

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Raquel Nailê Brinkhus

**ANÁLISE DE VIGAS CASTELADAS E VIGAS CASTELADAS
MISTAS**

**PORTO ALEGRE
2015**

Raquel Nailê Brinkhus

**ANÁLISE DE VIGAS CASTELADAS E VIGAS CASTELADAS
MISTAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Orientador: Inácio Benvegnu Morsch

PORTO ALEGRE
2015

RAQUEL NAILÊ BRINKHUS

**ANÁLISE DE VIGAS CASTELADAS E VIGAS CASTELADAS
MISTAS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Estruturas, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 15 de janeiro de 2015

Prof. Inácio Benvegnu Morsch
Dr. PPGEC/UFRGS
orientador

Prof. Armando Miguel Awruch
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Armando Miguel Awruch (UFRGS)
Dr. pela COPPE/UFRJ

Prof. Zacarias Martin Chamberlain Pravia (UPF)
Dr. pela COPPE/UFRJ

Prof. Gladimir de Campos Grigoletti (RITTER DOS REIS/ ULBRA)
Dr. pela PROMEC/UFRGS

Dedico este trabalho a todos que me apoiaram e auxiliaram para tornar este sonho possível, em especial, aos meus pais e ídolos Adelaide e Evaldo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor e orientador Inácio Benvegnu Morsch pela paciência, ensinamentos, dedicação e apoio, não apenas na realização deste trabalho, mas também durante o mestrado. Pelos conhecimentos repassados nas orientações, contribuindo para minha formação científica e pessoal.

Aos demais professores da escola de engenharia da UFRGS pelo embasamento teórico durante as disciplinas do curso.

Aos meus pais, Evaldo e Adelaide, pelo grande apoio e incentivo, sempre prontamente dispostos a me ajudar no que fosse necessário.

Aos colegas veteranos do curso que me auxiliaram diversas vezes Maiga Marques Dias e Tiago Becker Evangelho.

Aos demais colegas pelo auxílio e grande amizade, conheci diversas pessoas dentro do curso pela qual hoje tenho imenso carinho e converso freqüentemente.

Ao bolsista Matheus Roman Carini por toda ajuda com as modelagens no ANSYS.

A Mayara, amiga de longos anos, pelo carinho, amizade e ajuda.

Ao Guilherme, meu namorado, por toda ajuda e apoio emocional, sempre estando ao meu lado e me animando nos momentos difíceis.

Ao meu chefe Paulo Roberto Marcondes de Carvalho, pelo grande incentivo.

Aos demais amigos e familiares por toda compreensão ao meu sumiço durante os estudos e dissertação.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior – CAPES pela bolsa de estudos.

O segredo é não correr atrás das borboletas...
É cuidar do jardim para que elas venham até você.
Mario Quintana

RESUMO

BRINKHUS, R. N. Análise de vigas casteladas e vigas casteladas mistas. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

As vigas casteladas são fabricadas a partir do corte em zigue-zague da alma de perfis I, após são deslocados e soldados, fazendo com que a viga tenha uma expansão na altura, porém sem aumentar a massa do perfil. As mesmas voltaram a ser uma opção competitiva devido aos avanços tecnológicos, que possibilitam a automação do corte e solda da alma do perfil e com o início das produções de perfis I laminados no Brasil em 2002. Apresenta grandes vantagens proporcionando a passagem de dutos e tubulações, aumento na rigidez no plano de flexão e boa estética. O presente trabalho apresenta um estudo analítico-numérico realizado com objetivo de verificar o comportamento de vigas casteladas e vigas casteladas mistas, a fim de apresentar e/ou propor dimensionamentos conforme a norma brasileira para as mesmas. Os trabalhos apresentados por Cimadevila (2000) e Veríssimo (2012) foram utilizados para formulação da análise de vigas casteladas. O trabalho de Lawson (2011) que aborda vigas casteladas mistas com aberturas (circulares e retangulares), que é baseado no EUROCODE 3 (2005), foi utilizado para formulação da metodologia de análise de vigas casteladas mistas. Foram realizadas planilhas para análise de vigas casteladas e vigas mistas com aberturas utilizando as metodologias estudadas, e planilhas de análise de vigas casteladas mistas com a metodologia proposta. Utilizando-se o software ANSYS as planilhas e metodologias puderam ser testadas e validadas. Foram selecionados alguns projetos de dimensionamento para comparar vigas de alma cheia, vigas casteladas, vigas mistas, vigas mistas com aberturas e vigas mistas casteladas.

Palavras-chave: viga castelada; viga mista com aberturas na alma; viga castelada mista; estruturas metálicas; estruturas mistas.

ABSTRACT

BRINKHUS, R. N. Analysis of castellated beams and composite castellated beams. 2015. Thesis (Masters in Engineering) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Castellated beams are made of metal I-beams, in which the webs are first divided by a lengthwise zigzag cut, then these parts are welded together in order to join the peaks of both parts, thus increasing its depth and strength, without mass increasing. Castellated beams are again competitive due to technological advances, which enabled automatic cut and welding the web of the I-beams, and with the beginning of the production of rolled metal I-beams in Brazil in 2002. They exhibit great advantages, such as passing of ducts and pipes, increasing bending stiffness, and having good aesthetics. This work presents analytical and numerical studies looking for analysis the behavior of castellated beams and composite castellated beams in order to develop design methods satisfying the corresponding Brazilian code. The castellated beams analysis were based in the works of Cimadevila (2000) and Veríssimo (2012). The work of Lawson (2011), which concerns composite castellated beams and is based on EUROCODE 3 (2005), was used for the formulation of the methodology of the analysis of composite castellated and cellular beams. Spreadsheets were developed for analysis of castellated beams and composite beams with web openings, using both, the studied methodologies and the suggested methodologies for the composite beams. Using ANSYS software, it was possible to test and validate the developed spreadsheets. Design projects of full web beams, castellated beams, composite beams, composite castellated beams and composite beams with web openings were selected for comparison.

Keywords: castellated beam; composite beam with web opening; composite castellated beam; steel structure; composite structure.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	15
1 INTRODUÇÃO.....	21
1.1 JUSTIFICATIVAS	26
1.2 OBJETIVOS.....	27
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1 MODOS DE COLAPSO DA VIGA CASTELADA.....	28
2.1.1 Formação de um mecanismo Vierendeel	29
2.1.2 Formação de rótula	30
2.1.3 Ruptura da solda entre as aberturas	30
2.1.4 Flambagem do montante da alma devido à força cortante	31
2.1.5 Flambagem por compressão do montante da alma.....	32
2.1.6 Flambagem lateral com torção	32
2.2 MODOS DE FALHA DA VIGA MISTA CASTELADA	33
2.2.1 Resistência ao cisalhamento	34
2.2.2 Resistência ao momento fletor	34
2.2.3 Resistência à flexão de Vierendeel.....	34
2.2.4 Flambagem local da mesa	35
2.2.5 Flambagem da alma.....	35
2.2.6 Flecha	35
2.3 DEFINIÇÕES E SIMBOLOGIA	35
2.4 PADRÕES	37
2.4.1 Viga Celular.....	37
2.4.2 Viga Anglo-Saxão	38
2.4.3 Viga Peiner	38
2.4.4 Viga Litzka	39
2.4.5 Outros	39
2.5 PADRÕES DE CORTE.....	40
2.6 NORMAS DE DIMENSIONAMENTO	41
2.6.1 Norma Brasileira	41
2.6.2 Normas Estrangeiras.....	41

2.7 TRABALHOS RECENTES	42
3 VERIFICAÇÕES DE VIGAS CASTELADAS	44
3.1 PARÂMETROS GEOMÉTRICOS	44
3.2 MODOS DE FALHA	48
3.2.1 Formação de mecanismo plástico.....	49
3.2.2 Escoamento do montante de alma por cisalhamento.....	54
3.2.3 Escoamento do montante de alma por flexão.....	56
3.2.4 Flambagem do montante de alma.....	58
3.2.5 Flambagem lateral com torção	59
3.2.6 Estado-limite de serviço de deslocamento excessivo.....	62
3.2.7 Estado-limite de serviço de vibrações excessivas	63
3.2.8 Estado limite de serviço de fadiga.....	63
4 VERIFICAÇÕES DE VIGAS CASTELADAS MISTAS	65
4.1 PARÂMETROS GEOMÉTRICOS	65
4.2 RESISTÊNCIA DOS CONECTORES	67
4.3 RESISTÊNCIA AO MOMENTO FLETOR NAS ABERTURAS	69
4.4 RESISTÊNCIA AO ESFORÇO CISALHANTE.....	71
4.5 RESISTÊNCIA A FLEXÃO DE VIERENDEEL.....	73
4.6 RESISTÊNCIA DOS CONECTORES NA ABERTURA	74
4.7 RESISTÊNCIA AO CORTE LONGITUDINAL.....	75
4.8 RESISTÊNCIA À FLAMBAGEM DA ALMA.....	76
4.9 RESISTÊNCIA LIMITE AO CISALHAMENTO.....	77
4.9.1 Resistência governada pela flexão.....	77
4.9.1 Resistência governada pela flambagem.....	78
4.10 ESTADO-LIMITE DE SERVIÇO DE DESLOCAMENTO EXCESSIVO	78
4.11 ADAPTAÇÕES PARA ANÁLISE DE VIGAS CASTELADAS MISTAS.....	79
5 PLANILHAS DESENVOLVIDAS PARA ANÁLISE DE VIGAS CASTELADAS	81
5.1 DADOS DE ENTRADA DO PROJETO	82
5.2 VERIFICAÇÕES PARA VIGA DE ALMA CHEIA.....	86
5.3 VERIFICAÇÕES PARA VIGA CASTELADA	87
5.4 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	90
6 PLANILHAS DESENVOLVIDAS PARA ANÁLISE DE VIGAS MISTAS COM ABERTURAS E VIGAS MISTAS CASTELADAS	93
6.1 DADOS DE ENTRADA DA VIGA MISTA.....	95

6.2 DADOS DE ENTRADA DA VIGA MISTA COM ABERTURAS OU CASTELADA	97
6.3 VERIFICAÇÃO DE VIGA MISTA.....	101
6.4 VERIFICAÇÃO DE VIGA MISTA COM ABERTURAS.....	104
6.5 VERIFICAÇÃO DE VIGA MISTA CASTELADA.....	113
6.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	120
7 MODELOS.....	125
7.1 EXEMPLO A1: COMPARAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIAS PARA O USO DE UM MESMO PERFIL	125
7.2 EXEMPLO A2: COMPARAÇÃO NA DIMINUIÇÃO DO PERFIL ORIGINAL PARA ATENDER A UM PROJETO	128
7.3 EXEMPLO A3: COMPARAÇÃO USANDO DIFERENTES DIMENSÕES PARA CHAPA EXPANSORA.....	131
7.4 EXEMPLO A4: COMPARAÇÃO NAS MUDANÇAS DO TIPO DE CASTELAMENTO	135
7.5 EXEMPLO A5: COMPARAÇÃO NAS MUDANÇAS DOS PARÂMETROS PARA VIGAS CASTELADAS CIRCULAR.....	136
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	139
8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	140
REFERÊNCIAS	142
ANEXO A – SIMULAÇÃO DO MODELO 7.1.....	146

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de viga castelada.....	21
Figura 2: Abertura em uma estrutura composta por placas	23
Figura 3: Centro de Convenções World Trade Center	23
Figura 4: Estação Santo Afonso - Novo Hamburgo.....	24
Figura 5: Kings Place, London.....	24
Figura 6: Hall One - Kings Place, London.....	25
Figura 7: Ponte de uma fazenda na Nova Zelândia.....	26
Figura 8: Formação do mecanismo Vierendeel.....	29
Figura 9: Redução na curva de iteração flexão-cisalhamento de seções perfuradas devido ao mecanismo Vierendeel	30
Figura 10: Ruptura na solda.....	31
Figura 11: Flambagem do montante da alma por cisalhamento.....	31
Figura 12: Flambagem do montante da alma por cisalhamento.....	32
Figura 13: Flambagem lateral com torção.....	33
Figura 14: Modos de falha de uma viga mista com aberturas.....	34
Figura 15: Elementos das vigas casteladas alveolares.....	36
Figura 16: Geometria da seção transversal das vigas alveolares.....	36
Figura 17: Geometria de uma viga Celular	37
Figura 18: Geometria de uma viga castelada no padrão Anglo-Saxão.....	38
Figura 19: Geometria de uma viga castelada no padrão Peiner	39
Figura 20: Geometria de uma viga castelada no padrão Litzka	39
Figura 21: Vigas Casteladas com altura variável	40
Figura 22: Padrão de corte das vigas casteladas e celulares.....	40
Figura 23: Parâmetros geométricos para vigas casteladas.....	45
Figura 24: Parâmetros geométricos da viga celular para sistemas de piso.....	47
Figura 25: Analogia de viga Vierendeel para vigas alveolares	48
Figura 26: Elementos adotados para análise de tensões na seção transversal de uma viga castelada.....	49
Figura 27: Forças atuantes no alvéolo de uma viga castelada.....	49
Figura 28: Tensões significativas no cordão da seção 2.....	50

Figura 29: Método gráfico para determinação da seção mais desfavorável em uma viga alveolar	53
Figura 30: Viga castelada com carregamento uniformemente distribuído.....	53
Figura 31: Elementos para o estudo dos esforços no montante de alma em vigas: (a) casteladas e (b) celulares.....	55
Figura 32: Geometria das seções	60
Figura 33: Elementos de uma viga mista com aberturas	66
Figura 34: Distribuição de tensões em viga mista com abertura.....	70
Figura 35: Forças entre aberturas para aberturas circulares	75
Figura 36: Sequência de procedimento realizado pelas das planilhas para verificação de vigas	82
Figura 37: Dados de entrada referentes ao perfil de alma cheia.....	83
Figura 38: Dados de entrada referentes ao perfil castelado.....	84
Figura 39: Dados de entrada referentes aos parâmetros da viga castelada.....	84
Figura 40: Dados de entrada referente ao material utilizado e coeficientes estruturais	85
Figura 41: Dados de entrada referente a geometria e carregamento do projeto	86
Figura 42: Planilha de verificação da viga de alma cheia	87
Figura 43: Planilha de cálculo dos parâmetros geométricos	88
Figura 44: Planilha de cálculo das propriedades	88
Figura 45: Planilha de cálculo das propriedades da seção líquida	89
Figura46: Planilha de cálculo dos modos de falha – Parte 1	89
Figura 47: Planilha de cálculo dos modos de falha – Parte 2.....	90
Figura 48: Planilha com os resultados das solicitações do projeto	90
Figura 49: Planilha com os gráficos de cortante (módulo) e momento fletor do projeto.....	91
Figura 50: Planilha com os resultados finais de projeto e comparações entre viga de alma cheia e castelada	92
Figura 51: Sequência de procedimento realizado pelas planilhas de verificação de vigas mistas	94
Figura 52: Planilha de entrada de dados: geometria e material do perfil	95
Figura 53: Planilha de entrada de dados: geometria e materiais da laje.....	96
Figura 54: Planilha de entrada de dados: conectores e outras informações	96
Figura 55: Planilha de entrada de dados: informações de projeto.....	97
Figura 56: Planilha de entrada de dados castelado: perfil	98

Figura 57: Planilha de entrada de dados castelado: informações das aberturas e castelamento	99
Figura 58: Planilha de entrada de dados castelado: informações do aço e laje	100
Figura 59: Planilha de entrada de dados castelado: informações do projeto.....	101
Figura 60: Planilha de dimensionamento de viga mista: parâmetros geométricos e de esbeltez	102
Figura 61: Planilha de dimensionamento de viga mista: verificações de flambagem local ...	102
Figura 62: Planilha de dimensionamento de viga mista: cálculo da linha neutra e momento fletor	103
Figura 63: Planilha de dimensionamento de viga mista: resistência ao esforço cortante	103
Figura 64: Planilha de dimensionamento de viga mista: distribuição dos conectores	104
Figura 65: Planilha de dimensionamento de viga mista: deslocamento máximo.....	104
Figura 66: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: distribuição dos conectores	105
Figura 67: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: momento resistente	106
Figura 68: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: geometria	107
Figura 69: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: solicitações.....	107
Figura 70: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: solicitações.....	108
Figura 71: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: esforço cortante.....	109
Figura 72: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: mecanismo de Vierendeel.....	110
Figura 73: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: esforços cortantes e flambagem alma	110
Figura 74: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: resistências limite ..	111
Figura 75: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: deslocamentos no centro do vão	112
Figura 76: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: deslocamento – aberturas múltiplas.....	112
Figura 77: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: parâmetros geométricos.	113
Figura 78: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: exigências e flambagem da mesa.....	114
Figura 79: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: distribuição dos conectores	114

Figura 80: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: linha neutra e momento resistente	115
Figura 81: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: geometria das aberturas .	115
Figura 82: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: solicitações.....	116
Figura 83: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: resistência ao momento fletor nas aberturas críticas	117
Figura 84: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: resistência ao esforço cortante	118
Figura 85: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: resistência ao mecanismo de vierendeel.....	119
Figura 86: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: demais verificações.....	119
Figura 87: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: deslocamento	120
Figura 88: Planilha de resultados: diagramas	121
Figura 89: Planilha de resultados: viga mista.....	121
Figura 90: Planilha de resultados: viga mista com aberturas – Parte 1	122
Figura 91: Planilha de resultados: viga mista com aberturas – Parte 2	123
Figura 92: Planilha de resultados: viga mista castelada	124
Figura 93: Viga A1 e geometria do perfil utilizado.....	125
Figura 94: Modelo ANSYS	128
Figura 95: Viga A2 e geometria dos perfis utilizados	129
Figura 96: Viga A3 e geometria do perfil utilizado.....	132
Figura 97: Modelos de falha do montante de alma da viga A3	134
Figura 98: Resultados da viga A4 para modos de falha do montante alma.....	136
Figura 99: Resultados da viga A5 para modos de falha (a) do montante alma (b) deslocamentos.....	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros geométricos para vigas casteladas	45
Tabela 2: Relações propostas para vigas celulares adequadas para sistemas de piso	47
Tabela 3: Relações propostas para vigas celulares adequadas para sistemas de cobertura.....	47
Tabela 4. Parâmetros geométricos para vigas mistas equivalentes	66
Tabela 5. Tabela de coeficientes dos materiais	68
Tabela 6. Limites para fator de redução máximo	69
Tabela 7. Fator de imperfeição	77
Tabela 8. Fator de imperfeição	77
Tabela 9. Variáveis adaptadas da viga mista com abertura para viga mista castelada.....	79
Tabela 10: Propriedades do perfil e material utilizados no exemplo A1.....	126
Tabela 11: Resultados do exemplo A1 para viga de alma cheia	126
Tabela 12: Resultados do exemplo A1 para viga castelada.....	126
Tabela 13: Comparação entre resultados de Momento Resistente	128
Tabela 14: Comparação entre deslocamentos máximos.....	128
Tabela 15: Propriedades do perfil e material utilizados no exemplo A2.....	129
Tabela 16: Resultados do exemplo A2 para viga de alma cheia	129
Tabela 17: Resultados do exemplo A2 para viga castelada.....	130
Tabela 18: Resultados do exemplo A2 para perfil W250x22,3 de alma cheia.....	131
Tabela 19: Resultados do exemplo A2 para perfil W250x17,9 castelada.....	131
Tabela 20: Propriedades do perfil e material utilizados no exemplo A3.....	132
Tabela 21: Resultados do exemplo A3 para viga castelada.....	133
Tabela 22: Parâmetros da abertura circular para o modelo A4	135
Tabela 23: Resultados do exemplo A4 para viga castelada.....	135
Tabela 24: Conjunto de Parâmetros para corte circular adotadas	137
Tabela 25: Resultados do exemplo A5 para viga castelada.....	137

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

a_0	largura do alvéolo
b	largura da laje de concreto
$b_{eff,o}$	largura efetiva da laje na abertura
b_i	largura da parte inclinada do alvéolo
b_f	largura da mesa do perfil
b_o	largura média abertura deck
$b_w ; s_o$	Distância horizontal entre alvéolos
b_{we}	largura do montante de extremidade
$b_{we,min}$	largura mínima do montante de extremidade
b_{ws}	largura efetiva do concreto para corte
c	seção crítica de uma viga castelada
d	altura do perfil
d_c	diâmetro do conector stud bolt
$d_g ; h$	altura final da viga castelada
$d_o ; D_o$	diâmetro do alvéolo
f	Deslocamento
f_{add}	deslocamento adicional no meio do vão devido a abertura
f_b	deslocamento desconsiderando as aberturas
f_M	deslocamento devido à flexão
f_V	deslocamento devido ao cisalhamento
f_{cd}	resistência de cálculo do concreto à compressão
f_{ck}	resistência característica do concreto à compressão
f_u	resistência à ruptura
f_y	resistência ao escoamento do aço

f_{yd}	resistência de cálculo ao escoamento do aço
h_{eff}	distância entre os centróides dos tês
h_{eo}	altura equivalente a abertura retangular
h_{exp}	altura do centro até o topo do alvéolo
h_F	distância entre laje e perfil; altura nominal da nervura da fôrma
h_o	altura do alvéolo; altura da abertura
h_p	a altura da chapa expansora
h_s	distância entre o topo do perfil e o topo da laje
h_t	altura do tê
$h_{w,T}$	altura da alma do tê
k	razão de expansão
k_o	fator de redução
k_t	fator de redução
$k_{t,max}$	fator de redução máximo
k_1	Parâmetro
l_e	largura equivalente a abertura retangular
l_o	largura da abertura
$l_{o,eff}$	largura equivalente efetiva
n	Número de alvéolos
n_r	Número de conectores por fileira
n_{sc}	Número de conectores até o centro da abertura
$n_{sc,o}$	Número de conectores entre aberturas
$n_{sc,s}$	Número de conectores entre as linhas adjacentes as aberturas
$p ; s$	passo; tamanho entre o início de um alvéolo e outro
q	Carga

r	raio de giração
t_c	espessura da laje de concreto
t_f	espessura da mesa
t_w	espessura da alma
x	Coordenada
y	coordenada; distância
y_a	distância entre topo do perfil e o centro de gravidade do tê superior
$y_b ; \bar{y}$	distância entre topo do alvéolo e o centro de gravidade do tê superior
y_o	distância do centro de gravidade do cordão ao eixo da viga
z_c	altura do concreto em compressão
z_{el}	distância entre o centróide do Tê até o topo do Tê
z_{pl}	distância da linha neutra do tê até o topo do tê
$A ; A_g$	área bruta da seção transversal
A_f	área da mesa
A_e	área equivalente da viga castelada
A_{sl}	área de reforço da armadura
$A_t ; A_{bT}$	área da seção transversal de um tê
A_v	área de influência do cortante
$A_{w,T}$	área da alma
C_b	fator de modificação para o diagrama de momento fletor não-uniforme
C_w	constante de empenamento
E	módulo de elasticidade do aço
E_c	módulo de elasticidade do concreto
G	módulo de elasticidade transversal do aço
I	momento de inércia

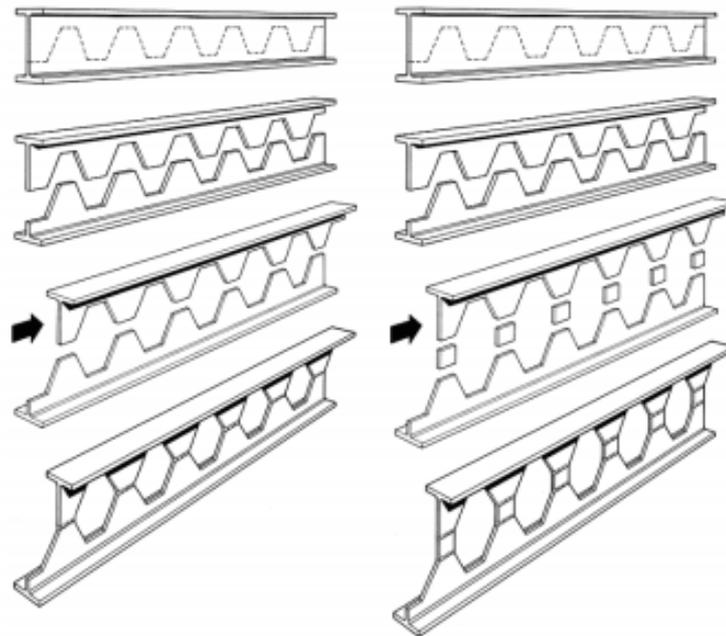
I_e	momento de inércia equivalente da viga castelada
I_t	momento de inércia do tê
I_x	momento de inércia no eixo x
I_y	momento de inércia no eixo y
J	constante de torção
$L; L_v$	vão
L_b	comprimento do vão destravado
L_d	comprimento útil para distribuição dos alvéolos
L_p	comprimento destravado, relacionado a plastificação
L_r	comprimento destravado, relacionado ao início do escoamento
L_r, cor	comprimento destravado corrigido, relacionado ao início do escoamento
M	momento fletor
$M_{b,NV,Rd}$	média da resistência local à flexão dos tês
$M_{bT,NV,Rd}$	resistência local à flexão do tê inferior
$M_{c,Rd}$	resistência ao momento fletor
M_{pl}	momento de plastificação da seção transversal
M_{plo}	momento de plastificação da viga castelada na seção do alvéolo
$M_{pl,Rd}$	resistência a flexão de cada tê
M_{Rk}	momento fletor resistente
M_{Sd}	momento fletor de cálculo
$M_{iT,NV,Rd}$	resistência local à flexão do tê superior
M_v	momento causado pela força cortante
$M_{vc,Rd}$	resistência proporcionada pela conexão laje/perfil na abertura
$M_{Vi,Sd}$	solicitação de vierendeel
$M_{wp,Rd}$	resistência ao momento no centro da abertura

N	força axial
$N_{a,Rd}$	resistência do perfil de aço
$N_{bT,Rd}$	resistente do tê
$N_{c,s,Rd}$	resistência da laje de concreto
$N_{Sd}; N_{cSd}$	solicitação a compressão na abertura
$N_{wp,Rd}$	resistência a compressão da alma
P_{Rd}	resistência do conector ao corte
R_d	resistência de cálculo; solicitação resistente de cálculo
R_k	resistência característica; resistência nominal
R_o	raio do alvéolo
S_d	solicitação de cálculo
V	força cortante
V_{cr}	força cortante crítica
$V_{b,Rd}$	resistência do tê inferior ao esforço cortante
$V_{c,Rd}$	resistência da laje de concreto ao esforço cortante
V_h	força cortante no centro do montante
V_{Rk}	força cortante característica de cálculo
V_{Rd}	força cortante resistente de cálculo
V_{Sd}	força cortante solicitante de cálculo
$V_{t,Rd}$	resistência do tê superior ao esforço cortante
$V_{wp,Rd}$	resistência à força cortante longitudinal
$V_{wp,Sd}$	solicitação à força cortante longitudinal
W	módulo de resistência elástico
Z_{xo}	módulo resistente plástico da viga expandida na seção do alvéolo
α	relação altura/diâmetro do conector

β_1	coeficiente
γ_{d1}	coeficiente de ponderação da resistência
γ_c	coeficiente de resistência do concreto
γ_s	coeficiente de reforço
γ_v	coeficiente de resistência do stud blot
γ_{M0}	coeficiente de resistência do perfil de aço
γ_{M1}	coeficiente de resistência do aço à instabilidade
η	razão entre o passo e o diâmetro da abertura
θ	ângulo entre raio e a altura da tensão máxima no montante
λ	índice de esbeltez; parâmetro de esbeltez
λ_p	parâmetro de esbeltez limite para seções compactas
λ_r	parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas
ρ	massa específica
σ	tensão normal
σ_{cp}	tensão de compressão no concreto
σ_{\max}	tensão normal máxima
σ_M	tensões normais originadas pelo momento fletor
σ_V	tensões tangenciais devidas ao esforço cortante
σ_1	tensão normal no ponto 1
τ	tensão cisalhante
τ_{\max}	tensão cisalhante máxima
$\Delta N_{c,Rd}$	incremento da resistência a compressão da laje
χ	fator de redução associado à resistência à compressão

1 INTRODUÇÃO

Para proporcionar a passagem de tubulações e dutos de grande diâmetro sob vigas de aço ou também por aspectos arquitetônicos, grandes vãos podem ser requeridos. A partir desta demanda, surgiram as vigas alveolares. A viga alveolares é feita a partir de um perfil I que é cortado longitudinalmente segundo um traçado padrão simétrico, para que posteriormente as metades sejam destacadas, deslocadas e soldadas no eixo, formando as aberturas ao longo da alma. O novo perfil tem a mesma massa, porém se torna mais rígido, e com a possibilidade de passagem de dutos e tubulações pelas aberturas. O processo pode ser visualizado na Figura 1.



Fonte: GRÜNBAUER (2012).

Figura 1: Esquema de viga castelada

As vigas alveolares de aço surgiram na Europa na primeira metade do século XX, devido à necessidade de perfis com altura superior à dos perfis I produzidos pela indústria da época. Essas vigas foram desenvolvidas e patenteadas em 1939 pelo inglês Geoffrey Murray Boyd. Devido ao alto custo de mão de obra, as vigas alveolares caíram em desuso durante

alguns anos. Atualmente, estas voltaram a ser opções competitivas devido aos avanços tecnológicos na área de automação que, possibilitaram executar os cortes e soldas no perfil com um custo mais baixo.

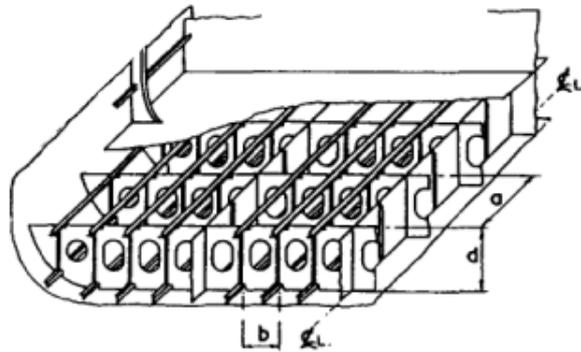
Conforme Oliveira (2012) o emprego de vigas casteladas apresenta algumas vantagens. O aumento da altura da seção incrementa o momento de inércia no plano principal de flexão, resultando em um aumento na rigidez e na resistência à flexão. Como a rigidez é majorada, a seção resiste a uma solicitação maior, resultando assim, em uma minoração do peso do perfil utilizado. Esse tipo de solução permite um melhor aproveitamento dos perfis original. Do ponto de vista arquitetônico, as vigas casteladas possibilitam a passagem de dutos e tubulações de serviço, evitando aberturas não projetadas. Além disso, essa solução transmite uma maior leveza visual que é um aspecto estético procurado.

Por outro lado, as vigas casteladas não são uma solução para todos os problemas, uma vez que apresentam uma redução na capacidade de resistência ao cisalhamento. Uma aplicação ideal para esse tipo de solução se dá em problemas onde predomina a exigência do critério de flecha máxima.

Uma das grandes utilizações das vigas casteladas são em situações nas quais necessita-se vencer grandes vãos, mas com cargas mais baixas, tais como coberturas de supermercados ou grandes lojas, vigas de coberturas, pisos de estações rodoviárias e ferroviárias, edifícios-garagem (necessita-se do menor número possível de pilares de modo a facilitar as manobras e otimizar o número de vagas), coberturas de galpões industriais em pórtico.

Outra vantagem das vigas casteladas é sua utilização em locais onde há necessidade de passagem de uma grande quantidade de dutos ou tubulações, tais como pontes de autoestrada ou viadutos nos quais os furos na alma das vigas são usados para acessos a serviços, inspeções e manutenções. Neste caso, torna-se propício as aberturas do tipo circulares, também chamadas de aberturas celulares.

Outro exemplo pode ser encontrado na indústria aeroespacial, sendo comum a abertura nas asas e fuselagens de aviões para passagem de dutos, fios elétricos e sistema de arrefecimento. Estas aberturas permitem os benefícios de inspeção, manutenção e servem para reduzir o peso global da estrutura. A Figura 2 mostra este exemplo.



Fonte: Shanmugam (1997).

Figura 2: Abertura em uma estrutura composta por placas

O Centro de Convenções World Trade Center, localizado em São Paulo é um exemplo onde necessitou-se de grandes vãos e a passagem de diversos dutos, conforme ilustra a Figura 3.



Fonte: Página da VALEMAM Perfis Metálicos

Figura 3: Centro de Convenções World Trade Center

Recentemente a Trensurb está estendendo sua linha de metrô até a cidade de Novo Hamburgo. Nesse processo, estão sendo construídas cinco novas estações fazendo o uso de vigas celulares. A Figura 4 mostra uma das novas estações.



Fonte: Página do ClicRS

Figura 4: Estação Santo Afonso - Novo Hamburgo



Fonte: Página da Tata Steel Limited

Figura 5: Kings Place, London

A Figura 5 mostra o edifício Kings Place localizado em Londres ainda na fase de construção, conforme se visualiza o edifício foi inteiramente construído em vigas casteladas mistas. O mesmo contém salões para concertos, uma galeria, auditórios e 7 andares de escritórios.

O maior salão para concertos do Kings Place é o No Hall One, seu espaço é amplo, tendo as seguintes dimensões: largura 22 m, comprimento 13 m e altura 12 m. A Figura 6 mostra o salão que fica localizado dentro do edifício.



Fonte: Página do Kings Place no prLeap

Figura 6: Hall One - Kings Place, London

As vigas casteladas também são utilizadas como passarelas e pontes, conforme mostra a Figura 7. As mesmas apresentam uma grande vantagem neste uso, pois apresentam uma menor área de resistência ao vento, reduzindo o empuxo horizontal da estrutura.



Fonte: Página do Lattey Civil & Precast Services Bridge Work

Figura 7: Ponte de uma fazenda na Nova Zelândia

Apesar das grandes vantagens e ampla utilização, as vigas casteladas têm carência de normas e procedimentos para o seu dimensionamento. As normas brasileira, americana e européia não apresentam nada sobre vigas casteladas, a norma britânica é a única a apresentar algum tipo de dimensionamento para as vigas casteladas, porém se limita a um tipo de padrão de corte. Nenhuma destas normas apresenta qualquer informação sobre vigas casteladas mistas.

As vigas casteladas são muito analisadas e modeladas desde sua criação, sendo possível, inclusive encontrar alguns estudos de dimensionamento baseados na norma brasileira. Entretanto, sobre vigas casteladas mistas não há de muito estudo, e praticamente nenhuma consideração é feita pela norma brasileira.

Frente a um mercado cada vez mais competitivo e exigente, em que os profissionais devem optar por uma determinada solução, mostra-se importante o estudo do roteiro de verificação e dimensionamento desta solução estrutural.

1.1 JUSTIFICATIVAS

Com as novas tecnologias, as vigas casteladas ressurgem como uma opção competitiva, porém as normas nacionais específicas para este tipo de vigas são mínimas. Com

critérios de dimensionamento em norma ausentes, são limitadas as possibilidades de uso desta solução estrutural.

O presente trabalho tem como objetivo analisar as vigas casteladas e vigas casteladas mistas, estabelecendo passos para seu dimensionamento comparando os resultados com as vigas de alma cheia e analisando os ganhos pela opção desta solução.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo analisar vigas casteladas e vigas casteladas mistas, tendo os seguintes objetivos específicos:

- Estudar analiticamente as vigas I e vigas mistas analiticamente e verificar a existência de normas e de procedimentos conhecidos na literatura;
- Analisar as referências encontradas e buscar um procedimento padronizado de dimensionamento de vigas casteladas e vigas casteladas mistas;
- Na falta de normas para vigas casteladas ou vigas casteladas mistas, propor um processo de dimensionamento para as mesmas utilizando as referências de vigas com aberturas e vigas mistas com aberturas;
- Construir planilhas utilizando a metodologia encontrada e/ou proposta para vigas casteladas e vigas casteladas mistas;
- Modelar numericamente via método dos elementos finitos comercial para analisar vigas casteladas;
- Comparar os resultados obtidos com vigas de alma cheia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As vigas casteladas foram patenteadas em 1939 pelo inglês Geoffrey Murray Boyd, e que expirou já há muitos anos, permitindo que qualquer fabricante de estruturas de aço produza estas vigas (Knowles 1991).

Conforme Litzka (1960) em meados do século passado, as vigas casteladas deixaram de ser uma solução competitiva, devido ao alto custo de produção e montagem da indústria da construção metálica, racionando o uso dos perfis de aço, sendo usados apenas em situações especiais.

Com os avanços tecnológicos, os sistemas de corte e solda foram automatizados, e as vigas casteladas voltaram a se tornar uma alternativa competitiva.

Desta forma, as vigas celulares também tem sido cada vez mais solicitadas, havendo sido patenteadas em 1990, sendo então mais novas se comparadas as vigas casteladas. Sua patente também encontra-se expirada, Estas vigas tem sido cada vez mais solicitadas por arquitetos, pois oferecem as vantagens das vigas casteladas e tem uma boa aparência estética (Hechler et al, 2006).

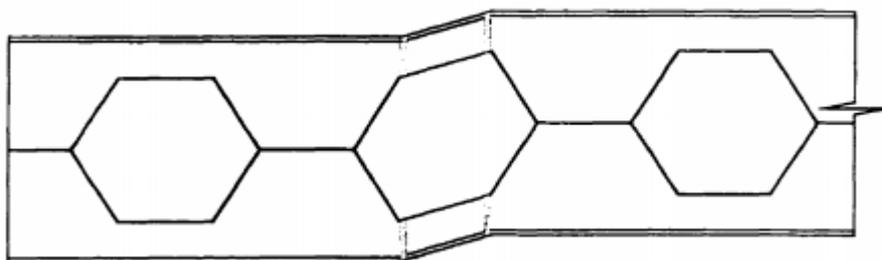
As vigas casteladas e celulares tiveram vários estudos analíticos, experimentais e numéricos, sendo os grandes pioneiros Nethercot e Kerdal (1982) e Kerdal e Nethercot (1984) que investigaram experimentalmente o comportamento e a estabilidade das vigas casteladas. A seguir, serão apresentados os modos de colapso que podem ocorrer em uma viga castelada e os principais estudos relacionados a cada modo.

