

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Guilherme Wienandts Alminhana**

**VIGAS METÁLICAS ALVEOLARES: ANÁLISE  
COMPARATIVA COM VIGAS DE ALMA CHEIA**

Porto Alegre  
dezembro 2014

**GUILHERME WIENANDTS ALMINHANA**

**VIGAS METÁLICAS ALVEOLARES: ANÁLISE  
COMPARATIVA COM VIGAS DE ALMA CHEIA**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de  
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Engenheiro Civil

**Orientador: Ruy Carlos Ramos de Menezes**

Porto Alegre  
dezembro 2014

**GUILHERME WIENANDTS ALMINHANA**

**VIGAS METÁLICAS ALVEOLARES: ANÁLISE  
COMPARATIVA COM VIGAS DE ALMA CHEIA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 15 de dezembro de 2014

Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes  
Dr. Techn. pela Universitaet Innsbruck, Áustria  
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt  
Dra. pelo PPGA/UFRGS  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Rafael Ivannoff (Medabil S. A.)**  
Eng. Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Felipe Schaedler de Almeida (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

**Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes (UFRGS)**  
Dr. Techn. pela Universitaet Innsbruck, Áustria

Dedico este trabalho a meus pais e minha noiva, pela força e palavras encorajadoras nas horas difíceis durante todo o curso de Engenharia Civil.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes, orientador deste trabalho, pela paciência, palavras de apoio e pelas indicações ao longo do período de elaboração do mesmo.

Agradeço a Profa. Carin, pelas recomendações, ajuda e indicações ao longo da confecção deste trabalho.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, que sempre me apoiaram e fizeram com que hoje eu chegasse até aqui.

Agradeço à minha noiva, que sempre me prestou ajuda, teve paciência e me encorajou nas horas mais difíceis ao longo desse último ano.

Agradeço também a todas as pessoas que fizeram e fazem parte da minha vida, devido às suas contribuições e ajuda ao longo de toda a jornada.

Enquanto suspiramos por uma vida sem dificuldades,  
devemos nos lembrar que o carvalho cresce forte através  
de ventos contrários e que os diamantes são formados sob  
pressão.

*Peter Marshall*

## RESUMO

Com o desenvolvimento experimentado nos últimos anos na Construção Civil, o uso de estruturas metálicas tem atraído uma grande parcela de interesse das pessoas envolvidas nesse setor, visto que esse tipo de estrutura possibilita uma alta velocidade de montagem e confiabilidade na execução. O desenvolvimento das tecnologias nos mecanismos de produção de perfis metálicos passou por transformações, e evoluiu, tanto que novas opções surgiram no mercado, como por exemplo, o retorno das vigas alveolares. Tendo em vista o ressurgimento deste tipo de elemento, o presente trabalho busca fazer a comparação entre vigas metálicas de alma cheia, comumente utilizadas na Construção Civil em estruturas metálicas, e vigas alveolares, que são obtidas a partir do corte das vigas de alma cheia. Inicialmente, fez-se a comparação entre a adoção de vigas de alma cheia e alveolares para diferentes vãos, valores de carregamento e condições de contenção lateral, visando avaliar em termos quantitativos o peso de aço utilizado para atender às diversas situações de cálculo propostas, seguindo as prerrogativas estabelecidas pela NBR8800:2008, em termos de deslocamento e resistências máximas. Tendo em vista a modificação em termos estruturais nos perfis alveolares provocados pelas aberturas distribuídas ao longo da viga, partiu-se para uma nova comparação, a qual objetivava averiguar a diferença no desempenho estrutural entre vigas de alma cheia e alveolares. Conclui-se ao final do trabalho, que a utilização racional das vigas alveolares pode resultar em uma economia significativa no consumo de aço, em geral, quando os carregamentos são mais baixos e os vãos possuem maiores extensões. Percebeu-se através das análises desenvolvidas, que cada tipo de viga propicia vantagens em determinadas situações, deste modo, o presente trabalho fornece informações valiosas no que diz respeito ao entendimento do comportamento, utilização e desempenho de ambas as vigas metálicas, de modo a fazer com que se explore ao máximo os benefícios oferecidos por cada uma delas.

Palavras-chave: Estruturas Metálicas. Vigas de Alma Cheia. Vigas Alveolares.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho de conclusão .....	24
Figura 2 – Tensão x deformação dos aços normatizados pelo ASTM .....	30
Figura 3 – Principais perfis laminados .....	32
Figura 4 – Principais tipos de vigas em alma cheia .....	43
Figura 5 – Fases de plastificação da seção transversal de uma viga .....	45
Figura 6 – Flambagem lateral com torção .....	46
Figura 7 – Processo de fabricação de vigas metálicas alveolares .....	55
Figura 8 – Processo de confecção de vigas alveolares curvas .....	57
Figura 9 – Elementos da seção transversal de uma viga alveolar .....	58
Figura 10 – Definições geométricas do padrão Litzka .....	60
Figura 11 – Definições geométricas do padrão Peiner .....	61
Figura 12 – Definições geométricas do padrão Anglo-Saxão .....	62
Figura 13 – Definições geométricas do padrão celular .....	63
Figura 14 – Mecanismo Vierendeel.....	64
Figura 15 – Forças no montante de alma .....	65
Figura 16 – Colapso por flambagem lateral com torção e distorção da alma .....	67
Figura 17 – Analogia com viga Vierendeel .....	67
Figura 18 – Forças atuantes no alvéolo .....	68
Figura 19 – Determinação da seção crítica .....	70
Figura 20 – Forças atuantes no alvéolo - cisalhamento .....	71
Figura 21 – Parâmetros da análise de consumo de aço .....	81
Figura 22 – Configuração final de uma viga alveolar .....	82
Figura 23 – Preenchimento nos extremos de uma viga alveolar .....	84
Figura 24 – Comparativo do consumo de aço para diferentes contenções laterais para espaçamento entre vigas de 2,0m .....	88
Figura 25 – Comparativo do consumo de aço para diferentes contenções laterais para espaçamento entre vigas de 3,0m .....	89
Figura 26 – Comparativo do consumo de aço para diferentes contenções laterais para espaçamento entre vigas de 4,0m .....	89



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades mecânicas dos aços-carbono .....	28
Quadro 2 – Principais aços normatizados pela ABNT .....	29
Quadro 3 – Coeficientes de ponderação para $\gamma_g$ e $\gamma_q$ , segundo NBR8800:2008 .....	38
Quadro 4 – Coeficientes de ponderação para estados limites de serviço e últimos, segundo NBR8800:2008 .....	39
Quadro 5 – Deslocamentos máximos permitidos para os estados limites de serviço, segundo NBR8800:2008 .....	41
Quadro 6 – Coeficientes de ponderação da resistência, segundo NBR8800:2008 .....	42
Quadro 7 – Verificação ao momento fletor no eixo de maior inércia proposta pela NBR8800:2008 .....	48
Quadro 8 – Comparativo para a FLT entre vigas alveolares e de alma cheia .....	93
Quadro 9 – Resistência a FLT para vãos destravados muito grandes .....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cargas para análise do consumo de aço .....	81
Tabela 2 – Parâmetros das combinações .....	81
Tabela 3 – Comparativo entre o esforço cortante resistente das vigas metálicas .....	94
Tabela 4 – Comparativo de deformação para vigas alveolares e de alma cheia .....	96

## LISTA DE SIGLAS

NBR – Norma Brasileira

ABNT – Associação Brasileiras de Normas Técnicas

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

FLA – Flambagem Local de Alma

FLM – Flambagem Local de Mesa

FLT – Flambagem Lateral com Torção

CNC – Comando Numérico Computadorizado

PST – Plastificação da Seção Transversal

DE – Deslocamento Excessivo

## LISTA DE SÍMBOLOS

$E$  – módulo de elasticidade longitudinal do aço (kN/cm<sup>2</sup>)

$\nu$  – coeficiente de Poisson

$\beta$  – coeficiente de dilatação térmica (°C<sup>-1</sup>)

$\rho_a$  – massa específica (kg/m<sup>3</sup>)

$\gamma_f$  – coeficiente de ponderação de uma ação

$\gamma_{f1}$  – parcela que considera a variabilidade das ações

$\gamma_{f2}$  – parcela que considera a simultaneidade de atuação das ações

$\gamma_{f3}$  – parcela que considera os possíveis erros de avaliação dos efeitos das ações, deficiência do método de cálculo empregado

$\Psi_1$  – coeficiente de redução da ação variável principal para combinações de serviço frequentes

$\Psi_2$  – coeficiente de redução das demais ações variáveis para combinações de serviço quase permanentes

$F_d$  – ação de cálculo (kN)

$F_{Gi,k}$  – valor característico da ação permanente (kN)

$F_{Q1,k}$  – valor característico da ação variável, tomada como principal (kN)

$F_{Qj,k}$  – valor característico para as demais ações variáveis atuantes (kN)

$\gamma_{gi}$  – coeficiente de ponderação para carga permanente

$\gamma_{q1}$  – coeficiente de ponderação para carga variável principal

$\gamma_{qj}$  – coeficiente de ponderação para carga variável das demais cargas variáveis

$\Psi_{0j}$  – coeficiente de redução para cargas variáveis

$F_{ser}$  – ação de cálculo (kN)

$F_{Gi,k}$  – valor característico da ação permanente (kN)

$F_{Qj,k}$  – valor característico para as ações variáveis atuantes (kN)

$\Psi_{2j}$  – coeficiente de redução para cargas variáveis

$f_d$  – resistência de cálculo do elemento (kN/cm<sup>2</sup>)

$f_k$  – resistência característica do material (kN/cm<sup>2</sup>)

$\gamma_m$  – coeficiente de ponderação da resistência

$M_{sd}$  – momento fletor solicitante de cálculo (kN.cm)

$V_{sd}$  – força cortante solicitante de cálculo (kN)

$M_{rd}$  – momento fletor resistente de cálculo (kN.cm)

$V_{rd}$  – força cortante resistente de cálculo (kN)

$W$  – módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal da barra em relação ao eixo de flexão (cm<sup>3</sup>)

$\gamma_{a1}$  – coeficiente de ponderação da resistência ao escoamento, flambagem e instabilidade do aço estrutural

$f_y$  – resistência ao escoamento do aço (kN/cm<sup>2</sup>)

$M_r$  – momento fletor correspondente ao início do escoamento (kN.cm)

$M_{cr}$  – momento fletor de flambagem elástica (kN.cm)

$\lambda$  – parâmetro de esbeltez

$\lambda_p$  – parâmetro de esbeltez limite para plastificação

$\lambda_r$  – parâmetro de esbeltez limite para início do escoamento

$W_c$  – módulo de resistência elástico do lado comprimido da seção, relativo ao eixo de flexão ( $\text{cm}^3$ )

$\sigma_r$  – tensão residual de compressão, tomada comumente por 30% da resistência ao escoamento do aço ( $\text{kN/cm}^2$ )

$M_{pl}$  – momento fletor de plastificação da seção transversal ( $\text{kN.cm}$ )

$I_y$  – momento de inércia da seção em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma ( $\text{cm}^4$ )

$L_b$  – distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção ( $\text{cm}$ )

$C_w$  – constante de empenamento da seção ( $\text{cm}^6$ )

$J$  – constante de torção da seção transversal ( $\text{cm}^4$ )

$r_y$  – raio de giração em torno do eixo y ( $\text{cm}$ )

$\beta_1$  – constante para FLT

$C_b$  – fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme

$M_{m\acute{a}x}$  – momento fletor máximo solicitante de cálculo ( $\text{kN.cm}$ )

$M_A$  – momento fletor máximo solicitante de cálculo, seção a um quarto do comprimento destravado ( $\text{kN.cm}$ )

$M_B$  – momento fletor máximo solicitante de cálculo, seção central do comprimento destravado ( $\text{kN.cm}$ )

$M_C$  – momento fletor máximo solicitante de cálculo, seção a três quartos do comprimento destravado ( $\text{kN.cm}$ )

$R_m$  – parâmetro de monossimetria da seção transversal

$h$  – altura da alma ( $\text{cm}$ )

$t_w$  – espessura da alma ( $\text{cm}$ )

$k_v$  – parâmetro de cisalhamento

$V_{pl}$  – força cortante de plastificação (kN)

$A_w$  – área efetiva de cisalhamento (cm<sup>2</sup>)

$k$  – razão de expansão

$d_g$  – altura do perfil expandido (cm)

$d$  – altura total de um perfil de alma cheia (cm)

$p$  – passo do alvéolo (cm)

$h_o$  – altura do alvéolo (cm)

$a_o$  – comprimento do alvéolo (cm)

$b_w$  – trecho reto do comprimento do alvéolo (cm)

$D_o$  – diâmetro do alvéolo (cm)

$c$  – constante de conversão do momento fletor (cm)

$y_o$  – distância do centroide do alvéolo em relação ao centroide do tê (cm)

$A_t$  – área da seção transversal de um tê (cm<sup>2</sup>)

$I_t$  – momento de inércia de um tê em relação ao centroide do alvéolo (cm<sup>4</sup>)

$V_{rk1}$  – resistência característica para o esforço cortante por cisalhamento do montante (kN)

$b$  – projeção horizontal do lado inclinado da abertura para vigas casteladas (cm)

$h_{exp}$  – projeção vertical da porção inclinada do montante (cm)

$h_p$  – altura da chapa expansora (cm)

$L_p$  – comprimento de flambagem para a plastificação (cm)

$M_{r,cor}$  – momento fletor do início do escoamento ajustado (kN.cm)

$L_{r,cor}$  – comprimento para início do escoamento da seção transversal ajustado (cm)

$f$  – deslocamento (flecha) final da viga (cm)

$f_M$  – deslocamento (flecha) devido a flexão (cm)

$f_V$  – deslocamento (flecha) devido ao corte (cm)

$I_e$  – inércia equivalente de uma viga alveolar (cm<sup>4</sup>)

$A_e$  – área equivalente de uma viga alveolar (cm<sup>2</sup>)

$L_d$  – comprimento útil para distribuição dos alvéolos (cm)

$G$  – módulo de elasticidade transversal do aço (kN/cm<sup>2</sup>)

$y_a$  – distância entre o centroide do tê e a parte inferior do mesmo (cm)

$dv$  – largura da área de carregamento sobre a viga ou afastamento entre vigas (m)

$L$  – vão da viga biapoiada (m)

$L_v$  – vão de projeto (cm)

$b_{we(min)}$  – largura mínima do montante de extremidade (cm)

$n$  – número de alvéolos

$L_c$  – comprimento de corte (cm)

$\Delta MRd$  – diferença na resistência ao momento fletor entre viga de alma cheia e viga Litzka

$\Delta VRd$  – diferença na resistência ao corte entre viga de alma cheia e viga Litzka

$Q_{ser}$  – carga uniformemente distribuída de serviço (kN/m)

$\Delta f$  – diferença no deslocamento entre viga de alma cheia e viga Litzka

$Sd/Rd$  – relação entre sollicitação e resistência de cálculo

$Qd$  – carga uniformemente distribuída de cálculo (kN/m)

$\Delta Qd$  – diferença na carga máxima de cálculo entre viga de alma cheia e Litzka



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	19
<b>2 DIRETRIZES DE PESQUISA</b> .....	22
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	22
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	22
<b>2.2.1 Objetivo principal</b> .....	22
<b>2.2.2 Objetivos secundários</b> .....	22
2.3 PRESSUPOSTOS .....	22
2.4 DELIMITAÇÃO .....	23
2.5 LIMITAÇÕES .....	23
2.6 DELINEAMENTO .....	23
<b>3 AÇO ESTRUTURAL</b> .....	26
3.1 HISTÓRICO .....	26
3.2 TIPOS DE AÇO ESTRUTURAL .....	27
<b>3.2.1 Aços-carbono</b> .....	28
<b>3.2.2 Aços de baixa liga</b> .....	29
3.3 FABRICAÇÃO DO AÇO .....	30
3.4 PRODUTOS PARA USO ESTRUTURAL .....	31
<b>3.4.1 Perfis laminados a quente</b> .....	31
<b>3.4.2 Perfis soldados</b> .....	32
3.5 PROPRIEDADES DO AÇO .....	32
<b>3.5.1 Ductilidade</b> .....	33
<b>3.5.2 Fragilidade</b> .....	33
<b>3.5.3 Resiliência</b> .....	33
<b>3.5.4 Tenacidade</b> .....	34
<b>3.5.5 Dureza</b> .....	34
<b>3.5.6 Fadiga</b> .....	34
<b>4 SEGURANÇA E ESTADOS LIMITES</b> .....	35
4.1 AÇÕES .....	35
<b>4.1.1 Permanentes</b> .....	35
<b>4.1.2 Variáveis</b> .....	36
<b>4.1.3 Excepcionais</b> .....	36
4.2 COMBINAÇÕES DE AÇÕES .....	36
<b>4.2.1 Coeficientes de ponderação das ações</b> .....	37

<b>4.2.2</b>	<b>Combinações últimas normais</b> .....	39
<b>4.2.3</b>	<b>Combinações quase permanentes de serviço</b> .....	40
<b>4.2.4</b>	<b>Coefficientes de ponderação das resistências</b> .....	41
<b>5</b>	<b>VIGAS EM ALMA CHEIA</b> .....	43
5.1	CONCEITUAÇÃO .....	43
5.2	MODOS DE FALHA .....	44
<b>5.2.1</b>	<b>Flexão Simples</b> .....	44
<b>5.2.2</b>	<b>Esforço Cortante</b> .....	46
5.3	DIMENSIONAMENTO .....	47
<b>5.3.1</b>	<b>Momento fletor</b> .....	47
5.3.1.1	Plastificação da seção transversal .....	48
5.3.1.2	Flambagem lateral com torção .....	50
<b>5.3.2</b>	<b>Esforço cortante</b> .....	52
<b>6</b>	<b>VIGAS METÁLICAS ALVEOLARES</b> .....	54
6.1	HISTÓRICO .....	54
6.2	FABRICAÇÃO .....	55
6.3	GEOMETRIA DOS PERFIS ALVEOLARES .....	57
<b>6.3.1</b>	<b>Elementos da seção transversal</b> .....	58
<b>6.3.2</b>	<b>Razão de expansão</b> .....	58
6.3.2.1	Vigas casteladas .....	59
6.3.2.2	Vigas celulares .....	59
<b>6.3.3</b>	<b>Padrões de alvéolos</b> .....	59
6.3.3.1	Padrão Litzka .....	60
6.3.3.2	Padrão Peiner .....	61
6.3.3.3	Padrão Anglo-Saxão .....	61
6.3.3.4	Padrão Celular .....	62
6.4	MODOS DE FALHA .....	63
<b>6.4.1</b>	<b>Colapso por formação de mecanismo plástico</b> .....	64
<b>6.4.2</b>	<b>Colapso do montante de alma</b> .....	65
<b>6.4.3</b>	<b>Colapso por rasgamento da solda de emenda</b> .....	66
<b>6.4.4</b>	<b>Colapso por flambagem lateral com torção</b> .....	66
6.5	DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DE FLECHA .....	67
<b>6.5.1</b>	<b>Formação de mecanismo plástico</b> .....	68
<b>6.5.2</b>	<b>Montante de alma</b> .....	71
6.5.2.1	Escoamento por cisalhamento .....	71

6.5.2.2 Escoamento por flexão .....	72
6.5.2.3 Flambagem do montante de alma .....	73
<b>6.5.3 Flambagem lateral com torção</b> .....	<b>74</b>
<b>6.5.4 Deslocamento</b> .....	<b>77</b>
<b>7 ANÁLISES COMPARATIVAS</b> .....	<b>79</b>
7.1 CONSUMO DE AÇO .....	79
<b>7.1.1 Considerações iniciais</b> .....	<b>79</b>
<b>7.1.2 Considerações finais</b> .....	<b>84</b>
7.1.2.1 Vão destravado .....	85
7.1.2.2 Vão com contenção central .....	86
7.1.2.3 Vão com contenção contínua .....	87
7.1.2.4 Comparativo entre as diferentes contenções laterais .....	87
7.2 DESEMPENHO ESTRUTURAL .....	90
<b>7.2.1 Momento fletor</b> .....	<b>90</b>
7.2.1.1 Plastificação da seção transversal .....	90
7.2.1.1.1 <i>Considerações iniciais</i> .....	90
7.2.1.1.2 <i>Considerações finais</i> .....	91
7.2.1.2 Flambagem lateral com torção .....	92
7.2.1.2.1 <i>Considerações iniciais</i> .....	92
7.2.1.2.2 <i>Considerações finais</i> .....	92
<b>7.2.2 Esforço cortante</b> .....	<b>94</b>
7.2.2.1 Considerações iniciais .....	94
7.2.2.2 Considerações finais .....	94
<b>7.2.3 Deslocamento</b> .....	<b>95</b>
7.2.3.1 Considerações iniciais .....	95
7.2.3.2 Considerações finais .....	96
<b>8 CONCLUSÕES</b> .....	<b>98</b>
REFERÊNCIAS.....	100
APÊNDICE A .....	102
APÊNDICE B .....	110
APÊNDICE C .....	118
APÊNDICE D .....	126
APÊNDICE E .....	133
APÊNDICE F .....	140

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história as vigas metálicas alveolares foram utilizadas como solução para a limitação dos perfis fabricados no passado, pois a adoção desta técnica possibilita obter perfis em que a altura da seção transversal aumenta em até 50% em relação aos perfis que os originaram. Os elementos obtidos com esta técnica são capazes de vencer grandes vãos, devido à inércia do elemento estrutural, fazendo com que o mesmo venha a trabalhar com tensões mais elevadas, isto é, aproveitando de forma mais eficiente a resistência mecânica do aço.

A viga alveolar é confeccionada a partir do corte longitudinal de um perfil I. O corte da viga em alma cheia é feito de tal maneira com que se possa afastar as mesas do perfil, propiciando assim um ganho em inércia. O traçado de seção da viga em alma cheia pode ser tanto em zigue-zague quanto semicircular, pois dependendo do tipo de corte realizado, pode-se obter vigas do tipo castelada ou celular, o primeiro tipo de viga alveolar tem características geométricas bem definidas, ao passo em que o segundo, possui uma maior flexibilidade no que tange às suas características geométricas. Após a etapa de corte, parte-se para união das metades superior e inferior da viga através de soldagem em determinados pontos, chamados de montante de alma. Ao final do processo de produção, tem-se uma viga com maior altura e peso linear semelhante ao do perfil que lhe deu origem, porém este as vigas alveolares contêm uma série de aberturas distribuídas ao longo do seu eixo longitudinal.

A utilização da expansão da alma dos perfis metálicos constituiu uma solução atrativa e amplamente difundida ao longo do milênio passado, mas como a técnica possuía um caráter muito artesanal, o aumento do custo com a mão de obra fez com que a técnica deixasse de ser atrativa e caísse em desuso ao longo dos anos. Somente com o avanço do conhecimento e da produção intelectual humana houve o desenvolvimento de modelos estruturais mais adequados e que descrevem o comportamento das vigas alveolares sob a ação de cargas e dos modos de colapso com maior precisão. Assim como a evolução experimentada pelas indústrias siderúrgicas nos mecanismos de automação e de soldagem utilizados em suas plantas de produção.

O uso racional e o melhor aproveitamento das propriedades dos materiais são benefícios que a técnica de expandir a alma dos perfis possui. Pode-se citar como benefícios, a diminuição do

peso final do elemento, pois as aberturas distribuídas ao longo do comprimento da viga propiciam tal redução do peso próprio final da peça. Tem-se também que o aumento da altura da seção transversal da viga produz um ganho em inércia, culminando em uma menor sensibilidade a deformações, e por conseguinte, é possível superar vãos em que perfis I usuais em alma cheia de mesmo peso linear não conseguem, visto o não atendimento das flechas máximas exigidas pelas normas técnicas. E por fim, as aberturas ao longo das vigas facilitam a passagem de canalizações e dutos, que atualmente são muito empregados nas edificações correntes, evitando assim possíveis reforços que ocorreriam caso fosse optado uma solução com vigas em alma cheia.

As vigas metálicas alveolares ainda trazem um alto apelo estético, que pode apresentar-se interessante na elaboração de projetos arquitetônicos que explorem a leveza que os padrões dos alvéolos ao longo das vigas possibilitam.

As vigas alveolares também apresentam algumas desvantagens, tais como maior custo de produção, e os processos que regem o comportamento delas podem ser significativamente afetados pelos padrões de carregamento e pelo gabarito adotado para a execução dos alvéolos ao longo da peça a ser utilizada, além da perda de resistência ao esforço cortante.

Nesse contexto, a utilização de vigas alveolares como solução de elemento estrutural portante de obras de Engenharia Civil, mostra-se interessante e cabe ser alvo de estudo, pois propiciam algumas vantagens e também desvantagens. Deste modo, o presente trabalho visa fazer um estudo comparativo. Avaliando as diferenças em termos de resistência às solicitações (momento fletor e esforço cortante), deformações (flecha) e de consumo de aço que as vigas alveolares proporcionam quando comparadas com soluções típicas de vigas em alma cheia, para algumas situações de cálculo propostas. Buscando assim, promover um maior conhecimento da ordem de grandeza do impacto, no que tange ao desempenho estrutural e consumo de aço, que a escolha entre um tipo ou outro de viga acarreta.

No capítulo 2, são abordados tópicos acerca das diretrizes de pesquisa estabelecidas para o trabalho de conclusão, tais como a questão e objetivos do mesmo. Também são apresentados os pressupostos, limitações que o trabalho possui, assim como as etapas de desenvolvimento do trabalho de conclusão.

O capítulo 3 é destinado a uma breve apresentação do aço estrutural, buscando informar questões de âmbito histórico, mostrar os tipos de aço que se têm disponível atualmente, assim como descrever de forma sucinta os processos de fabricação do mesmo e apresentar juntamente os principais produtos utilizados em estruturas metálicas. Neste capítulo, também são apresentadas as principais características mecânicas apresentadas pelo aço, e assim caracterizar o comportamento mecânico que o mesmo apresenta.

No capítulo 4, são apresentados tópicos relacionados à metodologia dos estados limites que a NBR8800:2008 propõe para o dimensionamento de estruturas metálicas, expondo questões ligadas à segurança das estruturas e a abordagens que devem ser seguidas para avaliação da capacidade resistiva que venham a apresentar frente às solicitações impostas.

Nos capítulos 5 e 6, são abordadas as vigas que são utilizadas na análise comparativa de consumo de aço e desempenho estrutural. Nestes capítulos buscam-se apresentar alguns conceitos relacionados à geometria das vigas, abordar os modos de colapso existentes e as metodologias estabelecidas para o dimensionamento destes elementos.

O capítulo 7 é destinado à apresentação das análises de consumo de aço e de desempenho estrutural. Para as duas análises realizadas, primeiramente, fez-se a exposição dos parâmetros e considerações adotados nas análises. Posteriormente, são realizadas a apresentação e discussão dos resultados encontrados.

No último capítulo são tratadas as conclusões retiradas do trabalho, tecendo comentários sobre uso de vigas alveolares na Construção Civil em detrimento aos tradicionais perfis do tipo I.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa do trabalho é: quais são as diferenças em termos estruturais e de consumo de aço que a adoção de vigas alveolares apresenta quando comparada com soluções típicas em alma cheia?

### **2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal do trabalho é: a verificação da eficiência no desempenho estrutural e consumo de aço de vigas alveolares, quando comparadas com vigas de alma cheia.

#### **2.2.2 Objetivos secundários**

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) apresentação de diretrizes para o dimensionamento de vigas alveolares;
- b) comparação do consumo de aço para diferentes contenções;
- c) desenvolvimento de planilhas eletrônicas para o dimensionamento das vigas metálicas alveolares e de alma cheia.

### **2.3 PRESSUPOSTOS**

Para o dimensionamento das vigas de alma cheia e alveolares, nos estados limites últimos e de serviço aplicáveis, são pressupostos verdadeiros e válidos do trabalho, respectivamente:

- a) as recomendações sugeridas pela NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008);
- b) as recomendações contidas em Estados limites aplicáveis às vigas alveolares de aço (VERÍSSIMO et al., 2013).

## 2.4 DELIMITAÇÃO

O trabalho delimita-se ao estudo de vigas metálicas alveolares e de alma cheia biapoiadas com carregamento uniformemente distribuído e estático. Tanto as vigas de alma cheia quanto as alveolares têm a altura entre mesas constante ao longo do vão.

## 2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) uso de vigas em perfis laminados de aço com seção do tipo H e W, sendo que para as vigas alveolares utilizou-se somente elementos no padrão Litzka, com razão de expansão de 1,5 e sem chapa expansora;
- b) a verificação da resistência ao momento fletor e esforço cortante para os estados limites últimos, e a verificação de deslocamentos excessivos no estado limite de serviço, para ambas as vigas metálicas;
- c) o carregamento foi suportado apenas por elementos metálicos, ou seja, não foi feito o dimensionamento considerando a seção das vigas como sendo mista;
- d) variações nos seguintes aspectos: vão entre apoios, valor da carga uniformemente distribuída, contenções laterais e dos perfis utilizados para vencer o vão;
- e) o uso de apenas um procedimento de dimensionamento como forma de avaliar a resistência e o comportamento das vigas metálicas alveolares.

