8.1 Viga mista celular

A flecha antes da cura do concreto pode ser calculada da mesma forma que para vigas celulares de aço.

A flecha da viga mista devido às cargas variável (sobrecarga) e a parcela de carga permanente (impostas depois da cura) são calculadas conforme a aproximação manual de Chien e Ritchie (1984) *apud* Ward (1990). Essa aproximação envolve os seguintes passos:

- Calcular a área da laje de concreto delimitada pela largura efetiva e transformá-la em área de aço equivalente;
- Calcular o momento de inércia da seção mista transformada, I_{tr} , usando apenas o t \hat{e} inferior de aço e a laje de concreto transformada;
- Calcular o momento de inércia reduzido da seção de aço multiplicando o momento de inércia da seção da abertura (dois t \hat{e} s) por 0,15, I_{red} ;
- Calcular a flecha utilizando o momento de inércia igual ao da seção mista transformada menos o momento de inércia da seção de aço reduzida, $I_{tr} - I_{red}$; dividido pelo fator 1,3 que considera os efeitos da interação parcial e fluência.

5 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

5.1 Introdução

O item 5.2 desse capítulo descreve o programa computacional desenvolvido abordando sua abrangência e limitações. A apresentação da interface do programa com o usuário é feita no item 5.3, onde são apresentadas as telas principais do programa.

No item 5.4 são apresentados dois exemplos de dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto com perfis de aço celulares, um extraído de Oliveira, T. (2012) e o outro extraído do guia de projeto de Ward (1990). Esses exemplos foram utilizados na aferição do programa. Adicionalmente, no item 5.5, ensaios experimentais em vigas celulares da literatura foram utilizados para confrontar a carga de colapso experimental com os resultados obtidos pelo programa.

5.2 Sobre o programa desenvolvido

Foi desenvolvido um programa computacional para o dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto com perfis de aço celulares, com base na metodologia de Lawson e Hicks (2011) e na metodologia de Ward (1990). O programa verifica a condição de segurança para os estados limites últimos e para o estado limite de serviço de flecha excessiva.

5.2.1 Ferramenta computacional utilizada

O programa de dimensionamento foi desenvolvido no MATLAB (2010), uma vez que essa ferramenta computacional possui muitas funções internas que facilitam a implementação computacional, sendo possível até mesmo criar interfaces gráficas de forma simples. Assim, foi possível desenvolver uma interface para o programa que facilita o processo de entrada de dados e torna a exibição de resultados mais clara para os usuários.

5.2.2 Abrangência e limitações do programa

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 possibilita 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.

5.3 Apresentação do programa

A entrada de dados no programa é feita por meio de janelas sequencialmente abertas contendo as informações necessárias, como por exemplo, a geometria do perfil de aço, os parâmetros para construção da viga celular e as propriedades mecânicas do aço (Figura 37). Os dados da laje de concreto e da conexão de cisalhamento são solicitados na janela da Figura 38. Os dados de carregamentos são inseridos na janela da Figura 39, onde é possível especificar a natureza do carregamento: permanente (peso próprio do perfil de aço e demais ações permanentes) ou variável e selecionar se a carga é de curta ou longa duração. Nessa última janela, é necessário entrar com o tipo de construção: escorada ou não escorada.

File Edit View Insert Tools Desktop Window Help

Propriedades da viga Parâmetros da laje Carregamentos Resultados

Propriedades do perfil

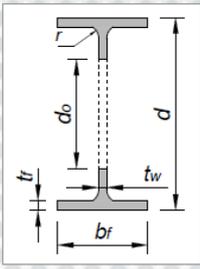
t_w (mm) 11.1

b_f (mm) 210

t_f (mm) 17.2

d (mm) 550

r (mm) 24



Parâmetros da viga celular

L (m) 10

d_o (mm) 400

s (mm) 550

s_e (mm) 400

f_y (MPa) 235

E (MPa) 200000

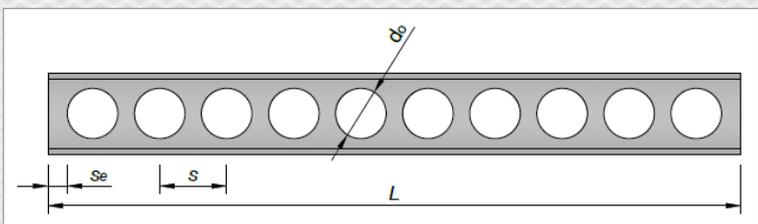


Figura 37 - Interface para entrada de dados do perfil e da viga celular no programa

File Edit View Insert Tools Desktop Window Help

Propriedades da viga Parâmetros da laje Carregamentos Resultados

Viga não mista Laje maciça Laje mista

Parâmetros da laje

f_{ck} (MPa) 30

E_c (MPa) 26071.6

d_{v1} (m) 2

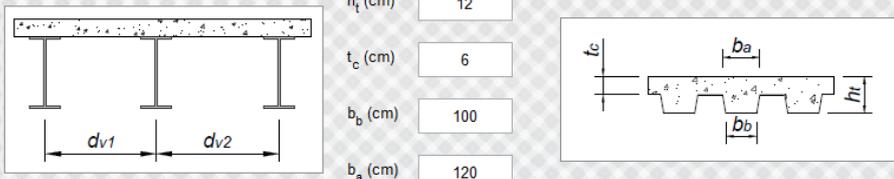
d_{v2} (m) 2

h_t (cm) 12

t_c (cm) 6

b_b (cm) 100

b_a (cm) 120



Parâmetros dos conectores

n_c 2

s_t (mm) 200

d_c (mm) 19

f_{ucs} (MPa) 450

Nervuras perpendiculares

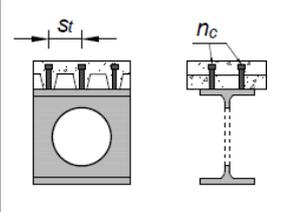


Figura 38 - Interface para entrada de dados da laje no programa

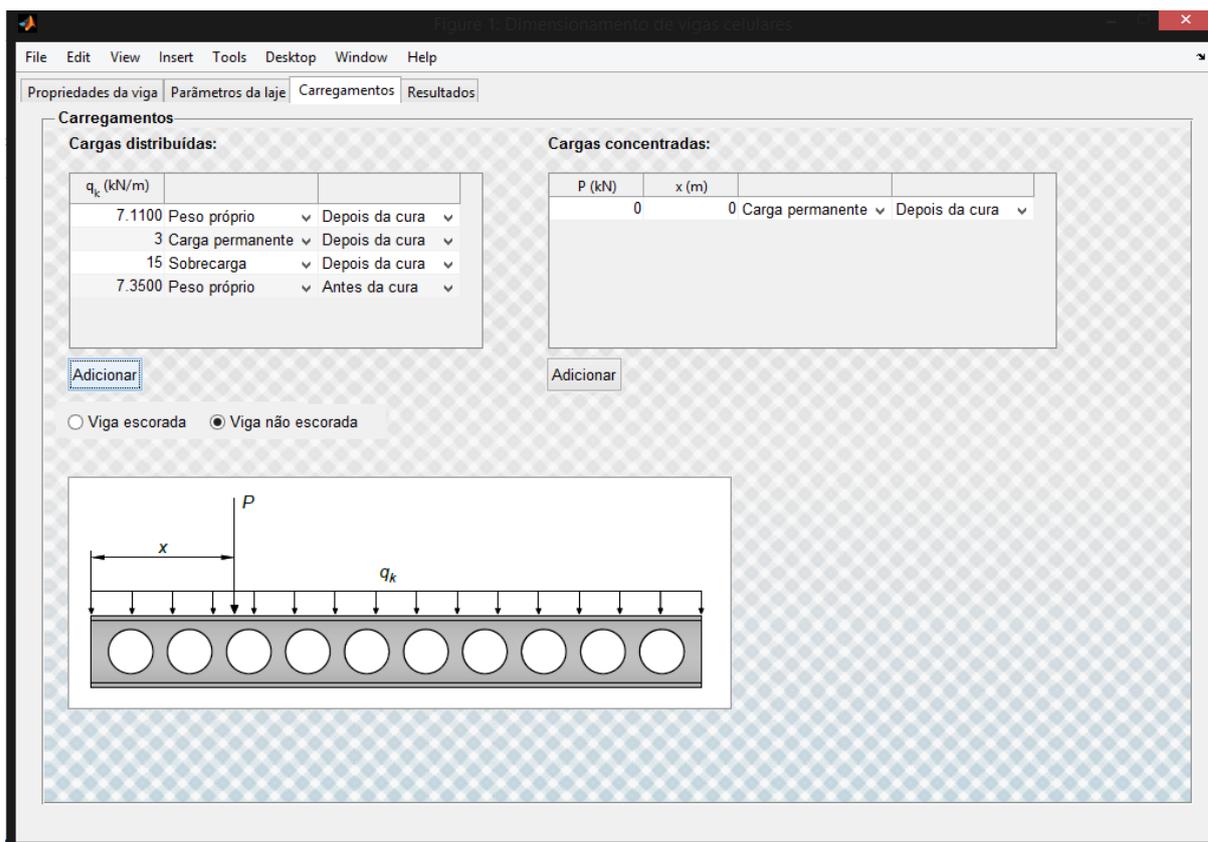


Figura 39 - Interface para entrada de dados dos carregamentos no programa

Como resultados, para cada estado limite último, são exibidos os valores dos esforços resistentes e dos esforços solicitantes. Para o estado limite de serviço de flecha excessiva, é apresentado o valor deslocamento vertical. A Figura 40 mostra como os resultados são exibidos na interface do programa.

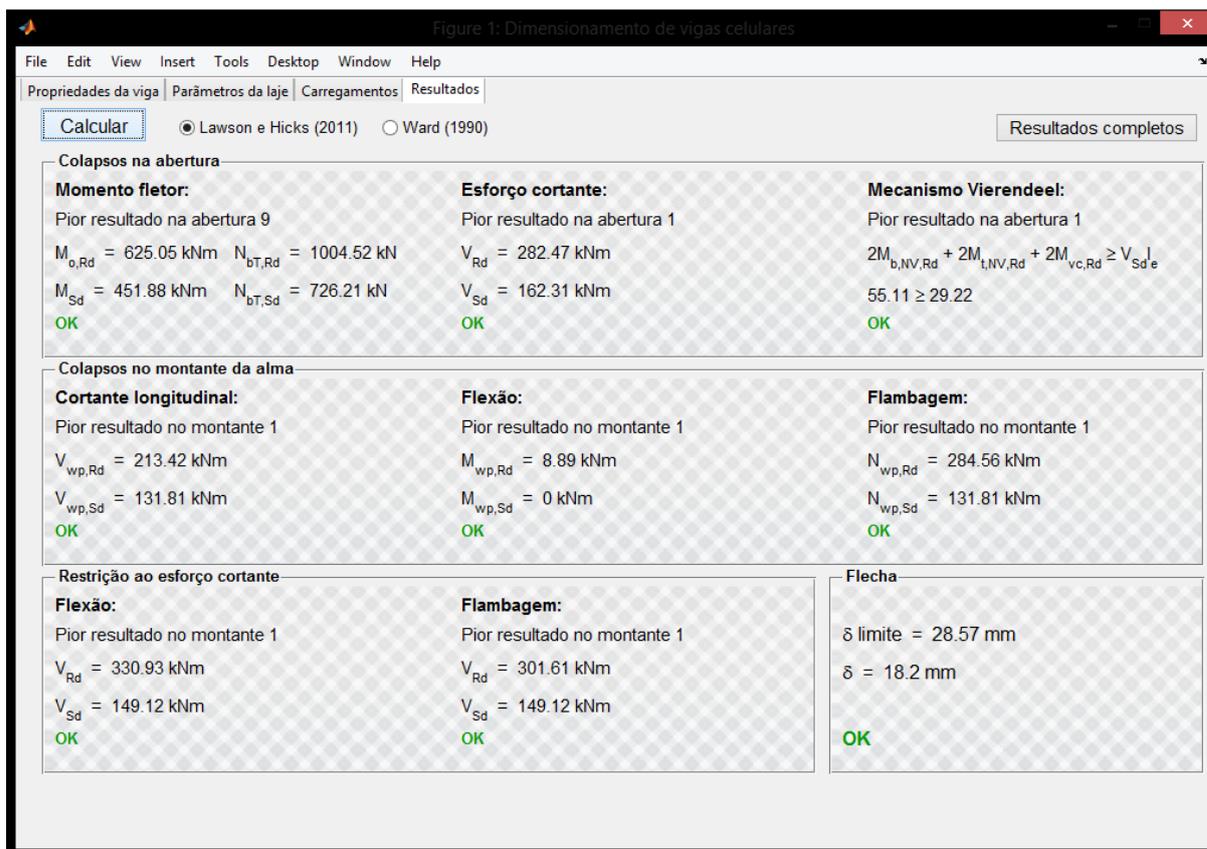


Figura 40 - Resultados exibidos na interface do programa

5.4 Aferição do programa

Para a aferição do programa, foram selecionados dois exemplos numéricos disponíveis na literatura. O exemplo prático de Oliveira, T. (2012) foi utilizado na validação do programa implementado com a metodologia de Lawson e Hicks (2011) e o programa implementado com a metodologia de Ward (1990) foi validada com o exemplo prático contido no seu guia de dimensionamento.

A seguir são apresentados os exemplos resolvidos conforme as metodologias de Lawson e Hicks (2011) e Ward (1990), capítulos 3 e 4, porém com as adaptações para uso de acordo com a ABNT NBR 8800:2008, excetuando itens que não são abordados por essa norma, como por exemplo, o procedimento de classificação da seção transversal.

5.4.1 Exemplo numérico de Oliveira, T. (2012)

Oliveira, T. (2012) fez uma análise de metodologias para o dimensionamento de vigas celulares mistas de aço e concreto em temperatura ambiente e em temperatura elevada. Essas metodologias de cálculo foram aplicadas na resolução de exemplos numéricos, e então, foi apresentada uma comparação de resultados obtidos por meio da utilização dos métodos de cálculo simplificados com os resultados obtidos por meio de modelos numéricos.

O exemplo é de uma viga mista com perfil de aço celular simplesmente apoiada, com 10 metros de vão, submetida a uma carga distribuída. Os dados do exemplo são apresentados na Tabela 4 e as propriedades geométricas da viga mista são mostradas na Figura 41.

Tabela 4 - Dados do exemplo de Oliveira, T. (2012)

Parâmetros da viga	$L = 10\text{ m}$ Distância entre vigas = 2 m Distância entre as aberturas (s) = 550 mm Diâmetro da abertura (d_o) = 400 mm Largura da extremidade apoiada (s_e) = 400 mm
Parâmetros do perfil de aço IPE 550	$d = 550\text{ mm}$ $t_w = 11,1\text{ mm}$ $b_f = 210\text{ mm}$ $t_f = 17,2\text{ mm}$ $A_a = 134\text{ cm}^2$ $I_x = 67120\text{ cm}^4$
Parâmetros da laje mista	$h_t = 120\text{ mm}$ $t_c = 60\text{ mm}$
Parâmetros dos conectores de cisalhamento	$d_{cs} = 19\text{ mm}$ $h_{cs} = 100\text{ mm}$ Número de conectores por nervura (n) = 2
Propriedades dos materiais	$f_y = 235\text{ Mpa}$ $f_{ck} = 30\text{ MPa}$ $f_{ucs} = 450\text{ MPa}$

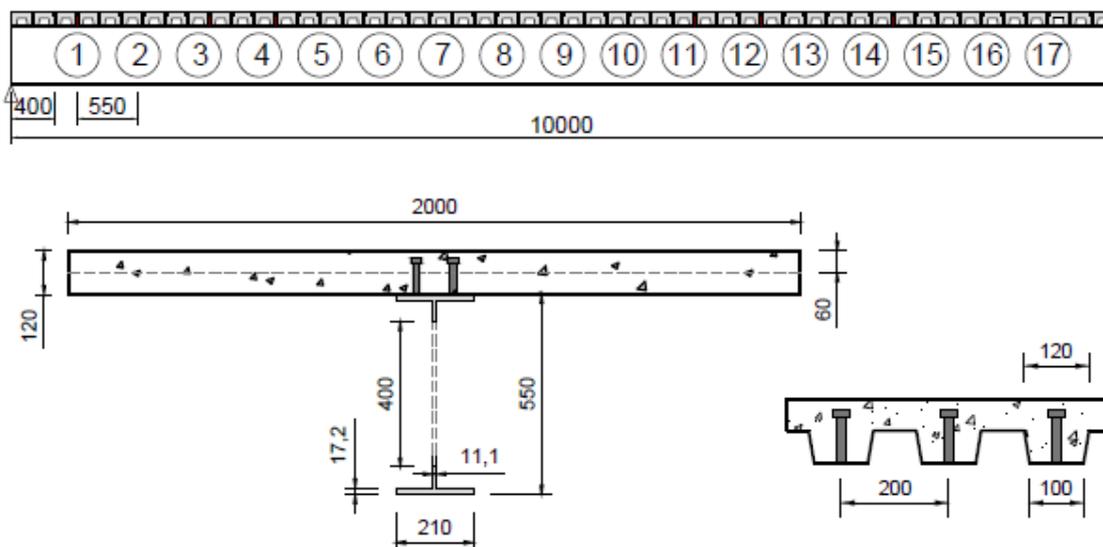


Figura 41 - Propriedades geométricas da viga mista

A Tabela 5 mostra as ações permanentes e variáveis que atuam na viga.

Tabela 5 - Ações permanentes e variáveis

Ações permanentes	Peso próprio da forma de aço incorporada: $0,2 \text{ kN/m}$ Peso próprio do perfil de aço: $1,05 \text{ kN/m}$ Peso próprio da armadura: $0,1 \text{ kN/m}$ Acabamentos: 3 kN/m Peso próprio da laje depois da cura do concreto: $5,76 \text{ kN/m}$
Ações variáveis	Peso próprio da laje antes da cura do concreto: 6 kN/m Sobrecarga de construção: $1,5 \text{ kN/m}$ Sobrecarga: 15 kN/m

A carga que atua na viga, para a verificação dos estados limites últimos, é igual a:

$$q_d = 1,35 \times (0,2 + 1,05 + 0,1 + 3 + 5,76) + 1,5 \times 15 = 36,15 \text{ kN/m} \quad (104)$$

5.4.1.1 Propriedades da seção transversal

As propriedades da seção transversal de uma viga com perfil de aço celular são calculadas considerando uma abertura retangular equivalente, onde sua altura é calculada como:

$$h_{eo} = 0,9d_o = 0,9 \times 400 = 360 \text{ mm} \quad (105)$$

$$d_T = \frac{d - h_{eo}}{2} = \frac{550 - 360}{2} = 95 \text{ mm} \quad (106)$$

$$h_{wT} = \frac{d - h_{eo}}{2} - t_f = \frac{550 - 360}{2} - 17,2 = 77,8 \text{ mm} \quad (107)$$

$$z_T = \frac{\frac{b_f t_f^2}{2} + h_{wT} t_w \left(h_{wT} + \frac{t_f}{2} \right)}{b_f t_f + h_{wT} t_w} = \frac{\frac{210 \times 17,2^2}{2} + 77,8 \times 11,1 \times \left(\frac{77,8}{2} + 17,2 \right)}{210 \times 17,2 + 77,8 \times 11,1} = 17,77 \text{ mm} \quad (108)$$

$$h_{ef} = d - 2z_T = 550 - 2 \times 17,77 = 514,46 \text{ mm} \quad (109)$$

$$A_T = \frac{A_a - h_{eo} t_w}{2} = \frac{13400 - 360 \times 11,1}{2} = 4702 \text{ mm}^2 \quad (110)$$

5.4.1.2 Classificação da seção transversal

A classificação relativa à esbeltez da alma do tê depende do comprimento efetivo da abertura, que para perfis celulares vale:

$$l_{o,ef} = 0,7d_o = 0,7 \times 400 = 280 \text{ mm} \quad (111)$$

Desse modo, a classificação da alma do tê, independente de sua altura. A alma será de classe 2 se atender a equação (113).

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1 \quad (112)$$

$$l_{o,ef} < 32\varepsilon t_w \Leftrightarrow 280 < 32 \times 1 \times 11,1 = 355,2 \text{ mm} \quad (113)$$

Logo, a alma do tê é de classe 2.

A classificação da mesa do tê é dada pelas equações (114) e (115).

$$(b_f/t_f)_{lim} = 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,56 \sqrt{\frac{200000}{235}} = 16,34 \quad (114)$$

$$b_f/t_f = \frac{210}{17,2} = 12,21 \quad (115)$$

Como $b_f/t_f < (b_f/t_f)_{lim}$, a mesa do tê é compacta.

5.4.1.3 Resistência do conector de cisalhamento

Sabendo que os conectores estão inseridos numa laje mista com nervuras perpendiculares ao vão da viga e que são dois conectores por nervura, é possível calcular a resistência do conector de acordo com a equação (117).

$$E_c = 4760\sqrt{f_{ck}} = 4760 \times \sqrt{30} = 26071,6 \text{ MPa} \quad (116)$$

$$\begin{aligned} Q_{Rd} &= \min\left(\frac{1}{2} \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}}; \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}}\right) \\ &= \min\left(\frac{1}{2} \times \pi \times \frac{19^2}{4} \times \frac{\sqrt{30 \times 26071,6}}{1,25 \times 10^3}; \frac{0,85 \times 0,6 \times \pi \times 19^2 \times 450}{4 \times 1,25 \times 10^3}\right) \\ &= \min(100,3; 52,06) = 52,06 \text{ kN} \end{aligned} \quad (117)$$

5.4.1.4 Largura efetiva e força de cisalhamento de cálculo

A largura efetiva da seção mista é dada pela equação (118).

$$b = \min\left(\frac{2000}{4}; \frac{10000}{8}\right) \times 2 = \min(1000, 1250) \times 2 = 2000 \text{ mm} \quad (118)$$

Assim, a resistência do concreto à compressão é calculada pela equação (119).

$$R_{cd} = \frac{0,85 f_{ck} b t_c}{\gamma_c} = \frac{0,85 \times 30 \times 2000 \times 60}{1,4 \times 1000} = 2185,71 \text{ kN} \quad (119)$$

A resistência do perfil de aço ao esforço axial é calculada pela equação (120).

$$R_{td} = \frac{A_a f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{2 \times 4702 \times 235}{1,1 \times 1000} = 2009,04 \text{ kN} \quad (120)$$

A força de cisalhamento de cálculo entre o componente de aço e a laje é o menor valor entre R_{cd} e R_{td} , ou seja:

$$F_{hRd} = \min(R_{cd}; R_{td}) = 2009,04 \text{ kN} \quad (121)$$

A resistência da conexão é dada pela equação (122).

$$nQ_{Rd} = 50 \times 52,06 = 2603 \text{ kN} \quad (122)$$

Como $nQ_{Rd} > F_{hRd}$, a interação é completa.

5.4.1.5 Verificação do momento fletor

O método de cálculo simplificado do momento fletor resistente na zona de abertura resulta do equilíbrio de forças, considerando os esforços resistentes à compressão da laje de concreto e à tração somente do tê inferior. A verificação é feita na abertura onde atua o maior valor do momento fletor. Como a viga está submetida somente a cargas uniformemente distribuídas essa verificação será feita na abertura 9, cujo centro coincide com o meio do vão. O momento fletor solicitante é calculado como na equação (123).

$$M_{sd} = \frac{q_d L^2}{8} = \frac{36,15 \times 10^2}{8} = 451,88 \text{ kNm} \quad (123)$$

Para o cálculo do momento fletor resistente na região da abertura, deve-se determinar a posição da linha neutra plástica, para isso é necessário calcular os esforços de compressão no concreto e de tração no tê inferior. A resistência do concreto vale:

$$N_{c,Rd} = \min(R_{cd}; nQ_{Rd}) = \min(2185,71; 50 \times 52,06) = 2185,71 \text{ kN} \quad (124)$$

e o esforço resistente de tração no tê inferior é dado pela equação (125).

$$N_{bT,Rd} = \frac{A_T f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{4702 \times 235}{1,1 \times 1000} = 1004,52 \text{ kN} \quad (125)$$

Como $N_{c,Rd} > N_{bT,Rd}$ a linha neutra plástica se encontra na laje, então a força de tração no tê superior pode ser desprezada e, conseqüentemente, o momento fletor resistente é calculado considerando o binário de forças, sendo a posição da resultante de compressão dada pela equação (126) e a expressão do momento escrita em função da resultante de tração no tê inferior, equação (127).

$$z_c = \frac{N_{c,Rd}}{0,85f_{cd}b} = \frac{2185,71 \times 10^3}{0,85 \times 30/1,4 \times 2000} = 60,0 \text{ mm} \leq t_c \quad (126)$$

$$\begin{aligned} M_{o,Rd} &= N_{pl,Rd} \left(h_{ef} + z_T + h_t - \frac{1}{2} z_c \right) \\ &= \frac{1004,52 \times \left(514,47 + 17,77 + 120 - \frac{1}{2} \times 60 \right)}{1000} = 625,05 \text{ kNm} \quad (127) \\ &> 451,88 \text{ kNm OK} \end{aligned}$$

Pode-se observar que o momento fletor resistente na abertura é superior ao solicitante, portanto para esse estado limite último, a seção mista atende à condição de segurança. O esforço solicitante de tração no tê inferior deve ser calculado conforme equação (128).

$$\begin{aligned} N_{bT,Sd} &= \frac{M_{Sd}}{h_{ef} + z_T + h_t - \frac{1}{2} z_c} = \frac{451,88 \times 10^3}{514,47 + 17,77 + 120 - 0,5 \times 60} = 726,21 \text{ kN} \\ &< 1004,52 \text{ kN OK} \end{aligned} \quad (128)$$

Como o esforço resistente de tração no tê inferior é superior ao solicitante, não haverá plastificação na seção do tê inferior. Também é necessário determinar os esforços axiais solicitantes nos tê da primeira abertura, pois estes influenciam a resistência do mecanismo Vierendeel.

$$M_{sd} = \frac{q_d L}{2} x - \frac{q x^2}{2} = \frac{36,15 \times 10 \times 0,6}{2} - \frac{36,15 \times 0,6^2}{2} = 101,94 \text{ kNm} \quad (129)$$

$$N_{c,Rd} = \min(R_{cd}; nQ_{Rd}) = \min(2185,71; 6 \times 52,06) = 312,36 \text{ kN} \quad (130)$$

Como $N_{bT,Rd} > N_{c,Rd}$, a linha neutra plástica se encontra no tê superior do perfil de aço. O esforço solicitante de tração no tê inferior é calculado conforme equação (131).

$$N_{bT,Sd} = \frac{M_{Sd}}{h_{ef} + z_T + h_t - \frac{1}{2}t_c} = \frac{101,94 \times 10^3}{514,47 + 17,77 + 120 - 0,5 \times 60} = 163,83 \text{ kN}$$

$$< 1004,52 \text{ kN OK} \quad (131)$$

Como $N_{bT,Sd} < N_{c,Rd}$, não haverá compressão no tê superior e, conseqüentemente, o esforço de compressão no concreto será igual a $N_{bT,Sd}$, logo a conexão de cisalhamento pode ser verificada como:

$$N_{c,Rd} = 312,36 \text{ kN} > 0,4N_{bT,Sd} = 0,4 \times 117,1 = 46,84 \text{ kN OK} \quad (132)$$

5.4.1.6 Verificação do esforço cortante

A verificação a esforço cortante é feita na abertura onde atua o maior valor desse esforço, no caso, a primeira abertura. O esforço cortante solicitante é definido como o maior valor atuante nas extremidades do alvéolo. Considerando a largura retangular equivalente, o esforço cortante solicitante é calculado de acordo com as equações (133) e (134).

$$l_e = 0,45d_o = 0,45 \times 400 = 180 \text{ mm} \quad (133)$$

$$V_{Sd} = \frac{q_d L}{2} - qx = \frac{36,15 \times 10}{2} - 36,15 \times \left(0,6 - \frac{0,18}{2}\right) = 162,31 \text{ kN} \quad (134)$$

A força cortante resistente do tê é dada pela equação (135).

$$V_{pl,Rd} = \frac{0,6A_w f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,6 \times 95 \times 11,1 \times 235}{1,1 \times 1000} = 135,17 \text{ kN} \quad (135)$$

A força cortante resistente da laje de concreto é calculada conforme as prescrições da NBR 8800:2008, equações (136) a (139).

$$f_{ctd} = \frac{\eta f_{ctk,inf}}{\gamma_c} = \frac{1 \times 0,21 \times (30)^{2/3}}{1,4} = 1,448 \text{ MPa} \quad (136)$$

$$\tau_{Rd} = 0,25 f_{ctd} = 0,25 \times 1,448 = 0,36 \text{ MPa} \quad (137)$$

$$A_v = \frac{(100 + 140) \times 120}{2} = 14400 \text{ mm}^2 \quad (138)$$

$$V_{c,Rd} = \frac{1000\tau_{Rd}k_v(1,2 + 40\rho)A_v}{b_n} = \frac{1000 \times 0,36 \times 1 \times (1,2 + 0) \times 14400}{200 \times 10^3} \quad (139)$$

$$= 31,10 \text{ kN/m}$$

$$b_w = b_f + 2h_{t,ef} = 210 + 2 \times 0,75 \times 120 = 390 \text{ mm} \quad (140)$$

$$V_{Rd,c} = b_w V_{v,c,Rd} = 0,39 \times 31,10 = 12,13 \text{ kN} \quad (141)$$

Logo, a resistência total vale:

$$V_{Rd} = 2V_{pl,Rd} + V_{Rd,c} = 2 \times 135,17 + 12,13 = 282,47 \text{ kN} \geq 162,31 \text{ kN} \quad (142)$$

Pode-se observar que o esforço cortante resistente da seção na abertura 1 é superior ao solicitante, portanto, para esse estado limite último, a seção mista atende à condição de segurança.