2.1 MODOS DE COLAPSO DA VIGA CASTELADA

Além dos modos de colapso que aparecem em uma viga de alma cheia, na viga castelada aparecem outros modos devidos a esbeltez da alma e a presença das aberturas na alma (Kerdal & Nethercot, 1984). Apresentam-se na sequência os possíveis modos de falha.

2.1.1 Formação de um mecanismo Vierendeel

O mecanismo Vierendeel se torna presente em vigas de longos vãos e com uma relação vão/altura maior que 20. Ao transferir o cisalhamento lateral ao longo da parte com abertura da alma formam-se quatro rotulas plásticas conforme ilustra a Figura 8.



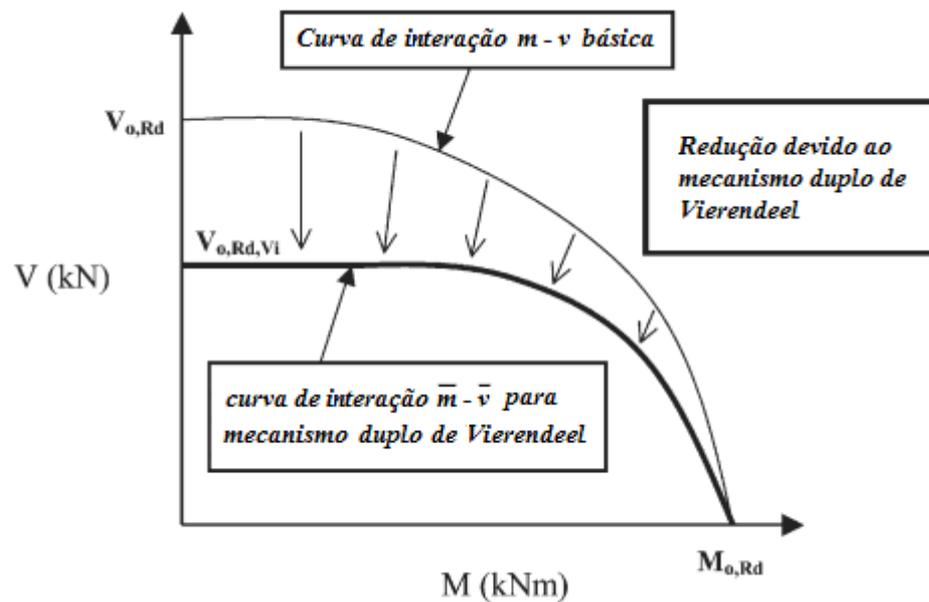
Fonte: Demirdjian (1999).

Figura 8: Formação do mecanismo Vierendeel

Esse modo foi relatado inicialmente por Altifillisch (1957, apud Kerdal e Nethercot, 1984) e Toprac e Cooke (1959). Conforme Chung et al. (2003), este mecanismo depende muito do comprimento que contém a abertura, e a resistência local ao cisalhamento e a flexão. Desta forma, é observado em vãos com aberturas alongadas e pequenas alturas, conforme estudos de Halleux (1967 apud Kerdal e Nethercot, 1984).

Chung et al. (2003) realizaram análises numérico-analíticas para avaliar a resistência ao mecanismo de Vierendeel em vigas de aço com furos circulares na alma. O efeito da flexão de Vierendeel que atua nos “Tês” pode ser considerado através de uma redução na capacidade de resistência ao cisalhamento global das seções perfuradas. Nas modelagens os autores propõem uma curva empírica de interação flexão-cisalhamento para o dimensionamento prático de vigas de aço com furo na alma. Foram consideradas diferentes tamanhos e formas de aberturas. Comparando as curvas de interação, encontrou-se uma similaridade entre as mesmas, sugeriram que seria possível o desenvolvimento de uma curva de interação flexão-cisalhamento generalizada. Os autores também concluíram que quanto maior a abertura e os esforços cisalhantes, maior a predominância de falha por mecanismo de Vierendeel.

A Figura 9 mostra a curva de interação global entre as resistências à flexão (m) e ao cisalhamento (v), sendo $M_{o,Sd}$ o momento global, $V_{o,Sd}$ a uma força de cisalhamento global e $V_{o,Sd,Vi}$ a resistência dupla ao cisalhamento global da seção perfurada.



Fonte: Adaptada de Chung et al. (2003).

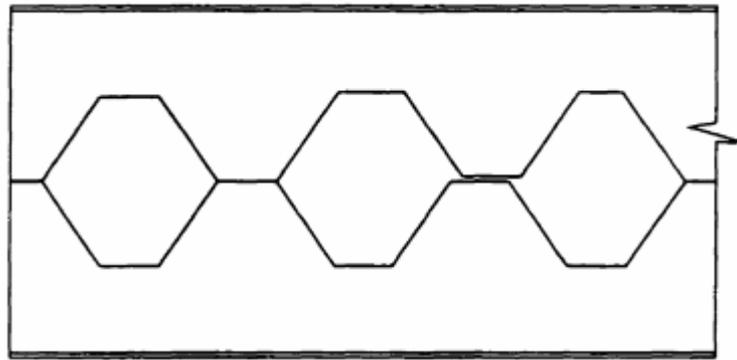
Figura 9: Redução na curva de interação flexão-cisalhamento de seções perfuradas devido ao mecanismo Vierendeel

2.1.2 Formação de rótula

As metades superior e inferior do perfil submetidos a um momento fletor escoam por tração e compressão, formando uma rótula plástica. Este modo de fratura foi apresentado por Toprac e Cook (1959) e Halleux (1967), sendo que o momento resistente é igual ao momento de plastificação, M_p que é o produto entre Z' e f_y , sendo Z' o módulo plástico no centro da abertura e f_y a resistência ao escoamento do aço.

2.1.3 Ruptura da solda entre as aberturas

A ruptura na solda ocorre quando a tensão horizontal de cisalhamento excede a capacidade resistente, conforme mostra a Figura 10. Este modo de colapso é predominante quando se reduz o comprimento da abertura para tentar evitar a falha por mecanismo de Vierendeel.



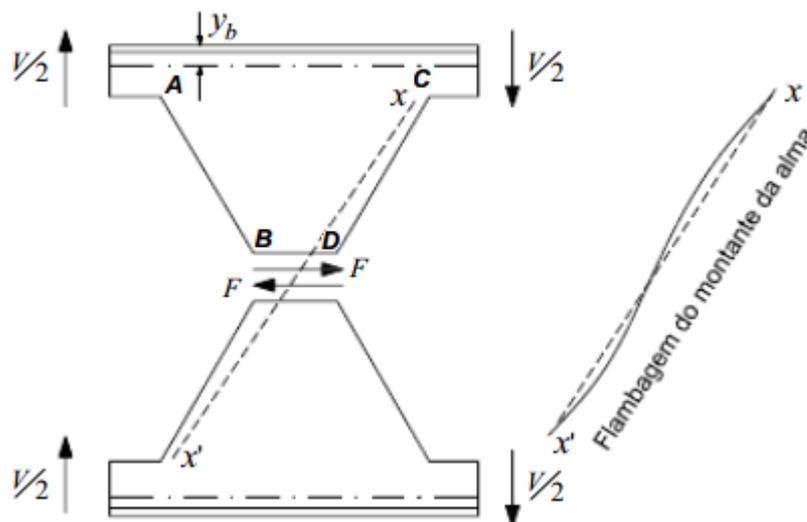
(Fonte: Demirdjian, 1999).

Figura 10: Ruptura na solda

Hosain e Speirs (1970) *apud* Kerdal e Nethercot (1984) realizaram ensaios para observar rupturas nas regiões de solda e concluíram que as vigas normalmente têm colapsos por outros modos do que por este. Desta forma, a ruptura da solda só acontece se as tensões no local da solda ultrapassarem a tensão de escoamento do material.

2.1.4 Flambagem do montante da alma devido à força cortante

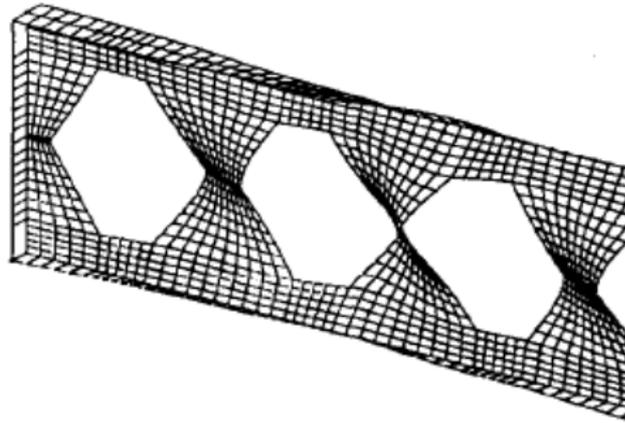
A força cisalhante atuante na solda gera um momento no montante da alma, equilibrado pela força cortante $V/2$. Desta forma, surgirão no trecho AB esforços de tração e de compressão no trecho CD, conforme mostra a Figura 11. Estes esforços podem gerar a flambagem do montante da alma por cisalhamento.



Fonte: Kerdal e Nethercot (1984).

Figura 11: Flambagem do montante da alma por cisalhamento

Zaarour e Redwood (1996) definiram os fatores que podem gerar este modo de ruptura: a altura da abertura pela altura total da seção, a altura da abertura pela largura mínima do montante de alma, a largura mínima do montante de alma pela espessura da chapa, a altura da chapa intermediária pela altura da abertura e a altura da chapa intermediária pela espessura da chapa.



Fonte: Redwood e Dermidjian (1998).

Figura 12: Flambagem do montante da alma por cisalhamento

A Figura 12 mostra o modo de flambagem do montante de alma por cisalhamento estudado por Redwood e Dermidjian (1998) por elementos finitos, onde foram conseguidas boas correlações entre resultados experimentais e as teorias estimadas.

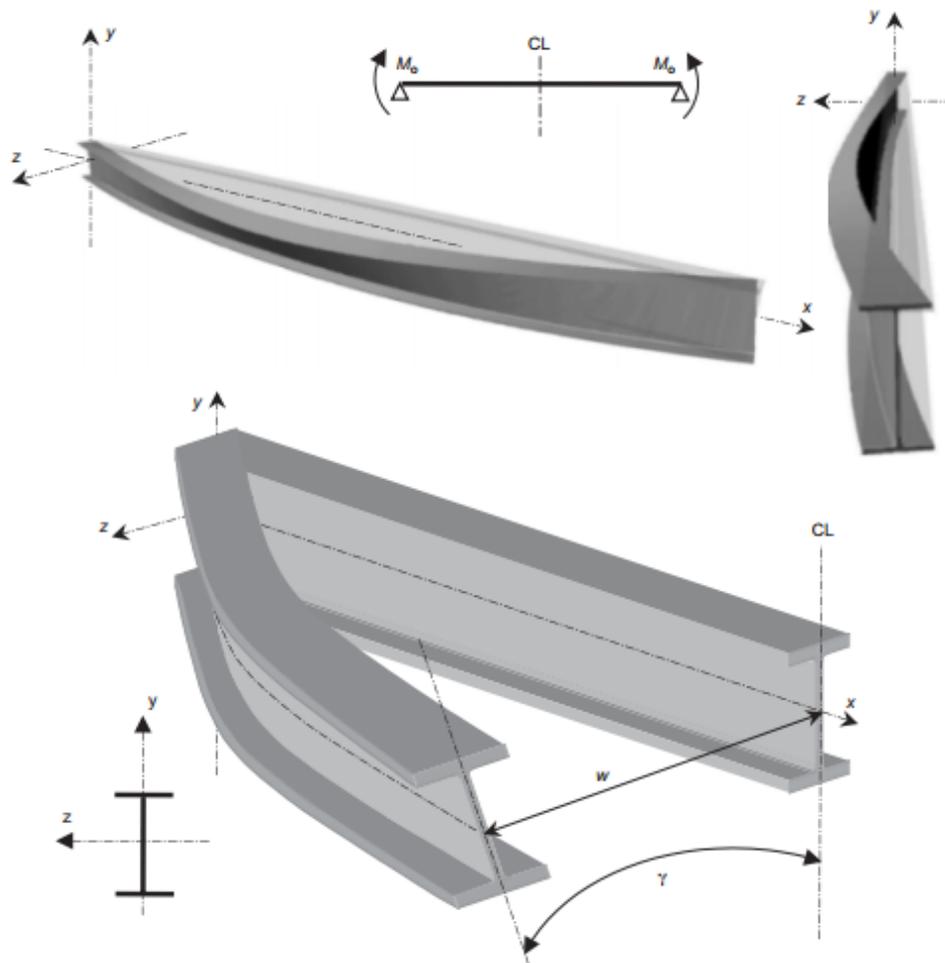
2.1.5 Flambagem por compressão do montante da alma

A flambagem por compressão do montante de alma aparece quando existe uma força concentrada ou uma reação de apoio aplicada diretamente no montante da alma. Neste modo de colapso, o montante da alma sofre um deslocamento para fora do plano da viga, não acompanhado de torção, como seria a flambagem por cisalhamento.

Este modo de colapso foi relatado experimentalmente por Toprac e Cook (1959), sendo evitado com reforços adequados.

2.1.6 Flambagem lateral com torção

A flambagem lateral com torção ocorre da mesma forma que em vigas com almas cheias, normalmente em vigas longas com apoios laterais inadequados, gerando uma translação lateral (w) e uma torção (γ) da seção transversal, conforme mostra a Figura 13.



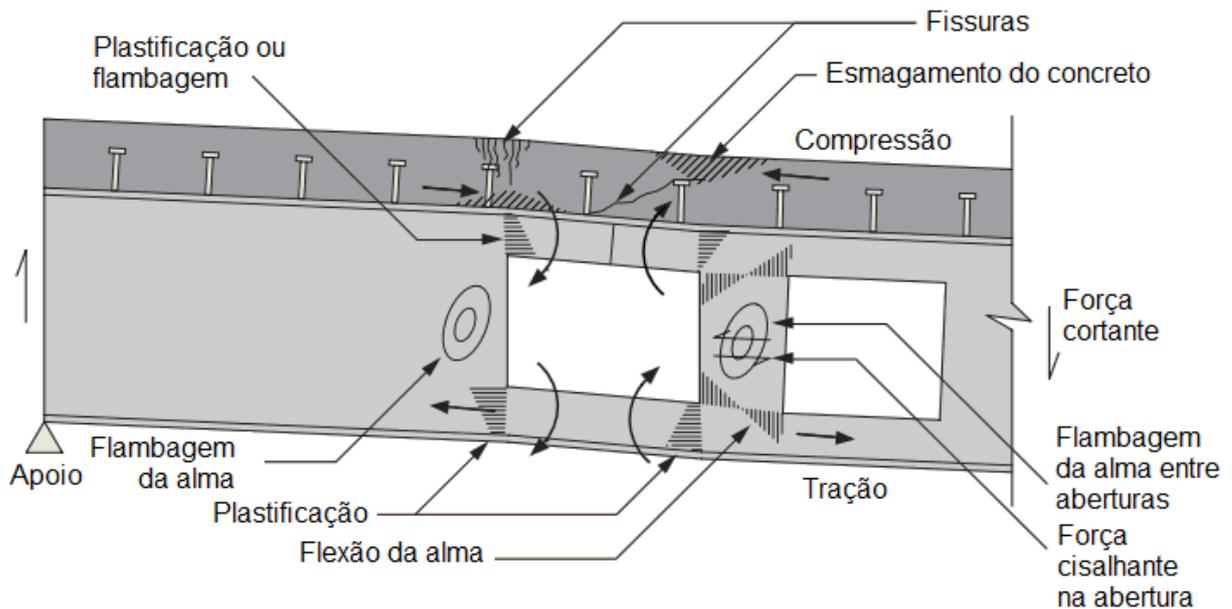
Fonte: Sayed-Ahmed (2004).

Figura 13: Flambagem lateral com torção

Inicialmente para Dermidjian (1999) e Nethercot e Kerdal (1982) as aberturas não influenciam neste modo. Porém Thevendran e Shanmugam (1991) estudaram vigas com aberturas circulares e retangulares, mostrando a influência das aberturas no momento fletor resistente para este modo de ruptura.

2.2 MODOS DE FALHA DA VIGA MISTA CASTELADA

Assim como nas vigas casteladas, as vigas casteladas mistas apresentam os mesmos modos de falha de uma viga mista de alma cheia e mais outros modos devido ao aumento da esbeltez do perfil. A Figura 14 apresenta os modos de falha em uma viga mista com aberturas.



Fonte: Adaptada de Lawson (2011).

Figura 14: Modos de falha de uma viga mista com aberturas

A seguir são apresentados os critérios que devem ser analisados para uma viga castelada mista ou com aberturas.

2.2.1 Resistência ao cisalhamento

A viga deverá suportar os esforços cortantes solicitantes nas regiões onde são localizadas as aberturas. A resistência na região das aberturas tem contribuições do perfil de aço, da laje de concreto (trabalhos recentes mostram que a largura efetiva da laje contribui com até três vezes a espessura da laje) e, principalmente, dos conectores.

2.2.2 Resistência ao momento fletor

Da mesma forma, a viga precisa resistir a solicitação do momento fletor, tanto a viga como um todo, quanto nas seções com aberturas. Quando a largura da laje é muito grande, os trechos da mesa não trabalham completamente ao momento fletor, desta forma é necessário reduzir a largura real pela largura efetiva. A resistência é calculada fazendo o equilíbrio de forças dos diagramas de tensões da laje e do perfil de aço.

2.2.3 Resistência à flexão de Vierendeel

Assim como nas vigas casteladas, a flexão de Vierendeel ocorre em regiões entre aberturas devido a transferência dos esforços de cisalhamento e sua resistência depende das resistências dos “Tês” e deve ultrapassar o esforço de cisalhamento atuante entre as aberturas.

Devido a esbeltez da alma e as aberturas, este modo de falha é mais frequente; por isto, as vezes é necessário enrijecedores horizontais soldados acima e abaixo da abertura para aumentar sua resistência.

2.2.4 Flambagem local da mesa

A flambagem local da mesa caracteriza-se pela ondulação dos elementos planos que compõem a seção transversal do perfil; a mesma flamba sob compressão devido à ação do momento global. O fator que tem maior influência sobre a flambagem local da mesa é a relação entre espessura e largura da mesa.

2.2.5 Flambagem da alma

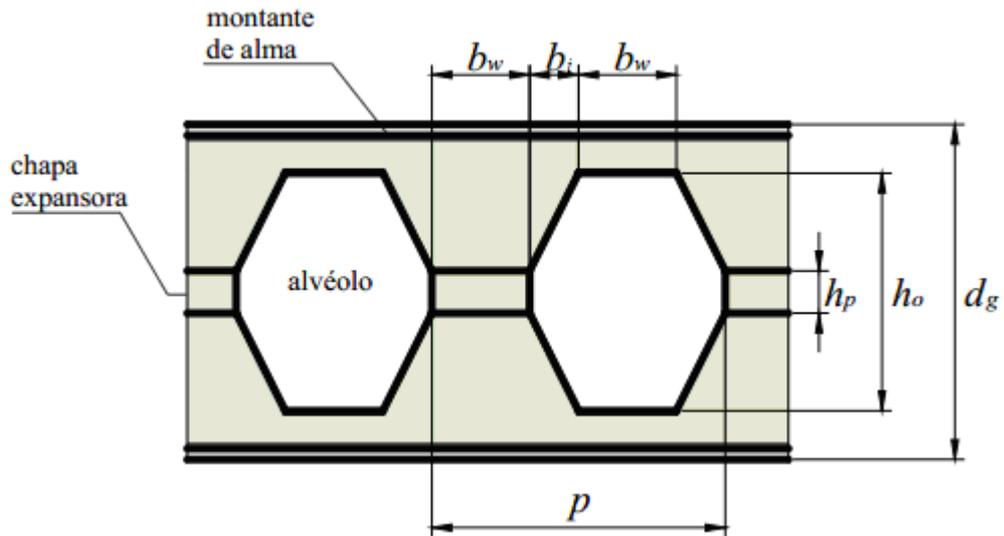
Com o aumento da altura da viga, a viga castelada pode ser facilmente suscetível a flambagem da alma, que depende principalmente da relação entre altura e espessura da alma. Ao redor das aberturas ocorre a transferência dos esforços, o que leva a compressão vertical local da alma neste lugar, grandes esforços de cisalhamento (maior intensidade na região dos apoios) horizontal nesta região também podem levar a flambagem da alma.

2.2.6 Flecha

Cada abertura contribui ao acréscimo da flecha no centro do vão em cerca 2% a 2,5%; comparado a viga de alma cheia; em vigas com diversas aberturas a flecha pode ter um acréscimo significativo.

2.3 DEFINIÇÕES E SIMBOLOGIA

As figuras 15 e 16 mostram a simbologia e algumas definições das vigas casteladas que serão utilizadas neste trabalho.

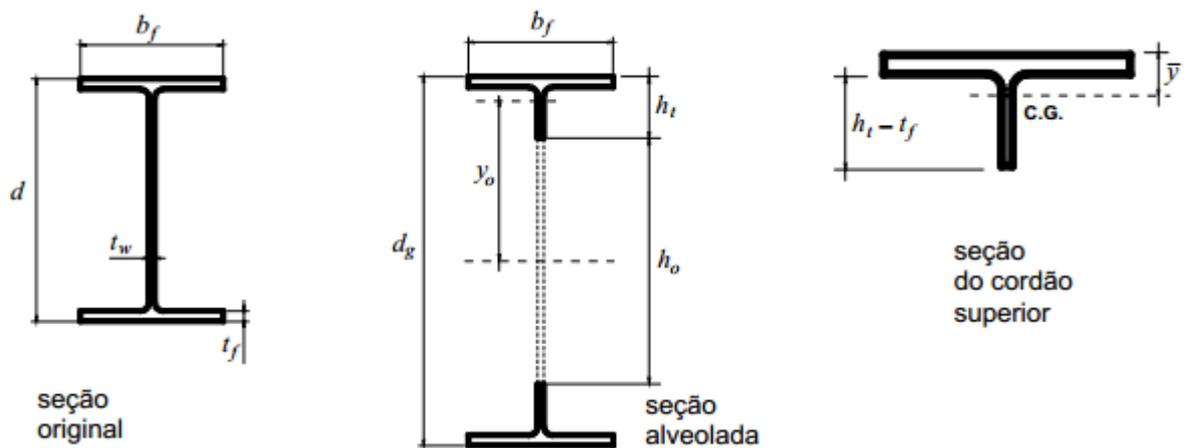


Fonte: Oliveira (2012).

Figura 15: Elementos das vigas casteladas alveolares

Tem-se que h_o é a altura do alvéolo, h_p é a altura da chapa expansora (peça opcional), d_g é a altura final da viga castelada, b_w é a distância horizontal entre alvéolos, b_i é a inclinação do alvéolo, e p (passo) é o tamanho entre o início de um alvéolo e outro. Para vigas casteladas de abertura circular D_o ou d_o é o diâmetro do alvéolo.

Nas vigas mistas com aberturas eventuais a distância entre aberturas b_w é chamada de s_o , p também é chamado de s , l_o é a largura das aberturas, b a largura da laje de concreto e t_c a espessura da laje de concreto.



Fonte: Veríssimo (2010).

Figura 16: Geometria da seção transversal das vigas alveolares

Por outro lado, b_f é a largura da mesa do perfil original, d a altura do perfil inicial, t_w a espessura da alma do perfil original, t_f a espessura da mesa do perfil original, y_o a distância do centro de gravidade do cordão ao eixo da viga e h_c a altura do cordão.

A “seção do cordão superior” também é referenciada como “tê superior”, o mesmo acontece para a seção inferior, que é denominado “tê inferior”, e para as duas seções, utiliza-se a denominação “tês”.

2.4 PADRÕES

Dos padrões mais utilizados estão:

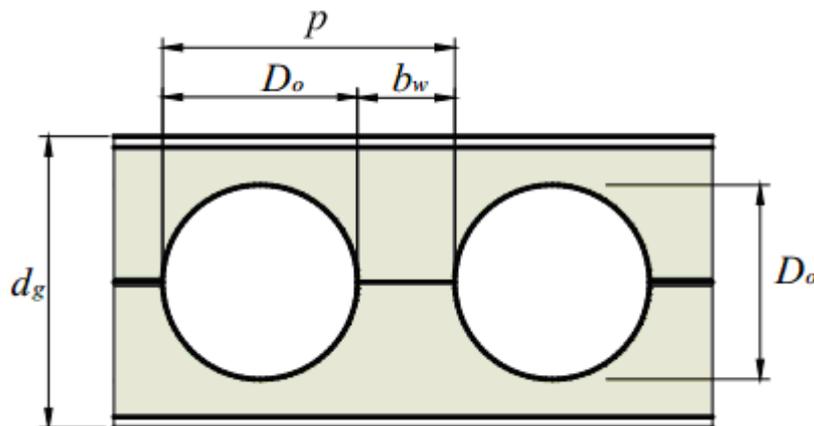
2.4.1 Viga Celular

A Figura 17 mostra o modelo que foi patenteado por Peter A. Walker, em 1990, mas encontra-se expirado. As configurações geométricas constantes em sua patente são:

- razão entre o diâmetro da abertura e altura da viga expandida de 0,67;
- razão entre o passo e o diâmetro igual a 1,25.

Existem diversas apresentações para os valores de passo e diâmetro; usualmente são mantidos valores dentro de limites que oferecem resultados compensadores, variando conforme se indica abaixo:

- passo de 1,08 a 1,5 vezes o valor do diâmetro;
- diâmetro de 0,57 a 0,8 vezes o valor da altura final.



Fonte: Oliveira (2012).

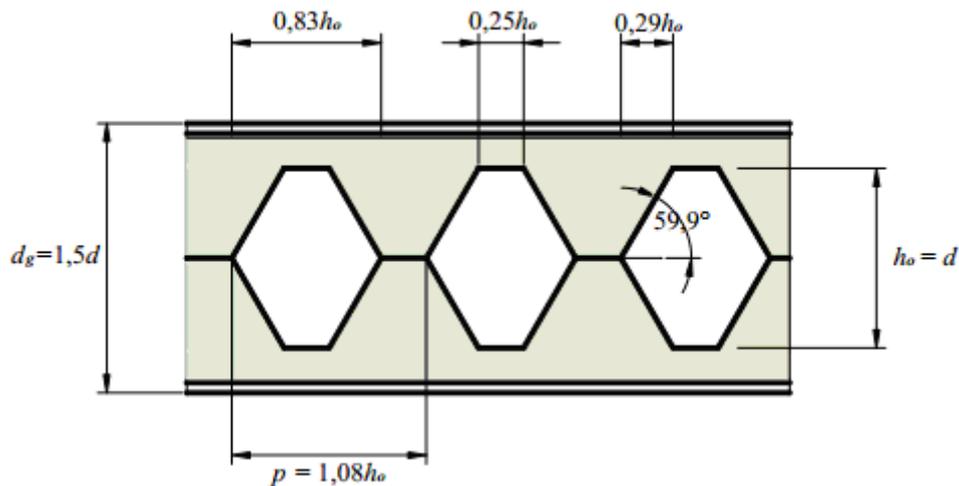
Figura 17: Geometria de uma viga Celular

2.4.2 Viga Anglo-Saxão

Tradicionalmente usada na Inglaterra, Estados Unidos e Canadá, foi difundida no Reino Unido e é especificada na BS 5950:2000, contendo as seguintes características:

- relação entre altura da viga castelada e altura da abertura igual 1,5 (nesse modelo a altura da abertura será também a altura do perfil inicial);
- passo de 1,08 vezes a altura do perfil inicial;
- ângulo da abertura hexagonal igual a 60° .

O valor ótimo do passo de $1,08d$ foi descrito por Dougherty (1993) e Demirdjian (1999), sendo a largura do montante suficiente para que não ocorra o rompimento da viga na região soldada e reduzida para evitar a formação de mecanismo plástico nos cordões. A Figura 18 mostra o modelo apresentado.

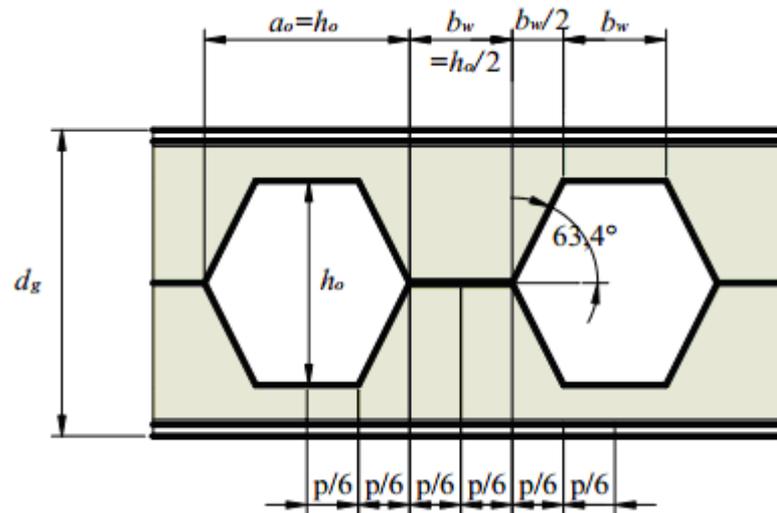


Fonte: Oliveira (2012).

Figura 18: Geometria de uma viga castelada no padrão Anglo-Saxão

2.4.3 Viga Peiner

O modelo apresentado na Figura 19 é tradicionalmente usado na Europa e tem as seguintes características: relação entre altura da viga castelada e altura da abertura igual 1,5 (nesse modelo a altura da abertura será também a altura do perfil inicial), passo igual a altura inicial do perfil, ângulo da abertura hexagonal igual a $63,4^\circ$.

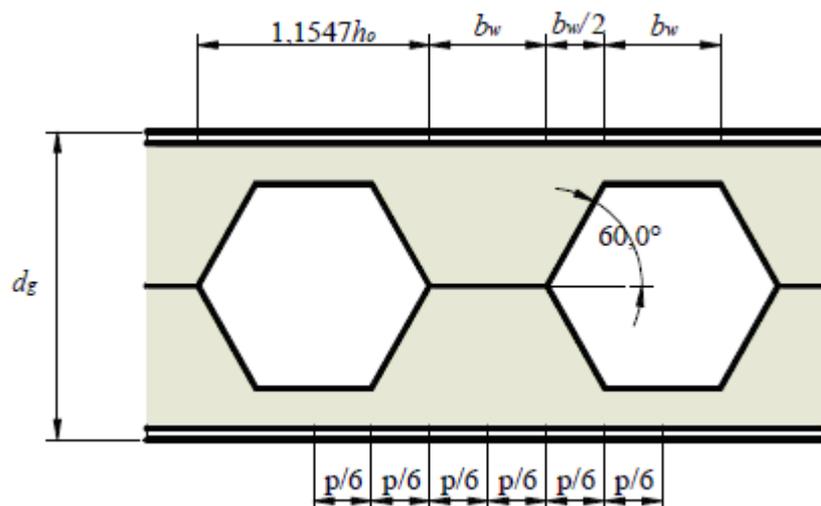


Fonte: Oliveira (2012).

Figura 19: Geometria de uma viga castelada no padrão Peiner

2.4.4 Viga Litzka

Na maioria dos países este modelo tem as mesmas características que o Peiner, porém nos países da Inglaterra, Estados Unidos e Canadá, o ângulo da abertura hexagonal também é usado com 60° . A Figura 20 mostra este modelo.



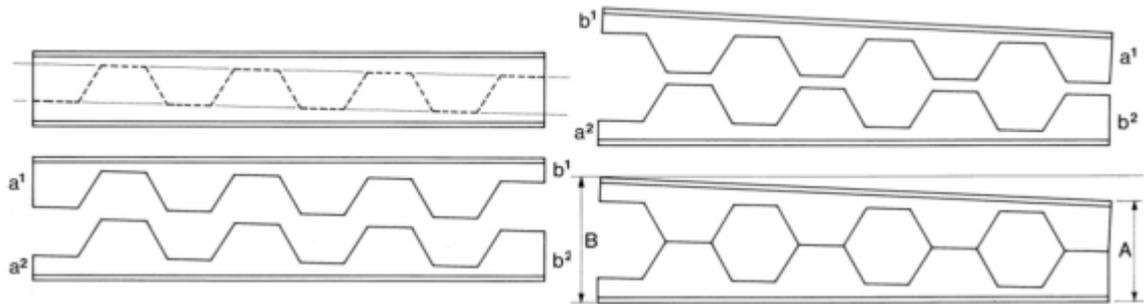
Fonte: Oliveira (2012).

Figura 20: Geometria de uma viga castelada no padrão Litzka

2.4.5 Outros

Devido a flexibilidade de corte das vigas casteladas, pode-se modificar a capacidade resistente ao longo do comprimento alterando o padrão de corte produzindo peças de alturas

variáveis. A Figura 21 mostra o corte levemente inclinado em relação ao eixo do perfil, após umas das peças é invertida, formando assim, uma seção com altura variável.



Fonte: Grünbauer (2012).

Figura 21: Vigas Casteladas com altura variável

2.5 PADRÕES DE CORTE

A Figura 22 mostra os padrões para a execução de corte e soldagem das vigas casteladas e celulares. Observa-se que as vigas casteladas tem um corte otimizado não tendo perdas de material, enquanto as vigas celulares necessitam de 2 cortes e tem perda de material.

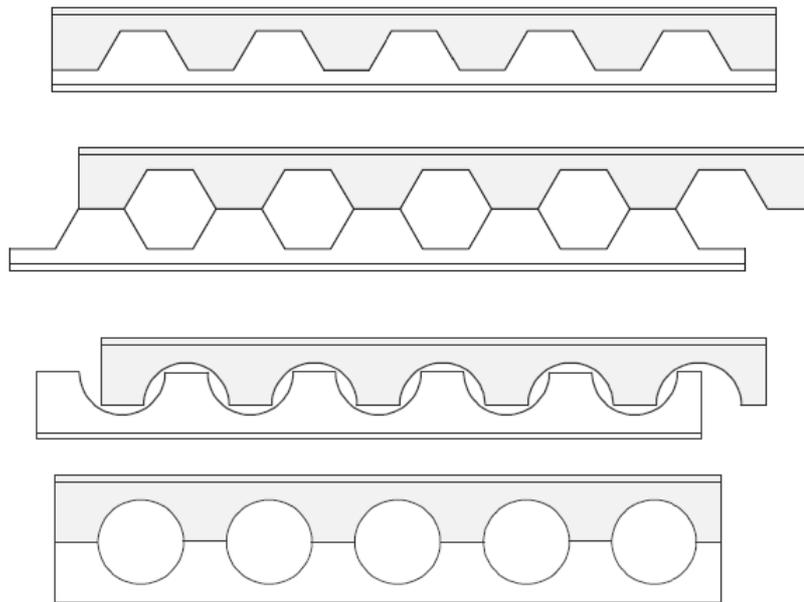


Figura 22: Padrão de corte das vigas casteladas e celulares

2.6 NORMAS DE DIMENSIONAMENTO

2.6.1 Norma Brasileira

As vigas de alma cheia são verificadas pela norma ABNT NBR 8800:2008, onde são estabelecidas as condições para o dimensionamento de barras prismáticas submetidas a flexão simples e esforço cortante.

O anexo I dessa norma, trata sobre aberturas circulares na alma da viga no formato de aberturas não significativas (cujas almas possuem uma relação entre altura e espessura limite de $h/t_w \leq 3,76\sqrt{E/f_y}$ e cuja mesa comprimida tenham uma relação limite de $b_f/2t_c \leq 0,38\sqrt{E/f_y}$); esses casos correspondem a uma ou mais aberturas, mas não sistematizados como as de uma viga castelada, nem de grandes dimensões. Nesses casos faz-se uma verificação simples, não havendo a necessidade de cálculos adicionais e reforços na abertura. Para aberturas significativas (maiores dimensões) ou aberturas sistematizadas (casteladas) a norma não tem um procedimento padrão, recomendando-se o estudo de outras bibliografias, sendo elas:

- Darwin, David (1990), Steel and composite with web openings. Steel Design Guide 2, American Institute of Steel Construction, Chicago.
- Lawson, R. M. (1987). Design for openings in the webs of composite beams, The Steel Construction Institute Ascot, Berkshire, UK.
- Veríssimo, G.S.; Fakury, R. H.; Ribeiro, J. C. L. (2006). Design Aids for Unreinforced Web Openings in Steel and Composite Beams with W-Shapes, AISC Engineering Journal, Third Quarter 2006, pp.163-172, American Institute for Steel Construction. Chicago.

As bibliografias indicadas na norma não apresentam um procedimento para dimensionamento de vigas casteladas ou vigas casteladas mistas, sendo úteis apenas para vigas e vigas mistas com aberturas eventuais na alma.

2.6.2 Normas Estrangeiras

A norma americana ANSI/AISC 360-10 (2010) que traz especificações para edifícios de estrutura metálicas, não apresenta nada sobre o dimensionamento de vigas casteladas, e para aberturas eventuais, recomenda algumas bibliografias externas.

A norma européia para o projeto de estruturas de aço, EUROCODE 3 (2005), não cita nem apresenta nenhum dimensionamento sobre vigas casteladas ou vigas casteladas mistas.