## 2.6 DELINEAMENTO

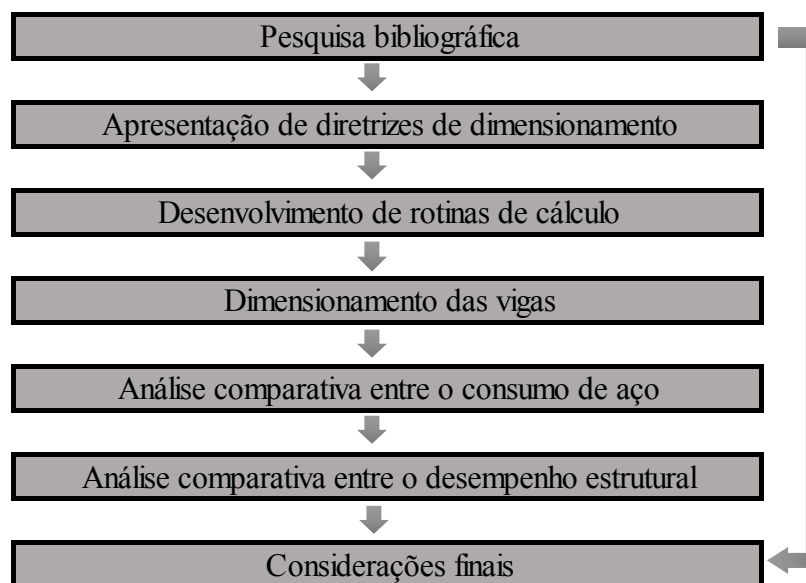
O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) apresentação de diretrizes de dimensionamento;
- c) desenvolvimento de rotinas de cálculo;
- d) dimensionamento das vigas;
- e) análise comparativa entre o consumo de aço;



- f) análise comparativa entre o desempenho estrutural;
- g) conclusões e considerações finais.

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho de conclusão



(fonte: elaborado pelo autor)

A partir da definição do tema, iniciou-se a **pesquisa bibliográfica** como etapa inicial do trabalho, com o propósito de aprofundar o conhecimento teórico acerca dos tópicos necessários para o desenvolvimento do mesmo. Devido ao tema ser pouco conhecido pelo meio técnico, a pesquisa bibliográfica deu-se de maneira contínua ao longo de todo desenvolvimento do trabalho.

A próxima etapa do trabalho foi a de **apresentação de diretrizes** propostas na literatura acerca do **dimensionamento das vigas alveolares de aço** para a situação biapoiada com carregamento uniformemente distribuído, assim como para as vigas de alma cheia para mesma situação. Essa etapa serviu de base para a próxima, cujo objetivo era o **desenvolvimento das rotinas de cálculo**, isto é, a programação de mecanismos de dimensionamento através de planilhas eletrônicas, para cada situação de estado limite último e de serviço aplicáveis para ambos os tipos de vigas que foram analisadas no trabalho.

Após feita a programação de rotinas de verificações em planilhas eletrônicas, realizou-se o **dimensionamento das vigas** para diferentes valores de carregamentos uniformemente

distribuídos, contenções laterais e vão entre apoios. Verificou-se para cada valor de carregamento qual seria o perfil mais apropriado para que o vão proposto fosse vencido.

Tendo em posse os resultados apresentados na etapa de **dimensionamento das vigas** alveolares e de alma cheia, fora iniciada uma **análise comparativa**, avaliando as diferenças entre o **consumo de aço** para os diferentes vãos propostos. Posteriormente foi realizada uma próxima **análise comparativa**, a qual avaliou o **desempenho estrutural**.

No comparativo do **desempenho estrutural**, foi avaliado o caso em que os perfis de alma cheia escolhidos para a análise passassem a ser alveolares, de modo a determinar para os diferentes vãos, qual a carga máxima de projeto que seria responsável por plastificar a seção transversal das vigas, objetivando verificar o comportamento das mesmas em função do vão. Analisou-se também, o comportamento de ambas as vigas para o mecanismo de colapso por flambagem lateral com torção, assim como a resistência ao corte. Por fim, comparou-se o desempenho das vigas na condição de serviço, avaliando as diferenças em termos de deslocamentos apresentados frente a diferentes carregamentos e vãos, de modo a comparar as flechas entre ambos os tipos de vigas, e por último, se os deslocamentos apresentados pelas vigas respeitam o valor limite estabelecido por norma técnica.

Após realizadas todas as etapas anteriores, foram apresentadas as **conclusões e considerações finais** a respeito do uso de vigas alveolares metálicas frente às vigas em alma cheia, frutos das análises feitas neste trabalho.

## 3 AÇO ESTRUTURAL

### 3.1 HISTÓRICO

A utilização de elementos constituídos basicamente por ferro data de cerca de 8.000 anos atrás. Tais elementos eram utilizados basicamente como ferramentas domésticas ou para armamentos bélicos por civilizações antigas, tais como as da antiga Mesopotâmia e Egípcia (PRAVIA et al., 2013, p. 1). Pfeil e Pfeil (2009, p. 2) explicam que “O primeiro material siderúrgico empregado na construção foi o ferro fundido. Entre 1780 e 1820 construíram-se pontes em arco ou treliçadas, com elementos em ferro fundido trabalhando em compressão.”.

Pfeil e Pfeil (2009, p. 2) citam que “O aço já era conhecido desde a Antiguidade. Não estava, porém, disponível a preços competitivos por falta de um processo industrial de fabricação.”. Após o desenvolvimento de tecnologias, tais como fornos, a produção em larga escala a preços competitivos fez com que o aço assumisse o lugar do ferro fundido como principal elemento utilizado para a confecção de estruturas metálicas (PFEIL; PFEIL, 2009, p. 2). Segundo Bellei (2010, p. 15), “As primeiras obras em aço datam de 1750, quando se descobriu a maneira de produzi-lo industrialmente.”. O uso de aços constituídos basicamente de aço-carbono em estruturas metálicas foi largamente feito até os anos de 1900, após houve o desenvolvimento de tecnologias de fabricação que possibilitaram a entrada de aços de baixa liga e de alta resistência no setor da Construção Civil (PFEIL; PFEIL, 2009, p. 3).

Quanto ao uso do aço no Brasil, Pravia et al. (2013, p. 1) informam que:

O uso do aço no Brasil está relacionado diretamente com a história do país. Na primeira fase de uso, em fins do século XIX, o Brasil ainda não tinha indústrias siderúrgicas; desse modo, importavam-se grandes quantidades de componentes de ferrovias, com suas estações e pontes, da Inglaterra. A segunda fase surgiu entre as duas guerras mundiais, em consequência da paralisação das importações, tornou-se imperativo iniciar, assim, o processo de criação e desenvolvimento das empresas que hoje formam o parque siderúrgico nacional. Com o desenvolvimento, surgiu, também, todo o complexo de indústrias derivadas, como as de fabricação e montagem de estruturas e componentes metálicos.

Segundo Souza (2013, p. 9), “Um das vantagens do uso do aço em estruturas é o fato de ser um material homogêneo, com características bem definidas e de simples caracterização.

Independentemente do tipo de aço [...]”. Ainda sobre as vantagens que o uso do aço propicia, Bellei (2010, p. 15) cita que:

- a) alta resistência do material nos diversos estados de tensão (tração, compressão, flexão etc.), o que permite aos elementos estruturais suportarem grandes esforços apesar da área relativamente pequena das suas seções; [...], são mais leves do que os elementos constituídos em concreto armado;
- b) os elementos de aço oferecem uma grande margem de segurança no trabalho, o que se deve ao fato de o material ser único e homogêneo, com limite de escoamento; ruptura e módulo de elasticidade bem definidos;
- c) os elementos de aço são fabricados em oficinas, de preferência seriados, e sua montagem é bem mecanizada, permitindo com isso diminuir o prazo final da construção;
- d) os elementos de aço podem ser desmontados e substituídos com facilidade, o que permite reforçar ou substituir facilmente diversos elementos da estrutura;
- e) a possibilidade de reaproveitamento do material que não seja mais necessário à construção.

Em contrapartida o uso do aço também apresenta algumas desvantagens, como cita Pravia et al. (2013, p. 2):

- a) dependendo do planejamento da obra, pode custar mais caro que uma estrutura de concreto equivalente;
- b) exige mão de obra altamente especializada;
- c) em algumas regiões, às vezes é difícil encontrar determinados aços e perfis;
- d) muitas regiões do Brasil não têm tradição em utilizar estruturas de aço;
- e) necessita de mercado de componentes desenvolvido (fachada pré-moldada, *dry-wall* etc.);
- f) viabiliza somente elementos lineares, para lajes necessita da associação com concreto.

### 3.2 TIPOS DE AÇO ESTRUTURAL

Segundo Bellei (2010, p. 21), “O aço é um composto que consiste quase totalmente de ferro (98%), com pequenas quantidades de carbono, silício, enxofre, fósforo, manganês etc. O carbono é o material que exerce o maior efeito nas propriedades do aço.”.

Quanto à produção do aço, a variação dos elementos químicos utilizados na confecção resulta em diferentes tipos de aço, com diferentes propriedades mecânicas, assim como atribuir

características distintas, como maior resistência à corrosão e também maior resistência às altas temperaturas (SOUZA, 2013, p. 9). Pfeil e Pfeil (2009, p. 9) citam que “Segundo a composição química, os aços utilizados em estruturas são divididos em dois grupos: aços-carbono e aços de baixa liga [...]. Os dois tipos podem receber tratamentos térmicos que modificam suas propriedades mecânicas.”.

O uso de aços com maior teor de carbono resulta em elementos com maior resistência mecânica, porém estes apresentam um comportamento frágil e uma maior dificuldade para soldagem. Usualmente na Construção Civil, utilizam-se aços com teor máximo de 0,45% de carbono a fim de evitar o uso de elementos frágeis (BELLEI, 2010, p. 21).

### 3.2.1 Aços-carbono

No que tange a este tipo de aço estrutural, Bellei (2010, p. 21) descreve que “Os aços-carbono são os tipos mais usuais, nos quais o aumento de resistência em relação ao ferro puro é produzido pelo carbono, e em menor escala, pela adição de manganês.”. Pfeil e Pfeil (2009, p. 10) indicam que “Em estruturas usuais de aço, utilizam-se aços com baixo teor de carbono, que podem ser soldados sem precauções especiais.”. O quadro 1 expõe os tipos de aço e propriedades mecânicas dos mesmos.

Quadro 1 – Propriedades mecânicas dos aços-carbono

Especificação	Teor de Carbono %	Limite de escoamento	Resistência à ruptura
		$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)
ABNT MR250	baixo	250	400
ASTM A7		240	370-500
ASTM A36	0,25 - 0,29	250 (36 ksi)	400-500
ASTM A307 (parafuso)	baixo	-	415
ASTM A325 (parafuso)	médio	635 (min)	825 (min)
EM S235	baixo	235	360

(fonte: adaptado de PFEIL; PFEIL, 2009, p. 10)

### 3.2.2 Aços de baixa liga

Para Pfeil e Pfeil (2009, p. 10), “Os aços de baixa liga são aços-carbono acrescidos de elementos de liga (cromo colúmbio, cobre, manganês, molibdênio, níquel, fósforo, vanádio, zircônio), os quais melhoram algumas propriedades mecânicas.”. Bellei (2010, p. 21) explica que “Os elementos de liga provocam um aumento na resistência do aço, através da modificação da microestrutura para grãos finos. Graças a este fato, pode-se obter resistência elevada com um teor de carbono da ordem de 0,20%, permitindo, ainda assim, uma boa soldabilidade.”. O autor ainda indica que “Com uma pequena variação na composição química e com adição de alguns componentes, [...], esses aços podem ter aumentada sua resistência à corrosão atmosférica de duas a quatro vezes.”.

A seguir apresenta-se no quadro 2, os principais tipos de aço normatizados por normas brasileiras.

Quadro 2 – Principais aços normatizados pela ABNT

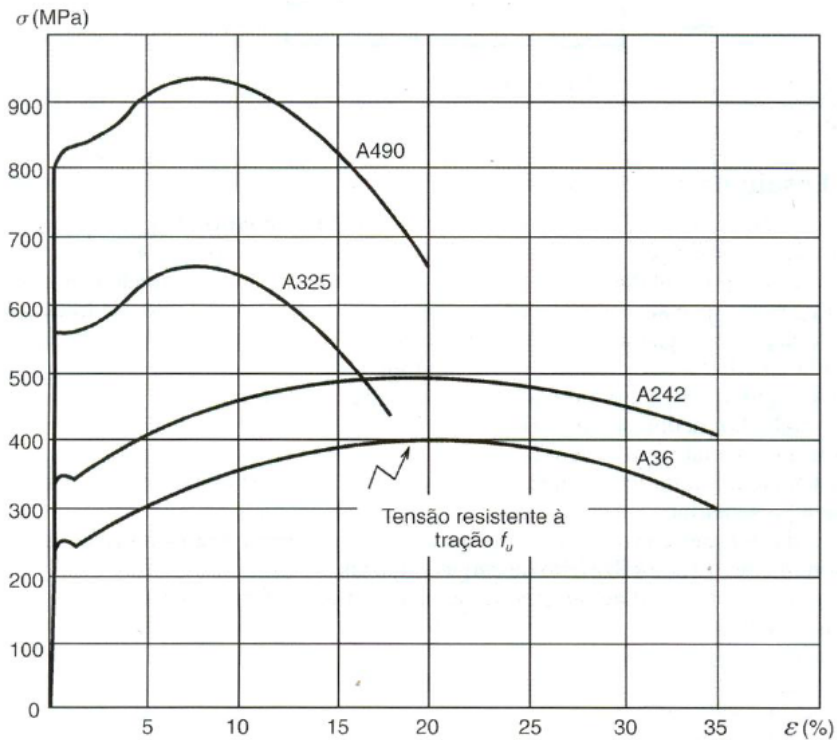
ABNT NBR 7007			ABNT NBR 6648			ABNT NBR 6649 / ABNT NBR 6650		
Aços-carbono e microligados para uso estrutural e geral			Chapas grossas de aço-carbono para uso estrutural			Chapas finas (a frio/a quente) de aço-carbono para uso estrutural		
Denominação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	Denominação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	Denominação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa
MR 250	250	400-560	CG-26	255	410	CF-26	260/260	400/410
AR 350	350	450	CG-28	275	440	CF-28	280/280	440/440
AR 350 COR	350	485				CF-30	---/300	---/490
AR 415	415	520						
ABNT NBR 5000			ABNT NBR 5004			ABNT NBR 5008		
Chapas grossas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica			Chapas finas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica			Chapas grossas e bobinas grossas, de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural		
Denominação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	Denominação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	Denominação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa
G-30	300	415	F-32/Q-32	310	410	CGR 400	250	380
G-35	345	450	F-35/Q-35	340	450	CGR 500 e CGR 500A	370	490
G-42	415	520	Q-40	380	480			
G-45	450	550	Q-42	410	520			
			Q-45	450	550			
ABNT NBR 5920/ABNT NBR 5921			ABNT NBR 8261					
Chapas finas e bobinas finas (a frio/a quente), de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural			Perfil tubular, de aço-carbono, formado a frio, com e sem costura, de seção circular ou retangular para usos estruturais					
Denominação	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	Denominação	Seção circular		Seções quadrada e retangular		
				$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	$f_y$ MPa	$f_u$ MPa	
CFR 400	---/250	---/380	B	290	400	317	400	
CFR 500	310/370	450/490	C	317	427	345	427	

<sup>a</sup> Para limitações de espessura, ver norma correspondente.

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 108)

A figura 2 ilustra o desempenho dos aços normatizados pelo ASTM através do diagrama tensão x deformação.

Figura 2 – Tensão x deformação dos aços normatizados pelo ASTM



(fonte: PFEIL;PFEIL, 2009, p. 14)

### 3.3 FABRICAÇÃO DO AÇO

A produção de aço se faz com o uso de alto-forno, no qual se produz ferro fundido e posteriormente realizam-se tratamentos neste, que fazem com que o mesmo se converta em aço e adquira as propriedades finais desejadas para determinadas finalidades (PFEIL; PFEIL, 2009, p. 6).

Quanto à fabricação do aço estrutural, Pfeil e Pfeil (2009, p. 6-8) explicam que as principais etapas são:

- a) alto-forno: etapa na qual são inseridos os minérios necessários para a produção de ferro-carbono, havendo também a formação de uma pequena quantidade de escória;
- b) conversor de oxigênio: nessa fase de produção, é feita a remoção das escórias geradas pela etapa anterior, juntamente com a diminuição do teor de carbono que o ferro-carbono apresenta;

- c) tratamento do aço na panela: são inseridos elementos que evitam que a degaseificação da massa líquida de aço venha a ter muitos vazios. Posteriormente, é realizado o refinamento do aço, que consiste em eliminar óxidos que prejudicam as características mecânicas finais do mesmo;
- d) lingoteamento: etapa na qual o aço é levado a formas que lhe servem de leito para que após os processos de repouso e desmoldagem, este seja refinado. Posteriormente os blocos de aço (lingotes) são levados até fornos preparatórios para o processo de laminação do aço. Em fábricas mais modernas, os lingotes são levados de forma direta aos laminadores;
- e) laminação: nesta etapa dar-se-á forma aos lingotes, primeiramente é feito o aquecimento dos lingotes, para que posteriormente, estes passem diversas vezes por rolos laminadores que dão forma ao aço, transformando-o no perfil estrutural desejado;
- f) tratamento térmico: existem dois tipos básicos de tratamento térmico, o primeiro relacionado ao alívio das tensões internas que os rolos laminadores produziram nos perfis estruturais. O outro é destinado a modificar a microestrutura do aço, modificando a resistência mecânica através de tempera e processos de revenição.

### 3.4 PRODUTOS PARA USO ESTRUTURAL

Segundo Pfeil e Pfeil (2009, p. 19), “As usinas produzem aços para utilização estrutural sob diversas formas: chapas, barras, perfis laminados, fios trefilados, cordoalhas e cabos.”. Quanto aos produtos oriundos do aço estrutural voltado para a Engenharia Civil, Bellei (2010, p. 28) realça que:

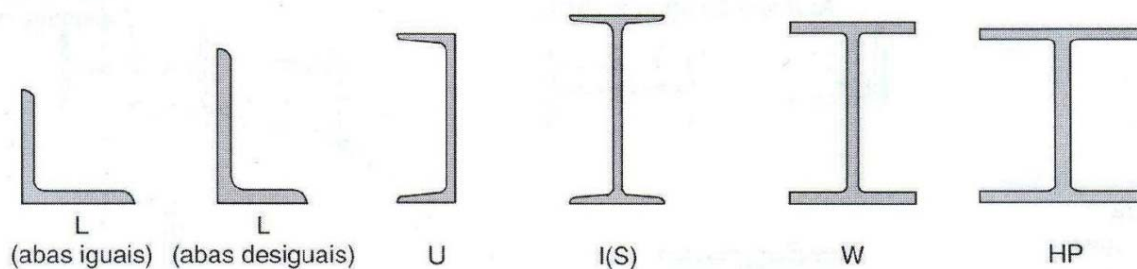
Os principais materiais usados como elementos ou componentes estruturais são chapas finas a frio, chapas zincadas, chapas finas a quente, chapas grossas, perfis laminados estruturais, tubos estruturais com e sem costura, barras redondas e barras chatas, perfis soldados e perfis estruturais em chapas dobradas.

#### 3.4.1 Perfis laminados a quente

No que tange aos perfis laminados a quente, Pravia et al. (2013, p. 3) em seu trabalho informam que “São perfis formados pelo mesmo processo utilizado para os produtos planos como as chapas, obtidos a partir da laminação a quente, conformados por uma sucessão de passes.”, os autores ainda indicam que “Dentre estes perfis, destacam-se: cantoneiras de abas iguais e desiguais, perfis ‘W’ e perfis ‘U’.”. A figura 3 ilustra os principais tipos de perfis laminados produzidos comercialmente.



Figura 3 – Principais perfis laminados



(fonte: adaptada de PFEIL; PFEIL, 2009, p. 20)

### 3.4.2 Perfis Soldados

Os perfis soldados são obtidos a partir da união de diversas chapas planas, tendo a sua esbelteza definida por normas técnicas (PRAVIA et al., 2013, p. 3). Para Bellei (2010, p. 32), “Com esses produtos, o projetista passa a ter opções muito variadas e grande liberdade.”.

Pravia et al. (2013, p. 4) citam que para perfis soldados há certos requisitos a serem obedecidos, assim deste modo, estes perfis são divididos em:

- a) padrão de qualidade I: para estruturas especiais que requerem elevado rigor de tolerância e para elementos estruturais sujeitos a cargas cíclicas;
- b) padrão de qualidade II: para estruturas convencionais, tais como galpões industriais, edifícios de andares múltiplos etc.;
- c) padrão de qualidade III: para estruturas secundárias e complementares, tais como: estacas, postes, corrimões etc.

## 3.5 PROPRIEDADES DO AÇO

O aço normalmente apresenta características físicas bem definidas, visto que o seu processo de elaboração vem sendo aprimorado ao longo do tempo, assim, de maneira simples, pode-se adotar para projeto os seguintes valores típicos para constantes físicas, segundo Pfeil e Pfeil (2009, p. 16):

- a) módulo de deformação longitudinal ou módulo de elasticidade  $E = 200.000 \text{ MPa}$ ;
- b) coeficiente de Poisson  $\nu = 0,3$ ;
- c) coeficiente de dilatação térmica  $\beta = 12 \times 10^{-6} \text{ por } ^\circ\text{C}$ ;
- d) massa específica  $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$ .

Quanto as propriedades que o aço estrutural apresenta, pode-se listar as principais como sendo:

- a) ductilidade;
- b) fragilidade;
- c) resiliência;
- d) tenacidade;
- e) dureza;
- f) fadiga.

### **3.5.1 Ductilidade**

A ductilidade tem importância fundamental para estruturas na Construção Civil, visto que esta propriedade mecânica relaciona a magnitude de deformação com a atuação de cargas na mesma, isto é, se o elemento em aço apresenta grandes deformações antes de ruir. A capacidade de deformação serve como uma advertência de atuação de cargas que não foram previstas inicialmente no dimensionamento do elemento, visto que nesse caso há a presença de grandes deformações, assim pode-se, atuar e prevenir que o mesmo entre em colapso (PFEIL; PFEIL, 2009, p. 16).

### **3.5.2 Fragilidade**

Nesta propriedade, Pfeil e Pfeil (2009, p. 16) informam que a fragilidade “É o oposto da ductilidade. Os aços podem se tornar frágeis pela ação de diversos agentes: baixas temperaturas ambientes, efeitos térmicos locais [...]”.

A utilização de elementos com alta resistência e pouca ductilidade não se mostra interessante na Engenharia Civil, visto que o rompimento destes se dá de forma brusca, sem mostrar sinais de que o aço está sob elevadas cargas, levando assim a grandes desastres (PFEIL; PFEIL, 2009, p. 16).

### **3.5.3 Resiliência**

Segundo Pfeil e Pfeil (2009, p. 17), a resiliência pode ser definida como “[...] a capacidade de absorver energia mecânica em regime elástico, ou, o que é equivalente, a capacidade de restituir energia mecânica absorvida.”. Os autores ainda explicam que “Denomina-se módulo de

resiliência ou simplesmente resiliência a quantidade de energia elástica que pode ser absorvida por unidade de volume do metal tracionado.”.

### **3.5.4 Tenacidade**

No que tange esta propriedade mecânica do aço, Pfeil e Pfeil (2009, p. 17) definem que “Tenacidade é a energia total, elástica e plástica que o material pode absorver por unidade de volume até a sua ruptura. Em tração simples, a tenacidade é representada pela área do diagrama  $\sigma, \epsilon$ .”.

### **3.5.5 Dureza**

Para Pfeil e Pfeil (2009, p. 17), pode-se definir dureza como “[...] a resistência ao risco ou abrasão. Na prática, mede-se dureza pela resistência que a superfície do material oferece à penetração de uma peça de maior dureza.”.

### **3.5.6 Fadiga**

A fadiga pode ser definida como sendo a atuação de cargas de forma repetitiva, em ciclos de sollicitação, levando o material à ruptura sob tensões muito abaixo do que em condições normais de aplicação de carga este suportaria. O fenômeno de fadiga sugere um certo enfraquecimento do aço de suportar os esforços que nele são aplicados (PFEIL; PFEIL, 2009, p. 17). Os autores colocam que “A resistência à fadiga das peças é fortemente diminuída nos pontos de concentração de tensões, provocadas, por exemplo, por variações bruscas na forma da seção, indentações devidas à corrosão etc.”.

Quando se faz uso de uniões por solda, deve-se ter em mente que este tipo de união provoca uma modificação na microestrutura do aço no ponto de ligação, levando à diminuição da resistência mecânica do aço para as sollicitações oriundas de esforços cíclicos, tais como os provocados por fadiga (PFEIL; PFEIL, 2009, p. 18).

## 4 SEGURANÇA E ESTADOS LIMITES

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008, p. 14), “Os estados-limites últimos estão relacionados com a segurança da estrutura sujeita às combinações mais desfavoráveis de ações previstas em toda a vida útil, durante a construção ou quando atuar uma ação especial ou excepcional.”. Para Pfeil e Pfeil (2009, p. 35), “Os estados limites últimos estão associados à ocorrência de cargas excessivas e conseqüente colapso da estrutura [...]”.

Deve-se ainda avaliar para uma estrutura, os estados limites de serviço, que segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008, p. 14) são aqueles que “[...] estão relacionados com o desempenho da estrutura sob condições normais de utilização.”. Os estados limites de serviço estão associados diretamente com deformações em excesso e vibrações em demasia na estrutura (PFEIL; PFEIL, 2009, p. 35).

### 4.1 AÇÕES

As ações em uma estrutura, segundo Pfeil e Pfeil (2009, p. 38), “[...] são as cargas que nelas atuam ou deformações impostas (por variação de temperatura, recalque, etc.)”. Quanto às ações, estas podem ser divididas em:

- a) permanentes;
- b) variáveis;
- c) excepcionais.

#### 4.1.1 Permanentes

Para a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008, p. 15), as ações permanentes são “[...] as que ocorrem com valores praticamente constantes durante toda a vida útil da construção. Também são consideradas permanentes as ações que crescem no tempo, tendendo a um valor-limite.”.

Quanto às ações tidas como permanentes, estas podem ser classificadas em diretas e indiretas. As primeiras são causadas por carregamentos que a estrutura venha a estar sujeita, como por

exemplo, peso próprio e dos elementos fixos na estrutura, assim como empuxos. Ao passo em que as indiretas estão relacionadas às deformações, deslocamentos e imperfeições geométricas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 15).

#### **4.1.2 Variáveis**

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008, p. 15), coloca que “As ações variáveis são as que ocorrem com valores que apresentam variações significativas durante a vida útil da estrutura.”, e ainda explica que:

As ações variáveis comumente existentes são causadas pelo uso e ocupação da edificação, como as ações decorrentes de sobrecargas em pisos e coberturas, de equipamentos e de divisórias móveis, de pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas, pela ação do vento e pela variação da temperatura da estrutura.

#### **4.1.3 Excepcionais**

No que tange a definição das ações excepcionais, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008, p. 16) explica que estas “[...] são as que têm duração extremamente curta e probabilidade muito baixa de ocorrência durante a vida da construção [...]. São ações excepcionais aquelas decorrentes de causas como explosões, choques de veículos incêndios, enchentes e sismos excepcionais.”.

### **4.2 COMBINAÇÕES DE AÇÕES**

As combinações utilizadas para o dimensionamento de estruturas são fruto das interações entre as ações permanentes, variáveis e excepcionais, cujas atuações na estrutura sejam capazes de originar estados limites, que devem ser respeitados para que a estrutura possa ser considerada estável. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008, p. 19) coloca que “A combinação das ações deve ser feita de forma que possam ser determinados os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura[...]”.

Quanto às combinações, estas podem ser classificadas em últimas ou de serviço. Para a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008, p. 19), “Uma combinação última de ações pode ser classificada em normal, especial, de construção e excepcional.”.

Para as combinações de serviço, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008, p. 21) expõe que “As combinações de serviço são classificadas de acordo com sua permanência na estrutura em quase permanentes, frequentes e raras.”

#### 4.2.1 Coeficientes de ponderação das ações

Estes possuem o caráter de transformar os valores característicos das solicitações em valores de cálculo, que integraram as combinações de ações. O coeficiente de ponderação das ações é fruto da equação 1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 17):

$$\gamma_f = \gamma_{f1} \times \gamma_{f2} \times \gamma_{f3} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

$\gamma_f$  = coeficiente de ponderação de uma ação;

$\gamma_{f1}$  = parcela que considera a variabilidade das ações;

$\gamma_{f2}$  = parcela que considera a simultaneidade de atuação das ações;

$\gamma_{f3}$  = parcela que considera os possíveis erros de avaliação dos efeitos das ações, deficiência do método de cálculo empregado.