5.4.1.7 Verificação do mecanismo Vierendeel

A verificação do mecanismo Vierendeel também é feita na abertura onde atua o maior esforço cortante, ou seja, na primeira. Antes de verificar o mecanismo Vierendeel é necessário definir a distribuição de esforço cortante solicitante na seção transversal. A determinação da distribuição de esforço cortante pode levar a um processo de cálculo iterativo, porém, para simplificar, a distribuição pode ser estabelecida de tal forma que a flexão no meio do montante da alma seja minimizada. Para isso, o documento RT1356 (2012) *apud* Oliveira, T. (2012), propõe uma reformulação da equação (44), considerando $M_{wp,sd} = 0$, dessa forma:

$$V_{sd} = \frac{q_d L}{2} - qx = \frac{36,15 \times 10}{2} - 36,15 \times 0,875 = 149,12 \text{ kN} \quad (143)$$

$$\begin{aligned}
 V_{bT,Sd} &= \frac{\left(V_{Sd} - \frac{\Delta N_{cs}(z_T + h_t - 0,5t_c)}{s} \right)}{2} \\
 &= \frac{\left(149,12 - \frac{4 \times 52,06 \times (17,77 + 120 - 0,5 \times 60)}{550} \right)}{2} = 54,16 \text{ kN}
 \end{aligned} \tag{144}$$

Logo, a percentagem do esforço cortante que atua no tê inferior em relação ao esforço cortante total no montante é igual a:

$$\frac{V_{bT,Sd}}{V_{Sd}} = \frac{54,16}{149,12} = 0,36 = 36\% \tag{145}$$

Contudo, é importante verificar se a distribuição de esforço cortante satisfaz a equação (11).

Como a alma do tê de classe 2 e a mesa do tê é compacta, o momento fletor resistente à plastificação dos tês pode ser calculado pelas equações (146) e (147).

$$z_{pl} = \frac{A_f + A_{wT}}{2b_f} = \frac{210 \times 17,2 + 77,8 \times 11,1}{2 \times 210} = 10,66 \text{ mm} \tag{146}$$

$$\begin{aligned}
 M_{pl,Rd} &= \frac{A_{wT}f_y}{\gamma_{a1}} \left(\frac{1}{2} h_{wT} + t_f + z_{pl} \right) + \frac{A_f f_y}{\gamma_{a1}} \left(\frac{1}{2} t_f - z_{pl} + \frac{z_{pl}^2}{t_f} \right) \\
 &= \frac{863,58 \times 235}{1,1 \times 10^6} \times (0,5 \times 77,8 + 17,2 - 10,66) + \frac{3612 \times 235}{1,1 \times 10^6} \\
 &\quad \times \left(0,5 \times 17,2 - 10,66 + \frac{10,66^2}{17,2} \right) = 11,89 \text{ kNm}
 \end{aligned} \tag{147}$$

Como o tê inferior está submetido a um esforço axial de tração, o seu momento fletor resistente deve ser calculado da seguinte forma:

$$M_{b,NV,Rd} = M_{pl,Rd} \left(1 - \left(\frac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}} \right)^2 \right) = 11,89 \left(1 - \left(\frac{163,83}{1004,52} \right)^2 \right) = 11,57 \text{ kN} \tag{148}$$

Então,

$$2M_{b,NV,Rd}/l_e = \frac{2 \times 11,59 \times 1000}{180} = 128,78 \text{ kN} > 54,15 \text{ OK} \tag{149}$$

Conclui-se que a distribuição de esforço cortante assumida é válida.

A verificação do mecanismo Vierendeel deve ser feita na 1ª abertura, onde o esforço cortante solicitante é maior do que no montante da alma adjacente. Adotando a mesma distribuição de esforço cortante para a 1ª abertura, tem-se:

$$V_{bT,Sd} = 162,21 \times 0,36 = 58,40 \text{ kN} < 128,78 \text{ OK} \quad (150)$$

Logo, o esforço cortante no tê superior vale:

$$V_{tT,Sd} = V_{Sd} - V_{c,Rd} - V_{bT,Sd} = 162,31 - 12,13 - 58,4 = 91,78 \text{ kN} \quad (151)$$

$$\rho_t = \frac{V_{tT,Sd}}{V_{pl,Rd}} = \frac{91,78}{135,17} = 0,68 > 0,5 \quad (152)$$

$$\rho_b = \frac{V_{bT,Sd}}{V_{pl,Rd}} = \frac{58,40}{135,17} = 0,43 < 0,5 \quad (153)$$

Como o valor de esforço cortante solicitante no tê superior é maior que a metade do valor do esforço cortante resistente, logo é necessário determinar a espessura da alma efetiva, calculada conforme equação (154).

$$t_{w,ef} = t_w(1 - (2\rho_t - 1)^2) = 11,1 \times (1 - (2 \times 0,68 - 1)^2) = 9,66 \text{ mm} \quad (154)$$

Com o valor da espessura da alma efetiva é calculado novamente o momento fletor resistente à plastificação do tê superior conforme as equações (155) e (156):

$$z_{pl} = \frac{A_f + A_{wT}}{2b_f} = \frac{210 \times 17,2 + 77,8 \times 9,66}{2 \times 210} = 10,39 \text{ m} \quad (155)$$

$$\begin{aligned} M_{pl,Rd} &= \frac{A_{wT}f_y}{\gamma_{a1}} \left(\frac{1}{2} h_{wT} + t_f + z_{pl} \right) + \frac{A_f f_y}{\gamma_{a1}} \left(\frac{1}{2} t_f - z_{pl} + \frac{z_{pl}^2}{t_f} \right) \\ &= \frac{751,55 \times 235}{1,1 \times 10^6} \times (0,5 \times 77,8 + 17,2 - 10,39) + \frac{3612 \times 235}{1,1 \times 10^6} \\ &\quad \times \left(0,5 \times 17,2 - 10,39 + \frac{10,39^2}{17,2} \right) = 10,80 \text{ kNm} \end{aligned} \quad (156)$$

O momento fletor resistente de Vierendeel também possui uma componente devido à interação da laje com o tê superior, que é calculada conforme equação (158).

$$k_o = 1 - \frac{l_o}{25d_T} = 1 - \frac{180}{25 \times 95} = 0,924 \quad (157)$$

$$\begin{aligned}
 M_{vc,Rd} &= \Delta N_c \left(z_T + h_t - \frac{1}{2} t_c \right) k_o \\
 &= \frac{2 \times 52,06 \times (17,77 + 120 - 0,5 \times 60) \times 0,924}{10^3} = 10,37 \text{ kNm}
 \end{aligned} \quad (158)$$

A verificação da resistência ao momento fletor de Vierendeel é calculada conforme equação (159).

$$\begin{aligned}
 2M_{b,NV,Rd} + 2M_{t,NV,Rd} + M_{vc,Rd} &\geq V_{sd} l_e \Leftrightarrow 2 \times 11,57 + 2 \times 10,80 + 10,37 \\
 &\geq 162,31 \times 180 \times 10^{-3} \Leftrightarrow 55,11 \geq 29,22 \text{ OK}
 \end{aligned} \quad (159)$$

Pode-se observar que o momento fletor resistente de Vierendeel na abertura 1 é superior ao solicitante, portanto, para esse estado limite último, a seção mista atende à condição de segurança.

5.4.1.8 Verificação à flexão do montante da alma

Devido à distribuição de esforço cortante adotada, não é necessário verificar a flexão do montante da alma, uma vez que o momento fletor solicitante no meio do montante é igual a zero. Mas o momento fletor resistente pode ser calculado pela equação (160).

$$M_{wp,Rd} = \frac{s_0^2 t_w f_y}{6 \gamma_{a1}} = \frac{150^2 \times 11,1 \times 235}{6 \times 1,1 \times 10^6} = 8,89 \text{ kNm} \quad (160)$$

5.4.1.9 Verificação ao esforço cortante longitudinal do montante da alma

Para determinar o esforço cortante longitudinal solicitante no montante da alma, é necessário primeiramente considerar que o grau de conexão é total ($\Delta N_{cs} \geq V_{wp,sd}$), dessa forma:

$$V_{wp,sd} = \frac{V_{sd} s}{h_{ef} + z_T + h_t - 0,5 t_c} = \frac{149,12 \times 550}{514,47 + 17,77 + 120 - 0,5 \times 60} = 131,81 \text{ kN} \quad (161)$$

$$\Delta N_{cs} = n_{cs} Q_{Rd} = 4 \times 65,07 = 260,28 \text{ kN} > 131,81 \text{ kN} \quad (162)$$

Dessa forma, verifica-se que o esforço cortante longitudinal solicitante pode ser determinado para a condição de interação total.

A resistência ao esforço cortante longitudinal é calculada como:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,6s_o t_w f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,6 \times 150 \times 11,1 \times 235}{1,1 \times 10^3} = 213,42 \text{ kN} > 131,81 \text{ kN OK} \quad (163)$$

Pode-se observar que o esforço cortante longitudinal resistente no montante da alma situado entre as aberturas 1 e 2 é superior ao solicitante, portanto, para esse estado limite último, a seção mista atende à condição de segurança.

5.4.1.10 Verificação à flambagem do montante da alma

O esforço de compressão solicitante é calculado como:

$$N_{wp,Sd} = V_{wp,Sd} + \frac{|M_{wp,Sd}|}{\frac{d_o}{2}} = 131,8 \mp 0 = 131,81 \text{ kN} \quad (164)$$

Para o cálculo da resistência à flambagem é necessário determinar o coeficiente de redução, que depende da esbeltez reduzida. Para vigas celulares a esbeltez é calculado de acordo com as equações (165) e (166).

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \times \sqrt{\frac{200000}{235}} = 91,65 \quad (165)$$

$$\lambda_0 = \frac{1,75 \sqrt{s_o^2 + d_o^2}}{t_w \lambda_1} = \frac{1,75 \times \sqrt{150^2 + 400^2}}{11,1 \times 91,65} = 0,73 \quad (166)$$

Como $\lambda_0 < 1,5$ o coeficiente de redução é calculado pela equação (167).

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,658^{0,73^2} = 0,8 \quad (167)$$

Logo, a resistência à flambagem do montante da alma vale:

$$\begin{aligned} N_{wp,Rd} &= \chi \frac{s_o t_w f_y}{\gamma_{a1}} = 0,8 \times \frac{150 \times 11,1 \times 235}{1,1 \times 10^3} = 284,56 \text{ kN} > N_{wp,Sd} \\ &= 131,81 \text{ OK} \end{aligned} \quad (168)$$

Pode-se observar que o esforço de compressão resistente no montante da alma situado entre as aberturas 1 e 2 é superior ao solicitante, portanto, para esse estado limite último, a seção mista atende à condição de segurança.

5.4.1.11 Verificação das restrições ao esforço cortante

A restrição do montante da alma à flexão é verificada para a condição de interação total, uma vez que o esforço cortante longitudinal foi verificado para a mesma condição. Assim, o esforço cortante resistente devido a flexão poder ser calculado como:

$$\begin{aligned}
 V_{Rd} &= \left(\frac{2M_{wp,Rd}}{s} + \frac{4M_{b,NV,Rd}}{l_o} \right) \frac{h_{ef} + h_t - 0,5t_c}{h_{ef}} \\
 &= \left(\frac{2 \times 8,89 \times 10^3}{550} + \frac{4 \times 11,22 \times 10^3}{180} \right) \frac{514,47 + 120 - 0,5 \times 60}{514,47} \quad (169) \\
 &= 330,93 \text{ kN} > V_{sd} = 149,12 \text{ kN} \text{ OK}
 \end{aligned}$$

O esforço cortante resistente limitado pela flambagem do montante da alma, também pode ser calculado para a condição de conexão total, assim:

$$\begin{aligned}
 V_{Rd} &= \left(N_{wp,Rd} \left(\frac{d_o}{s} \right) + \frac{4M_{b,NV,Rd}}{l_o} \right) \frac{h_{ef} + h_t - 0,5t_c}{h_{ef} + d_o} \\
 &= \left(\frac{284,56 \times 400}{550} + \frac{4 \times 11,22 \times 10^3}{180} \right) \frac{514,47 + 120 - 0,5 \times 60}{514,47 + 400} \quad (170) \\
 &= 301,61 \text{ kN} > V_{sd} = 149,12 \text{ kN} \text{ OK}
 \end{aligned}$$

Pode-se observar que o esforço cortante resistente limitado pela flexão e pela flambagem no montante da alma situado entre as aberturas 1 e 2 é superior ao solicitante, portanto, para esse estado limite último, a seção mista atende à condição de segurança.

O valor do momento fletor resistente do tê inferior para o calculo do esforço cortante resistente devido à flexão e a flambagem do montante da alma foi considerado como a média das resistências dos tê inferiores de aberturas adjacentes ao montante da alma.

5.4.1.12 Verificação do estado limite de serviço

- Flecha antes da cura do concreto

$$\delta_a = \frac{5gL^4}{384EI_x} = \frac{5 \times (1,05 + 0,2 + 0,1 + 6) \times 10000^4}{384 \times 200000 \times 671,2 \times 10^6} = 7,13 \text{ mm} \quad (171)$$

- Flecha depois da cura do concreto para carregamento de curta duração

$$E_c = 4760\sqrt{fck} = 4760 \times \sqrt{30} = 26072 \text{ MPa} \quad (172)$$

$$n = \frac{E}{E_c} = \frac{200000}{26072} = 7,67 \quad (173)$$

$$b_{tr} = \frac{b}{n} = \frac{2000}{7,67} = 260,76 \text{ mm} \quad (174)$$

$$w = d - z_T + h_t = 550 - 275 + 120 = 395 \text{ mm} \quad (175)$$

$$a = \frac{\sqrt{A_a^2 + 2b_{tr}A_a w} - A_a}{b_{tr}} = \frac{\sqrt{13400^2 + 2 \times 260,76 \times 13400 \times 395} - 13400}{260,76} = 156,55 \text{ mm} \quad (176)$$

$$t_{c2} = \min(a, t_c) = 60 \text{ mm} \quad (177)$$

$$A_c = b_{tr}t_{c2} = 260,76 \times 60 = 15645,6 \text{ mm}^2 \quad (178)$$

$$I_{xc} = \frac{b_{tr}t_{c2}^3}{12} = \frac{260,76 \times 60^3}{12} = 4,69 \times 10^6 \text{ mm}^4 \quad (179)$$

$$y_c = d - z_T + h_t - \frac{t_{c2}}{2} = 550 - 275 + 120 - \frac{60}{2} = 365 \text{ mm} \quad (180)$$

$$y_g = \frac{A_c y_c}{A_c + A_a} = \frac{15645,6 \times 365}{15645,6 + 13400} = 196,61 \text{ mm} \quad (181)$$

$$\begin{aligned} I_{tr} &= A_c y_c^2 + (I_x + I_{xc}) - (A_a + A_c) y_g^2 \\ &= 15645,6 \times 365^2 + 671,2 \times 10^6 + 4,69 \times 10^6 \\ &\quad - (13400 + 15645,6) \times 196,61^2 = 1,638 \times 10^9 \text{ mm}^4 \end{aligned} \quad (182)$$

$$I_{ef} = I_x + (I_{tr} - I_x)\sqrt{\eta_i} = 671,2 \times 10^6 + (1638 \times 10^6 - 671,2 \times 10^6)\sqrt{1}$$

$$= 1,638 \times 10^9 \text{ mm}^4 \quad (183)$$

$$\delta_{ds} = \frac{5q_c L^4}{384E I_{ef}} = \frac{5 \times 15 \times 10000^4}{384 \times 200000 \times 1,638 \times 10^9} = 6,00 \text{ mm} \quad (184)$$

- Flecha depois da cura do concreto para carregamento de longa duração

$$n = 3 \frac{E}{E_c} = 3 \times 7,67 = 23,01 \quad (185)$$

$$b_{tr} = \frac{b}{n} = \frac{2000}{23,01} = 86,92 \text{ mm} \quad (186)$$

$$w = d - z_T + h_t = 395 \text{ mm} \quad (187)$$

$$a = \frac{\sqrt{A_a^2 + 2b_{tr}A_a w} - A_a}{b_{tr}} = \frac{\sqrt{13400^2 + 2 \times 86,92 \times 13400 \times 395} - 13400}{86,92}$$

$$= 227,35 \text{ mm} \quad (188)$$

$$t_{c2} = \min(a, t_c) = 60 \text{ mm} \quad (189)$$

$$A_c = b_{tr} t_{c2} = 86,92 \times 60 = 5215,2 \text{ mm}^2 \quad (190)$$

$$I_{xc} = \frac{b_{tr} t_{c2}^3}{12} = \frac{86,92 \times 60^3}{12} = 1,565 \times 10^6 \text{ mm}^4 \quad (191)$$

$$y_c = d - z_T + h_t - \frac{t_{c2}}{2} = 365 \text{ mm} \quad (192)$$

$$y_g = \frac{A_c y_c}{A_c + A_a} = \frac{5215,2 \times 365}{5215,2 + 13400} = 102,26 \text{ mm} \quad (193)$$

$$I_{tr} = A_c y_c^2 + (I_x + I_{xc}) - (A_a + A_c) y_g^2$$

$$= 5215,2 \times 365^2 + 671,2 \times 10^6 + 1,565 \times 10^6$$

$$- (13400 + 5215,2) \times 102,26^2 = 1,173 \times 10^9 \text{ mm}^4 \quad (194)$$

$$I_{ef} = I_{x02} + (I_{tr} - I_x)\sqrt{\eta_i} = 671,2 \times 10^6 + (1173 \times 10^9 - 671,2 \times 10^6)\sqrt{1} \\ = 1,173 \times 10^9 \text{ mm}^4 \quad (195)$$

$$\delta_{dp} = \frac{5q_l L^4}{384EI_{ef}} = \frac{5 \times 3 \times 10000^4}{384 \times 200000 \times 1,173 \times 10^9} = 1,67 \text{ mm} \quad (196)$$

- Flecha devido a presença de aberturas na alma

$$\frac{\delta_{ad}}{\delta_a + \delta_{ds} + \delta_{dp}} = 0,7n_o k_o \left(\frac{l_o}{L}\right) \left(\frac{d_o}{d}\right) = 0,7 \times 17 \times 1,5 \times \left(\frac{180}{10 \times 10^3}\right) \left(\frac{400}{550}\right) = 0,23 \quad (197)$$

$$\delta_{ad} = 0,23 \times (\delta_a + \delta_{ds} + \delta_{dp}) = 0,23 \times (7,13 + 6 + 1,67) = 3,40 \text{ mm} \quad (198)$$

- Verificação da flecha total

$$\delta_t = \delta_a + \delta_{ds} + \delta_{dp} + \delta_{ad} = 7,13 + 6 + 1,67 + 3,4 = 18,2 \text{ mm} \quad (199)$$

$$\delta_{lim} = \frac{L}{350} = \frac{10000}{350} = 28,57 \text{ mm} > 18,2 \text{ mm OK} \quad (200)$$

Portanto atende a condição de serviço para esse estado limite.

5.4.2 Exemplo numérico de Ward (1990)

O exemplo é uma viga mista com perfil de aço celular simplesmente apoiada, com 10 metros de vão, submetida a uma carga distribuída. Os dados do exemplo são apresentados na Tabela 6 e as propriedades geométricas da viga mista são mostradas na Figura 42.

Tabela 6 - Dados do exemplo de Ward (1990)

Parâmetros da viga	$V\tilde{a}o (L) = 10\ m$ Distância entre vigas = 3 m Distância entre as aberturas (s) = 600 mm Diâmetro da abertura (d_o) = 400 mm
Parâmetros do perfil de aço	$d = 626,8\ mm$ $t_w = 8,5\ mm$ $b_f = 189,9\ mm$ $t_f = 12,7\ mm$
Parâmetros da laje mista	$h_t = 130\ mm$ $t_c = 80\ mm$
Parâmetros dos conectores de cisalhamento	$d_{cs} = 19\ mm$ $h_{cs} = 95\ mm$ Número de conectores por nervura (n) = 1
Propriedades dos materiais	$f_y = 355\ Mpa$ $f_{ck} = 30\ MPa$ $f_{ucs} = 450\ MPa$

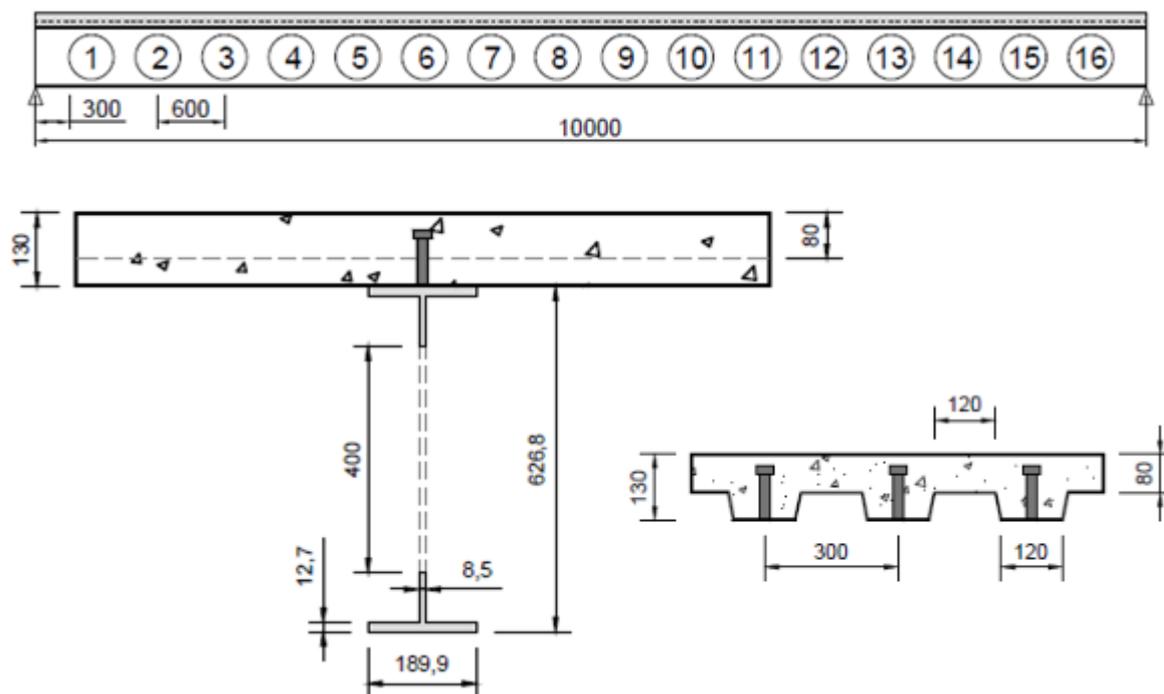


Figura 42 - Propriedades geométricas da viga mista

A Tabela 7 mostra as ações permanentes e variáveis que atuam na viga.