A norma britânica para o uso estrutural de estruturas de aço nas construções, BS 5950 (2001), contém informações sobre vigas casteladas. A mesma apresenta as dimensões e configurações da seção e regras para o dimensionamento para o tipo de viga castelada Anglo-Saxão.

2.7 TRABALHOS RECENTES

Cimadevila (2000) apresentou um estudo analítico, propondo equações para resistência das vigas casteladas e algumas das suas propriedades (como inércia e área equivalentes).

Lawson (2011) apresenta uma metodologia de cálculo para o dimensionamento de vigas mistas com aberturas eventuais (circulares, retangulares ou com aberturas alongadas). O estudo é baseado na norma européia EUROCODE 3 (2005). Não apresenta uma metodologia para análise dos modos de falha de vigas casteladas mistas, porém apresenta uma metodologia para dimensionamento do deslocamento máximo para uma viga mista com n aberturas.

Lawson (2006) apresenta um estudo analítico da resistência de vigas mistas com aberturas (circulares, retangulares ou com aberturas alongadas) para perfis assimétricos. Soluções fechadas foram propostas para permitir o dimensionamento das mesmas.

Atualmente, no Brasil, foram publicadas algumas dissertações de mestrados para o dimensionamento de alguns modos de falha de uma viga castelada; os estudos têm como base o roteiro de dimensionamento estabelecido pela norma nacional ABNT NBR 8800:2008.

Abreu (2010) observou o comportamento à flambagem lateral com torção de vigas celulares simétricas, e com base nos seus resultados numéricos, foi proposta uma metodologia tomando como referência na norma nacional.

Bezerra (2011) também avaliou o comportamento à flambagem lateral com torção, porém de vigas casteladas simétricas, e também considerando seus resultados numéricos, foi proposta uma metodologia com base na norma nacional.

Vieira (2011) realizou estudos numéricos no comportamento de vigas casteladas de aço com ênfase na instabilidade do montante da alma. Conclui que para carregamentos

uniformemente distribuídos e longos vãos, este modo de colapso é menos frequente que os demais modos.

Silveira (2011) desenvolveu estudos teóricos e numéricos da formação de rótulas plásticas das vigas casteladas e celulares. Com base em seus estudos, foram propostas novas expressões para estimar a capacidade resistente das vigas, relacionadas ao colapso por montante de alma por flexão e por cisalhamento, com base na norma nacional.

Ferrari (2013) realizou um estudo numérico para investigar o comportamento de vigas casteladas e celulares mistas de aço e concreto com base em resultados experimentais disponíveis na literatura. Todos os casos utilizados no estudo da validação apresentaram modos de colapso muito parecidos com os observados experimentalmente na literatura, representando com êxito a interação parcial e total entre o aço e o concreto.

Yuan (2013) apresentou um trabalho analítico para o cálculo da carga crítica de flambagem na utilização dos perfis castelados como colunas e não como vigas. Seu trabalho concluiu que as deformações por cisalhamento devem ser consideradas para esta configuração, pois as mesmas chegam até 25% do deslocamento total. A solução proposta teve uma boa concordância com as soluções numéricas utilizando elementos finitos.

3 VERIFICAÇÕES DE VIGAS CASTELADAS

Os roteiros de verificação apresentados nesta seção não são normalizados, mas buscam seguir o mesmo roteiro normalizado para dimensionamento de vigas de alma cheia, as mesmas verificações (com as devidas adaptações) e verificações extras necessárias devido ao castelamento da viga.

Os roteiros apresentados foram baseados principalmente em quatro trabalhos. Oliveira (2012) apresentou um estudo sobre os parâmetros geométricos das vigas casteladas. Cimadevila (2000) e Veríssimo (2012) apresentaram trabalhos analíticos para determinação dos modos de falha, Cimadevila (2000) também apresentou trabalhos para determinação das propriedades equivalentes da viga castelada. Bradley (2003) desenvolveu equações para determinação das propriedades da viga castelada.

Para a análise das vigas casteladas devem ser determinados inicialmente alguns parâmetros geométricos, e com estes dados, as mesmas podem ser dimensionadas. Os estudos para formulação são complexos, sendo apresentados os resultados de trabalhos teóricos e experimentais.

3.1 PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Os parâmetros geométricos dependem do tipo de castelamento utilizado; inicialmente serão apresentados os parâmetros referentes as aberturas hexagonais (padrões Litzka, Peiner e Anglo-Saxão) e após para aberturas circulares.

O valor da razão de expansão das vigas casteladas pode variar; Toprac e Cooke (1959) realizaram ensaios com diferentes valores de expansão. Foi observado que o ganho na resistência da viga castelada, se comparada à viga de alma cheia, acontecia até uma expansão de 1,5.

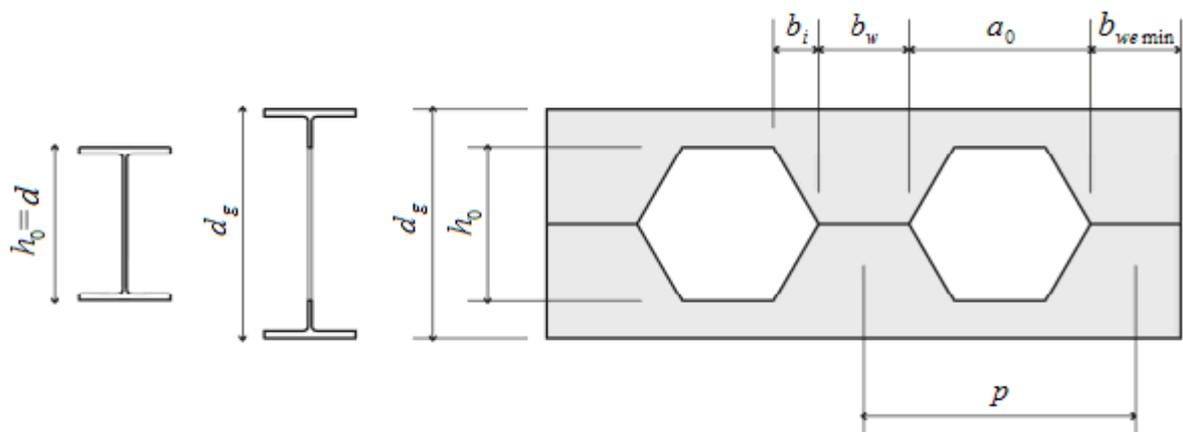
A partir deste estudo, passou a ser utilizado nos trabalhos subseqüentes de vigas casteladas, um valor ótimo para a altura do perfil alveolar (d_g) como sendo a altura do perfil original multiplicada pela razão de expansão com melhor ganho ($d_g = 1,5d$).

Outros parâmetros a serem determinados são obtidos a partir das dimensões do perfil original e do tipo de padrão de viga castelada adotada. Na tabela 1 encontram-se o cálculo destes parâmetros.

Tabela 1. Parâmetros geométricos para vigas casteladas

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

Cada tipo de padrão de abertura tem uma geometria; a partir desta geometria pode-se montar a tabela acima. Na figura 23, são apresentados os parâmetros da tabela acima para um perfil genérico.



Fonte: Adaptada de Oliveira (2012).

Figura 23: Parâmetros geométricos para vigas casteladas

Para iniciar o dimensionamento da viga castelada, ainda faltam os seguintes parâmetros geométricos: comprimento útil para distribuição dos alvéolos (L_d), número de

alvéolos (n) e largura mínima total do montante de extremidade (b_{we}). Para o cálculo destes parâmetros, inicialmente é calculado a largura mínima do montante de extremidade ($b_{we\ min}$).

No montante extremo é onde atua a sollicitação do cortante crítica; para que esta região não fique menos resistente que o restante da viga, a largura $b_{we\ min}$ deve ter um valor pelo menos igual a largura dos montantes intermediários (b_w); assim $b_{we\ min} \geq b_w$.

Por outro lado, $b_{we\ min}$ deve ter um valor tal que seja possível realizar a execução da ligação entre a viga e o restante da estrutura. As dimensões de uma cantoneira de ligação (soldada ou parafusada) devem ser compatíveis com a capacidade resistente da seção do perfil (BAIÃO FILHO e SILVA, 2010) conforme a série do perfil. Para perfis da série W150 à W460 recomenda-se a cantoneira de 76mm ($b_{we\ min} \geq 76mm$) e para série W530 à 610 recomenda-se a cantoneira de 102mm ($b_{we\ min} \geq 102mm$).

O valor final para $b_{we\ min}$, deve atender aos dois critérios apresentados.

Pode-se calcular agora o comprimento útil onde serão distribuídos os alvéolos (L_d), conforme equação (1).

$$L_d \leq L_v - 2 \left(b_{we\ min} - \frac{b_w}{2} \right) \quad (1)$$

em que L_v é o vão de projeto e as demais variáveis já foram definidas (Figura 23).

Assim o numero de alvéolos pode ser calculado conforme equação (2).

$$n = INT \left(\frac{L_d}{p} \right) \quad (2)$$

A equação (3) calcula a largura final do montante de extremidade, que é ajustada conforme o arredondamento do número de alvéolos e sua distribuição ao longo do vão.

$$b_{we} = \frac{L_v - (n \cdot p - b_w)}{2} \quad (3)$$

A razão de expansão, largura do alvéolo e diâmetro do alvéolo em vigas de aberturas circulares não são fixos como em aberturas hexagonais. As tabelas 2 e 3 apresentam a flexibilidade destes parâmetros para sistemas de cobertura e piso.

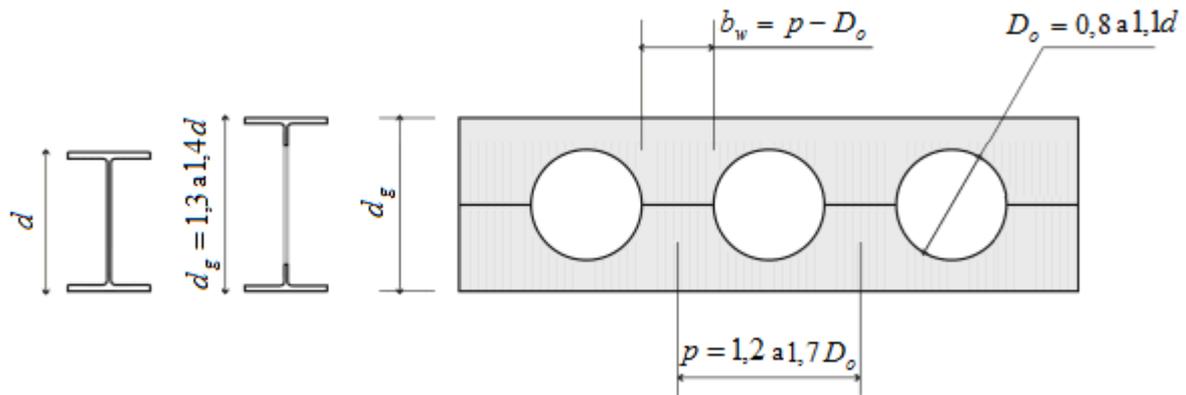
Tabela 2: Relações propostas para vigas celulares adequadas para sistemas de piso

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

Tabela 3: Relações propostas para vigas celulares adequadas para sistemas de cobertura

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

A Figura 24 ilustra os parâmetros adotados e o valor de b_w , que é obtido com a subtração do diâmetro de abertura do passo.



Fonte: Adaptada de Oliveira (2012).

Figura 24: Parâmetros geométricos da viga celular para sistemas de piso

Independente do sistema e parâmetros adotados, devem ser verificados os limites para o valor de b_w ; o catálogo de vigas da ArcelorMittal (2008) sugere valores mínimos e máximos, conforme equações (4), (5) e (6):

$$b_{w \min} \geq \begin{cases} D_o / 12 \\ 50 \text{mm} \end{cases} \quad (4)$$

$$b_{w\max} \leq \frac{D_o}{1,25} \quad (5)$$

$$b_{we\min} \geq p - \frac{D_o}{2} \quad (6)$$

em que D_o é o diâmetro da abertura celular.

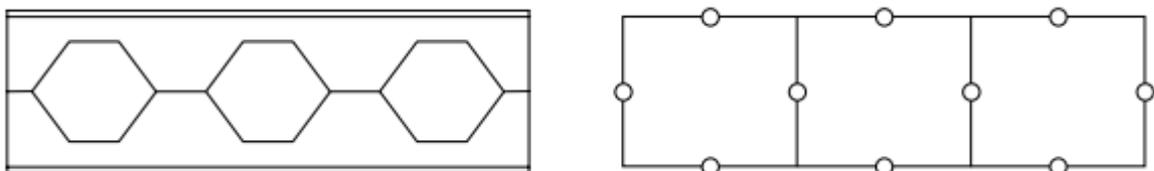
3.2 MODOS DE FALHA

Apresentam-se as verificações de cada um dos modos de falha mostrados anteriormente, bem como a formulação para verificação da estrutura pelo critério dos deslocamentos verticais excessivos (flechas), critério que também deve ser verificado para uma viga de alma cheia, conforme a ABNT NBR 8800:2008.

Devido à complexidade do estudo analítico das vigas casteladas são encontrados poucos trabalhos na literatura. Os dois trabalhos que se destacam são os de Delesques (1968 e 1969) e Cimadevila (2000).

Delesques (1968 e 1969) estudou a estabilidade dos montantes de alma de vigas casteladas de aço; em seu trabalho desenvolveu uma formulação para a verificação da capacidade resistente das vigas casteladas. Para isto, assumiu algumas simplificações, tais como, associar o comportamento da viga castelada ao de uma viga Vierendeel com articulações no ponto médio dos montantes e dos segmentos de banzo entre montantes e com as cargas aplicadas aos nós.

A Figura 25 apresenta esta simplificação, que possibilita a análise da estrutura similarmente a de uma treliça isostática, em que os nós coincidem com as seções para as quais se considera o momento nulo.

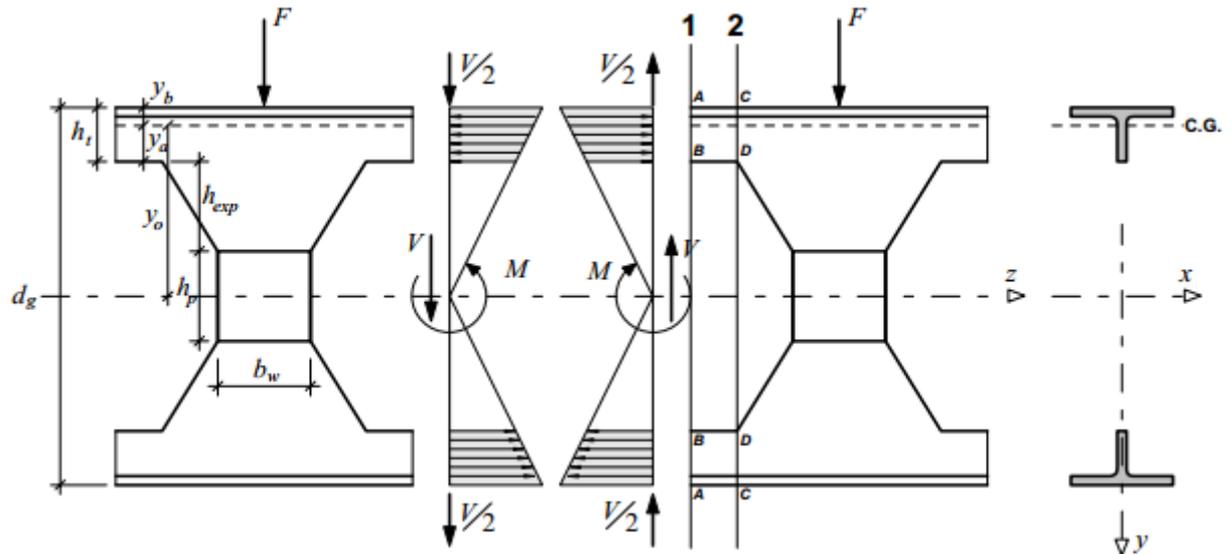


Fonte: Veríssimo (2012).

Figura 25: Analogia de viga Vierendeel para vigas alveolares

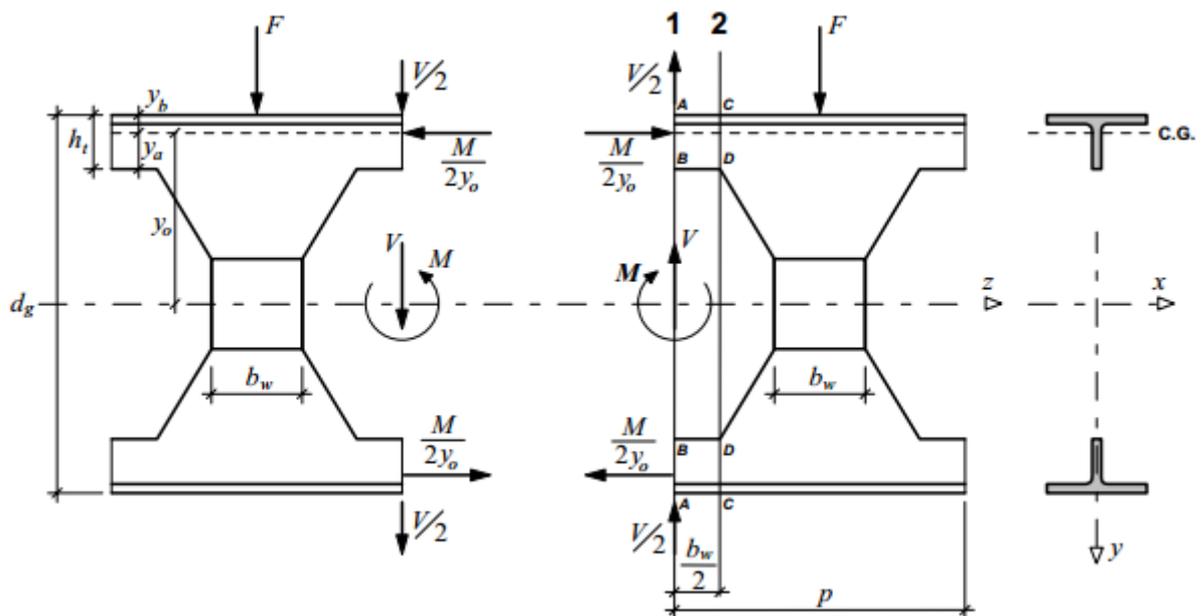
3.2.1 Formação de mecanismo plástico

A Figura 26 mostra apenas os elementos entre as rótulas da Figura 25, apresentando a distribuição dos esforços nos trechos alveolares.



Fonte: Veríssimo (2012).

Figura 26: Elementos adotados para análise de tensões na seção transversal de uma viga castelada



Fonte: Veríssimo (2012).

Figura 27: Forças atuantes no alvéolo de uma viga castelada

Cimadevila (2000) constatou que a seção mais desfavorável é a seção 2 conforme mostra a Figura 27, devidas às das tensões normais e de cisalhamento provocadas pelo

momento fletor e o esforço cortante, respectivamente. A ação da força cortante em balanço na extremidade do “tê” cria uma flexão produzindo uma parcela adicional de tensão.

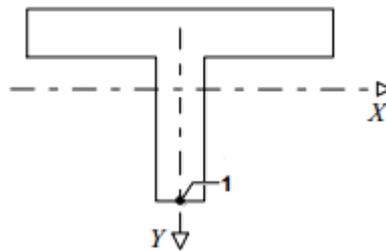
O Momento causado pela força cortante na seção dos cordões correspondentes ao segmento CD pode ser escrito como:

$$M_v = \frac{V b_w}{2} = \frac{V b_w}{4} \quad (7)$$

A tensão máxima causada por M_v acontece na fibra mais afastada, localizada na ponta da alma do “tê”, sendo escrita como:

$$\sigma_v = \frac{V b_w y_a}{4 I_t} \quad (8)$$

A Figura 28 mostra a seção 2 detalhadamente, onde são analisadas as demais tensões atuantes.



Fonte: Adaptada de Cimadevila (2000).

Figura 28: Tensões significativas no cordão da seção 2

O estado de tensões no ponto 1 é representado por $\sigma_M = \frac{M}{2y_o A_t}$ e $\sigma_v = \frac{V b_w y_a}{4 I_t}$, sendo σ_M as tensões normais originadas pelo momento fletor M , σ_v as tensões tangenciais devidas ao esforço cortante V , A_t a área da seção transversal de um “tê”, I_t o momento de inércia de um “tê” e demais variáveis já definidas, conforme apresentadas na Figura 27.

Como,

$$\sigma_1 = \sigma_M + \sigma_v \leq f_y \quad (9)$$

Obtém-se substituindo as definições anteriores, e desenvolvendo a equação (9), que:

$$\frac{M}{2y_o A_t} + \frac{V b_w y_a}{4 I_t} \leq f_y \quad (10)$$

Operando com a equação (10) tem-se:

$$\frac{4MI_t + 2y_o A_t V b_w y_a}{2y_o A_t 4I_t} \leq f_y \quad (11)$$

que pode ser escrita como:

$$M + \left(\frac{y_o A_t b_w y_a}{2I_t} \right) V \leq 2y_o A_t f_y = M_{plo} \quad (12)$$

em que M_{plo} é o momento de plastificação da viga castelada na seção do alvéolo. A equação (12) pode ser rescrita como:

$$M + cV \leq M_{plo} \quad (13)$$

em que,

$$c = \frac{y_o y_a b_w A_t}{2I_t} \quad (14)$$

em que A_t e I_t são a área da seção transversal e o momento de inércia de um “tê”, mostradas nas equações (15) e (16) respectivamente.

$$A_t = \frac{A_g}{2} - \frac{h_o - h_p}{4} t_w \quad (15)$$

$$I_t = \frac{b_f t_f^3}{12} + b_f t_f \left(\frac{-}{y} - \frac{t_f}{2} \right)^2 + \frac{t_w (h_t - t_f)^3}{12} + t_w (h_t - t_f) \left(\frac{-}{y} - \frac{h_t + t_f}{2} \right)^2 \quad (16)$$

cujas constantes já foram definidas conforme Figura 26 e são dadas por.

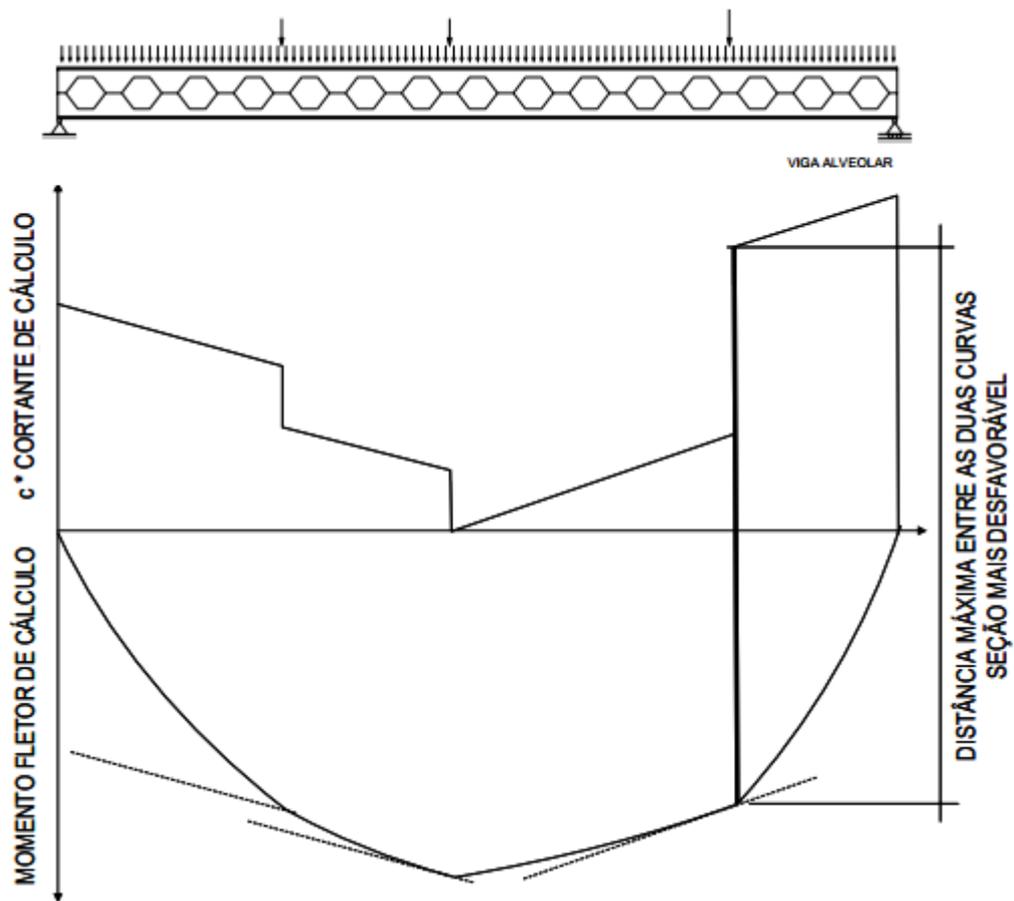
$$\bar{y} = \frac{b_f t_f^2 + h_t^2 - t_f^2 t_w}{2(b_f t_f + h_t t_w - t_f t_w)} \quad (17)$$

$$h_t = \frac{d_g - h_o}{2} \quad (18)$$

$$y_o = \frac{h_o}{2} + h_t - \bar{y} \quad (19)$$

A priori, não se pode dizer em qual parte viga, as combinações de momento fletor e força cortante são mais desfavoráveis, pois esta depende da configuração do carregamento da estrutura. Delesques (1969) sugere um procedimento prático para determinar a seção mais crítica em uma viga castelada submetida a um carregamento genérico.

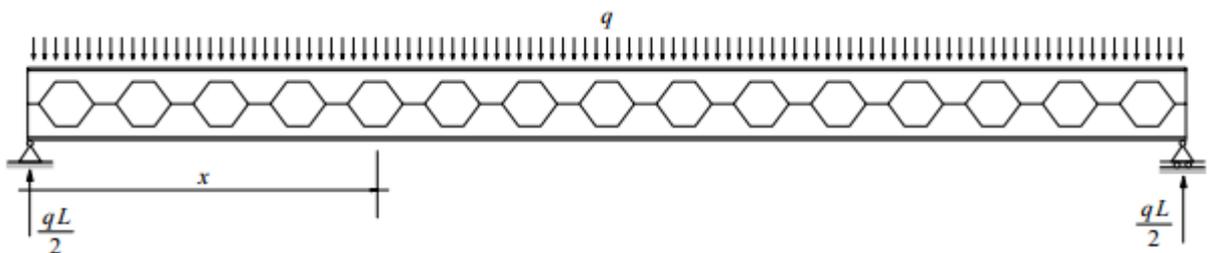
Como se verifica na Figura 29, utilizam-se os diagramas do módulo do momento fletor (M) e do módulo da força cortante (V) ponderado pela constante c. O A seguir faz-se a soma ponto a ponto desses dois diagramas. O ponto com maior valor, que corresponde a maior distância entre os gráficos, é a seção crítica da viga castelada.



Fonte: Veríssimo (2012).

Figura 29: Método gráfico para determinação da seção mais desfavorável em uma viga alveolar

As vigas casteladas não são adequadas ao uso de cargas concentradas, por isto e para a parametrização do cálculo do ponto onde a seção é crítica, é utilizado um sistema com uma viga biapoiada com carregamento uniformemente distribuído.



Fonte: Veríssimo (2012).

Figura 30: Viga castelada com carregamento uniformemente distribuído

A Figura 30 representa o modelo considerado para a viga, tendo as seguintes equações de momento e cortante.

$$M = \frac{qL}{2}x - \frac{qx^2}{2} \Rightarrow \frac{dM}{dx} = \frac{qL}{2} - qx \quad (20)$$

$$V = \frac{qL}{2} - qx \Rightarrow \frac{dV}{dx} = -q \quad (21)$$

$$\frac{dM}{dx} + c \frac{dV}{dx} = 0 \Rightarrow x = \frac{L}{2} - c \quad (22)$$

Conforme demonstra a equação (22), nas vigas casteladas a seção mais desfavorável não coincide com a seção de momento máximo como nas vigas de alma cheia. A partir da equação (12) pode-se escrever a equação (23) que determina o estado-limite último de formação de mecanismo plástico:

$$M_{sd} + cV_{sd} \leq \frac{M_{plo}}{\gamma_{a1}} \quad (23)$$

em que M_{sd} é a solicitação de momento fletor, V_{sd} é a solicitação do esforço cortante, M_{plo} é o momento fletor de plastificação e γ_{a1} é o coeficiente de ponderação estrutural obtido na NBR 8800:2008.

Assim, o momento fletor de plastificação da seção transversal é dado pela equação:

$$M_{plo} = Z_{xo} f_y = 2y_o A_t f_y \quad (24)$$

em que f_y é a tensão de escoamento do aço e Z_{xo} o módulo resistente plástico da viga expandida na seção do alvéolo.

3.2.2 Escoamento do montante de alma por cisalhamento

O montante da viga castelada pode ter um colapso dependendo da geometria e carregamento aplicado, por isto é necessário estudar sua menor seção, que é apresentada na Figura 31.

Lembrando que o valor da força cortante resistente de cálculo (seguindo a ABNT NBR 8800:2008) é dado por:

$$V_{Rd1} = \frac{V_{Rk1}}{\gamma_{a1}} \quad (29)$$

em que V_{Rk1} é a força cortante característica de cálculo e γ_{a1} é o coeficiente de ponderação estrutural obtido na presente norma.

3.2.3 Escoamento do montante de alma por flexão

A força cortante V_h na articulação virtual admitida no centro do montante, conforme mostrado na Figura 31, produz sobre o montante, momentos fletores a uma distância y do eixo da viga assumindo o valor de “ $V_h \cdot y$ ”, produzindo sobre a seção de área $t_w \cdot b_m(y)$ uma tensão normal máxima dada por:

$$\sigma = \frac{V_h y}{\frac{t_w b_m^2}{6}} = \frac{6V_h y}{t_w b_m^2} \quad (30)$$

Aplicando a equação (25) na expressão acima e novamente desprezando $F/2$ pelo mesmo motivo anterior, pode-se rescrever essa equação como:

$$\sigma = \frac{3Vpy}{y_o t_w b_m^2(y)} \quad (31)$$

A função $b_m(y)$ varia para as vigas casteladas de aberturas hexagonais conforme equações (32) e (33), e para aberturas circulares conforme equação (34):

$$b_m = b_w \quad \text{para} \quad y \leq h_p / 2 \quad (32)$$

$$b_m = b_w + \frac{b_i}{h_{\text{exp}}}(2y - h_p) \quad \text{para} \quad h_p / 2 < y < h_{\text{exp}} + h_p / 2 \quad (33)$$

$$b_m = p - 2R_o \cos(\theta) \quad (34)$$

em que, b é a projeção horizontal do lado inclinado da abertura.

A coordenada y representa o ponto onde a tensão é máxima, a mesma pode ser obtida a partir da equação (35).

$$y = \frac{b_w h_{\text{exp}}}{2b_i} - \frac{h_p}{2} \quad (35)$$

Quando $y < h_p / 2$ tem-se que $b_m = b_w$, e nesse caso, o valor de coordenada da tensão máxima será:

$$y = \frac{h_p}{2} \quad (36)$$

Desta forma a tensão máxima é dada por:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{3}{8} \frac{h_{\text{exp}}^2 p V}{y_o t_w b_i (b_w h_{\text{exp}} - b h_p)} \leq f_y \quad \text{para} \quad 0 \leq h_p \leq \frac{b_w h_{\text{exp}}}{2b_i} \quad (37)$$

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{3}{2} \frac{V p h_p}{y_o t_w b_w^2} \leq f_y \quad \text{para} \quad h_p \geq \frac{b_w h_{\text{exp}}}{2b_i} \quad (38)$$

Utilizando o mesmo procedimento obtém-se o valor de tensão máxima para as aberturas circulares:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{3\eta V}{y_o t_w} \frac{\sqrt{4 - (\eta - \sqrt{\eta^2 + 8})^2}}{(3\eta - \sqrt{\eta^2 + 8})^2} \leq f_y \quad (39)$$

Em que $\eta = p / D_o$

Escrevendo as equações (37), (38) e (39) em termos da força cortante, tem-se:

$$V_{Rk2} \leq \frac{8 y_o t_w b_i (b_w h_{\text{exp}} - b h_p)}{3 h_{\text{exp}}^2 p} f_y \quad \text{para} \quad 0 \leq h_p \leq \frac{b_w h_{\text{exp}}}{2 b_i} \quad (40)$$

$$V_{Rk2} \leq \frac{2 y_o t_w b_w^2}{3 p h_p} f_y \quad \text{para} \quad h_p \geq \frac{b_w h_{\text{exp}}}{2 b_i} \quad (41)$$

$$V_{Rk2} \leq \frac{y_o t_w f_y}{3 \eta} \frac{(3 \eta - \sqrt{\eta^2 + 8})^2}{\sqrt{4 - (\eta - \sqrt{\eta^2 + 8})^2}} \quad (42)$$

Novamente, deve-se lembrar que o valor da força cortante de cálculo, seguindo as prescrições da ABNT NBR 8800: 2008 é dada por:

$$V_{Rd2} = \frac{V_{Rk2}}{\gamma_{a1}} \quad (43)$$

3.2.4 Flambagem do montante de alma

O estado-limite último de instabilidade dos montantes de alma foi estudado por Delesques (1968), este faz toda dedução da força cortante crítica (V_{cr}), porém a solução obtida é muito complexa e extensa, inviabilizando seu uso prático. O autor fez um novo estudo, e apresenta uma expressão simplificada, que tem dado bons resultados, sendo bastante adequada para o uso prático. A equação apresentada no estudo é:

$$V_{cr} = \frac{E t_w^3}{1,18 y_o} \left[1 + \left(1 - \frac{2 b_w}{p} \right) \left(\frac{y_o - 0,8 h_{\text{exp}} - h_p}{y_o} \right) \right] \quad (44)$$

A partir da força crítica, o autor propõe as seguintes condições:

$$V_{Sd} \leq \frac{2}{3} V_{cr} \quad \text{então} \quad \frac{V_{cr}}{V_{Rk2}} \leq 1$$

$$V_{Sd} \leq \frac{V_{Rk2} + V_{cr}}{3} \quad \text{então} \quad 1 \leq \frac{V_{cr}}{V_{Rk2}} \leq 2 \quad (45)$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rk2} \quad \text{então} \quad \frac{V_{cr}}{V_{Rk2}} \geq 2$$

Quanto maior a altura da viga, ou seja, principalmente quando são usadas chapas expansoras, maior é a tendência de ocorrer a flambagem do montante de alma. Por isto, deve-se avaliar as solicitações do projeto e a altura ideal, caso seja escolhido a utilização das chapas expansoras.

3.2.5 Flambagem lateral com torção

O processo para determinar a flambagem lateral com torção segue a mesma sequência da norma ABNT NBR 8800:2008, similar à determinação do mesmo para vigas de alma cheia, porém substituindo os parâmetros de esbeltez λ_p e λ_r e alguns ajustes adicionais conforme abaixo:

- Devem ser adotadas as propriedades geométricas da seção considerando as aberturas e utilizado a constante de empenamento (C_w) determinada por Kohnehpooshi e Showkati (2009) conforme: $C_w = \frac{I_y h^2}{4}$, em que, h é a distância entre os eixos centrais das mesas da viga castelada;

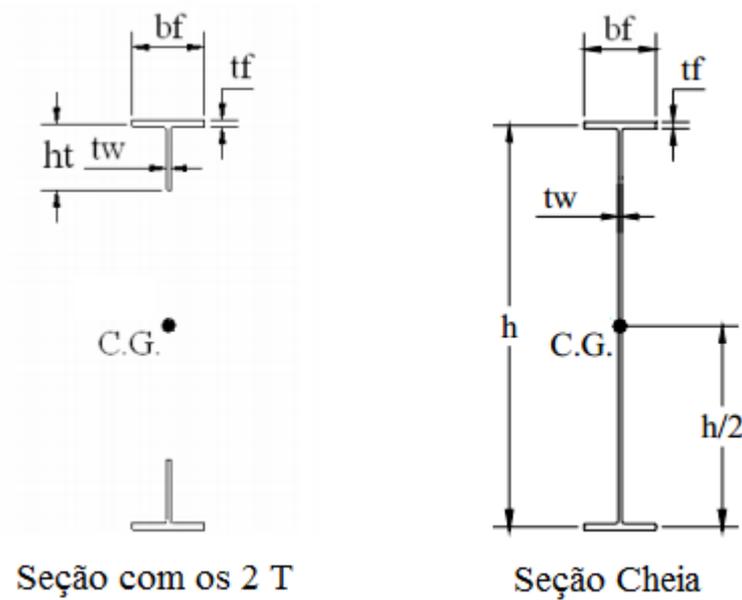
- Substituir o valor de L_r por um valor corrigido $L_{r,cor} = 1,2L_r$, conforme equação 52;

- Assumir um valor de momento fletor resistente máximo como 90% do momento de plastificação.

As propriedades geométricas foram estudadas por Bradley (2003), que em seu trabalho determinou o momento de inércia (I_y), constante de empenamento (C_w) e constante de torção (J) em três formas. Considerando a seção na abertura (formada apenas pelos dois “tês”), a viga sem a abertura, e uma ponderação considerando os dois resultados anteriores.

As equações (46) e (47) apresentam os valores para seção na abertura e as equações (48) e (49) para seção sem abertura conforme Bradley (2003). A Figura 32 mostra as seções

representadas no mesmo trabalho. Neste trabalho será adotado para cada uma das propriedades a soma das suas respectivas formulas ponderadas pela sua fração da viga.



Fonte: Adaptada de Bradley (2003).