O valor que os coeficientes de ponderação das ações possuem são distintos, e isto se dá em função da natureza (permanente ou variável) e da característica (material utilizado, uso e ocupação, efeito do vento, etc.) da ação. Ao analisar estados limites relacionados às condições de serviço da estrutura, faz-se necessário o uso dos coeficientes de redução  $\Psi_1$  e  $\Psi_2$ , cujas finalidades são de reduzir os efeitos das ações de origem variável para estes estados limites.

Os quadros 3 e 4 apresentam os valores dos coeficientes de ponderação de ações, propostos pela NBR8800:2008 para uso nas combinações de ações nas estruturas.

Quadro 3 – Coeficientes de ponderação para  $\gamma_g$  e  $\gamma_q$ , segundo NBR8800:2008

Combinações	Ações permanentes ( $\gamma_g$ ) <sup>a,c</sup>					
	Diretas					Indiretas
	Peso próprio de estruturas metálicas	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados e empuxos permanentes	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	
Normais	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,35 (1,00)	1,40 (1,00)	1,50 (1,00)	1,20 (0)
Especiais ou de construção	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,40 (1,00)	1,20 (0)
Excepcionais	1,10 (1,00)	1,15 (1,00)	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,30 (1,00)	0 (0)
	Ações variáveis ( $\gamma_q$ ) <sup>a,d</sup>					
	Efeito da temperatura <sup>b</sup>	Ação do vento	Ações truncadas <sup>e</sup>	Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação		
Normais	1,20	1,40	1,20	1,50		
Especiais ou de construção	1,00	1,20	1,10	1,30		
Excepcionais	1,00	1,00	1,00	1,00		

<sup>a</sup> Os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis à segurança; ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança não devem ser incluídas nas combinações.

<sup>b</sup> O efeito de temperatura citado não inclui o gerado por equipamentos, o qual deve ser considerado ação decorrente do uso e ocupação da edificação.

<sup>c</sup> Nas combinações normais, as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,35 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m<sup>2</sup>, ou 1,40 quando isso não ocorrer. Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,25 e 1,30, e nas combinações excepcionais, 1,15 e 1,20.

<sup>d</sup> Nas combinações normais, se as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança forem agrupadas, as ações variáveis que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas também todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,50 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m<sup>2</sup>, ou 1,40 quando isso não ocorrer (mesmo nesse caso, o efeito da temperatura pode ser considerado isoladamente, com o seu próprio coeficiente de ponderação). Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,30 e 1,20, e nas combinações excepcionais, sempre 1,00.

<sup>e</sup> Ações truncadas são consideradas ações variáveis cuja distribuição de máximos é truncada por um dispositivo físico, de modo que o valor dessa ação não possa superar o limite correspondente. O coeficiente de ponderação mostrado nesta Tabela se aplica a este valor-limite.

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 18)

Quadro 4 – Coeficientes de ponderação para estados limites de serviço e últimos, segundo NBR8800:2008

Ações		$\gamma_{\Omega}^a$		
		$\psi_0$	$\psi_1^d$	$\psi_2^e$
Ações variáveis causadas pelo uso e ocupação	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas <sup>b)</sup>	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas <sup>c)</sup>	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas (ver B.5.1)	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
	Vigas de rolamento de pontes rolantes	1,0	0,8	0,5
	Pilares e outros elementos ou subestruturas que suportam vigas de rolamento de pontes rolantes	0,7	0,6	0,4
<sup>a</sup> Ver alínea c) de 4.7.5.3. <sup>b</sup> Edificações residenciais de acesso restrito. <sup>c</sup> Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público. <sup>d</sup> Para estado-limite de fadiga (ver Anexo K), usar $\psi_1$ igual a 1,0. <sup>e</sup> Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para $\psi_2$ o valor zero.				

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 19)

#### 4.2.2 Combinações últimas normais

Para a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008, p. 19), “As combinações últimas normais decorrem do uso previsto para a edificação.”, a mesma ainda explica que “Devem ser consideradas tantas combinações de ações quantas forem necessárias para verificação das condições de segurança em relação a todos os estados-limites últimos aplicáveis.”. O uso da equação 2 permite a composição de combinações últimas normais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 20):

$$Fd = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} \times F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} \times F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \times \psi_{0j} \times F_{Qj,k}) \quad (\text{equação 2})$$



Onde:

$F_d$  = ação de cálculo, em kN;

$F_{Gi,k}$  = valor característico da ação permanente, em kN;

$F_{Q1,k}$  = valor característico da ação variável, tomada como principal, em kN;

$F_{Qj,k}$  = valor característico para as demais ações variáveis atuantes, em kN;

$\gamma_{gi}$  = coeficiente de ponderação para carga permanente;

$\gamma_{q1}$  = coeficiente de ponderação para carga variável principal;

$\gamma_{qj}$  = coeficiente de ponderação para carga variável das demais cargas variáveis;

$\Psi_{0j}$  = coeficiente de redução para cargas variáveis.

### 4.2.3 Combinações quase permanentes de serviço

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008, p. 21), as combinações do tipo quase permanentes de serviço podem ser entendidas como “[...] aquelas que podem atuar durante grande parte do período da vida da estrutura, da ordem da metade desse período. Essas combinações são utilizadas para os efeitos de longa duração e para a aparência da construção.”.

Comumente, utilizam-se combinações do tipo quase permanentes para averiguar o valor dos deslocamentos em vigas, visando evitar deformações excessivas no elemento e assegurar a funcionalidade da estrutura (PFEIL; PFEIL, 2009, p. 45).

Com a equação 3, determina-se os valores dos esforços para a combinação de serviço (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 21):

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=1}^n (\Psi_{2j} \times F_{Qj,k}) \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

$F_{ser}$  = ação de cálculo, em kN;

$F_{Gi,k}$  = valor característico da ação permanente, em kN;

$F_{Qj,k}$  = valor característico para as ações variáveis atuantes, em kN;

$\Psi_{2j}$  = coeficiente de redução para cargas variáveis.

Para fixar os deslocamentos máximos permitidos para determinados elementos constituintes das estruturas metálicas correntes, a NBR8800:2008 propõe o quadro 5.

Quadro 5 – Deslocamentos máximos permitidos para os estados limites de serviço, segundo NBR8800:2008

Descrição	$\delta^a$
- Travessas de fechamento	$L/180^b$
	$L/120^{c,d}$
- Terças de cobertura <sup>g)</sup>	$L/180^e$
	$L/120^f$
- Vigas de cobertura <sup>g)</sup>	$L/250^h$
- Vigas de piso	$L/350^h$
- Vigas que suportam pilares	$L/500^h$
Vigas de rolamento: <sup>j)</sup>	
- Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal inferior a 200 kN	$L/600^i$
- Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal igual ou superior a 200 kN, exceto pontes siderúrgicas	$L/800^i$
- Deslocamento vertical para pontes rolantes siderúrgicas com capacidade nominal igual ou superior a 200 kN	$L/1000^i$
- Deslocamento horizontal, exceto para pontes rolantes siderúrgicas	$L/400$
- Deslocamento horizontal para pontes rolantes siderúrgicas	$L/600$
Galpões em geral e edifícios de um pavimento:	
- Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base	$H/300$
- Deslocamento horizontal do nível da viga de rolamento em relação à base	$H/400^{k,l}$
Edifícios de dois ou mais pavimentos:	
- Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base	$H/400$
- Deslocamento horizontal relativo entre dois pisos consecutivos	$h/500^m$
Lajes mistas	Ver Anexo Q

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 117)

#### 4.2.4 Coeficientes de ponderação das resistências

Estes coeficientes buscam ajustar a variabilidade existente nos materiais estruturais utilizados em projetos, em termos da variabilidade da tensão resistente, dos desvios entre a resistência obtida em ensaio frente a resistência do material in loco, e por fim, das incertezas na determinação da resistência última dos elementos constituintes da estrutura (PFEIL; PFEIL, 2009, p. 43). No que tange aos coeficientes de minoração para os estados limites de serviço, estes não precisam ser utilizados (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 24).

Para determinar o valor da resistência final, ou seja, seu valor de cálculo, faz-se uso da equação 4, juntamente com o uso do quadro 6 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 23):

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m} \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

$f_d$  = resistência de cálculo do elemento, em kN/cm<sup>2</sup>;

$f_k$  = resistência característica do material, em kN/cm<sup>2</sup>;

$\gamma_m$  = coeficiente de ponderação da resistência.

Quadro 6 – Coeficientes de ponderação da resistência, segundo NBR8800:2008

Combinações	Aço estrutural <sup>a</sup>		Concreto $\gamma_c$	Aço das armaduras $\gamma_s$
	$\gamma_a$			
	Escoamento, flambagem e instabilidade $\gamma_{a1}$	Ruptura $\gamma_{a2}$		
Normais	1,10	1,35	1,40	1,15
Especiais ou de construção	1,10	1,35	1,20	1,15
Excepcionais	1,00	1,15	1,20	1,00
<sup>a</sup> Inclui o aço de fôrma incorporada, usado nas lajes mistas de aço e concreto, de pinos e parafusos.				

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 23)

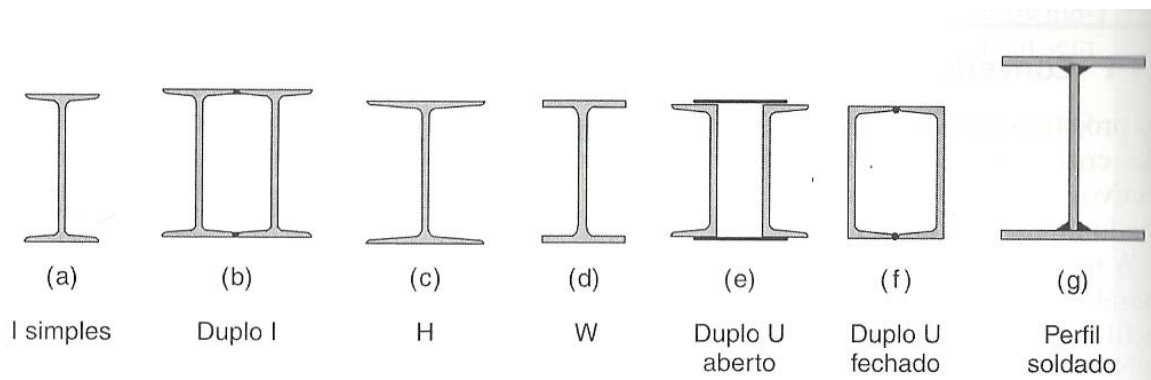
## 5 VIGAS EM ALMA CHEIA

Neste capítulo são caracterizadas as vigas em alma cheia, expondo conjuntamente os principais mecanismos causadores de falhas nestes elementos, assim como métodos de dimensionamento segundo os princípios da NBR8800:2008.

### 5.1 CONCEITUAÇÃO

As vigas em alma cheia são aquelas que não possuem aberturas ao longo de seu eixo longitudinal. Tem-se que as principais formas deste tipo de viga são os perfis I, sejam estes laminados ou soldados. Também há outras formas de vigas em alma cheia sem utilizar perfis do tipo I, como por exemplo, a união de perfis U, mas estes são menos utilizados na prática. A figura 4 ilustra os tipos mais comuns de vigas em alma cheia utilizados na Construção Civil.

Figura 4 – Principais tipos de vigas em alma cheia



(fonte: PFEIL; PFEIL, 2009, p. 154)

Os perfis I apresentam características interessantes em termos de resistência à flexão, pois este tipo de perfil possui grande parte da sua área afastada da linha neutra, e essa característica faz com que a inércia da viga em relação ao eixo paralelo ao plano das mesas seja grande, possibilitando a viga a resistir grandes momentos fletores. Tais argumentos citados acima, são reforçados por Pfeil e Pfeil (2009, p. 153) que explicam que “Os tipos de seções transversais mais adequados para o trabalho à flexão são aqueles com maior inércia no plano da flexão, isto é, com as áreas mais afastadas do eixo neutro.”, os autores ainda colocam que “[...] as vigas em

forma de I são as mais funcionais, devendo, entretanto, seu emprego obedecer às limitações de flambagem.”.

## 5.2 MODOS DE FALHA

Neste tópico, são abordados os principais mecanismos provocadores de falha em vigas de alma cheia, dando enfoque para perfis I, discutindo o que tais efeitos provocam no elemento estrutural.

### 5.2.1 Flexão simples

Em vigas sujeitas à flexão simples, os principais mecanismos que levam estes elementos ao colapso estrutural são:

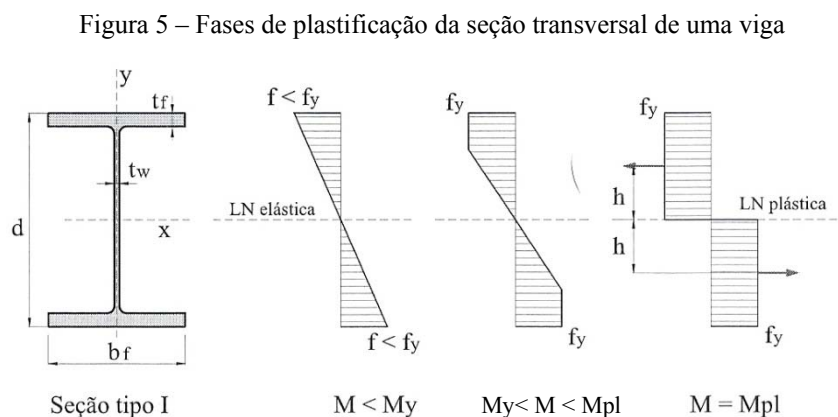
- a) flambagem local da alma;
- b) flambagem local da mesa;
- c) flambagem lateral com torção;
- d) formação de rótula plástica.

Pfeil e Pfeil (2009, p. 153, grifo dos autores) definem que “A **flambagem local** é a perda da estabilidade das chapas comprimidas componentes do perfil [...], a qual reduz o momento resistente da seção.”. A flambagem local pode ocorrer em dois casos, o primeiro deles sendo na mesa comprimida da viga e a segunda, através da alma da mesma. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008, p. 36) classifica vigas com seção comprimida em:

- a) seção compacta: seções cujos elementos comprimidos possuem  $\lambda$  não superior a  $\lambda_p$  e cujas mesas são ligadas continuamente à(s) alma(s) [...];
- b) seção semicompactas: seções que possuem um ou mais elementos comprimidos com  $\lambda$  excedendo  $\lambda_p$ , mas não  $\lambda_r$  [...];
- c) esbeltas: seções que possuem um ou mais elementos comprimidos com  $\lambda$  excedendo  $\lambda_r$  [...].

Para vigas em alma cheia com seções compactas não há flambagem local, porém as mesmas apresentam plastificação total da seção transversal, configurando assim a formação de uma rótula plástica (PFEIL; PFEIL, 2009, p. 158). Segundo Souza (2013, p. 65), “A formação de uma rótula plástica consiste na plastificação de uma seção transversal desde as fibras mais

externas (mais afastadas do eixo neutro) até a plastificação total da seção.”. O autor ainda coloca que “O mecanismo de formação da rótula plástica apresenta uma fase elástica que corresponde ao início da plastificação da fibra mais externa e uma fase elastoplástica, até atingir a plastificação total [...]”. A figura 5 é apresentada visando melhor ilustrar os estágios de plastificação da seção transversal de uma viga.



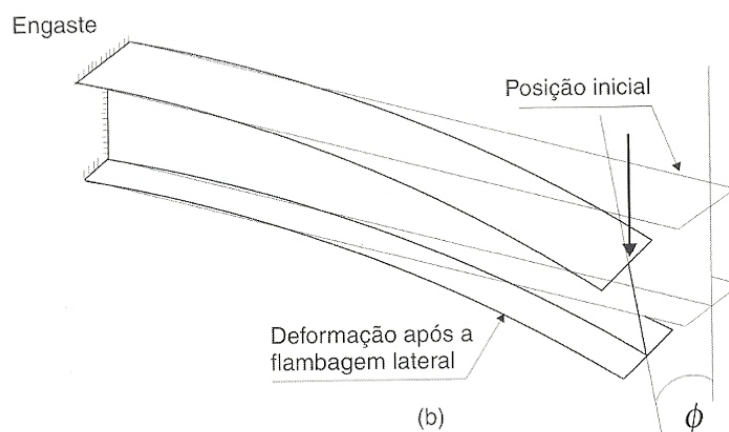
(fonte: SOUZA, 2013, p. 65)

Em vigas semicompactas, a flambagem local ocorre após uma pequena plastificação da seção transversal da viga, resultando em uma pequena rotação do elemento. Para vigas esbeltas, a seção transversal não chega a apresentar sinais de plastificação, uma vez que o fenômeno de flambagem local, faz com que a viga entre em colapso antes do patamar de plastificação, ainda na fase elástica (PFEIL; PFEIL, 2009, p. 158).

No que tange à flambagem lateral com torção Pfeil e Pfeil (2009, p. 153) explicam que “[...] a viga perde seu equilíbrio no plano principal de flexão (em geral vertical) e passa a apresentar deslocamentos laterais e rotações de torção [...]”, os autores ainda adicionam que “Para evitar a flambagem de uma viga I, cuja rigidez à torção é muito pequena, é preciso prover contenção lateral à viga.”.

Quanto ao funcionamento da flambagem lateral com torção, esta pode ser entendida como a mesa tracionada, funcionando como uma contenção contínua, que impede que a mesa comprimida sofra deformações no seu plano. Para, desta forma, encontrar o equilíbrio, a mesa comprimida sofre uma rotação e um deslocamento lateral (SOUZA, 2013, p. 66). Na figura 6, é possível ver como funciona o mecanismo de flambagem lateral com torção para uma viga do tipo I.

Figura 6 – Flambagem lateral com torção



(fonte: adaptada de PFEIL; PFEIL, 2009, p. 153)

### 5.2.2 Esforço cortante

Em vigas de alma cheia, o elemento responsável por atribuir resistência ao esforço cortante é a alma. Em perfis I, a alma geralmente apresenta uma espessura menor do que a das mesas, assim tem-se uma maior esbelteza para este elemento da seção transversal da viga.

Nos perfis laminados a menor espessura da alma não proporciona problemas em termos de resistência ao esforço cortante, visto que estas vigas são pouco esbeltas. Já em perfis soldados, a esbelteza da alma é mais elevada, fazendo com que a flambagem desta seja um fator determinante no dimensionamento da viga. Há casos em que é necessário a utilização de enrijecedores para proporcionar uma sobre resistência à viga para os esforços provocados por cisalhamento (PFEIL; PFEIL, 2009, p. 174).

Souza (2013, p. 75) explica que “Os modos de falha ou estados limites últimos associados à força cortante em vigas são: a plastificação da alma por cisalhamento ou a flambagem por cisalhamento.”. A partir da definição dada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008, p 50):

- a) para  $\lambda \leq \lambda_p$ : plastificação da alma;
- b) para  $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ : plastificação parcial da alma e presença de fenômenos de flambagem local;
- c) para  $\lambda_r < \lambda$ : fenômenos de flambagem local na alma apenas.

### 5.3 DIMENSIONAMENTO

Para o dimensionamento dos elementos em aço sujeitos a esforço cortante e ação de momento fletor, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008, p. 47) define que:

$$M_{sd} \leq M_{rd} \quad (\text{equação 5})$$

$$V_{sd} \leq V_{rd} \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

$M_{sd}$  = momento fletor solicitante de cálculo, em kN.cm;

$V_{sd}$  = força cortante solicitante de cálculo, em kN;

$M_{rd}$  = momento fletor resistente de cálculo, em kN.cm;

$V_{rd}$  = força cortante resistente de cálculo, em kN.

#### 5.3.1 Momento fletor

Para que seja determinado o valor máximo de resistência ao momento fletor para um perfil I, deve-se analisar conjuntamente as flambagens locais que ocorrem tanto na alma (FLA), quanto na mesa (FLM) comprimida, de modo a verificar o tipo de seção da viga, isto é, se a mesma é compacta, semicompacta ou esbelta. Além de verificar a viga quanto à plastificação ou flambagem local da seção transversal, faz-se necessário verificar a estabilidade lateral (FLT) que o perfil escolhido apresenta frente às solicitações que lhe são impostas, e assim evitar que este venha a falhar por flambagem lateral por torção. Toma-se como resistência final ao momento fletor o menor valor obtido entre FLA, FLM e FLT.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008, p. 47), aponta que “O momento fletor resistente de cálculo,  $M_{rd}$ , deve ser determinado de acordo com os Anexos G ou H, o que for aplicável [...]”, e ainda aponta que “Para assegurar a validade da análise elástica, o momento fletor resistente de cálculo não pode ser tomado maior do que  $1,50 W f_y / \gamma_{a1}$ , sendo  $W$  o módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal da barra em relação ao eixo de flexão.”.



### 5.3.1.1 Plastificação da seção transversal

Para que seja determinado de forma adequada o valor final do momento fletor que o perfil I é capaz de resistir antes de plastificar, faz-se o uso do quadro 7, o qual fornece as equações necessárias para a determinação dos parâmetros referentes aos estados limite de flambagem local de alma (FLA) e flambagem local de mesa (FLM).

Quadro 7 – Verificação ao momento fletor no eixo de maior inércia proposta pela NBR8800:2008

Tipo de seção e eixo de flexão	Estados-limites aplicáveis	$M_r$	$M_{cr}$	$\lambda$	$\lambda_p$	$\lambda_r$
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U não sujeitas a momento de torção, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver Nota 5	Ver Nota 1	$\frac{L_b}{r_y}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 1
	FLM	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver Nota 5	Ver Nota 6	$\frac{b}{t}$ Ver Nota 8	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo H)	$\frac{h}{t_w}$	$3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 134)

Para a determinação dos valores de  $M_{cr}$  e  $\lambda_r$  das mesas de perfis laminados, utilizam-se as equações 7 e 8 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 136):

$$M_{cr(FLM)} = \frac{0,69 \times E}{\lambda^2} \times W_c \quad (\text{equação 7})$$

$$\lambda_r = 0,83 \times \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)}} \quad (\text{equação 8})$$

Onde:

$M_{cr}$  = momento fletor de flambagem elástica, em kN.cm;

$\lambda$  – parâmetro de esbeltez;

$W_c$  – módulo de resistência elástico do lado comprimido da seção, relativo ao eixo de flexão, em cm<sup>3</sup>;

$\lambda_r$  – parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento;

$f_y$  – resistência ao escoamento do aço, em kN/cm<sup>2</sup>;

$\sigma_r$  – tensão residual de compressão, tomada comumente por 30% da resistência ao escoamento do aço, em kN/cm<sup>2</sup>.

Tendo posse dos resultados dos parâmetros apresentados no quadro 7, verifica-se em qual tipo de seção o perfil se enquadra, isto é, se o mesmo é uma seção compacta, semicompacta ou esbelta. As equações 9, 10 e 11 são responsáveis por fornecer o valor da resistência que o perfil apresenta para os estados limites de FLA e FLM (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 130):

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad (\text{equação 9})$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \times \left[ M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right], \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (\text{equação 10})$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda_r < \lambda \quad (\text{equação 11})$$

Onde:

$M_{Rd}$  = momento fletor resistente, em kN.cm;

$M_{pl}$  = momento fletor de plastificação da seção transversal, em kN.cm;

$M_r$  = momento fletor correspondente ao início do escoamento, em kN.cm;

$M_{cr}$  = momento fletor de flambagem elástica, em kN.cm;

$\lambda$  = parâmetro de esbeltez;

$\lambda_p$  = parâmetro de esbeltez limite para plastificação;

$\lambda_r$  = parâmetro de esbeltez limite para início do escoamento;

$\gamma_{a1}$  = coeficiente de ponderação da resistência ao escoamento, flambagem e instabilidade do aço estrutural.

Caso a avaliação da FLA de um perfil resultar em seção esbelta, faz-se necessário o uso do Anexo H da NBR8800:2008, para melhor avaliar a resistência ao momento fletor final do perfil. Comumente, os perfis laminados não apresentam alma esbelta, já os perfis soldados podem apresentar alma de elevada esbeltez.

### 5.3.1.2 Flambagem lateral com torção

Na determinação do momento fletor resistente final para este modo de colapso, faz-se novamente uso do quadro 7, juntamente com a utilização das equações 12 e 13, que são responsáveis por fornecerem os valores de  $M_{cr}$  e  $\lambda_r$  para o estado limite de instabilidade lateral para o perfil (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 135).

$$M_{cr} = \frac{C_b \times \pi^2 \times E \times I_y}{L_b^2} \times \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \times \left(1 + 0,0039 \times \frac{J \times L_b^2}{C_w}\right)} \quad (\text{equação 12})$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \times \sqrt{I_y \times J}}{r_y \times J \times \beta_1} \times \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \times C_w \times \beta_1^2}{I_y}}} \quad (\text{equação 13})$$

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r)W}{E \times J} \quad (\text{equação 14})$$

Onde:

$M_{cr}$  = momento fletor de flambagem elástica, em kN.cm;

$E$  = módulo de elasticidade longitudinal do aço, em kN/cm<sup>2</sup>;

$I_y$  = momento de inércia da seção em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma, em cm<sup>4</sup>;

$L_b$  = distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção, em cm;

$C_w$  = constante de empenamento da seção, em cm<sup>6</sup>;

$J$  = constante de torção da seção transversal, em cm<sup>4</sup>;

$r_y$  = raio de giração em torno do eixo y, em cm;

$\beta_1$  = constante para FLT;

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço, em kN/cm<sup>2</sup>;

$\sigma_r$  = tensão residual de compressão, em kN/cm<sup>2</sup>;

$W$  = módulo de resistência (mínimo) elástico da seção transversal, relativo ao eixo de flexão, em cm<sup>3</sup>.

Com a equação 15, determina-se o coeficiente  $C_b$  (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 47):

$$C_b = \frac{12,5 \times M_{m\acute{a}x}}{2,5M_{m\acute{a}x} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \times R_m \leq 3,0 \quad (\text{equação 15})$$

Onde:

$C_b$  = fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme;

$M_{m\acute{a}x}$  = momento fletor máximo solicitante de cálculo, em kN.cm;

$M_A$  = momento fletor máximo solicitante de cálculo, seção a um quarto do comprimento destravado, em kN.cm;

$M_B$  = momento fletor máximo solicitante de cálculo, seção central do comprimento destravado, em kN.cm;

$M_C$  = momento fletor máximo solicitante de cálculo, seção a três quartos do comprimento destravado, em kN.cm;

$R_m$  = parâmetro de monossimetria da seção transversal.

Obtendo os parâmetros necessários para a avaliação do momento fletor por flambagem lateral com torção (FLT), verifica-se qual o nível de esbeltez que a viga apresenta, isto em função dos parâmetros de esbeltez  $\lambda$ ,  $\lambda_p$  e  $\lambda_r$ . Para a determinação final do valor do momento fletor resistente, usa-se as equações 9, 10 e 11, de maneira análoga àquela utilizada para a determinação do momento fletor para os estados de FLA e FLM, com ressalva para vigas que apresentem esbeltez entre  $\lambda_p$  e  $\lambda_r$ , para esses casos, deverá ser multiplicado o valor de momento resistente obtido com o uso da equação 10 pelo coeficiente de transformação do diagrama de momento fletor não-uniforme ( $C_b$ ).

### 5.3.2 Esforço cortante

No que tange à determinação do esforço resistente do perfil para os efeitos oriundos de força cortante, faz-se necessário averiguar a esbeltez da alma do perfil. O uso das equações 16,17 e 18 possibilita a identificação de em qual patamar de esbeltez a viga se encontra (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 50):

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (\text{equação 16})$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (\text{equação 17})$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (\text{equação 18})$$

Onde:

$\lambda$  = parâmetro de esbeltez;

$h$  = altura da alma, em cm;

$t_w$  = espessura da alma, em cm;

$\lambda_p$  = parâmetro de esbeltez limite para plastificação;

$\lambda_r$  = parâmetro de esbeltez limite para início do escoamento;

$k_v$  = parâmetro de cisalhamento;

$E$  = módulo de elasticidade longitudinal do aço, em kN/cm<sup>2</sup>;

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço, em kN/cm<sup>2</sup>.

Tendo posse dos valores para os parâmetros de esbeltez do perfil, a determinação da resistência é feita através das equações 19, 20, 21 e 22 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 50-51):

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad (\text{equação 19})$$

$$V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (\text{equação 20})$$

$$V_{Rd} = 1,24 \left( \frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda_r < \lambda \quad (\text{equação 21})$$

$$V_{pl} = 0,60 A_w \times f_y \quad (\text{equação 22})$$

Onde:

$\lambda$  = parâmetro de esbeltez;

$\lambda_p$  = parâmetro de esbeltez limite para plastificação;

$\lambda_r$  = parâmetro de esbeltez limite para início do escoamento;

$V_{Rd}$  = resistência ao momento fletor, em kN;

$V_{pl}$  = força cortante de plastificação, em kN;

$A_w$  = área efetiva de cisalhamento, cm<sup>2</sup>;

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço, em kN/cm<sup>2</sup>.