Tabela 7 - Ações permanentes e variáveis

<p>Ações permanentes</p>	<p>Peso próprio da forma de aço incorporada: $0,15 \text{ kN/m}^2$ Peso próprio do perfil de aço: $0,2 \text{ kN/m}^2$ Peso próprio da armadura: $0,04 \text{ kN/m}^2$ Instalações de serviço: $0,5 \text{ kN/m}^2$ Peso próprio da laje depois da cura do concreto: $1,85 \text{ kN/m}^2$</p>
<p>Ações variáveis</p>	<p>Peso próprio da laje antes da cura do concreto: $1,99 \text{ kN/m}^2$ Sobrecarga de construção: $0,5 \text{ kN/m}^2$ Sobrecarga: 5 kN/m^2 Divisórias móveis: 1 kN/m^2</p>

5.4.2.1 Propriedades da seção transversal

$$h_T = \frac{d - d_o}{2} - t_f = \frac{626,8 - 400}{2} - 12,7 = 100,7 \text{ mm} \quad (201)$$

$$A_T = t_f b_f + t_w h_{wT} = 12,7 \times 189,9 + 8,5 \times 100,7 = 3267,68 \text{ mm}^2 \quad (202)$$

$$z_T = \frac{\frac{b_f t_f^2}{2} + t_w h_{wT} \left(t_f + \frac{h_{wT}}{2} \right)}{A_T} = \frac{\frac{189,9 \times 12,7^2}{2} + 8,5 \times 100,7 \times \left(12,7 + \frac{100,7}{2} \right)}{3267,68} \quad (203)$$

$$= 21,2 \text{ mm}$$

$$I_{xT} = \frac{b_f t_f^3}{12} + b_f t_f \left(z_T - \frac{t_f}{2} \right)^2 + \frac{t_w h_{wT}^3}{12} + t_w h_{wT} \left(\frac{h_{wT}}{2} + t_f - z_T \right)^2 \quad (204)$$

$$= \frac{189,9 \times 12,7^3}{12} + 189,9 \times 12,7 \times \left(21,2 - \frac{12,7}{2} \right)^2 + \frac{8,5 \times 100,7^3}{12}$$

$$+ 8,5 \times 100,7 \times \left(\frac{100,7}{2} + 12,7 - 21,2 \right)^2 = 2,7867 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_{x0} = 2 \left(I_{xT} + A_T (y_g - z_T)^2 \right) = 2 \times (2,7867 \times 10^6 + 3267,68 \times (313,4 - 21,2)^2) \quad (205)$$

$$= 5,6357 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$W_x = \frac{I_{x0}}{y_g} = \frac{5,6357 \times 10^8}{313,4} = 1,798 \times 10^6 \text{ mm}^3 \quad (206)$$

5.4.2.2 Resistência do conector de cisalhamento

Para determinação da resistência do conector é considerado que as nervuras da laje mista são perpendiculares ao vão da viga. A Figura 43 ilustra a disposição dos conectores sobre a viga.

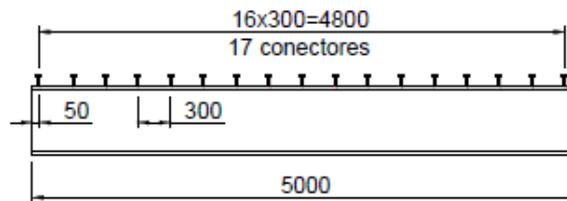


Figura 43 - Disposição de conectores sobre a viga

$$E_c = 4760 \sqrt{f_{ck}} = 4760 \times \sqrt{30} = 26071,6 \text{ MPa} \quad (207)$$

$$\begin{aligned}
 Q_{Rd} &= \min\left(\frac{1}{2} \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}}; \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}}\right) \\
 &= \min\left(\frac{1}{2} \times \pi \times \frac{19^2}{4} \times \frac{\sqrt{30 \times 26071,6}}{1,25 \times 10^3}; \frac{1 \times 0,75 \times \pi \times 19^2 \times 450}{4 \times 1,25 \times 10^3}\right) \quad (208) \\
 &= \min(100,3; 76,55) = 76,55 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

5.4.2.3 Largura efetiva e força de cisalhamento de cálculo

A largura efetiva da seção mista é dada pela equação (209).

$$b = \min\left(\frac{3000}{2}; \frac{10000}{8}\right) \times 2 = \min(1500; 1250) \times 2 = 2500 \text{ m} \quad (209)$$

Assim, a resistência da laje de concreto à compressão é calculada pela equação (210).

$$R_{cd} = \frac{0,85 f_{ck} b t_c}{\gamma_c} = \frac{0,85 \times 30 \times 2500 \times 80}{1,4 \times 1000} = 3642,86 \text{ kN} \quad (210)$$

A resistência do perfil de aço ao esforço axial é calculada pela equação (211).

$$R_{td} = \frac{A_a f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{2 \times 3267,7 \times 355}{1,1 \times 1000} = 2109,15 \text{ kN} \quad (211)$$

A força de cisalhamento de cálculo entre o componente de aço e a laje é o menor valor entre R_{cd} e R_{td} , ou seja:

$$F_{hRd} = \min(R_{cd}; R_{td}) = 2109,15 \text{ kN} \quad (212)$$

Logo, o valor do grau de interação é dado pela equação (213).

$$\eta_i = \frac{n Q_{Rd}}{F_{hRd}} = \frac{7 \times 76,55}{2109,15} = 0,62 \quad (213)$$

E o grau de interação mínimo é dado pela equação (214).

$$\begin{aligned}
 \eta_i &= 1 - \frac{E}{578 f_y} (0,75 - 0,03 L_e) = 1 - \frac{200000}{578 \times 355} (0,75 - 0,03 \times 10) = 0,56 \\
 &< 0,62 \text{ OK}
 \end{aligned} \quad (214)$$

5.4.2.4 Cálculo dos esforços solicitantes

A carga que atua na viga, para a verificação dos estados limites últimos, é calculada pela equação (215).

$$q_d = 1,35 \times (1,85 + 0,5 + 0,15 + 0,04 + 0,2) \times 3 + 1,5 \times (5 + 1) \times 3$$

$$= 38,10 \text{ kN/m} \quad (215)$$

Conforme descrito no item 4.3.2, os esforços solicitantes são inicialmente calculados considerando que o grau de interação é adequado, dessa forma, o esforço axial que atua no tê inferior deve ser determinado com as Equações (61) e (62).

O valor de x_c pode ser encontrado substituindo a Equação (61) na (62), o que resulta na equação (216).

$$-0.5R_{cd}x_c^2 + R_{cd}(d - z_T + h_t)x_c - M_{Sd}t_c = 0 \quad (216)$$

Logo, x_c é dado pela equação (217).

$$x_c = \frac{\sqrt{(R_{cd}(d - z_T + h_t))^2 - 2R_{cd}M_{Sd}t_c} - R_{cd}(d - z_T + h_t)}{-R_{cd}} \quad (217)$$

Fazendo $w = d - z_T + h_t$, a expressão se resume a:

$$x_c = w - \sqrt{w^2 - \frac{2t_c M_{Sd}}{R_{cd}}} \quad (218)$$

Na primeira abertura x_c é calculado pelas equações (219) e (220).

$$w = d - z_T + h_t = 628,8 - 21,2 + 130 = 735,6 \text{ mm} \quad (219)$$

$$x_c = w - \sqrt{w^2 - \frac{2t_c M_{Sd}}{R_{cd}}} = 735,6 - \sqrt{735,6^2 - \frac{2 \times 80 \times 90,49 \times 10^3}{3642,86}} = 2,71 \text{ mm} \quad (220)$$

Logo, o esforço solicitante no tê inferior é dado pela equação (221).

$$N_{bT,Sd} = \frac{R_{cd}x_c}{t_c} = \frac{3642,86 \times 2,71}{80} = 123,40 \text{ kNm} \quad (221)$$

A Tabela 8 mostra os esforços solicitantes de cálculo para as demais aberturas.

Tabela 8 - Cálculo inicial dos esforços solicitantes que atuam nas aberturas

Abertura	$V_{Sd}(kN)$	$M_{Sd}(kNm)$	$N_{bT,Sd}(kN)$	$x_c(mm)$
1	171,45	90,49	123,40	2,71
2	148,59	186,50	254,54	5,59
3	125,73	268,80	367,47	8,07
4	102,87	337,38	461,73	10,14
5	80,01	392,24	537,32	11,80
6	57,15	433,39	594,24	13,05
7	34,29	460,82	632,49	13,89
8	11,43	474,54	651,62	14,31

É necessário comparar o esforço de tração no tê inferior com a resistência da conexão de cisalhamento para determinar se haverá ou não esforço axial no tê superior.

Para a primeira abertura a resistência da conexão é dada pela equação (222).

$$nQ_{Rd} = 2 \times 76,55 = 153,1 \text{ kN} \quad (222)$$

Como na primeira abertura $nQ_{Rd} > N_{bT,Sd}$, o grau de interação é adequado, portanto, $N_{tT,Sd} = 0$.

A Tabela 9 mostra os esforços solicitantes nas demais aberturas.

Tabela 9 - Cálculo final dos esforços nas aberturas

Abertura	n	$nQ_{Rd}(kN)$	interação	$N_{tT,Sd}(kN)$	$N_{bT,Sd}(kN)$	$V_{wp,Sd}(kN)$
1	2	153,1	adequada	0	123,40	0
2	4	306,2	adequada	0	254,54	131,14
3	6	459	adequada	0	367,47	112,93
4	8	612,4	adequada	0	461,73	94,26
5	10	765,5	adequada	0	537,32	75,59
6	12	918,6	adequada	0	594,24	56,92
7	14	1071,7	adequada	0	632,49	38,25
8	16	1224,8	adequada	0	651,62	19,13

5.4.2.5 Verificação ao momento fletor

Para o cálculo do momento fletor resistente na região da abertura é necessário determinar o momento de plastificação da seção transversal da viga mista considerando interação total. Para isso, primeiramente, é necessário encontrar a

posição da linha neutra plástica na seção mista, comparando a resistência à tração do perfil de aço com a resistência à compressão da laje de concreto.

Como $R_{cd} > R_{td}$ a linha neutra plástica se encontra na laje e a altura de concreto em compressão é calculada como na equação (223).

$$a = \frac{R_{td}t_c}{R_{cd}} = \frac{2109,15 \times 80}{3642,86} = 46,32 \text{ mm} \quad (223)$$

Logo, o momento de plastificação da seção mista é calculado pela equação (224).

$$M_{pl} = R_{td} \left(\frac{d}{2} + h_t - \frac{a}{2} \right) = \frac{2109,15 \times \left(313,4 + 130 - \frac{46,32}{2} \right)}{1000} = 886,35 \text{ kNm} \quad (224)$$

O momento resistente elástico do perfil de aço é dado pela equação (225).

$$M_{el} = W_x f_y = \frac{1,798 \times 10^6 \times 355}{10^6} = 638,29 \text{ kNm} \quad (225)$$

Assim, o momento fletor resistente da viga mista na região da abertura pode ser calculado de acordo com a equação (226).

$$\begin{aligned} M_{Rd} &= \frac{M_{el} + \eta_i(M_{pl} - M_{el})}{\gamma_{a1}} = \frac{638,29 + 0,62 \times (886,35 - 638,29)}{1,1} \\ &= 720,08 \text{ kNm} > 474,54 \text{ kNm OK} \end{aligned} \quad (226)$$

Pode-se observar que o momento fletor resistente na abertura 8 é superior ao solicitante, portanto, para esse estado limite último, a seção mista atende à condição de segurança.

5.4.2.6 Verificação a esforço cortante

O esforço cortante resistente no apoio é calculado pelas equações (227) e (228).

$$A_w = dt_w = 626,8 \times 8,5 = 5327,8 \text{ mm}^2 \quad (227)$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6A_w f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,6 \times 5327,8 \times 355}{1,1 \times 10^3} = 1031,7 \text{ kN} > V_{Sd} = 190,5 \text{ kN OK} \quad (228)$$

O esforço cortante resistente na abertura é dado pelas equações (229) e (230).

$$A_{wT} = 2d_T t_w = 2 \times 113,4 \times 8,5 = 1927,8 \text{ mm}^2 \quad (229)$$

$$V_{o,Rd} = \frac{0,6A_{wT}f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,6 \times 1927,8 \times 355}{1,1 \times 10^3} = 373,29 \text{ kN} > V_{sd} = 171,45 \text{ kN OK} \quad (230)$$

O esforço cortante longitudinal resistente no montante da alma é dado pelas equações (231) e (232).

$$A_{wp} = s_o t_w = 200 \times 8,5 = 1700 \text{ mm}^2 \quad (231)$$

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,6A_{wp}f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,6 \times 1700 \times 355}{1,1 \times 10^3} = 329,18 \text{ kN} > V_h = 131,14 \text{ kN OK} \quad (232)$$

Pode-se observar que os esforços cortantes resistentes no apoio, na abertura 1 e no montante da alma entre as aberturas 1 e 2 são superiores aos solicitantes, portanto, para esse estado limite, a seção mista é atende à condição de segurança.

5.4.2.7 Verificação à flexão e à flambagem do montante da alma

A verificação à flexão e à flambagem do montante da alma é feita na seção A-A conforme Figura 35. As constantes C_1 a C_3 são determinadas pelas equações (235) a (237) e o momento resistente na seção AA, determinado pelas equações (238) a (241) é superior ao momento solicitante, determinado pela equação (242).

$$\frac{s}{d_o} = 1,5 \quad (233)$$

$$\frac{d_o}{t_w} = \frac{400}{8,5} = 47,06 \quad (234)$$

$$C_1 = 5,097 + 0,1464 \left(\frac{d_o}{t_w} \right) - 0,00174 \left(\frac{d_o}{t_w} \right)^2 = 8,1464 \quad (235)$$

$$C_2 = 1,441 + 0,0625 \left(\frac{d_o}{t_w} \right) - 0,000683 \left(\frac{d_o}{t_w} \right)^2 = 2,8697 \quad (236)$$

$$C_3 = 3,645 + 0,0853 \left(\frac{d_o}{t_w} \right) - 0,00108 \left(\frac{d_o}{t_w} \right)^2 = 5,2674 \quad (237)$$

$$\frac{M_{max}}{M_e} = \left[C_1 \left(\frac{s}{d_o} \right) - C_2 \left(\frac{s}{d_o} \right)^2 - C_3 \right] = [8,1464 \times 1,5 - 2,8697 \times 1,5^2 - 5,2674] \quad (238)$$

$$= 0,4954$$

$$W = \frac{8,5 \times (200 + 0,564 \times 400)^2}{6} = 256608 \text{ mm}^2 \quad (239)$$

$$M_e = \frac{W f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{256608 \times 355}{1,1 \times 10^6} = 82,81 \text{ kNm} \quad (240)$$

$$M_{max} = 0,4954 \times M_e = 0,4954 \times 82,81 = 41,02 \text{ kNm} \quad (241)$$

$$M_{AA} = \frac{V_{wp,sd} 0,9 d_o}{2} = \frac{131,14 \times 0,9 \times 0,4}{2} = 23,61 \text{ kNm} \quad (242)$$

$$M_{max} > M_{AA} \text{ OK}$$

Portanto atende à condição de segurança desse estado limite último.

5.4.2.8 Verificação do mecanismo Vierendeel

O esforço cortante resistente da laje de concreto pode ser considerado na verificação do mecanismo Vierendeel e este deve ser calculado conforme as prescrições da NBR 8800:2008, equações (243) a (246).

$$f_{ctd} = \frac{\eta f_{ctk,inf}}{\gamma_c} = \frac{1 \times 0,21 \times (30)^{2/3}}{1,4} = 1,448 \text{ MPa} \quad (243)$$

$$\tau_{Rd} = 0,25 f_{ctd} = 0,25 \times 1,448 = 0,36 \text{ MPa} \quad (244)$$

$$A_v = \frac{(120 + 276) \times 130}{2} = 25740 \text{ mm}^2 \quad (245)$$

$$V_{c,Rd} = \frac{1000 \tau_{Rd} k_v (1,2 + 40\rho) A_v}{b_n} = \frac{1000 \times 0,36 \times 1 \times (1,2 + 0) \times 25740}{300 \times 10^3} \quad (246)$$

$$= 37,07 \text{ kN/m}$$

Como o valor do esforço cortante resistente da laje de concreto calculado conforme a ABNT NBR 8800:2008 é dado por metro, é recomendado utilizar a largura efetiva definida por Lawson e Hicks (2011).

$$b_w = b_f + 2h_{t,ef} = 189,9 + 2 \times 0,75 \times 130 = 384,9 \text{ mm} \quad (247)$$

$$V_{Rd,c} = b_w V_{v,c,Rd} = 0,3849 \times 35,19 = 14,27 \text{ kN} \quad (248)$$

Inicialmente é considerado que todo o esforço cortante solicitante atua no t \hat{e} superior, dessa forma, não é necessário fazer a verificação do mecanismo Vierendeel no t \hat{e} inferior. Mas caso a verificação no t \hat{e} superior não seja satisfeita parte do esforço cortante pode ser transferido para o t \hat{e} inferior e, portanto, a verificação deverá ser feita nos dois t \hat{e} s.

Na primeira abertura o esforço cortante solicitante no t \hat{e} superior vale:

$$V_{tT,Sd} = V_{Sd} - V_{c,Rd} = 171,45 - 14,27 = 157,18 \text{ kN} \quad (249)$$

Para determinar a seção crítica é necessário verificar em qual seção em torno da abertura a equação (86) resulta em maior valor, para simplificar o processo de cálculo manual, pode ser adotada a seção crítica igual a 25 $^\circ$.

A espessura da mesa e a altura da alma do t \hat{e} na seção crítica, pelo método de Sahmel, são dadas pelas equações (250) e (251).

$$t'_f = \frac{t_f}{\cos \theta} = \frac{12,7}{\cos 25} = 14,01 \text{ mm} \quad (250)$$

$$h'_{wT} = \frac{d/2 - t_f}{\cos \theta} - \frac{d_o}{2} = \frac{626,8/2 - 12,7}{\cos 25} - 200 = 131,79 \text{ mm} \quad (251)$$

O esforço cortante resistente na seção crítica é calculado pela equação (252).

$$V'_{T,Rd} = \frac{0,6(h'_{wT} + t'_f)t_w f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,6 \times (131,79 + 14,01) \times 8,5 \times 355}{1,1 \times 10^3} = 239,97 \text{ kN} \quad (252)$$

Os esforços solicitantes na seção crítica, pelo método de Sahmel, são calculados conforme as equações (253) a (257).

$$N'_{tT,Sd} = |N_{tT,Sd} \cos \theta - V_{tT,Sd} \sin \theta| = |0 \times \cos 25 - 157,18 \times \sin 25| = 66,43 \text{ kN} \quad (253)$$

$$V'_{tT,sd} = N_{tT,sd} \sin \theta + V_{tT,sd} \cos \theta = 0 \times \sin 25 + 157,18 \times \cos 25 = 142,45 \text{ kN} \quad (254)$$

$$A'_T = b_f t'_f + h'_{wT} t_w = 189,9 \times 14,01 + 131,79 \times 8,5 = 3780,71 \text{ mm}^2 \quad (255)$$

$$\begin{aligned} z'_T &= \frac{b_f t'^2_f / 2 + h'_{wT} t_w (t'_f + h'_{wt} / 2)}{A'_T} \\ &= \frac{189,9 \times 14,01^2 / 2 + 131,79 \times 8,5 \times (14,01 + 131,79 / 2)}{3780,71} \\ &= 28,61 \text{ mm} \end{aligned} \quad (256)$$

$$\begin{aligned} M'_{sd} &= N_{tT,sd} (z'_T - z_T) + V_{tT,sd} \left(\frac{d}{2} - z'_T \cos \theta \right) \tan \theta \\ &= 0 + \frac{157,18 \times (313,4 - 28,61 \cos 25) \tan 25}{1000} = 21,07 \text{ kNm} \end{aligned} \quad (257)$$

Para o cálculo do esforço axial e do momento fletor resistente, deve-se verificar se é necessário reduzir a espessura da alma através da verificação dada pela equação (258).

$$\rho = \frac{V'_{tT,sd}}{V'_{tT,Rd}} = \frac{142,45}{239,97} = 0,59 > 0,5 \quad (258)$$

Como $\rho > 0,5$, a espessura efetiva da alma deve ser calculada conforme a equação (259).

$$t_{ef} = t_w \sqrt{1 - \left(\frac{V'_{tT,sd}}{V'_{tT,Rd}} \right)^2} = 8,5 \times \sqrt{1 - \frac{142,45^2}{239,97^2}} = 6,84 \text{ mm} \quad (259)$$

O momento fletor resistente à plástificação do tê na seção crítica é calculado pelas equações (260) a (263).

$$A'_T = b_f t'_f + t_{ef} h'_{wT} = 189,9 \times 14,01 + 6,84 \times 131,79 = 3561,94 \text{ mm}^2 \quad (260)$$

$$y = \frac{A'_T}{2b_f} = \frac{3561,94}{2 \times 189,9} = 9,38 \text{ mm} \quad (261)$$

$$\begin{aligned}
 Z' &= \frac{b_f y^2}{2} + \frac{b_f (t'_f - y)^2}{2} + h'_{wT} t_{ef} \left(\frac{h'_{wT}}{2} + t'_f - y \right) \\
 &= \frac{189,9 \times 9,38^2}{2} + \frac{189,9 \times (14,01 - 9,38)^2}{2} + 131,79 \times 6,84 \\
 &\quad \times \left(\frac{131,79}{2} + 14,01 - 9,38 \right) = 73964 \text{ mm}^3
 \end{aligned} \tag{262}$$

$$M'_{pl} = \frac{Z' f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{73964 \times 355}{1,1 \times 10^6} = 23,87 \text{ kNm} \tag{263}$$

O esforço axial resistente do t  na se o cr tica   dado pela equa o (264).

$$N'_{T,Rd} = \frac{A'_T f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{3561,94 \times 355}{1,1 \times 10^3} = 1149,54 \text{ kN} \tag{264}$$

A verifica o do mecanismo Vierendeel   dada pela equa o (265).

$$\frac{N'_{tT,Sd}}{N'_{T,Rd}} + \frac{M'_{Sd}}{M'_{pl}} < 1 = \frac{66,43}{1149,54} + \frac{21,07}{23,87} = 0,94 < 1 \text{ OK} \tag{265}$$

Pode-se observar que para a se o cr tica igual a 25^o a verifica o do mecanismo Vierendeel   satisfeita.

5.4.2.9 Verifica o do estado limite de servi o

- Flecha antes da cura do concreto

O carregamento que atua na viga, para a verifica o da flecha antes da cura do concreto,   calculado pela equa o (266).

$$q_{ka} = (1,99 + 0,15 + 0,04 + 0,2) \times 3 = 7,14 \text{ kN/m} \tag{266}$$

A Tabela 10 mostra os esfor os internos devido ao carregamento real e   carga unit ria aplicada no centro da viga.

Tabela 10 - Esforços internos

Abertura	$N_{tT,sd}$ (kN)	$V_{tT,sd}$ (kN)	V_h (kN)	\bar{N}_{tTsd} (kN)	$\bar{V}_{tT,sd}$ (kN)	\bar{V}_h (kN)
1	29,02	32,13	30,79	0,43	0,5	0,51
2	59,81	27,85	26,39	0,94	0,5	0,51
3	86,20	23,56	21,99	1,45	0,5	0,51
4	108,19	19,28	17,59	1,97	0,5	0,51
5	125,78	14,99	13,20	2,48	0,5	0,51
6	138,98	10,71	8,79	2,99	0,5	0,51
7	147,77	6,43	4,40	3,51	0,5	0,51
8	152,17	2,14	0	4,02	0,5	0,51

Primeiramente, são calculadas as flechas para a primeira abertura, em seguida as flechas para as demais aberturas e a flecha total (y_i) de cada abertura são mostradas na Tabela 11.

$$y_1 = \frac{0,091R^3}{3EI_{xT}} (V_i \bar{V}_i) = \frac{0,091 \times 200^3}{3 \times 200000 \times 2,7867 \times 10^6} (V_i \bar{V}_i) = 4,35 \times 10^{-7} (V_i \bar{V}_i) \quad (267)$$

$$= 4,35 \times 10^{-7} \times 32,13 \times 0,5 \times 1000 = 0,007 \text{ mm}$$

$$y_2 = \frac{13,145}{Et_w} \left[\log_e \left(\frac{s - 0,9R}{s - 2R} \right) + 2 \left(\frac{s - 2R}{s - 0,9R} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{s - 2R}{s - 0,9R} \right)^2 - \frac{3}{2} \right] V_h \bar{V}_h$$

$$= \frac{13,145}{200000 \times 8,5} \left[\log_e \left(\frac{600 - 0,9 \times 200}{600 - 2 \times 200} \right) + 2 \left(\frac{600 - 2 \times 200}{600 - 0,9 \times 200} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{600 - 2 \times 200}{600 - 0,9 \times 200} \right)^2 - \frac{3}{2} \right] V_h \bar{V}_h = 6,26 \times 10^{-7} V_h \bar{V}_h \quad (268)$$

$$= 6,26 \times 10^{-7} \times 30,79 \times 0,51 \times 1000 = 0,0098 \text{ mm}$$

$$y_3 = \frac{2s}{EA_T} T_i \bar{T}_i = \frac{2 \times 600}{200000 \times 3267,68} T_i \bar{T}_i = 1,84 \times 10^{-6} T_i \bar{T}_i \quad (269)$$

$$= 1,84 \times 10^{-6} \times 29,02 \times 0,43 \times 1000 = 0,0229 \text{ mm}$$

$$y_4 = \frac{0,45R}{GA_{wT}} V_i \bar{V}_i = \frac{0,45 \times 200}{77000 \times 113,4 \times 8,5} V_i \bar{V}_i = 1,21 \times 10^{-6} V_i \bar{V}_i \quad (270)$$

$$= 1,21 \times 10^{-6} \times 32,13 \times 0,5 \times 1000 = 0,0194 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
 y_5 &= \frac{1,636}{Gt_w} \chi \log_e \left(\frac{s - 0,9R}{s - 2R} \right) V_h \bar{V}_h = \frac{1,636 \times 1,5}{77000 \times 8,5} \log_e \left(\frac{600 - 0,9 \times 200}{600 - 2 \times 200} \right) V_h \bar{V}_h \\
 &= 2,78 \times 10^{-6} V_h \bar{V}_h = 2,78 \times 10^{-6} \times 30,79 \times 0,51 \times 1000 \\
 &= 0,0437 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{271}$$

Tabela 11 - Flecha total de cada abertura

Abertura	y_1 (mm)	y_2 (mm)	y_3 (mm)	y_4 (mm)	y_5 (mm)	y_i (mm)
1	0,0070	0,0098	0,0229	0,0194	0,0437	0,1029
2	0,0061	0,0084	0,1032	0,0168	0,0374	0,1720
3	0,0051	0,0070	0,2295	0,0143	0,0312	0,2871
4	0,0042	0,0056	0,3913	0,0117	0,0250	0,4378
5	0,0033	0,0042	0,5728	0,0091	0,0187	0,6080
6	0,0023	0,0028	0,7630	0,0065	0,0125	0,7871
7	0,0014	0,0014	0,9524	0,0039	0,0062	0,9653
8	0,0005	0	1,1232	0,0013	0	1,1250

$$\begin{aligned}
 I_x &= \frac{t_w h_w^3}{12} + \frac{b_f t_f^3}{12} + 2b_f t_f \left(\frac{h_w}{2} + \frac{t_f}{2} \right)^2 \\
 &= \frac{8,5 \times 601,4^3}{12} + \frac{189,9 \times 12,7^3}{12} + \frac{189,9 \times 12,7 \times (601,4 + 12,7)^2}{2} \\
 &= 608,9 \times 10^6 \text{ mm}^4
 \end{aligned} \tag{272}$$

A flecha na seção final é calculada conforme a equação (273).