Figura 32: Geometria das seções

$$J = \frac{1}{3}(b_i t_f^3 + h_t t_w^3) \quad (46)$$

$$I_y = \frac{1}{12} t_f b_i^3 + \frac{1}{12} \left(h_t - \frac{t_f}{2} \right) t_w^3 \quad (47)$$

$$J = \frac{1}{3}(2b_i t_f^3 + h t_w^3) \quad (48)$$

$$I_y = \frac{1}{6} t_f b_i^3 + \frac{1}{12} (h - t_f) t_w^3 \quad (49)$$

Com relação às propriedades para o cálculo do W_x , ainda é necessário a determinação do momento de inércia com relação ao eixo x (I_x), que pode ser calculado usando o teorema dos eixos paralelos apresentado na seguinte equação:

$$I_x = 2(I_t + A_t y_o^2) \quad (50)$$

Os limites de comprimento destravado L_p (relacionado a plastificação) e $L_{r,cor}$ (relacionado ao início do escoamento corrigido) são:

$$L_p = 1,76 r_y \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (51)$$

$$L_{r,cor} = \frac{1,66 \sqrt{I_y J}}{J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (52)$$

em que J é a constante de torção, C_w é a constante de empenamento transversal e β_1 é dado pela equação (53).

$$\beta_1 = \frac{0,7 f_y W_x}{EJ} \quad (53)$$

Desta forma, o momento fletor resistente é dado em função do comprimento destravado (L_b), conforme abaixo:

$$\text{- Para } L_b > L_{r,cor} \quad M_{Rk} = M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \quad (54)$$

$$\text{- Para } L_p \leq L_b \leq L_{r,cor} \quad \begin{aligned} & M_{Rk} = M_{cr} = \\ & C_b \left[0,9 M_{pl} - \left(0,9 M_{pl} - M_{r,cor} \right) \frac{L_b - L_p}{L_{r,cor} - L_p} \right] \leq 0,9 M_{pl} \end{aligned} \quad (55)$$

$$\text{- Para } L_b \leq L_p \quad M_{Rk} = 0,9 M_{pl} \quad (56)$$

em que C_b é o fator de modificação para o diagrama de momento fletor não-uniforme conforme ABNT NBR 8800:2008, M_{pl} é o momento de plastificação da seção transversal e

$M_{r,cor}$ é o momento fletor correspondente ao início do escoamento, ajustado em função do valor de $L_{r,cor}$, conforme equação (57).

$$M_{r,cor} = \frac{0,31E}{L_{r,cor}^2} \sqrt{I_y (1000C_w + 39JL_b^2)} \quad (57)$$

Seguindo as prescrições da ABNT NBR 8800:2008 o momento fletor de cálculo é dado por:

$$M_{Rd} = \frac{M_{Rk}}{\gamma_{a1}} \quad (58)$$

3.2.6 Estado-limite de serviço de deslocamento excessivo

A ABNT NBR 8800:2008 determina também a verificação do deslocamento máximo, no caso de vigas de alma cheia é usual desconsiderar a parcela da deformação relativa à força cortante, porém em vigas casteladas esta parcela pode ser significativa, não podendo ser desconsiderada. O deslocamento vertical máximo é obtido a partir da soma do deslocamento devida à flexão (f_M) e ao cisalhamento (f_V), conforme equação:

$$f = f_M + f_V = \frac{5}{384} \frac{qL^4}{EI_e} + \frac{qL^2}{8GA_e} \quad (59)$$

em que I_e é o momento de inércia equivalente da viga castelada, dada pela equação (60) e A_e é a área equivalente da viga castelada, dada pela equação (61).

$$I_e = 2(A_t y_o^2 + I_t) + \frac{t_w}{24} \left[6h_{exp}^3 + 3h_{exp} h_p^2 + 8h_{exp}^2 h_p + \frac{2b_w}{p} (h_p + h_{exp}) (h_p^2 + 2h_p h_{exp} + 2h_{exp}^2) \right] \quad (60)$$

$$\frac{1}{A_e} = \frac{54}{t_w y_o^2 p^2} \frac{G}{E} [0,2h_{exp}^3 + 0,375h_{exp} h_p (h_{exp} + 0,75h_p) + 0,125h_p^3] + \frac{0,6}{t_w y_o^2} (2,08h_{exp} + 1,5h_p) + \frac{p^2}{648I_t} \frac{G}{E} + \frac{2t_w y_a^5}{45I_t^2} \quad (61)$$

A equação (61) foi desenvolvida por Cimadevila (2000) para vigas casteladas com os padrões Litzka e Peiner e uma relação p/b_w igual a 3. Porém o autor em seu estudo mostrou que a equação tem uma boa aproximação para vigas Anglo-Saxão e por isto pode ser utilizada para qualquer um destes três padrões.

3.2.7 Estado-limite de serviço de vibrações excessivas

O estado limite de serviço de vibrações excessivas tem sentido prático em estruturas com forças de inércia importante e que trabalham com cargas que apresentam comportamento variável no tempo. Por exemplo ginásios, passarelas, pontes, salões de dança.

A norma ABNT NBR 8800:2008 em seu anexo L apresenta recomendações para verificação de vibrações excessivas, que consiste na aplicação de limites para o deslocamento máximo das vigas de piso, submetidas a combinação normal de cargas de serviço, conforme:

- 20 mm para pisos sujeitos a atividades de caminhada apenas;
- 9 mm para pisos sujeitos a atividades rítmicas (dança ou ginástica) ou prática de esportes pouco repetitivos;
- 5 mm para pisos sujeitos a atividades de esporte e muito repetitivas.

A vibração de uma viga depende proporcionalmente da sua rigidez e é inversamente proporcional a massa. Como as vigas casteladas mantêm o peso linear da viga original e aumentam a rigidez da mesma devido ao incremento da altura final da seção, as vigas casteladas diminuem o nível de vibração se comparadas à mesma viga não castelada.

3.2.8 Estado limite de serviço de fadiga

O estado limite de serviço associado com a fadiga tem sentido prático em estruturas que trabalham com um estado de tensões variável no tempo. Por exemplo estruturas de pontes, passarelas, embora o emprego de vigas alveolares nessas estruturas não seja comum.

A ABNT NBR 8800:2008 em seu anexo K, traz as prescrições necessárias para avaliação à fadiga dos elementos. A aplicação das prescrições é limitada a estruturas com adequada resistência à corrosão atmosférica ou sujeitas apenas à atmosferas levemente corrosivas, e em temperaturas abaixo de 150°C. Além disto, as tensões calculadas no metal base (usando as combinações de ações descritas em K.2.1) não podem ultrapassar o valor máximo de $0,66f_y$ para as tensões normais e $0,40f_y$ para tensões cisalhantes.

Casos em que o número de ciclos de solicitação seja inferior a 20.000 e a faixa de variação de tensões esteja abaixo do valor de σ_{TH} (faixa de tensões admissíveis) pela Tabela K.1 da norma não necessitam de nenhuma verificação.

Nota-se que a norma ABNT NBR 8800:2008 não apresenta uma curva tensão x número de ciclos ($\sigma - N$) que represente um perfil do tipo castelado. As alternativas nesse caso são empregar a curva $\sigma - N$ de um perfil laminado de alma cheia ou de um perfil soldado. No entanto não se pode afirmar que essas alternativas sejam as mais recomendáveis. A rigor tem-se um assunto que requer ser pesquisado.

4 VERIFICAÇÕES DE VIGAS CASTELADAS MISTAS

Assim como nas vigas casteladas, os roteiros de verificação apresentados nesta seção não são normalizados, pois não existe uma norma nacional para dimensionamento de vigas casteladas mistas. Entretanto o roteiro apresentado busca seguir a mesma metodologia da norma brasileira para dimensionamento de vigas mistas, seguindo as mesmas verificações, com as adaptações necessárias e verificações extras devido ao castelamento da viga.

Na falta de metodologia própria para análise de vigas casteladas mistas, apresente-se inicialmente um estudo de Lawson (2011) para vigas casteladas com aberturas. Este estudo engloba aberturas circulares e retangulares e não é normalizado, porém segue os critérios de dimensionamento de vigas mistas do EUROCODE 3 (2005).

Utilizando-se do estudo de Lawson (2011), do roteiro de dimensionamento de viga mista da ABNT NBR 8800:2008 e do roteiro de dimensionamento de vigas casteladas apresentados no capítulo 3, a autora deste trabalho apresenta uma sugestão de roteiro para o dimensionamento de vigas casteladas mistas. Para manter a padronização conforme já estabelecido pela norma vigente, este busca seguir o mesmo roteiro apresentado pela ABNT NBR 8800:2008 para o dimensionamento de vigas mistas (sem aberturas).

A seguir é apresentado o roteiro para dimensionamento de vistas mistas com aberturas na alma. São apresentadas as verificações necessárias devido a abertura na alma do perfil; o perfil deve ainda inicialmente ser capaz de resistir aos esforços como se fosse uma viga mista sem a abertura na alma.

4.1 PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Inicialmente são estabelecidos alguns parâmetros geométricos, que serão utilizados no dimensionamento. A Figura 33 mostra os elementos da uma viga mista com abertura.

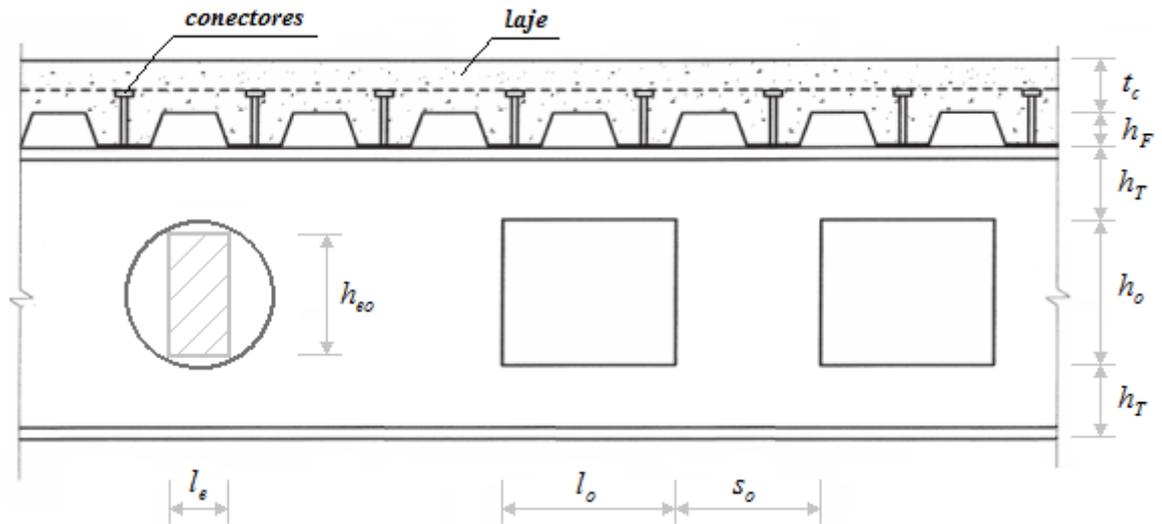


Figura 33: Elementos de uma viga mista com aberturas

A Tabela 4 apresenta os primeiros parâmetros a serem calculados referentes as equivalências da abertura circular para abertura retangular.

Tabela 4. Parâmetros geométricos para vigas mistas equivalentes

Parâmetro		Tipo de abertura	
		Circular	Retangular
l_e	Largura equivalente	$0,45d_o$	l_o
h_{eo}	Altura equivalente	$0,9d_o$	h_o
$l_{o,eff}$	Largura equivalente efetiva	$0,7d_o$	l_o

A Equação (62) apresenta o cálculo de z_{el} , que é a distância entre o centróide do “Tê” até o topo do “Tê”.

$$z_{el} = \frac{A_{w,T} (0,5h_{w,T} + t_f) + 0,5t_f A_f}{(A_f + A_{w,T})} \quad (62)$$

em que A_f é a área da mesa e $A_{w,T}$ é a área da alma. A altura do “Tê”, h_T , é dado pela equação (63).

$$h_T = \frac{(d - h_{eo})}{2} \quad (63)$$

A altura da alma do “Tê”, $h_{w,T}$, dado pela equação (64).

$$h_{w,T} = h_T - t_f \quad (64)$$

A área de cada um dos “Tês”, A_{bT} , é calculada conforme equação (65).

$$A_{bT} = \frac{(A - h_{e0}t_w)}{2} \quad (65)$$

A distância entre os centróides dos “Tês”, h_{eff} , é apresentada na equação (66).

$$h_{eff} = d - 2z_{el} \quad (66)$$

4.2 RESISTÊNCIA DOS CONECTORES

O principal mecanismo de interação entre a laje e o perfil de aço é o conector de cisalhamento. Os conectores mais usados são o *stud bolt* e o perfil U. Neste trabalho será adotado o conector do tipo *stud bolt*, sendo os mesmos soldados à viga por eletrofusão, deixando o processo prático e rápido. Sua resistência na laje de concreto é dada pelo menor valor das equações (67) e (68).

$$P_{Rd} = \frac{0,8f_u \cdot \pi \cdot d_c^2 / 4}{\gamma_v} \quad (67)$$

em que P_{Rd} é a resistência do conector ao corte, d_c é o diâmetro do conector *stud bolt*, f_u é a resistência a ruptura do conector e γ_v é o coeficiente de resistência do *stud blot* conforme apresenta a tabela 5.

$$P_{Rd} = \frac{0,29 \cdot \alpha \cdot d_c^2 \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_v} \quad (68)$$

em que f_{ck} é o módulo de cisalhamento do concreto, E_c é módulo de elasticidade do concreto e α relação altura/diâmetro do conector conforme equação (69).

$$\alpha = 0,2 \left(\frac{t_c}{d_c} \right) \text{ para } 3 \leq \frac{t_c}{d_c} \leq 4$$

(69)

$$\alpha = 1 \text{ para } \frac{t_c}{d_c} > 4$$

Tabela 5. Tabela de coeficientes dos materiais

PARÂMETRO DE PROJETO		ESTADO LIMITE	
		ÚLTIMO	SERVIÇO / FOGO
RESISTÊNCIA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO AÇO	γ_{M0}	1,0	1,0
RESISTÊNCIA DOS MEMBROS DE AÇO A INSTABILIDADE	γ_{M1}	1,0	1,0
RESISTÊNCIA DO CONCRETO	γ_c	1,5	1,0
RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO STUD	γ_V	1,25	1,0
RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DA LAJE COMPOSTA	γ_{VS}	1,25	1,0
ARMADURA	γ_S	1,15	1,0

Fonte: Tradução baseada no EUROCODE 3 (2005).

Segundo Lawson (2011) o uso de *steel deck* traz influências entre a laje e o perfil reduzindo a resistência do conector ao esforço cortante. O fator de redução, k_t , já considera os efeitos do *steel deck* e deve ser multiplicado pela resistência P_{Rd} . A equação (70) apresenta o valor de k_t para o deck no sentido transversal à viga conforme Lawson (2011); este valor não pode ser maior que $k_{t,max}$, dado pela Tabela 6.

$$k_t = \frac{0,7}{\sqrt{n_r}} \frac{b_o}{h_F} \left(\frac{t_c}{h_F} - 1 \right) \quad (70)$$

em que n_r é número de conectores por fileira, b_o a largura média da abertura do deck, h_F a distância entre laje e perfil.

Tabela 6. Limites para fator de redução máximo

NÚMERO DE CONECTORES POR FILEIRA	ESPESSURA DA CHAPA	$d_c < 20mm$	$20 \leq d_c < 22mm$
$n_r = 1$	$\leq 1,0$	0,85	0,75
	$> 1,0$	1,0	0,75
$n_r = 2$	$\leq 1,0$	0,70	0,60
	$> 1,0$	0,80	0,60

Fonte: Lawson (2011).

4.3 RESISTÊNCIA AO MOMENTO FLETOR NAS ABERTURAS

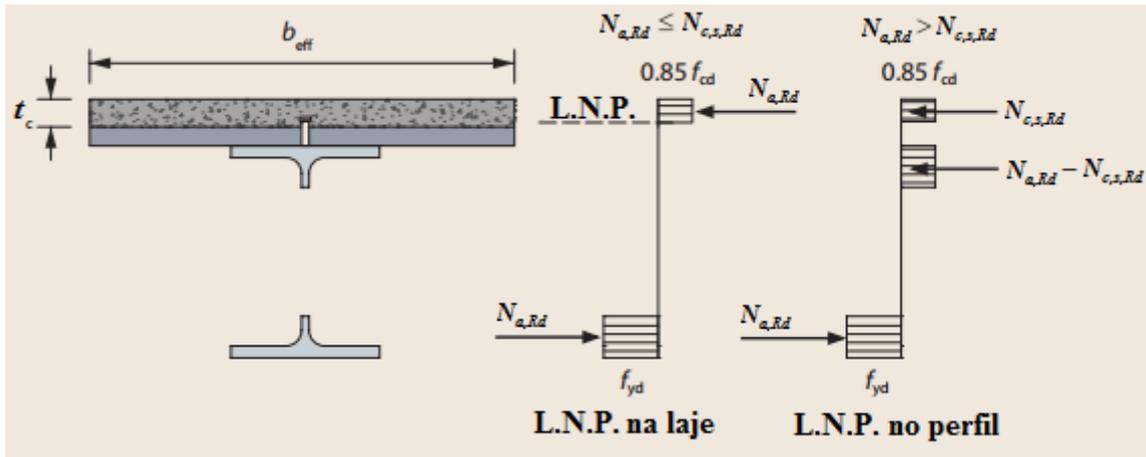
A resistência ao momento fletor deve ser verificada para o centro de cada abertura; este é resistido pela força de tração do “Tê” inferior e pela força de compressão da laje de concreto; por isto inicialmente é necessário verificar o local da linha neutra. A equação (71) apresenta a resistência da laje de concreto e a equação (72) a resistência do perfil de aço.

$$N_{c,s,Rd} = \frac{0,85 f_{ck} b_{eff} t_c}{\gamma_c} \quad (71)$$

$$N_{a,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (72)$$

em que γ_c é coeficiente de resistência do concreto e γ_{M0} é o coeficiente de resistência do perfil de aço, conforme apresentados na tabela 5.

Caso a resistência da laje seja maior que a do perfil ($N_{c,s,Rd} > N_{a,Rd}$) a linha neutra plástica (L.N.P.) se encontra na laje de concreto, caso contrario ($N_{c,s,Rd} \leq N_{a,Rd}$) a L.N.P. se encontra no perfil, conforme mostra a Figura 34.



Fonte: Adaptada da Lawson (2011).

Figura 34: Distribuição de tensões em viga mista com abertura

A resistência ao momento fletor ($M_{c,Rd}$) deve ser maior que a sollicitação do mesmo (M_{Sd}), $M_{c,Rd} \geq M_{Sd}$, sendo a resistência dada pela equação (73).

$$M_{c,Rd} = N_{bT,Rd} (h_{eff} + z_{el} + h_s + 0,5z_c) \quad \text{para L.N.P na laje} \quad (73)$$

$$M_{c,Rd} = N_{bT,Rd} h_{eff} + N_{c,Rd} (z_{el} + h_s + 0,5t_c) \quad \text{para L.N.P no perfil}$$

em que $h_s = t_c + h_F$ é a distância entre o topo do perfil e o topo da laje, h_F é altura nominal da nervura da fôrma, $N_{bT,Rd}$ é a resistente do “Tê” dada na equação (74) e z_c é a altura do concreto em compressão dada pela equação (75).

$$N_{bT,Rd} = \frac{A_{bT} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (74)$$

$$z_c = \frac{N_{c,Rd}}{0,85 f_{cd} b_{eff,o}} \leq t_c \quad (75)$$

em que $N_{c,Rd}$ é a resistência a compressão do concreto dada pela equação (76).

$$N_{c,Rd} = \min\{0,85 f_{cd} b_{eff,o} t_c \ ; \ n_{sc} P_{Rd}\} \quad (76)$$

em que $b_{eff,o}$ é a largura efetiva da laje na abertura, dada pela equação (77), n_{sc} é o número de conectores até o centro da abertura e f_{cd} é a resistência ao escoamento do concreto dado pela equação $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$.

$$b_{eff,o} = 3L/16 + x/4 \quad \text{para } x \leq L/4 \quad (77)$$

$$b_{eff,o} = L/4 \quad \text{para } x > L/4$$

em que x é o centro da abertura.

4.4 RESISTÊNCIA AO ESFORÇO CISALHANTE

O esforço de cisalhamento é resistido pela alma dos “Tês” superior e inferior e pela laje de concreto. A resistência ao esforço de cisalhamento (V_{Rd}) deve ser maior que as forças cisalhantes (V_{Sd}) conforme equação (78).

$$V_{Rd} = V_{c,Rd} + V_{t,Rd} + V_{b,Rd} \geq V_{Sd} \quad (78)$$

em que $V_{c,Rd}$ é a resistência da laje de concreto dado pela equação (81), $V_{t,Rd}$ é a resistência do “Tê” superior e $V_{b,Rd}$ é a resistência do Tê inferior. A resistência dos Tês é apresentada na equação (79).

$$V_{t,Rd} = V_{b,Rd} = \frac{A_v f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} \quad (79)$$

em que A_v é a área de influência do cortante, que para perfis soldados é dada pela equação (80).

$$A_v = (A - b_f t_f + 0,5 t_f (2r + t_w)) \quad (80)$$

em que r é o raio de concordância do perfil.

$$V_{c,Rd} = (\nu + k_1 \sigma_{cp}) b_{ws} t_c \quad (81)$$

em que b_{ws} é a largura efetiva do concreto para corte conforme equação (82), k_1 é parâmetro dado pela norma ($k_1 = 0,15$), σ_{cp} é a tensão de compressão no concreto apresentado na equação (83) e ν é dado pela equação (84) e tem valor mínimo conforme equação (85).

$$b_{ws} = b_f + 2(0,75)h_s \quad (82)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{cSd}}{b_{eff} t_c} \leq 0,2 f_{cd} \quad (83)$$

em que N_{cSd} é a solicitação a compressão na abertura.

$$\nu = C_{Rd,c} k (100 p_1 f_{ck})^{1/3} \quad (84)$$

$$\nu_{\min} = \sqrt{0,035^3 f_{ck}} \quad (85)$$

em que os parâmetros $C_{Rd,c}$, k e p_1 são apresentados, respectivamente, nas equações (86), (87) e (88).

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} \quad (86)$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{t_c}} \leq 0,02 \quad (87)$$

$$p_1 = \frac{A_{sl}}{b_w t_c} \leq 2,0 \quad (88)$$

em que A_{sl} é a área de reforço da armadura.

4.5 RESISTÊNCIA A FLEXÃO DE VIERENDEEL

A resistência a flexão local de Vierendeel é dada pela soma da resistência local à flexão do tê inferior ($M_{bT,NV,Rd}$), do tê superior ($M_{iT,NV,Rd}$) e pela conexão laje/perfil, ou seja, pelos conectores localizados acima da abertura ($M_{vc,Rd}$). Esta soma deve ultrapassar a solicitação ($M_{Vi,Sd}$) conforme ilustra a equação (89).

$$2M_{bT,NV,Rd} + 2M_{iT,NV,Rd} + M_{vc,Rd} \geq M_{Vi,Sd} \quad (89)$$

em que $M_{Vi,Sd}$ é o solicitação de Vierendeel apresentada na equação (90) e $M_{vc,Rd}$, $M_{iT,NV,Rd}$ e $M_{bT,NV,Rd}$ são apresentados respectivamente nas equações (91), (94) e (95).

$$M_{Vi,Sd} = V_{Sd} l_e \quad (90)$$

$$M_{vc,Rd} = \Delta N_{c,Rd} (h_s + z_{el} - 0,5t_c) k_o \quad (91)$$

em que $\Delta N_{c,Rd}$, dado na equação (92) é o incremento da resistência a compressão da laje e k_o é o fator de redução apresentado na equação (93).

$$\Delta N_{c,Rd} = n_{sc,o} P_{Rd} \quad (92)$$

$$k_o = \left(1 - \frac{l_o}{25h_t} \right) \quad (93)$$

em que $n_{sc,o}$ é o número de conectores entre aberturas.

$$M_{iT,V,Rd} = M_{pl,Rd} \quad (94)$$

$$M_{bT,NV,Rd} = M_{pl,Rd} \left(1 - \left(\frac{N_{Sd}}{N_{bT,Rd}} \right)^2 \right) \quad (95)$$

em que $M_{pl,Rd}$ é a resistência a flexão de cada “Tê” conforme equações (96) e (97) e N_{sd} é a solicitação de compressão na abertura. A resistência do “Tê” inferior é reduzida devido as forças axiais de tração.

$$M_{pl,Rd} = \frac{A_{w,T} f_y}{\gamma_{M0}} (0,5h_{w,T} + t_f - z_{pl}) + \frac{A_f f_y}{\gamma_{M0}} \left(0,5t_f - z_{pl} + \frac{z_{pl}^2}{t_f} \right) \quad \text{para L.N.P. no perfil} \quad (96)$$

$$M_{el,Rd} = \frac{A_{w,T} f_{yd} (0,5h_{w,T} + t_f - z_{el})^2 + A_f f_{yd} (z_{el} - 0,5t_f)^2}{h_{w,T} + t_f - z_{el}} \quad \text{para L.N.P. na laje} \quad (97)$$

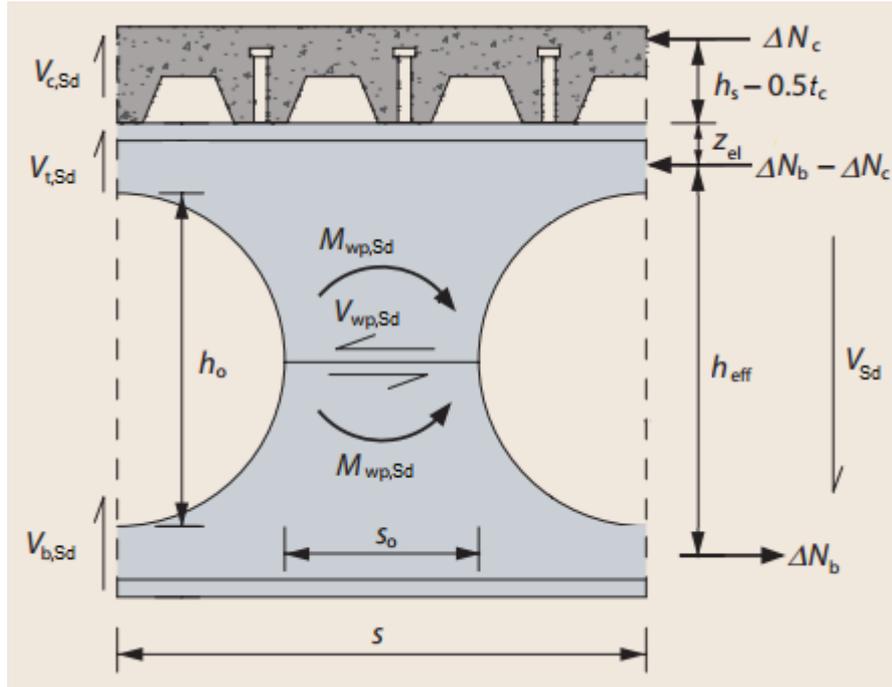
em que γ_s é o coeficiente de reforço já apresentado na tabela 5, f_{yd} é a resistência ao escoamento do aço conforme equação (98) e z_{pl} é a distância da linha neutra do “Te” até o topo do “Te” conforme equação (99).

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_s} \quad (98)$$

$$z_{pl} = \frac{(A_{w,T} + A_f)}{2b_f} \quad (99)$$

4.6 RESISTÊNCIA DOS CONECTORES NA ABERTURA

O incremento na resistência a compressão do concreto, devido aos conectores entre as aberturas ($\Delta N_{sc,Rd}$) deve ser maior que a solicitação da força cortante longitudinal no mesmo ($V_{wp,Sd}$), ou seja, $\Delta N_{sc,Rd} \geq V_{wp,Sd}$ em que $V_{wp,Sd}$ e $\Delta N_{sc,Rd}$ são apresentados, respectivamente, nas equações (100) e (101). A Figura 35 mostra as forças atuantes entre aberturas.



Fonte: Adaptada da Lawson (2011).

Figura 35: Forças entre aberturas para aberturas circulares

$$V_{wp,Sd} = \frac{V_{Sd}s}{(h_{eff} + z_{el} + h_s - 0,5t_c)} \quad (100)$$

$$\Delta N_{sc,Rd} = n_{sc,s} P_{Rd} \quad (101)$$

em que $n_{sc,s}$ é o número de conectores entre as linhas adjacentes as aberturas.

4.7 RESISTÊNCIA AO CORTE LONGITUDINAL

A resistência à força cortante longitudinal ($V_{wp,Rd}$), que é influenciada pela área da alma entre aberturas, também deve ser maior que a solicitação da mesma, ou seja, $V_{wp,Rd} \geq V_{wp,Sd}$, sendo $V_{wp,Rd}$ definido na equação (102).

$$V_{wp,Rd} = \frac{(s_o t_w) f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} \quad (102)$$

4.8 RESISTÊNCIA À FLAMBAGEM DA ALMA

Com o aumento da altura da alma, a mesma pode ficar suscetível a flambagem, sendo necessário que a resistência a compressão da alma ($N_{wp,Rd}$) seja maior que os esforços na mesma, conforme apresenta equação (103).

$$N_{wp,Rd} \geq V_{wp,Sd} \quad (103)$$

em que $N_{wp,Rd}$ é apresentado na equação (104).

$$N_{wp,Rd} = \chi \frac{s_o t_w f_y}{\gamma_{M1}} \quad (104)$$

em que χ é o fator de redução associado a resistência de compressão, sendo definido pela equação (105), e γ_{M1} é o coeficiente de resistência do aço à instabilidade, também apresentado na tabela 5.

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (105)$$

em que ϕ e $\bar{\lambda}$ são parâmetros definidos pelas equações (106), (107) e (108).

$$\phi = 0,5 \left(1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right) \quad (106)$$

em que α é o fator de imperfeição, que está definido nas Tabelas 7 e 8.

$$\bar{\lambda} = \frac{1,75 \sqrt{s_o^2 + h_o^2}}{t_w} \frac{1}{\lambda_1} \quad \text{para aberturas circulares} \quad (107)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{2,5 \sqrt{s_o^2 + h_o^2}}{t_w} \frac{1}{\lambda_1} \quad \text{para aberturas retangulares} \quad (108)$$

em que λ_1 é apresentado na equação (109).

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (109)$$

Tabela 7. Fator de imperfeição

TIPO DE PERFIL	LIMITES		EIXOS	α	
				S235, S275, S355, S420	S460
PERFIL LAMINADO	$d/b > 1,2$	$t_f \leq 40mm$	MAIOR	A	A0
			MENOR	B	A0
		$40 < t_f \leq 100mm$	MAIOR	B	A
			MENOR	C	A
	$d/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100mm$	MAIOR	B	A
			MENOR	C	A
		$t_f > 100mm$	MAIOR	D	C
			MENOR	D	C
PERFIL SOLDADO	$t_f \leq 40mm$		MAIOR	B	B
			MENOR	C	C
	$t_f > 40mm$		MAIOR	C	C
			MENOR	D	D

Fonte: EUROCODE 3 (2005)

Tabela 8. Fator de imperfeição

CURVA	A0	A	B	C	D
α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Fonte: EUROCODE 3 (2005)

4.9 RESISTÊNCIA LIMITE AO CISALHAMENTO

Para aberturas muito próximas, que é o caso das vigas casteladas, é necessário ainda verificar a resistência limite ao cisalhamento da viga. Esta verificação deve ser feita especialmente para aberturas retangulares, devido a pouca área de aço da alma, a mesma tende a ser mais frágil perante às aberturas circulares. A seguir apresenta-se a verificação da resistência ao cisalhamento em aberturas retangulares.

4.9.1 Resistência governada pela flexão

O comportamento das vigas retangulares com aberturas muito próximas é influenciado fortemente pela flexão de Vierendeel e pela flexão global da viga. A resistência ao esforço cisalhante entre aberturas governada pela flexão deve ser o menor valor entre as equações (110) e (111).

$$V_{Rd} = \frac{\frac{2M_{wp,Rd}}{s} + \frac{4M_{b,NV,Rd}}{l_o}}{1 + \frac{h_o}{h_{eff}}} + \frac{\Delta N_{cs,Rd}}{s} (z_{el} + h_s - 0,5t_c) \quad (110)$$

$$V_{Rd} = \left(\frac{2M_{wp,Rd}}{s} + \frac{4M_{b,NV,Rd}}{l_o} \right) \frac{(h_{eff} + h_s - 0,5t_c)}{(h_{eff} + h_o)} \quad (111)$$

em que $M_{wp,Rd}$ é o momento no centro da abertura, conforme equação (112) e $M_{b,NV,Rd}$ é a média da resistência local à flexão dos “Tês”, conforme equação (113).

$$M_{wp,Rd} \geq V_{wp,Sd} h_o / 2 \quad (112)$$

$$M_{b,NV,Rd} = (M_{tT,NV,Rd} + M_{bT,NV,Rd}) / 2 \quad (113)$$

4.9.1 Resistência governada pela flambagem

A mesma abordagem é utilizada para verificar a resistência governada pela flambagem, que é dada pelo menor valor das equações (114) e (115).

$$V_{Rd} = \frac{N_{wp,Rd} \frac{h_o}{s} + \frac{4M_{b,NV,Rd}}{l_o}}{1 + \frac{h_o}{h_{eff}}} + \frac{\Delta N_{cs,Rd}}{s} (z_{el} + h_s - 0,5t_c) \quad (114)$$

$$V_{Rd} = \left(N_{wp,Rd} \frac{h_o}{s} + \frac{4M_{b,NV,Rd}}{l_o} \right) \frac{(h_{eff} + h_s - 0,5t_c)}{(h_{eff} + h_o)} \quad (115)$$

4.10 ESTADO-LIMITE DE SERVIÇO DE DESLOCAMENTO EXCESSIVO

Assim como nas vigas de aço, as vigas mistas também devem ser verificadas quanto ao deslocamento máximo. O deslocamento adicional no meio do vão para uma viga

submetida a um carregamento distribuído considerando os esforços de flexão para cada abertura (f_{add} / f_b) é apresentado nas equações (116) e (117).

$$\frac{f_{add}}{f_b} = 1,5 \left(\frac{l_e}{L} \right) \left(\frac{h_o}{d} \right) \left(1 - \frac{x}{L} \right) \quad \text{para } x \leq 0,5L \quad (116)$$

$$\frac{f_{add}}{f_b} = 1,5 \left(\frac{l_e}{L} \right) \left(\frac{h_o}{d} \right) \left(\frac{x}{L} \right) \quad \text{para } x > 0,5L \quad (117)$$

em que f_b é o deslocamento desconsiderando as aberturas.

4.11 ADAPTAÇÕES PARA ANÁLISE DE VIGAS CASTELADAS MISTAS

Para análise de vigas casteladas mistas, propõe-se o mesmo roteiro para o dimensionamento de vigas mistas com abertura na alma apresentados neste capítulo, utilizado-se dos parâmetros geométricos das vigas celular apresentados na seção 3.1 e alteração geométricas.

Primeiramente devem ser atualizadas as propriedades do perfil, tais como: altura final (d) considerando a expansão da altura do perfil conforme Tabelas 2 e 3, área da seção, momento de inércia, módulo de resistência elástico e constante de empenamento.

A abertura crítica nas vigas casteladas se dá onde o esforço cisalhante é máximo, para vigas com carregamento distribuído esta configuração acontece nas aberturas localizadas próximas aos apoios. Desta forma, as coordenadas das aberturas testadas “ $xr1$ ” e “ $xr2$ ”, devem ser as aberturas mais próximas ao apoio. A Tabela 9 apresenta estas coordenadas e as equivalências dos parâmetros geométricos.

Tabela 9. Variáveis adaptadas da viga mista com abertura para viga mista castelada

VIGAS MISTAS COM ABERTURAS	VIGAS MISTAS CASTELADAS
$xr1$	$b_{we} + D_o / 2$
$xr2$	$xr1 + p$
s	p
s_o	b_w

Com estas alterações, é possível utilizar as formulações apresentadas anteriormente neste capítulo para dimensionar vigas casteladas mistas aos diferentes esforços solicitantes.

No dimensionamento para vigas casteladas mistas, inicialmente a mesma deve ser verificada desconsiderando as aberturas (resistência ao momento fletor e resistência a flambagem local da mesa); este dimensionamento segue os padrões usuais da ABNT NBR 8800:2008 para vigas mistas.

A seguir devem ser verificados os demais modos de falha, sendo que para os modos relacionados aos esforços de cisalhamento é utilizado a abertura mais próxima do apoio, e para os modos relacionados ao esforço fletor crítico é utilizado a abertura mais próxima ao centro do vão. Assim, cada resistência é verificada para sua solicitação crítica.

Por fim, as equações (116) e (117) que dimensionam o deslocamento adicional para cada abertura podem ser simplificadas para n aberturas conforme equações (118) e (119).

$$\frac{f_{add}}{f_b} = 1,05n \left(\frac{l_o}{L} \right) \left(\frac{h_o}{d} \right) \quad \text{para aberturas retangulares} \quad (118)$$

$$\frac{f_{add}}{f_b} = 0,47n \left(\frac{d}{L} \right) \left(\frac{h_o}{d} \right)^2 \quad \text{para aberturas circulares} \quad (119)$$

5 PLANILHAS DESENVOLVIDAS PARA ANÁLISE DE VIGAS CASTELADAS

Foram desenvolvidas planilhas no formato Excel para o cálculo de vigas casteladas conforme formulação apresentada. As planilhas têm quatro etapas. A primeira etapa corresponde às informações do projeto, a segunda etapa mostra a verificação do projeto da viga de alma cheia (conforme norma brasileira ABNT NBR 8800:2008), a terceira etapa verifica o projeto para vigas casteladas e a última etapa compara as solicitações do projeto com as verificações realizadas para as duas vigas e analisa os resultados.