## 6 VIGAS METÁLICAS ALVEOLARES

Neste capítulo, são caracterizadas as vigas alveolares, isto é, são apresentados aspectos relacionados ao seu surgimento, assim como as principais tipologias reconhecidas pelo meio técnico. Apresentar-se-á também, os mecanismos causadores de falhas nestas vigas, assim como os procedimentos propostos pela literatura para o dimensionamento das mesmas.

### 6.1 HISTÓRICO

A respeito do histórico das vigas alveolares, tem-se que o nascimento destas vigas está diretamente relacionado à necessidade de se utilizar perfis que propiciassem uma maior rigidez à flexão do que os perfis em alma cheia que eram produzidos no início do século passado. Ainda a respeito do surgimento das vigas alveolares, Silveira (2011, p. 7) comenta que “Na literatura são encontradas diferentes versões para a origem das vigas alveolares. Por outro lado, seu desenvolvimento está intimamente relacionado com o desenvolvimento da tecnologia de solda na construção metálica, datada no final dos anos 20.”, tal afirmação é reforçada por Ferrari (2013, p. 8), o qual aponta que “Como as vigas alveolares dependem de solda elétrica para serem construídas, seu desenvolvimento está intimamente relacionado com o desenvolvimento da tecnologia de solda elétrica na construção metálica, por volta do final da década de 1920.”. Oliveira (2012, p. 8) cita que “O primeiro pedido de patente para vigas alveolares foi solicitado em 1937 em nome de Geoffrey Murray Boyd.”, e desde então atribuiu-se a ele a invenção das vigas alveolares.

Boyd era engenheiro estrutural e estava desenvolvendo o projeto de um monotrilho na Argentina. Na época, os perfis produzidos e passíveis de serem utilizados, em função das restrições geométricas do projeto, não eram capazes de oferecer a rigidez necessária para atender aos esforços solicitantes. Em função disso, Boyd pensou em cortar um perfil I em alma cheia e deslocar as metades resultantes um certo passo e soldá-las entre si. Para avaliar a viabilidade da ideia, o engenheiro fez um protótipo em papelão, o qual mostrou que a técnica de alveolar idealizada seria uma solução para o projeto em questão (OLIVEIRA, 2012, p. 8).

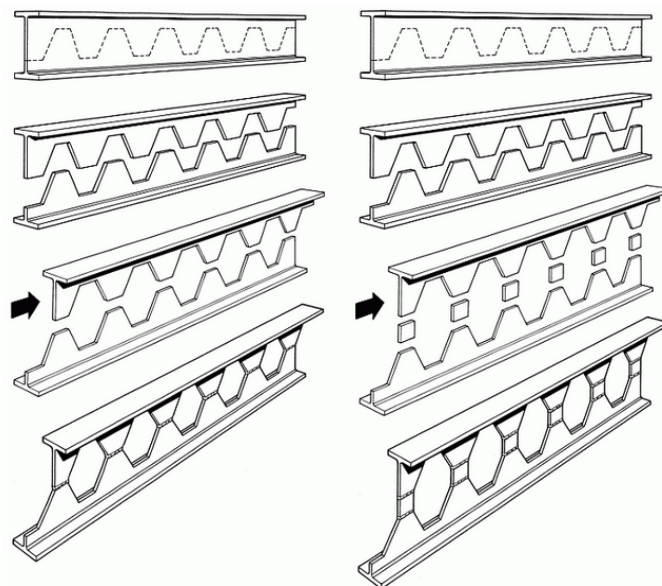
Para Oliveira (2012, p. 9), “Vale ressaltar que inicialmente foram produzidas apenas vigas com furos hexagonais ou octogonais, chamadas de casteladas por apresentarem saliências separadas por intervalos iguais, como as ameias posicionadas na parte superior das muralhas de castelos [...]”. Outro tipo de viga alveolar, é a celular que possui aberturas circulares dispostas ao longo do eixo longitudinal do elemento, estas surgiram depois das vigas casteladas, em função da maior complexidade do corte envolvido em sua confecção.

Em função do aumento dos custos relacionados à mão de obra e ao fato de o processo de produção de uma viga alveolar possuir um caráter extremamente artesanal, aos poucos estas vigas caíram em desuso. Seu ressurgimento deu-se em função de avanços tecnológicos nas empresas siderúrgicas na área de corte, tais como as máquinas CNC e os processos de soldagem. Em função de tais avanços, foi possível produzir vigas alveolares com custos que fizeram com que estas pudessem concorrer com soluções típicas em alma cheia (SILVEIRA, 2011, p. 3).

## 6.2 FABRICAÇÃO

Quanto a fabricação das vigas alveolares, Bezerra (2011, p. 2) informa que esta “[...] é feita normalmente a partir de um perfil laminado de seção I de faces paralelas, cuja alma é inicialmente cortada longitudinalmente em ‘zigue-zague’ trapezoidal [...]”, como é exemplificado na figura 7.

Figura 7 – Processo de fabricação de vigas metálicas alveolares



(fonte: adaptada de GRUNBAUER, [2014])



Quanto ao processo de fabricação das vigas alveolares, Oliveira (2012, p. 11) informa que há três etapas de confecção:

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

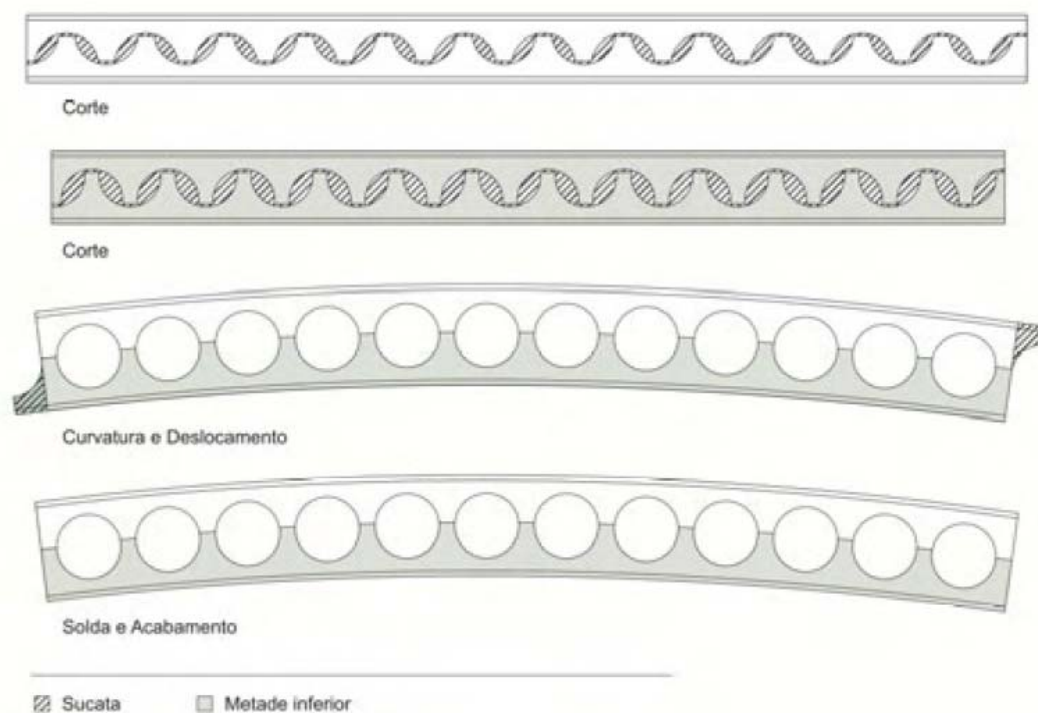
Atualmente, as empresas siderúrgicas possuem diferentes tecnologias que possibilitam o corte dos perfis I, como por exemplo oxicorte, plasma e corte a laser. Cada um propicia vantagens e desvantagens em termos de precisão, velocidade e acabamento. Em uma viga alveolar, o corte é sempre iniciado em um ponto interno, dirigindo-se para as extremidades da viga, sempre mantendo pontos de contato entre as metades produzidas pelo seccionamento da seção. Esse cuidado se dá em função das tensões residuais decorrentes do processo de laminação do aço (OLIVEIRA, 2012, p. 47-48).

Após o corte inicial das metades da viga, estas são posicionadas de modo que os montantes fiquem alinhados um em relação ao outro. A união destes é feita através de pontos de solda, os quais evitam que a viga venha a fletir, devido às tensões residuais do aço. Feita a pré-soldagem e o alinhamento das metades da viga, parte-se para a eliminação das partes sobressalentes do processo de corte, e finalmente, passa-se para a soldagem final da viga alveolar. Ressalta-se que antes de ser levada à obra, ainda necessita-se realizar tratamentos superficiais no aço, tais como jateamento e pintura. Isto é feito para que haja a devida proteção do aço frente aos fenômenos de oxidação e corrosão (OLIVEIRA, 2012, p. 50-52).

No processo de fabricação de uma viga alveolar, Oliveira (2012, p. 44) explica que “Uma desvantagem da viga celular em relação à castelada é a perda de material devido ao tipo de corte para obtenção do formato circular do alvéolo.”, e que “Outra desvantagem relacionada ao processo de fabricação das vigas celulares é o fato de que o caminho percorrido pela máquina de corte para obtenção de alvéolos circulares precisa ser duplo [...]”.

Quanto aos processos de confecção de vigas alveolares curvas, Oliveira (2012, p. 53) explica que é possível fazê-las “[...] cortando-se dois perfis originais com alvéolos de tamanhos ligeiramente diferentes. As metades do perfil com alvéolos maiores constituem os dois tês superiores de duas vigas, e as metades do perfil com alvéolos menores constituem os dois tês inferiores dessas mesmas vigas.”, como ilustra a figura 8.

Figura 8 – Processo de confecção de vigas alveolares curvas



(fonte: OLIVEIRA, 2012, p. 54)

### 6.3 GEOMETRIA DOS PERFIS ALVEOLARES

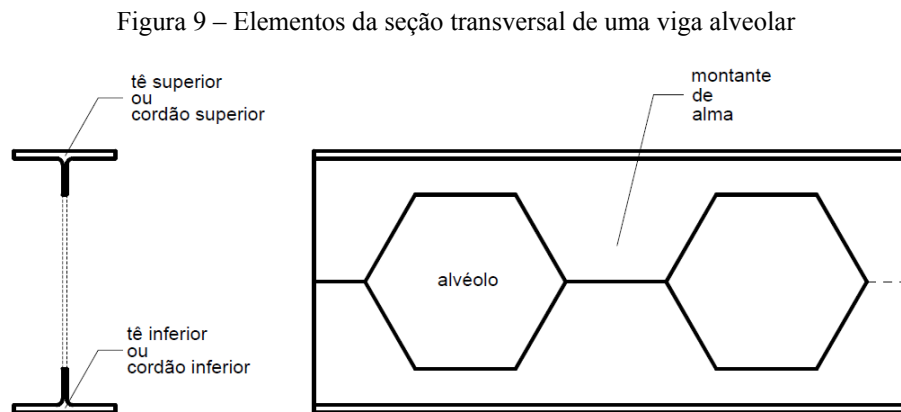
Neste item são abordados aspectos relacionados à geometria das vigas alveolares, visto que este é um parâmetro de fundamental importância para a resistência das vigas. São discutidos tópicos acerca dos padrões de alvéolos mais comumente encontrados na literatura, assim como suas relações geométricas características.

A definição de qual tipo de viga alveolar (castelada ou celular) deve ser utilizada em determinado projeto é fundamental, visto que para a adoção de vigas casteladas, a geometria implica diretamente nas propriedades da seção transversal da viga, devido às relações existentes entre alvéolo e montante. Todavia, a utilização do padrão celular confere uma maior liberdade ao projetista, visto que nesse padrão não há uma relação geométrica pré-estabelecida entre o diâmetro da abertura e a largura do montante de alma, podendo-se assim, variar ambos os valores desses elementos da seção transversal de forma independente (OLIVEIRA, 2012, p. 79).

### 6.3.1 Elementos da seção transversal

O fato de as vigas alveolares serem uma modificação de um perfil em alma cheia convencional, resulta em vigas que possuem elementos da seção transversal iguais aos perfis que lhes deram origem, assim como o surgimento de alguns elementos não existentes em seus perfis progenitores.

Tem-se como novos elementos da seção transversal, os tês superior e inferior. Eles são produtos do corte da alma do perfil. Os tês sempre situam-se entre a parte superior e inferior de um alvéolo da viga. Juntamente com o aparecimento dos tês, há também o surgimento de um elemento, sempre situado entre dois alvéolos, chamado montante de alma. Além deles, há também o aparecimento dos alvéolos frutos do corte dos perfis em alma cheia, estes podem ser tanto em padrões poligonais ou circulares. A figura 9 ilustra os elementos integrantes da seção transversal das vigas alveolares.



(fonte: adaptada de SILVEIRA, 2011, p. 12)

### 6.3.2 Razão de expansão

A razão de expansão relaciona o ganho de altura que a viga alveolar apresenta quando comparada com o seu perfil progenitor. Segundo Oliveira (2012, p. 17), pode-se calcular a razão de expansão através da seguinte equação:

$$k = d_g / d \quad (\text{equação 23})$$

Onde:

$k$  = razão de expansão;

$d_g$  = altura do perfil expandido, em cm;

$d$  = altura total de um perfil de alma cheia, em cm.

A autora ainda cita que “Há fatores que condicionam a razão de expansão nas vigas casteladas diferentemente do que ocorre nas vigas celulares.”.

#### 6.3.2.1 Vigas casteladas

Muitos estudos foram realizados a fim de encontrar qual a melhor razão de expansão para vigas casteladas. O trabalho desenvolvido por Toprac e Cooke<sup>1</sup> (1959 apud OLIVEIRA, 2012, p. 18-19) verificou a resistência ao momento fletor para nove vigas possuindo diferentes razões de expansão. Os pesquisadores chegaram a resultados que mostraram que a resistência ao momento fletor das vigas casteladas aumenta até a razão de expansão de 1,5, e após esse valor a resistência começa a diminuir.

#### 6.3.2.2 Vigas celulares

Estas vigas apresentam uma gama muito grande de variações e combinações para tamanhos de alvéolos e montantes. No que tange à razão de expansão de vigas celulares Oliveira (2012, p. 24) cita que “[...], a razão de expansão da viga alveolar varia entre 1,3 a 1,6 vezes a altura do perfil original.”.

### 6.3.3 Padrões de alvéolos

Após o surgimento das vigas alveolares por parte do engenheiro inglês, Geoffrey Boyd, muitos buscaram desenvolver padrões geométricos para estas vigas. Silveira (2011, p. 15) informa que “Ao longo da história alguns padrões de castelação foram estabelecidos nos mercados europeu e americano. Alguns desses padrões são comumente identificados com os nomes de seus desenvolvedores.”.

Os principais padrões de vigas casteladas que se destacaram ao longo da história foram: o padrão Litzka, Peiner e o Anglo-Saxão. Quanto aos padrões estabelecidos, Oliveira (2012, p.

---

<sup>1</sup> TOPRAC, A. A.; COOKE, B. R., An experimental investigation of open-web beams, **Welding Research Council Bulletin Series**, New York, n. 47, p. 1-10, Feb. 1959.

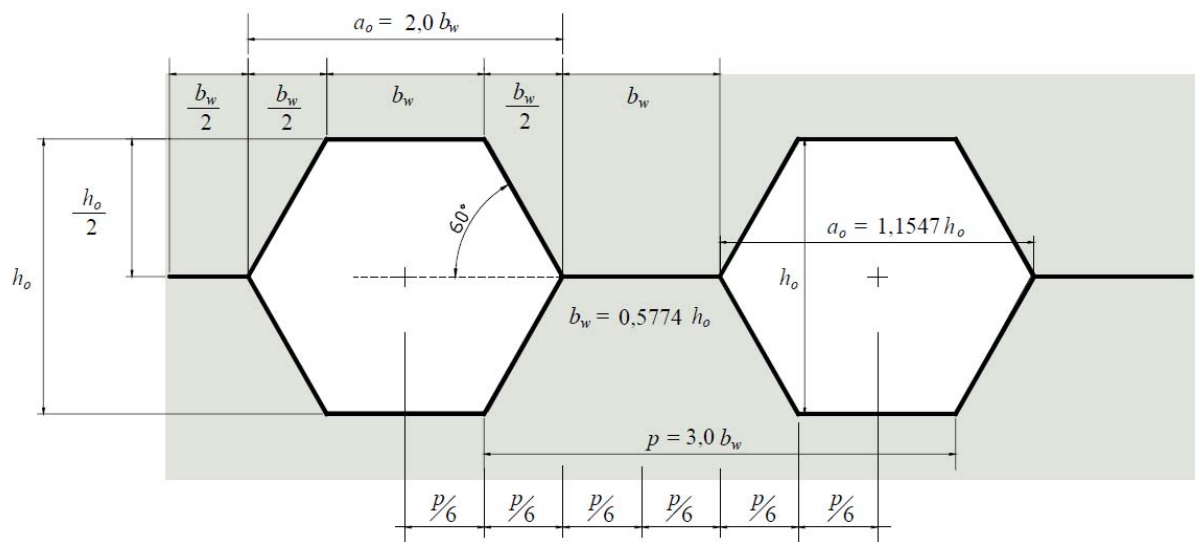
37) explica que “De modo geral, os diversos padrões representam uma busca por geometrias ótimas de acordo com os equipamentos de corte e os perfis oferecidos na época, e com as considerações dos modos de colapso feitas até então.”.

A utilização dos diferentes padrões de vigas casteladas varia de local para local, tanto que Bezerra (2011, p. 7) informa que “Na Europa, tradicionalmente, são muito usadas as vigas de Padrão Peiner [...]” e que “Na Inglaterra, Estados Unidos e Canadá, normalmente é adotado um padrão um pouco diferente do anterior, conhecido como padrão anglo-saxônico [...]”.

### 6.3.3.1 Padrão Litzka

Segundo Oliveira (2012, p. 37), o padrão Litzka “Caracteriza-se por apresentar aberturas hexagonais regulares e proporções relacionadas com o passo, que é dividido em seis partes iguais. O ângulo interno do alvéolo no padrão Litzka é de  $60^\circ$  e a razão de expansão usual é de 1,5.”, como é identificado na figura 10.

Figura 10 – Definições geométricas do padrão Litzka



(fonte: SILVEIRA, 2011, p. 15)

Onde:

$p$  : passo do alvéolo;

$h_o$  : altura do alvéolo;

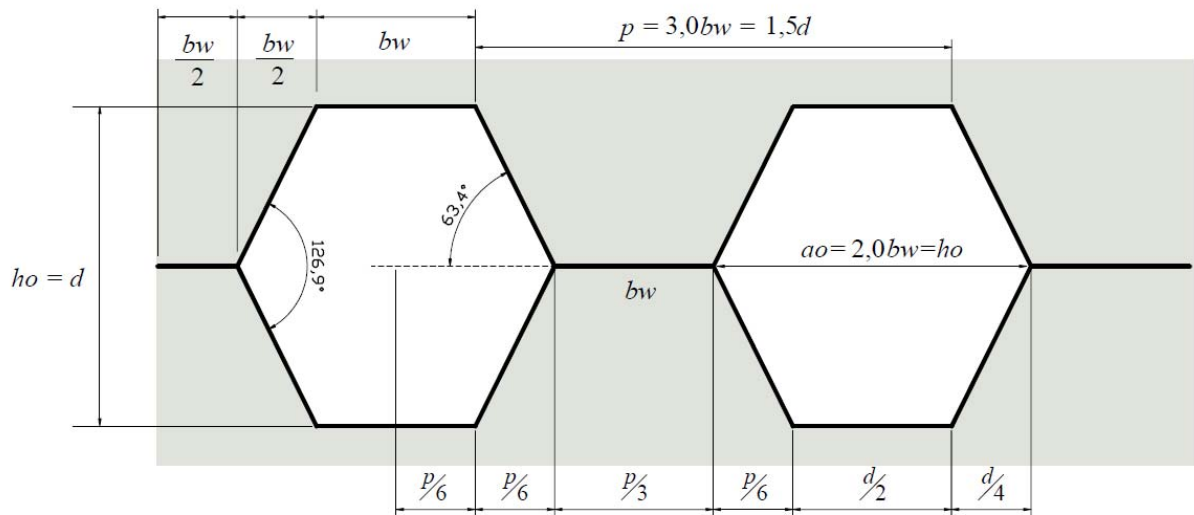
$a_o$  : comprimento do alvéolo;

$b_w$  : trecho reto do comprimento do alvéolo.

### 6.3.3.2 Padrão Peiner

Oliveira (2012, p. 37) aborda que “O padrão Peiner [...] é similar ao Litzka, porém o alvéolo não é um hexágono regular. No padrão Peiner, o alvéolo possui largura ( $a_o$ ) igual à altura ( $h_o$ ), padrão que resulta em um ângulo interno de  $63,4^\circ$ ”. Silveira (2011, p. 16) adiciona, informando que o padrão Peiner “Também permite que montantes e alvéolos possam ser medidos em relação ao passo, sempre dividindo-o em seis partes iguais.”. A figura 11 mostra os padrões geométricos estabelecidos para o padrão Peiner.

Figura 11 – Definições geométricas do padrão Peiner



(fonte: SILVEIRA, 2011, p. 15)

Onde:

$p$  : passo do alvéolo;

$h_o = d$  : altura do alvéolo;

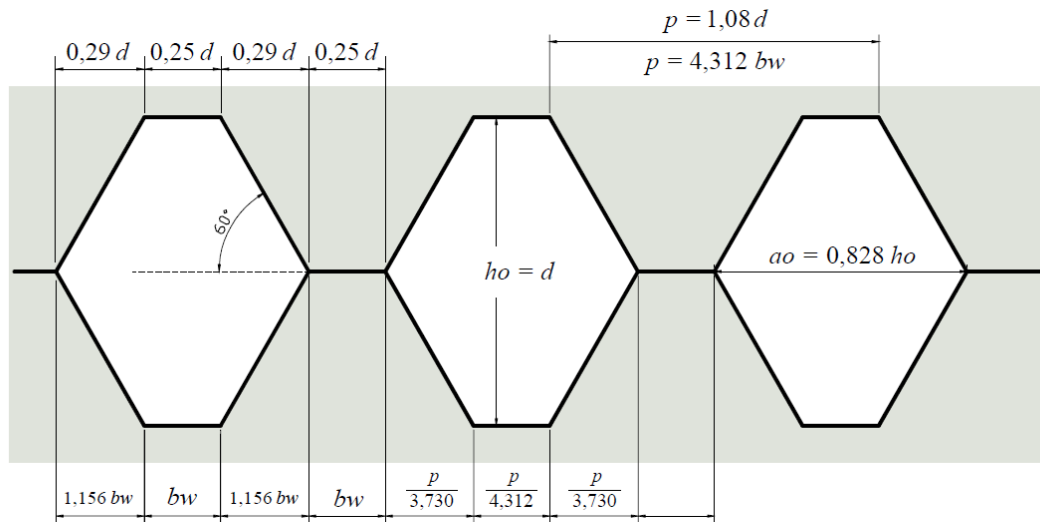
$a_o$  : comprimento do alvéolo;

$b_w$  : trecho reto do comprimento do alvéolo.

### 6.3.3.3 Padrão Anglo-Saxão

Para este padrão de viga castelada, Oliveira (2012, p. 38) comenta que “O padrão apresenta um ângulo interno de aproximadamente de  $60^\circ$  e as proporções das aberturas são tomadas de forma que o passo tenha um valor ótimo de  $1,08d$ ”. Na figura 12, tem-se as relações geométricas para o padrão Anglo-Saxão.

Figura 12 – Definições geométricas do padrão Anglo-Saxão



(fonte: SILVEIRA, 2011, p. 16)

Onde:

$p$  : passo do alvéolo;

$h_o = d$ : altura do alvéolo;

$a_o$  : comprimento do alvéolo;

$b_w$  : trecho reto do comprimento do alvéolo.

Ferrari (2013, p. 16) explica que “No padrão Anglo-Saxão [...], o ângulo do lado inclinado do alvéolo é de  $60^\circ$ , tal como no padrão Litzka, porém o alvéolo possui uma razão de aspecto diferente, com  $a_o = 0,828h_o$ .”.

#### 6.3.3.4 Padrão Celular

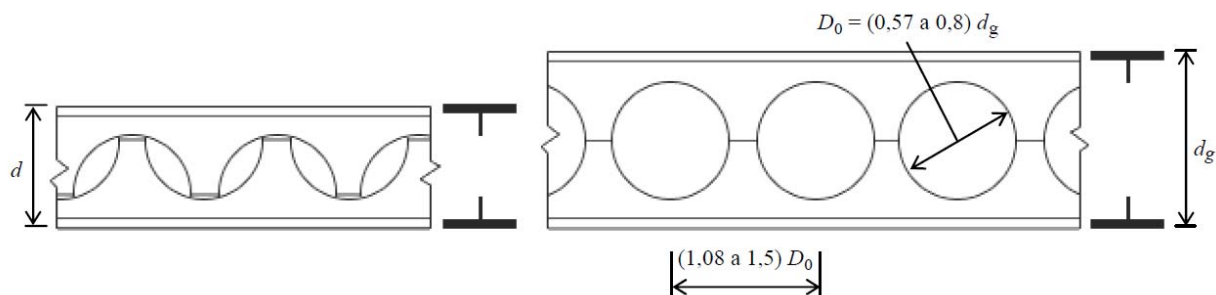
No padrão celular tem-se uma maior flexibilidade, devido ao traçado de corte não afetar significativamente a resistência do perfil, como é observado no caso de vigas casteladas. A possibilidade de variar o tamanho e o espaçamento dos alvéolos, resulta em algumas vantagens, como aborda Oliveira (2012, p. 39):

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

Segundo Oliveira (2012, p. 39), “[...] a viga celular possui menos alvéolos do que a castelada no padrão anglo-saxão e maior largura do montante de alma, o que pode ser interessante

dependendo das condições de carregamento.”. Oliveira (2012, p. 41) explica que “Quando os alvéolos são pouco espaçados, a viga celular assume um comportamento análogo ao de uma viga Vierendeel, e uma formulação de cálculo baseada nessa hipótese fornece bons resultados.”. A figura 13 mostra as relações geométricas típicas para vigas celulares.

Figura 13 – Definições geométricas do padrão celular



(fonte: SILVEIRA, 2011, p. 18)

Onde:

$d$  : altura do perfil em alma cheia;

$d_g$  : altura da viga celular;

$D_o$  : diâmetro do alvéolo.

Segundo Oliveira (2012, p. 42), “Quanto mais espaçados forem os alvéolos, mais o comportamento estrutural da viga alveolar irá se assemelhar ao comportamento de uma viga de alma cheia.”.

## 6.4 MODOS DE FALHA

A seguir, são abordados os modos de colapso identificados na literatura acerca das vigas alveolares metálicas. Devido ao fato destas vigas possuírem um comportamento diferente das tradicionais vigas em alma cheia, surgem diferentes modos de colapso, que culminam no esgotamento da capacidade resistente do elemento de suportar os carregamentos que lhe são impostos.

Silveira (2011, p. 32) cita que “Além dos modos de colapso observados nas vigas de alma cheia, novos modos de colapso surgem devido ao aumento da esbelteza da viga com a expansão da altura total.”. A autora ainda cita que “A distribuição de tensões e os deslocamentos também



apresentam sensíveis diferenças devido à periódica mudança da área da seção transversal e alma mais susceptível a fenômenos de instabilidade [...]”.

No que tange aos modos de colapso nas vigas alveolares, Silveira (2011, p. 32) apresenta os modos conhecidos como sendo:

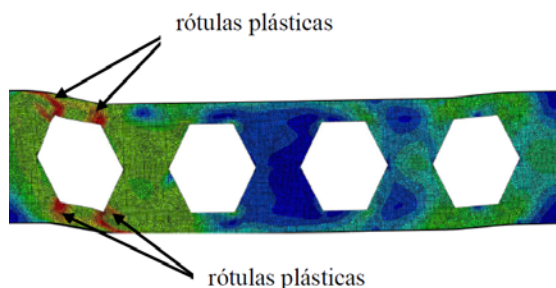
- a) colapso por formação de mecanismo plástico;
- b) colapso do montante de alma por cisalhamento;
- c) colapso do montante de alma por flexão;
- d) colapso por flambagem do montante de alma;
- e) colapso por rasgamento da solda de emenda à meia altura do montante de alma;
- f) flambagem lateral com torção.

#### 6.4.1 Colapso por formação de mecanismo plástico

Este modo de colapso é caracterizado pela plastificação da seção transversal, na qual se encontram os tês superior e inferior mais solicitados da viga. Segundo Silveira (2011, p. 32), “Vigas com vãos longos e com relação altura/vão acima de 20 costumam apresentar o modo de colapso por mecanismo de flexão.”.