$$\begin{aligned}
 \delta_{sf} &= \int \frac{M_i \bar{M}_i}{EI_x} dx = \int_0^{200} \left(35,7 \times 10^3 x - 7,14 \frac{x^2}{2} \right) \frac{0,5x}{EI_x} dx \\
 &= \left[\frac{17,85 \times 10^3 x^3}{3} - \frac{1,785 x^4}{4} \right]_0^{200} = 0,0004 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{273}$$

A flecha aproximada na metade da primeira abertura é calculada pela equação (274).

$$\delta_{pa} = \frac{y_1 + y_3 + y_4}{2} = \frac{0,0070 + 0,0229 + 0,0194}{2} = 0,0247 \text{ mm} \tag{274}$$

A flecha total antes da cura do concreto é dada pela equação (275).

$$\delta_a = 2 \times \left(0,0004 + 0,0247 + 0,1029 + 0,1720 + 0,2871 + 0,4378 + 0,6080 \right. \\ \left. + 0,7871 + 0,9653 + \frac{1,1250}{2} \right) = 7,90 \text{ mm} \quad (275)$$

- Flecha depois da cura do concreto

$$I_{red} = 0,15I_{x0} = 0,15 \times 5,6357 \times 10^8 = 84,54 \times 10^6 \text{ mm}^4 \quad (276)$$

$$E_c = 4760\sqrt{fck} = 4760 \times \sqrt{30} = 26072 \text{ MPa} \quad (277)$$

$$n = \frac{E}{E_c} = \frac{200000}{26072} = 7,67 \quad (278)$$

$$b_{tr} = \frac{b}{n} = \frac{2500}{7,67} = 325,95 \text{ mm} \quad (279)$$

$$w = d - z_T + h_t = 626,8 - 21,2 + 130 = 735,6 \text{ mm} \quad (280)$$

$$a = \frac{\sqrt{A_T^2 + 2b_{tr}A_Tw} - A_T}{b_{tr}} \\ = \frac{\sqrt{3267,68^2 + 2 \times 325,95 \times 3267,68 \times 735,6} - 3267,68}{325,95} \quad (281) \\ = 111,83 \text{ mm}$$

$$t_{c2} = \min(a, t_c) = 80 \text{ mm} \quad (282)$$

$$A_c = b_{tr}t_{c2} = 325,95 \times 80 = 26076 \text{ mm}^2 \quad (283)$$

$$I_{xc} = \frac{b_{tr}t_{c2}^3}{12} = \frac{325,95 \times 80^3}{12} = 13,91 \times 10^6 \text{ mm}^4 \quad (284)$$

$$y_c = d - z_T + h_t - \frac{t_{c2}}{2} = 626,8 - 21,2 + 130 - \frac{80}{2} = 695,6 \text{ mm} \quad (285)$$

$$y_g = \frac{A_c y_c}{A_c + A_T} = \frac{26076 \times 695,6}{26076 + 3267,68} = 618,14 \text{ mm} \quad (286)$$

$$\begin{aligned}
 I_{tr} &= A_c y_c^2 + (I_{xT} + I_{xc}) - (A_T + A_c) y_g^2 \\
 &= 26076 \times 695,6^2 + 2,7867 \times 10^6 + 13,91 \times 10^6 \\
 &\quad - (3267,68 + 26076) \times 618,14^2 = 1,422 \times 10^9 \text{ mm}^4
 \end{aligned}
 \tag{287}$$

$$I = (I_{tr} - I_{red})/1,3 = (1422 \times 10^6 - 84,54 \times 10^6)/1,3 = 1,03 \times 10^9 \text{ mm}^4
 \tag{288}$$

$$\delta_d = \frac{5q_{kc}L^4}{384EI} = \frac{5 \times 19,5 \times 10000^4}{384 \times 200000 \times 1,03 \times 10^9} = 12,33 \text{ mm}
 \tag{289}$$

- Verificação da flecha total

$$\delta_t = \delta_a + \delta_d = 7,90 + 12,33 = 20,23 \text{ mm}
 \tag{290}$$

$$\delta_{lim} = \frac{L}{350} = \frac{10000}{350} = 28,57 \text{ mm} > 20,23 \text{ mm OK}
 \tag{291}$$

Portanto atende à condição de serviço desse estado limite.

5.4.3 Aferição do programa

A aferição do programa foi comprovada, uma vez que os resultados obtidos pelo programa desenvolvido são iguais aos dos exemplos numéricos das metodologias estudadas. A Tabela 12 compara os resultados do programa com os do exemplo numérico de Oliveira, T. (2012), que trata da metodologia de Lawson e Hicks (2011) e a Tabela 13 compara os resultados do programa com os da metodologia de Ward (1990).

Tabela 12 - Comparação dos resultados obtidos do exemplo de Oliveira, T. (2012) 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	451,88	625,05	726,21	1004,52	162,31	282,47	29,22	55,11	131,81	213,42
Programa	451,88	625,05	726,21	1004,52	162,31	282,47	29,22	55,11	131,81	213,42
Diferença (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

	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	0	8,89	131,81	284,56	149,12	301,61	330,93	18,2
Programa	0	8,89	131,81	284,56	149,12	301,61	330,93	18,2
Diferença (%)	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 13 - Comparação dos resultados obtidos do exemplo de Ward (1990) e do programa computacional

	Momento fletor na abertura (kNm)		Força cortante no apoio (kN)		Força cortante na abertura (kN)		Cortante longitudinal (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	474,54	720,08	190,5	1031,7	171,45	373,29	131,14	329,18	23,61	41,02
Programa	474,54	720,08	190,5	1031,7	171,45	373,29	131,14	329,18	23,61	41,02
Diferença (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

	Mecanismo Vierendeel	Flecha (mm)
	$\frac{N_{tT,Sd}}{N_{T,Rd}} + \frac{M_{sd}}{M_{pl}}$	
Exemplo	0,94	20,23
Programa	0,94	20,23
Diferença (%)	0,0	0,0

5.5 Comprovação experimental

5.5.1 Ensaio de Nadjai *et al.* (2007)

A Figura 44 mostra a viga celular mista de aço e concreto simplesmente apoiada e com carga concentrada aplicada em dois pontos, denominada *Ulster Beam A1*, ensaiada por Nadjai *et al.* (2007). As características geométricas do modelo experimental são: 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.

Nadjai *et al.* (2007) 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 mostradas Figura 45.

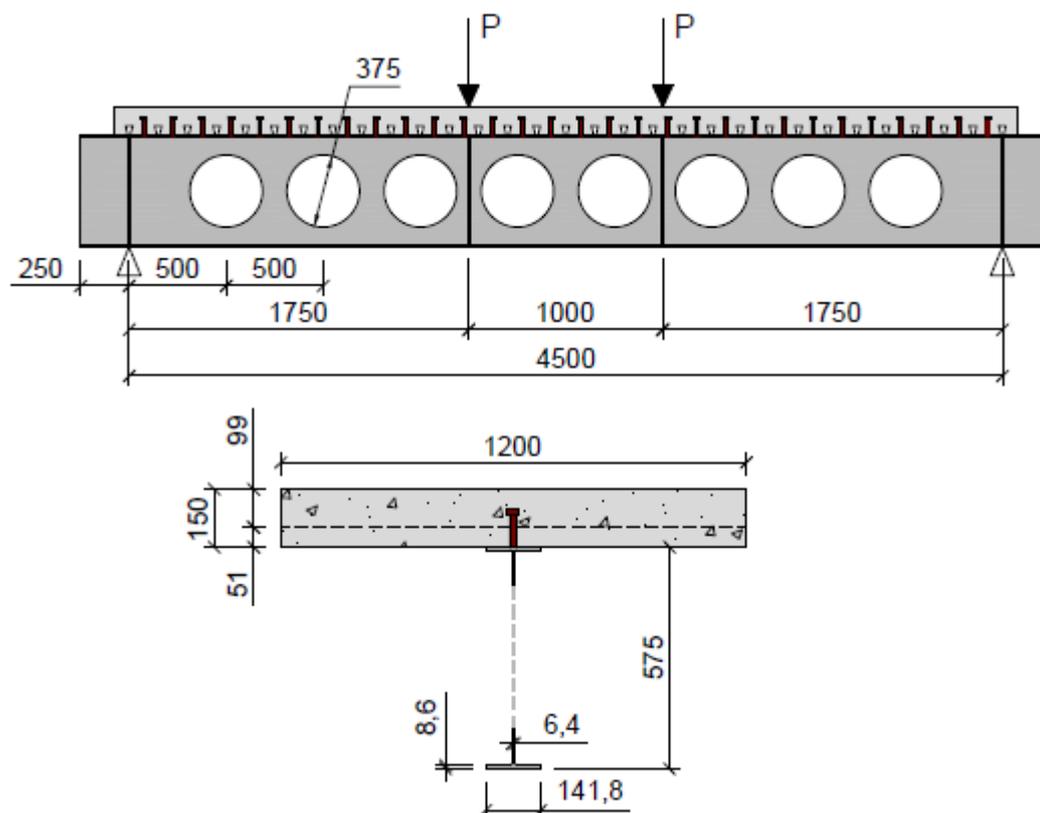


Figura 44 - Características geométricas da viga *Ulster Beam A1* (dimensões em milímetros)

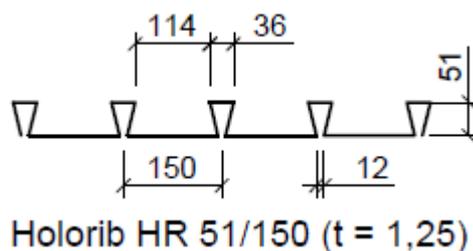


Figura 45 - Características geométricas da forma de aço incorporada à laje (dimensões em milímetros)

A laje de 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 (2011) e Ward (1990). Pela Tabela 14, pode-se notar que ambas as metodologias estão a favor da segurança e que a metodologia de Lawson e Hicks (2011) mostrou-se mais adequada na previsão da carga de colapso relacionada ao estado limite em questão.

Tabela 14 - Comparação entre os resultados de Nadjai *et al.* (2007) e do programa

	Carga de colapso (kN)	Diferença percentual ($P_p^* - P_e$)/$P_e \times 100$
Experimental (P_e)	370	-
Lawson e Hicks (2011)	310	-16%
Ward (1990)	276	-25%

(*) P_p = Carga de colapso obtida pelo programa

5.5.2 Ensaio de Müller *et al.* (2006)

A Figura 46 mostra a viga celular mista de aço e concreto simplesmente apoiada e com carga concentrada aplicada em quatro pontos, denominada *RWTH Beam 1B*, ensaiada por Müller *et al.* (2006). As características geométricas do modelo experimental são: 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.* (2006) 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, conforme mostrado na Figura 45.

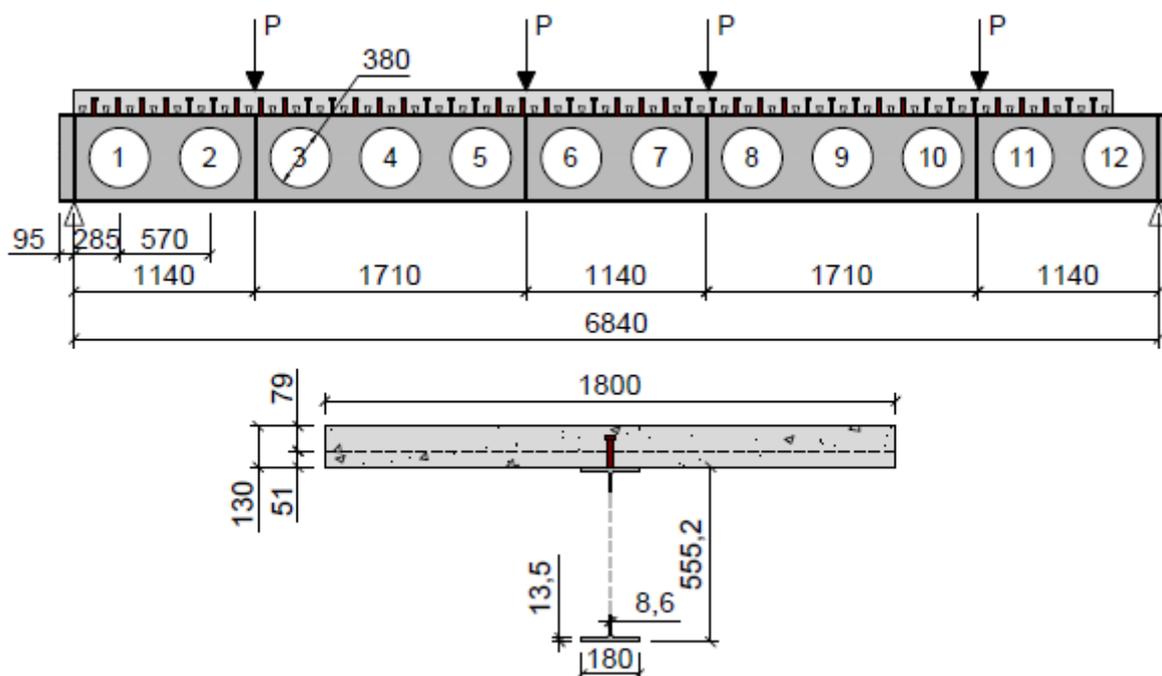


Figura 46 - Características geométricas da viga *RWTH Beam 1B* (dimensões em mm).

A laje de 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 (2011) e 42% menor que a experimental segundo a metodologia de Ward (1990).

A Tabela 15 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 (2011) mostrou-se mais adequada na previsão da carga de colapso relacionada ao estado limite em questão.

Tabela 15 - Comparação entre os resultados de Müller *et al.* (2006) 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 (2011)	692	-18%
Ward (1990)	556	-34%

(*) P_p = Carga de colapso obtida pelo programa

6 ESTUDO PARAMÉTRICO

6.1 Introdução

Após a aferição do programa computacional, apresentada no capítulo 5, foi realizado um estudo paramétrico de uma série de vigas mistas com perfis celulares de geometria definida conforme os limites das metodologias em estudo.

O estudo paramétrico, apresentado neste capítulo, foi desenvolvido com o intuito de estudar os modos de colapso e as variáveis que influenciam a resistência à flexão dessas vigas e também comparar as metodologias de dimensionamentos.

O item 6.2 deste capítulo apresenta as geometrias e as características dos modelos utilizados no estudo paramétrico. As metodologias e ferramentas utilizadas para a realização do estudo são descritas no 6.3.

Os resultados do estudo paramétrico são apresentados no item 6.4, onde para cada uma das metodologias estudadas é feita uma avaliação da influência das diversas variáveis no valor da carga última e no modo de colapso.

6.2 Modelos da parametrização

O estudo paramétrico de vigas mistas com perfil de aço celular foi realizado considerando vigas obtidas a partir de dois perfis 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 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 deram origem as vigas mistas de perfis celulares estudadas. O mesmo número de conectores de cisalhamento foi adotado para as vigas mistas com perfis celulares.

Os principais parâmetros analisados são: comprimento do vão da viga (L), espaçamento entre aberturas (s), diâmetro das aberturas (d_o), altura final da viga celular (d) (Figura 47).

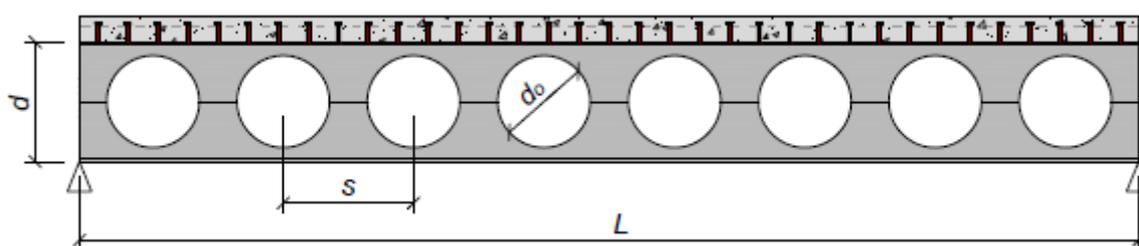


Figura 47 - Parâmetros geométricos da viga celular

As metodologias de Ward (1990) e Lawson e Hicks (2011) apresentam limites diferentes (item 3.2 e item 4.2, respectivamente) para a definição da geometria de vigas celulares. Neste estudo, as propriedades geométricas das vigas foram definidas atendendo aos limites de ambas as metodologias. As Tabelas 16 e 17 mostram, respectivamente, as propriedades geométricas e a razão L/d_g (vão/altura do perfil original) adotados para os perfis W 310x32,7 e W 530x85. 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/d_g são as propriedades geométricas. 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, 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.

Tabela 16 - Propriedades geométricas adotadas para o perfil W310x32,7.

nº	Designação	d	d_o	s	L/d_g
1	VC 310-1,3-0,6-1,3-10	$1,3d_g$	$0,6d$	$1,3d_o$	10
2	VC 310-1,3-0,6-1,3-15				15
3	VC 310-1,3-0,6-1,3-20				20
4	VC 310-1,3-0,6-1,3-25				25
5	VC 310-1,3-0,6-1,3-30				30

Continuação da Tabela 16 - Propriedades geométricas adotadas para o perfil
W310x32,7

nº	Designação	d	d_o	s	L/d_g	
6	VC 310-1,3-0,6-1,3-35	$1,3d_g$	$0,6d$	$1,3d_o$	35	
7	VC 310-1,3-0,6-1,3-40				40	
8	VC 310-1,3-0,6-1,4-10			$1,4d_o$	10	
9	VC 310-1,3-0,6-1,4-15				15	
10	VC 310-1,3-0,6-1,4-20				20	
11	VC 310-1,3-0,6-1,4-25				25	
12	VC 310-1,3-0,6-1,4-30				30	
13	VC 310-1,3-0,6-1,4-35				35	
14	VC 310-1,3-0,6-1,4-40				40	
15	VC 310-1,3-0,6-1,5-10				$1,5d_o$	10
16	VC 310-1,3-0,6-1,5-15			15		
17	VC 310-1,3-0,6-1,5-20			20		
18	VC 310-1,3-0,6-1,5-25			25		
19	VC 310-1,3-0,6-1,5-30			30		
20	VC 310-1,3-0,6-1,5-35			35		
21	VC 310-1,3-0,6-1,5-40			40		
22	VC 310-1,3-0,7-1,3-10			$0,7d$		$1,3d_o$
23	VC 310-1,3-0,7-1,3-15				15	
24	VC 310-1,3-0,7-1,3-20				20	
25	VC 310-1,3-0,7-1,3-25				25	
26	VC 310-1,3-0,7-1,3-30		30			
27	VC 310-1,3-0,7-1,3-35		35			
28	VC 310-1,3-0,7-1,3-40		40			
29	VC 310-1,3-0,7-1,4-10		$1,4d_o$		10	
30	VC 310-1,3-0,7-1,4-15				15	
31	VC 310-1,3-0,7-1,4-20				20	
32	VC 310-1,3-0,7-1,4-25				25	
33	VC 310-1,3-0,7-1,4-30				30	
34	VC 310-1,3-0,7-1,4-35				35	
35	VC 310-1,3-0,7-1,4-40				40	
36	VC 310-1,3-0,7-1,5-10				$1,5d_o$	10
37	VC 310-1,3-0,7-1,5-15		15			
38	VC 310-1,3-0,7-1,5-20		20			
39	VC 310-1,3-0,7-1,5-25		25			
40	VC 310-1,3-0,7-1,5-30		30			
41	VC 310-1,3-0,7-1,5-35		35			
42	VC 310-1,3-0,7-1,5-40		40			
43	VC 310-1,3-0,8-1,3-10		$0,8d$	$1,3d_o$		10
44	VC 310-1,3-0,8-1,3-15				15	
45	VC 310-1,3-0,8-1,3-20				20	
46	VC 310-1,3-0,8-1,3-25				25	

Continuação da Tabela 16 - Propriedades geométricas adotadas para o perfil
W310x32,7

nº	Designação	d	d_o	s	L/d_g		
47	VC 310-1,3-0,8-1,3-30	$1,3d_g$	$0,8d$	$1,3d_o$	30		
48	VC 310-1,3-0,8-1,3-35				35		
49	VC 310-1,3-0,8-1,3-40				40		
50	VC 310-1,3-0,8-1,4-10			$1,4d_o$	10		
51	VC 310-1,3-0,8-1,4-15				15		
52	VC 310-1,3-0,8-1,4-20				20		
53	VC 310-1,3-0,8-1,4-25				25		
54	VC 310-1,3-0,8-1,4-30				30		
55	VC 310-1,3-0,8-1,4-35				35		
56	VC 310-1,3-0,8-1,4-40				40		
57	VC 310-1,3-0,8-1,5-10			$1,5d_o$	10		
58	VC 310-1,3-0,8-1,5-15				15		
59	VC 310-1,3-0,8-1,5-20				20		
60	VC 310-1,3-0,8-1,5-25				25		
61	VC 310-1,3-0,8-1,5-30				30		
62	VC 310-1,3-0,8-1,5-35				35		
63	VC 310-1,3-0,8-1,5-40				40		
64	VC 310-1,4-0,63-1,3-10			$1,4d_g$	$0,63d$	$1,3d_o$	10
65	VC 310-1,4-0,63-1,3-15						15
66	VC 310-1,4-0,63-1,3-20						20
67	VC 310-1,4-0,63-1,3-25	25					
68	VC 310-1,4-0,63-1,3-30	30					
69	VC 310-1,4-0,63-1,3-35	35					
70	VC 310-1,4-0,63-1,3-40	40					
71	VC 310-1,4-0,7-1,3-10	$1,3d_o$	$0,7d$		10		
72	VC 310-1,4-0,7-1,3-15				15		
73	VC 310-1,4-0,7-1,3-20				20		
74	VC 310-1,4-0,7-1,3-25				25		
75	VC 310-1,4-0,7-1,3-30				30		
76	VC 310-1,4-0,7-1,3-35				35		
77	VC 310-1,4-0,7-1,3-40				40		
78	VC 310-1,4-0,7-1,4-10			$1,4d_o$	10		
79	VC 310-1,4-0,7-1,4-15				15		
80	VC 310-1,4-0,7-1,4-20				20		
81	VC 310-1,4-0,7-1,4-25	25					
82	VC 310-1,4-0,7-1,4-30	30					
83	VC 310-1,4-0,7-1,4-35	35					
84	VC 310-1,4-0,7-1,4-40	40					
85	VC 310-1,4-0,7-1,5-10	$1,5d_o$	10				
86	VC 310-1,4-0,7-1,5-15		15				
87	VC 310-1,4-0,7-1,5-20		20				

Continuação da Tabela 16 - Propriedades geométricas adotadas para o perfil
W310x32,7

nº	Designação	d	d_o	s	L/d_g	
88	VC 310-1,4-0,7-1,5-25	$1,4d_g$	$0,7d$	$1,5d_o$	25	
89	VC 310-1,4-0,7-1,5-30				30	
90	VC 310-1,4-0,7-1,5-35				35	
91	VC 310-1,4-0,7-1,5-40				40	
92	VC 310-1,4-0,8-1,3-10		$0,8d$	$1,3d_o$	10	
93	VC 310-1,4-0,8-1,3-15				15	
94	VC 310-1,4-0,8-1,3-20				20	
95	VC 310-1,4-0,8-1,3-25				25	
96	VC 310-1,4-0,8-1,3-30				30	
97	VC 310-1,4-0,8-1,3-35				35	
98	VC 310-1,4-0,8-1,3-40				40	
99	VC 310-1,4-0,8-1,4-10				$1,4d_o$	$1,4d_o$
100	VC 310-1,4-0,8-1,4-15			15		
101	VC 310-1,4-0,8-1,4-20			20		
102	VC 310-1,4-0,8-1,4-25			25		
103	VC 310-1,4-0,8-1,4-30			30		
104	VC 310-1,4-0,8-1,4-35			35		
105	VC 310-1,4-0,8-1,4-40			40		
106	VC 310-1,4-0,8-1,5-10			$1,5d_o$		
107	VC 310-1,4-0,8-1,5-15				15	
108	VC 310-1,4-0,8-1,5-20	20				
109	VC 310-1,4-0,8-1,5-25	25				
110	VC 310-1,4-0,8-1,5-30	30				
111	VC 310-1,4-0,8-1,5-35	35				
112	VC 310-1,4-0,8-1,5-40	40				
113	VC 310-1,5-0,73-1,3-10	$1,5d_g$	$0,73d$	$1,3d_o$	10	
114	VC 310-1,5-0,73-1,3-15				15	
115	VC 310-1,5-0,73-1,3-20				20	
116	VC 310-1,5-0,73-1,3-25				25	
117	VC 310-1,5-0,73-1,3-30				30	
118	VC 310-1,5-0,73-1,3-35				35	
119	VC 310-1,5-0,73-1,3-40		40			
120	VC 310-1,5-0,8-1,3-10		$0,8d$	$1,3d_o$	10	
121	VC 310-1,5-0,8-1,3-15				15	
122	VC 310-1,5-0,8-1,3-20	20				
123	VC 310-1,5-0,8-1,3-25	25				
124	VC 310-1,5-0,8-1,3-30	30				
125	VC 310-1,5-0,8-1,3-35	35				
126	VC 310-1,5-0,8-1,3-40	40				
127	VC 310-1,5-0,8-1,4-10	$1,4d_o$		$1,4d_o$	10	
128	VC 310-1,5-0,8-1,4-15				15	

Continuação da Tabela 16 - Propriedades geométricas adotadas para o perfil
W310x32,7

nº	Designação	d	d_o	s	L/d_g			
129	VC 310-1,5-0,8-1,4-20	$1,5d_g$	$0,8d$	$1,4d_o$	20			
130	VC 310-1,5-0,8-1,4-25				25			
131	VC 310-1,5-0,8-1,4-30				30			
132	VC 310-1,5-0,8-1,4-35				35			
133	VC 310-1,5-0,8-1,4-40				40			
134	VC 310-1,5-0,8-1,5-10			$1,5d_o$	10			
135	VC 310-1,5-0,8-1,5-15				15			
136	VC 310-1,5-0,8-1,5-20				20			
137	VC 310-1,5-0,8-1,5-25				25			
138	VC 310-1,5-0,8-1,5-30				30			
139	VC 310-1,5-0,8-1,5-35				35			
140	VC 310-1,5-0,8-1,5-40				40			
141	VC 310-1,57-0,8-1,3-10				$1,57d_g$	$0,8d$	$1,3d_o$	10
142	VC 310-1,57-0,8-1,3-15							15
143	VC 310-1,57-0,8-1,3-20	20						
144	VC 310-1,57-0,8-1,3-25	25						
145	VC 310-1,57-0,8-1,3-30	30						
146	VC 310-1,57-0,8-1,3-35	35						
147	VC 310-1,57-0,8-1,3-40	40						