A Figura 36 apresenta um fluxograma das etapas da planilha, referenciando as seções e equações utilizadas.

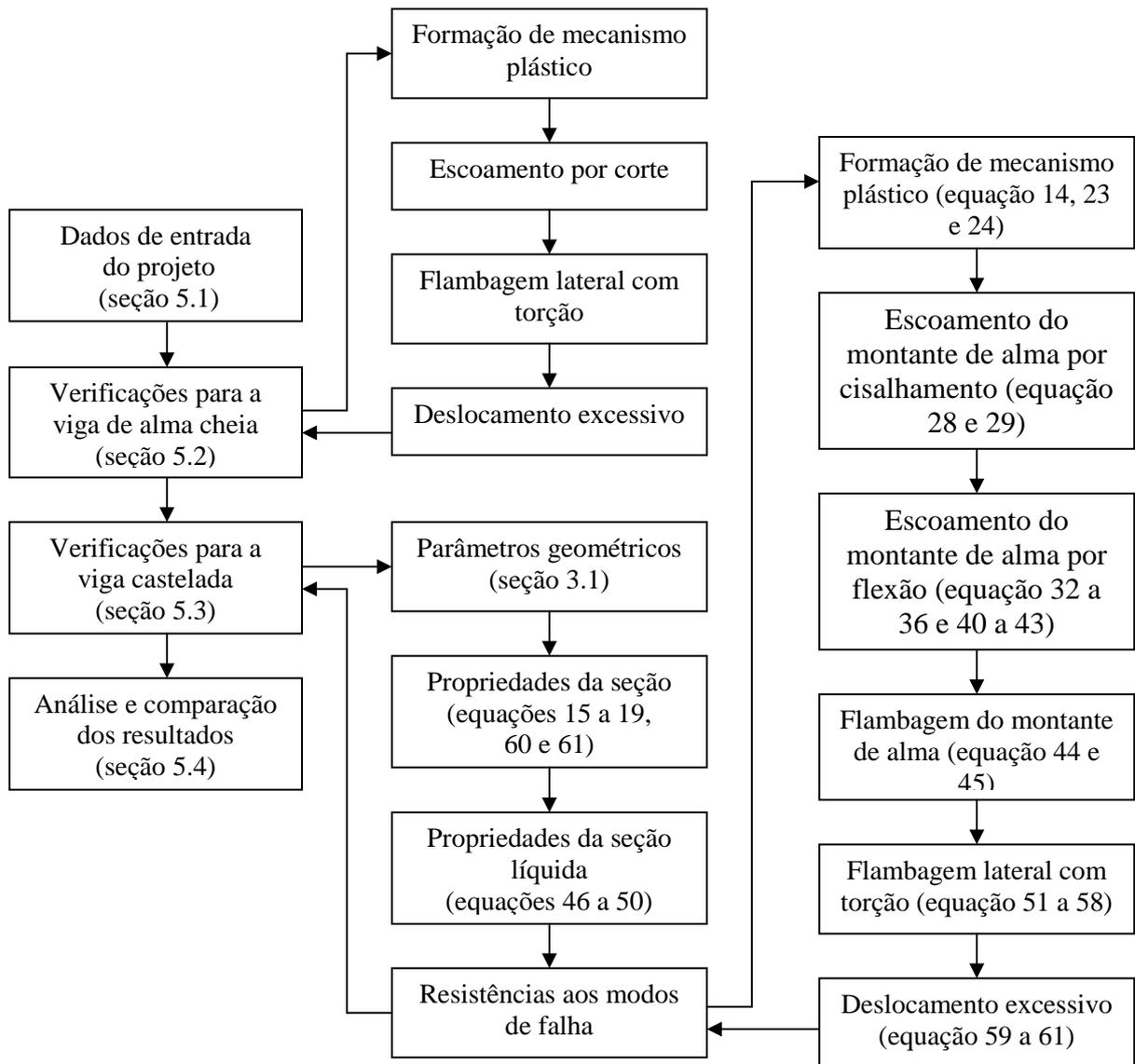


Figura 36: Sequência de procedimento realizado pelas das planilhas para verificação de vigas

5.1 DADOS DE ENTRADA DO PROJETO

A seguir são mostrados os dados de entrada do projeto, os campos em cinza escuro são os campos que o usuário deverá preencher, os campos em cinza claro são preenchidos automaticamente, ou podem ser alterados manualmente. No campo que se escolhe o perfil, aparece uma lista dos perfis I; quando o usuário escolhe o perfil, as propriedades são preenchidas automaticamente.

Em determinadas situações, como dimensionar o perfil para um determinado projeto, é interessante testar perfis diferentes para o dimensionamento da viga de alma cheia e viga

castelada. Por isto, existem duas entradas de perfil, uma para a viga de alma cheia e outra para a castelada. A Figura 37 mostra a planilha com as informações de entrada dos perfis para o projeto de viga de alma cheia e a Figura 38 para vigas casteladas.

DADOS DO PERFIL DE ALMA CHEIA

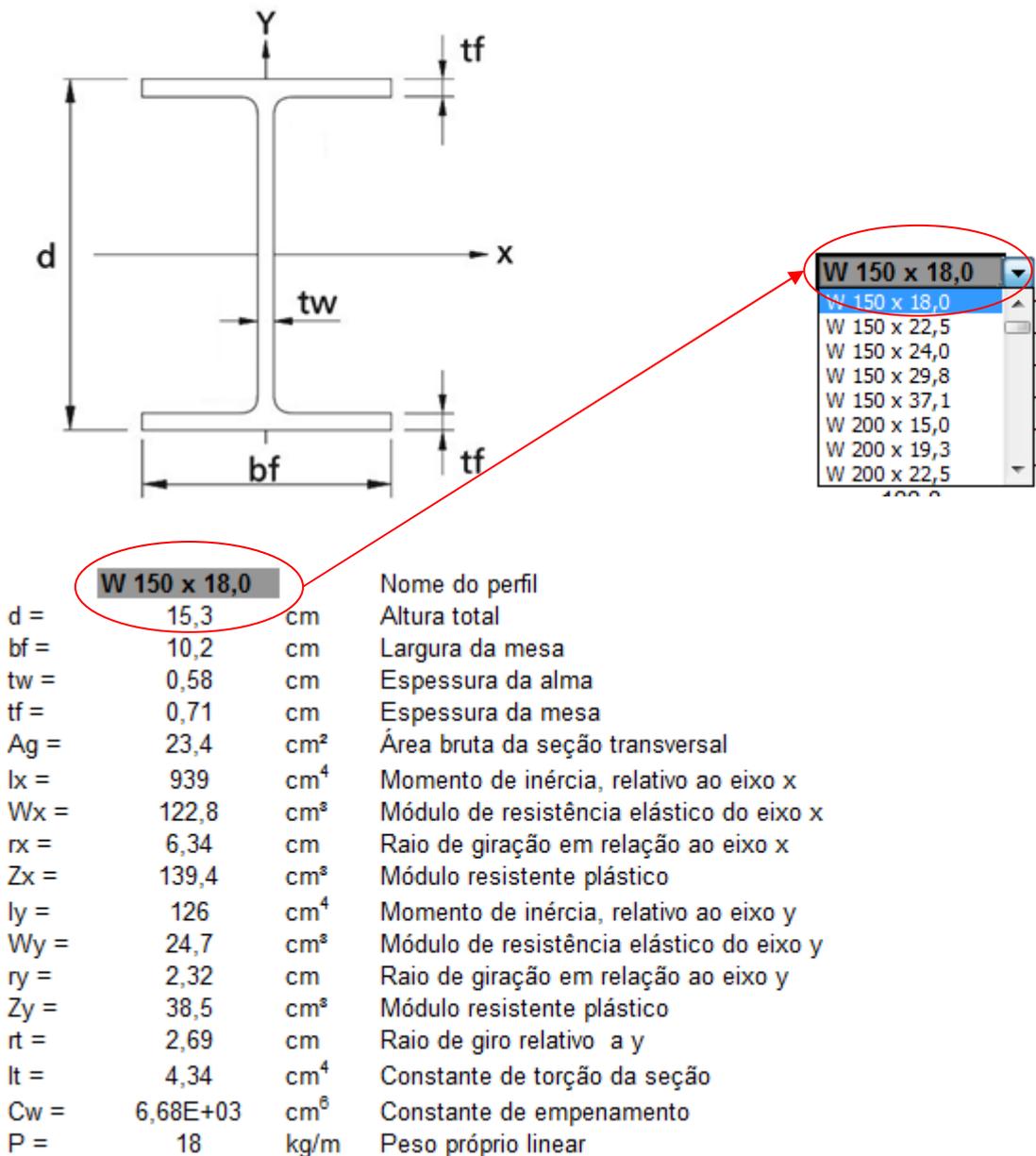


Figura 37: Dados de entrada referentes ao perfil de alma cheia

DADOS DO PERFIL CASTELADO

W 150 x 18,0			Nome do perfil
d =	15,3	cm	Altura total
bf =	10,2	cm	Largura da mesa
tw =	0,58	cm	Espessura da alma
tf =	0,71	cm	Espessura da mesa
Ag =	23,4	cm ²	Área bruta da seção transversal
Ix =	939	cm ⁴	Momento de inércia, relativo ao eixo x
Wx =	122,8	cm ³	Módulo de resistência elástico do eixo x
rx =	6,34	cm	Raio de giração em relação ao eixo x
Zx =	139,4	cm ³	Módulo resistente plástico
Iy =	126	cm ⁴	Momento de inércia, relativo ao eixo y
Wy =	24,7	cm ³	Módulo de resistência elástico do eixo y
ry =	2,32	cm	Raio de giração em relação ao eixo y
Zy =	38,5	cm ³	Módulo resistente plástico
rt =	2,69	cm	Raio de giro relativo a y
It =	4,34	cm ⁴	Constante de torção da seção
Cw =	6,68E+03	cm ⁶	Constante de empenamento
P =	18	kg/m	Peso próprio linear

Figura 38: Dados de entrada referentes ao perfil castelado

A Figura 39 mostra a entrada de dados referente ao tipo de padrão de viga castelada e seus parâmetros. Como os parâmetros mudam dependendo do tipo de viga castelada, há uma verificação se o valor inserido esta dentro da faixa permitida, mostrando um “ok” ou “erro” ou “--” caso este não seja necessário.

DADOS GEOMÉTRICOS DO CASTELADO

Tipo	2	Tipo 1:Anglo Saxão ; Tipo 2:Peiner ; Tipo 3:Litzka ; Tipo 4:Circular
hp	0	cm Altura da chapa expansora - Apenas para não circular

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

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

k	1,5	ok	Razão Expansora
Do/d	1	--	Apenas para viga castelada circular
p/Do	1,3	--	Apenas para viga castelada circular

Figura 39: Dados de entrada referentes aos parâmetros da viga castelada

A Figura 40 mostra a entrada de dados dos materiais utilizados e coeficientes de projeto.

DADOS DO MATERIAL

	ASTM A36	Nome do Aço
$f_y =$	25	kN/cm ² Resistência ao escoamento aço
$E =$	20.000	kN/cm ² Módulo de elasticidade aço
$G =$	7.930	kN/cm ² Módulo de cisalhamento do aço

OUTRAS INFORMAÇÕES

Combinações	Aço estrutural ^a	
	γ_a	
	Escoamento, flambagem e instabilidade γ_{a1}	Ruptura γ_{a2}
Normais	1,10	1,35
Especiais ou de construção	1,10	1,35
Excepcionais	1,00	1,15

γ_{a1} 1,1 - Coeficiente de ponderação estrutural

Figura 40: Dados de entrada referente ao material utilizado e coeficientes estruturais

Os dados finais da planilha de entrada de dados são as informações de projeto, como vão, número de travamentos laterais e carregamento da estrutura e utilização da viga. O valor de deslocamento máximo admissível é preenchido conforme a utilização informada (piso ou cobertura), porém, pode-se alterar este valor manualmente (é apresentada a tabela C.1 da ABNT NBR 8800:2008 com os valores máximos para deslocamentos conforme sua utilização). A Figura 41 mostra a entrada de dados das informações do projeto.

INFORMAÇÕES DE PROJETO

L =	421	cm	Comprimento da viga
n cl=	0		Número de contenções laterais
Lb =	421	cm	Comprimento destravado
q =	6	kN/m	Carga distribuída
q Ld =	0,0922	kN/cm	Combinação de Cargas para dimensionamento
q L =	0,0618	kN/cm	Combinação de Cargas para flecha
Momentos para calculo de Cb		Trecho: 1	
Ma =	1.532,15	kNcm	Momento em Lb/4
Mb =	2.042,86	kNcm	Momento em 2Lb/4
Mc =	1.532,15	kNcm	Momento em 3Lb/4
Cb =	1,1364	-	Fator de modificação
MSd =	2.042,86	kNcm	Momento Fletor de cálculo
VSd =	19,41	kN	Esforço Cortante de cálculo
Utiliz.	1		Utiliz. 1:Piso ; Utiliz. 2:Cobertura
$\delta^a = L /$	350		Deslocamento Máximo Admissível
f máx =	1,20	cm	Deslocamento Máximo Admissível

Tabela C.1 — Deslocamentos máximos

Descrição	δ^a
- Travessas de fechamento	$L/180^b$
	$L/120^{cd}$
- Terças de cobertura ^{g)}	$L/180^e$
	$L/120^f$
- Vigas de cobertura ^{g)}	$L/250^h$
- Vigas de piso	$L/350^h$

Figura 41: Dados de entrada referente a geometria e carregamento do projeto

5.2 VERIFICAÇÕES PARA VIGA DE ALMA CHEIA

A planilha de verificação para viga de alma cheia mostra às resistências da viga a formação de mecanismo plástico, escoamento por corte, flambagem lateral com torção e deslocamentos no centro do vão, conforme ilustrado na Figura 42.

FORMACAO DE MECANISMO PLÁSTICO

$M_{plo} = 3.485,00$ kN.cm Momento fletor de plastificação

$MP = 3.168,18$ kN.cm Estado-limite último de formação de mecanismo plástico

ESCOAMENTO POR CORTE

$h = 13,88$ cm Altura da alma do perfil

$h/t = 19,55$

$C1 = 68,31$ condição 1

$C2 = 88,54$ condição 2

$VRd = 109,78$ kN Força Cortante resistente de cálculo

FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO

$L_p = 115,49$ Comprimento destravado, relacionado a plastificação

$\beta_1 = 0,024758$

$L_r = 462,39$ cm Comprimento destravado, relacionado ao inicio do escoamento

$M_r = 2.149,00$ kN.cm Momento fletor (inicio do escoamento)

$M_{rk} = 2.720,82$ kN.cm Momento fletor nominal resistente

$MRd = 2.473,47$ kN.cm Momento fletor de calculo

ESTADO-LIMITE DE SERVIÇO - DESLOCAMENTO EXCESSIVO

$f_M = 1,35$ cm Deslocamento - flexão

$f_V = 0,01$ cm Deslocamento - cisalhamento

$f = 1,35$ cm Deslocamento total

Figura 42: Planilha de verificação da viga de alma cheia

5.3 VERIFICAÇÕES PARA VIGA CASTELADA

A planilha de verificação das vigas casteladas é dividida em quatro partes. Na Figura 43 é apresentada a primeira parte da planilha, onde inicialmente são calculados os parâmetros geométricos conforme o tipo de abertura e na Figura 44 encontra-se a parte seguinte, onde são calculadas as propriedades da seção.

PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

bwe,m =	7,65	cm	Largura mínima do montante de extremidade
dg =	22,95	cm	Altura final da viga castelada
p =	22,95	cm	Tamanho entre o início de um alvéolo e outro
bw =	7,65	cm	Distância horizontal entre alvéolos
a0 =	15,3	cm	Largura do alvéolo
bi =	3,83	cm	Largura da parte inclinada do alvéolo
ho =	15,3	cm	Altura do alvéolo
Ld =	413,35	cm	Comprimento útil para distribuição dos alvéolos
n =	18		Número de alvéolos
bwe =	7,77	cm	Largura final do montante de extremidade
Lc =	432,48	cm	Comprimento da viga para corte

Figura 43: Planilha de cálculo dos parâmetros geométricos

PROPRIEDADES

At =	9,48	cm ²	Área da seção transversal de um tê
ht =	3,83	cm	Altura do cordão
\bar{y} =	0,74	cm	Posição do C.G. do cordão
yo =	10,74	cm	Distância do centro de gravidade do cordão ao eixo da viga
It =	7,05	cm ⁴	Momento de inércia de um tê
ya =	3,09	cm	Distância entre topo do perfil e o centro de gravidade do tê superior
yb =	0,74	cm	Distância entre topo do alvéolo e o centro de gravidade do tê superior
hexp =	7,65	cm	Altura de meia abertura (alvéolo)
Ie =	2.280,03	cm ⁴	Momento de inércia equivalente
Ae =	2,57	cm ²	Área equivalente

Figura 44: Planilha de cálculo das propriedades

Também se faz necessário, o cálculo das propriedades na seção líquida da abertura, onde é necessário determinar as propriedades considerando duas situações: a seção apenas como o “Tê” superior e como alma cheia. Faz-se também a ponderação entre as duas, conforme apresenta a Figura 45.

Por fim, são calculadas as resistências da viga castelada. A Figura 46 apresenta os primeiros resultados para formação de mecanismo plástico, escoamento do montante da alma por cisalhamento e flexão, e a Figura 47 mostra os demais resultados: flambagem do montante de alma, flambagem lateral com torção e deslocamentos no centro do vão.

PROPRIEDADES DA SEÇÃO LÍQUIDA

Linc =	137,70	cm	Largura do vão com trechos apenas inclinados
Considerando apenas os 2 T			
ly =	125,68	cm ⁴	Momento de inércia, relativo ao eixo y
J =	1,42	cm ⁴	Constante de torção da seção
Lt =	137,70	cm	Largura do vão com trecho apenas de T
lx =	2.200,69	cm ⁴	Momento de inércia, relativo ao eixo x
Pt =	0,49		Proporção da seção T na viga
Considerando a seção cheia			
ly =	125,83	cm ⁴	Momento de inércia, relativo ao eixo y
J =	3,88	cm ⁴	Constante de torção da seção
Lsc =	145,60	cm	Largura do vão com trecho apenas de seção cheia
lx =	2.273,99	cm ⁴	Momento de inércia, relativo ao eixo x
Pt =	0,51		Proporção de alma cheia na viga
lx =	2.238,03	cm ⁴	Momento de inércia, relativo ao eixo x
Wx =	195,03	cm ³	Módulo de resistência elástico da seção relativo ao eixo de flexão
ly =	125,75	cm ⁴	Momento de inércia, relativo ao eixo y
J =	2,67	cm ⁴	Constante de torção da seção
ry =	2,32	cm	Raio de giração em relação ao eixo y
Cw =	15.558,82	cm ⁶	Constante de empenamento

Figura 45: Planilha de cálculo das propriedades da seção líquida

FORMACAO DE MECANISMO PLÁSTICO

c =	170,49	cm	Constante que multiplica a força cortante
Mplo =	5.090,68	kN.cm	Momento fletor de plastificação
MP =	4.627,9	kN.cm	Estado-limite último de formação de mecanismo plástico

ESCOAMENTO DO MONTANTE DE ALMA POR CISALHAMENTO

VRk1 ≤	39,95	kN	Força cortante característica de cálculo
VRd =	36,32	kN	Força cortante resistente de cálculo

ESCOAMENTO DO MONTANTE DE ALMA POR FLEXÃO

y =	7,65	cm	Altura onde ocorre a tensão máxima (a partir do centro)
bm =	15,3	cm	Largura da abertura em y
VRk2 ≤	69,2	kN	Força cortante característica de cálculo
VRd =	62,91	kN	Força cortante de cálculo

Figura46: Planilha de cálculo dos modos de falha – Parte 1

FLAMBAGEM DO MONTANTE DE ALMA

Vcr =	352,11	kN	Força cortante crítica
VSd =	69,2	kN	Força cortante solicitante de cálculo

FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO

Lp =	115,4	cm	Comprimento destravado, relacionado a plastificação
β_1 =	0,063846		
Lr, cor =	391,66	cm	Comprimento destravado, relacionado ao início do escoamento
Mr,cor=	2.644,2	kN.cm	Momento fletor (início do escoamento), ajustado Lr,cor
Mrk =	2.618,22	kN.cm	Momento fletor nominal resistente
MRd =	2.380,2	kN.cm	Momento fletor de cálculo

ESTADO-LIMITE DE SERVIÇO - DESLOCAMENTO EXCESSIVO

fM =	0,55	cm	Deslocamento - flexão
fV =	0,07	cm	Deslocamento - cisalhamento
f =	0,62	cm	Deslocamento total

Figura 47: Planilha de cálculo dos modos de falha – Parte 2

5.4 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A última planilha apresenta um resumo dos cálculos de solicitação do projeto e resistências dos perfis de alma cheia e castelado. A Figura 48 apresenta o resumo das solicitações de projeto, tendo-se o valor de: momento máximo (M_{Sd}), cortante máximo (V_{Sd}), flecha máxima ($f_{m\acute{a}x}$), distância crítica da viga castelada (c) e combinação crítica da viga castelada (MP_{Sd}).

SOLICITAÇÕES DE PROJETO

MSd =	2.042,86	kNcm
VSd =	19,41	kN
f máx =	1,20	cm
c =	170,49	cm
MP Sd =	3.382,96	kNcm

Figura 48: Planilha com os resultados das solicitações do projeto

Além dos valores de M_{sd} e V_{sd} são mostrados também o módulo do diagrama de esforços cortante e o momento fletor, conforme apresenta a Figura 49.

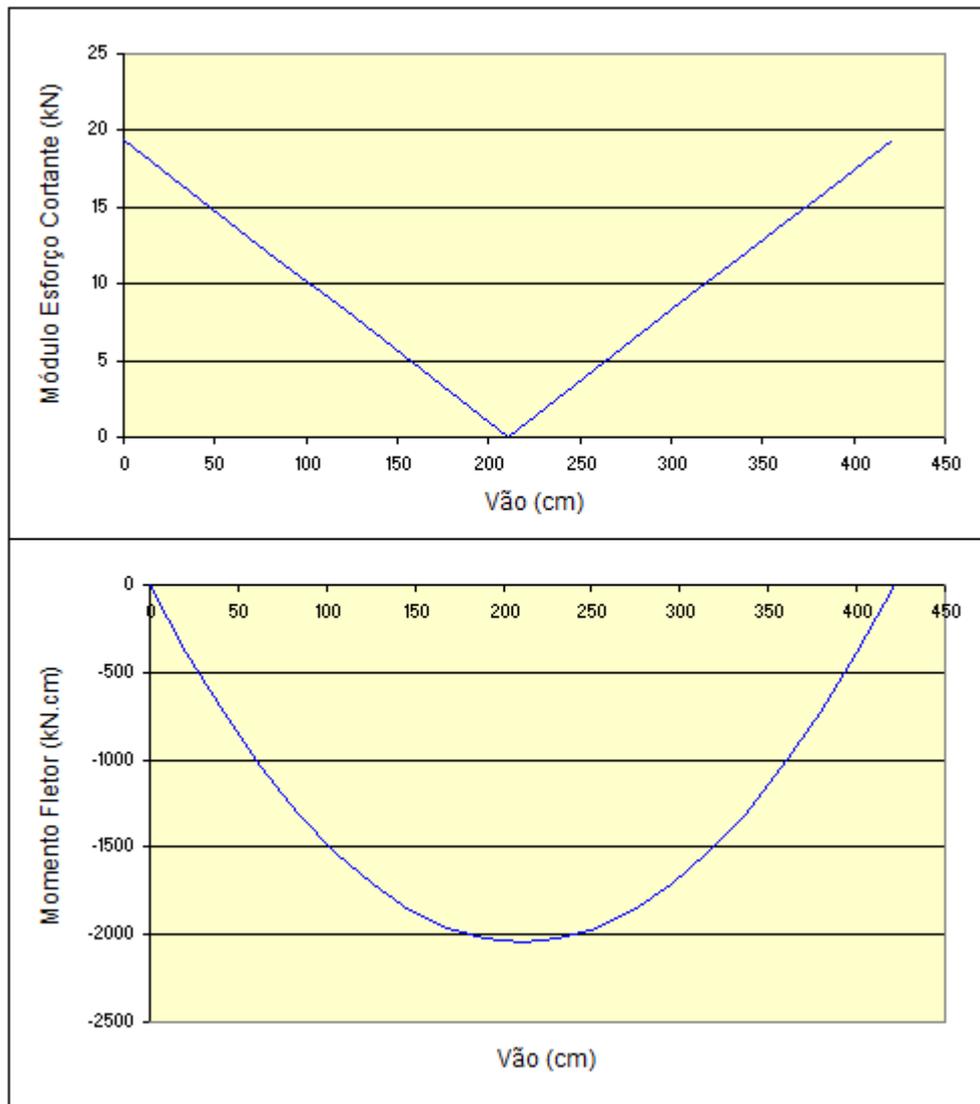


Figura 49: Planilha com os gráficos de cortante (módulo) e momento fletor do projeto

Também são apresentados os resultados para resistências da viga de alma cheia e da viga castelada para os diferentes modos de falha e a comparação entre estes valores, conforme apresenta a Figura 50. Deve-se lembrar que há de ter cuidado ao comparar alguns resultados como formação de mecanismo plástico, pois as solicitações de projeto não são as mesmas.

RESUMO DAS VERIFICAÇÕES

Solicitação	Unidade	Alma Cheia	Castelada	Melhoria
Formação de Mecanismo Plástico	MP = kN.cm	3.168,18 Verifica	4.627,90 Verifica	46,07%
Escoamento do Montante de Alma por Cisalhamento	VRd = kN	109,78 Verifica	36,32 Verifica	-66,91%
Escoamento do Montante de Alma por Flexão	VRd = kN	109,78 Verifica	62,91 Verifica	-42,69%
Flambagem do Montante de Alma	VSd = kN	109,78 Verifica	69,20 Verifica	-36,96%
Flambagem Lateral com Torção	MRd = kN.cm	2.473,47 Verifica	2.380,20 Verifica	-3,77%
Estado-Limite de Serviço de Deslocamento Excessivo	fM =	1,35	0,55	-58,82%
	fV =	0,01	0,07	808,78%
	f =	1,35	0,62	-54,09%
	cm	N Verif	Verifica	

Figura 50: Planilha com os resultados finais de projeto e comparações entre viga de alma cheia e castelada

6 PLANILHAS DESENVOLVIDAS PARA ANÁLISE DE VIGAS MISTAS COM ABERTURAS E VIGAS MISTAS CASTELADAS

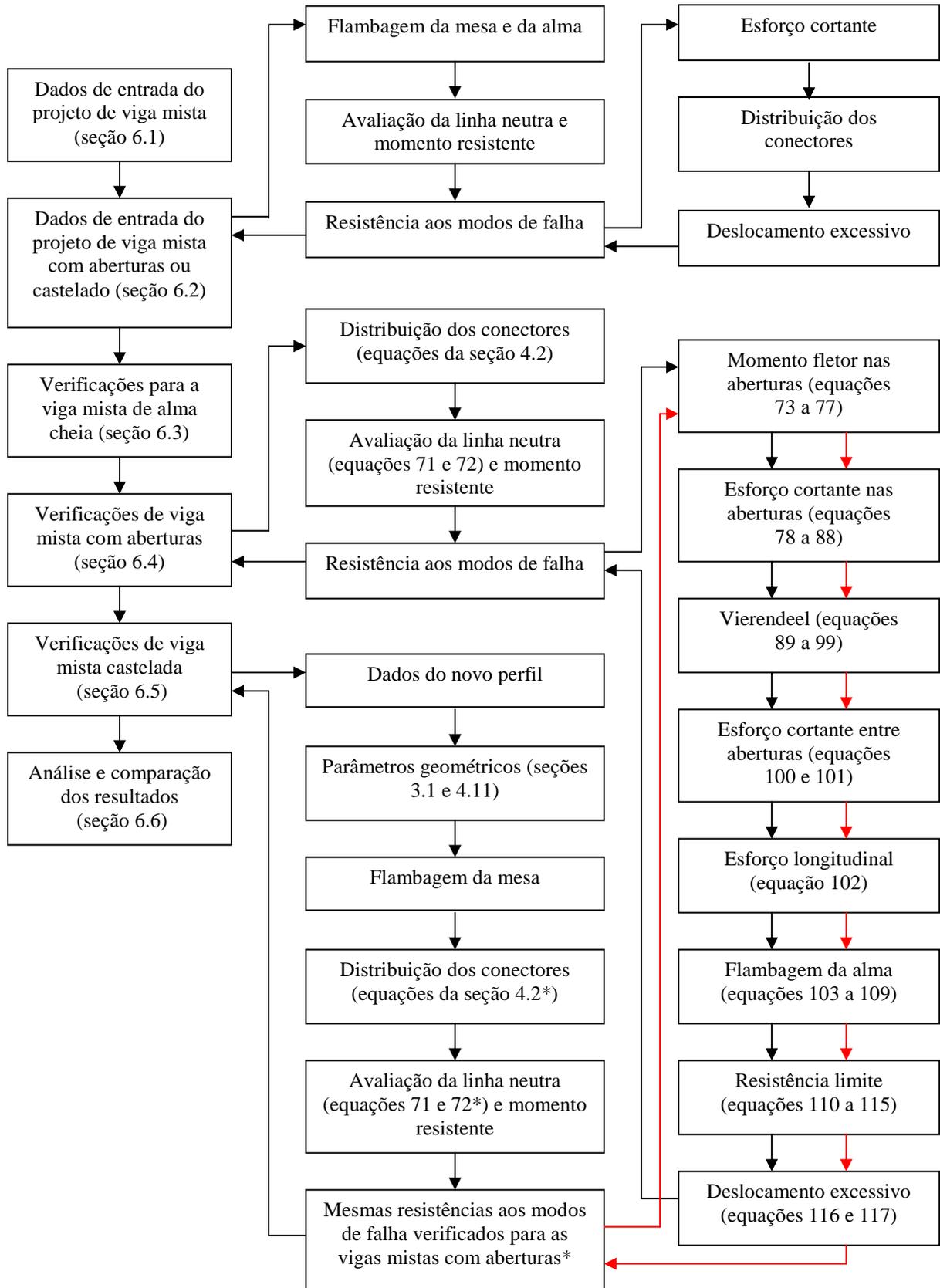
Foram desenvolvidas planilhas no formato Excel para verificação de vigas mistas com aberturas conforme formulação apresentada no capítulo 5. É possível dimensionar vigas mistas (alma cheia), vigas mistas com a possibilidade de até 2 aberturas circulares e 2 aberturas retangulares e vigas mistas casteladas com aberturas circulares.

As planilhas foram divididas em 6 partes, sendo a primeira parte corresponde a entrada de dados relativos à verificação de vigas mistas, a segunda parte corresponde a entrada de dados de vigas mistas com aberturas ou casteladas, a terceira parte corresponde ao dimensionamento de vigas mistas, a quarta parte corresponde ao dimensionamento de vigas mistas com aberturas, a quinta parte corresponde ao dimensionamento de vigas casteladas mistas e a última parte corresponde ao resumo dos resultados gerais dos dimensionamentos.

A entrada de dados da viga mista e viga mista com aberturas ou castelada foi dividida desta forma devido à diferença normativa nos dimensionamentos, sendo uma baseada na norma brasileira (ABNT NBR 8800:2008) e outra na europeia (EUROCODE 3), respectivamente.

Para as vigas mistas é necessário o cálculo da armadura mínima inserida na laje de concreto, que depende do tipo e da área da laje. Esta verificação só é realizada para as vigas mistas com aberturas e casteladas, pois nesse caso a mesma é de grande importância.

A Figura 51 mostra o fluxograma das etapas das planilhas de verificação das vigas mistas, referenciando as seções e equações utilizadas.



Nota: *Com as alterações propostas na seção 4.11.

Figura 51: Sequência de procedimento realizado pelas planilhas de verificação de vigas mistas

6.1 DADOS DE ENTRADA DA VIGA MISTA

A entrada de dados segue os mesmos padrões já apresentados na viga castelada; inicialmente é escolhido o perfil de aço a ser dimensionado, conforme apresenta a Figura 52, e a geometria e materiais da laje de concreto (Figura 53).

DADOS DO PERFIL

	W 460 x 74,0		Nome do perfil
d =	45,7	cm	Altura total
bf =	19	cm	Largura da mesa
tw =	0,9	cm	Espessura da alma
tf =	1,45	cm	Espessura da mesa
Ag =	94,9	cm ²	Área bruta da seção transversal
Ix =	33415	cm ⁴	Momento de inércia, relativo ao eixo x
Wx =	1462,4	cm ³	Módulo de resistência elástico do eixo x
rx =	18,77	cm	Raio de giração em relação ao eixo x
Zx =	1657,4	cm ³	Módulo resistente plástico
Iy =	1661	cm ⁴	Momento de inércia, relativo ao eixo y
Wy =	174,8	cm ³	Módulo de resistência elástico do eixo y
ry =	4,18	cm	Raio de giração em relação ao eixo y
Zy =	271,3	cm ³	Módulo resistente plástico
rt =	4,93	cm	Raio de giro relativo a y
It =	52,97	cm ⁴	Constante de torção da seção
Cw =	8,11E+05	cm ⁶	Constante de empenamento
P =	74	kg/m	Peso próprio linear

DADOS DO MATERIAL - PERFIL

	ASTM A588		Nome do Aço
fy =	35,5	kN/cm ²	Resistência ao escoamento aço
E =	20.000	kN/cm ²	Módulo de elasticidade aço
G =	7.930	kN/cm ²	Módulo de cisalhamento do aço
fr =	10,65	kN/cm ²	Tensão residual de compressão nas mesas
fyd =	32,27	kN/cm ²	Resistência ao escoamento aço

Figura 52: Planilha de entrada de dados: geometria e material do perfil

DADOS DA LAJE

b ef =	250	cm	Largura efetiva da Laje
tc =	7	cm	Espessura da Laje
hF	6	cm	Distancia entre laje e perfil
b =	300	cm	Comprimento da laje

DADOS DO MATERIAL - LAJE

	CP II-E-32		Nome do Concreto
fck	3	kN/cm ²	Módulo de cisalhamento do concreto
fcd =	2,14	kN/cm ²	Resistência ao escoamento do concreto
Ec =	3.300,00	kN/cm ²	Módulo de elasticidade do concreto

Figura 53: Planilha de entrada de dados: geometria e materiais da laje

Ainda é necessário informar os dados referentes aos conectores de cisalhamento (Figura 54) e informações referentes ao projeto (Figura 55).

DADOS DOS CONECTORES

	STB 100x19		Nome do Conector
Hc =	10	cm	Altura do Conector
Dc =	1,9	cm	Diâmetro do Conector
fu =	45	kN/cm ²	Resistência a ruptura do conector

OUTRAS INFORMAÇÕES

β_{vm} = 1 - Coef. dado conforme a capacidade de rotação da ligação
 Para as vigas: biapoiada=1,00; contínuas=0,95 e semicontínuas 0,85, 0,90 ou 0,95

γ_{a1} 1,1 - Coeficiente de ponderação estrutural

Figura 54: Planilha de entrada de dados: conectores e outras informações

INFORMAÇÕES DE PROJETO

L =	1000	cm	Comprimento da viga
q =	6,077	kN/m ²	Carga distribuída
q Ld =	0,001268	kN/cm ²	Combinação de Cargas para dimensionamento
q L =	0,000872	kN/cm ²	Combinação de Cargas para flecha
MSd =	47.558,15	kNcm	Momento Fletor de cálculo
VSd =	190,23	kN	Esforço Cortante de cálculo
Utiliz.	2		Utiliz. 1:Piso ; Utiliz. 2:Cobertura
$\delta^s = L /$	250		Deslocamento Máximo admissível
f máx =	4,00	cm	Deslocamento Máximo admissível

Tabela C.1 — Deslocamentos máximos

Figura 55: Planilha de entrada de dados: informações de projeto

6.2 DADOS DE ENTRADA DA VIGA MISTA COM ABERTURAS OU CASTELADA

Os campos da entrada de dados para vigas mistas com aberturas ou castelada inicialmente duplicam os valores informados na planilha de entrada de dados para viga mista (para facilitar o processo, caso o usuário queira fazer um comparativo entre os dois modelos). Entretanto estes campos ficam em cinza claro, podendo ser preenchidos apenas para o tipo de dimensionamento desejado.

Novamente o primeiro campo a ser informado é o perfil utilizado no dimensionamento, conforme ilustra a Figura 56.

DADOS DO PERFIL CASTELADO

	W 460 x 74,0		Nome do perfil
d =	45,7	cm	Altura total
bf =	19	cm	Largura da mesa
tw =	0,9	cm	Espessura da alma
tf =	1,45	cm	Espessura da mesa
Ag =	94,9	cm ²	Área bruta da seção transversal
Ix =	33415	cm ⁴	Momento de inércia, relativo ao eixo x
Wx =	1462,4	cm ³	Módulo de resistência elástico do eixo x
rx =	18,77	cm	Raio de giração em relação ao eixo x
Zx =	1657,4	cm ³	Módulo resistente plástico
Iy =	1661	cm ⁴	Momento de inércia, relativo ao eixo y
Wy =	174,8	cm ³	Módulo de resistência elástico do eixo y
ry =	4,18	cm	Raio de giração em relação ao eixo y
Zy =	271,3	cm ³	Módulo resistente plástico
rt =	4,93	cm	Raio de giro relativo a y
It =	52,97	cm ⁴	Constante de torção da seção
Cw =	8,11E+05	cm ⁶	Constante de empenamento
P =	74	kg/m	Peso próprio linear

Figura 56: Planilha de entrada de dados castelado: perfil

A Figura 57 apresenta os dados de entrada referentes às aberturas na viga, que podem ser até duas aberturas circulares, duas retangulares ou do tipo castelada (de abertura circular). A primeira abertura retangular é referenciada como abertura 1, a segunda abertura retangular como abertura 2, a primeira abertura circular como abertura 3 e a segunda abertura circular como abertura 4.