Quando o esforço cortante possui um valor elevado, pode ocorrer a formação de mecanismo Vierendeel. Este fenômeno é responsável por gerar rótulas nos tês superior e inferior da região da viga que contém o alvéolo mais solicitado por esforços cortantes (FERRARI, 2013, p. 27). Na figura 14, a coloração azul indica zonas sujeitas à baixa tensão, já as regiões avermelhadas correspondem às zonas de alta tensão na viga e nessas áreas ocorre a formação de rótulas plásticas na viga, caracterizando assim, a formação de mecanismo plástico.

Figura 14 – Mecanismo Vierendeel



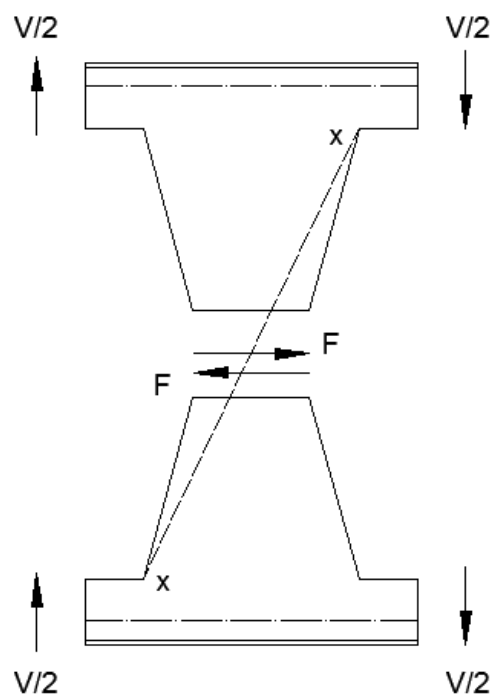
(fonte: adaptada de BEZERRA, 2011, p. 69)

### 6.4.2 Colapso do montante de alma

Referente aos modos de colapso apresentados pelos montantes de uma viga alveolar, a geometria e os esforços atuantes são determinantes para a caracterização de um dado modo de colapso, seja este por compressão ou cisalhamento do painel da alma da viga alveolar. Quando o momento fletor se sobrepõe aos esforços decorrentes do corte ao longo da viga, há uma predominância do modo de colapso ocasionado pela flambagem do montante de alma por compressão. Ao passo em que se aumenta o esforço de corte, o modo de colapso que passa a condicionar a resistência última da viga é o de ruptura do montante de alma por cisalhamento, isto é, no ponto entre a ligação do metal-base com a solda (SILVEIRA, 2011, p. 35).

No que tange à flambagem do montante de alma por compressão, Ferrari (2013, p. 31) explica que “[...], o montante sofre um deslocamento para fora do plano da viga sem que ocorra torção [...], comportando-se como uma coluna submetida à compressão.”. A flambagem do montante de alma pode ocorrer também em regiões próximas de apoios, visto que, nestes locais, há a presença de altos esforços que podem causar compressão na alma da viga alveolar, levando à flambagem da mesma (BEZERRA, 2011, p. 12). A figura 15 ilustra as forças que atuam no montante de uma viga alveolar.

Figura 15 – Forças no montante de alma



(fonte: elaborada pelo autor)

Ao analisar os momentos gerados pelas forças de corte ( $V/2$ ) apresentadas na figura 16, identifica-se que surgem esforços de corte ( $F$ ) na metade do painel da viga. Dependendo da magnitude das solicitações cisalhantes impostas a viga, esta pode apresentar o colapso conhecido como: flexão do montante de alma. A flambagem do montante por cisalhamento ocorre em função dos esforços de tração no lado esquerdo e pela compressão no lado direito do painel da alma, oriundos de esforço cortante na viga. Com os esforços de tração e compressão, a solda é solicitada na união das metades da viga alveolar (SILVEIRA, 2011, p. 35), como nota-se ao analisar a figura 15.

### **6.4.3 Colapso por rasgamento da solda de emenda**

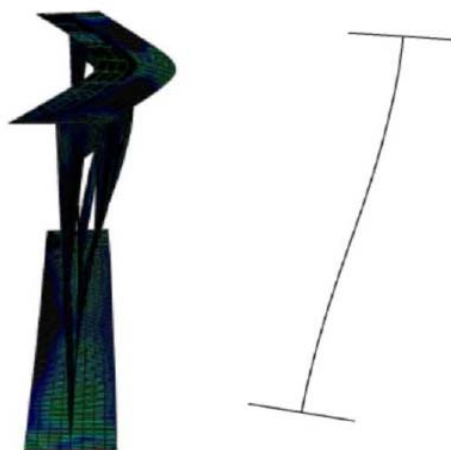
A ruptura da solda de emenda acontece, segundo Bezerra (2011, p. 11), “[...] quando a tensão horizontal de cisalhamento atuante excede sua capacidade resistente [...]” e ainda coloca que “Esse modo de colapso depende do comprimento entre as aberturas (quanto menor o comprimento, maior a possibilidade de ocorrência)”. Tal ruptura ocorre quando busca-se evitar que a viga venha a colapsar por formação de mecanismo plástico, ou seja, o mecanismo Vierendeel (SILVEIRA, 2011, p. 34). Silveira (2011, p. 34) explica que “Em alguns casos, é observada apenas uma deformação excessiva no entorno da solda, sem que uma ruptura propriamente dita aconteça [...]”.

### **6.4.4 Colapso por flambagem lateral com torção**

Como exemplifica Silveira (2011, p. 33), “Dependendo do comprimento destravado, as vigas alveolares podem sofrer flambagem lateral assim como as vigas de alma cheia [...]”. Ferrari (2013, p. 28) ainda explica que “O modo de colapso por flambagem lateral com torção envolve um deslocamento lateral e um giro da seção transversal, que pode ou não ser nulo.”, e que ainda “Esses dois movimentos ocorrem simultaneamente e podem ser explicados pelo fato de a parte comprimida da seção transversal ser ligada [...] à parte tracionada por meio da alma.”.

Segundo Bezerra (2011, p. 22), em “[...] vigas com comprimentos destravados intermediários, a flambagem lateral com torção pode ocorrer juntamente com a flambagem local da alma mudando assim a geometria da seção transversal, ou seja, ocorre a distorção da alma [...]”, e ainda que “[...] essa distorção da alma diminui a rigidez a torção da viga, diminuindo assim o momento fletor resistente.”. Na figura 16, é mostrada a distorção da alma de uma viga alveolar.

Figura 16 – Colapso por flambagem lateral com torção e distorção da alma



(fonte: adaptada de BEZERRA, 2011, p. 60)

## 6.5 DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DE FLECHA

No que tange ao dimensionamento para vigas alveolares, seguiu-se o modelo proposto em Estados limites aplicáveis às vigas alveolares de aço (VERÍSSIMO et al., 2013), o qual propõe um modelo analítico fundamentado em estudos teóricos, numéricos e experimentais acerca das vigas metálicas alveolares. O modelo nasceu fruto da integração entre a Universidade Federal de Minas Gerais com a Universidade Federal de Viçosa.

Para o dimensionamento das vigas alveolares, realiza-se uma analogia do comportamento destas com vigas do tipo Vierendeel, as quais possuem articulações nos pontos médios dos montantes, assim como nos banzos (VERÍSSIMO et al., 2013, p. 130). A figura 17 ilustra a associação feita para o estabelecimento do modelo de cálculo.

Figura 17 – Analogia com viga Vierendeel

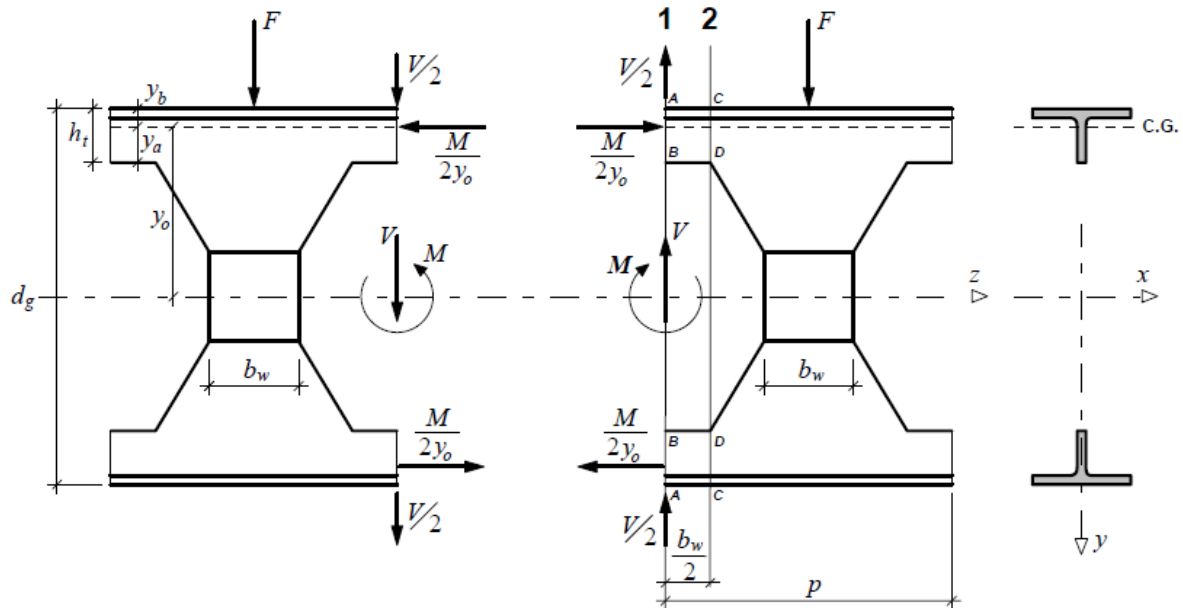


(fonte: VERÍSSIMO et al., 2013, p. 130)

### 6.5.1 Formação de mecanismo plástico

Para o dimensionamento deste estado limite em uma viga alveolar, faz-se necessário o equilíbrio das forças que atuam nos nós oriundos da analogia com viga Vierendeel (VERÍSSIMO et al., 2013, p. 131). A figura 18 apresenta as forças atuantes no alvéolo de uma viga castelada com chapa expansora.

Figura 18 – Forças atuantes no alvéolo



(fonte: VERÍSSIMO et al., 2013, p. 131)

Veríssimo et al. (2013, p. 131) explica que:

[...] a seção 2 é a mais desfavorável, uma vez que, além das tensões normais e de cisalhamento, decorrentes do momento fletor e do esforço cortante, respectivamente existe uma parcela adicional de tensão normal que se origina da flexão produzida pela ação da força cortante na extremidade do tê em balanço [...].

Inicialmente, para uma viga alveolar não se pode afirmar que a seção na qual atua o maior momento fletor é capaz de originar a plastificação da seção transversal, a plastificação se dá a partir da combinação entre esforço cortante e momento fletor. Para determinar a seção crítica que sofre por formação do mecanismo plástico, pode-se adotar o procedimento proposto por Delesques<sup>2</sup> (1969 apud Veríssimo et al. 2013, p. 132).

<sup>2</sup> DELESQUES, R. Stabilité des montants des poutres ajourées. *Construction Métallique*, Paris, v. 3, p. 26-33, [juil] 1968.

O método proposto consiste em plotar o diagrama de momento fletor juntamente com o de esforço cortante, sendo o esforço cortante multiplicado por uma constante, cuja função é a de converter o esforço de corte atuante no centro do alvéolo em um momento fletor na seção crítica do alvéolo, como indicado na figura 18. Após realizar a soma do momento fletor e esforço cortante modificado ao longo de todo o vão da viga, a seção crítica para a plastificação dar-se-á no ponto de maior distância entre os diagramas de sollicitação (VERÍSSIMO et al., 2013, p. 132).

A constante que multiplica o esforço cortante para a determinação da seção crítica para a plastificação, é função da geometria do alvéolo e é determinada conforme a equação 24 (VERÍSSIMO et al., 2013, p. 133):

$$c = \frac{y_o y_a b_w A_t}{2I_t} \quad (\text{equação 24})$$

Onde:

$c$  = constante de conversão do momento fletor, em cm;

$y_o$  = distância do centroide do alvéolo em relação ao centroide do tê, em cm;

$y_a$  = distância do centroide do tê em relação alinhamento inferior tê, em cm;

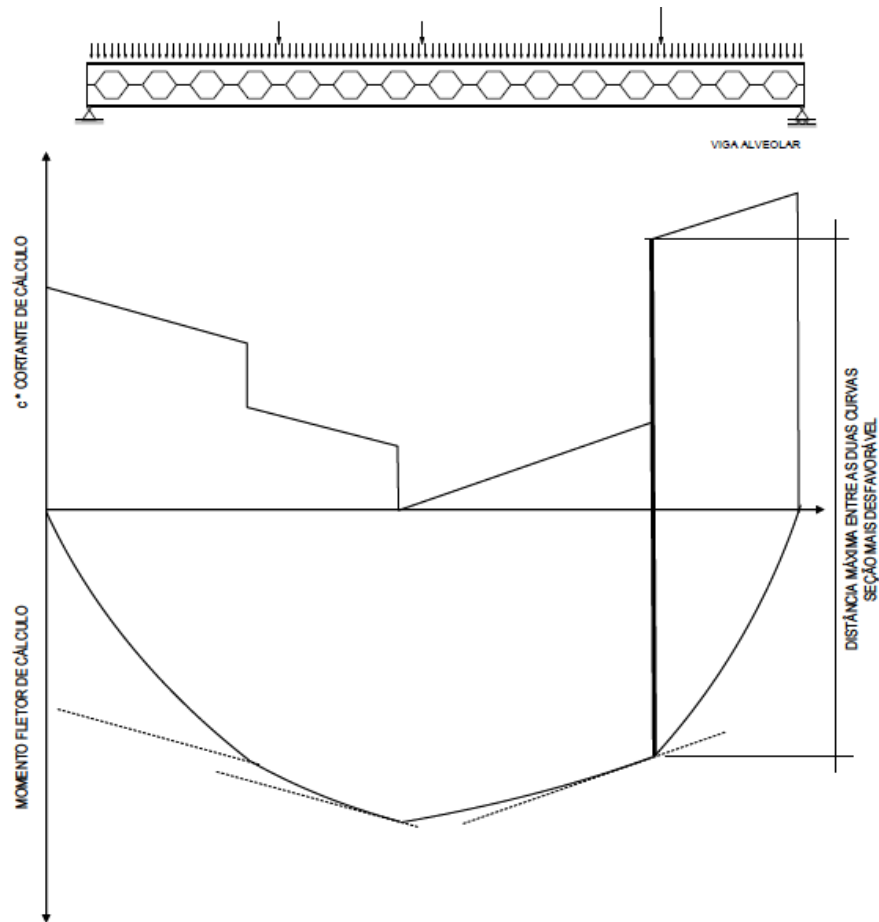
$b_w$  = comprimento do montante do alvéolo, em cm;

$A_t$  = área da seção transversal de um tê, em cm<sup>2</sup>;

$I_t$  = momento de inércia de um tê, em relação ao centroide do alvéolo, em cm<sup>4</sup>.

Na figura 18, são mostradas as variáveis utilizadas na equação 24. Já na figura 19, é exemplificado o método proposto para a determinação da seção crítica em uma viga alveolar.

Figura 19 – Determinação da seção crítica



(fonte: adaptada de VERÍSSIMO et al., 2013, p. 132)

Para determinar a magnitude da sollicitação que causa a plastificação da seção transversal da viga alveolar, assim como determinar a resistência a este modo de colapso, utilizam-se as equações 25 e 26 (VERÍSSIMO et al., 2013, p. 134):

$$M_{sd} + c V_{sd} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (\text{equação 25})$$

$$M_{pl} = 2y_o A_t f_y \quad (\text{equação 26})$$

Onde:

$c$  = constante de conversão do momento fletor, em cm;

$M_{sd}$  = momento fletor solicitante na seção crítica, em kN.cm;

$V_{sd}$  = esforço cortante na seção crítica, em kN;

$M_{pl}$  = momento fletor de plastificação da seção transversal, em kN.cm;

$\gamma_{a1}$  = coeficiente de ponderação de resistência;

$y_o$  = distância do centroide do alvéolo em relação ao centroide do tê, em cm;

$A_t$  = área da seção transversal de um tê, em cm<sup>2</sup>;

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço, em kN/cm<sup>2</sup>.

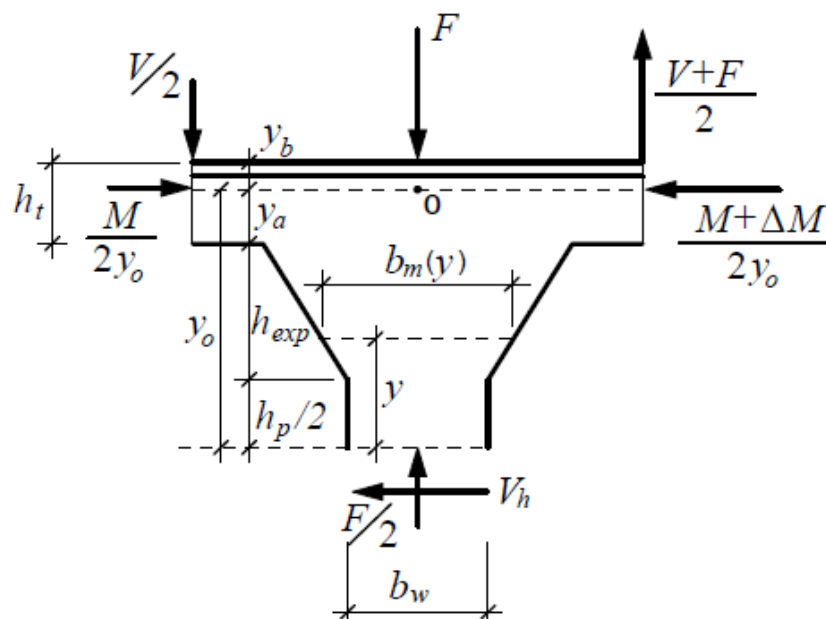
## 6.5.2 Montante de alma

Neste item são abordados tópicos relacionados ao dimensionamento do montante de alma para vigas alveolares, em termos do cisalhamento, flexão e flambagem. O dimensionamento considera a interação completa entre metais solda e base, assim a ruptura acontecerá preferencialmente no metal base.

### 6.5.2.1 Escoamento por cisalhamento

Para o dimensionamento ao escoamento do montante de alma devido ao cisalhamento, deve-se fazer o equilíbrio das forças atuantes no alvéolo (VERÍSSIMO et al., 2013, p. 134-135), como é indicado na figura 20.

Figura 20 – Forças atuantes no alvéolo – cisalhamento



(fonte: adaptada de VERÍSSIMO, 2013, p. 135)



Através do equilíbrio de forças e momentos, juntamente com o uso dos conhecimentos em resistência dos materiais, chega-se a equação 27, que é utilizada para o dimensionamento ao escoamento do montante de alma (VERÍSSIMO et al., 2013, p. 135):

$$V_{Rk1} = \frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{b_w t_w y_o}{p} f_y \quad (\text{equação 27})$$

Onde:

$V_{rk1}$  = resistência característica para o esforço cortante por cisalhamento do montante, em kN;

$b_w$  = comprimento do montante do alvéolo, em cm;

$t_w$  = espessura da alma do perfil, em cm;

$y_o$  = distância do centroide do alvéolo em relação ao centroide do tê, em cm;

$p$  = passo do alvéolo, em cm;

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço, em kN/cm<sup>2</sup>.

#### 6.5.2.2 Escoamento por flexão

Para o dimensionamento adequado do montante para os esforços oriundos de flexão, utiliza-se a figura 20. E através desta figura, nota-se a atuação de uma força  $Vh$  no montante, a qual é responsável por produzir flexão no mesmo. Utilizando os conceitos de resistência dos materiais, chega-se nas equações 28 e 29 (VERÍSSIMO et al., 2013, p. 136):

$$\text{a) para: } 0 \leq h_p \leq \frac{b_w h_{exp}}{2b}$$

$$V_{Rk2} = \frac{8 y_o t_w b (b_w h_{exp} - b h_p)}{3 h_{exp}^2 p} f_y \quad (\text{equação 28})$$

$$\text{b) para: } h_p > \frac{b_w h_{exp}}{2b}$$

$$V_{Rk2} = \frac{2 y_o t_w b_w^2}{3 h_p p} f_y \quad (\text{equação 29})$$

Onde:

$V_{rk2}$  = resistência característica para o esforço cortante por flexão do montante, em kN;

$y_o$  = distância do centroide do alvéolo em relação ao centroide do tê, em cm;

$b_w$  = comprimento do montante do alvéolo, em cm;

$b$  = projeção horizontal do lado inclinado da abertura para vigas casteladas, em cm;

$h_{exp}$  = projeção vertical da porção inclinada do montante, em cm;

$h_p$  = altura da chapa expansora, em cm;

$p$  = passo do alvéolo, em cm;

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço, em kN/cm<sup>2</sup>.

### 6.5.2.3 Flambagem do montante de alma

Para a verificação da instabilidade dos montantes sem chapas expansoras, utilizam-se as equações 30, 31, 32 e 33 (VERÍSSIMO et al., 2013, p. 138):

$$V_{Sd} \leq \frac{2}{3} V_{cr}, \text{ se } \frac{V_{cr}}{V_{Rk2}} \leq 1 \quad (\text{equação 30})$$

$$V_{Sd} \leq \frac{1}{3} (V_{cr} + V_{Rk2}), \text{ se } 1 < \frac{V_{cr}}{V_{Rk2}} \leq 2 \quad (\text{equação 31})$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rk2}, \text{ se } \frac{V_{cr}}{V_{Rk2}} > 2 \quad (\text{equação 32})$$

$$V_{cr} = \frac{E t_w^3}{1,18 y_o} \left[ 1 + \left( 1 - \frac{2b_w}{p} \right) \times \left( \frac{y_o - 0,8h_{exp}}{y_o} \right) \right] \quad (\text{equação 33})$$

Onde:

$V_{rk1}$  = resistência característica para o esforço cortante por cisalhamento do montante, em kN;

$b_w$  = comprimento do montante do alvéolo, em cm;

$t_w$  = espessura da alma do perfil, em cm;

$y_o$  = distância do centroide do alvéolo em relação ao centroide do tê, em cm;

$p$  = passo do alvéolo, em cm;

$y_o$  = distância do centroide do alvéolo em relação ao centroide do tê, em cm;

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço, em kN/cm<sup>2</sup>;

$E$  = módulo de elasticidade longitudinal do aço, em kN/cm<sup>2</sup>;

$h_{exp}$  = projeção vertical da porção inclinada do montante, em cm.

### 6.5.3 Flambagem lateral com torção

No dimensionamento deste item, Veríssimo et al. (2013, p. 139) explica que “[...] para determinação do estado limite último de flambagem lateral com torção tem como base a adoção das prescrições da ABNT NBR8800:2008 para vigas de alma cheia [...]”.

Devido às modificações constantes ao longo do eixo da viga, algumas modificações se fazem necessárias para a avaliação das vigas alveolares (VERÍSSIMO et al., 2013, p. 139):

- a) troca dos parâmetros de esbelteza  $\lambda_p$  e  $\lambda_r$ , para os respectivos comprimentos de flambagem responsáveis pela plastificação ( $L_p$ ) e início do escoamento dos perfis ( $L_r$ );
- b) adotar as propriedades geométricas da seção líquida do perfil, ou seja, no centro dos alvéolos, já a constante de empenamento é calculada como se o perfil alveolar fosse de alma cheia;
- c) o comprimento de flambagem  $L_r$ , deve sofrer uma correção de 20%, isto é, o comprimento de início do escoamento torna-se  $L_{r,cor} = 1,20L_r$ ;
- d) o momento fletor de plastificação máximo a qual a viga resiste, é igual a 90% do valor determinado para a formação do mecanismo plástico.

Para a determinação de  $L_p$  e  $L_{r,cor}$ , utilizam-se as equações 34 e 35, respectivamente (VERÍSSIMO et al., 2013, p. 139-140):

$$L_p = 1,76r_y \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{equação 34})$$

$$L_{r,cor} = \frac{1,66 \sqrt{I_y J}}{J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (\text{equação 35})$$

Onde:

$L_p$  = comprimento de flambagem para a plastificação, em cm;

$r_y$  = raio de giração da seção transversal em relação ao eixo y, em cm;

E = módulo de elasticidade longitudinal do aço, em kN/cm<sup>2</sup>;

$f_y$  = resistência ao escoamento do aço, em kN/cm<sup>2</sup>;

$I_y$  = momento de inércia da seção em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma, em cm<sup>4</sup>;

J = constante de torção da seção, em cm<sup>4</sup>;

$\beta_1$  = constante para FLT;

$C_w$  = constante de empenamento, em cm<sup>6</sup>.

Tendo posse dos valores dos comprimentos de flambagem para a viga alveolar em questão, poder-se-á determinar o momento fletor resistente característico, a partir das equações 36, 37, 38 e 39 (VERÍSSIMO et al., 2013, p. 140):

$$M_{Rk} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w}\right)}, \text{ para } L_b > L_{r,cor} \quad (\text{equação 36})$$

$$M_{Rk} = C_b \left[ 0,9 M_{pl} - (0,9 M_{pl} - M_{r,cor}) \frac{L_b - L_p}{L_{r,cor} - L_p} \right], \text{ para } L_p < L_b \leq L_{r,cor} \quad (\text{equação 37})$$

$$M_{r,cor} = \frac{0,31 E}{L_{r,cor}^2} \sqrt{I_y (1000 C_w + 39 J L_b^2)} \quad (\text{equação 38})$$

$$M_{Rk} = 0,9M_{pl} , \text{ para } L_b \leq L_p \quad (\text{equação 39})$$

Onde:

$C_b$  = fator de modificação para momento fletor não-uniforme;

$E$  = módulo de elasticidade longitudinal do aço, em kN/cm<sup>2</sup>;

$I_y$  = momento de inércia da seção em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma, em cm<sup>4</sup>;

$L_b$  = comprimento destravado da viga, em cm;

$C_w$  = constante de empenamento, em cm<sup>6</sup>;

$J$  = constante de torção da seção, em cm<sup>4</sup>;

$M_{pl}$  = momento de plastificação da seção transversal, em kN.cm;

$M_{r,cor}$  = momento fletor do início do escoamento ajustado, em kN.cm;

$L_p$  = comprimento para plastificação da seção transversal, em cm;

$L_{r,cor}$  = comprimento para início do escoamento da seção transversal ajustado, em cm.

Cabe salientar, que para pequenos comprimentos de flambagem, próximos de  $L_p$ , o tipo de carregamento tem influência direta sobre a resistência da viga a FLT. Para carga uniformemente distribuída, as vigas alveolares não atingem a plastificação completa da seção, isto em função da distorção que ocorre na alma para essa condição de carregamento. Já quando a viga está sujeita apenas à atuação de momento fletor constante, esta consegue atingir a plastificação, pois para essa condição de carregamento, os montantes não estão sujeitos ao mesmo nível de distorção que ocorre em outras condições de carregamento.

A distorção provocada na alma da viga ocorre quando há atuação conjunta entre formação de mecanismo plástico, flambagem de montante de alma e FLT para pequenos comprimentos destravados. E para essa combinação de modos de colapso, a viga sofre uma redução significativa em sua resistência a FLT, da ordem de 30% para menos do que o previsto no procedimento de dimensionamento, caso o carregamento aplicado seja uniformemente distribuído. Já para momento fletor constante ao longo da viga, o método de dimensionamento proposto apresenta excelentes resultados (BEZERRA, 2011).

### 6.5.4 Deslocamento

De forma contrária a experimentada para vigas de alma cheia, os efeitos derivados de corte para vigas alveolares são responsáveis por aumentar o deslocamento significativamente. Para avaliar de forma correta a flecha final destes elementos alveolados é necessário somar a parcela da flecha devido aos esforços de flexão juntamente com os oriundos de corte (VERÍSSIMO et al., 2013, p. 141).

Para o cálculo correto da flecha em uma viga alveolar, utilizam-se as equações 40, 41 e 42 (VERÍSSIMO et al., 2013, p. 141):

$$f = f_M + f_V \quad (\text{equação 40})$$

Onde:

$f$  = deslocamento (flecha) final da viga, em cm;

$f_M$  = deslocamento (flecha) devido a flexão, em cm;

$f_V$  = deslocamento (flecha) devido ao corte, em cm.

No cálculo dos deslocamentos por flexão da viga, necessita-se utilizar a inércia do elemento, assim faz-se uso da equação 41, que aponta a inércia de uma viga alveolar sem chapa expansora, que deve ser utilizada no cálculo (VERÍSSIMO et al., 2013, p. 141):

$$I_e = 2(A_t y_0^2 + I_t) + \frac{t_w}{24} \left( 6h_{exp}^3 + \frac{4b_w h_{exp}^3}{p} \right) \quad (\text{equação 41})$$

Onde:

$I_e$  = inércia equivalente de uma viga alveolar, em cm<sup>4</sup>;

$A_t$  = área da seção transversal de um tê, em cm<sup>2</sup>;

$y_0$  = distância do centroide do alvéolo em relação ao centroide do tê, em cm;

$I_t$  = momento de inércia de um tê em relação ao centroide do alvéolo, em cm<sup>4</sup>;

$t_w$  = espessura da alma, em cm;

$h_{exp}$  = projeção vertical da porção inclinada do montante, em cm;

$b_w$  = trecho reto do comprimento do alvéolo, em cm;  
 $p$  = passo do alvéolo, em cm.