Tabela 17 - Propriedades geométricas adotadas para o perfil W530x85

nº	Designação	d	d_o	s	L/d_g	
148	VC 530-1,3-0,6-1,3-10	$1,3d_g$	$0,6d$	$1,3d_o$	10	
149	VC 530-1,3-0,6-1,3-15				15	
150	VC 530-1,3-0,6-1,3-20				20	
151	VC 530-1,3-0,6-1,3-25				25	
152	VC 530-1,3-0,6-1,3-30				30	
153	VC 530-1,3-0,6-1,3-35				35	
154	VC 530-1,3-0,6-1,3-40				40	
155	VC 530-1,3-0,6-1,4-10			$1,4d_o$	10	
156	VC 530-1,3-0,6-1,4-15				15	
157	VC 530-1,3-0,6-1,4-20				20	
158	VC 530-1,3-0,6-1,4-25				25	
159	VC 530-1,3-0,6-1,4-30				30	
160	VC 530-1,3-0,6-1,4-35				35	
161	VC 530-1,3-0,6-1,4-40				40	
162	VC 530-1,3-0,6-1,5-10				$1,5d_o$	10
163	VC 530-1,3-0,6-1,5-15					15
164	VC 530-1,3-0,6-1,5-20	20				
165	VC 530-1,3-0,6-1,5-25	25				

Continuação da Tabela 17 - Propriedades geométricas adotadas para o perfil
W530x85

nº	Designação	d	d_o	s	L/d_g	
166	VC 530-1,3-0,6-1,5-30	$1,3d_g$	$0,6d$	$1,5d_o$	30	
167	VC 530-1,3-0,6-1,5-35				35	
168	VC 530-1,3-0,6-1,5-40				40	
169	VC 530-1,3-0,7-1,3-10		$0,7d$	$1,3d_o$	10	
170	VC 530-1,3-0,7-1,3-15				15	
171	VC 530-1,3-0,7-1,3-20				20	
172	VC 530-1,3-0,7-1,3-25				25	
173	VC 530-1,3-0,7-1,3-30				30	
174	VC 530-1,3-0,7-1,3-35				35	
175	VC 530-1,3-0,7-1,3-40				40	
176	VC 530-1,3-0,7-1,4-10				$1,4d_o$	10
177	VC 530-1,3-0,7-1,4-15					15
178	VC 530-1,3-0,7-1,4-20					20
179	VC 530-1,3-0,7-1,4-25		25			
180	VC 530-1,3-0,7-1,4-30		30			
181	VC 530-1,3-0,7-1,4-35		35			
182	VC 530-1,3-0,7-1,4-40		40			
183	VC 530-1,3-0,7-1,5-10		$1,5d_o$	10		
184	VC 530-1,3-0,7-1,5-15			15		
185	VC 530-1,3-0,7-1,5-20			20		
186	VC 530-1,3-0,7-1,5-25	25				
187	VC 530-1,3-0,7-1,5-30	30				
188	VC 530-1,3-0,7-1,5-35	35				
189	VC 530-1,3-0,7-1,5-40	40				
190	VC 530-1,3-0,8-1,3-10	$0,8d$	$1,3d_o$	10		
191	VC 530-1,3-0,8-1,3-15			15		
192	VC 530-1,3-0,8-1,3-20			20		
193	VC 530-1,3-0,8-1,3-25			25		
194	VC 530-1,3-0,8-1,3-30			30		
195	VC 530-1,3-0,8-1,3-35			35		
196	VC 530-1,3-0,8-1,3-40		40			
197	VC 530-1,3-0,8-1,4-10		$1,4d_o$	10		
198	VC 530-1,3-0,8-1,4-15			15		
199	VC 530-1,3-0,8-1,4-20			20		
200	VC 530-1,3-0,8-1,4-25			25		
201	VC 530-1,3-0,8-1,4-30			30		
202	VC 530-1,3-0,8-1,4-35			35		
203	VC 530-1,3-0,8-1,4-40			40		
204	VC 530-1,3-0,8-1,5-10			$1,5d_o$	10	
205	VC 530-1,3-0,8-1,5-15		15			
206	VC 530-1,3-0,8-1,5-20	20				

Continuação da Tabela 17 - Propriedades geométricas adotadas para o perfil
W530x85

nº	Designação	d	d_o	s	L/d_g
207	VC 530-1,3-0,8-1,5-25	$1,3d_g$	$0,8d$	$1,5d_o$	25
208	VC 530-1,3-0,8-1,5-30				30
209	VC 530-1,3-0,8-1,5-35				35
210	VC 530-1,3-0,8-1,5-40				40
211	VC 530-1,4-0,63-1,3-10	$1,4d_g$	$0,63d$	$1,3d_o$	10
212	VC 530-1,4-0,63-1,3-15				15
213	VC 530-1,4-0,63-1,3-20				20
214	VC 530-1,4-0,63-1,3-25				25
215	VC 530-1,4-0,63-1,3-30				30
216	VC 530-1,4-0,63-1,3-35				35
217	VC 530-1,4-0,63-1,3-40				40
218	VC 530-1,4-0,7-1,3-10				$0,7d$
219	VC 530-1,4-0,7-1,3-15		15		
220	VC 530-1,4-0,7-1,3-20		20		
221	VC 530-1,4-0,7-1,3-25		25		
222	VC 530-1,4-0,7-1,3-30		30		
223	VC 530-1,4-0,7-1,3-35		35		
224	VC 530-1,4-0,7-1,3-40		40		
225	VC 530-1,4-0,7-1,4-10		$1,4d_o$	$1,4d_o$	
226	VC 530-1,4-0,7-1,4-15				15
227	VC 530-1,4-0,7-1,4-20	20			
228	VC 530-1,4-0,7-1,4-25	25			
229	VC 530-1,4-0,7-1,4-30	30			
230	VC 530-1,4-0,7-1,4-35	35			
231	VC 530-1,4-0,7-1,4-40	40			
232	VC 530-1,4-0,7-1,5-10	$1,5d_o$			$1,5d_o$
233	VC 530-1,4-0,7-1,5-15		15		
234	VC 530-1,4-0,7-1,5-20		20		
235	VC 530-1,4-0,7-1,5-25		25		
236	VC 530-1,4-0,7-1,5-30		30		
237	VC 530-1,4-0,7-1,5-35		35		
238	VC 530-1,4-0,7-1,5-40		40		
239	VC 530-1,4-0,8-1,3-10		$0,8d$	$1,3d_o$	
240	VC 530-1,4-0,8-1,3-15	15			
241	VC 530-1,4-0,8-1,3-20	20			
242	VC 530-1,4-0,8-1,3-25	25			
243	VC 530-1,4-0,8-1,3-30	30			
244	VC 530-1,4-0,8-1,3-35	35			
245	VC 530-1,4-0,8-1,3-40	40			
246	VC 530-1,4-0,8-1,4-10	$1,4d_o$			10
247	VC 530-1,4-0,8-1,4-15			15	

Continuação da Tabela 17 - Propriedades geométricas adotadas para o perfil
W530x85

nº	Designação	d	d_o	s	L/d_g		
248	VC 530-1,4-0,8-1,4-20	$1,4d_g$	$0,8d$	$1,4d_o$	20		
249	VC 530-1,4-0,8-1,4-25				25		
250	VC 530-1,4-0,8-1,4-30				30		
251	VC 530-1,4-0,8-1,4-35				35		
252	VC 530-1,4-0,8-1,4-40				40		
253	VC 530-1,4-0,8-1,5-10			$1,5d_o$	10		
254	VC 530-1,4-0,8-1,5-15				15		
255	VC 530-1,4-0,8-1,5-20				20		
256	VC 530-1,4-0,8-1,5-25				25		
257	VC 530-1,4-0,8-1,5-30				30		
258	VC 530-1,4-0,8-1,5-35				35		
259	VC 530-1,4-0,8-1,5-40				40		
260	VC 530-1,5-0,73-1,3-10				$0,73d$	$1,3d_o$	10
261	VC 530-1,5-0,73-1,3-15						15
262	VC 530-1,5-0,73-1,3-20	20					
263	VC 530-1,5-0,73-1,3-25	25					
264	VC 530-1,5-0,73-1,3-30	30					
265	VC 530-1,5-0,73-1,3-35	35					
266	VC 530-1,5-0,73-1,3-40	40					
267	VC 530-1,5-0,8-1,3-10	$1,5d_g$	$1,3d_o$	10			
268	VC 530-1,5-0,8-1,3-15			15			
269	VC 530-1,5-0,8-1,3-20			20			
270	VC 530-1,5-0,8-1,3-25			25			
271	VC 530-1,5-0,8-1,3-30			30			
272	VC 530-1,5-0,8-1,3-35			35			
273	VC 530-1,5-0,8-1,3-40			40			
274	VC 530-1,5-0,8-1,4-10		$0,8d$	$1,4d_o$	10		
275	VC 530-1,5-0,8-1,4-15				15		
276	VC 530-1,5-0,8-1,4-20				20		
277	VC 530-1,5-0,8-1,4-25				25		
278	VC 530-1,5-0,8-1,4-30				30		
279	VC 530-1,5-0,8-1,4-35				35		
280	VC 530-1,5-0,8-1,4-40				40		
281	VC 530-1,5-0,8-1,5-10	$1,5d_o$			10		
282	VC 530-1,5-0,8-1,5-15		15				
283	VC 530-1,5-0,8-1,5-20		20				
284	VC 530-1,5-0,8-1,5-25		25				
285	VC 530-1,5-0,8-1,5-30		30				
286	VC 530-1,5-0,8-1,5-35		35				
287	VC 530-1,5-0,8-1,5-40		40				

Continuação da Tabela 17 - Propriedades geométricas adotadas para o perfil W530x85

nº	Designação	d	d_o	s	L/d_g
288	VC 530-1,6-0,8-1,3-10	$1,6d_g$	$0,8d$	$1,3d_o$	10
289	VC 530-1,6-0,8-1,3-15				15
290	VC 530-1,6-0,8-1,3-20				20
291	VC 530-1,6-0,8-1,3-25				25
292	VC 530-1,6-0,8-1,3-30				30
293	VC 530-1,6-0,8-1,3-35				35
294	VC 530-1,6-0,8-1,3-40				40

No total, foram dimensionadas pelo programa 294 vigas mistas de aço e concreto com perfil de aço celular para cada metodologia.

6.3 Metodologia e ferramentas utilizadas

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 pela equação (292).

$$\delta = (P_{VC} - P_{VM})/P_{VM} \times 100(\%) \quad (292)$$

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 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.

No APÊNDICE A são apresentados as cargas últimas e os estados limites associados para cada uma das vigas analisadas no estudo paramétrico.

6.4 Análise dos resultados

6.4.1 Vigas mistas com perfis de alma cheia

A Tabela 18 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.

Tabela 18 - Estado limite e carga máxima para vigas mistas com perfil de alma cheia

L/d_g	W 310x32,7		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

Conforme mostra a Tabela 18, o estado limite de plastificação por momento fletor governou o dimensionamento de vigas mistas com perfis de alma cheia para vãos pequenos, razão L/d_g igual ou inferior a 15. Para vãos médios e grandes, o estado limite de flecha excessiva governa o dimensionamento. Vale lembrar que a possibilidade de aplicação de uma contra flecha não foi estudada nessa análise.

6.4.2 Metodologia de Lawson e Hicks (2011)

6.4.2.1 Influência do diâmetro das aberturas na diferença percentual e no estado limite

A Tabela 19 mostra a influência do diâmetro das aberturas no estado limite que governa o dimensionamento da viga mista com perfil celular. Para essa análise foram selecionados os perfis celulares com razão s/d_o igual a 1,5, uma vez que para razões menores há maior possibilidade do estado limite ser governado pela largura do montante da alma, e com razão d/d_g igual a 1,3, já que para essa razão foi possível obter uma maior variação do diâmetro das aberturas. Pode-se observar que à medida que o diâmetro da abertura aumenta, o mecanismo Vierendeel governa o dimensionamento para razões L/d_g maiores, governando o dimensionamento até para razão L/d_g igual a 20 quando a razão d_o/d é igual a 0,8.

Tabela 19 - Influência do diâmetro das aberturas no estado limite das vigas mistas com perfil celular

L/d_g	Estado limite – VC 310x32,7		
	$d_o=0,6d$	$d_o=0,7d$	$d_o=0,8d$
10	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel
15	Momento fletor	Vierendeel	Vierendeel
20	Momento fletor	Momento fletor	Vierendeel
25	Momento fletor	Momento fletor	Momento fletor
30	Momento fletor	Momento fletor	Momento fletor
35	Flecha	Momento fletor	Momento fletor
40	Flecha	Flecha	Flecha
L/d_g	Estado limite – VC 530x85		
	$d_o=0,6d$	$d_o=0,7d$	$d_o=0,8d$
10	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel
15	Momento fletor	Vierendeel	Vierendeel
20	Momento fletor	Momento fletor	Vierendeel
25	Flecha	Flecha	Momento fletor
30	Flecha	Flecha	Flecha
35	Flecha	Flecha	Flecha
40	Flecha	Flecha	Flecha

Obs.: Vigas de altura $1,3d_g$ e distância entre aberturas igual a $1,5d_o$

Por meio da Tabela 19, também é possível observar que para razões L/d_g maiores que 25, a viga mista com perfil celular obtida do perfil W 310x32,7 é mais suscetível ao colapso por plastificação por momento fletor do que a viga mista celular com perfil W 530x85. Isso ocorre devido ao perfil W 310x32,7 possuir menor espessura

da alma e menor área da mesa, o que resulta num perfil celular cuja área do tê inferior não é suficiente para superar esse estado limite.

A Figura 48 mostra a influência do diâmetro das aberturas na diferença percentual entre as cargas últimas da viga mista celular e da viga mista de alma cheia. A análise dos gráficos da Figura 48 mostra que os perfis celulares com menores diâmetros apresentaram maior resistência ou rigidez (conforme o estado limite que governe) em todas as razões L/d_g estudadas. Também é possível observar uma maior influência do diâmetro das aberturas quando a razão L/d_g é menor ou igual a 20.

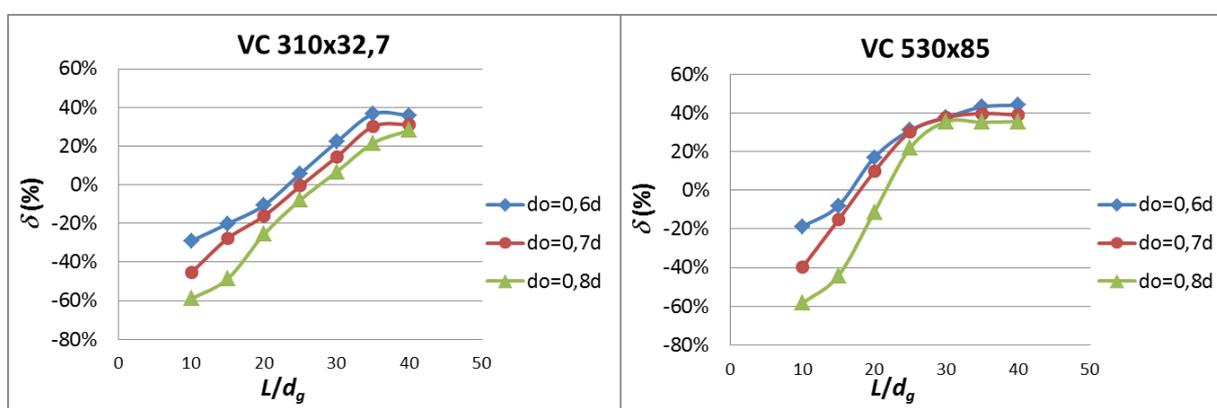


Figura 48 - Influência do diâmetro das aberturas na diferença percentual da viga mista com perfil celular

6.4.2.2 Influência da altura expandida na diferença percentual e no estado limite

A Tabela 20 mostra a influência da altura expandida no estado limite que governa o dimensionamento da viga mista com perfil celular. Foram selecionados os perfis celulares com razão d_o/d igual a 0,8 e com razão s/d_o igual a 1,3, pois para essas razões foi possível obter uma maior variação da altura expandida. Pode-se observar que a flambagem do montante da alma ocorre quando a razão d/d_g é maior, visto que na viga mista celular com perfil W 310x32,7 ocorre somente para razão d/d_g igual a 1,57 e na viga mista celular com perfil W 530x85 ocorre a partir da razão d/d_g igual a 1,5. Também é possível notar que a viga mista celular obtida a partir do perfil W 530x85 é mais suscetível à flambagem do montante da alma, uma vez que para essa viga esse estado limite ocorre para razões d/d_g menores, quando comparado ao perfil W 310x32,7.

Tabela 20 - Influência da altura expandida no estado limite das vigas mistas com perfil celular

L/d_g	Estado limite – VC 310x32,7			
	$d=1,3d_g$	$d=1,4d_g$	$d=1,5d_g$	$d=1,57d_g$
10	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel
15	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel
20	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel	Flambagem
25	Momento fletor	Momento fletor	Momento fletor	Flambagem
30	Momento fletor	Momento fletor	Momento fletor	Momento fletor
35	Momento fletor	Momento fletor	Momento fletor	Momento fletor
40	Flecha	Momento fletor	Momento fletor	Momento fletor
L/d_g	Estado limite – VC 530x85			
	$d=1,3d_g$	$d=1,4d_g$	$d=1,5d_g$	$d=1,6d_g$
10	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel
15	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel	Flambagem
20	Vierendeel	Vierendeel	Flambagem	Flambagem
25	Momento fletor	Momento fletor	Flambagem	Flambagem
30	Flecha	Flecha	Momento fletor	Flambagem
35	Flecha	Flecha	Flecha	Flecha
40	Flecha	Flecha	Flecha	Flecha

Obs.: Vigas de diâmetro $0,8d$ e distância entre aberturas igual a $1,3d_o$

A análise dos gráficos da Figura 49 mostra que a altura expandida do perfil celular tem maior influência na diferença percentual quando a razão L/d_g é maior que 25, sendo que maiores valores da altura expandida geram maior resistência ou rigidez (conforme o estado limite que governe). Para razões menores que 25, a variação na altura expandida praticamente não teve influência.

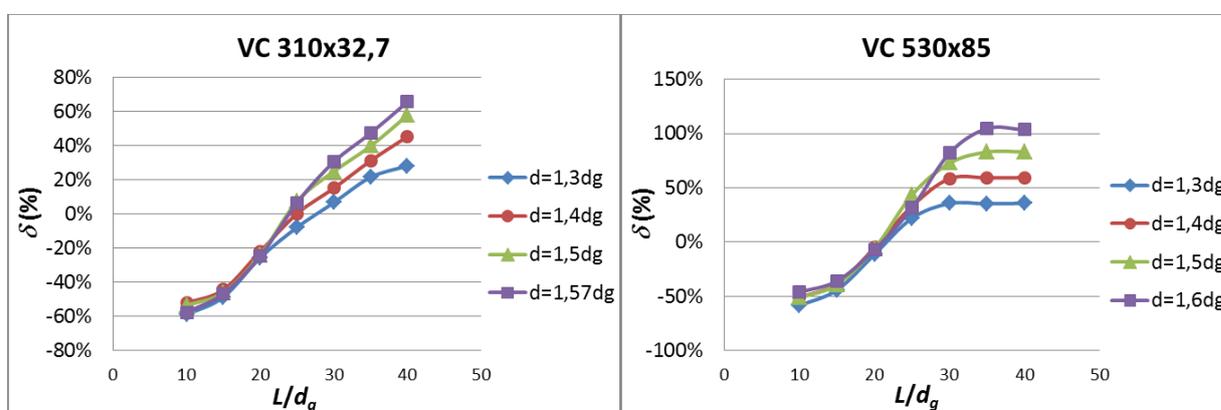


Figura 49 - Influência da altura expandida na diferença percentual entre as cargas últimas da viga mista celular e da viga mista de alma cheia

Através da Tabela 21 também é possível observar que quando o diâmetro da abertura é menor (consequentemente o mecanismo Vierendeel é menos crítico) a flambagem do montante da alma passa a governar o dimensionamento para razões d/d_g menores, uma vez que esse estado limite ocorreu para razão d/d_g igual a 1,4 para a viga mista celular obtida do perfil W 530x85 com razão d_o/d igual a 0,7 e razão s/d_o igual a 1,3 e ocorreu para razão d/d_g igual a 1,5 para a viga mista celular obtida do perfil W 310x32,7 com razão d_o/d igual a 0,73 e razão s/d_o igual a 1,3.

Tabela 21 - Influência do diâmetro da abertura na flambagem do montante da alma

L/d_g	Estado limite – VC 310x32,7 com $d=1,5d_g$		Estado limite – VC 530x85 com $d=1,4d_g$	
	$d_o=0,8d$	$d_o=0,73d$	$d_o=0,8d$	$d_o=0,7d$
10	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel	Flambagem
15	Vierendeel	Flambagem	Vierendeel	Flambagem
20	Vierendeel	Flambagem	Vierendeel	Flambagem
25	Momento fletor	Momento fletor	Momento fletor	Momento fletor
30	Momento fletor	Momento fletor	Flecha	Flecha
35	Momento fletor	Momento fletor	Flecha	Flecha
40	Momento fletor	Momento fletor	Flecha	Flecha

Obs.: Vigas de distância entre aberturas igual a $1,3d_o$

6.4.2.3 Influência da distância entre aberturas na diferença percentual e no estado limite

A Tabela 22 mostra a influência da distância entre aberturas no estado limite que governa o dimensionamento das vigas mistas com perfil celular. Foram selecionados os perfis celulares com altura de $1,3d_g$ e com diâmetro de $0,6d$, pois esses perfis apresentavam menor largura do montante da alma. Pode-se observar que a plastificação por cortante longitudinal ocorre somente para razões L/d_g menores que 25 e em razões s/d_o menores que 1,5.

Tabela 22 - Influência da distância entre aberturas no estado limite das vigas mistas com perfil celular

L/d_g	Estado limite - VC 310x32,7		
	$s=1,3d_o$	$s=1,4d_o$	$s=1,5d_o$
10	Cortante longitudinal	Cortante longitudinal	Vierendeel
15	Cortante longitudinal	Cortante longitudinal	Momento fletor
20	Cortante longitudinal	Momento fletor	Momento fletor
25	Momento fletor	Momento fletor	Momento fletor
30	Momento fletor	Momento fletor	Momento fletor
35	Flecha	Flecha	Flecha
40	Flecha	Flecha	Flecha
L/d_g	Estado limite – VC 530x85		
	$s=1,3d_o$	$s=1,4d_o$	$s=1,5d_o$
10	Cortante longitudinal	Cortante longitudinal	Vierendeel
15	Cortante longitudinal	Cortante longitudinal	Momento fletor
20	Cortante longitudinal	Momento fletor	Momento fletor
25	Flecha	Flecha	Flecha
30	Flecha	Flecha	Flecha
35	Flecha	Flecha	Flecha
40	Flecha	Flecha	Flecha

Obs.: Vigas de diâmetro $0,6d$ e altura expandida igual a $1,3d_g$

A Figura 50 mostra a influência da distância entre aberturas na diferença percentual entre as cargas últimas da viga mista com perfil de celular e da viga mista com alma cheia. Para a avaliação desse parâmetro foi necessário variar o diâmetro das aberturas, já que a distância entre as aberturas varia em função de seu diâmetro.

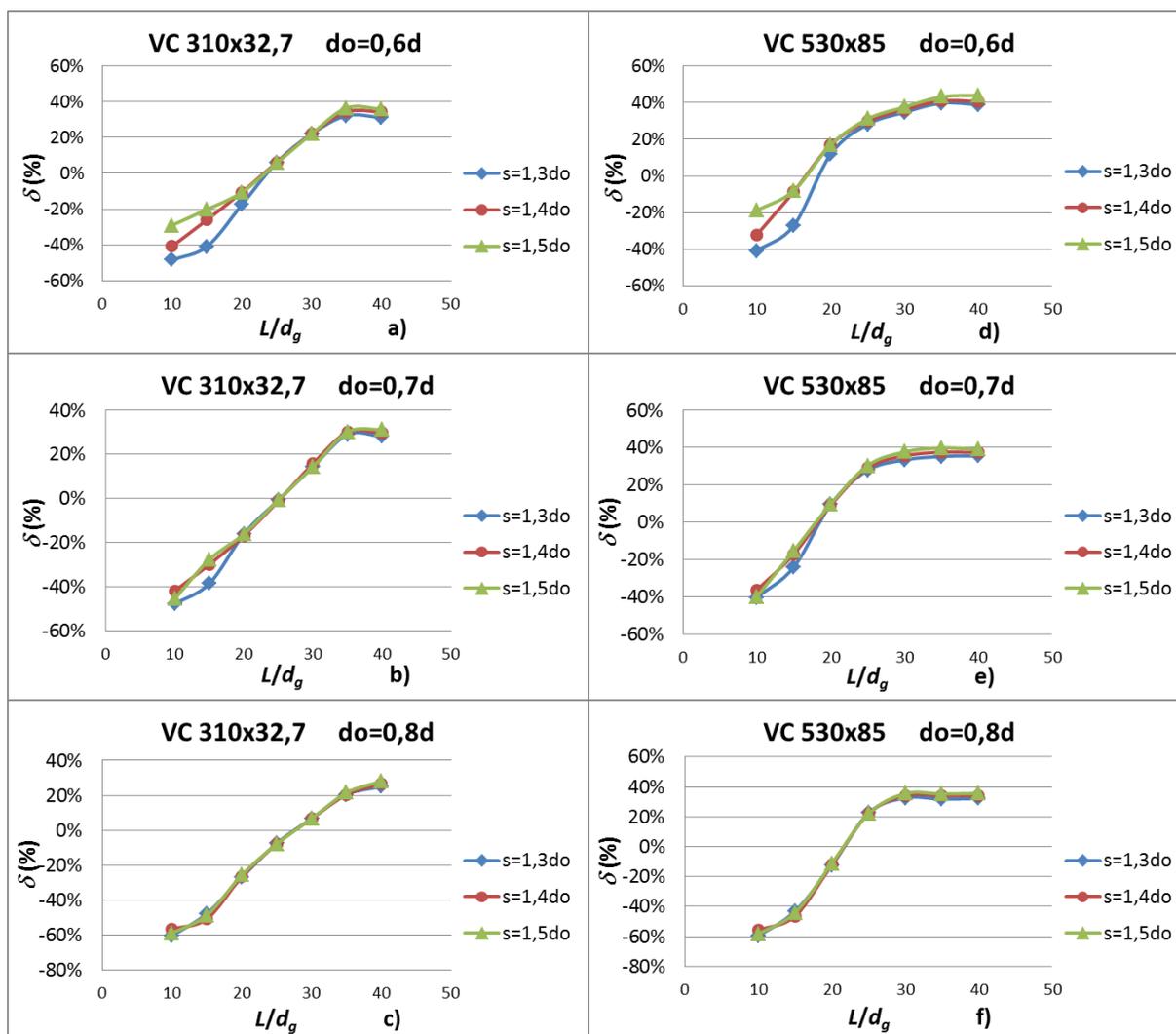


Figura 50 - Influência da distância entre aberturas na diferença percentual entre as cargas últimas da viga mista celular e da viga mista de alma cheia

Nota-se que para razões L/d_g menores que 20, as curvas das Figura 50 (a) a (d) não coincidem devido à influência da largura do montante da alma na resistência da viga (a plastificação por cortante longitudinal governa o dimensionamento). Quando a razão L/d_g é maior que 25, o estado limite que governa é o de flecha excessiva ou de plastificação por momento fletor, que não dependem da distância entre as aberturas. Conforme o diâmetro da abertura aumenta, para razões L/d_g menores que 20, o mecanismo Vierendeel se torna mais crítico e ao mesmo tempo a resistência à plastificação por cortante longitudinal aumenta devido ao aumento na largura do montante da alma, dessa forma, quando a razão d_o/d é igual a 0,8 nota-se que não há influência da distância entre aberturas na carga última (Figura 50 (c) e (f)).