Os valores de “XP1”, “XR2”, “XC3” e “XC4” referem-se ao centro das aberturas; os valores automaticamente preenchidos abaixo “xr1”, “xr2”, “xc3” e “xc4” representam as mesmas aberturas, porém com suas respectivas menores distâncias até os apoios. Estes valores serão usados de base, pois para o dimensionamento, o importante é a distância das aberturas perante o apoio.

A entrada de dados para viga mista castelada contem os mesmos parâmetros das vigas celulares.

DADOS DAS ABERTURAS

Podem conter um uma viga até 2 aberturas circulares e 2 retangulares

Retangular (apenas para aberturas eventuais)

lo =	50	cm	Largura das aberturas retangulares
ho =	30	cm	Altura das aberturas retangulares
XR1 =	205	cm	Posição da abertura retangular 1
XR2 =	295	cm	Posição da abertura retangular 2
xr1 =	205	cm	Posição da abertura retangular 1 (menor distancia do apoio)
xr2 =	295	cm	Posição da abertura retangular 2 (menor distancia do apoio)

Circular (apenas para aberturas eventuais)

* A distancia entre aberturas esta limitada a 0,5do

do =	30	cm	Diâmetro das aberturas circulares
XC3 =	760	cm	Posição da abertura circular 3
XC4 =	805	cm	Posição da abertura circular 4
xc3 =	240	cm	Posição da abertura circular 3 (menor distancia do apoio)
xc4 =	195	cm	Posição da abertura circular 4 (menor distancia do apoio)

Aberturas Casteladas

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

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

k	1,4	ok	Razão Expansora
Do/d	1	ok	Parâmetro
p/Do	1,3	ok	Parâmetro

Figura 57: Planilha de entrada de dados castelado: informações das aberturas e castelamento

A seguir são solicitados os dados referentes ao material do aço, dados geométricos e materiais da laje, tipo de aço que será usado na armadura adicional mínima da laje e informações dos conectores de cisalhamento (Figura 58).

DADOS DO MATERIAL - PERFIL

	ASTM A588		Nome do Aço
$f_y =$	35,5	kN/cm ²	Resistência ao escoamento aço
$E =$	20.000	kN/cm ²	Módulo de elasticidade aço
$G =$	7930	kN/cm ²	Módulo de cisalhamento do aço

DADOS DA LAJE

$b_{ef} =$	250	cm	Largura efetiva da Laje
$t_c =$	7	cm	Espessura da Laje
$h_F =$	6	cm	Distancia entre laje e perfil
$b_o =$	16	cm	Largura média abertura deck
$t =$	0,9	cm	espessura do deck
$b =$	300	cm	Comprimento da laje

DADOS DO MATERIAL - LAJE

	CP II-E-32		Nome do Concreto
$f_{ck} =$	3	kN/cm ²	Módulo de cisalhamento do concreto
$f_{cd} =$	2,00	kN/cm ²	Resistência ao escoamento do concreto
$E_c =$	3.300,00	kN/cm ²	Módulo de elasticidade do concreto
Aço CA	60		Resistência da armadura adicional

DADOS DOS CONECTORES

	STB 100x19		Nome do Conector
$H_c =$	10	cm	Altura do Conector
$D_c =$	1,9	cm	Diâmetro do Conector
$f_u =$	45	kN/cm ²	Resistência a ruptura do conector
$d_i =$	30	cm	Distancia entre conectores
$n_r =$	2		Número de conectores por fileira

Figura 58: Planilha de entrada de dados castelado: informações do aço e laje

A Figura 59 mostra as últimas informações referentes aos dados de projeto. Junto ao coeficiente de ponderação estrutural (fundo cinza escuro) está a tabela do mesmo para referência do usuário (Tabela 5).

OUTRAS INFORMAÇÕES

γ_{M0}	1	-	Coefficiente de ponderação estrutural
β_{vm}	1	-	Coef. dado conforme a capacidade de rotação da ligação Para as vigas: biapoiada=1,00; contínuas=0,95 e semicontínuas 0,85, 0,90 ou 0,95
γ_{a1}	1,1	-	Coefficiente de ponderação estrutural

INFORMAÇÕES DE PROJETO

L =	1000	cm	Comprimento da viga
q =	6,077	kN/m ²	Carga distribuída
q _{Ld} =	0,001268	kN/cm ²	Combinação de Cargas para dimensionamento
q _L =	0,000872	kN/cm ²	Combinação de Cargas para flecha
M _{Sd} =	47.558,15	kNcm	Momento Fletor de cálculo
V _{Sd} =	190,23	kN	Esforço Cortante de cálculo * Própria reação de apoio
Utiliz.	2		Utiliz. 1:Piso ; Utiliz. 2:Cobertura
$\delta^* = L /$	250		Deslocamento Máximo admissível
f máx =	4,00	cm	Deslocamento Máximo admissível

Tabela C.1 — Deslocamentos máximos

Figura 59: Planilha de entrada de dados castelado: informações do projeto

6.3 VERIFICAÇÃO DE VIGA MISTA

A planilha de verificação de vigas mistas calcula inicialmente os parâmetros geométricos e de esbeltez da viga (Figura 60).

PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

$h =$	42,80	cm	Altura da alma do perfil de aço
$h_p =$	43,42	cm	Duas vezes a distância da face interna da mesa à LNP
$y_g =$	22,54	cm	Centro de gravidade do perfil
$A_{af} =$	27,55	cm ²	Área da mesa superior do perfil de aço
$A_{aw} =$	38,52	cm ²	Área da alma do perfil de aço

EXIGÊNCIAS

$h/t_w =$	47,56	Esbeltez da Viga
Limite 1 =	89,25	Viga não esbelta
Limite 2 =	135,29	ok

Figura 60: Planilha de dimensionamento de viga mista: parâmetros geométricos e de esbeltez

As primeiras verificações são referentes à flambagem local da mesa e alma do perfil, conforme mostra a Figura 61.

VERIFICAÇÕES DA FLAMBAGEM NA MESA

$\lambda =$	6,24	Parâmetro de esbeltez	
$\lambda_p =$	9,02	Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação	
$\lambda_r =$	23,55	Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento	
$M_r =$	51.915,20	kN.cm	Momento fletor correspondente ao início do escoamento
$M_{pl} =$	59.702,48	kN.cm	Momento fletor de plastificação da seção
$M_{cr} =$	259.032,42	kN.cm	Momento fletor de flambagem elástica
$M_{Rk} =$	59.702,48	kN.cm	Momento fletor característico
$M_{Rd0} =$	54.274,98	kN.cm	Momento resistente de cálculo antes da cura do concreto

VERIFICAÇÕES DA FLAMBAGEM NA ALMA

$\lambda =$	47,56	Parâmetro de esbeltez	
$\lambda_p =$	87,98	Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação	
$M_r =$	51.913,89	kN.cm	Momento fletor correspondente ao início do escoamento
$M_{pl} =$	59.700,98	kN.cm	Momento fletor de plastificação da seção
$M_{Rk} =$	59.700,98	kN.cm	Momento fletor característico
$M_{Rd0} =$	54.273,62	kN.cm	Momento resistente de cálculo antes da cura do concreto

Figura 61: Planilha de dimensionamento de viga mista: verificações de flambagem local

AVALIAÇÃO DA LINHA NEUTRA

C1	3.187,50	kN	Resistente à compressão da laje
C2	3.062,68	kN	Resistência à tração do perfil de aço

Posição da linha neutra plástica na laje de concreto

Ccd =	3.062,68	kN	Força Resistente de cálculo da espessura comprimida da laje
Tad =	3.062,68	kN	Força resistente de cálculo da região tracionada do perfil de aço
a =	6,73	cm	Espessura comprimida da laje

MOMENTO RESISTENTE DE CÁLCULO

MRd =	99.497,51	kN.cm	Momento fletor de cálculo
-------	-----------	-------	---------------------------

Figura 62: Planilha de dimensionamento de viga mista: cálculo da linha neutra e momento fletor

Em seguida é calculada a posição da linha neutra e são dimensionados o momento fletor resistente (Figura 62) e resistência ao esforço cortante (Figura 63).

VERIFICAÇÃO AO ESFORÇO CORTANTE

λ =	47,56		Parâmetro de esbeltez
λ_p =	58,38		Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação
λ_r =	72,71		Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento
A_w =	41,13	cm ²	Área efetiva de cisalhamento
V_{pl} =	876,07	kN	Força cortante correspondente à plastificação
VR_k =	876,07	kN	Força cortante resistente característica
VR_d =	796,43	kN	Força cortante resistente de cálculo

Figura 63: Planilha de dimensionamento de viga mista: resistência ao esforço cortante

Na sequência são dimensionados os conectores de cisalhamento (Figura 64).

DISTRIBUIÇÃO DOS CONECTORES

VRd =	3.062,68	kN	Força cortante resistente de cálculo
Aw =	2,84	cm ²	Área efetiva de cisalhamento
qRd 1 =	102,07	kN	Resistência de cálculo do Stud bolt
qRd 2 =	112,84	kN	Resistência de cálculo do Stud bolt
qRd =	102,07	kN	Resistência de cálculo do Stud bolt
n =	62		Número total de conectores ao longo do vão
e max =	56,00	cm	Espaçamentos máximos
e min =	7,6	cm	Espaçamentos mínimos
e min =	19	cm	Espaçamentos mínimos
di =	15,87	cm	Distância interconectores
	erro		Verificação da distribuição
	31,75	cm	Distância interconectores (duas linhas)
	ok		

Figura 64: Planilha de dimensionamento de viga mista: distribuição dos conectores

Por último, é verificado o deslocamento máximo no centro do vão, conforme Figura 65.

ESTADO-LIMITE DE SERVIÇO DE DESLOCAMENTO EXCESSIVO

q =	0,000264	kN/cm ²	Peso da laje e perfil
fa =	1,54	cm	Deslocamento devido ao peso próprio
q =	0,000608	kN/cm ²	Demais carregamentos
η E =	12,12		Homogenização dos módulos de elasticidade
r =	0,054		Relação de áreas laje/perfil
I VM =	93.929,73	cm ⁴	Momento de inércia combinado
fi =	1,26	cm	Deslocamento devido as cargas adicionais
f =	2,81	cm	Deslocamento total

Figura 65: Planilha de dimensionamento de viga mista: deslocamento máximo

6.4 VERIFICAÇÃO DE VIGA MISTA COM ABERTURAS

O dimensionamento de vigas mistas com aberturas segue a mesma rotina apresentada no capítulo 4, sendo inicialmente calculada a resistência e o número de conectores (Figura 66).

DISTRIBUIÇÃO DOS CONECTORES

$A_w =$	2,84	cm ²	Área efetiva de cisalhamento
$\alpha =$	1,00		Relação altura/diâmetro do conector
PRd 1=	81,66	kN	Resistência de cálculo do Stud bolt
PRd 2=	83,33	kN	Resistência de cálculo do Stud bolt
PRd =	81,66	kN	Resistência de cálculo do Stud bolt adotada
$k_t =$	0,88		Fator de redução
$k_{t \max} =$	0,70		Fator de redução máximo
$k_{t \text{ ad}} =$	0,70		Fator de redução adotado
$q_{Rd} =$	57,16	kN	Resistência de cálculo do Stud bolt
$n =$	32		Número de conectores por fileira ao longo do vão
$n_1 =$	12,0		Número de conectores até o centro da abertura retangular 1
$n_2 =$	18,0		Número de conectores até o centro da abertura retangular 2
$n_{1,2} =$	6,0		Número de conectores entre os centros das aberturas retangulares
$n_{o1} =$	3,3		Número de conectores na abertura retangular 1
$n_{o2} =$	3,3		Número de conectores na abertura retangular 2
$n_3 =$	16,0		Número de conectores até o centro da abertura circular 3
$n_4 =$	12,0		Número de conectores até o centro da abertura circular 4
$n_{3,4} =$	3,0		Número de conectores entre os centros das aberturas circulares
$n_{o3} =$	0,0		Número de conectores na abertura circular 3
$n_{o4} =$	0,0		Número de conectores na abertura circular 4

Figura 66: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: distribuição dos conectores

A primeira verificação apresentada é a localização da linha neutra e a verificação da resistência ao momento fletor desconsiderando as aberturas (Figura 67).

AVALIAÇÃO DA LINHA NEUTRA

$N_{c,s,Rd}$	2.975,00	kN	Resistente à compressão da laje
$N_{a,Rd}$	3.368,95	kN	Resistência à tração do perfil de aço

Linha neutra plástica na seção do perfil

$N_{c,max} =$	1.829,10	kN	Força cortante dos conectores
$\eta =$	0,61		Grau da força cortante dos conectores
$\eta_{,min} 1 =$	0,55		Grau da força cortante dos conectores mínimo
$\eta =$	0,61		Grau da força cortante dos conectores adotado
$N_{f,Rd} =$	978,03	kN	Resistência da mesa do perfil
$N_{w,Rs} =$	1.412,90	kN	Resistência na alma

Linha neutra na alma do perfil

$M_{pl,Rd} =$	105.243,01	kN.cm	Momento resistente no topo do perfil
$M_{pl,a,Rd} =$	51.915,20	kN.cm	Resistência seção aço

MOMENTO RESISTENTE DE CÁLCULO

$MRd =$	84.702,40	kN.cm	Momento resistente de cálculo
---------	-----------	-------	-------------------------------

Figura 67: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: momento resistente

A seguir iniciam-se as verificações considerando as aberturas. Os modos de falha são calculados para todas as aberturas, inicialmente para as aberturas circulares e após para as aberturas retangulares.

Inicialmente são calculadas as informações geométricas das aberturas (Figura 68) que são utilizadas posteriormente.

ABERTURA CIRCULAR

NAS ABERTURAS

Geometria

so =	15,00	cm	Distância entre aberturas (imagem)
heo =	27	cm	Altura equivalente a uma abertura retangular da abertura circular
le =	13,5	cm	Largura equivalente a uma abertura retangular da abertura circular
loeff =	21	cm	Largura da abertura (classificação)
A bT =	35,3	cm ²	Área de cada um dos T (seção proporcional retangular)
hT =	9,35	cm	Altura do T
hw,T =	7,9	cm	Altura da alma do T
A T =	34,66	cm ²	Área de cada um dos T (seção circular)
Zel =	1,68	cm	Distância do centróide do T até o topo do T
h eff =	42,33	cm	Distância entre os centróides dos T's

Figura 68: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: geometria

São calculadas as solicitações de esforço cortante e momento fletor nas aberturas e entre aberturas, estes valores são utilizados para verificar cada modo de falha. A Figura 69 mostra as solicitações calculadas.

Solicitações

Abertura	3		
x =	240	cm	Centro da abertura
M Sd =	34.698,43	kNcm	Momento no centro da abertura
V Sd =	101,49	kN	Força cortante no centro da abertura
Abertura	4		
x =	195	cm	Centro da abertura
M Sd =	29.861,76	kNcm	Momento no centro da abertura
V Sd =	118,61	kN	Força cortante no centro da abertura
x =	217,5	cm	Posição entre centros de abertura
V Sd int =	107,48	kN	Força cortante entre as aberturas

Figura 69: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: solicitações

Conforme a sequência apresentada, o primeiro modo de falha a ser verificado é a resistência ao momento fletor nas aberturas (Figura 70).

Resistência ao Momento Fletor

$N_{bT,Rd} =$	1.253,15	kN	Resistencia a tração do tê inferior
Abertura	3		
$b_{eff,o} =$	247,50	cm	Largura efetiva laje
$N_{cRd 1} =$	2.945,25	kN	Resistência compressão na abertura circular 4
$N_{cRd 2} =$	914,55	kN	Resistência compressão na abertura
$N_{cRd} =$	914,55	kN	Resistência compressão adotado na abertura
$M_{c,Rd} =$	63.276,66	kN.cm	Momento resistente de cálculo
$N_{bT, Sd} =$	558,00	kN	Solicitação de compressão na abertura
Abertura	4		
$b_{eff,o} =$	236,25	cm	Largura efetiva laje
$N_{cRd 1} =$	2.811,38	kN	Resistência compressão na abertura circular 3
$N_{cRd 2} =$	685,91	kN	Resistência compressão na abertura
$N_{cRd} =$	685,91	kN	Resistência compressão adotado na abertura
$M_{c,Rd} =$	60.719,58	kN.cm	Momento resistente de cálculo
$N_{bT, Sd} =$	558,00	kN	Solicitação de compressão na abertura

Figura 70: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: solicitações

Na sequência, é calculada a resistência ao esforço cortante para cada abertura (Figura 71).

Esforço Cortante

AT =	33,95	cm ²	Área de cada um dos T (ponderada)
Av =	8,36	cm ²	Área de influencia do cortante (no T)
Vt,Rd =	171,29	kN	Resistência ao esforço cortante do T (superior ou inferior)
bws =	38,50	cm	Largura efetiva laje
CRd =	0,12		Parâmetro
k1 =	0,15		Parâmetro
k =	2,00		Parâmetro
Armadura			
Asl cc =	7,60	cm ² /m	Área de aço calculada
Asl =	7,60	cm ² /m	Área reforço
ρ1 =	0,0109		Parâmetro
v =	0,77	N/mm ²	Início da expressão
v min =	0,54	N/mm ²	Valor mínimo do início da expressão
v =	0,77	N/mm ²	Início da expressão adotado
Abertura	3		
σcp =	0,32	kN/cm ²	Tensão no T
Vc,Rd =	33,68	kN	Resistência ao esforço cortante do concreto
VRd =	376,27	kN	Força cortante resistente de cálculo abertura
Abertura	4		
σcp =	0,34	kN/cm ²	Tensão no T
Vc,Rd =	34,30	kN	Resistência ao esforço cortante do concreto
VRd =	376,89	kN	Força cortante resistente de cálculo abertura

Figura 71: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: esforço cortante

Finalizando as verificações entre aberturas, são verificados os modos de falhas entre aberturas, mecanismo de Vierendeel (Figura 72), resistência ao cortante entre aberturas dos conectores, longitudinal e flambagem da alma (Figura 73).

ENTRE ABERTURAS**Vierendeel**

$A_{w,T} =$	7,11	cm ²	Área da alma do T
$A_f =$	27,55	cm ²	Área da mesa do T
$z_{pl} =$	0,91	cm	Distância da linha neutra do T até o topo do T
$\Delta N_{cs,Rd} =$	0,00	kN	Resistência dos conectores
$k_o =$	0,79		
$M_{vc,Rd} =$	0,00	kN.cm	
$M_{pl,Rd} =$	1.510,91	kN.cm	Resistência do T superior ou inferior
Abertura	4		
$M_{bT,N,Rd} =$	1.211,34	kN.cm	Resistência do T inferior considerando as tensões axiais
$M_{tT,N,Rd} =$	1.510,91	kN.cm	Resistência do T superior
$M_{Vi,Rd} =$	5.444,52	kN.cm	Resistência ao Vierendeel
$V_{Sd} =$	118,61	kN	Esforço cortante crítico
$M_{Vi,Sd} =$	1.601,24	kN.cm	Solicitação Vierendeel

Figura 72: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: mecanismo de Vierendeel

Esforço Cortante**Conectores**

$V_{wp,Sd} =$	90,38	kN	Solicitação de esforço cortante
$\Delta N_{cs,Rd} =$	171,48	kN	Resistência dos conectores

Longitudinal

$V_{wp,Rd} =$	276,70	kN	Resistência da alma entre aberturas
---------------	--------	----	-------------------------------------

Flambagem alma

$M_{wp,Rd} =$	1.198,13	kN.cm	Momento resistente de cálculo
$\lambda_1 =$	74,57		Parâmetro de esbeltez
$\lambda =$	0,87		Parâmetro de esbeltez relativo
$\alpha =$	0,34		Fator imperfeição
$\phi =$	1,00		Parâmetro
$\chi =$	0,68		Fator de redução de flambagem local
$N_{wp,Rd} =$	324,67	kN	Força axial de compressão resistente de cálculo da alma

Figura 73: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: esforços cortantes e flambagem alma

Encerando as verificações das aberturas circulares, iniciam-se as verificações das aberturas retangulares.

Os processos são exatamente iguais aos apresentados anteriormente (Figura 66 a 73). A Figura 74 mostra a única diferença entre as verificações, nas resistências limites da viga (governadas pela flexão e flambagem).

Resistencia limite da viga (limitada pela flexão)

$M_{wp,Rd} =$	8.520,00	kN.cm	Momento resistente de cálculo
$M_{bT,N,Rd} =$	798,56	kN.cm	Momento resistente de cálculo do Te inferior
$V_{Rd 1} =$	190,55	kN	Força cortante resistente de cálculo
$V_{Rd 2} =$	182,00	kN	Força cortante resistente de cálculo
$V_{Rd} =$	182,00	kN	Força cortante resistente de cálculo limite adotada

Flambagem da alma

$\lambda_1 =$	74,57	Parâmetro de esbeltez
$\lambda =$	1,86	Parâmetro de esbeltez relativo
$\alpha =$	0,49	Fator imperfeição
$\phi =$	2,64	Parâmetro
$\chi =$	0,22	Fator de redução de flambagem local

Resistência limite da viga (limitada pela flambagem)

$N_{wp,Rd} =$	283,02	kN	Força axial de compressão resistente de cálculo da alma
$V_{Rd 1} =$	134,65	kN	Força cortante resistente de cálculo limite
$V_{Rd 2} =$	113,73	kN	Força cortante resistente de cálculo limite
$V_{Rd} =$	113,73	kN	Força cortante resistente de cálculo limite adotada

Figura 74: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: resistências limite

Verificados todos os modos de falha para todas as aberturas circulares e retangulares, falta ainda ser verificado os deslocamentos máximos no centro do vão.

A Figura 75 apresenta a verificação da flecha utilizando a metodologia de incremento para cada abertura, enquanto a Figura 76 apresenta a flecha utilizando a metodologia para múltiplas aberturas e uma comparação entre estas duas formulações.

ESTADO-LIMITE DE SERVIÇO DE DESLOCAMENTO EXCESSIVO

n =	12,12		Homogenização
q =	0,000264	kN/cm ²	Carga devido ao peso próprio
fa =	1,54	cm	Deslocamento pelo peso próprio
q =	0,000608	kN/cm ²	Demais cargas
r =	0,054		Relação de áreas laje/perfil
I VM =	93.929,73	cm ⁴	Momento de inércia combinado
fi =	1,26	cm	Deslocamento devido as demais cargas
f =	2,81	cm	Deslocamento total desconsiderando as aberturas
f add/f =	0,039	cm	Deslocamento proporcional adicional da abertura 1
f add/f =	0,035	cm	Deslocamento proporcional adicional da abertura 2
f add/f =	0,010	cm	Deslocamento proporcional adicional da abertura 3
f add/f =	0,011	cm	Deslocamento proporcional adicional da abertura 4
f add/f =	0,266	cm	Deslocamento adicionais das aberturas
f =	3,07	cm	Deslocamento total

Figura 75: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: deslocamentos no centro do vão

FORMULAÇÃO PARA MÚLTIPLAS ABERTURAS

f add/f =	0,02	cm	Deslocamento proporcionais adicionais das aberturas circulares
f add/f =	0,07	cm	Deslocamento proporcionais adicionais das aberturas retangulares
f add/f =	0,246	cm	Deslocamento adicionais das aberturas

Diferença no deslocamento adicional

diff f =	8%	Diferença entre métodos apresentados
----------	----	--------------------------------------

Figura 76: Planilha de dimensionamento de viga mista com aberturas: deslocamento – aberturas múltiplas

Este dimensionamento apresentado teve uma diferença de 7,62%, ficando dentro do esperado considerando que são apenas 4 aberturas; para n aberturas, esta diferença tende a diminuir.

6.5 VERIFICAÇÃO DE VIGA MISTA CASTELADA

A planilha de verificação de vigas casteladas mistas inicia apresentando os parâmetros geométricos do castelamento e dimensões e propriedades do perfil celular (Figura 77).

PERFIL CASTELADO

di =	45,70	cm	Altura total do perfil original
d =	63,98	cm	Altura total do perfil castelado
h =	61,08	cm	Altura da alma do perfil de aço castelado
Ag =	110,07	cm ²	Área bruta da seção transversal
Ix =	70.960,56	cm ⁴	Momento de inércia, relativo ao eixo x
Wx =	2.218,21	cm ³	Módulo de resistência elástico do eixo x
Cw =	1,62E+06	cm ⁶	Constante de empenamento

PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

hp =	61,08	cm	Duas vezes a distância da face interna da mesa à LNP
yg =	31,99	cm	Centro de gravidade do perfil
Aaf =	27,55	cm ²	Área da mesa superior do perfil de aço
Aawi =	54,97	cm ²	Área da alma do perfil de aço
Aaw =	54,97	cm ²	Área da alma do perfil de aço
bwe,m =	36,56	cm	Largura mínima do montante de extremidade
p =	59,41	cm	Tamanho entre o início de um alvéolo e outro
bw =	13,71	cm	Distância horizontal entre alvéolos Limites: ok
Do =	45,7	cm	Diâmetro do alvéolo
Ld =	940,59	cm	Comprimento útil para distribuição dos alvéolos
n =	15		Número de alvéolos
bwe =	61,28	cm	Largura final do montante de extremidade
Lc =	1.029,71	cm	Comprimento da viga para corte
xr1 =	84,13	cm	Posição da abertura circular 3 (menor distância do apoio)
xr2 =	143,54	cm	Posição da abertura circular 4 (menor distância do apoio)

Figura 77: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: parâmetros geométricos

EXIGÊNCIAS

$h/tw =$	67,87	Esbeltez da Viga
Limite 1 =	89,25	Viga não esbelta
Limite 2 =	135,29	ok

VERIFICAÇÕES DA FLAMBAGEM NA MESA

$\lambda =$	6,24	Parâmetro de esbeltez	
$\lambda_p =$	9,02	Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação	
$\lambda_r =$	23,55	Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento	
$M_r =$	78.746,48	kN.cm	Momento fletor correspondente ao início do escoamento
$M_{pl} =$	90.558,45	kN.cm	Momento fletor de plastificação da seção
$M_{cr} =$	392.907,86	kN.cm	Momento fletor de flambagem elástica
$M_{Rk} =$	90.558,45	kN.cm	Momento fletor característico
$M_{Rd0} =$	82.325,86	kN.cm	Momento resistente de cálculo antes da cura do concreto

Figura 78: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: exigências e flambagem da mesa

Em seguida é verificada a flambagem da mesa (Figura 78), distribuição dos conectores (Figura 79) e avaliação da linha neutra (Figura 80), lembrando que o momento resistente é verificado inicialmente para uma viga cheia (sem as aberturas).

DISTRIBUIÇÃO DOS CONECTORES

$A_w =$	2,84	cm ²	Área efetiva de cisalhamento
$\alpha =$	1,00		Relação altura/diâmetro do conector
$PRd\ 1 =$	81,66	kN	Resistência de cálculo do Stud bolt
$PRd\ 2 =$	83,33	kN	Resistência de cálculo do Stud bolt
$PRd =$	81,66	kN	Resistência de cálculo do Stud bolt adotada
$kt =$	0,88		Fator de redução
$kt\ max =$	0,70		Fator de redução máximo
$kt\ ad =$	0,70		Fator de redução adotado
$qRd =$	57,16	kN	Resistência de cálculo do Stud bolt
$n =$	32		Número de conectores por fileira ao longo do vão
$n\ 3 =$	4,0		Número de conectores até o centro da abertura circular 3
$n\ 4 =$	8,0		Número de conectores até o centro da abertura circular 4
$n\ c =$	32,0		Número de conectores até a abertura central
$n\ 3,4 =$	4,0		Número de conectores entre os centros das aberturas circulares
$no\ 3 =$	0,0		Número de conectores na abertura circular 3
$no\ 4 =$	0,0		Número de conectores na abertura circular 4

Figura 79: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: distribuição dos conectores

AVALIAÇÃO DA LINHA NEUTRA

$N_{c,s,Rd}$	3.187,50	kN	Resistente à compressão da laje
$N_{a,Rd}$	3.552,32	kN	Resistência à tração do perfil de aço

Linha neutra plástica na seção do perfil

$C_{cd} =$	3.187,50	kN	Força Resist, de cálculo da esp. comprimida da laje de concreto
$C_{ad} =$	182,41	kN	Força resistente de cálculo da região comprimida do perfil de aço
$T_{ad} =$	3.369,91	kN	Força resistente de cálculo da região tracionada do perfil de aço

A linha neutra plástica está na mesa superior

$y_p =$	0,30	cm	Distância da linha neutra da seção plastificada até a face superior do perfil de aço
$y_c =$	0,15	cm	Distância do centro geométrico da parte comprimida do perfil de aço até a face superior desse perfil
$y_t =$	30,27	cm	Distância do centro geométrico da parte tracionada do perfil de aço até a face inferior desse perfil

MOMENTO RESISTENTE DE CÁLCULO

$MR_d =$	143.865,82	kN.cm	Momento resistente de cálculo
----------	------------	-------	-------------------------------

Figura 80: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: linha neutra e momento resistente

Em seguida são calculadas as geometrias das aberturas (Figura 81) e solicitações (Figura 82).

ABERTURAS CIRCULARES

NAS ABERTURAS

Geometria

$s_o =$	13,71	cm	Distância entre aberturas (imagem)
$h_{eo} =$	41,13	cm	Altura equivalente a uma abertura retangular da abertura circular
$l_e =$	6,1695	cm	Largura equivalente a uma abertura retangular da abertura circular
$l_{oeff} =$	9,597	cm	Largura da abertura (classificação)
$A_{bT} =$	36,5275	cm ²	Área de cada um dos T (seção proporcional retangular)
$h_T =$	11,425	cm	Altura do T
$h_{w,T} =$	9,975	cm	Altura da alma do T
$A_T =$	36,5275	cm ²	Área de cada um dos T (seção circular)
$Z_{el} =$	2,13	cm	Distância do centróide do T até o topo do T
$h_{eff} =$	59,72	cm	Distância entre os centróides dos T's

Figura 81: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: geometria das aberturas

Solicitações

Abertura	1		
x =	84,13	cm	Centro da abertura
M Sd =	14.657,83	kNcm	Momento no centro da abertura
V Sd =	159,40	kN	Força cortante no centro da abertura
Abertura	2		
x =	143,54	cm	Centro da abertura
M Sd =	23.386,49	kNcm	Momento no centro da abertura
V Sd =	136,79	kN	Força cortante no centro da abertura
x =	113,835	cm	Posição entre centros de abertura
V Sd int =	146,92	kN	Força cortante entre as aberturas
Abertura	Centro		
x =	500,00	cm	Centro da abertura
M Sd =	47.558,15	kNcm	Momento no centro da abertura

Figura 82: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: solicitações

Na sequência são verificados os modos de falha nas aberturas (lembrando que as aberturas verificadas são as aberturas críticas e nos casos em que há combinação de esforços, todos os pontos críticos são verificados).

A resistência ao momento fletor (Figura 83) depende de diversos fatores; desta forma não é possível prever onde será o ponto mais crítico; conforme o modelo apresentado, todos os pontos críticos devem ser avaliados.

Resistência ao Momento Fletor

$N_{bT,Rd} =$	1.296,73	kN	Tensão resistente pelo T inferior
Abertura	1		
$b_{eff,o} =$	208,53	cm	Largura efetiva da laje
$N_{cRd 1} =$	2.481,54	kN	Resistência compressão na abertura circular 4
$N_{cRd 2} =$	228,64	kN	Resistência compressão na abertura
$N_{cRd} =$	228,64	kN	Resistência compressão adotado na abertura
$M_{c,Rd} =$	80.101,95	kN.cm	Momento resistente de cálculo
$N_{bT, Sd} =$	347,07	kN	Solicitação de compressão na abertura
Abertura	2		
$b_{eff,o} =$	223,39	cm	Largura efetiva da laje
$N_{cRd 1} =$	2.658,28	kN	Resistência compressão na abertura circular 3
$N_{cRd 2} =$	457,28	kN	Resistência compressão na abertura
$N_{cRd} =$	457,28	kN	Resistência compressão adotado na abertura
$N_{bT, Sd} =$	327,77	kN	Solicitação de compressão na abertura
$M_{c,Rd} =$	82.760,78	kN.cm	Momento resistente de cálculo
Abertura	centro		
$b_{eff,o} =$	250,00	cm	Largura efetiva da laje
$N_{cRd 1} =$	2.975,00	kN	Resistência compressão na abertura circular 3
$N_{cRd 2} =$	1.829,10	kN	Resistência compressão na abertura
$N_{cRd} =$	1.829,10	kN	Resistência compressão adotado na abertura
$M_{c,Rd} =$	98.713,71	kN.cm	Momento resistente de cálculo

Figura 83: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: resistência ao momento fletor nas aberturas críticas

A Figura 84 apresenta o dimensionamento ao esforço cortante que também é verificado para mais de uma abertura. Entretanto, a resistência a este esforço não mostrou uma grande variação entre os pontos analisados.

Esforço Cortante

AT =	48,87	cm ²	Área de cada um dos T (ponderada)
Av =	23,27	cm ²	Área de influência do cortante (no T)
Vt,Rd =	477,02	kN	Resistência ao esforço cortante do T (superior ou inferior)
bws =	38,50	cm	Largura efetiva da laje
CRd =	0,12		Parâmetro
k1 =	0,15		Parâmetro
k =	2,00		Parâmetro
Armadura			
Asl cc =	7,60	cm ² /m	Área de aço calculada
Asl =	7,60	cm ² /m	Área reforço
ρ1 =	0,0109		Parâmetro
v =	0,77	N/mm ²	Início da expressão
v min =	0,54	N/mm ²	Valor mínimo do início da expressão
v =	0,77	N/mm ²	Início da expressão adotado
Abertura 1			
σcp =	0,24	kN/cm ²	Tensão no T
Vc,Rd =	30,27	kN	Resistência ao esforço cortante do concreto
VRd =	984,31	kN	Força cortante resistente de cálculo abertura
Abertura 2			
σcp =	0,21	kN/cm ²	Tensão no T
Vc,Rd =	29,13	kN	Resistência ao esforço cortante do concreto
VRd =	983,18	kN	Força cortante resistente de cálculo abertura

Figura 84: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: resistência ao esforço cortante

A solicitação ao mecanismo de Vierendeel (Figura 85) é diretamente proporcional ao esforço cortante no local. Desta forma, é necessário apenas verificar a resistência entre aberturas mais próximas ao apoio, onde este cortante será máximo.

A Figura 86 apresenta o restante das verificações, também analisadas nas aberturas mais próximas do apoio.

ENTRE ABERTURAS**Vierendeel**

$A_{w,T} =$	8,98	cm ²	Área da alma do T
$A_f =$	27,55	cm ²	Área da mesa do T
$z_{pl} =$	0,96	cm	Distância da linha neutra do T até o topo do T
$\Delta N_{cs,Rd} =$	0,00	kN	Resistência dos conectores
$k_o =$	1,00		
$M_{vc,Rd} =$	0,00	kN.cm	
$M_{pl,Rd} =$	2.137,47	kN.cm	Resistência do T superior ou inferior
Abertura	1		
$M_{bT,N,Rd} =$	1.984,35	kN.cm	Resistência do T inferior considerando as tensões axiais
$M_{tT,N,Rd} =$	2.137,47	kN.cm	Resistência do T superior
$M_{Vi,Rd} =$	8.243,63	kN.cm	Resistência a Vierendeel
$V_{Sd} =$	159,40	kN	Esforço cortante crítico
$M_{Vi,Sd} =$	983,40	kN.cm	Solicitação Vierendeel

Figura 85: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: resistência ao mecanismo de vierendeel

Esforço Cortante**Conectores**

$V_{wp,Sd} =$	56,46	kN	Solicitação de esforço cortante
$\Delta N_{cs,Rd} =$	226,39	kN	Resistência dos conectores

Longitudinal

$V_{wp,Rd} =$	252,90	kN	Resistência da alma entre aberturas
---------------	--------	----	-------------------------------------

Flambagem da alma

$M_{wp,Rd} =$	1.000,91	kN.cm	Momento resistente de cálculo
$\lambda_1 =$	74,57		Parâmetro de esbeltez
$\lambda =$	0,51		Parâmetro de esbeltez relativo
$\alpha =$	0,49		Fator imperfeição
$\phi =$	0,70		Parâmetro
$\chi =$	0,84		Fator de redução de flambagem local
$N_{wp,Rd} =$	367,89	kN	Força axial de compressão resistente de cálculo da alma

Figura 86: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: demais verificações

Por fim, são verificados os deslocamentos no centro do vão (Figura 87), onde é utilizada a metodologia para o cálculo dos deslocamentos para n aberturas.

ESTADO-LIMITE DE SERVIÇO DE DESLOCAMENTO EXCESSIVO

$n =$	12,12		Relação modular
$q =$	0,000264	kN/cm ²	Carga devido ao peso próprio
$f_a =$	0,73	cm	Deslocamento pelo peso próprio
$q =$	0,000608	kN/cm ²	Demais cargas
$r =$	0,063		
$I_{VM} =$	1,79E+05	cm ⁴	Momento de inércia combinado
$f_i =$	0,66	cm	Deslocamento devido as demais cargas
$f =$	1,39	cm	Deslocamento total desconsiderando as aberturas

DESLOCAMENTO DEVIDO AS ABERTURAS

$f_{add/w} =$	0,23	cm	Deslocamento proporcionais adicionais das aberturas circulares
$f_{add} =$	0,320	cm	Deslocamento adicionais das aberturas
$f =$	1,71	cm	Deslocamento total

Figura 87: Planilha de dimensionamento de viga mista castelada: deslocamento

6.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esta planilha traz o resumo de todas as solicitações e resistências, verificando se a viga mista é capaz ou não de resistir aos esforços.