Para a avaliação da porção da flecha que é devida ao corte, é necessário o conhecimento da área efetiva da seção transversal da viga alveolar. Na equação 42 segue a formulação proposta para o cálculo da área equivalente de vigas alveolares sem chapa expansora (CIMADEVILA et al.<sup>3</sup>, 2000 apud VERÍSSIMO et al., 2013, p. 142):

$$\frac{1}{A_e} = \frac{54}{t_w y_0^2 p^2} \cdot \frac{G}{E} \cdot 0,2 \cdot h_{exp}^3 + \frac{0,6}{t_w y_0^2} \cdot 2,08 h_{exp} + \frac{p^2}{648 I_t} \cdot \frac{G}{E} + \frac{2 t_w y_a^5}{45 I_t^2} \quad (\text{equação 42})$$

Onde:

$A_e$  = área equivalente de uma viga alveolar, em cm<sup>2</sup>;

$t_w$  = espessura da alma, em cm;

$y_0$  = distância do centroide do alvéolo em relação ao centroide do tê, em cm;

$p$  = passo do alvéolo, em cm;

$I_t$  = momento de inércia de um tê em relação ao centroide do alvéolo, em cm<sup>4</sup>;

$G$  = módulo de elasticidade transversal do aço, em kN/cm<sup>2</sup>;

$E$  = módulo de elasticidade longitudinal do aço, em kN/cm<sup>2</sup>;

$h_{exp}$  = projeção vertical da porção inclinada do montante, em cm;

$y_a$  = distância entre o centroide do tê e a parte inferior do mesmo, em cm.

<sup>3</sup> CIMADEVILA, F. J. E.; GUTIÉRREZ, E. M.; RODRÍGUEZ, J. A. V. **Vigas alveoladas**. 1. ed. Madri: Bellisco, 2000. v. 3.

## **7 ANÁLISES COMPARATIVAS**

Neste item, seguem as análises realizadas a fim de averiguar o consumo de aço e desempenho estrutural que resulta da adoção de um tipo ou outro de viga. Nas análises, empregaram-se vigas do tipo W e H, que comumente são utilizadas em estruturas metálicas, sendo utilizado o aço ASTM A572 grau 50. Quanto às vigas alveolares, fez-se uso apenas do padrão Litzka, com este possuindo a razão de expansão de 1,5. Portanto, tem-se que os consumos de aço e resistências para outros padrões de vigas alveolares podem variar um pouco em relação aos valores encontrados para o padrão Litzka.

### **7.1 CONSUMO DE AÇO**

Neste item são expostas as considerações iniciais para a avaliação do consumo de aço para as vigas de alma cheia e alveolares. Posteriormente, são discutidos os resultados obtidos na avaliação do consumo de aço, expondo as vantagens e desvantagens do uso de um tipo de viga ou de outro.

Os resultados das análises de consumo de aço encontram-se nos apêndices A, B e C, já no apêndice D, seguem as verificações dos perfis utilizados nas vigas metálicas.

#### **7.1.1 Considerações iniciais**

Na análise de consumo de aço, adotou-se diferentes valores de carregamento uniformemente distribuído, vãos livres e tipos de contenção ao longo das vigas, para que assim se avaliasse as diferenças na demanda de aço entre vigas biapoiadas constituídas por perfis de alma cheia ou alveolares.

Os critérios e parâmetros de dimensionamento adotados na análise de consumo de aço para as vigas metálicas são os mesmos que se utiliza no cálculo de estruturas do tipo garagem, essa escolha se deve ao fato do carregamento nesse tipo de edificação ser tipicamente distribuído e pelo maior rigor na avaliação dos elementos estruturais na condição de serviço.



Definiu-se inicialmente, que o carregamento aplicado nas vigas é ocasionado por cargas de caráter variável e permanente. Fixou-se para a carga variável, o valor de 3,0 kN/m<sup>2</sup>, conforme recomenda a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1980, p. 3) para sobrecargas em edificações do tipo garagem para veículos leves. Para a carga permanente utilizada na avaliação do consumo de aço, estabeleceu-se que esta seria proveniente de uma laje de 10 cm, conforme indicação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014, p. 74) e de uma carga de 1,0 kN/m<sup>2</sup> para demais cargas de elementos que pudessem ser fixados à laje de concreto, tais como revestimentos e tubulações. Tem-se ainda como carga permanente, o peso próprio da viga metálica adotada para vencer o vão proposto.

Na avaliação do consumo de aço de uma viga biapoiada para diferentes comprimentos de vão, utilizou-se extensões “L” que foram variando de 6,0 a 14,0 m, sendo que o aumento do vão era de 2,0 m em relação ao anterior. No que tange aos carregamentos, estes foram sendo aumentados através da largura da área de carregamento sobre a viga, ou do espaçamento entre vigas (dv). Inicialmente, adotou-se o valor de 2,0 m, chegando ao valor máximo de 4,0 m, com a taxa de aumento de 0,5 m.

Utilizou-se três condições distintas de travamentos laterais na análise de consumo de aço. Na primeira situação, a viga encontra-se livre para se deslocar lateralmente ao longo de todo o seu vão. Na segunda, a viga teria uma contenção lateral no centro do vão. E, por fim, uma condição na qual a viga teria seu deslocamento lateral contido ao longo de toda a sua extensão, impossibilitando a FLT e distorções de alma geradas nesse modo de colapso, havendo assim, somente ruína por plastificação da seção transversal ou por falha no montante de alma da viga.

Na figura 21, são ilustrados os parâmetros chave utilizados na análise do consumo de aço de das vigas biapoiadas para os carregamentos, vãos e tipos de contenções definidos.

Nas tabelas 1 e 2 são apresentados os parâmetros utilizados no dimensionamento das vigas, sendo que a combinação utilizada no estado limite último foi do tipo normal, já para o estado limite de serviço, optou-se por uma combinação quase-permanente. Na etapa de dimensionamento das vigas, considerou-se que as ligações flexíveis e emendas não interfeririam na determinação dos perfis adotados. E para limitar o deslocamento máximo nos elementos, utilizou-se o critério de vigas de piso, conforme recomenda a NBR8800:2008. Cabe salientar que nas seguintes tabelas, não são inclusos os valores de carregamento devidos ao peso próprio das vigas metálicas

Tabela 1 – Cargas para análise do consumo de aço

dv (m)	Descrição	Tipo	Carga (kN/m <sup>2</sup> )	CD (kN/m)
2,00	Laje (10cm)	Permanente	2,50	5,00
	Demais	Permanente	1,00	2,00
	Sobrecarga	Acidental	3,00	6,00
2,50	Laje (10cm)	Permanente	2,50	6,25
	Demais	Permanente	1,00	2,50
	Sobrecarga	Acidental	3,00	7,50
3,00	Laje (10cm)	Permanente	2,50	7,50
	Demais	Permanente	1,00	3,00
	Sobrecarga	Acidental	3,00	9,00
3,50	Laje (10cm)	Permanente	2,50	8,75
	Demais	Permanente	1,00	3,50
	Sobrecarga	Acidental	3,00	10,50
4,00	Laje (10cm)	Permanente	2,50	10,00
	Demais	Permanente	1,00	4,00
	Sobrecarga	Acidental	3,00	12,00

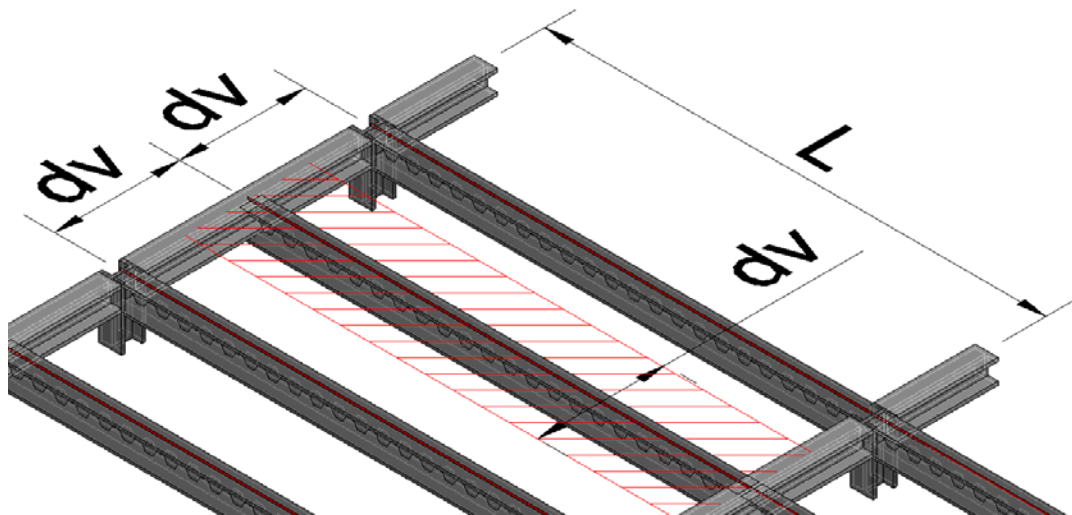
(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 2 – Parâmetros das combinações

Descrição	Tipo	ELU			ELS		
		$\gamma_g$	$\varphi$	$\gamma_q$	$\gamma_g$	$\gamma_q$	$\psi_2$
Laje (10cm)	Permanente	1,40	-	-	1,00	-	-
Demais	Permanente	1,40	-	-	1,00	-	-
PP. Metálica	Permanente	1,25	-	-	1,00	-	-
Sobrecarga	Acidental	-	1,00	1,50	-	1,00	0,60

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 21 – Parâmetros da análise de consumo de aço



(fonte: elaborada pelo autor)

Onde:

$d_v$  : largura da área de carregamento sobre a viga ou afastamento entre vigas;

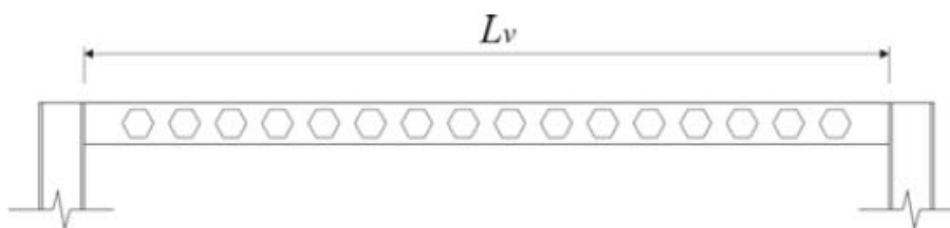
$L$  : vão da viga biapoiada.

Neste trabalho, adotou-se que os perfis metálicos e a laje não iriam funcionar em conjunto para resistir aos carregamentos atuantes, visto que o foco do mesmo é explorar somente o comportamento das vigas metálicas frente às diversas condicionantes impostas na análise (vãos, carregamentos e contenções) e seus diversos modos de colapso. Portanto, dimensionou-se as vigas para a totalidade dos esforços, sem considerar a contribuição da laje de concreto na resistência.

Sabe-se que a desconsideração do dimensionamento das vigas metálicas como mistas pode ser feita apenas para fins acadêmicos, em situações reais de projeto deve-se fazer com que laje e viga metálica funcionem conjuntamente, visto o maior desempenho que há nessa condição. Se fosse considerado apenas a condição de seção mista para as vigas metálicas, o consumo de aço não poderia ser explorado para diferentes contenções, assim como não poderia ser avaliada, de forma isolada, a eficiência no consumo de aço e no desempenho estrutural das vigas. Por conseguinte, também não se poderia utilizar os resultados frutos desta análise comparativa para outras situações com características similares às exploradas neste trabalho.

Na determinação do peso final de aço utilizado nas vigas alveolares, adotou-se a metodologia proposta em Procedimentos para definição das características geométricas de vigas alveolares de aço para sistemas de piso e de cobertura (OLIVEIRA, 2012). No presente procedimento, o consumo de aço para uma viga alveolar é maior do que o vão que a mesma vence, visto que nos extremos é feito um preenchimento nos alvéolos, pois nestes pontos há a ocorrência de esforços cortantes de alta magnitude. A figura 22 ilustra a configuração final de uma viga alveolar conforme o método utilizado na avaliação do consumo de aço.

Figura 22 – Configuração final de uma viga alveolar



(fonte: OLIVEIRA, 2012, p. 80)

A partir do uso da equação 43, pode-se estabelecer o valor do comprimento útil para distribuição dos alvéolos ( $L_d$ ) (OLIVEIRA, 2012, p. 83):

$$L_d \leq L_v - 2 \cdot \left( b_{we(mín)} - \frac{b_w}{2} \right) \quad (\text{equação 43})$$

Onde:

$L_d$  = comprimento útil para distribuição dos alvéolos, em cm;

$L_v$  = vão de projeto, em cm;

$b_{we(mín)}$  = largura mínima do montante de extremidade, segundo Oliveira (2012, p. 82-83), em cm;

$b_w$  = largura do montante, em cm.

Determinado o valor de  $L_d$ , busca-se, através da equação 44, encontrar o número inteiro máximo de alvéolos que podem ser dispostos no comprimento útil de distribuição dos mesmos (OLIVEIRA, 2012, p. 83):

$$n = \text{INT} \left( \frac{L_d}{p} \right) \quad (\text{equação 44})$$

Onde:

$n$  = número de alvéolos;

$L_d$  = comprimento útil de distribuição dos alvéolos, em cm;

$p$  = passo do alvéolo, em cm.

Com o número máximo de alvéolos definidos, parte-se para a determinação do comprimento de corte a partir da equação 45 (OLIVEIRA, 2012, p. 85):

$$L_c = L_v + \frac{p}{2} \quad (\text{equação 45})$$

Onde:

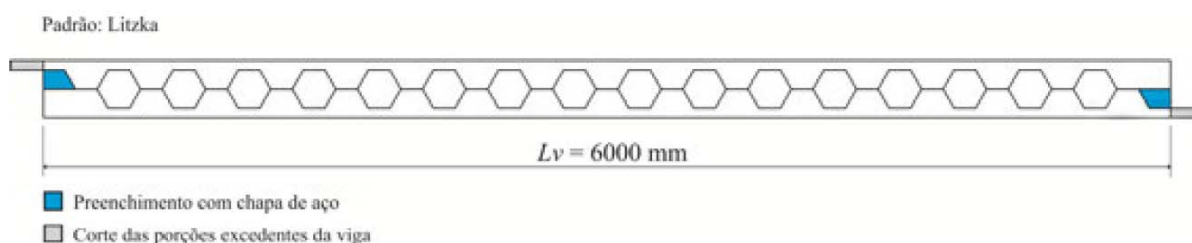
$L_c$  = comprimento de corte, em cm;

$L_v$  = vão de projeto, em cm;

$p$  = passo do alvéolo, em cm.

Tendo posse do comprimento de corte e da distribuição dos alvéolos, pode-se avaliar o consumo de aço para cada situação de cálculo prevista na análise. Na figura 23, é exemplificado o método utilizado para o preenchimento dos extremos na produção de uma viga alveolar, visando amenizar os efeitos derivados do cortante nos apoios.

Figura 23 – Preenchimento dos extremos de uma viga alveolar



(fonte: OLIVEIRA, 2012, p. 85)

Adotou-se que as ligações flexíveis e emendas seriam iguais para ambas as vigas, deste modo não computou-se o consumo de aço para as ligações, sendo contabilizado apenas o peso de aço utilizado nas vigas metálicas.

### 7.1.2 Considerações finais

Os resultados encontrados a partir da análise do consumo de aço mostram que dependendo do vão e do carregamento utilizados, as vigas Litzka não apresentam vantagens frente às vigas de alma cheia. Em muitos casos, os fenômenos derivados do esforço cortante foram determinantes na obtenção dos perfis, resultando em um consumo maior de aço.

De maneira geral, conclui-se que as vigas Litzka possuem um alto potencial de utilização quando os carregamentos são de baixa magnitude ou quando o critério de deslocamento máximo admissível assume a condição de parâmetro chave na escolha da bitola do perfil. Portanto, as vigas Litzka possuem vantagens caso as situações citadas estejam presentes no projeto de uma estrutura metálica, demonstrando potencial na redução do consumo de aço. A seguir, apresentam-se as conclusões retiradas das análises de consumo de aço para cada

condição de travamento lateral, juntamente com o comparativo de consumo para as diferentes contenções laterais adotadas na análise.

#### 7.1.2.1 Vão destravado

Quando se analisa os resultados oriundos do caso de vão completamente destravado, nota-se, de modo geral, que ocorre economia de aço para situações em que o carregamento não possui uma alta magnitude e os vãos são de extensão intermediária, entre 8 e 10 m.

Para pequenos vãos, tais como o de 6,0 m, os perfis de alma cheia resultam em um consumo menor de aço de forma geral, isto se dá em função da formação do mecanismo plástico nas vigas Litzka. Somente com o aumento do vão, as vigas alveolares passam a demandar um menor peso de aço para vencer os vãos propostos, visto que os fenômenos de corte já não atuam de forma determinante nestas vigas.

Na análise de vãos maiores, tais como o de 12 m, notou-se que o consumo de aço diminui com o uso de vigas Litzka, chega-se a 22% para carregamentos de menor magnitude e de 7% para os de maior, quando comparados com perfis de alma cheia.

Para algumas situações de carregamento e vão, tanto as vigas alveolares quanto as de alma cheia acabaram por utilizar a mesma seção transversal, e isto se deu em função da escassez de perfis com menor peso linear para bitolas de maior altura. Em diversas situações, a capacidade do elemento alveolar estava próxima de suportar a solicitação a ele aplicada, mas não atingia a resistência necessária, levando à escolha de bitolas imediatamente superiores, que casualmente eram as mesmas utilizadas para os perfis de alma cheia. Como as vigas alveolares necessitam de um maior comprimento para que sejam confeccionadas, elas conduziram a valores maiores de consumo de aço.

Conclui-se que as vigas Litzka produzem melhores resultados em termos de consumo de aço quando os carregamentos a que estão submetidas são baixos e os vãos possuem maiores comprimentos. A utilização de vãos curtos, mesmo para carregamentos baixos, geralmente conduz ao uso de vigas de alma cheia, pois em tais situações estas propiciam um menor consumo de aço devido à maior resistência frente aos fenômenos de corte.

### 7.1.2.2 Vão com contenção central

Nessa situação de cálculo proposta, viu-se que a economia proporcionada pelo uso de vigas Litzka é maior quando os vãos possuem maiores extensões, tais como os 12 e 14 m. Para esses vãos, os principais critérios de dimensionamento foram a FLT e o deslocamento máximo admissível, cujo uso das vigas Litzka mostrou-se mais eficiente para esses parâmetros de dimensionamento.

Algumas vigas com 6 m de vão e com largura “dv” de influência de carga variando entre 3,0 e 4,0 m tiveram seus comprimentos destravados próximos de  $L_p$ . Assim, de forma conservadora, limitou-se a relação entre solicitação e resistência para o valor máximo de 60%, possuindo assim, uma margem de 10% de segurança, uma vez que o método de dimensionamento apresenta uma imprecisão para a FLT em comprimentos que estejam próximos da plastificação ( $L \sim L_p$ ), conforme mencionou-se no item 6.5.3. Contudo, viu-se que a relação  $S_d/R_d$  para essas vigas ficou abaixo do patamar estabelecido como seguro.

Quando o afastamento entre vigas principais é da ordem de 2,0 m, o uso de vigas Litzka conduz a uma economia somente quando o vão passa a ter 8 m. Para o vão menor, como o de 6 m, o mecanismo Vierendeel faz com que se utilize vigas em alma cheia, visto que para este vão, o principal modo de colapso no dimensionamento das vigas Litzka foi a plastificação da seção transversal. Com o aumento de vão, consegue-se ter um máximo de economia em peso de aço utilizado, chegando a 17% de redução para o vão de 10 m.

Ao passo em que se aumenta o valor do espaçamento, ou seja, o valor do carregamento uniformemente distribuído, verifica-se que para os vãos menores, da ordem de 6 m, ocorre o aumento do consumo de aço novamente, isto em função da plastificação da seção por mecanismo plástico. A diferença chega a ser de 44% de peso em aço, como é o caso para o espaçamento de 4 m entre vigas. Nestes casos, necessita-se de uma maior altura para a seção transversal das vigas casteladas, para que assim, sejam superados os esforços causadores da formação de mecanismo plástico, culminando em muitos casos no aumento do peso linear do perfil utilizado na viga.

Aumentando o vão, mesmo para carregamentos maiores, nota-se que as vigas Litzka voltam a apresentar vantagens. A redução experimentada no consumo de aço chega a ser de até 24%, em relação às vigas de alma cheia, pois os quesitos de deformação máxima e flambagem lateral destacam-se em relação às outras solicitações provocadoras de modos de colapso. Portanto,

para vãos longos, em que a FLT e a flecha são determinantes na escolha do perfil a ser utilizado, as vigas Litzka geralmente são mais efetivas na diminuição do peso de aço consumido.

#### 7.1.2.3 Vão com contenção contínua

Nessa condição de cálculo, na qual a flambagem lateral com torção pode ser retirada da análise, tem-se que o uso de vigas Litzka para carregamentos com valores mais baixos mostra-se muito econômico em termos de consumo de aço.

Para o afastamento da ordem de 2,0 m entre vigas, consegue-se economizar em média 21% no consumo de aço. Enquanto que, se o afastamento é aumentado para 2,5 m, há uma economia média de 15%. Esse comportamento ocorre em virtude dos perfis atenderem às solicitações oriundas da formação de mecanismo plástico, pois estas ainda encontram-se em patamares baixos, e desta forma, as vigas alveolares proporcionam a resistência necessária.

O aumento no afastamento entre vigas causa para vãos menores, tais como os de 6 m, um acréscimo considerável no consumo de aço, quando opta-se por vigas alveolares. Chega-se em alguns casos, a um aumento no peso utilizado de 25% a 43% em relação aos perfis de alma cheia, pois de forma contrária às vigas com carregamentos mais baixos, tem-se que a carga mais alta gera um momento fletor capaz de dar origem a formação do mecanismo Vierendeel, devido ao maior esforço de corte presente na viga. E para que sejam atendidos os esforços gerados na formação de mecanismo plástico, deve-se promover o aumento da altura da viga alveolar, levando a um consumo maior de aço, em muitos casos.

Para vãos maiores, tem-se que as vigas em alma cheia começam a não oferecer uma rigidez que propicie o atendimento do deslocamento máximo admissível, assim esse tipo de viga acaba demandando um maior consumo de aço. Nas vigas Litzka, o ganho em altura é capaz de gerar uma rigidez muito maior à viga, de modo a fazer com que se atenda maiores vãos utilizando elementos mais leves do que as vigas em alma cheia. Consegue-se ter uma economia em aço de 16 a 35% para os diversos espaçamentos entre vigas.

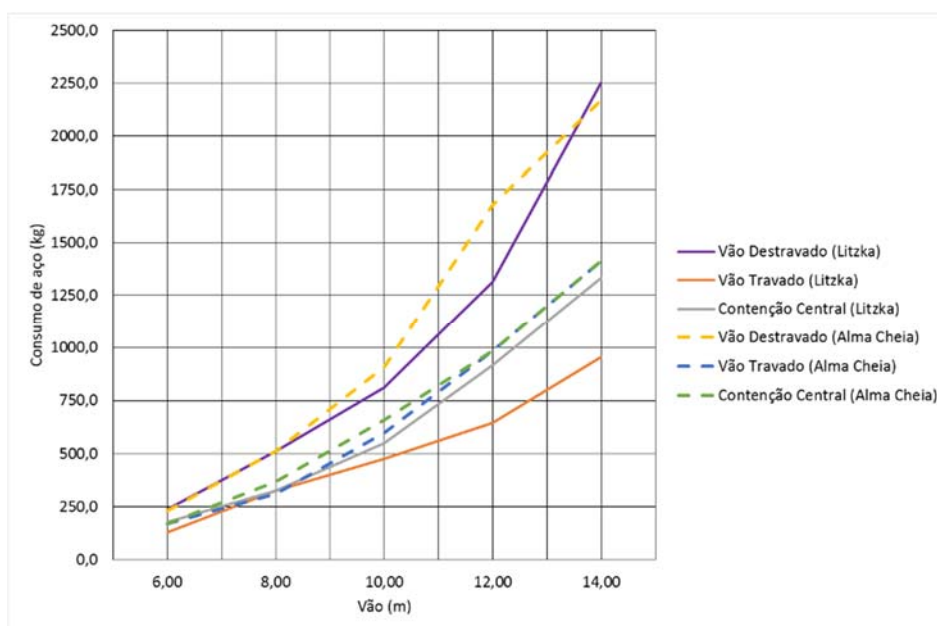
#### 7.1.2.4 Comparativo entre as diferentes contenções laterais

A partir das análises comparativas realizadas para os diferentes vãos propostos, efetuou-se a avaliação do comportamento no consumo de aço para as três contenções laterais utilizadas no trabalho.



Inicialmente, avaliou-se o comportamento para carregamento baixo, de modo que pudesse ser averiguada a diferença que haveria no consumo de aço. Para tanto, utilizou-se os pesos de aço encontrados no espaçamento entre vigas de 2,0 m, gerando a figura 24. Nesta ilustração, são retratadas as diferenças no consumo de aço, em função das condições distintas de contenção lateral para os vãos adotados na etapa comparativa de consumo de aço.

Figura 24 – Comparativo do consumo de aço para diferentes contenções laterais para espaçamento entre vigas de 2,0m



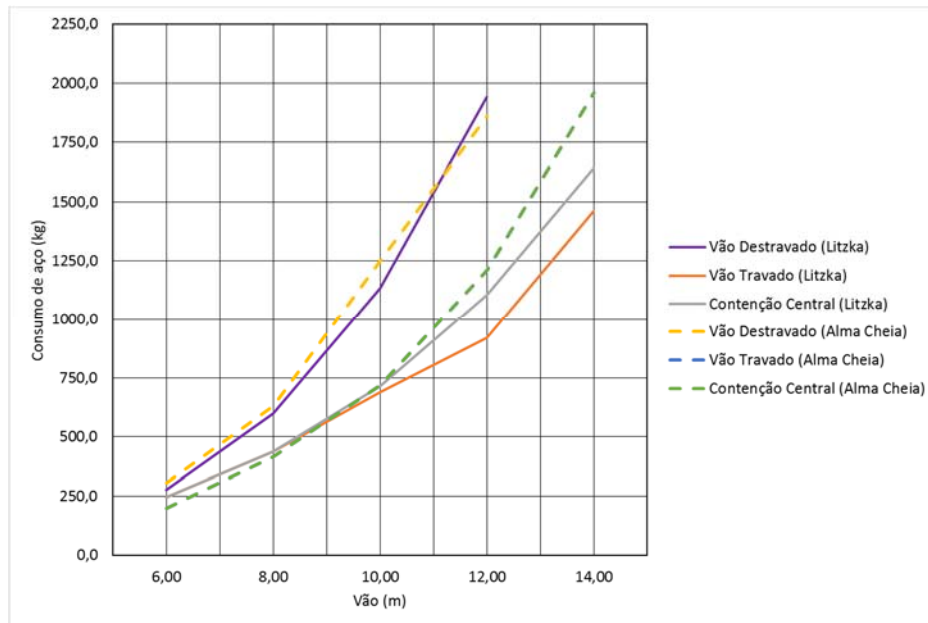
(fonte: elaborada pelo autor)

Notou-se que a adoção entre um tipo de contenção lateral e outro tem uma influência direta no consumo de aço. As variações chegam a ser de 58% no consumo de aço vigas alveolares e de 41% para as de alma cheia, quando opta-se por utilizar um vão completamente destravado e outro sem a possibilidade de deslocamento lateral. Outro ponto de destaque, é que um vão completamente travado gera uma economia de até 30%, em relação ao vão com contenção central para as vigas alveolares. Já para as de alma cheia, essa economia mostra-se um pouco inferior, reduz-se até 16% do peso de aço utilizado.

Com o aumento dos carregamentos, há diferenças no consumo de aço para as diferentes contenções laterais. Estas começam a apresentar um comportamento diferente ao observado para os carregamentos mais baixos, principalmente entre o vão com contenção central e o vão completamente travado. Comparando-se o vão destravado com o vão travado ao longo de toda a viga, tem-se um comportamento similar ao apresentado para  $dv = 2,0$  m.