Pela Tabela 23, também é possível observar que a flambagem do montante da alma ocorre quando a razão s/d_o é menor, uma vez que para a viga mista com perfil celular obtido a partir do perfil W 530x85 com razão d/d_g igual 1,5 e d_o/d igual a 0,8 a flambagem do montante da alma ocorre somente quando a razão s/d_o é igual a 1,3.

Tabela 23 - Influência da distância entre aberturas na flambagem do montante da alma

L/d_g	Estado limite – VC 530x85		
	$s=1,3d_o$	$s=1,4d_o$	$s=1,5d_o$
10	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel
15	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel
20	Flambagem	Vierendeel	Vierendeel
25	Flambagem	Momento fletor	Momento fletor
30	Momento fletor	Momento fletor	Momento fletor
35	Flecha	Flecha	Flecha
40	Flecha	Flecha	Flecha

Obs.: Vigas de altura $1,5d_g$ e de diâmetro igual a $0,8d$

6.4.2.4 Análise de desempenho da viga mista com perfil celular

A Tabela 24 apresenta as vigas mistas com perfil celular obtidas a partir do perfil W 310x32 que apresentaram o melhor desempenho (maior carga última 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 24 - Diferença percentual e estado limite predominante nas vigas mistas com perfil celular obtido a partir do perfil W 310x32,7.

L/d_g	$\delta^{(*)}$	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

Pela Tabela 24, 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,

uma vez que para menores comprimentos (menor razão L/d_g), houve a manifestação de estados limites como a flambagem do montante da alma e o mecanismo Vierendeel, resultando em resistências menores que a da viga mista correspondente de alma cheia. 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 0,6 ou 0,73 vezes a altura final e distância entre as aberturas iguais a 1,3 ou 1,5 vezes o diâmetro das aberturas.

A Tabela 25 apresenta as vigas mistas com perfil celular obtidas a partir do perfil W 530x85 que apresentaram o melhor desempenho (maior carga última ou menor flecha, dependendo do estado limite que governa). O estado limite que governou o dimensionamento é mencionado na tabela.

Tabela 25 - Diferença percentual e estado limite predominante nas 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

Pela Tabela 25, pode-se notar que a utilização de vigas mistas com perfil celular obtidas a partir do perfil W 530x85 é vantajosa para razão L/d_g igual ou superior a 20, uma vez que para menores comprimentos (menor razão L/d_g), houve a manifestação de estados limites como o mecanismo Vierendeel e a formação de rótula plástica, resultando em resistências menores que a da viga mista correspondente de alma cheia. 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, 1,4, 1,5 ou 1,6 vezes a altura do perfil original. O diâmetro das aberturas variando de 0,6, 0,63, 0,73 e 0,8 vezes da altura final e a distância entre as aberturas variando de a 1,3 e 1,5 vezes o diâmetro dessas.

A análise do gráfico da Figura 51 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, δ , é maior para o perfil W 530x85, em comparação ao perfil W 310x32,7, 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.

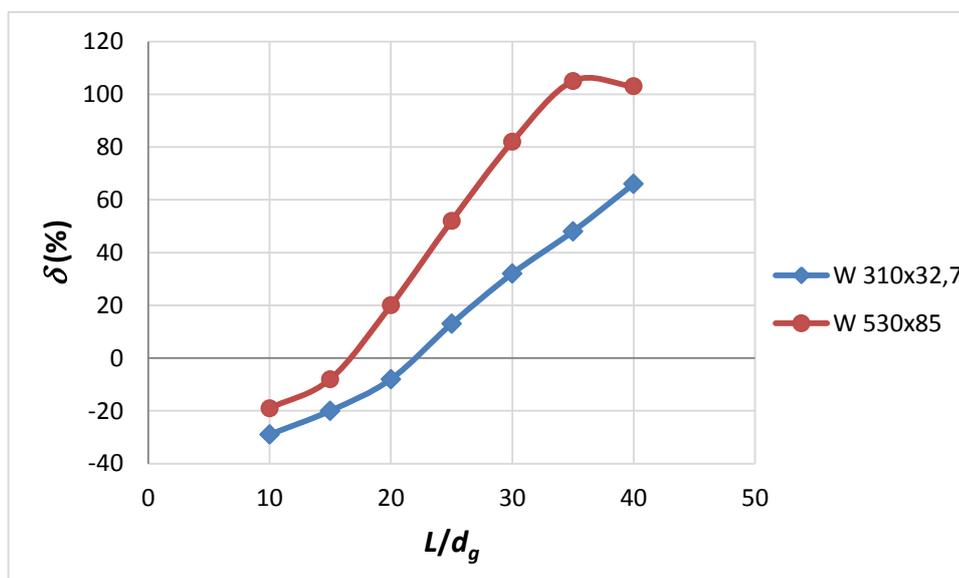


Figura 51 - Comparação das diferenças percentuais entre as cargas últimas da viga mista celular e da viga mista de alma cheia

6.4.3 Metodologia de Ward (1990)

6.4.3.1 Influência do diâmetro das aberturas na diferença percentual e no estado limite

A Tabela 26 mostra a influência do diâmetro das aberturas no estado limite que governa o dimensionamento da viga mista com perfil celular. Para essa análise foram selecionados os perfis celulares com razão s/d_o igual a 1,5, uma vez que para razões menores há maior possibilidade do estado limite ser governado pela largura do montante da alma, e com razão d/d_g igual a 1,3, já que para essa razão foi possível obter uma maior variação do diâmetro das aberturas. Pode-se observar que à medida que o diâmetro da abertura aumenta, o mecanismo Vierendeel governa o

dimensionamento para razões L/d_g maiores, governando o dimensionamento até para razão L/d_g igual a 25 quando a razão d_o/d é igual a 0,8.

Tabela 26 - Influência do diâmetro das aberturas na diferença percentual entre as cargas últimas da viga mista celular e da viga mista de alma cheia

L/d_g	Estado limite – VC 310x32,7		
	$d_o=0,6d$	$d_o=0,7d$	$d_o=0,8d$
10	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel
15	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel
20	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel
25	Flecha	Flecha	Vierendeel
30	Flecha	Flecha	Flecha
35	Flecha	Flecha	Flecha
40	Flecha	Flecha	Flecha
L/d_g	Estado limite – VC 530x85		
	$d_o=0,6d$	$d_o=0,7d$	$d_o=0,8d$
10	Flamb Flex MA	Vierendeel	Vierendeel
15	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel
20	Flecha	Vierendeel	Vierendeel
25	Flecha	Flecha	Vierendeel
30	Flecha	Flecha	Flecha
35	Flecha	Flecha	Flecha
40	Flecha	Flecha	Flecha

Obs.: Vigas de altura $1,3d_g$ e distância entre aberturas igual a $1,5d_o$

A Figura 52 mostra a influência do diâmetro das aberturas na diferença percentual entre as cargas últimas da viga mista celular e da viga mista de alma cheia. A análise dos gráficos da Figura 52 mostra que os perfis celulares com menores diâmetros apresentaram maior resistência ou rigidez (conforme o estado limite que governe) em todas as razões L/d_g estudadas. Também é possível observar uma maior influência do diâmetro das aberturas quando a razão L/d_g é menor que 25.

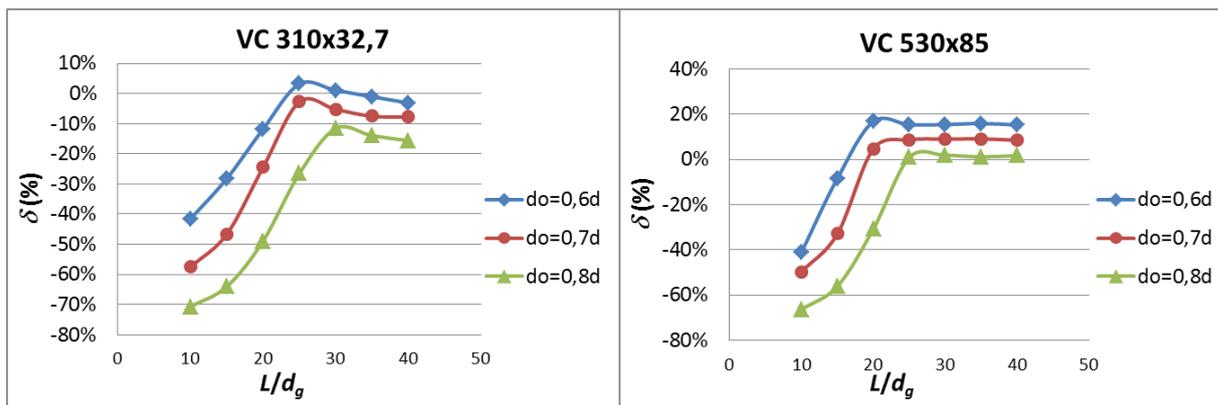


Figura 52 - Influência do diâmetro das aberturas na diferença percentual entre as cargas últimas da viga mista celular e da viga mista de alma cheia

6.4.3.2 Influência da altura expandida na diferença percentual e no estado limite

A Tabela 27 mostra a influência da altura expandida no estado limite que governa o dimensionamento de vigas mistas com perfil celular. Foram selecionados os perfis celulares com razão d/d_0 igual a 0,8 e com razão s/d_0 igual a 1,3, pois para essas razões foi possível obter uma maior variação da altura expandida. É possível observar que para a viga mista com perfil celular obtido do perfil W 310x32,7, quando a altura expandida aumenta, para razão L/d_g igual a 30, a flecha excessiva deixa de ser o estado limite crítico e o mecanismo Vierendeel passa a governar o dimensionamento. Para a viga mista com perfil celular obtido do perfil W 530x85 a razão d/d_0 não influencia no estado limite.

Tabela 27 - Influência do diâmetro das aberturas no estado limite das vigas mistas com perfil celular

L/d_g	Estado limite – VC 310x32,7			
	$d=1,3d_g$	$d=1,4d_g$	$d=1,5d_g$	$d=1,57d_g$
10	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel
15	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel
20	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel
25	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel
30	Flecha	Flecha	Vierendeel	Vierendeel
35	Flecha	Flecha	Flecha	Flecha
40	Flecha	Flecha	Flecha	Flecha
L/d_g	Estado limite – VC 530x85			
	$d=1,3d_g$	$d=1,4d_g$	$d=1,5d_g$	$d=1,6d_g$
10	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel
15	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel
20	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel
25	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel	Vierendeel
30	Flecha	Flecha	Flecha	Flecha
35	Flecha	Flecha	Flecha	Flecha
40	Flecha	Flecha	Flecha	Flecha

Obs.: Vigas de diâmetro $0,8d$ e distância entre aberturas igual a $1,3d_0$

A análise dos gráficos da Figura 53 mostra que a altura do perfil celular tem maior influência na diferença percentual entre as cargas últimas da viga mista celular e da viga mista de alma cheia quando a razão L/d_g é maior que 25.

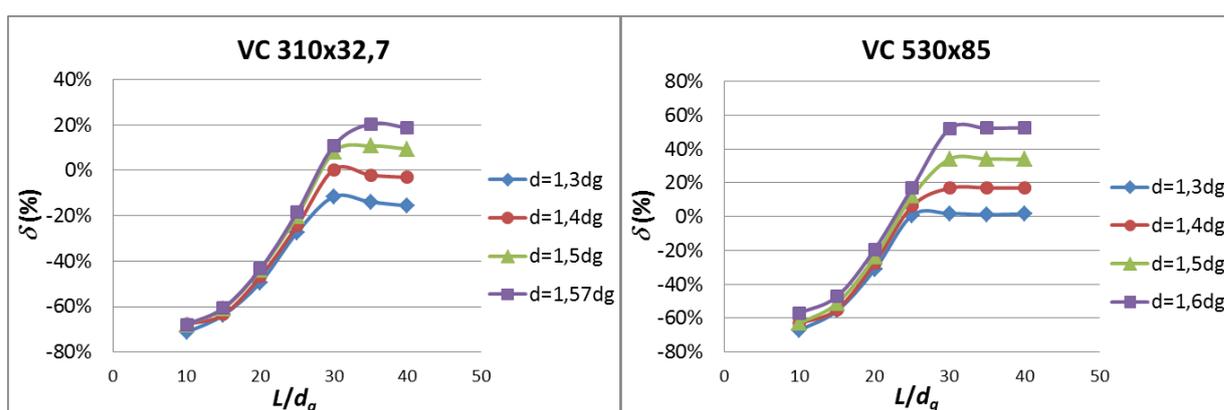


Figura 53 - Influência da altura expandida na diferença percentual entre as cargas últimas da viga mista celular e da viga mista de alma cheia

6.4.3.3 Influência da distância entre aberturas na diferença percentual e no estado limite

A Tabela 28 mostra a influência da distância entre aberturas no estado limite que governa o dimensionamento das vigas mistas com perfil celular. Foram selecionados os perfis celulares com altura de $1,3d_g$ e com diâmetro das aberturas de $0,6d$, pois esses perfis apresentavam menor largura do montante da alma. Pode-se observar que para a viga mista celular com perfil W 310x32,7, a flambagem e flexão do montante da alma ocorre somente para razões L/d_g menores que 30 e em razões s/d_o menores que 1,5. Na viga mista celular com perfil W 530x85, a flambagem e flexão do montante da alma ocorre somente para razões L/d_g menores que 25 quando a razão s/d_o é menor ou igual a 1,4 e ocorre somente para razão L/d_g igual a 10 quando a razão s/d_o é igual a 1,5.

Tabela 28 - Influência da distância entre aberturas no estado limite das vigas mistas com perfil celular

L/d_g	Estado limite - VC 310x32,7		
	$s=1,3d_o$	$s=1,4d_o$	$s=1,5d_o$
10	Flamb Flex MA	Flamb Flex MA	Vierendeel
15	Flamb Flex MA	Flamb Flex MA	Vierendeel
20	Flamb Flex MA	Flamb Flex MA	Vierendeel
25	Flamb Flex MA	Flecha	Flecha
30	Flecha	Flecha	Flecha
35	Flecha	Flecha	Flecha
40	Flecha	Flecha	Flecha
L/d_g	Estado limite - VC 530x85		
	$s=1,3d_o$	$s=1,4d_o$	$s=1,5d_o$
10	Flamb Flex MA	Flamb Flex MA	Flamb Flex MA
15	Flamb Flex MA	Flamb Flex MA	Vierendeel
20	Flamb Flex MA	Flamb Flex MA	Flecha
25	Flecha	Flecha	Flecha
30	Flecha	Flecha	Flecha
35	Flecha	Flecha	Flecha
40	Flecha	Flecha	Flecha

Obs.: Vigas de diâmetro $0,8d$ e distância entre aberturas igual a $1,3d_o$

A Figura 54 mostra a influência da distância entre aberturas diferença percentual entre as cargas últimas da viga mista celular e da viga mista de alma cheia. Para a avaliação desse parâmetro foi necessário variar o diâmetro das aberturas, já que a distância entre as aberturas varia em função de seu diâmetro.

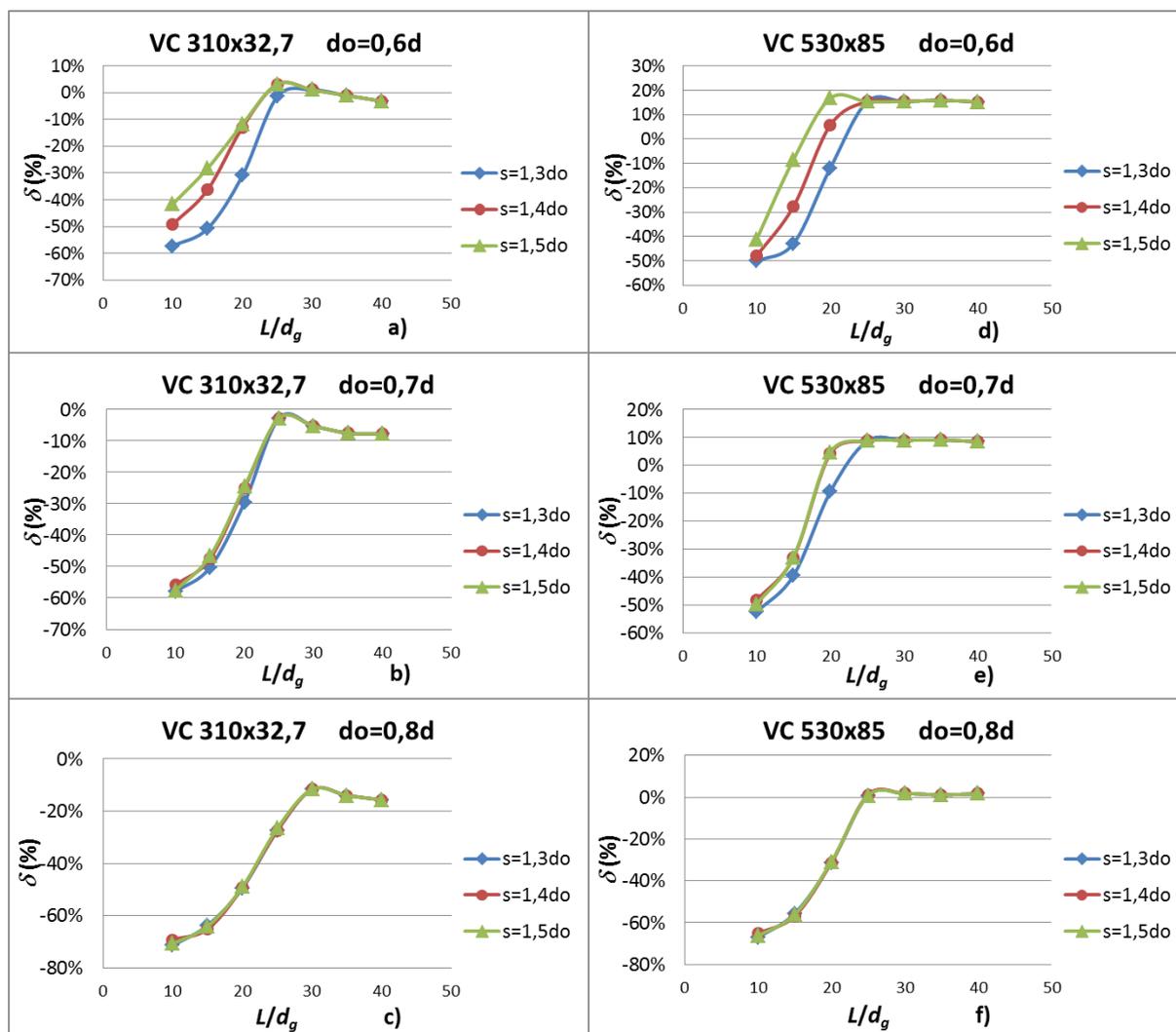


Figura 54 - Influência da distância entre aberturas diferença percentual entre as cargas últimas da viga mista celular e da viga mista de alma cheia

Nota-se que para razões L/d_g menores que 20, as curvas das Figura 50 (a) a (d) não coincidem devido à influência da largura do montante da alma na resistência à flambagem e flexão do montante da alma, quando a razão L/d_g é maior que 25 o estado limite que governa é o de flecha excessiva. Conforme o diâmetro da abertura aumenta, para razões L/d_g menores que 25, o mecanismo Vierendeel se torna mais crítico e ao mesmo tempo a resistência à flambagem e flexão do montante da alma aumenta devido ao aumento na largura do montante da alma, dessa forma, quando a razão d_o/d é igual a 0,8 pode-se notar que não há influência da distância entre aberturas na carga última (Figura 48 (c) e (f)).

6.4.3.4 Análise de desempenho da viga mista com perfil celular

A Tabela 29 apresenta as vigas mistas com perfil celular obtidas a partir do perfil W 310x32 que apresentaram o melhor desempenho (maior carga última 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 29 – Diferença percentual e estado limite predominante nas vigas mistas com perfil celular obtido a partir do perfil W 310x32,7

L/d_g	$\delta^{(*)}$	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

Pela Tabela 29, 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, uma vez que para menores comprimentos (menor razão L/d_g), houve a manifestação de estados limites como o mecanismo Vierendeel resultando em resistências menores que a da viga mista correspondente de alma cheia. 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 1,57 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 de 1,3 ou 1,5 vezes o diâmetro dessas.

A Tabela 30 apresenta as vigas mistas com perfil celular obtidas a partir do perfil W 530x85 que apresentaram o melhor desempenho (maior carga última ou menor flecha, dependendo do estado limite que governa). O estado limite que governou o dimensionamento é mencionado na tabela.

Tabela 30 – Diferença percentual e estado limite predominante nas vigas mistas com perfil celular obtido a partir do perfil W 530x85

L/d_g	$\delta^{(*)}$	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

Pela Tabela 30, 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, uma vez que para menores comprimentos (menor razão L/d_g), houve a manifestação de estados limites como a flambagem do montante da alma e o mecanismo Vierendeel resultando em resistências menores que a da viga mista correspondente de alma cheia. 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 do gráfico da Figura 55 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, δ , é maior para o perfil W 530 x 85, em comparação ao perfil W 310x32,7, 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.

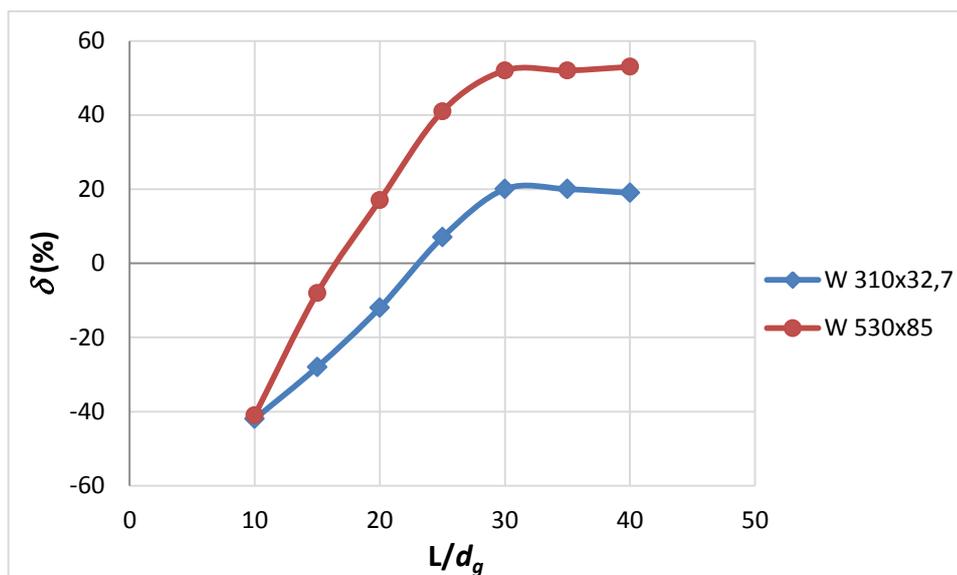


Figura 55 - Comparação das diferenças percentuais entre as cargas últimas da viga mista celular e da viga mista de alma cheia

6.4.4 Comparação entre as metodologias de Lawson e Hicks (2011) e de Ward (1990)

A Figura 56 mostra a diferença percentual obtida por ambas as metodologias, Ward (1990) e Lawson e Hicks (2011). Foram selecionados os perfis celulares com razão d/d_g igual a 1,3, razão d_o/d igual a 0,8 e razão s/d_o igual a 1,5, uma vez que para essas vigas foi observado que para razão L/d_g menor ou igual a 20 ocorre o mecanismo Vierendeel para ambas as metodologias. A análise do gráfico da Figura 56 mostra que, na metodologia de Ward (1990), a verificação do mecanismo Vierendeel apresenta resultados mais conservadores. Também é possível observar que o procedimento para a determinação da flecha dado por Ward (1990) gera resultados mais conservadores, uma vez que para razão L/d_g maior que 30 esse estado limite governou o dimensionamento.

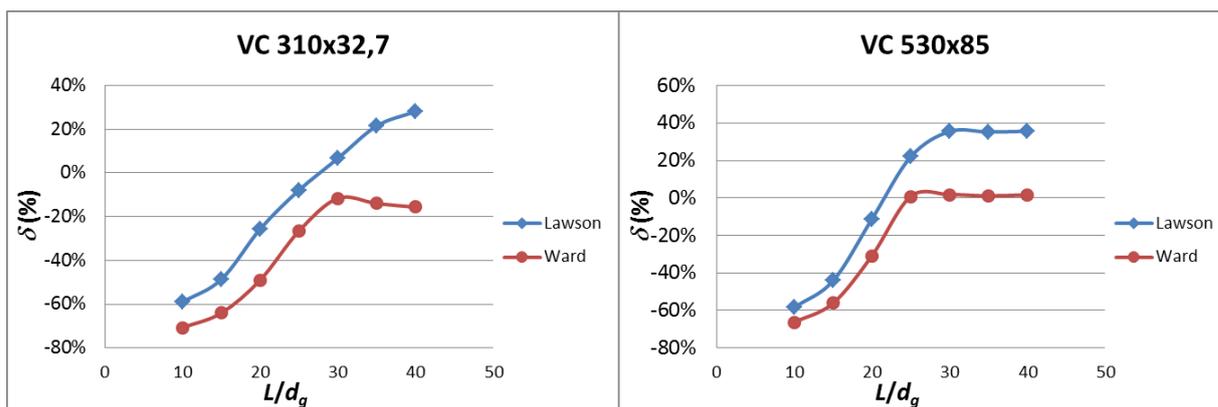


Figura 56 - Comparação entre as metodologias para razão d/d_g igual a 1,3, razão d_o/d igual a 0,8 e razão s/d_o igual a 1,5

A Figura 57 mostra a diferença percentual obtida por ambas as metodologias, Ward (1990) e Lawson e Hicks (2011). Foram selecionados os perfis celulares com razão d/d_g igual a 1,3, razão d_o/d igual a 0,6 e razão s/d_o igual a 1,3, uma vez que para essas vigas foi observado que para razão L/d_g menor ou igual a 20 o estado limite é governado pela largura do montante da alma. Comparando as Tabelas 21 e 27 é possível observar que para as mesmas características geométricas, as metodologias apresentaram estados limites diferentes, visto que para a metodologia de Ward (1990) ocorreu a flexão e flambagem do montante da alma e para a metodologia de Lawson e Hicks (2011) ocorreu a plastificação por cortante longitudinal. A análise do gráfico da Figura 57 mostra que a verificação da flambagem e flexão do montante da alma apresenta resultados mais conservadores.