Apresenta-se inicialmente, conforme ilustra a Figura 88, o diagrama de esforços cortante e momento fletor.

DIAGRAMAS

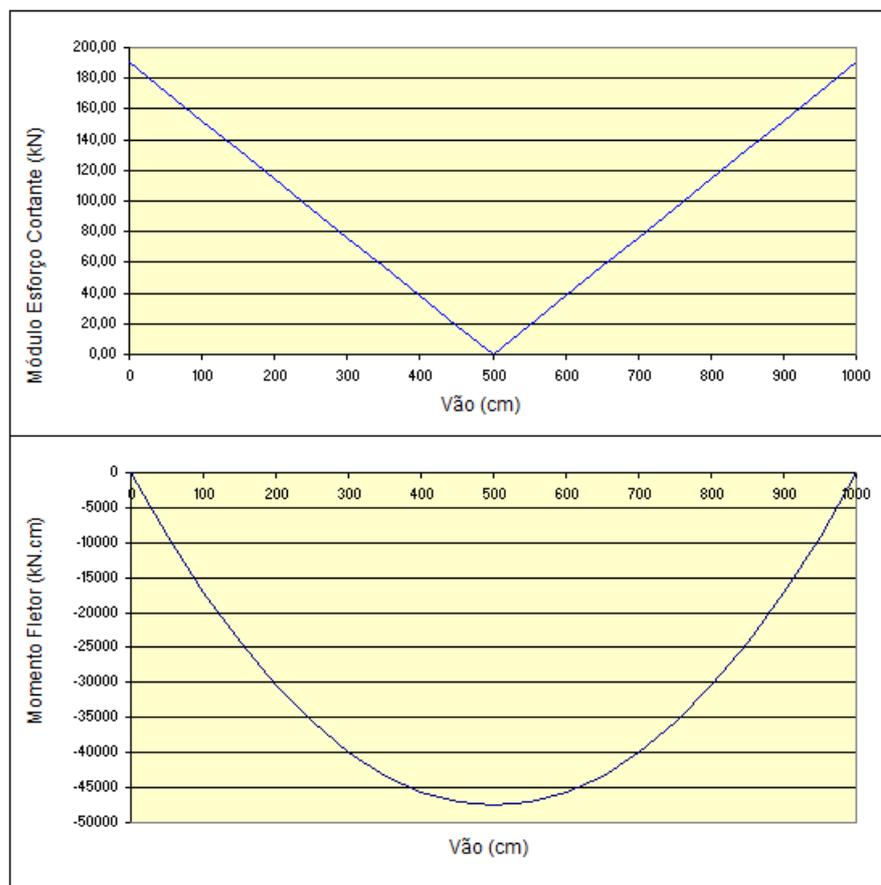


Figura 88: Planilha de resultados: diagramas

RESUMO DAS VERIFICAÇÕES

Modo de falha	Unidade	Alma Cheia	Solicitações
Resistência ao Cisalhamento	VRd = kN	796,43 Verifica	190,23
Resistência ao Momento Fletor	MRd = kN.cm	99.497,51 Verifica	47.558,15
Flambagem Local da Mesa	Mrdo = kN.cm	54.274,98 Verifica	47.558,15
Flambagem da Alma	Mrdo = kN.cm	54.273,62 Verifica	47.558,15
Deslocamento Excessivo	f = cm	2,81 Verifica	4,00

Figura 89: Planilha de resultados: viga mista

Em uma segunda etapa, apresenta-se um resumo das solicitações e resistências de projeto da viga mista (alma cheia), conforme apresenta a Figura 89. Em uma terceira etapa são apresentados os resultados para o dimensionamento da viga mista com as aberturas, conforme podem ser visualizados nas Figuras 90 e 91.

Modo de falha	Unidade	Aberturas	Solicitações
Resistência ao Momento Fletor	MRd = kN.cm	84.702,40 Verifica	47.558,15
Resistência ao Momento Fletor na abertura 1	MRd = kN.cm	59.174,19 Verifica	31.003,16
Resistência ao Momento Fletor na abertura 2	MRd = kN.cm	62.913,69 Verifica	39.563,62
Resistência ao Cisalhamento na abertura 1	VRd = kN	377,19 Verifica	121,75
Resistência ao Cisalhamento na abertura 2	VRd = kN	379,42 Verifica	87,51
Resistência a Flexão de Virendeel aberturas 1 e 2	MRd = kN.cm	5.592,62 N Verif	6.087,44
Resistência ao Cisalhamento dos conectores 1 e 2	VRd = kN	342,96 Verifica	159,13
Resistência ao Cisalhamento longitudinal entre aberturas 1 e 2	VRd = kN	737,85 Verifica	159,13
Resistência ao cisalhamento entre abertura 1 e 2 (limitada pela flexão)	VRd = kN	182,00 Verifica	95,12
Flambagem da alma entre as aberturas 1 e 2	VRd = kN	283,02 Verifica	159,13
Resistência ao cisalhamento entre ab. 1 e 2 (limitada pela flambagem)	VRd = kN	134,65 Verifica	95,12

Figura 90: Planilha de resultados: viga mista com aberturas – Parte 1

Resistência ao Momento Fletor na abertura 3	MRd = kN.cm	63.276,66 Verifica	34.698,43
Resistência ao Momento Fletor na abertura 4	MRd = kN.cm	60.719,58 Verifica	29.861,76
Resistência ao Cisalhamento na abertura 3	VRd = kN	376,27 Verifica	101,49
Resistência ao Cisalhamento na abertura 4	VRd = kN	376,89 Verifica	118,61
Resistência a Flexão de Virendeel abertura 3 e 4	MRd = kN.cm	5.444,52 Verifica	1.601,24
Resistência ao Cisalhamento dos conectores 3 e 4	VRd = kN	171,48 Verifica	90,38
Resistência ao Cisalhamento longitudinal entre aberturas 3 e 4	VRd = kN	276,70 Verifica	90,38
Flambagem da alma entre as aberturas 3 e 4	VRd = kN	324,67 Verifica	90,38
Deslocamento Excessivo	f = cm	3,07 Verifica	4,00

Figura 91: Planilha de resultados: viga mista com aberturas – Parte 2

Em uma última etapa, são apresentados os esforços e resistências da viga mista castelada (Figura 92).

Modo de falha	Unidade	Castelada	Solicitações
Resistência ao Momento Fletor	MRd = kN.cm	143.865,82 Verifica	47.558,15
Flambagem Local da Mesa	Mrdo = kN.cm	82.325,86 Verifica	47.558,15
Resistência ao Momento Fletor na abertura 1	MRd = kN.cm	80.101,95 Verifica	14.657,83
Resistência ao Momento Fletor na abertura 2	MRd = kN.cm	82.760,78 Verifica	23.386,49
Resistência ao Momento Fletor na abertura central	MRd = kN.cm	98.713,71 Verifica	47.558,15
Resistência ao Cisalhamento na abertura 1	VRd = kN	984,31 Verifica	159,40
Resistência ao Cisalhamento na abertura 2	VRd = kN	983,18 Verifica	136,79
Resistência a Flexão de Virendeel aberturas 1 e 2	MRd = kN.cm	8.243,63 Verifica	983,40
Resistência ao Cisalhamento dos conectores 3 e 4	VRd = kN	226,39 Verifica	56,46
Resistência ao Cisalhamento entre aberturas 1 e 2	VRd = kN	252,90 Verifica	56,46
Flambagem da alma entre as aberturas 1 e 2	VRd = kN	367,89 Verifica	56,46
Deslocamento Excessivo	f = cm	1,71 Verifica	4,00

Figura 92: Planilha de resultados: viga mista castelada

7 MODELOS

São apresentados cinco exemplos para comparar a utilização dos perfis castelados, analisando a resistência de perfis de alma cheia versus perfil castelados, diminuição do perfil original para um mesmo projeto, diferentes alturas de chapa expansora e tipos de padrões castelados hexagonais e circulares.

7.1 EXEMPLO A1: COMPARAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIAS PARA O USO DE UM MESMO PERFIL

A viga A1 é simplesmente apoiada apresentando um comprimento de 4,2 m. A mesma é utilizada como viga de piso e está sujeita a um carregamento de peso próprio e uma carga uniformemente distribuída de 7 kN/m. Os materiais e perfis utilizados foram: aço ASTM A572 G50, perfil W150x18 (para as duas vigas, a de alma cheia e castelada), padrão de castelada do tipo Peiner e sem uso de chapa expansora. A Figura 93 apresenta a geometria da seção transversal, as propriedades dos materiais e perfil utilizado encontram-se na Tabela 10.

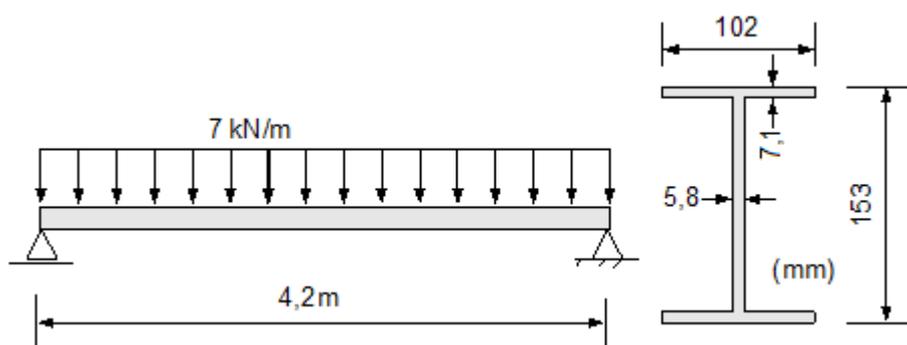


Figura 93: Viga A1 e geometria do perfil utilizado

Tabela 10: Propriedades do perfil e material utilizados no exemplo A1

Perfil	W150x18		Aço	ASTM A572 G50	
Ag =	23,4	cm ²	fy =	34,5	kN/cm ²
J =	4,34	cm ⁴	E =	20.500	kN/cm ²
P =	18	Kg/m	G =	7.720	kN/cm ²

Neste exemplo apresenta-se a comparação entre uma viga de alma cheia e uma viga castelada utilizando o mesmo perfil original, sendo comparado o ganho ao se castelar uma viga.

A tabela 11 apresenta os resultados para o dimensionamento do projeto considerando uma viga de alma cheia e a tabela 12 apresenta o mesmo projeto com o mesmo perfil porém castelado.

Tabela 11: Resultados do exemplo A1 para viga de alma cheia

Modo de Falha	Resistência de cálculo			Solicitação do projeto			Situação
Formação de mecanismo plástico	MP =	4.372,09	kN.cm	MSd =	2.375,19	kN.cm	Verifica
Escoamento do montante de alma por flexão e cisalhamento	VRd =	151,49	kN	VSd =	22,57	kN	Verifica
Flambagem lateral com torção	MRd =	2.535,31	kN.cm	MSd =	2.375,19	kN.cm	Verifica
Estado-limite de serviço - deslocamento excessivo	fM =	1,52	cm				
	fV =	0,01	cm				
	f =	1,53	cm	f máx =	1,2	cm	Não Verifica

Tabela 12: Resultados do exemplo A1 para viga castelada

Modo de Falha	Resistência de cálculo			Solicitação do projeto			Situação
Formação de mecanismo plástico	MP =	6.386,50	kN.cm	MSd =	2.933,29	kN.cm	Verifica
Escoamento do montante de alma por cisalhamento	VRd =	50,12	kN	VSd =	22,57	kN	Verifica
Escoamento do montante de alma por flexão	VRd =	86,82	kN	VSd =	22,57	kN	Verifica
Flambagem do montante de alma	VSd =	95,50	kN	VSd =	22,57	kN	Verifica
Flambagem lateral com torção	MRd =	2.439,71	kN.cm	MSd =	2.375,19	kN.cm	Verifica
Estado-limite de serviço - deslocamento excessivo	fM =	0,63	cm				
	fV =	0,08	cm				
	f =	0,71	cm	f máx =	1,2	cm	Verifica

Verificando as Tabelas 11 e 12 pode-se fazer as seguintes considerações:

A resistência à formação de mecanismo plástico da viga castelada teve um aumento, porém a solicitação crítica combinada de projeto para a viga castelada também aumentou. A viga de alma cheia verificou com 84% a mais que o necessário, enquanto a viga castelada 62%. As duas vigas verificaram a este modo de falha com uma boa margem de segurança, porém a viga castelada apresentou uma melhoria nesta resistência;

Conforme o esperado, devido às alterações na seção transversal, a resistência da viga castelada para esforços de cisalhamento foi bem inferior a viga de alma cheia, tendo uma diminuição de 66,91%. Porém para este tipo de projeto, sem uma grande carga pontual, este esforço não se manifestou-se como um problema significativo nas verificações de segurança da viga castelada;

A resistência a flambagem lateral sofreu uma leve diminuição de 3,77%;

Nas flechas verifica-se a maior diferença entre a viga castelada e a de alma cheia. A parcela devida à flexão, que é a mais significativa, teve uma baixa de 59% enquanto a parcela devida ao cisalhamento teve um aumento de 797%. Mesmo com o alto aumento da parcela devida ao cisalhamento, esta é irrelevante perante a parcela devida a flexão, mostrando assim uma redução na flecha total de 54%.

Para o projeto apresentado, a viga na forma de alma cheia não poderia ser utilizada, porém o mesmo perfil na forma de castelada, pode ser empregado. Quanto maior o vão, maior será a importância do critério da flecha no dimensionamento do projeto e maior será a vantagem em utilizar a viga castelada frente a viga de alma cheia.

O presente trabalho apresentou uma boa concordância nos resultados obtidos com os modelos numéricos usando ABAQUS (Bezerra, 2011) e com o modelo implementado utilizando o ANSYS no CEMACOM, conforme apresenta a Tabela 13 e Tabela 14. A Figura 94 ilustra o modelo implementado no ANSYS, que contém 9.575 nós e 12.212 elementos, as condições de apoio foram aplicadas nas laterais da viga no centro geométrico da seção transversal, sendo impedidos os deslocamentos transversais nas três direções; o código encontra-se no Anexo A.

Tabela 13: Comparação entre resultados de Momento Resistente

MOMENTO RESISTENTE (kN.m)			DIFERENÇA (%)	
ABAQUS (A)	ANSYS (B)	PRESENTE TRABALHO (C)	A X C	B X C
27,33	26,88	26,84	1,80	0,16

Tabela 14: Comparação entre deslocamentos máximos

DESLOCAMENTO MÁXIMO (cm)		DIFERENÇA (%)
ANSYS	PRESENTE TRABALHO	
0,69	0,71	2,82

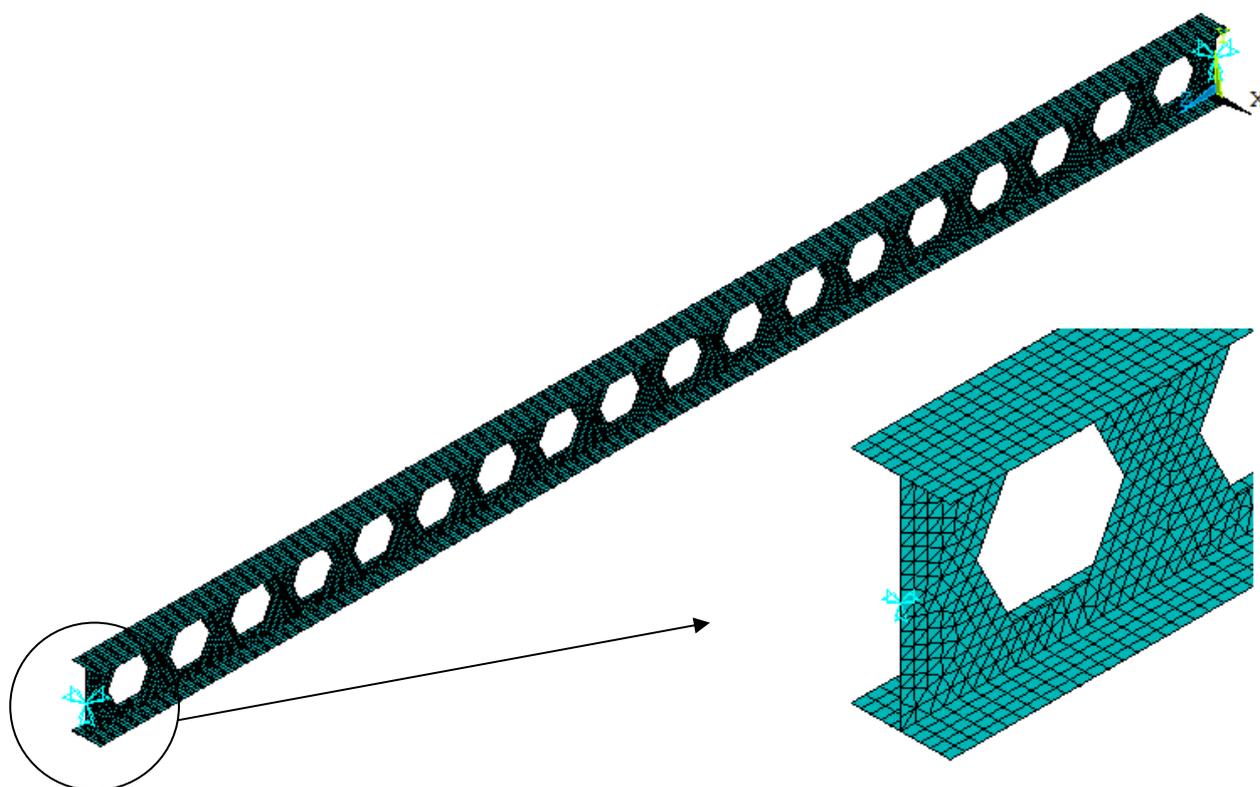


Figura 94: Modelo ANSYS

7.2 EXEMPLO A2: COMPARAÇÃO NA DIMINUIÇÃO DO PERFIL ORIGINAL PARA ATENDER A UM PROJETO

A viga A2 é simplesmente apoiada apresentando um comprimento de 10 m, com travamentos a cada 2,5 m. A mesma está sujeita a um carregamento de peso próprio e uma carga uniformemente distribuída de 3,6 kN/m e será usada como viga de cobertura. O material

e perfis empregados foram: aço ASTM A572 G50, perfil W250x44,8 para a viga de alma cheia e W250x22,3 para viga castelada (padrão do tipo Anglo-Saxão e sem uso de chapa expansora). A Figura 95 apresenta a geometria da seção transversal; as propriedades do material e perfil utilizado encontram-se na Tabela 15.

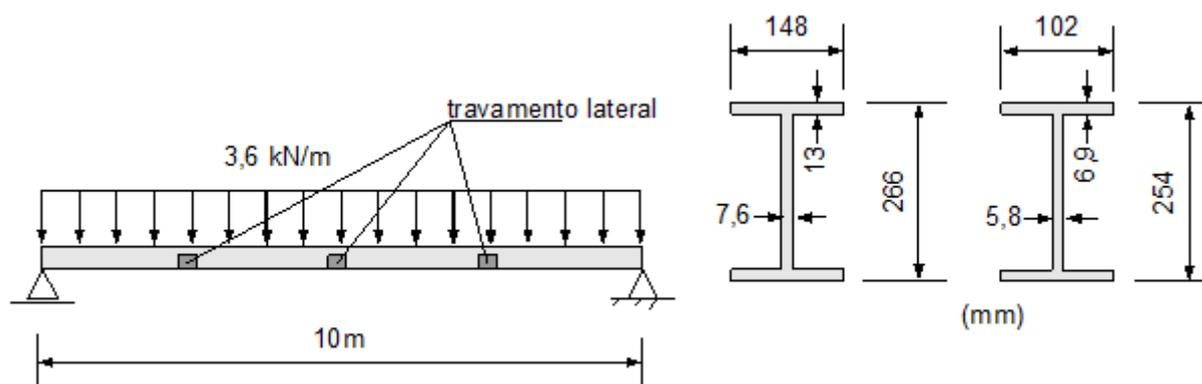


Figura 95: Viga A2 e geometria dos perfis utilizados

O objetivo deste exemplo é mostrar, para um mesmo projeto, quanto pode ser diminuído o perfil original de uma viga de alma cheia e castelada que atendam a um mesmo projeto. A tabela 16 apresenta os resultados para o dimensionamento do projeto considerando uma viga de alma cheia e a tabela 17 para a viga castelada.

Tabela 15: Propriedades do perfil e material utilizados no exemplo A2

Perfil	W 250 x 44,8	Perfil	W 250 x 22,3	Aço	ASTM A572 G50
Ag =	57,6 cm ²	Ag =	28,9 cm ²	fy =	34,5 kN/cm ²
J =	27,14 cm ⁴	J =	4,77 cm ⁴	E =	20.500 kN/cm ²
P =	44,8 kg/m	P =	22,3 kg/m	G =	7.720 kN/cm ²

Tabela 16: Resultados do exemplo A2 para viga de alma cheia

Modo de Falha	Resistência de cálculo	Solicitação do projeto	Situação
Formação de mecanismo plástico	MP = 19.015,77 kN.cm	MSd = 7.436,70 kN.cm	Verifica
Escoamento do montante de alma por flexão e cisalhamento	VRd = 343,24 kN	VSd = 29,75 kN	Verifica
Flambagem lateral com torção	MRd = 35.008,05 kN.cm	MSd = 7.436,70 kN.cm	Verifica
Estado-limite de serviço - deslocamento excessivo	fM = 3,58 cm		
	fV = 0,01 cm		
	f = 3,60 cm	f máx = 4,00 cm	Verifica

Neste exemplo, na verificação da viga de alma cheia, o critério decisivo foi o critério do deslocamento excessivo, sendo o perfil utilizado um perfil bem robusto considerando as outras verificações.

Tabela 17: Resultados do exemplo A2 para viga castelada

Modo de Falha	Resistência de cálculo	Solicitação do projeto	Situação
Formação de mecanismo plástico	MP = 11.951,00 kN.cm	MSd = 7.708,51 kN.cm	Verifica
Escoamento do montante de alma por cisalhamento	VRd = 57,36 kN	VSd = 29,75 kN	Verifica
Escoamento do montante de alma por flexão	VRd = 115,24 kN	VSd = 29,75 kN	Verifica
Flambagem do montante de alma	VSd = 120,71 kN	VSd = 29,75 kN	Verifica
Flambagem lateral com torção	MRd = 7.752,65 kN.cm	MSd = 7.436,70 kN.cm	Verifica
Estado-limite de serviço - deslocamento excessivo	fM = 3,59 cm		
	fV = 0,16 cm		
	f = 3,75 cm	f máx = 4,00 cm	Verifica

Este exemplo mostra novamente a grande vantagem das vigas casteladas; quando a carga é pequena e o vão grande, o deslocamento passa a ser o critério essencial, sendo que a viga castelada teve um deslocamento bem menor, sendo possível diminuir em 5 famílias o perfil original utilizado.

Em contrapartida, verificar-se que a viga castelada teve uma grande diminuição na resistência a flambagem lateral por torção; enquanto o perfil de alma cheia necessita apenas uma contenção lateral, o perfil castelado necessita de quatro. Isto se deve ao fato do objetivo a ser mostrado é o da diminuição de uma mesma família de perfil; com isto, adotou-se um perfil com a mesma alma, porém uma mesa muito menor, tendo sua inércia diminuída.

Para verificar se o castelamento do perfil W250x22,3 trouxe benefícios possibilitando o uso do mesmo para este projeto, apresenta-se na Tabela 18 os resultados para este perfil sem o castelamento (alma cheia). O perfil da viga não castelada não poderia ser utilizado neste projeto devido a não atender 2 modos de falha (flambagem lateral com torção e deslocamento excessivo). Novamente apresenta-se uma clara vantagem ao castelar-se um perfil.

Tabela 18: Resultados do exemplo A2 para perfil W250x22,3 de alma cheia

Modo de Falha	Resistência de cálculo			Solicitação do projeto			Situação
Formação de mecanismo plástico	MP =	8.396,05	kN.cm	MSd =	7.436,70	kN.cm	Verifica
Escoamento do montante de alma por flexão e cisalhamento	VRd =	262,17	kN	VSd =	29,75	kN	Verifica
Flambagem lateral com torção	MRd =	6.023,61	kN.cm	MSd =	7.436,70	kN.cm	Não Verifica
Estado-limite de serviço - deslocamento excessivo	fM =	8,25	cm				
	fV =	0,02	cm				
	f =	8,27	cm	f máx =	4,00	cm	Não Verifica

Também é necessário avaliar um perfil castelado inferior ao W250x22,3 para comprovar o número de famílias diminuídas. A Tabela 19 apresenta os resultados para o perfil castelado W250x17,9.

Tabela 19: Resultados do exemplo A2 para perfil W250x17,9 castelada

Modo de Falha	Resistência de cálculo			Solicitação do projeto			Situação
Formação de mecanismo plástico	MP =	9.368,78	kN.cm	MSd =	7.708,51	kN.cm	Verifica
Escoamento do montante de alma por cisalhamento	VRd =	46,93	kN	VSd =	29,75	kN	Verifica
Escoamento do montante de alma por flexão	VRd =	94,29	kN	VSd =	29,75	kN	Verifica
Flambagem do montante de alma	VSd =	79,56	kN	VSd =	29,75	kN	Verifica
Flambagem lateral com torção	MRd =	5.596,94	kN.cm	MSd =	7.436,70	kN.cm	Não Verifica
Estado-limite de serviço - deslocamento excessivo	fM =	4,62	cm				
	fV =	0,19	cm				
	f =	4,81	cm	f máx =	4,00	cm	Não Verifica

7.3 EXEMPLO A3: COMPARAÇÃO USANDO DIFERENTES DIMENSÕES PARA CHAPA EXPANSORA

A viga A3 é simplesmente apoiada apresentando um comprimento de 8,1 m, com travamentos a cada 2,7 m; está sujeita a um carregamento do peso próprio e uma carga uniformemente distribuída de 5,8 kN/m e será utilizado como viga de cobertura. Os materiais e perfis utilizado foram: aço ASTM A572 G50, perfil W310x28,3, padrão de castelada do tipo Litzka e com o uso de chapa expansora. A Figura 96 apresenta a geometria da seção

transversal, enquanto as propriedades dos materiais e perfil utilizado encontram-se na Tabela 20.

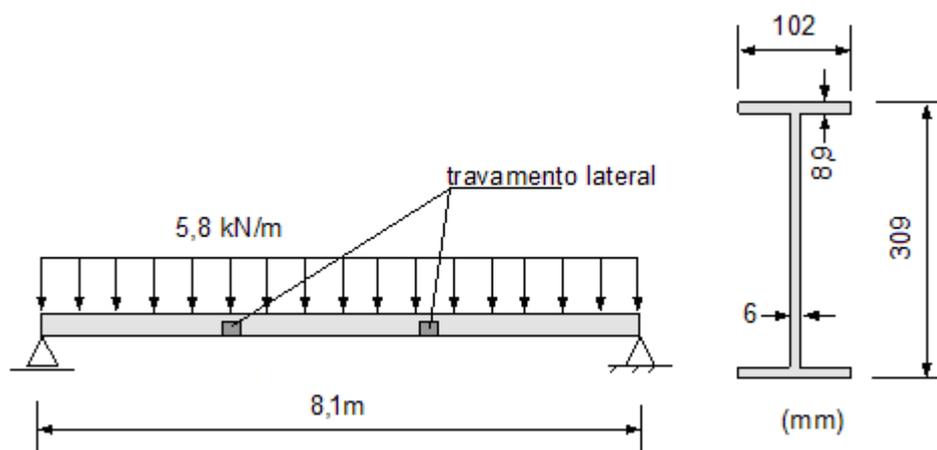


Figura 96: Viga A3 e geometria do perfil utilizado

Tabela 20: Propriedades do perfil e material utilizados no exemplo A3

Perfil	W310 x 28,3	Aço	ASTM A572 G50
$A_g =$	36,5 cm ²	$f_y =$	34,5 kN/cm ²
$J =$	8,14 cm ⁴	$E =$	20.500 kN/cm ²
$P =$	28,3 kg/m	$G =$	7.720 kN/cm ²

Foram testados diversos valores de chapa expansora, variando de zero a vinte centímetros a fim de verificar a vantagem e desvantagens no uso da chapa expansora. A Tabela 21 mostra os resultados obtidos.

Tabela 21: Resultados do exemplo A3 para viga castelada

Modo de Falha	Resistência de cálculo												
	unidade	sem hp	hp = 2 cm	hp = 4 cm	hp = 6 cm	hp = 8 cm	hp = 10 cm	hp = 12 cm	hp = 14 cm	hp = 16 cm	hp = 18 cm	hp = 20 cm	
Solicitação na seção crítica	MPSd =	kN.cm	10.734,51	11.049,62	11.379,03	11.722,75	12.080,77	12.453,09	12.839,72	13.240,65	13.655,89	14.085,43	14.529,28
Formação de mecanismo plástico	MP =	kN.cm	18.385,66	19.239,70	20.093,73	20.947,76	21.801,79	22.655,82	23.509,86	24.363,89	25.217,92	26.071,95	26.925,98
Escoamento do montante de alma por cisalhamento	VRd =	kN	103,95	108,78	113,61	118,44	123,27	128,10	132,93	137,75	142,58	147,41	152,24
Escoamento do montante de alma por flexão	VRd =	kN	207,93	217,58	227,24	236,90	246,56	256,22	265,88	275,53	137,69	126,54	117,62
Flambagem do montante de alma	VSd =	kN	132,70	124,47	117,13	110,54	104,61	99,24	94,36	89,91	85,84	82,10	78,65
Flambagem lateral com torção	MRd =	kN.cm	10.044,16	10.426,98	10.811,58	11.197,79	11.585,48	11.974,51	12.364,76	12.756,15	13.148,58	13.541,97	13.936,26
Estado-limite de serviço - deslocamento excessivo	fM =	cm	1,24	1,13	1,03	0,94	0,87	0,80	0,74	0,69	0,64	0,60	0,56
	fV =	cm	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14
	f =	cm	1,36	1,25	1,15	1,07	0,99	0,93	0,87	0,82	0,78	0,74	0,70

O uso da chapa expansora favorece a resistência à formação de mecanismo plástico linearmente, porém a sollicitação da seção crítica também aumenta linearmente. Desta forma, verifica-se que o uso de chapa expansora não apresenta ganhos ou perdas nos resultados referentes a falha por formação de mecanismo plástico. A flambagem lateral por torção também tem sua resistência aumentada linearmente.

A resistência do montante de alma é favorecida até o uso de uma chapa expansora de 14 centímetros; acima deste valor, a seção fica muito esbelta e por consequência frágil, conforme mostra a Figura 97. O deslocamento devido à flexão diminui exponencialmente, enquanto o deslocamento devido ao cisalhamento aumenta de forma pouco significativa.

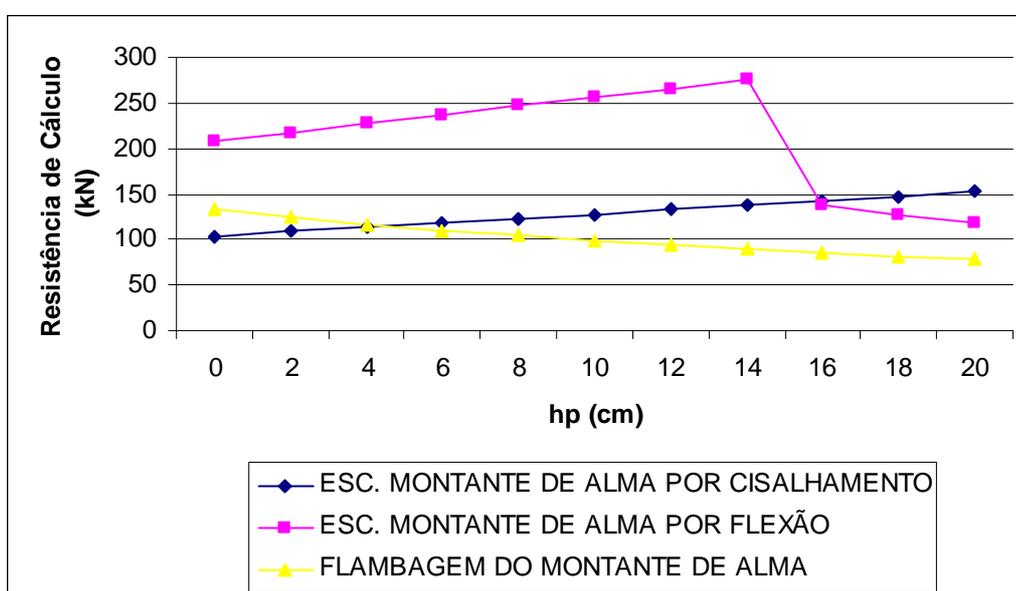


Figura 97: Modelos de falha do montante de alma da vida A3

O uso de chapa expansora aumenta a resistência do perfil de forma geral até certo valor, dependendo das particularidades de cada projeto. Neste exemplo em particular, até 14 centímetros houve ganho nas verificações e acima deste valor, algumas resistências diminuíram devido a esbeltez da seção. Porém estes valores devem ser avaliados podendo não ser o caso crítico do projeto, como é o caso deste exemplo, em que a sollicitação era apenas 37,86kN, sendo então possível que a chapa expansora utilizada neste projeto poderia ter qualquer um dos valores testados.

7.4 EXEMPLO A4: COMPARAÇÃO NAS MUDANÇAS DO TIPO DE CASTELAMENTO

A viga A4 também tem o mesmo projeto da viga A3 porém com diferentes padrões de abertura da viga castelada e circular. Os parâmetros adicionais para a abertura circular são apresentados na Tabela 22:

Tabela 22: Parâmetros da abertura circular para o modelo A4

Do/d	1
k	1,4
p/Do	1,3

Foram testados os três modelos de viga castelada, Anglo-Saxão, Peiner e Litzka e a abertura circular, a fim de verificar a vantagem e desvantagens de cada um. A Tabela 23 mostra os resultados obtidos.

Tabela 23: Resultados do exemplo A4 para viga castelada

Modo de Falha	unidade	Resistência de cálculo				
		Abertura				
		Anglo-Saxão	Peiner	Litzka	Circular	
Solicitação na seção crítica	MPSd =	kN.cm	8.041,12	9.905,38	10.734,51	9.384,69
Formação de mecanismo plástico	MP =	kN.cm	18.385,66	18.385,66	18.385,66	17.409,02
Escoamento do montante de alma por cisalhamento	VRd =	kN	72,19	103,95	103,95	68,14
Escoamento do montante de alma por flexão	VRd =	kN	145,04	180,05	207,93	72,15
Flambagem do montante de alma	VSd =	kN	124,57	132,37	132,70	79,36
Flambagem lateral com torção	MRd =	kN.cm	10.019,16	10.025,31	10.044,16	9.409,71
Estado-limite de serviço - deslocamento excessivo	fM =	cm	1,24	1,24	1,24	1,38
	fV =	cm	0,12	0,12	0,12	0,15
	f =	cm	1,37	1,35	1,36	1,53

Verifica-se que as alterações no tipo de corte da viga castelada trouxeram mudanças significativas apenas nas resistências do montante (Figura 98), sendo o padrão Circular o de menor resistência e o padrão Litzka o de maior resistência. O padrão Circular é mais crítico

neste modo de falha pois a área de abertura se torna maior frente a área de abertura dos padrões hexagonais, deixando o montante com menor área de aço, tornando-a conseqüentemente mais frágil.

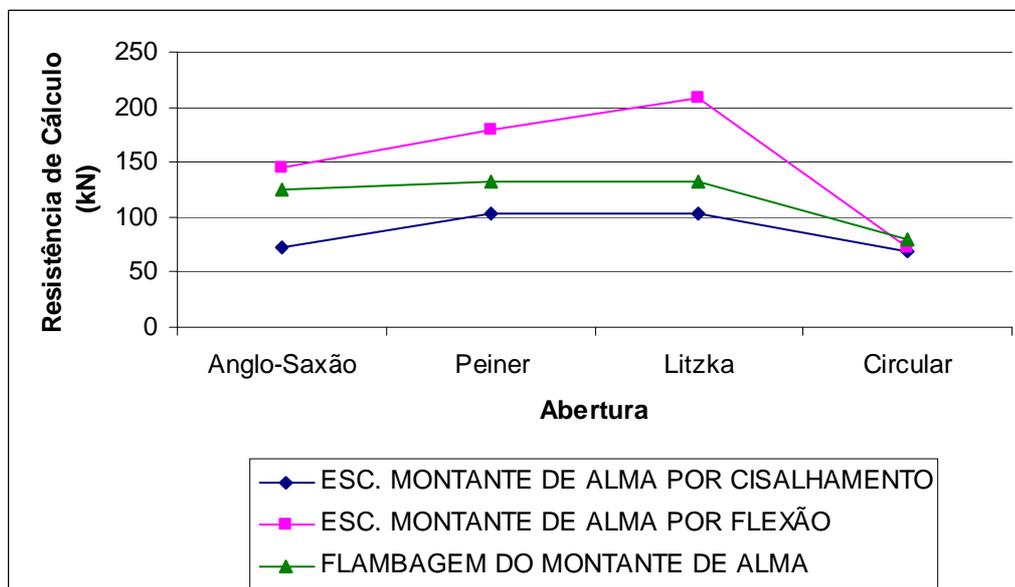


Figura 98: Resultados da viga A4 para modos de falha do montante alma

Verifica-se também que a solicitação na seção crítica também se altera com as mudanças no tipo de viga castelada sendo a Litzka a mais solicitada. A flambagem lateral com torção e flechas tem uma alteração pouco significativa.