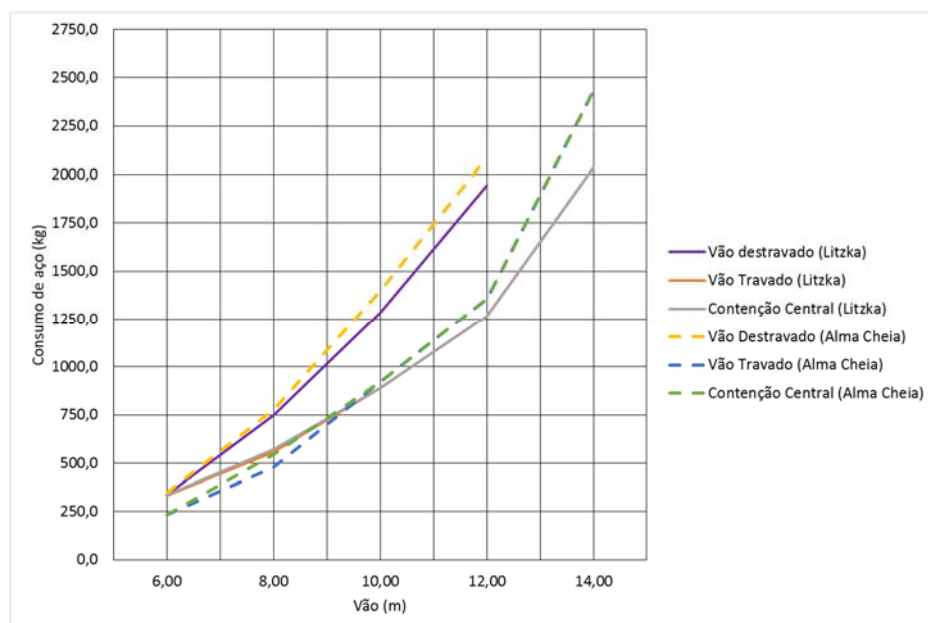
Na avaliação do consumo de aço para vão com contenção lateral e vão completamente travado para carregamentos maiores, tais como o com espaçamento entre vigas de 4,0 m, não houve diferenças significativas para o peso de aço utilizado. Nas figuras 25 e 26, tem-se os gráficos que apontam o comportamento observado nessas condições.

Figura 25 – Comparativo do consumo de aço para diferentes contenções laterais para espaçamento entre vigas de 3,0m



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 26 – Comparativo do consumo de aço para diferentes contenções laterais para espaçamento entre vigas de 4,0m



(fonte: elaborada pelo autor)

## 7.2 DESEMPENHO ESTRUTURAL

Na avaliação das modificações que ocorrem quando as vigas metálicas de alma cheia passam a ser alveolares, fez-se uma análise de forma individual dos parâmetros chave na determinação dos perfis a serem utilizados nas vigas. Essa avaliação tem como objetivo explorar o desempenho das vigas frente aos esforços de plastificação da seção transversal, FLT e corte, assim como avaliar a resposta no deslocamento (flecha) em determinadas condições.

Cabe salientar que para esta comparação, as vigas alveolares utilizadas foram somente do tipo Litzka, utilizando os seguintes perfis:

- a) W 150 x 13,0;
- b) W 200 x 15,0;
- c) W 310 x 21,0;
- d) W 410 x 38,8;
- e) W 530 x 66,0;
- f) W 610 x 101,0.

### 7.2.1 Momento fletor

Neste item, analisou-se a plastificação da seção transversal de ambas as vigas, assim como o modo de colapso por flambagem lateral com torção, buscando avaliar as diferenças no desempenho estrutural de ambas as vigas frente às solicitações derivadas de momento fletor.

#### 7.2.1.1 Plastificação da seção transversal

Neste item, é discutido o desempenho de ambas as vigas quanto à plastificação da seção transversal. Primeiramente, são expostas as considerações iniciais adotadas na análise, e posteriormente, são discutidos os resultados frutos da análise. No Apêndice E, são apresentados os resultados frutos da análise.

##### 7.2.1.1.1 Considerações iniciais

Na análise do comportamento de ambas as vigas com relação à plastificação da seção transversal, verificou-se qual a carga máxima de cálculo que as vigas metálicas são capazes de resistir para diferentes vãos. Com isso, avaliou-se para qual extensão de vão uma viga é mais vantajosa do que a outra.

### 7.2.1.1.2 Considerações finais

Na análise do desempenho das vigas nesse modo de colapso, percebeu-se que para vãos menores, da ordem de  $L/d < 28$ , as vigas de alma cheia são mais recomendadas, visto que o comportamento desses elementos é menos afetado pelos esforços de corte existentes em vigas curtas. Quando a relação  $L/d > 28$ , as vigas casteladas do tipo Litzka têm um ganho em desempenho, e assim, estas passam a resistir a carregamentos maiores do que as vigas de alma cheia, dado que a flexão começa a atuar de forma mais intensa do que os efeitos derivados de corte.

O comportamento apresentado na análise de desempenho estrutural pode ser entendido da seguinte maneira: quando a relação vão x altura do perfil é muito pequena, os fenômenos derivados do esforço cortante são muito maiores do que os oriundos da flexão. Como a avaliação do cortante na plastificação da seção de uma viga alveolar depende da determinação da seção crítica, esta se encontra próxima ao apoio que, por ventura, apresenta valores de cortante muito elevados.

Além do valor do esforço cortante ser alto próximo aos apoios, tem-se que o mesmo ainda é multiplicado pelo coeficiente “c”, que transforma esse esforço em um momento que atua na seção crítica, e que por fim, é fundamental na determinação da carga máxima que a viga Litzka é capaz de suportar. Com isso, as vigas de alma cheia apresentam significativa vantagem para vãos menores, já que estas não são sensíveis ao fenômeno do corte como vigas alveolares.

Os vãos de maior extensão apresentam cortantes baixos e momentos fletores com valores mais altos na seção crítica, e essa condição é benéfica para as vigas alveolares. Com vãos grandes, a seção crítica fica mais próxima do meio do vão, assim os fenômenos derivados do corte são menos decisivos na determinação da resistência da viga alveolar, sendo o momento fletor o fator chave na determinação da carga máxima que pode atuar na mesma. Desta maneira, as vigas Litzka começam a apresentar vantagens frente às vigas de alma cheia, porém para que isso aconteça, os vãos devem ser longos, possuindo relação  $L/d > 28$ , de forma geral.

Conclui-se então, que para o fenômeno de plastificação da seção transversal, o vão é um fator determinante na escolha do tipo de viga, pois dependendo da extensão deste, uma viga é muito mais resistente do que a outra. Portanto, quando pretende-se resistir a cargas muito grandes para pequenos vãos, recomenda-se o uso de vigas de alma cheia. Já para vãos extensos, é indicado o uso de vigas alveolares, visto o seu maior desempenho nessa condição.

### 7.2.1.2 Flambagem lateral com torção

Buscou-se avaliar neste item, qual a magnitude do impacto na resistência à flambagem lateral com torção que a viga sofre quando esta passa a ser alveolar, isto é, quando inicialmente a mesma era um perfil comum em alma cheia, e posteriormente torna-se alveolar.

#### 7.2.1.2.1 Considerações iniciais

Na avaliação das diferenças na FLT entre as vigas de alma cheia e alveolares do tipo Litzka, fez-se uso de diferentes comprimentos destravados, ou seja, avaliou-se, para os diferentes estágios de esbeltez, as resistências apresentadas por ambas as vigas. Tomou-se  $C_b = 1,0$  para avaliar a resistência das vigas frente à FLT.

Os resultados apresentados para vãos destravados menores do que  $L_r$ , são válidos apenas para atuação de momento fletor constante ao longo das vigas, isto em função da imprecisão apresentada pelo método de dimensionamento das vigas alveolares, conforme mencionou-se no item 6.5.3. Optando-se assim, para pequenos comprimentos destravados, observar somente o comportamento das vigas sob atuação de momento fletor constante. Para comprimentos destravados maiores, nos quais  $L > L_r$ , os resultados da análise são válidos também para carga uniformemente distribuída na viga.

#### 7.2.1.2.2 Considerações finais

Notou-se um ganho na capacidade resistente da viga alveolar, fruto da resistência a plastificação da seção transversal, pois estas vigas apresentam um elevado ganho nesse modo de colapso, em função do afastamento entre mesa comprimida e tracionada do perfil.

Quanto ao ganho da resistência a FLT, tem-se que a viga Litzka possui um desempenho superior, da ordem de 28%, para  $L < L_p$  e  $L_p < L < L_r$ , quando a viga está sujeita apenas a atuação de momento fletor constante. Para comprimentos maiores, em que ocorre apenas flambagem local,  $L > L_r$ , o desempenho da viga alveolar é 23% superior ao de alma cheia. Os resultados da análise para os diferentes estágios de esbeltez seguem no quadro 8.

Em vãos destravados muito longos,  $L \gg L_r$ , ambos perfis começam a demonstrar praticamente a mesma resistência, como é apresentado no quadro 9. Contudo, deve-se evitar vãos destravados muito longos, pois nesses casos, o principal critério de dimensionamento da viga torna-se o momento fletor causador de FLT, culminando no uso de bitolas de maior peso linear, para que

assim sejam atendidas as solicitações. Perdendo-se assim, a eficiência no uso do aço, juntamente com o desempenho estrutural do perfil, visto que este apresenta uma resistência muito superior em relação às solicitações para outros modos de colapso.

Quadro 8 – Comparativo para a FLT entre vigas alveolares e de alma cheia

Perfil	L < L <sub>p</sub>	Alma Cheia	Litzka	ΔMRd
	(cm)	MRd (kN.cm)	MRd (kN.cm)	(%)
W 150 x 13,0	85,0	3023,5	3957,4	31%
W 200 x 15,0	85,0	4638,7	5994,6	29%
W 310 x 21,0	85,0	9047,9	11537,7	28%
W 410 x 38,8	85,0	23108,7	29541,7	28%
W 530 x 66,0	85,0	48864,5	61943,8	27%
W 610 x 101,0	85,0	91666,5	117644,2	28%
Perfil	L <sub>r</sub> > L > L <sub>p</sub>	Alma Cheia	Litzka	ΔMRd
	(cm)	MRd (kN.cm)	MRd (kN.cm)	(%)
W 150 x 13,0	150,0	2704,2	3464,7	28%
W 200 x 15,0	150,0	4018,1	5173,9	29%
W 310 x 21,0	150,0	7494,9	9640,8	29%
W 410 x 38,8	150,0	21882,2	28855,2	32%
W 530 x 66,0	250,0	40230,8	51962,0	29%
W 610 x 101,0	400,0	72753,0	93309,1	28%
Perfil	L <sub>r</sub> < L	Alma Cheia	Litzka	ΔMRd
	(cm)	MRd (kN.cm)	MRd (kN.cm)	(%)
W 150 x 13,0	300,0	1825,1	2060,5	13%
W 200 x 15,0	350,0	1834,0	2139,2	17%
W 310 x 21,0	350,0	2798,8	3508,9	25%
W 410 x 38,8	500,0	7457,3	9439,2	27%
W 530 x 66,0	600,0	14631,6	18452,7	26%
W 610 x 101,0	750,0	36089,8	46420,8	29%

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 9 – Resistência a FLT para vãos destravados muito grandes

Perfil	L <sub>r</sub> << L	Alma Cheia	Litzka	ΔMRd
	(cm)	MRd (kN.cm)	MRd (kN.cm)	(%)
W 150 x 13,0	450,0	1069,5	1055,8	-1%
W 200 x 15,0	550,0	996,1	1004,0	1%
W 310 x 21,0	700,0	1051,5	1063,4	1%
W 410 x 38,8	1100,0	2502,6	2547,9	2%
W 530 x 66,0	1400,0	4620,8	4640,4	0%
W 610 x 101,0	2000,0	9528,5	9582,8	1%

(fonte: elaborado pelo autor)

Para vigas alveolares curtas, na faixa de L<sub>p</sub>, submetidas a carregamentos uniformemente distribuídos, tem-se que os fenômenos de corte aliados aos de FLT são responsáveis por reduzir de forma significativa a resistência do elemento. Contudo, tem-se que vigas alveolares curtas

são pouco utilizadas na prática, visto que estas são mais eficientes para vãos longos, como verificou-se no item 7.2.1.1. Conclui-se assim, que para vãos destravados pequenos, em que há a possibilidade de FLT, o uso de vigas em alma cheia é mais eficiente.

## 7.2.2 Esforço cortante

Neste item avaliou-se os mecanismos responsáveis pelo colapso do montante de alma. Abaixo seguem as considerações a respeito da comparação da resistência ao esforço cortante para vigas do tipo Litzka e de alma cheia.

### 7.2.2.1 Considerações iniciais

Neste modo de colapso, analisou-se as diferenças na resistência ao esforço cortante entre vigas Litzka e de alma cheia. Avaliou-se as três formas provocadoras de colapso por efeito cortante para as vigas alveolares, já para as vigas de alma cheia, seguiu-se o procedimento descrito no item 5.3.2.

### 7.2.2.2 Considerações finais

Para os diferentes perfis analisados, verificou-se que há uma redução significativa na resistência de uma viga alveolar para o esforço de corte. A redução experimentada pelas vigas é da ordem de 75%, quando comparada com uma viga de alma cheia de mesmo perfil. A tabela 3 ilustra o comparativo realizado para a determinação do impacto na capacidade da viga de resistir ao esforço cortante ao tornar-se alveolar.

Tabela 3 – Comparativo entre o esforço cortante resistente das vigas metálicas

Perfil	Alma Cheia (kN)	Litzka			$\Delta VRd$ (%)
		Cisalhamento (kN)	Flexão (kN)	Flambagem (kN)	
W150x13,0	119,8	32,9	72,3	68,8	-73%
W200x15,0	161,8	44,2	97,3	65,7	-73%
W310x21,0	290,8	78,3	172,3	74,1	-75%
W410x38,8	480,5	130,6	287,3	110,3	-77%
W530x66,0	879,3	237,2	521,9	226,8	-74%
W610x101,0	1191,5	324,6	714,1	321,7	-73%

(fonte: elaborado pelo autor)

Com a tabela 3, é possível notar que para os perfis alveolares com menor altura, o principal mecanismo responsável pela ruína da viga por esforço de corte é o escoamento do montante de alma por cisalhamento. Já para os perfis de maior altura, o modo de colapso que passa a atuar de maneira mais intensa na viga é a flambagem do montante de alma, em função da maior esbelteza apresentada. De maneira geral, percebe-se que a flexão do montante de alma é o modo de colapso que menos influencia na resistência da viga alveolar.

Cabe salientar, que ao longo do desenvolvimento das análises de consumo de aço e de desempenho estrutural dos perfis Litzka, notou-se que o esforço cortante não foi um parâmetro que afetou na determinação dos perfis para os diferentes vãos e carregamentos propostos nas análises. Para todos os dimensionamentos realizados no trabalho, os perfis possuíam a resistência necessária para evitar o colapso no montante de alma na viga.

Caso as vigas alveolares fiquem sujeitas a cargas concentradas com valores altos, o uso deste tipo de elemento fica restrito, visto que, observou-se que a resistência frente às solicitações para as vigas biapoiadas apresentaram valores mais próximos do que nas vigas em alma cheia. Portanto, para um projeto que contenha cargas concentradas com alta magnitude, o uso de vigas alveolares não se mostra adequado. A utilização de vigas alveolares se mostra mais atraente quando o tipo de carregamento é distribuído ao longo de todo o elemento e com valores baixos de esforço cortante.

### **7.2.3 Deslocamento**

Neste item, tratar-se-á das relações existentes entre os deslocamentos experimentados pelas vigas metálicas, sejam estas vigas de alma cheia ou alveolares do tipo Litzka. Inicialmente, são apresentadas as condições para as quais se avaliou a flecha para ambos os tipos de vigas, e posteriormente é discutido o comportamento das mesmas no quesito deslocamento.

#### **7.2.3.1 Considerações iniciais**

No que tange à comparação dos deslocamentos experimentados pelas vigas, utilizou-se como base de apoio para a análise, a condição de uma viga biapoiada sujeita a um carregamento uniformemente distribuído. Propôs-se dois vãos para cada altura de perfil, assim como dois valores para os carregamentos uniformemente distribuídos no estado limite de serviço, um deles sendo 15 kN/m e o outro 20 kN/m.



### 7.2.3.2 Considerações finais

Após realizar a comparação quanto às flechas apresentadas por vigas típicas em alma cheia e de vigas alveolares, verificou-se que a redução do deslocamento experimentada pelas vigas Litzka é um fator determinante na escolha de um perfil metálico. Na investigação realizada para comparar essa característica da viga, viu-se que em média, um elemento do tipo alveolar apresenta metade da flecha que uma viga típica em alma cheia que lhe deu origem.

Conclui-se que quando um dos critérios para a determinação do perfil de uma viga é o deslocamento máximo admissível, a viga alveolar apresenta vantagens em relação à sua progenitora, como pode ser visto na tabela 4.

Nesta análise, viu-se que as vigas alveolares, em geral, conseguiram atender o limite estabelecido para o deslocamento máximo em vigas de piso ( $L/350$ ), para ambos os vãos propostos, mostrando um alto desempenho na condição de serviço. Ao passo em que todas as vigas em alma cheia não conseguiram atender o limite estabelecido na norma.

Tabela 4 – Comparativo de deformação para vigas alveolares e de alma

Qser (kN/m)	Perfil	Vão (cm)	Limitação L/350	Alma Cheia flecha (cm)	Condição	Litzka flecha (cm)	Condição	$\Delta f$ (%)	
15	W 150 x 13,0	200	0,57	0,25	OK	0,15	OK	62%	
		300	0,86	1,25	NÃO OK	0,62	OK	50%	
	W 200 x 15,0	300	0,86	0,61	OK	0,33	OK	55%	
		400	1,14	1,92	NÃO OK	0,93	OK	49%	
	W 310 x 21,0	400	1,14	0,66	OK	0,35	OK	52%	
		500	1,43	1,62	NÃO OK	0,77	OK	48%	
	W 410 x 38,8	600	1,71	0,99	OK	0,51	OK	52%	
		700	2,00	1,84	OK	0,89	OK	49%	
	W 530 x 66,0	900	2,57	1,83	OK	0,87	OK	47%	
		1000	2,86	2,79	OK	1,28	OK	46%	
	W 610 x 101,0	1100	3,14	1,86	OK	0,90	OK	49%	
		1200	3,43	2,63	OK	1,24	OK	47%	
	20	W 150 x 13,0	200	0,57	0,33	OK	0,20	OK	62%
			300	0,86	1,66	NÃO OK	0,83	OK	50%
		W 200 x 15,0	300	0,86	0,81	OK	0,44	OK	55%
			400	1,14	2,55	NÃO OK	1,24	NÃO OK	49%
W 310 x 21,0		400	1,14	0,88	OK	0,46	OK	52%	
		500	1,43	2,16	NÃO OK	1,03	OK	48%	
W 410 x 38,8		600	1,71	1,32	OK	0,68	OK	52%	
		700	2,00	2,45	NÃO OK	1,19	OK	49%	
W 530 x 66,0		900	2,57	2,44	OK	1,15	OK	47%	
		1000	2,86	3,72	NÃO OK	1,70	OK	46%	
W 610 x 101,0		1100	3,14	2,48	OK	1,20	OK	49%	
		1200	3,43	3,51	NÃO OK	1,66	OK	47%	

(fonte: elaborada pelo autor)

Portanto, quando às solicitações experimentadas pelas vigas são baixas e respeitam as resistências máximas nos diversos modos de colapso, tem-se que o principal critério para a determinação da bitola a ser utilizada na viga é a altura, cujo valor seja capaz de propiciar uma inércia adequada e que respeite a limitação do deslocamento máximo admissível. Como uma viga alveolar apresenta uma altura maior frente ao seu perfil progenitor, pode-se utilizar perfis originários mais leves e de menor altura para que ao final, a flecha máxima seja atendida. Tendo assim, um ganho em altura similar aos perfis em alma cheia de peso linear maior, e uma diminuição significativa do peso de aço necessário para vencer o vão, como foi visto na análise de consumo de aço para vão totalmente travado.

## 8 CONCLUSÕES

Com as análises realizadas foi possível identificar um potencial de uso para as vigas alveolares do tipo Litzka na Engenharia Civil, pois viu-se nos resultados que as mesmas são capazes de propiciar alta economia em aço em determinadas situações, principalmente para carregamentos com valores mais baixos, com vãos variando de média a altas extensões.

No caso de vãos curtos e cargas baixas, as vigas alveolares que utilizam perfis de menor altura e que possuem capacidade de resistir aos esforços oriundos da formação de mecanismo plástico, possibilitam uma alta economia de aço. Para os vãos maiores, tem-se que o principal critério para determinar a bitola da viga é o deslocamento máximo permitido por normas técnicas, e nesse caso, as vigas alveolares possuem uma menor sensibilidade aos deslocamentos do que as vigas de alma cheia, resultando assim, na escolha de perfis com menor peso linear. As vigas Litzka ainda propiciam a utilização de vãos destravados maiores em geral, e em muitos casos, utiliza-se perfis mais leves do que os necessários para as vigas de alma cheia.

Os fenômenos de corte nas vigas alveolares devem ser estudados com cautela, pois ao longo do trabalho viu-se que a redução na resistência desses elementos é muito grande quando comparada com a de vigas de alma cheia. Assim, o estudo da possibilidade de utilização de vigas alveolares de qualquer padrão, deve ficar atento à presença de cargas pontuais. Portanto, em situações que apresentam cargas concentradas muito elevadas, a melhor opção é a de utilização de vigas em alma cheia.

Ao passo em que se aumentam os carregamentos nas vigas, tem-se que para menores vãos, as vigas alveolares não apresentam vantagens, visto que os esforços cortantes são determinantes na escolha da seção a ser utilizada. Somente em vãos com comprimentos maiores é que novamente as vigas alveolares voltam apresentar vantagens, visto que o mecanismo de formação plástico passa a atuar de forma menos intensa, culminando no uso de perfis com menor peso linear do que as vigas em alma cheia.

Observou-se que os travamentos laterais podem influenciar de forma direta na redução do consumo de aço para ambas as vigas metálicas. Em alguns casos, chega-se a uma diferença na redução de aço da ordem de 50%, portanto, tem-se que avaliar de forma criteriosa as

contenções ao longo do sistema de vigamento de uma estrutura metálica. Mas da mesma forma que é proporcionada economia para alguns casos, também deve-se ficar atento, que para outros não há uma redução significativa que justifique o investimento em dispositivos que contenham a estrutura de vigamento, tais como foram os casos estudados para contenção central e vão totalmente travado para carregamentos mais altos.

Nas análises desenvolvidas neste trabalho, não se considerou a atuação conjunta da laje de concreto armado e viga metálica para resistir aos carregamentos atuantes. Todavia, tem-se que da mesma forma que a laje de concreto auxilia na diminuição do consumo de aço para as vigas mistas em alma cheia, ter-se-ia um comportamento similar para as vigas alveolares. De modo a fazer com que a formação de mecanismo plástico atuasse de forma menos intensa para vãos menores, visto o ganho em capacidade de carga gerado pela seção mista. Através do uso de vigas com seção mista, o consumo de aço diminuiria para patamares ainda menores do que os obtidos nas análises realizadas neste trabalho, assim, fica como sugestão para trabalho futuro, a comparação do desempenho de vigas mistas alveolares frente às mistas em alma cheia.

O uso de vigas alveolares apresenta o benefício de reduzir o consumo de aço para diversas situações como foi visto, contudo, deve-se ficar atento aos custos de produção destes elementos, que são muito maiores do que os de vigas em alma cheia convencionais. Apesar do maior custo, as vigas alveolares propiciam vantagens em termos de deslocamentos, em aspectos construtivos, tais como a passagem de tubulações, de modo a evitar possíveis reforços em perfis metálicos. E ainda tem-se que a leveza e o apelo estético que os perfis alveolares possuem, podem ser explorados por projetos arquitetônicos, levando a uma maior interação entre estrutura e arquitetura.

No Brasil, o uso de vigas alveolares ainda é pouco difundido, seja por motivos culturais ou por questões relacionadas ao custo destes elementos. Contudo, notou-se através das análises, que estes elementos são vantajosos quando utilizados de forma racional, como por exemplo, no alívio de cargas nas fundações, o custo evitado em reforços e o atendimento de deslocamentos mais rigorosos. Portanto, a escolha de um tipo de viga ou de outro, deve levar em consideração aspectos relacionados não somente ao custo, mas de caráter executivo, estético e estrutural, ponderando qual tipo de viga propicia a melhor relação custo/benefício para o projeto.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

\_\_\_\_\_. **NBR 8800**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

BELLEI, I. H. **Edifícios industriais em aço**: projeto e cálculo. 6. ed. rev. e ampl. São Paulo: Pini, 2010.

BEZERRA, E. M. **Determinação do momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas de aço casteladas**. 2011. 100 f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2011. Disponível em:  
<<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/PASA-8H5GN2/245.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 22 maio 2014

FERRARI, G. de A. **Simulação numérica do comportamento estrutural de vigas alveolares mistas de aço e concreto**. 2013. 125 f. Dissertação (Magister Scientiae) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2013. Disponível em:  
<[http://www.tede.ufv.br/tesesimplificado/tde\\_arquivos/42/TDE-2013-06-10T142441Z-4569/Publico/texto%20completo.pdf](http://www.tede.ufv.br/tesesimplificado/tde_arquivos/42/TDE-2013-06-10T142441Z-4569/Publico/texto%20completo.pdf)>. Acesso em: 23 maio 2014.

GRUNBAUER, J. **What are castellated beams?** Diemen, NL, [2014]. Disponível em:  
<<http://www.grunbauer.nl/eng/wat.htm>>. Acesso em: 22 maio 2014.

OLIVEIRA, L. B. de. **Procedimentos para definição das características geométricas de vigas alveolares de aço para sistemas de piso e de cobertura**. 2012. 135 f. Dissertação (Magister Scientiae) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2012. Disponível em:  
<[http://www.tede.ufv.br/tesesimplificado/tde\\_arquivos/42/TDE-2012-10-02T070314Z-3973/Publico/texto%20completo.pdf](http://www.tede.ufv.br/tesesimplificado/tde_arquivos/42/TDE-2012-10-02T070314Z-3973/Publico/texto%20completo.pdf)>. Acesso em: 06 abr. 2014.

PFEIL, W. M.; PFEIL, M. M. **Estruturas de aço**: dimensionamento prático segundo a NBR 8800:2008. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009 (reimpressão 2013).

PRAVIA, Z. M. C.; FICANHA, R.; FABEANE, R. **Projeto e cálculo de estruturas de aço**: edifício industrial detalhado. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

SILVEIRA, E. G. da. **Avaliação do comportamento de vigas alveolares de aço com ênfase nos modos de colapso por plastificação**. 2011. 156 f. Dissertação (Magister Scientiae) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2011. Disponível em:  
<[http://www.tede.ufv.br/tesesimplificado/tde\\_arquivos/42/TDE-2012-03-26T095142Z-3652/Publico/texto%20completo.pdf](http://www.tede.ufv.br/tesesimplificado/tde_arquivos/42/TDE-2012-03-26T095142Z-3652/Publico/texto%20completo.pdf)>. Acesso em: 29 mar. 2014.

SOUZA, A. S. C. de. **Dimensionamento de elementos estruturais em aço segundo a NBR8800:2008**. São Carlos: EdUFSCAR, 2013.

VERÍSSIMO, G. de S.; VIEIRA, W. B.; SILVEIRA, E. G. da; RIBEIRO, J. C. L.; PAES, J. L. R.; BEZERRA, E. M.; SILVA, A. L. R. de C. e. Estados limites aplicáveis às vigas alveolares de aço. **Revista da Estrutura de Aço**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 2, p. 126-144, ago. 2013. Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/revistacientifica/arquivos/rea-V.02.N.02.pdf>> Acesso em: 23 maio 2014.