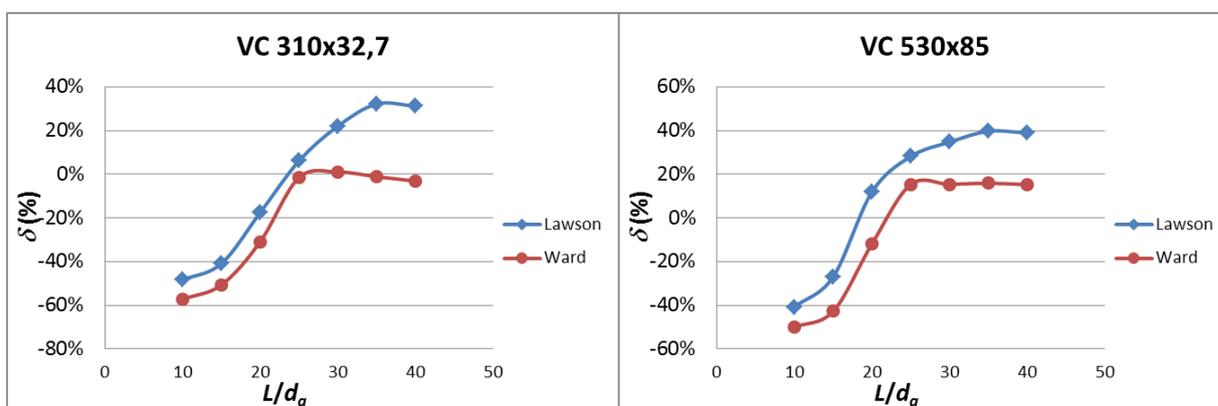


Figura 57 - Comparação entre as metodologias para razão d/d_g igual a 1,3, razão d_o/d igual a 0,6 e razão s/d_o igual a 1,3

A Figura 58 mostra a diferença percentual obtida da viga mista celular com perfil W 530 x 85 por ambas as metodologias, Ward (1990) e Lawson e Hicks (2011). Foram

selecionados os perfis celulares com razão d/d_g igual a 1,4, razão d_o/d igual a 0,7 e razão s/d_o igual a 1,3, uma vez que para essas vigas foi observado que para razão L/d_g menor ou igual a 20 pela metodologia de Ward (1990) ocorreu a flambagem e flexão do montante da alma e pela metodologia de Lawson e Hicks (2011) ocorreu a flambagem do montante da alma. A análise do gráfico da Figura 58 mostra que a verificação da flambagem e flexão do montante da alma da metodologia de Ward (1990) apresenta resultados mais conservadores.

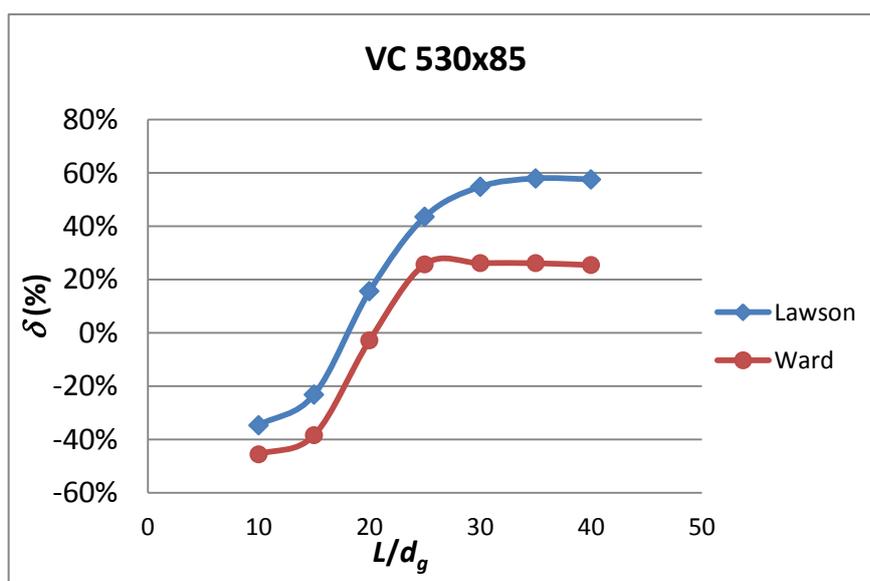


Figura 58 - Comparação entre as metodologias para razão d/d_g igual a 1,4, razão d_o/d igual a 0,7 e razão s/d_o igual a 1,3

7 CONCLUSÕES

7.1 Sobre o trabalho realizado

O objetivo principal deste trabalho foi apresentar metodologias e desenvolver ferramentas computacionais para o dimensionamento de vigas de aço e vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares. A adequação das metodologias de dimensionamento em relação ao comportamento estrutural dessas vigas foi verificada e então, exemplos numéricos foram implementados.

Duas metodologias de dimensionamento de vigas de aço e vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares foram estudadas: a metodologia de Ward (1990) e a metodologia de Lawson e Hicks (2011). Ambas as metodologias utilizavam as prescrições das normas europeias quando se refere a estados limites e resistências de cálculo já consagradas. Neste trabalho, procedeu-se a adaptação das metodologias de acordo com a ABNT NBR 8800:2008.

O programa computacional para o dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto com perfis de aço celulares foi desenvolvido em MATLAB (2010) abordando ambas as metodologias supracitadas. A aferição do programa computacional foi feita por meio de dois exemplos numéricos disponíveis na literatura.

É importante ressaltar que não existe nenhuma publicação nacional que apresente exemplos práticos com a aplicação de metodologias para o dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto com perfis de aço celulares, o que contribui para que o seu uso seja limitado. Neste trabalho são apresentados dois exemplos práticos, um para cada metodologia estudada, o que facilita o entendimento dos procedimentos de cálculo dessas vigas.

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.* (2007) e de Müller *et al.* (2006). Foi observado que tanto a metodologia de Lawson e Hicks (2011), quanto a metodologia de Ward (1990), apresentaram resultados um pouco conservadores, sendo que a

metodologia de Lawson e Hicks (2011) 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, ou seja:

- 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 $L/d \geq 25$;
- Para vãos menores (razão entre vão e altura, L/d , menor ou igual a 15), observou-se pelas duas metodologias que a utilização de vigas mistas com perfil de aço celular não é vantajosa, pois essas suportam carregamentos menores que a viga mista com perfil de aço original;
- 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, δ , foi maior para o perfil W 530 x 85 em todas as razões L/d_g ;
- Pela metodologia de Lawson e Hicks (2011), observou-se que: o mecanismo Vierendeel governa o dimensionamento principalmente quando o diâmetro da abertura é grande (razão d_o/d igual a 0,8) para razão L/d_g menor ou igual a 20; a plastificação por esforço cortante longitudinal governa o dimensionamento principalmente quando a distância entre aberturas é pequena (razão s/d_o igual a 1,3) e o diâmetro é pequeno (razão d_o/d igual a 0,6) para razão L/d_g menor ou igual a 20; a flambagem do montante da alma governa o dimensionamento principalmente quando a altura expandida é maior (razão d/d_g maior ou igual a 1,5) e a distância entre aberturas é pequena (razão s/d_o igual a 1,3) e pode ocorrer até para razão L/d_g igual a 30.

A plastificação por momento fletor e a flecha excessiva governam o dimensionamento principalmente para razão L/d_g maior que 25;

- Pela metodologia de Ward (1990), nos casos estudados, ocorreram apenas três estados limites: o mecanismo Vierendeel; a flambagem e flexão do montante da alma; e a flecha excessiva. Observou-se que: o mecanismo Vierendeel governa o dimensionamento principalmente quando o diâmetro da abertura é grande (razão d_o/d igual a 0,8) para razão L/d_g menor ou igual a 20; a flambagem e flexão do montante da alma governa o dimensionamento principalmente quando a distância entre aberturas é pequena (razão s/d_o igual a 1,3) e o diâmetro é pequeno (razão d_o/d igual a 0,6) para razão L/d_g menor ou igual a 20;
- Pode-se observar que em ambas as metodologias, quase que praticamente em todos os casos estudados, quem governa o dimensionamento em razões L/d_g maiores que 25 é a plastificação por momento fletor ou a flecha excessiva. Portanto, para intervalos práticos de vãos em vigas mistas, não houve a manifestação de estados limites específicos aos perfis celulares, o que demonstra a viabilidade da utilização desses perfis em vigas mistas de aço e concreto;
- Os procedimentos propostos por Ward (1990) 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 (2011) fornecesse cargas últimas maiores em todos os casos analisados.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com base no que foi analisado e concluído ao longo desta dissertação, podem ser feitas algumas sugestões de desenvolvimentos futuros relacionados ao tema, as quais são apresentadas no decorrer deste item.

Acrescentar no programa de cálculo desenvolvido:

- O dimensionamento de vigas mistas assimétricas com perfil celular;
- Considerar outros tipos de conexão de cisalhamento;

- Para o dimensionamento da viga de aço celular, incluir a verificação à flambagem lateral com torção.

Realizar estudo paramétrico com o auxílio do programa desenvolvido, abordando:

- Vigas de aço com perfil celular;
- Vigas mistas com perfil celular e interação parcial;
- Considerar no estudo paramétrico carregamentos concentrados e construção não escorada.

Desenvolver modelos numéricos que retratem as vigas analisadas nesse trabalho para uma avaliação adicional de ambas as metodologias abordadas.

8 REFERÊNCIAS

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.

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*, v. XXIX, p. 7255-7271, 2010.

BAKE, S. Behaviour of cellular beams and composite floor at ambient and elevated temperature. The University of Manchester, United Kingdom, 2010.

CHUNG, K. F.; LIU, T. C. H.; Ko, A. C. H. Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings, *Journal of Constructional Steel Research*, v. 57, p. 467-490, 2000.

CHUNG, K. F.; LIU, C. H.; Ko, A. C. H. Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: an empirical design using a general moment-shear interaction curve, *Journal of Constructional Steel Research*, v. 59, p. 1177-1200, 2003.

CIMADEVILA, F. J. E.; GUTIÉRREZ, E. M.; RODRÍGUEZ, J. A. V. Vigas alveoladas. Vol 3. Madri: A Coruña: Biblioteca Técnica Universitária; 2000.

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

DURIF, S.; BOUCHAÏR, A.; VASSART, O. Experimental tests and numerical modeling of cellular beams with sinusoidal openings. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 82, p. 72-97, 2013.

ERDAL, F.; DOAN, E.; SAKA, M. P. Optimum design of cellular beams using harmony search and particle swarm optimizers. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 67, p. 237-247, 2011.

FERRARI, G. A. Simulação numérica do comportamento estrutural de vigas alveolares mistas de aço e concreto. Dissertação de Mestrado, Viçosa: UFV, 2013.

GRÜMBAUER, J. <http://www.grunbauer.nl>, acessado em 2014.

KERDAL, D.; NETHERCOT D.A. Failure modes for castellated beams. *Journal of Constructional Steel Research*. p. 295-315; 1984.

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

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.

LAWSON, R. M.; HICKS, S. J.; SIMMS W.I. - Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 62, p.614-629, 2006.

LAWSON, R. M.; SAVERIRAJAN, A.H.A. Simplified elasto-plastic analysis of composite beams and cellular beams to Eurocode 4. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 67, p. 1426-1434, 2011.

MÜLLER, C.; OPPE, M. Conceptual design and design examples for multi-storey buildings. Disponível em: http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/WS2008/EN1993_6_Mueller.pdf. Acessado em 2014.

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.

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.

OLIVEIRA, L. B. Procedimentos para definição das características geométricas de vigas alveolares de aço para sistemas de piso e de cobertura. Dissertação de Mestrado, Viçosa: UFV, 2012.

OLIVEIRA, T. C. P. Vigas alveoladas: metodologias de dimensionamento. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2012.

PANEDPOJAMAN P.; THEPCHATRI T.; LIMKATANYU, S. Novel design equations for shear strength of local web-post buckling in cellular beams. *Thin-Walled Structures*, v. 76, p. 92-104, 2014.

PINHO, F. O. Vigas casteladas e celulares. Estruturas metálicas com mais resistência, menos deformação e redução de peso. www.arcorweb.com.br. 2009.

QUEIROZ, G.; PIMENTA, R. J.; DA MATA, L. A. C. Elementos das estruturas mistas aço – concreto. *O Lutador*, Belo Horizonte, 2001.

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.

SWEEDAN, A. M. I. Elastic lateral stability of I-shaped cellular steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 67, p. 151-163, 2011.

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.

VERÍSSIMO, G. S.; VIEIRA, W. B.; SILVEIRA, E. G.; RIBEIRO, J. C. L.; PAES, J. L. R.; BEZERRA, E. M.; CASTRO e SILVA, A. L. R.; FAKURY, R. H. Dimensionamento

de vigas alveolares de aço. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, 5., 2012, São Paulo.

VIEIRA, W. B. Simulação numérica do comportamento estrutural de vigas casteladas de aço com ênfase na flambagem do montante de alma. Dissertação de Mestrado, Viçosa: UFV, 2011.

VIEIRA, H. C.; CASTRO e SILVA, A. L. R.; FAKURY, R. H. Análise não linear da flambagem do montante da alma de vigas de aço celulares. IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTACIONAL METHODS IN ENGINEERING, XXXIV, 2013, Pirenópolis.

WARD, J. K. Design of composite and non-composite cellular beams, The Steel Construction Institute, 1990.

YOST, J. R.; DINEHART, D. W.; HOFFMAN, R. M.; GROSS, S. P.; CALLOW M. Experimental and analytical investigation of service-load stresses in cellular beams. Journal of Engineering Mechanics, p. 953-962, 2012.

APÊNDICE A – Resultados do estudo paramétrico

Nesse apêndice são apresentados as cargas últimas e os estados limites associados para cada uma das vigas analisadas no estudo paramétrico.

Resultados do estudo paramétrico obtido pela metodologia de Lawson e Hicks (2011) para a viga mista celular com perfil W 310x32,7

Designação	q (kN/m)	Estado Limite
VC 310-1,3-0,6-1,3-10	86,7	Cortante longitudinal
VC 310-1,3-0,6-1,3-15	50,6	Cortante longitudinal
VC 310-1,3-0,6-1,3-20	35,7	Cortante longitudinal
VC 310-1,3-0,6-1,3-25	25	Momento fletor
VC 310-1,3-0,6-1,3-30	17,4	Momento fletor
VC 310-1,3-0,6-1,3-35	12,3	Flecha
VC 310-1,3-0,6-1,3-40	8,4	Flecha
VC 310-1,3-0,6-1,4-10	99,6	Cortante longitudinal
VC 310-1,3-0,6-1,4-15	63,4	Cortante longitudinal
VC 310-1,3-0,6-1,4-20	38,7	Momento fletor
VC 310-1,3-0,6-1,4-25	25	Momento fletor
VC 310-1,3-0,6-1,4-30	17,4	Momento fletor
VC 310-1,3-0,6-1,4-35	12,5	Flecha
VC 310-1,3-0,6-1,4-40	8,6	Flecha
VC 310-1,3-0,6-1,5-10	119,4	Vierendeel
VC 310-1,3-0,6-1,5-15	68,4	Momento fletor
VC 310-1,3-0,6-1,5-20	38,7	Momento fletor
VC 310-1,3-0,6-1,5-25	24,9	Momento fletor
VC 310-1,3-0,6-1,5-30	17,4	Momento fletor
VC 310-1,3-0,6-1,5-35	12,7	Flecha
VC 310-1,3-0,6-1,5-40	8,7	Flecha
VC 310-1,3-0,7-1,3-10	87,6	Cortante longitudinal
VC 310-1,3-0,7-1,3-15	52,6	Cortante longitudinal
VC 310-1,3-0,7-1,3-20	36,3	Momento fletor
VC 310-1,3-0,7-1,3-25	23,4	Momento fletor
VC 310-1,3-0,7-1,3-30	16,3	Momento fletor
VC 310-1,3-0,7-1,3-35	12	Flecha
VC 310-1,3-0,7-1,3-40	8,2	Flecha
VC 310-1,3-0,7-1,4-10	97,7	Vierendeel
VC 310-1,3-0,7-1,4-15	60	Vierendeel
VC 310-1,3-0,7-1,4-20	36	Momento fletor
VC 310-1,3-0,7-1,4-25	23,3	Momento fletor
VC 310-1,3-0,7-1,4-30	16,5	Momento fletor

VC 310-1,3-0,7-1,4-35	12,1	Momento fletor
VC 310-1,3-0,7-1,4-40	8,3	Flecha
VC 310-1,3-0,7-1,5-10	91,8	Vierendeel
VC 310-1,3-0,7-1,5-15	61,9	Vierendeel
VC 310-1,3-0,7-1,5-20	36,3	Momento fletor
VC 310-1,3-0,7-1,5-25	23,4	Momento fletor
VC 310-1,3-0,7-1,5-30	16,3	Momento fletor
VC 310-1,3-0,7-1,5-35	12,1	Momento fletor
VC 310-1,3-0,7-1,5-40	8,4	Flecha
VC 310-1,3-0,8-1,3-10	66,6	Vierendeel
VC 310-1,3-0,8-1,3-15	44,8	Vierendeel
VC 310-1,3-0,8-1,3-20	31,6	Vierendeel
VC 310-1,3-0,8-1,3-25	21,8	Momento fletor
VC 310-1,3-0,8-1,3-30	15,2	Momento fletor
VC 310-1,3-0,8-1,3-35	11,2	Momento fletor
VC 310-1,3-0,8-1,3-40	8	Flecha
VC 310-1,3-0,8-1,4-10	72,9	Vierendeel
VC 310-1,3-0,8-1,4-15	42,2	Vierendeel
VC 310-1,3-0,8-1,4-20	31,8	Vierendeel
VC 310-1,3-0,8-1,4-25	21,7	Momento fletor
VC 310-1,3-0,8-1,4-30	15,2	Momento fletor
VC 310-1,3-0,8-1,4-35	11,2	Momento fletor
VC 310-1,3-0,8-1,4-40	8,1	Flecha
VC 310-1,3-0,8-1,5-10	69	Vierendeel
VC 310-1,3-0,8-1,5-15	44	Vierendeel
VC 310-1,3-0,8-1,5-20	32,2	Vierendeel
VC 310-1,3-0,8-1,5-25	21,7	Momento fletor
VC 310-1,3-0,8-1,5-30	15,2	Momento fletor
VC 310-1,3-0,8-1,5-35	11,3	Momento fletor
VC 310-1,3-0,8-1,5-40	8,2	Flecha
VC 310-1,4-0,63-1,3-10	95,1	Cortante longitudinal
VC 310-1,4-0,63-1,3-15	57,1	Cortante longitudinal
VC 310-1,4-0,63-1,3-20	38,1	Cortante longitudinal
VC 310-1,4-0,63-1,3-25	26,5	Momento fletor
VC 310-1,4-0,63-1,3-30	18,6	Momento fletor
VC 310-1,4-0,63-1,3-35	13,7	Momento fletor
VC 310-1,4-0,63-1,3-40	9,7	Flecha
VC 310-1,4-0,7-1,3-10	102,1	Vierendeel
VC 310-1,4-0,7-1,3-15	57,5	Cortante longitudinal
VC 310-1,4-0,7-1,3-20	39,1	Momento fletor
VC 310-1,4-0,7-1,3-25	25,3	Momento fletor
VC 310-1,4-0,7-1,3-30	17,7	Momento fletor
VC 310-1,4-0,7-1,3-35	13,1	Momento fletor
VC 310-1,4-0,7-1,3-40	9,4	Flecha
VC 310-1,4-0,7-1,4-10	95,5	Vierendeel

VC 310-1,4-0,7-1,4-15	64,5	Vierendeel
VC 310-1,4-0,7-1,4-20	39,4	Momento fletor
VC 310-1,4-0,7-1,4-25	25,4	Momento fletor
VC 310-1,4-0,7-1,4-30	17,9	Momento fletor
VC 310-1,4-0,7-1,4-35	13,1	Momento fletor
VC 310-1,4-0,7-1,4-40	9,6	Flecha
VC 310-1,4-0,7-1,5-10	105,6	Vierendeel
VC 310-1,4-0,7-1,5-15	60,7	Vierendeel
VC 310-1,4-0,7-1,5-20	39,1	Momento fletor
VC 310-1,4-0,7-1,5-25	25,4	Momento fletor
VC 310-1,4-0,7-1,5-30	17,8	Momento fletor
VC 310-1,4-0,7-1,5-35	13,1	Momento fletor
VC 310-1,4-0,7-1,5-40	9,8	Flecha
VC 310-1,4-0,8-1,3-10	75,3	Vierendeel
VC 310-1,4-0,8-1,3-15	43,4	Vierendeel
VC 310-1,4-0,8-1,3-20	32,7	Vierendeel
VC 310-1,4-0,8-1,3-25	23,5	Momento fletor
VC 310-1,4-0,8-1,3-30	16,5	Momento fletor
VC 310-1,4-0,8-1,3-35	12,1	Momento fletor
VC 310-1,4-0,8-1,3-40	9,2	Flecha
VC 310-1,4-0,8-1,4-10	70,6	Vierendeel
VC 310-1,4-0,8-1,4-15	45,1	Vierendeel
VC 310-1,4-0,8-1,4-20	33,1	Vierendeel
VC 310-1,4-0,8-1,4-25	23,5	Momento fletor
VC 310-1,4-0,8-1,4-30	16,5	Momento fletor
VC 310-1,4-0,8-1,4-35	12,2	Momento fletor
VC 310-1,4-0,8-1,4-40	9,3	Flecha
VC 310-1,4-0,8-1,5-10	80,5	Vierendeel
VC 310-1,4-0,8-1,5-15	47,7	Vierendeel
VC 310-1,4-0,8-1,5-20	33,8	Vierendeel
VC 310-1,4-0,8-1,5-25	23,6	Momento fletor
VC 310-1,4-0,8-1,5-30	16,4	Momento fletor
VC 310-1,4-0,8-1,5-35	12,2	Momento fletor
VC 310-1,4-0,8-1,5-40	9,3	Momento fletor
VC 310-1,5-0,73-1,3-10	103	Vierendeel
VC 310-1,5-0,73-1,3-15	55	Flambagem
VC 310-1,5-0,73-1,3-20	40	Flambagem
VC 310-1,5-0,73-1,3-25	26,7	Momento fletor
VC 310-1,5-0,73-1,3-30	18,8	Momento fletor
VC 310-1,5-0,73-1,3-35	13,8	Momento fletor
VC 310-1,5-0,73-1,3-40	10,6	Momento fletor
VC 310-1,5-0,8-1,3-10	72,9	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,3-15	46,6	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,3-20	34,3	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,3-25	25,3	Momento fletor

VC 310-1,5-0,8-1,3-30	17,7	Momento fletor
VC 310-1,5-0,8-1,3-35	13,1	Momento fletor
VC 310-1,5-0,8-1,3-40	10	Momento fletor
VC 310-1,5-0,8-1,4-10	82,9	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,4-15	49,1	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,4-20	34,9	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,4-25	25,4	Momento fletor
VC 310-1,5-0,8-1,4-30	17,7	Momento fletor
VC 310-1,5-0,8-1,4-35	13,1	Momento fletor
VC 310-1,5-0,8-1,4-40	10	Momento fletor
VC 310-1,5-0,8-1,5-10	78,2	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,5-15	46,3	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,5-20	32,9	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,5-25	25,3	Momento fletor
VC 310-1,5-0,8-1,5-30	17,8	Momento fletor
VC 310-1,5-0,8-1,5-35	13	Momento fletor
VC 310-1,5-0,8-1,5-40	10,1	Momento fletor
VC 310-1,57-0,8-1,3-10	71,4	Vierendeel
VC 310-1,57-0,8-1,3-15	45,7	Vierendeel
VC 310-1,57-0,8-1,3-20	32,6	Flambagem
VC 310-1,57-0,8-1,3-25	25,1	Flambagem
VC 310-1,57-0,8-1,3-30	18,6	Momento fletor
VC 310-1,57-0,8-1,3-35	13,7	Momento fletor
VC 310-1,57-0,8-1,3-40	10,6	Momento fletor

Resultados do estudo paramétrico obtido pela metodologia de Lawson e Hicks (2011) para a viga mista celular com perfil W 530x85

Designação	q (kN/m)	Estado Limite
VC 530-1,3-0,6-1,3-10	123,4	Cortante longitudinal
VC 530-1,3-0,6-1,3-15	72	Cortante longitudinal
VC 530-1,3-0,6-1,3-20	50,8	Cortante longitudinal
VC 530-1,3-0,6-1,3-25	30,9	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,3-30	18,8	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,3-35	12,3	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,3-40	8,2	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,4-10	141,8	Cortante longitudinal
VC 530-1,3-0,6-1,4-15	90,3	Cortante longitudinal
VC 530-1,3-0,6-1,4-20	53,1	Momento fletor
VC 530-1,3-0,6-1,4-25	31,3	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,4-30	19	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,4-35	12,4	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,4-40	8,3	Flecha

VC 530-1,3-0,6-1,5-10	169,4	Vierendeel
VC 530-1,3-0,6-1,5-15	90,8	Momento fletor
VC 530-1,3-0,6-1,5-20	53,1	Momento fletor
VC 530-1,3-0,6-1,5-25	31,6	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,5-30	19,2	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,5-35	12,6	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,5-40	8,5	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,3-10	124,4	Vierendeel
VC 530-1,3-0,7-1,3-15	74,9	Cortante longitudinal
VC 530-1,3-0,7-1,3-20	49,7	Momento fletor
VC 530-1,3-0,7-1,3-25	30,8	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,3-30	18,6	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,3-35	11,9	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,3-40	8	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,4-10	132,7	Vierendeel
VC 530-1,3-0,7-1,4-15	81,8	Vierendeel
VC 530-1,3-0,7-1,4-20	49,5	Momento fletor
VC 530-1,3-0,7-1,4-25	31,1	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,4-30	18,9	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,4-35	12,1	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,4-40	8,1	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,5-10	125,4	Vierendeel
VC 530-1,3-0,7-1,5-15	83,6	Vierendeel
VC 530-1,3-0,7-1,5-20	49,8	Momento fletor
VC 530-1,3-0,7-1,5-25	31,4	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,5-30	19,2	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,5-35	12,3	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,5-40	8,2	Flecha
VC 530-1,3-0,8-1,3-10	83,9	Vierendeel
VC 530-1,3-0,8-1,3-15	56,1	Vierendeel
VC 530-1,3-0,8-1,3-20	39,7	Vierendeel
VC 530-1,3-0,8-1,3-25	29,5	Momento fletor
VC 530-1,3-0,8-1,3-30	18,5	Flecha
VC 530-1,3-0,8-1,3-35	11,6	Flecha
VC 530-1,3-0,8-1,3-40	7,8	Flecha
VC 530-1,3-0,8-1,4-10	91,9	Vierendeel
VC 530-1,3-0,8-1,4-15	52,9	Vierendeel
VC 530-1,3-0,8-1,4-20	39,9	Vierendeel
VC 530-1,3-0,8-1,4-25	29,4	Momento fletor
VC 530-1,3-0,8-1,4-30	18,7	Flecha
VC 530-1,3-0,8-1,4-35	11,8	Flecha
VC 530-1,3-0,8-1,4-40	7,9	Flecha
VC 530-1,3-0,8-1,5-10	86,7	Vierendeel
VC 530-1,3-0,8-1,5-15	55,1	Vierendeel
VC 530-1,3-0,8-1,5-20	40,3	Vierendeel