Conclui-se, que para situações onde o cortante seja a falha predominante no projeto, o padrão Litzka pode ser a melhor opção, entretanto se a solicitação crítica for a formação de mecanismo plástico na seção crítica, o ideal é adotar o modelo Anglo-Saxão, e para casos intermediários, pode ser vantajoso adotar os demais modelos como Peiner ou Circular.

7.5 EXEMPLO A5: COMPARAÇÃO NAS MUDANÇAS DOS PARÂMETROS PARA VIGAS CASTELADAS CIRCULAR

A viga A5 também tem o mesmo projeto da viga A3, porém com abertura do tipo Circular. Para cada tipo de uso da viga (piso ou cobertura), existem uma faixa de valores utilizáveis para os parâmetros da abertura circular (k , D_o/d e p/D_o).

Foi escolhido um modelo com um conjunto de valores referenciais (M3), e mais três outros modelos, sendo em cada modelo é alterado um dos valores dos parâmetros, conforme é

mostrado na Tabela 24. Deseja-se verificar as alterações na resistência destes a cada modo de falha do perfil para cada um dos modelos a fim de verificar os benefícios e desvantagens na alteração de cada parâmetro.

Tabela 24: Conjunto de Parâmetros para corte circular adotas

	M1	M2	M3	M4
K	1,4	1,4	1,4	1,6
Do/d	1	1,3	1,3	1,3
p/Do	1,3	1,1	1,3	1,3
variação	Do/d	p/Do	referencial	k

A Tabela 25 mostra os resultados obtidos para cada modelo.

Tabela 25: Resultados do exemplo A5 para viga castelada

Modo de Falha		unidade	Resistência de cálculo			
			M1	M2	M3	M4
Solicitação na seção crítica	MPSd =	kN.cm	9.384,69	14.839,39	14.839,39	14.839,39
Formação de mecanismo plástico	MP =	kN.cm	17.409,02	16.220,28	16.220,28	18.261,71
Escoamento do montante de alma por cisalhamento	VRd =	kN	68,14	27,86	70,71	79,61
Escoamento do montante de alma por flexão	VRd =	kN	72,15	16,75	74,87	84,29
Flambagem do montante de alma	VSd =	kN	79,36	18,42	82,35	92,63
Flambagem lateral com torção	MRd =	kN.cm	9.409,71	9.314,46	9.405,65	10.602,40
Estado-limite de serviço - deslocamento excessivo	fM =	cm	1,38	1,36	1,35	1,09
	fV =	cm	0,15	1,01	1,34	0,22
	f =	cm	1,53	2,37	2,69	1,31

Verificou-se que com o aumento de Do/d (M1 versus M3), a solicitação na seção crítica e a flecha por cisalhamento aumentaram consideravelmente (Figura 99 a). Isto se deve à maior área de abertura, fragilizando a seção. O aumento de p/Do (M2 versus M3) trouxe melhoras consideráveis nas resistências aos esforços cortantes (Figura 99 b). Com o aumento de k (M3 versus M4) houve uma melhora em todas as resistências da viga.

O uso das vigas celulares hoje em dia deve-se a questões estéticas, passagem de dutos e flexibilidade nas configurações das aberturas. A altura final do perfil pode ser limitada dependendo do projeto, podendo tornar inviável a utilização dos demais tipos de abertura.

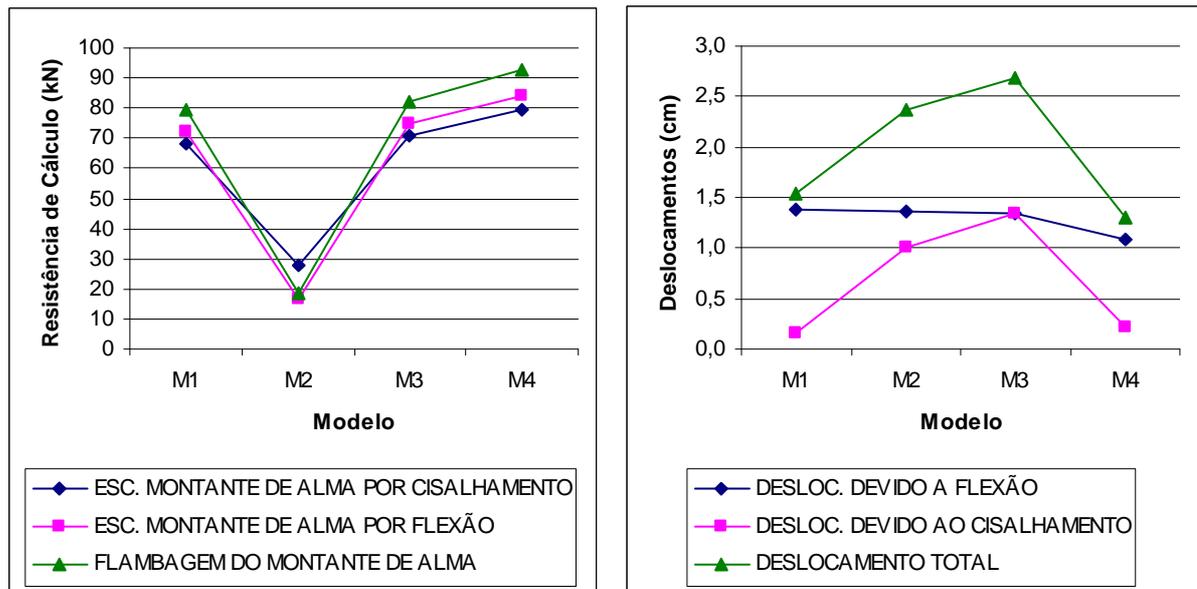


Figura 99: Resultados da viga A5 para modos de falha (a) do montante alma (b) deslocamentos

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho faz uma revisão dos processos existentes para o dimensionamento de vigas casteladas e vigas casteladas mistas. No momento a norma nacional ABNT NBR 8800:2008, e a norma americana ANSI/AISC 360-10 (2010), não apresentam nenhum esquema para o dimensionamento desse tipo de viga. No caso de vigas com aberturas eventuais estas normas citam referências externas. A norma européia, EUROCODE 3 (2005) não cita nem apresenta nenhum esquema de dimensionamento das mesmas. A norma britânica BS 5950 (2001) é a única que aborda informações sobre as vigas casteladas e apresenta configurações geométricas e diretrizes para o dimensionamento de vigas casteladas com aberturas do tipo Anglo-Saxão, porém não apresenta nenhuma informação sobre o dimensionamento de vigas casteladas mistas.

Para as vigas casteladas, os trabalhos de Cimadevila (2000) e Veríssimo (2012) servem de referência e os mesmos seguem os padrões utilizados na norma brasileira. As modelagens no software ANSYS ratificam a qualidade do procedimento implementado, tendo uma diferença no dimensionamento a flambagem lateral de 1,8 a 0,16% e de cerca de 4% nos deslocamentos.

As comparações entre vigas de alma cheia e vigas casteladas mostraram as grandes vantagens no uso de vigas casteladas, como a redução no valor da flecha máxima e a diminuição da família do perfil original. O deslocamento máximo no centro do vão do exemplo 1 reduziu-se em torno de 54% se comparado ao mesmo perfil não castelado. Assim, pode-se afirmar a grande vantagem da utilização das vigas casteladas, quando o projeto tem um grande vão e as cargas são pequenas, caso em que o critério do deslocamento máximo será o critério decisivo no dimensionamento.

No teste de dimensionamento de um mesmo projeto, as vigas casteladas conseguiram baixar o nível da família do perfil original utilizado em cinco. Reduzindo o nível da família do perfil utilizado, reduz-se o peso e o custo do material.

O uso de chapa expansora também se mostrou favorável. As chapas aumentam a resistência até certo valor, após o qual, a seção começa a ficar muito esbelta e, conseqüentemente, mais frágil. Porém mesmo com chapas expansoras grandes, deixando a seção bem esbelta, o modelo testado resistiria aos esforços de projeto com uma boa margem de segurança, mostrando o bom aproveitamento no uso da chapa expansora.

Dos 4 modelos de vigas casteladas analisados, não chegou-se a um modelo com uma geometria superior aos demais; cada modelo tem suas vantagens e desvantagens, sendo necessário uma avaliação específica para cada dimensionamento. Nos projetos cujo valor de esforço cortante seja elevado o padrão Litzka pode ser utilizado, porém se a formação de mecanismo plástico for o critério, o padrão Anglo-Saxão pode ser melhor, sendo que nos casos intermediários, os outros modelos (circular e Peiner) podem ser vantajosos.

Os testes em vigas celulares mostraram que o parâmetro k (razão de expansão) é o mais importante a ser dimensionado; no modelo apresentado, o incremento deste valor trouxe melhoras significativas nas resistências do perfil.

Para o dimensionamento de vigas casteladas mistas, utilizou-se principalmente do trabalho de Lawson (2011), que apresenta o dimensionamento de vigas mistas com aberturas seguindo o EUROCODE 3 (2005). Além deste trabalho, foi utilizada a metodologia apresentada pela norma brasileira para verificação de vigas mistas e dos materiais de viga castelada para propor um método de dimensionamento de vigas casteladas mistas.

8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As vigas casteladas dispõem de diversos trabalhos, enquanto que em relação às vigas casteladas mistas existe uma maior carência de referências sobre o seu dimensionamento. Algumas contribuições para as mesmas são comentadas a seguir.

- Estudar o dimensionamento de mais tipos de aberturas nas vigas casteladas mistas além das aberturas circulares, como os demais padrões aqui apresentados para as vigas casteladas (Litzka, Peiner e Anglo-Saxão);
- Comprovar numericamente e/ou experimentalmente as metodologias apresentadas para vigas casteladas mistas.
- Comprovar a distância crítica para cada modo de falha da viga castelada mista de forma experimental;

- Ensaiar experimentalmente as vigas casteladas para obtenção de uma curva tensão x número de ciclos que represente um perfil do tipo castelado;
- Propor equacionamentos para verificação das vigas casteladas e vigas casteladas mistas quanto ao modo de estado-limite de serviço de vibrações excessivas.

REFERÊNCIAS

ABREU, L. M. P., **Determinação do momento fletor resistente a flambagem lateral com torção de vigas de aço celulares**. 2010. Dissertação de mestrado. Programa de Pós Engenharia de Estruturas, UFMG, Minas Gerais.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **ANSI/AISC 360-10 - Specification for Structural Steel Buildings**. Chicago, Illinois, 2010.

ARCELORMITTAL. **Long Carbon Europe Sections and Merchant Bars. ACB Cellular Beams**. 2008. Disponível em: <<http://donar.messe.de/exhibitor/hannovermesse/2014/C634798/acb-R-cellular-beams-eng-29355.pdf>>. Acessado em 18/10/2014.

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

ALTFILLISCH, M. D., Cooke, B. R., Toprac, A. A. **An investigation of welded open-web expanded beams**. Welding Research Supplement. 1957.

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

BEZERRA, M. E. **Determinação do Momento Fletor Resistente à Flambagem Lateral com Torção de Vigas de Aço Casteladas**. 2011. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, UFMG, Belo Horizonte.

BRADLEY, T. P. **Stability of castellated beams during erection**. 2003. Master's Thesis, Virginia Tech.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI) **BS 5950-1:2000: Structural use of steelwork in building Part1: Code of practice for design- Rolled and welded sections**. London, 2001.

CIMADEVILA, Francisco Javier Estévez; Gutiérrez, Emilio Martín; Rodríguez, José Antonio Vázquez. **Vigas alveoladas**. Madri: A Coruña: Biblioteca Técnica Universitária, Vol 3. 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 moment-shear interaction curve**. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 59. 2003.

DELESQUES, R. **Stabilité des montants des poutres ajourées**. Construction Métallique, vol. 3. 1968.

DELESQUES, R. **Le calcul des poutres ajourées**. Construction Métallique, vol. 4. 1969.

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

DOUGUERTY, B. K. **Castellated Beams: A state of the art report**. South African, Institute of Civil Engineers Journal. 1993.

EUROCODE 3: EN 1993, **Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints**. Brussels. CEN-European Committee for Standardisation. 2005.

FERRARI, G. A. Simulação numérica do comportamento estrutural de vigas alveolares mistas de aço e concreto. 2013. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia, UFV, Viçosa

GRUNBAUER, B. V. **Strong in Steel**. Disponível em: <Web Page: <http://www.grunbauer.nl/eng/wat.htm>>. Acessado em 13/05/2013

HALLEUX, P. **Étude expérimentale et technique du compartement élastique des pouters métalliques à ame évidée**. Revue Française de Mécanique. 1967.

HECHLER, C. S. et al. **Investigations on beams with multiple regular web openings**. Architectural Engineering Conference. USA. 2006.

HOSAIN, M. U., SPEIRS, W. G. **An experimental investigation of expanded open-web steel beams**. Congres EIC, Ottawa. 1970.

KERDAL, D., NETHERCOT, D. A. **Failure modes for castellated beams**. Journal of Constructional Steel Research, v. 4. 1984.

KINGS PLACE. **Hall One**. Disponível em: <http://media.prleap.com/image/705/full/Concert_Hall_2.jpg>. Acessado em 18/10/2014.

KNOWLES, P. R. **Castellated Beams – Structural and Building Board**. Structural and Building Board. Proc. Inst. Civ. Engrs. Part 1. 1991.

LAWSON, R. M., LIM, J., HICKS, S. J., SIMM. **Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings**. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 62. 2006.

LAWSON, R. M., HICKS, S. J. **Design of composite beams with large web openings**. The Steel Construction Institute Publicarion P355. 2011.

LATTEY CIVIL & PRECAST SERVICES BRIDGE WORK. **Ponte de uma fazenda na Nova Zelândia**. Disponível em: <<http://www.latteycivil.co.nz/servbridgework.php#farmbridges>>. Acessado em 15/11/2014.

LITZKA, H. **La production automatique de pouters a âme évitée de tous types et de toutes dimensions**. Acier-Stahl-Steel, No. 11. 1960.

NETHERCOT, D. A., KERDAL, D. **Lateral-torsional buckling of of castellated beams**. Journal of the Institution of Structural Engineers, Part A Design and Construction, v. 68B. 1982.

OLIVEIRA, L. B., VERÍSSIMO, G. S., VIEIRA, W. B., CARVALHO, J. M. F., PAES J. C. L. **Procedimentos para definição das características geométricas de vigas alveolares de aço**. Construmetal, Congresso Latinoamericano da construção Metálica. 2012.

PÁGINA DO CLICRS. **Novas estações da Trensurb**. Disponível em: <Web Page: <http://wp.clicrbs.com.br/ultimasnoticias/2012/06/27/trensurb-confirma-para-terca-que-vem-inicio-das-operacoes-de-novas-estacoes/?topo=52,1,1,171,e171>>. Acessado em 23/09/2013.

REDWOOD, R. G., DEMIRDJIAN, S. **Castellated beam web buckling in shear**. Journal of Structural Engineering, Vol. 124. No. 10. 1998

SILVEIRA, E. G. **Estudo de vigas alveolares com ênfase nos modos de colapso com formação de rótula plástica**. 2011. Dissertação de Mestrado, UFV, Viçosa, Minas Gerais.

SHANMUGAM, N. E. **Openings in Thin-Walled Steel Structures**. In: ThinWalled Structures. Elsevier, v.28. 1997.

SAYED-AHMED, E. Y. **Lateral torsion-flexure buckling of corrugated web steel girders**. Structures & Building. 2004.

Steel beams with web opening, 2013. Disponível em: <<http://www.steel-insdag.org/teachingmaterial/chapter28.pdf>>. Acessado em 19/09/2013.

TAMAYO, J. L. P. **Análise Numérica de Vigas Mistas pelo Método dos Elementos Finitos**. 2011. Dissertação de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

TATA STEEL LIMITED. **Kings Place, London**. Disponível em: <<http://www.tatasteelconstruction.com/en/case-studies/commercial/kings-place#>>. Acessado em 10/09/2014.

THEVENDRAN, V.; SHANMUGAM, N. E. **Lateral Buckling of Doubly Symmetric Beams Containing Openings**. Journal of Engineering Mechanics. ASCE. No.7. Vol. 117. 1991.

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

VALEMAM PERFIS METÁLICOS. **Centro de Convenções World Trade Center**. Disponível em: <<http://www.valemam.com.br/index.php/conteudo/show/id/25>>. Acessado em 21/09/2013.

VERÍSSIMO, G. S., VIEIRA, W. B., SILVEIRA, E. G., RIBEIRO, J. C. L., PAES, J. L. R., BEZERRA, E. M., SILVA, A. L. R. C., FAKURY, R. H. **Dimensionamento de vigas alveolares de aço**. Construmetal, Congresso Latinoamericano da construção Metálica. 2012.

VERÍSSIMO, G. S., PAES, J. L. R., FAKURY, R. H., RODRIGUES, F. C. **Estudo de vigas de aço alveolares fabricadas a partir de perfis laminados brasileiros. Relatório de Pesquisa**. Registro FAPEMIG: TEC-APQ-01429-08. Registro UFV: 30157258412. 2010.

VIEIRA, W. B. **Simulação numérica do comportamento estrutural de vigas casteladas de aço com ênfase na flambagem do montante de alma.** 2011. Dissertação de Mestrado. UFV, Viçosa.

YUAN W., KIM B., LI, L. **Buckling of axially loaded castellated steel columns.** Journal of Constructional Steel Research. v.92, p 40-45. 2013.

ZAAROUR, W., REDWOOD, R. G. **Web buckling in thin webbed castellated beams.** Journal of Structural Engineering. v.122, No.8. 1996.

ANEXO A – SIMULAÇÃO DO MODELO 7.1

A seguir é apresentado o código usado para simular o modelo 7.1 no ANSYS. O script contém os dados parametrizados das seções casteladas, em que é necessário apenas entrar com os dados do perfil, tipo de castelamento e dados de projeto.

```

! CEMACOM - Centro de Mecânica Aplicada e Computacional
!
! Análise de Perfis I, Vigas Casteladas e Vigas Celulares
!
! Bolsista Matheus Roman Carini
! Mestranda Raquel Brinkhus
! Professor Inácio Morsch
!
/NOPR ! Suppress printing of UNDO process
/PMACRO ! Echo following commands to log
FINISH ! Make sure we are at BEGIN level
/CLEAR,NOSTART ! Clear model since no SAVE found
!*
/NOPR
/PMETH,OFF,0
/FILNAME,FLT,0
/TITLE,Peiner      L = 4210 mm      q = 7.18 kN/m
/CWD,'C:\ArqAnsys'
!
! ***** ENTRADAS *****
!
! Geometria
!
tw=5.8    ! espessura da alma
tfs=7.1   ! espessura da mesa superior
tfi=7.1   ! espessura da mesa inferior
bfs=102   ! largura da mesa superior

```

bfi=102 ! largura da mesa inferior

h0=153 ! altura do perfil de alma cheia inicial

n=18 ! número de furos (se alveolar)

!

! Padrão de Rasgos

!

padrao=2

! 0- Alma cheia

c=4210

halma=153-7.1 ! altura da alma (h0 não aplicável)

! 1- Anglo-Saxão

! 2- Peiner

! 3- Litzka

! 4- Celular (Walker)

d0=200 ! diâmetro (h0 não aplicável)

!

! Carregamento

!

l=7

! 1- Carga pontual aplicada no centro do vão e no centro da alma [N]

! 2- Carga pontual aplicada no centro do vão e na mesa superior [N]

! 3- Carga pontual aplicada no centro do vão e na mesa inferior [N]

! 4- Momento Constante aplicado na linha neutra [Nmm]

! 5- Binário aplicado nas mesas produzindo momento constante [Nmm]

! 6- Carga distribuída aplicada nas mesas produzindo momento constante [Nmm]

! 7- Cargas concentradas uniformemente distribuídas [N/mm]

bl=bf/2 ! largura da faixa de aplicação na mesa superior

p=7.180 ! Valor total da carga pontual ou carga linear

!

! Restrições

!

restr=2

! 1- Bi-apoiada na mesa inferior

! 2- Bi-apoiada na linha neutra

```

restrl=2
! 2- Contida lateralmente em ambas as faces
! 3- Contida lateralmente em ambas as faces somente na alma
! 4- Impede rotação no eixo axial nos dois extremos
!
! Material
!
E=2e5 ! módulo de elasticidade
v=0.3 ! coeficiente de Poisson
se=345 ! tensão do escoamento
Et=0 ! módulo tangente
!
! Relação tensão-deformação
!
m=0
! 0- elástico-linear
! 1- elasto-plástico perfeito
! Inelastic
! Rate Independent
! Isotropic Hardening Plastic
! Mises Plasticity
!
! Malha
!
ep=15 ! tamanho padrao adotado para todos os elementos
! OU especificar parâmetros abaixo e usar ep=0
ems=10 ! número de elementos da mesa superior (número par)
emi=10 ! número de elementos da mesa inferior (número par)
ea=30 ! tamanho do elemento da alma
ec=300 ! número de elementos ao longo do comprimento
!
! *** FIM DAS ENTRADAS ***
!
!
```

```
! Define que o problema é de análise estrutural
!
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
/GO
!*
/PREP7 ! Acessa o pre-processor
!*
ET,1,SHELL181      ! especifica elemento de casca 6 gl por no
!*
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,3,0
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,6,0
KEYOPT,1,7,0
KEYOPT,1,8,0
KEYOPT,1,9,0
KEYOPT,1,11,0
!
! Furos Hexagonais - Parâmetros utilizados
!
! 11 comprimento trecho rasgo com altura variável
! 12 comprimento trecho rasgo com altura constante
! 13 comprimento entre rasgos (alma cheia) (entre bordas)
```

! l4 comprimento entre a borda e início do primeiro rasgo

! h1 altura do furo

! h2 altura do centro do furo

! c comprimento

!

! Anglo-Saxão

!

*IF,padrao,EQ,1,THEN

 halma=1.5*h0

 l1=0.29*h0

 l2=0.25*h0

 l3=0.25*h0

 l4=179-37.775

 h1=h0

 h2=halma/2

 c=2*l4+(2*l1+l2+l3)*n-l3

 passo=2*l1+l2+l3

!

! Peiner

!

*ELSEIF,padrao,EQ,2,THEN

 halma=1.5*h0

 l1=h0/4

 l2=h0/2

 l3=h0/2

 l4=77.7 !confirmar

 h1=h0

 h2=halma/2

 c=2*l4+(2*l1+l2+l3)*n-l3

 passo=2*l1+l2+l3

!

! Litzka

!

*ELSEIF,padrao,EQ,3,THEN

```

        halma=1.5*h0
        l1=1.1547*h0/4
        l2=1.1547*h0/2
        l3=1.1547*h0/2
        l4=1.1547*h0/2
        h1=l1*3.4641
        h2=halma/2
        c=2*l4+(2*l1+l2+l3)*n-l3
        passo=2*l1+l2+l3
!
! Celular (Walker)
!
*ELSEIF, padrao, EQ, 4, THEN
        halma=d0/0.67
        l3=0.25*d0
        l4=0.25*d0
        h2=halma/2
        c=2*l4+(d0+l3)*n-l3
        passo=d0+l3
*ENDIF
ls=bfs/2 ! variáveis auxiliares
li=bfi/2
ei=emi/2
es=ems/2
!
! Especifica Espessuras
!
R,1,tfi, , , , ,
RMORE, , , ,
RMORE
RMORE, ,
R,2,tw, , , , ,
RMORE, , , ,
RMORE

```

```

RMORE, ,
R,3,tfs, , , , ,
RMORE, , , ,
RMORE
RMORE, ,
!
! Especifica o material
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,E
MPDATA,PRXY,1,,v
!
! Elasto-plástico perfeito
!
*IF,m,EQ,1,THEN
    TB,BISO,1,1,2,
    TBTEMP,0
    TBDATA,,se,Et,,,
*ENDIF
!
! Define os keypoints
!
K,1,0,,,
K,2,-li,,,
K,3,li,,,
K,4,0,halma,,
K,5,-ls,halma,,
K,6,ls,halma,,
K,7,0,0,c,
K,8,-li,0,c,
K,9,li,0,c,
K,10,0,halma,c,
K,11,-ls,halma,c,

```

```

K,12,ls,halma,c,
*IF,padrao,EQ,4,THEN
    K,13,0,h2,l4+d0/2
    K,14,0,h2+d0/2,l4+d0/2
    K,15,0,h2,l4
    K,16,0,h2-d0/2,l4+d0/2
    K,17,0,h2,l4+d0
*ELSE
    *IF,padrao,NE,0,THEN
        K,13,0,h2,l4
        K,14,0,h2+((h1)/2),l4+l1
        K,15,0,h2-((h1)/2),l4+l1
        K,16,0,h2+((h1)/2),l4+l1+l2
        K,17,0,h2-((h1)/2),l4+l1+l2
        K,18,0,h2,l4+2*l1+l2
    *ENDIF
*ENDIF
!
! Altera a representacao para perspectiva isometrica
!
/VIEW, 1 ,1,1,1
/ANG, 1
/REP,FAST
!
! Define as Retas
!
!1
LSTR, 3, 1
LSTR, 3, 9
LSTR, 9, 7
LSTR, 7, 1
LSTR, 1, 2
LSTR, 7, 8
LSTR, 8, 2

```

```
LSTR, 1, 4
LSTR, 4, 10
LSTR, 10, 7
!11
LSTR, 6, 4
LSTR, 6, 12
LSTR, 12, 10
LSTR, 4, 5
LSTR, 10, 11
LSTR, 11, 5
*IF,padrao,EQ,4,THEN
    LARC,14,15,13,d0/2
    LARC,15,16,13,d0/2
    LARC,16,17,13,d0/2
    LARC,17,14,13,d0/2
*ELSE
    *IF,padrao,NE,0,THEN
        LSTR, 13, 14
        LSTR, 13, 15
        LSTR, 14, 16
        LSTR, 15, 17
        !20
        LSTR, 17, 18
        LSTR, 16, 18
    *ENDIF
*ENDIF
!
! Definicao das areas
!
AL,1,2,3,4
AL,5,4,6,7
AL,8,4,10,9
AL,11,12,13,9
AL,14,9,15,16
```

```

*IF,padrao,EQ,4,THEN
    AL,17,18,19,20
*ELSE
    *IF,padrao,NE,0,THEN
        AL,17,18,19,20,21,22
    *ENDIF
*ENDIF
!
! Translação da área a ser cortada
!
*IF,padrao,NE,0,THEN
    AGEN,n,6, , , ,passo, ,0
!
! Subtração de áreas
!
    FLST,3,n,5,ORDE,2
    FITEM,3,6
    FITEM,3,-(5+n)
    ASBA,3,P51X
*ENDIF
NUMCMP,AREA ! Reenumera áreas
!
! Definicao dos parametros para geracao da malha
!
! Número de divisões
!
*IF,ep,NE,0,THEN
    ea=ep
    ii=1
    np=li/ep
    ei=1
    *DOWHILE,ii
        *IF,np,LE,ei,THEN
            ii=0

```

```

        *ENDIF
        ei=ei+1
*ENDDO
ii=1
np=ls/ep
es=1
*DOWHILE,ii
    *IF,np,LE,es,THEN
        ii=0
    *ENDIF
    es=es+1
*ENDDO
ii=1
np=halma/ep
ealma=2
*DOWHILE,ii
    *IF,np,LE,ealma,THEN
        ii=0
    *ENDIF
    ealma=ealma+2
*ENDDO
ii=1
np=c/ep
ec=2
*DOWHILE,ii
    *IF,np,LE,ec,THEN
        ii=0
    *ENDIF
    ec=ec+2
*ENDDO
*ENDIF
! Divide as retas
LESIZE,1, , ,ei, , , ,1
LESIZE,3, , ,ei, , , ,1

```

```

LESIZE,5, , ,ei, , , ,1
LESIZE,6, , ,ei, , , ,1
!
LESIZE,11, , ,es, , , ,1
LESIZE,13, , ,es, , , ,1
LESIZE,14, , ,es, , , ,1
LESIZE,15, , ,es, , , ,1
!
LESIZE,10, , ,ealma, , , ,1
LESIZE,8, , ,ealma, , , ,1
!
LESIZE,2, , ,ec, , , ,1
LESIZE,4, , ,ec, , , ,1
LESIZE,7, , ,ec, , , ,1
LESIZE,9, , ,ec, , , ,1
LESIZE,12, , ,ec, , , ,1
LESIZE,16, , ,ec, , , ,1
!
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
!*
AMESH,1
AMESH,2
REAL,    2 ! Seleciona o segundo conjunto de espessura
FLST,2,1,5,ORDE,1
*IF,padrao,NE,0,THEN
    FITEM,2,5
    *ELSEIF,padrao,EQ,0,THEN
        FITEM,2,3
*ENDIF
AESIZE,P51X,ea,
*IF,padrao,NE,0,THEN
    MSHAPE,1,2D
*ENDIF

```

```

MSHKEY,0
CM,_Y,AREA
*IF,padrao,NE,0,THEN
    ASEL, , , , 5
    *ELSEIF,padrao,EQ,0,THEN
        ASEL, , , , 3
*ENDIF
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
AMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
REAL, 3 ! Selecciona o terceiro conjunto de espessura
!
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
!*
FLST,5,2,5,ORDE,2
*IF,padrao,NE,0,THEN
    FITEM,5,3
    FITEM,5,-4
    *ELSEIF,padrao,EQ,0,THEN
        FITEM,5,4
        FITEM,5,-5
*ENDIF
CM,_Y,AREA
ASEL, , , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
AMESH,_Y1
CMDELE,_Y

```

CMDELE,_Y1

CMDELE,_Y2

NUMMRG,NODE, , , ,LOW ! Elimina possíveis nos coincidentes

NUMCMP,NODE ! Renumerar os nos

!

! Restrições

!

*IF,restre,EQ,1,THEN

FLST,2,2,4,ORDE,2

FITEM,2,3

FITEM,2,6

/GO

DL,P51X, ,UY,

FLST,2,2,4,ORDE,2

FITEM,2,1

FITEM,2,5

/GO

DL,P51X, ,UY,

FLST,2,1,3,ORDE,1

FITEM,2,7

/GO

DK,P51X, , , ,0,UX, , , , , ,

FLST,2,2,3,ORDE,2

FITEM,2,8

FITEM,2,-9

/GO

DK,P51X, , , ,0,UZ, , , , , ,

*ENDIF

!

! Restrições linha neutra

!

*IF,restre,EQ,2,THEN

NSEL,S,LOC,Z,c-ep/2,c+ep/2

NSEL,R,LOC,Y,halma/2-ep/2,halma/2+ep/2

```

*GET,numn1,node,,count,
*IF,numn1,EQ,1,THEN
    D,ALL, , , , ,UX,UY,UZ,, ,
*ENDIF
NSEL,S,LOC,Z,0-ep/2,0+ep/2
NSEL,R,LOC,Y,halma/2-ep/2,halma/2+ep/2
*GET,numn1,node,,count,
*IF,numn1,EQ,1,THEN
    D,ALL, , , , ,UX,UY,UZ,, ,
*ENDIF
*ENDIF
!
! Restrição lateral
!
! Toda a face
*IF,restrl,EQ,2,THEN
FLST,2,5,4,ORDE,5
FITEM,2,3
FITEM,2,6
FITEM,2,10
FITEM,2,13
FITEM,2,15
!*
/GO
DL,P51X, ,UX,
FLST,2,5,4,ORDE,5
FITEM,2,1
FITEM,2,5
FITEM,2,8
FITEM,2,11
FITEM,2,14
!*
/GO
DL,P51X, ,UX,

```

```

*ENDIF
!
! Contida lateralmente na alma
!
*IF,restr1,EQ,3,THEN
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,10
!*
/GO
DL,P51X, ,UX,
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,8
!*
/GO
DL,P51X, ,UX,
*ENDIF
!
! Impede rotação no eixo axial
!
*IF,restr1,EQ,4,THEN
*DO,tol,1,100,1
NSEL,S,LOC,Z,c+tol
NSEL,R,LOC,Y,halma/2
*GET,numn2,node,,count,
*IF,numn2,EQ,1,THEN
D,ALL, , , , ,,,,ROTZ, ,
*EXIT
*ENDIF
*ENDDO
NSEL,S,LOC,Z,0
NSEL,R,LOC,Y,halma/2
D,ALL, , , , ,,,,ROTZ, ,
*ENDIF

```

```

!
! Carga pontual centro do vão e centro da alma
!
*IF,1,EQ,1,THEN
! Para n par
*DO,tol,1,20,1 ! tol=tolerância
NSEL,S,LOC,Z,c/2
NSEL,R,LOC,Y,halma/2-tol,halma/2+tol
*GET,numn,node,,count, ! salva número de nós selecionados
!*
*IF,numn,GT,0,THEN
*EXIT
*ENDIF
*ENDDO
! Para n ímpar
*IF,numn,EQ,0,THEN
NSEL,S,LOC,Z,c/2-ep/2,c/2+ep/2
NSEL,R,LOC,Y,halma/2-h1/2-ep/2,halma/2+h1/2+ep/2
*GET,numn,node,,count,
*ENDIF
F,ALL,FY,(-p/numn)
*ENDIF
!
! Carga pontual mesa superior e centro do vão
!
*IF,1,EQ,2,THEN
NSEL,S,LOC,Z,c/2
NSEL,R,LOC,Y,halma
NSEL,R,LOC,X,0
*GET,numn,node,,count
F,ALL,FY,(-p/numn)
*ENDIF
/GO
ALLSEL,ALL

```

```

eplot
!
! Carga pontual mesa inferior e centro do vão
!
*IF,1,EQ,3,THEN
NSEL,S,LOC,Z,c/2
NSEL,R,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,X,0
*GET,numn,node,,count
F,ALL,FY,(-p/numn)
*ENDIF
/GO
ALLSEL,ALL
eplot
!
*IF,car2,EQ,1,THEN
NSEL,S,LOC,Z,0
NSEL,R,LOC,Y,halma/2
*GET,numn,node,,count, ! salva número de nós selecionados
F,ALL,FZ,p
*ENDIF
!
! Momento Constante linha neutra
!
*IF,1,EQ,4,THEN
    NSEL,S,LOC,Z,c-ep/2,c+ep/2
    NSEL,R,LOC,Y,halma/2-ep/2,halma/2+ep/2
    *GET,numn1,node,,count,
    *IF,numn1,EQ,1,THEN
        F,ALL,MX,p
    *ENDIF
    NSEL,S,LOC,Z,0-ep/2,0+ep/2
    NSEL,R,LOC,Y,halma/2-ep/2,halma/2+ep/2
    *GET,numn1,node,,count,

```

```

*IF,numn1,EQ,1,THEN
    F,ALL,MX,-p
*ENDIF
*ENDIF
!
! Binário
!
*IF,1,EQ,5,THEN
    NSEL,S,LOC,Z,c-ep/2,c+ep/2
    NSEL,R,LOC,Y,halma-ep/2,halma+ep/2
    NSEL,R,LOC,X,0
    *GET,numn1,node,,count,
    *IF,numn1,EQ,1,THEN
        F,ALL,FZ,-p/halma
    *ENDIF
    NSEL,S,LOC,Z,c-ep/2,c+ep/2
    NSEL,R,LOC,Y,-ep/2,ep/2
    NSEL,R,LOC,X,0
    *GET,numn1,node,,count,
    *IF,numn1,EQ,1,THEN
        F,ALL,FZ,p/halma
    *ENDIF
    NSEL,S,LOC,Z,0-ep/2,0+ep/2
    NSEL,R,LOC,Y,halma-ep/2,halma+ep/2
    NSEL,R,LOC,X,0
    *GET,numn1,node,,count,
    *IF,numn1,EQ,1,THEN
        F,ALL,FZ,p/halma
    *ENDIF
    NSEL,S,LOC,Z,0-ep/2,0+ep/2
    NSEL,R,LOC,Y,-ep/2,ep/2
    NSEL,R,LOC,X,0
    *GET,numn1,node,,count,
    *IF,numn1,EQ,1,THEN

```

```

                F,ALL,FZ,-p/halma
            *ENDIF
*ENDIF
!
! Momento Constante
!
*IF,1,EQ,6,THEN
SFL,13,PRES,p/(halma*bfs/2),
SFL,15,PRES,p/(halma*bfs/2),
SFL,11,PRES,p/(halma*bfs/2),
SFL,14,PRES,p/(halma*bfs/2),
SFL,3,PRES,-p/(halma*bfi/2),
SFL,6,PRES,-p/(halma*bfi/2),
SFL,1,PRES,-p/(halma*bfi/2),
SFL,5,PRES,-p/(halma*bfi/2),
*ENDIF
!
! Cargas pontuais uniformemente distribuídas
!
*IF,1,EQ,7,THEN
NSEL,S,LOC,Y,halma
NSEL,R,LOC,X,-bl/2,bl/2
*GET,numn,node,,count
F,ALL,FY,-p*c/numn/2
NSEL,S,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,X,-bl/2,bl/2
*GET,numn,node,,count
F,ALL,FY,-p*c/numn/2
*ENDIF
/GO
ALLSEL,ALL
eplot
!
! Resolve Análise Estática

```

```
!  
FINISH  
/SOL  
pstres,on          ! Activate the prestress option  
solve  
finish  
/solu  
/POST1  
!*  
/EFACET,1  
PLNSOL, U,Y, 0,1.0  
/RGB,INDEX,100,100,100, 0  
/RGB,INDEX, 80, 80, 80,13  
/RGB,INDEX, 60, 60, 60,14  
/RGB,INDEX, 0, 0, 0,15  
/REPLOT
```