VC 530-1,3-0,8-1,5-25	29,4	Momento fletor
VC 530-1,3-0,8-1,5-30	18,9	Flecha
VC 530-1,3-0,8-1,5-35	11,9	Flecha
VC 530-1,3-0,8-1,5-40	8	Flecha
VC 530-1,4-0,63-1,3-10	136,1	Cortante longitudinal
VC 530-1,4-0,63-1,3-15	81,7	Cortante longitudinal
VC 530-1,4-0,63-1,3-20	54,5	Cortante longitudinal
VC 530-1,4-0,63-1,3-25	35,7	Flecha
VC 530-1,4-0,63-1,3-30	21,8	Flecha
VC 530-1,4-0,63-1,3-35	14,2	Flecha
VC 530-1,4-0,63-1,3-40	9,5	Flecha
VC 530-1,4-0,7-1,3-10	136,4	Flambagem
VC 530-1,4-0,7-1,3-15	75,8	Flambagem
VC 530-1,4-0,7-1,3-20	52,5	Flambagem
VC 530-1,4-0,7-1,3-25	34,6	Momento fletor
VC 530-1,4-0,7-1,3-30	21,6	Flecha
VC 530-1,4-0,7-1,3-35	13,9	Flecha
VC 530-1,4-0,7-1,3-40	9,3	Flecha
VC 530-1,4-0,7-1,4-10	132,4	Vierendeel
VC 530-1,4-0,7-1,4-15	88,5	Vierendeel
VC 530-1,4-0,7-1,4-20	54,4	Momento fletor
VC 530-1,4-0,7-1,4-25	34,7	Momento fletor
VC 530-1,4-0,7-1,4-30	22	Flecha
VC 530-1,4-0,7-1,4-35	14,1	Flecha
VC 530-1,4-0,7-1,4-40	9,5	Flecha
VC 530-1,4-0,7-1,5-10	144,6	Vierendeel
VC 530-1,4-0,7-1,5-15	84,1	Vierendeel
VC 530-1,4-0,7-1,5-20	54,1	Momento fletor
VC 530-1,4-0,7-1,5-25	34,7	Momento fletor
VC 530-1,4-0,7-1,5-30	22,2	Flecha
VC 530-1,4-0,7-1,5-35	14,3	Flecha
VC 530-1,4-0,7-1,5-40	9,6	Flecha
VC 530-1,4-0,8-1,3-10	96,2	Vierendeel
VC 530-1,4-0,8-1,3-15	55,4	Vierendeel
VC 530-1,4-0,8-1,3-20	41,8	Vierendeel
VC 530-1,4-0,8-1,3-25	31,8	Momento fletor
VC 530-1,4-0,8-1,3-30	21,4	Flecha
VC 530-1,4-0,8-1,3-35	13,6	Flecha
VC 530-1,4-0,8-1,3-40	9,1	Flecha
VC 530-1,4-0,8-1,4-10	90,3	Vierendeel
VC 530-1,4-0,8-1,4-15	57,6	Vierendeel
VC 530-1,4-0,8-1,4-20	42,2	Vierendeel
VC 530-1,4-0,8-1,4-25	31,9	Momento fletor
VC 530-1,4-0,8-1,4-30	21,9	Flecha
VC 530-1,4-0,8-1,4-35	13,7	Flecha

VC 530-1,4-0,8-1,4-40	9,2	Flecha
VC 530-1,4-0,8-1,5-10	102,2	Vierendeel
VC 530-1,4-0,8-1,5-15	60,6	Vierendeel
VC 530-1,4-0,8-1,5-20	43,1	Vierendeel
VC 530-1,4-0,8-1,5-25	32,1	Momento fletor
VC 530-1,4-0,8-1,5-30	22,1	Momento fletor
VC 530-1,4-0,8-1,5-35	14	Flecha
VC 530-1,4-0,8-1,5-40	9,4	Flecha
VC 530-1,5-0,73-1,3-10	134,4	Vierendeel
VC 530-1,5-0,73-1,3-15	69,5	Flambagem
VC 530-1,5-0,73-1,3-20	50,5	Flambagem
VC 530-1,5-0,73-1,3-25	36,7	Momento fletor
VC 530-1,5-0,73-1,3-30	25	Flecha
VC 530-1,5-0,73-1,3-35	15,9	Flecha
VC 530-1,5-0,73-1,3-40	10,7	Flecha
VC 530-1,5-0,8-1,3-10	94,8	Vierendeel
VC 530-1,5-0,8-1,3-15	60,5	Vierendeel
VC 530-1,5-0,8-1,3-20	43,6	Flambagem
VC 530-1,5-0,8-1,3-25	33,5	Flambagem
VC 530-1,5-0,8-1,3-30	24	Momento fletor
VC 530-1,5-0,8-1,3-35	15,6	Flecha
VC 530-1,5-0,8-1,3-40	10,5	Flecha
VC 530-1,5-0,8-1,4-10	106,9	Vierendeel
VC 530-1,5-0,8-1,4-15	63,5	Vierendeel
VC 530-1,5-0,8-1,4-20	45,2	Vierendeel
VC 530-1,5-0,8-1,4-25	34,8	Momento fletor
VC 530-1,5-0,8-1,4-30	24	Momento fletor
VC 530-1,5-0,8-1,4-35	15,9	Flecha
VC 530-1,5-0,8-1,4-40	10,7	Flecha
VC 530-1,5-0,8-1,5-10	101,4	Vierendeel
VC 530-1,5-0,8-1,5-15	60,1	Vierendeel
VC 530-1,5-0,8-1,5-20	42,7	Vierendeel
VC 530-1,5-0,8-1,5-25	34,6	Momento fletor
VC 530-1,5-0,8-1,5-30	24,1	Momento fletor
VC 530-1,5-0,8-1,5-35	16,1	Flecha
VC 530-1,5-0,8-1,5-40	10,8	Flecha
VC 530-1,6-0,8-1,3-10	112,4	Vierendeel
VC 530-1,6-0,8-1,3-15	63,3	Flambagem
VC 530-1,6-0,8-1,3-20	42,2	Flambagem
VC 530-1,6-0,8-1,3-25	31,7	Flambagem
VC 530-1,6-0,8-1,3-30	25,4	Flambagem
VC 530-1,6-0,8-1,3-35	18	Flecha
VC 530-1,6-0,8-1,3-40	12	Flecha

**Resultados do estudo paramétrico obtidos pela metodologia de Ward (1990)
para a viga mista celular com perfil W 310x32,7**

Designação	q (kN/m)	Estado Limite
VC 310-1,3-0,6-1,3-10	71,9	Flamb Flex MA
VC 310-1,3-0,6-1,3-15	42,2	Flamb Flex MA
VC 310-1,3-0,6-1,3-20	29,9	Flamb Flex MA
VC 310-1,3-0,6-1,3-25	23,2	Flamb Flex MA
VC 310-1,3-0,6-1,3-30	14,4	Flecha
VC 310-1,3-0,6-1,3-35	9,2	Flecha
VC 310-1,3-0,6-1,3-40	6,2	Flecha
VC 310-1,3-0,6-1,4-10	85,5	Flamb Flex MA
VC 310-1,3-0,6-1,4-15	54,6	Flamb Flex MA
VC 310-1,3-0,6-1,4-20	37,7	Flamb Flex MA
VC 310-1,3-0,6-1,4-25	24,3	Flecha
VC 310-1,3-0,6-1,4-30	14,4	Flecha
VC 310-1,3-0,6-1,4-35	9,2	Flecha
VC 310-1,3-0,6-1,4-40	6,2	Flecha
VC 310-1,3-0,6-1,5-10	98,3	Vierendeel
VC 310-1,3-0,6-1,5-15	61,5	Vierendeel
VC 310-1,3-0,6-1,5-20	38,2	Vierendeel
VC 310-1,3-0,6-1,5-25	24,3	Flecha
VC 310-1,3-0,6-1,5-30	14,4	Flecha
VC 310-1,3-0,6-1,5-35	9,2	Flecha
VC 310-1,3-0,6-1,5-40	6,2	Flecha
VC 310-1,3-0,7-1,3-10	70,7	Flamb Flex MA
VC 310-1,3-0,7-1,3-15	42,6	Flamb Flex MA
VC 310-1,3-0,7-1,3-20	30,5	Flamb Flex MA
VC 310-1,3-0,7-1,3-25	22,9	Flecha
VC 310-1,3-0,7-1,3-30	13,5	Flecha
VC 310-1,3-0,7-1,3-35	8,6	Flecha
VC 310-1,3-0,7-1,3-40	5,9	Flecha
VC 310-1,3-0,7-1,4-10	74,3	Vierendeel
VC 310-1,3-0,7-1,4-15	45	Vierendeel
VC 310-1,3-0,7-1,4-20	32,5	Vierendeel
VC 310-1,3-0,7-1,4-25	22,9	Flecha
VC 310-1,3-0,7-1,4-30	13,5	Flecha
VC 310-1,3-0,7-1,4-35	8,6	Flecha
VC 310-1,3-0,7-1,4-40	5,9	Flecha
VC 310-1,3-0,7-1,5-10	71,4	Vierendeel
VC 310-1,3-0,7-1,5-15	45,7	Vierendeel
VC 310-1,3-0,7-1,5-20	32,7	Vierendeel
VC 310-1,3-0,7-1,5-25	22,9	Flecha
VC 310-1,3-0,7-1,5-30	13,5	Flecha

VC 310-1,3-0,7-1,5-35	8,6	Flecha
VC 310-1,3-0,7-1,5-40	5,9	Flecha
VC 310-1,3-0,8-1,3-10	48,2	Vierendeel
VC 310-1,3-0,8-1,3-15	31,1	Vierendeel
VC 310-1,3-0,8-1,3-20	21,9	Vierendeel
VC 310-1,3-0,8-1,3-25	17,1	Vierendeel
VC 310-1,3-0,8-1,3-30	12,6	Flecha
VC 310-1,3-0,8-1,3-35	8	Flecha
VC 310-1,3-0,8-1,3-40	5,4	Flecha
VC 310-1,3-0,8-1,4-10	51,9	Vierendeel
VC 310-1,3-0,8-1,4-15	29,9	Vierendeel
VC 310-1,3-0,8-1,4-20	22	Vierendeel
VC 310-1,3-0,8-1,4-25	17,1	Vierendeel
VC 310-1,3-0,8-1,4-30	12,6	Flecha
VC 310-1,3-0,8-1,4-35	8	Flecha
VC 310-1,3-0,8-1,4-40	5,4	Flecha
VC 310-1,3-0,8-1,5-10	49,3	Vierendeel
VC 310-1,3-0,8-1,5-15	30,8	Vierendeel
VC 310-1,3-0,8-1,5-20	22,1	Vierendeel
VC 310-1,3-0,8-1,5-25	17,3	Vierendeel
VC 310-1,3-0,8-1,5-30	12,6	Flecha
VC 310-1,3-0,8-1,5-35	8	Flecha
VC 310-1,3-0,8-1,5-40	5,4	Flecha
VC 310-1,4-0,63-1,3-10	77	Flamb Flex MA
VC 310-1,4-0,63-1,3-15	46,4	Flamb Flex MA
VC 310-1,4-0,63-1,3-20	31,1	Flamb Flex MA
VC 310-1,4-0,63-1,3-25	24,6	Flamb Flex MA
VC 310-1,4-0,63-1,3-30	16,2	Flecha
VC 310-1,4-0,63-1,3-35	10,4	Flecha
VC 310-1,4-0,63-1,3-40	7	Flecha
VC 310-1,4-0,7-1,3-10	78,9	Vierendeel
VC 310-1,4-0,7-1,3-15	45,7	Flamb Flex MA
VC 310-1,4-0,7-1,3-20	31,8	Flamb Flex MA
VC 310-1,4-0,7-1,3-25	24,4	Flamb Flex MA
VC 310-1,4-0,7-1,3-30	15,4	Flecha
VC 310-1,4-0,7-1,3-35	9,9	Flecha
VC 310-1,4-0,7-1,3-40	6,7	Flecha
VC 310-1,4-0,7-1,4-10	75,8	Vierendeel
VC 310-1,4-0,7-1,4-15	48,3	Vierendeel
VC 310-1,4-0,7-1,4-20	34,4	Vierendeel
VC 310-1,4-0,7-1,4-25	24,5	Vierendeel
VC 310-1,4-0,7-1,4-30	15,4	Flecha
VC 310-1,4-0,7-1,4-35	9,9	Flecha
VC 310-1,4-0,7-1,4-40	6,7	Flecha
VC 310-1,4-0,7-1,5-10	80,7	Vierendeel

VC 310-1,4-0,7-1,5-15	47,2	Vierendeel
VC 310-1,4-0,7-1,5-20	34,7	Vierendeel
VC 310-1,4-0,7-1,5-25	24,5	Vierendeel
VC 310-1,4-0,7-1,5-30	15,4	Flecha
VC 310-1,4-0,7-1,5-35	9,9	Flecha
VC 310-1,4-0,7-1,5-40	6,7	Flecha
VC 310-1,4-0,8-1,3-10	54,1	Vierendeel
VC 310-1,4-0,8-1,3-15	31,3	Vierendeel
VC 310-1,4-0,8-1,3-20	23	Vierendeel
VC 310-1,4-0,8-1,3-25	17,8	Vierendeel
VC 310-1,4-0,8-1,3-30	14,3	Flecha
VC 310-1,4-0,8-1,3-35	9,1	Flecha
VC 310-1,4-0,8-1,3-40	6,2	Flecha
VC 310-1,4-0,8-1,4-10	51,5	Vierendeel
VC 310-1,4-0,8-1,4-15	32	Vierendeel
VC 310-1,4-0,8-1,4-20	23,2	Vierendeel
VC 310-1,4-0,8-1,4-25	18	Vierendeel
VC 310-1,4-0,8-1,4-30	14,3	Flecha
VC 310-1,4-0,8-1,4-35	9,1	Flecha
VC 310-1,4-0,8-1,4-40	6,2	Flecha
VC 310-1,4-0,8-1,5-10	56,8	Vierendeel
VC 310-1,4-0,8-1,5-15	33	Vierendeel
VC 310-1,4-0,8-1,5-20	23,3	Vierendeel
VC 310-1,4-0,8-1,5-25	18,1	Vierendeel
VC 310-1,4-0,8-1,5-30	14,3	Flecha
VC 310-1,4-0,8-1,5-35	9,1	Flecha
VC 310-1,4-0,8-1,5-40	6,2	Flecha
VC 310-1,5-0,73-1,3-10	77,4	Vierendeel
VC 310-1,5-0,73-1,3-15	44,9	Vierendeel
VC 310-1,5-0,73-1,3-20	32,8	Vierendeel
VC 310-1,5-0,73-1,3-25	25,3	Flamb Flex MA
VC 310-1,5-0,73-1,3-30	17,1	Flecha
VC 310-1,5-0,73-1,3-35	11	Flecha
VC 310-1,5-0,73-1,3-40	7,4	Flecha
VC 310-1,5-0,8-1,3-10	54	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,3-15	33,5	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,3-20	24,3	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,3-25	18,8	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,3-30	15,4	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,3-35	10,3	Flecha
VC 310-1,5-0,8-1,3-40	7	Flecha
VC 310-1,5-0,8-1,4-10	59,2	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,4-15	34,4	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,4-20	24,5	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,4-25	18,8	Vierendeel

VC 310-1,5-0,8-1,4-30	15,3	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,4-35	10,3	Flecha
VC 310-1,5-0,8-1,4-40	7	Flecha
VC 310-1,5-0,8-1,5-10	57	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,5-15	33,2	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,5-20	23,8	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,5-25	18,9	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,5-30	15,4	Vierendeel
VC 310-1,5-0,8-1,5-35	10,3	Flecha
VC 310-1,5-0,8-1,5-40	7	Flecha
VC 310-1,57-0,8-1,3-10	54	Vierendeel
VC 310-1,57-0,8-1,3-15	33,8	Vierendeel
VC 310-1,57-0,8-1,3-20	24,5	Vierendeel
VC 310-1,57-0,8-1,3-25	19,2	Vierendeel
VC 310-1,57-0,8-1,3-30	15,8	Vierendeel
VC 310-1,57-0,8-1,3-35	11,2	Flecha
VC 310-1,57-0,8-1,3-40	7,6	Flecha

**Resultados do estudo paramétrico obtidos pela metodologia de Ward (1990)
para a viga mista celular com perfil W 530x85**

Designação	q (kN/m)	Estado Limite
VC 530-1,3-0,6-1,3-10	104,1	Flamb Flex MA
VC 530-1,3-0,6-1,3-15	56,4	Flamb Flex MA
VC 530-1,3-0,6-1,3-20	40	Flamb Flex MA
VC 530-1,3-0,6-1,3-25	27,8	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,3-30	16,1	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,3-35	10,2	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,3-40	6,8	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,4-10	108,6	Flamb Flex MA
VC 530-1,3-0,6-1,4-15	71,4	Flamb Flex MA
VC 530-1,3-0,6-1,4-20	48	Flamb Flex MA
VC 530-1,3-0,6-1,4-25	27,8	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,4-30	16,1	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,4-35	10,2	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,4-40	6,8	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,5-10	122,8	Flamb Flex MA
VC 530-1,3-0,6-1,5-15	90,4	Vierendeel
VC 530-1,3-0,6-1,5-20	53	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,5-25	27,8	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,5-30	16,1	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,5-35	10,2	Flecha
VC 530-1,3-0,6-1,5-40	6,8	Flecha

VC 530-1,3-0,7-1,3-10	99	Flamb Flex MA
VC 530-1,3-0,7-1,3-15	59,7	Flamb Flex MA
VC 530-1,3-0,7-1,3-20	41,1	Flamb Flex MA
VC 530-1,3-0,7-1,3-25	26,2	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,3-30	15,2	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,3-35	9,6	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,3-40	6,4	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,4-10	107,7	Vierendeel
VC 530-1,3-0,7-1,4-15	66,1	Vierendeel
VC 530-1,3-0,7-1,4-20	47,3	Vierendeel
VC 530-1,3-0,7-1,4-25	26,2	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,4-30	15,2	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,4-35	9,6	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,4-40	6,4	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,5-10	104,9	Vierendeel
VC 530-1,3-0,7-1,5-15	66,2	Vierendeel
VC 530-1,3-0,7-1,5-20	47,5	Vierendeel
VC 530-1,3-0,7-1,5-25	26,2	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,5-30	15,2	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,5-35	9,6	Flecha
VC 530-1,3-0,7-1,5-40	6,4	Flecha
VC 530-1,3-0,8-1,3-10	68,6	Vierendeel
VC 530-1,3-0,8-1,3-15	43,8	Vierendeel
VC 530-1,3-0,8-1,3-20	31,2	Vierendeel
VC 530-1,3-0,8-1,3-25	24,3	Vierendeel
VC 530-1,3-0,8-1,3-30	14,2	Flecha
VC 530-1,3-0,8-1,3-35	8,9	Flecha
VC 530-1,3-0,8-1,3-40	6	Flecha
VC 530-1,3-0,8-1,4-10	72,7	Vierendeel
VC 530-1,3-0,8-1,4-15	42,6	Vierendeel
VC 530-1,3-0,8-1,4-20	31,2	Vierendeel
VC 530-1,3-0,8-1,4-25	24,4	Vierendeel
VC 530-1,3-0,8-1,4-30	14,2	Flecha
VC 530-1,3-0,8-1,4-35	8,9	Flecha
VC 530-1,3-0,8-1,4-40	6	Flecha
VC 530-1,3-0,8-1,5-10	70,2	Vierendeel
VC 530-1,3-0,8-1,5-15	43,3	Vierendeel
VC 530-1,3-0,8-1,5-20	31,4	Vierendeel
VC 530-1,3-0,8-1,5-25	24,3	Vierendeel
VC 530-1,3-0,8-1,5-30	14,2	Flecha
VC 530-1,3-0,8-1,5-35	8,9	Flecha
VC 530-1,3-0,8-1,5-40	6	Flecha
VC 530-1,4-0,63-1,3-10	108,5	Flamb Flex MA
VC 530-1,4-0,63-1,3-15	61,6	Flamb Flex MA
VC 530-1,4-0,63-1,3-20	41,7	Flamb Flex MA

VC 530-1,4-0,63-1,3-25	31,7	Flecha
VC 530-1,4-0,63-1,3-30	18,4	Flecha
VC 530-1,4-0,63-1,3-35	11,6	Flecha
VC 530-1,4-0,63-1,3-40	7,8	Flecha
VC 530-1,4-0,7-1,3-10	113,5	Flamb Flex MA
VC 530-1,4-0,7-1,3-15	60,8	Flamb Flex MA
VC 530-1,4-0,7-1,3-20	44,1	Flamb Flex MA
VC 530-1,4-0,7-1,3-25	30,3	Flecha
VC 530-1,4-0,7-1,3-30	17,6	Flecha
VC 530-1,4-0,7-1,3-35	11,1	Flecha
VC 530-1,4-0,7-1,3-40	7,4	Flecha
VC 530-1,4-0,7-1,4-10	111	Vierendeel
VC 530-1,4-0,7-1,4-15	70,4	Vierendeel
VC 530-1,4-0,7-1,4-20	50,8	Vierendeel
VC 530-1,4-0,7-1,4-25	30,3	Flecha
VC 530-1,4-0,7-1,4-30	17,6	Flecha
VC 530-1,4-0,7-1,4-35	11,1	Flecha
VC 530-1,4-0,7-1,4-40	7,4	Flecha
VC 530-1,4-0,7-1,5-10	116,3	Vierendeel
VC 530-1,4-0,7-1,5-15	69,4	Vierendeel
VC 530-1,4-0,7-1,5-20	50,8	Vierendeel
VC 530-1,4-0,7-1,5-25	30,3	Flecha
VC 530-1,4-0,7-1,5-30	17,6	Flecha
VC 530-1,4-0,7-1,5-35	11,1	Flecha
VC 530-1,4-0,7-1,5-40	7,4	Flecha
VC 530-1,4-0,8-1,3-10	76,9	Vierendeel
VC 530-1,4-0,8-1,3-15	44,6	Vierendeel
VC 530-1,4-0,8-1,3-20	32,9	Vierendeel
VC 530-1,4-0,8-1,3-25	25,6	Vierendeel
VC 530-1,4-0,8-1,3-30	16,3	Flecha
VC 530-1,4-0,8-1,3-35	10,3	Flecha
VC 530-1,4-0,8-1,3-40	6,9	Flecha
VC 530-1,4-0,8-1,4-10	73,2	Vierendeel
VC 530-1,4-0,8-1,4-15	45,8	Vierendeel
VC 530-1,4-0,8-1,4-20	32,8	Vierendeel
VC 530-1,4-0,8-1,4-25	25,7	Vierendeel
VC 530-1,4-0,8-1,4-30	16,3	Flecha
VC 530-1,4-0,8-1,4-35	10,3	Flecha
VC 530-1,4-0,8-1,4-40	6,9	Flecha
VC 530-1,4-0,8-1,5-10	81	Vierendeel
VC 530-1,4-0,8-1,5-15	47	Vierendeel
VC 530-1,4-0,8-1,5-20	33	Vierendeel
VC 530-1,4-0,8-1,5-25	25,6	Vierendeel
VC 530-1,4-0,8-1,5-30	16,3	Flecha
VC 530-1,4-0,8-1,5-35	10,3	Flecha

VC 530-1,4-0,8-1,5-40	6,9	Flecha
VC 530-1,5-0,73-1,3-10	113,3	Vierendeel
VC 530-1,5-0,73-1,3-15	65	Flamb Flex MA
VC 530-1,5-0,73-1,3-20	47,2	Flamb Flex MA
VC 530-1,5-0,73-1,3-25	34,1	Flecha
VC 530-1,5-0,73-1,3-30	19,7	Flecha
VC 530-1,5-0,73-1,3-35	12,4	Flecha
VC 530-1,5-0,73-1,3-40	8,4	Flecha
VC 530-1,5-0,8-1,3-10	77,1	Vierendeel
VC 530-1,5-0,8-1,3-15	48,2	Vierendeel
VC 530-1,5-0,8-1,3-20	34,5	Vierendeel
VC 530-1,5-0,8-1,3-25	27	Vierendeel
VC 530-1,5-0,8-1,3-30	18,7	Flecha
VC 530-1,5-0,8-1,3-35	11,8	Flecha
VC 530-1,5-0,8-1,3-40	7,9	Flecha
VC 530-1,5-0,8-1,4-10	85	Vierendeel
VC 530-1,5-0,8-1,4-15	49,4	Vierendeel
VC 530-1,5-0,8-1,4-20	34,7	Vierendeel
VC 530-1,5-0,8-1,4-25	27	Vierendeel
VC 530-1,5-0,8-1,4-30	18,7	Flecha
VC 530-1,5-0,8-1,4-35	11,8	Flecha
VC 530-1,5-0,8-1,4-40	7,9	Flecha
VC 530-1,5-0,8-1,5-10	81,3	Vierendeel
VC 530-1,5-0,8-1,5-15	47,7	Vierendeel
VC 530-1,5-0,8-1,5-20	34	Vierendeel
VC 530-1,5-0,8-1,5-25	26,9	Vierendeel
VC 530-1,5-0,8-1,5-30	18,7	Flecha
VC 530-1,5-0,8-1,5-35	11,8	Flecha
VC 530-1,5-0,8-1,5-40	7,9	Flecha
VC 530-1,6-0,8-1,3-10	89,8	Vierendeel
VC 530-1,6-0,8-1,3-15	52,2	Vierendeel
VC 530-1,6-0,8-1,3-20	36,6	Vierendeel
VC 530-1,6-0,8-1,3-25	28,2	Vierendeel
VC 530-1,6-0,8-1,3-30	21,2	Flecha
VC 530-1,6-0,8-1,3-35	13,4	Flecha
VC 530-1,6-0,8-1,3-40	9	Flecha