## **APÊNDICE A – Análise do consumo de aço: vão destravado**

Tabela A1 – Consumo de aço para espaçamento entre vigas de 2,0 m

Vão (m)	Alma Cheia			Litzka			Consumo Redução/Ganho
	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	
6,0	W 310 x 38,7	232,20	FLT	W 250 x 38,5	239,74	FLT	3%
8,0	W 360 x 64,0	512,00	FLT	HP 250 x 62,0 (H)	509,21	PST	-1%
10,0	W 360 x 91,0 (H)	910,00	FLT	HP 310 x 79,0 (H)	810,46	FLT	-11%
12,0	W 610 x 140,0	1680,00	FLT	W 310 x 107,0 (H)	1312,82	PST	-22%
14,0	W 610 x 155,0	2170,00	FLT	W 610 x 155,0	2252,02	FLT	4%

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela A2 – Consumo de aço para espaçamento entre vigas de 2,5 m

Vão (m)	Alma Cheia			Litzka			Consumo Redução/Ganho
	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	
6,0	W 360 x 44,0	264,00	FLT	W 360 x 44,0	277,41	FLT / PST	5%
8,0	W 360 x 72,0	576,00	FLT	HP 250 x 62,0 (H)	509,21	PST	-12%
10,0	W 360 x 110,0 (H)	1100,00	FLT	W 360 x 91,0 (H)	937,82	PST	-15%
12,0	W 610 x 155,0	1860,00	FLT	HP 310 x 125,0 (H)	1533,78	FLT	-18%
14,0	W 610 x 174,0	2436,00	FLT	W 610 x 155,0	2252,02	FLT	-8%

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela A3 – Consumo de aço para espaçamento entre vigas de 3,0 m

Vão (m)	Alma Cheia			Litzka			Consumo Redução/Ganho
	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	
6,0	W 360 x 51,0	306,00	FLT	W 360 x 44,0	277,41	FLT / PST	-9%
8,0	W 360 x 79,0	632,00	FLT	W 360 x 72,0	597,83	PST	-5%
10,0	W 610 x 125,0	1250,00	FLT	W 360 x 110,0 (H)	1134,30	PST	-9%
12,0	W 610 x 155,0	1860,00	FLT	W 610 x 155,0	1942,02	FLT	4%
14,0	-	-	-	-	-	-	-

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela A4 – Consumo de aço para espaçamento entre vigas de 3,5 m

Vão (m)	Alma Cheia			Litzka			Consumo Redução/Ganho
	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	
6,0	W 310 x 52,0	312,00	FLT	W 410 x 53,0	336,50	PST	8%
8,0	W 460 x 89,0	712,00	FLT	W 530 x 82,0	693,50	FLT	-3%
10,0	W 610 x 140,0	1400,00	FLT	W 360 x 122,0 (H)	1258,36	PST	-10%
12,0	W 610 x 155,0	1860,00	FLT	W 610 x 155,0	1942,02	FLT	4%
14,0	-	-	-	-	-	-	-

(fonte: elaborada pelo autor)

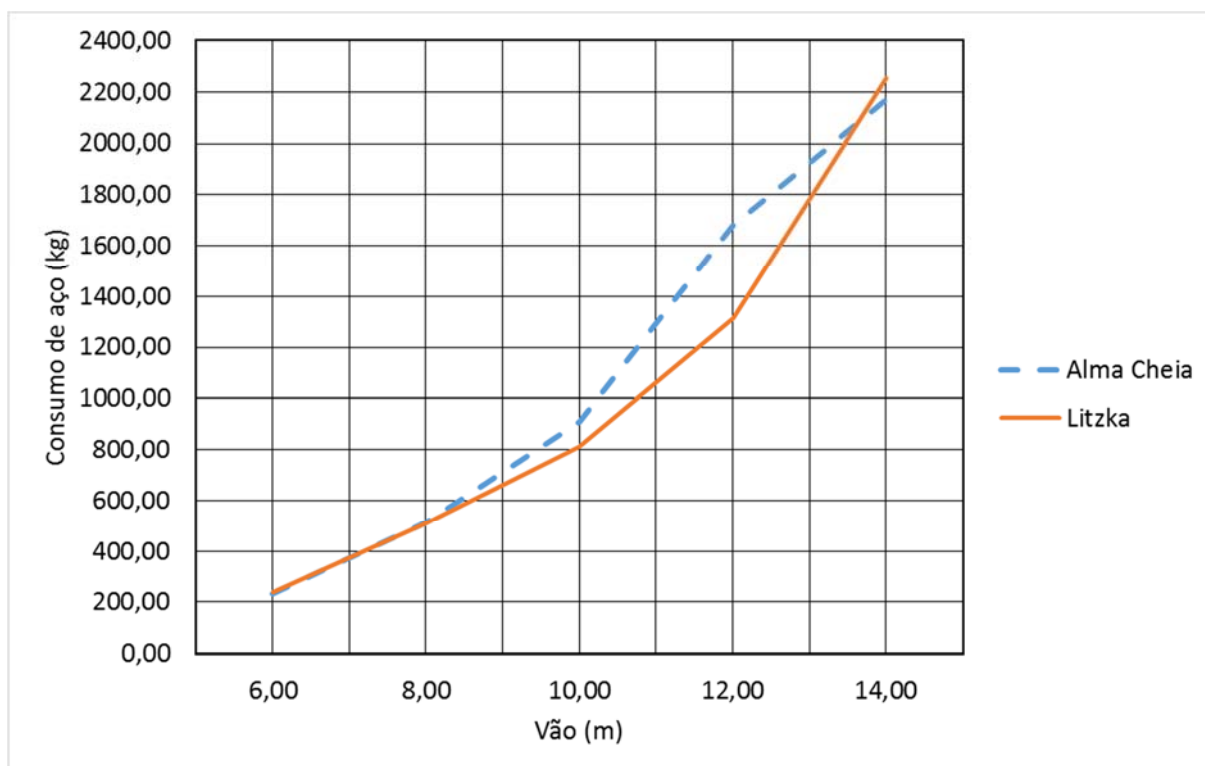
Tabela A5 – Consumo de aço para espaçamento entre vigas de 4,0 m

Vão (m)	Alma Cheia			Litzka			Consumo Redução/Ganho
	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	
6,0	W 360 x 57,8	346,80	FLT	W 410 x 53,0	336,50	PST	-3%
8,0	W 460 x 97,0	776,00	FLT	W 460 x 89,0	747,69	FLT	-4%
10,0	W 610 x 140,0	1400,00	FLT	HP 310 x 125,0 (H)	1283,78	PST	-8%
12,0	W 610 x 174,0	2088,00	FLT	W 610 x 155,0	1942,02	FLT	-7%
14,0	-	-	-	-	-	-	-

(fonte: elaborada pelo autor)

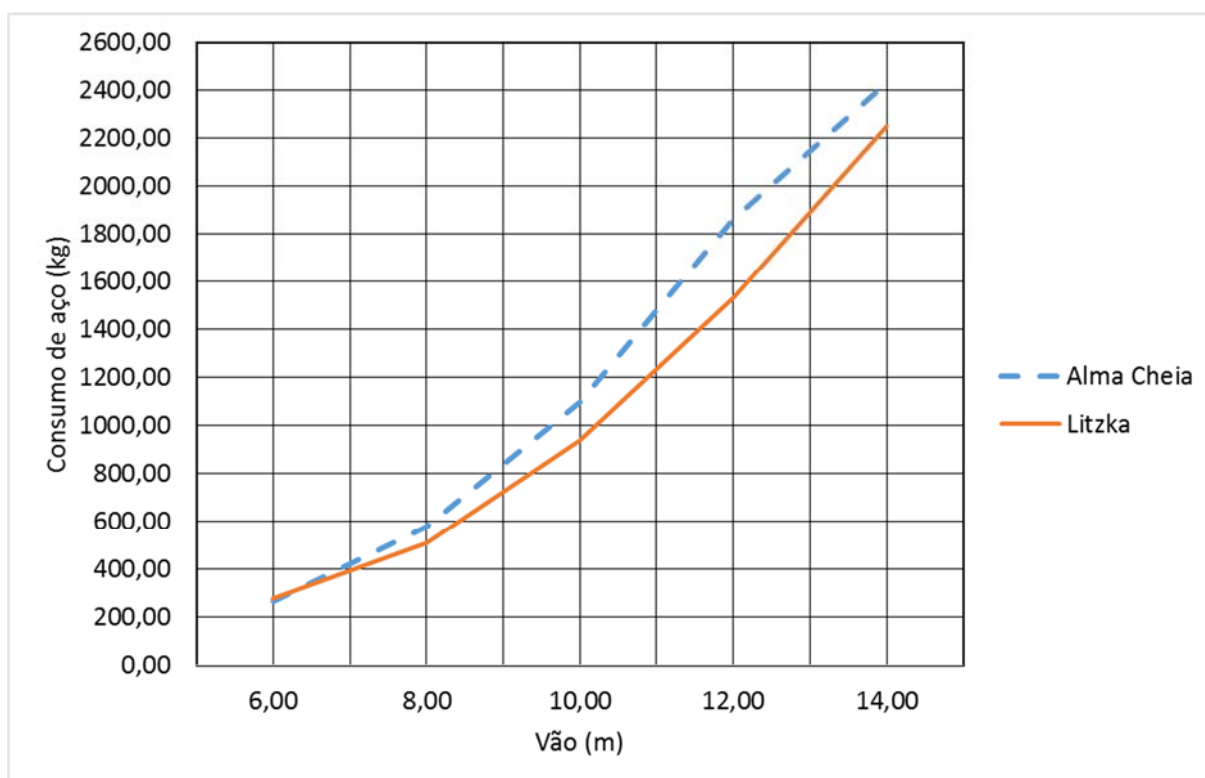


Figura A1 –Comparativo de consumo de aço para espaçamento entre vigas de 2,0 m



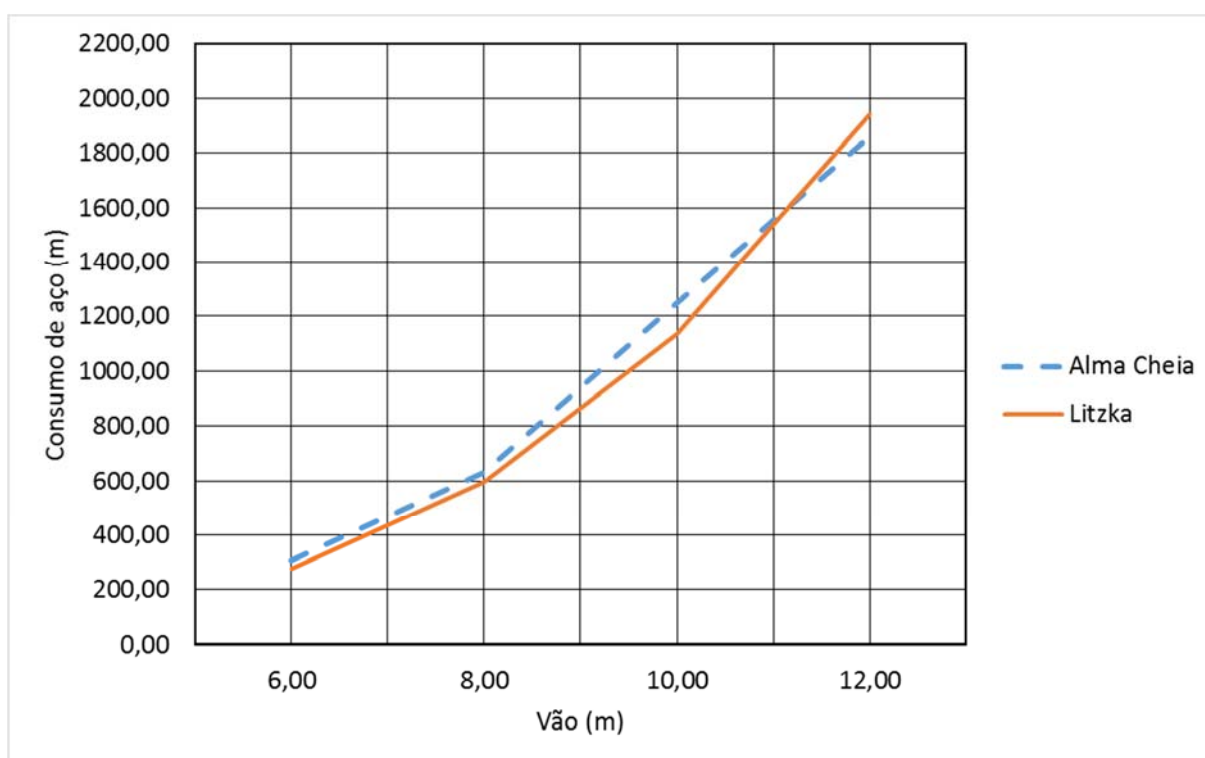
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A2 –Comparativo de consumo de aço para espaçamento entre vigas de 2,5 m



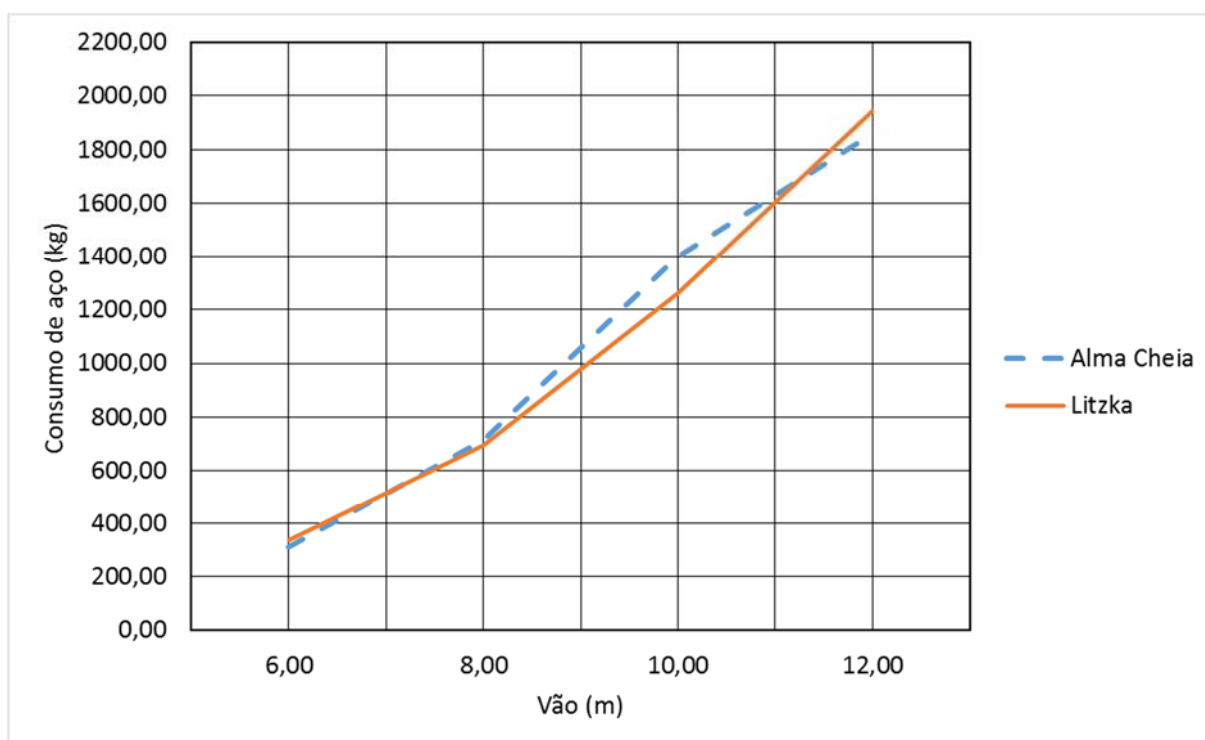
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A3 –Comparativo de consumo de aço para espaçamento entre vigas de 3,0 m



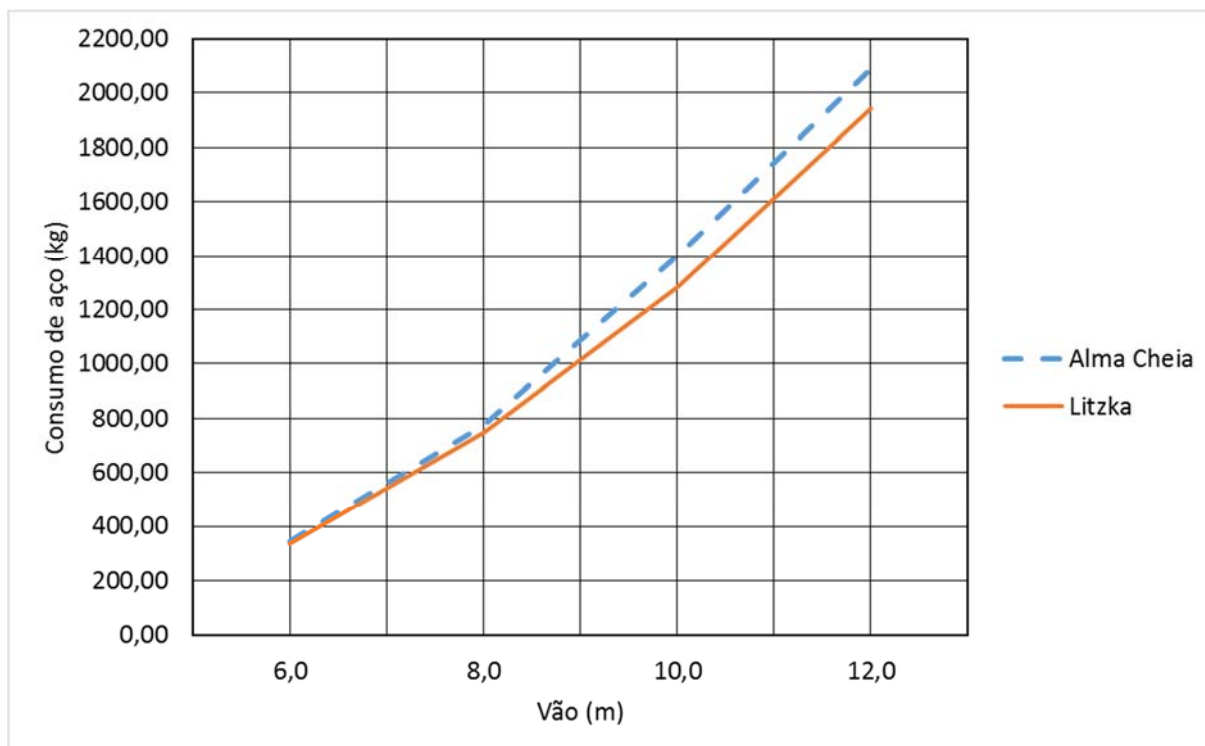
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A4 –Comparativo de consumo de aço para espaçamento entre vigas de 3,5 m



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A5 –Comparativo de consumo de aço para espaçamento entre vigas de 4,0 m



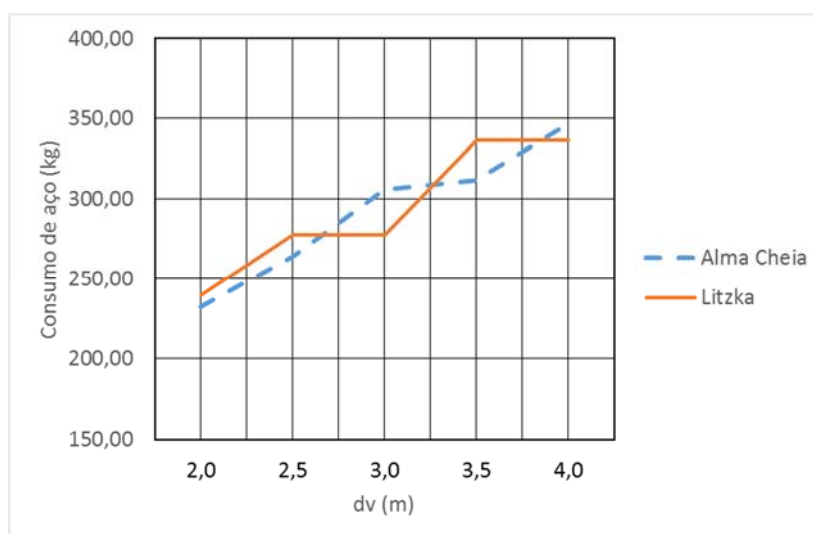
(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela A6 –Comparativo de consumo de aço para vão de 6,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas

dv (m)	Alma Cheia		Litzka	
	Perfil	Consumo (kg)	Perfil	Consumo (kg)
2,0	W 310 x 38,7	232,20	W 250 x 38,5	239,74
2,5	W 360 x 44,0	264,00	W 360 x 44,0	277,41
3,0	W 360 x 51,0	306,00	W 360 x 44,0	277,41
3,5	W 310 x 52,0	312,00	W 410 x 53,0	336,50
4,0	W 360 x 57,8	346,80	W 410 x 53,0	336,50

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A6 –Comparativo de consumo de aço para vão de 6,0 m e diferentes carregamentos



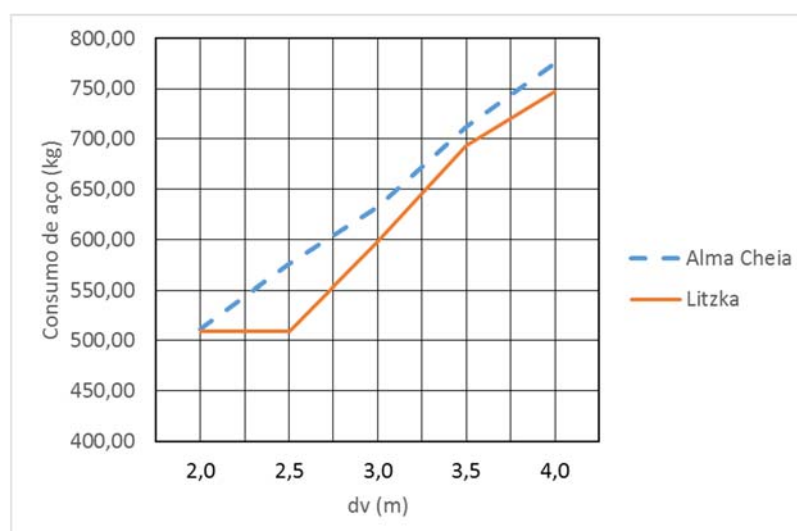
(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela A7 –Comparativo de consumo de aço para vão de 8,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas

dv (m)	Alma Cheia		Litzka	
	Perfil	Consumo (kg)	Perfil	Consumo (kg)
2,0	W 360 x 64,0	512,00	HP 250 x 62,0 (H)	509,21
2,5	W 360 x 72,0	576,00	HP 250 x 62,0 (H)	509,21
3,0	W 360 x 79,0	632,00	W 360 x 72,0	597,83
3,5	W 460 x 89,0	712,00	W 530 x 82,0	693,50
4,0	W 460 x 97,0	776,00	W 460 x 89,0	747,69

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A7 –Comparativo de consumo de aço para vão de 8,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas



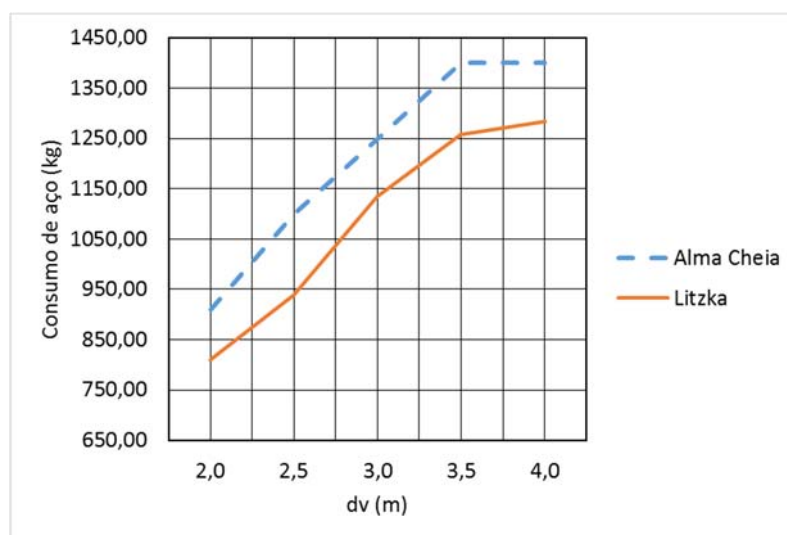
(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela A8 –Comparativo de consumo de aço para vão de 10,0 m e diferentes carregamentos

dv (m)	Alma Cheia		Litzka	
	Perfil	Consumo (kg)	Perfil	Consumo (kg)
2,0	W 360 x 91,0 (H)	910,00	HP 310 x 79,0 (H)	810,46
2,5	W 360 x 110,0 (H)	1100,00	W 360 x 91,0 (H)	937,82
3,0	W 610 x 125,0	1250,00	W 360 x 110,0 (H)	1134,30
3,5	W 610 x 140,0	1400,00	W 360 x 122,0 (H)	1258,36
4,0	W 610 x 140,0	1400,00	HP 310 x 125,0 (H)	1283,78

(fonte: elaborada pela autor)

Figura A8 –Comparativo de consumo de aço para vão de 10,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas



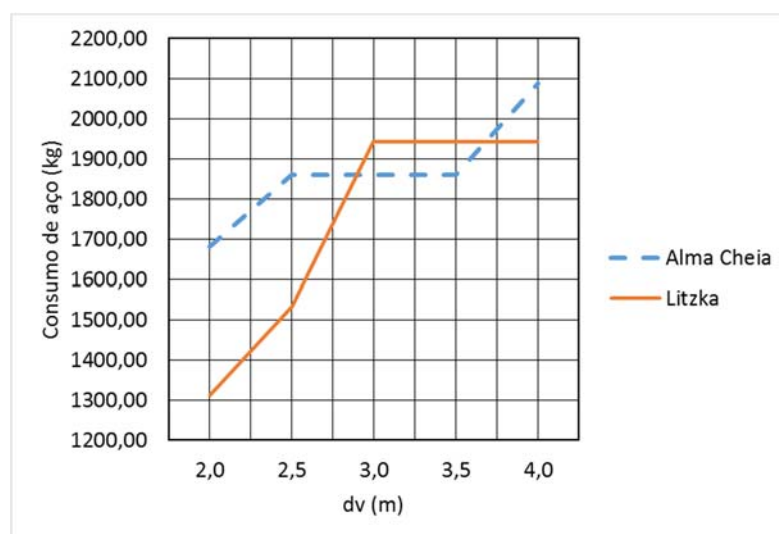
(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela A9 –Comparativo de consumo de aço para vão de 12,0m e diferentes espaçamentos entre vigas

dv (m)	Alma Cheia		Litzka	
	Perfil	Consumo (kg)	Perfil	Consumo (kg)
2,0	W 610 x 140,0	1680,00	W 310 x 107,0 (H)	1312,82
2,5	W 610 x 155,0	1860,00	HP 310 x 125,0 (H)	1533,78
3,0	W 610 x 155,0	1860,00	W 610 x 155,0	1942,02
3,5	W 610 x 155,0	1860,00	W 610 x 155,0	1942,02
4,0	W 610 x 174,0	2088,00	W 610 x 155,0	1942,02

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A9 –Comparativo de consumo de aço para vão de 12,0m e diferentes espaçamentos entre vigas



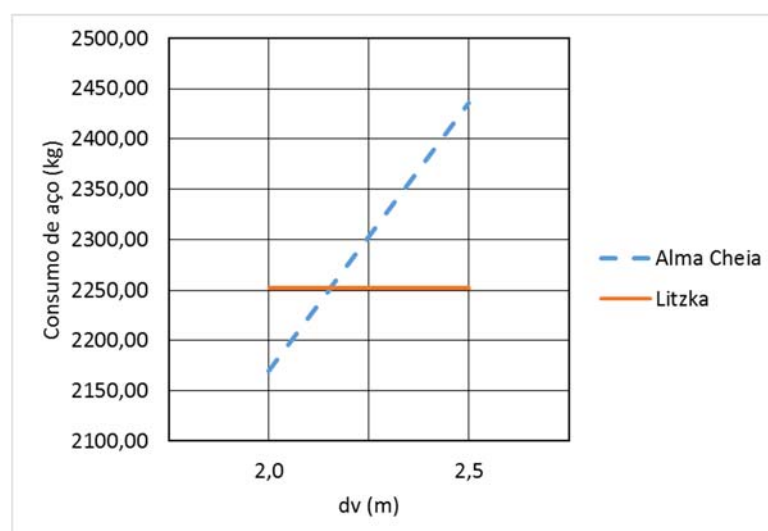
(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela A10 –Comparativo de consumo de aço para vão de 14,0m e diferentes carregamentos

dv (m)	Alma Cheia		Litzka	
	Perfil	Consumo (kg)	Perfil	Consumo (kg)
2,0	W 610 x 155,0	2170,00	W 610 x 155,0	2252,02
2,5	W 610 x 174,0	2436,00	W 610 x 155,0	2252,02
3,0	-	-	-	-
3,5	-	-	-	-
4,0	-	-	-	-

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura A10 –Comparativo de consumo de aço para vão de 14,0m e diferentes carregamentos



(fonte: elaborada pelo autor)

## **APÊNDICE B – Análise do consumo de aço: vão com contenção central**

Tabela B1 – Consumo de aço para espaçamento de 2,0 m entre vigas

Vão (m)	Alma Cheia			Litzka			Consumo Redução/Ganho
	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	
6,0	W 310 x 28,3	169,80	FLT	W 250 x 28,4	176,80	PST	4%
8,0	W 410 x 46,1	368,80	DE	W 360 x 39,0	323,92	FLT	-12%
10,0	W 530 x 66,0	660,00	FLT	W 410 x 53,0	548,50	PST	-17%
12,0	W 530 x 82,0	984,00	DE	W 460 x 74,0	917,29	FLT	-7%
14,0	W 610 x 101,0	1414,00	DE	W 530 x 92,0	1330,47	FLT	-6%

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela B2 – Consumo de aço para espaçamento de 2,5 m entre vigas

Vão (m)	Alma Cheia			Litzka			Consumo Redução/Ganho
	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	
6,0	W 310 x 32,7	196,20	DE	W 310 x 32,7	205,06	PST	5%
8,0	W 410 x 46,1	368,80	DE	W 410 x 46,1	384,89	PST	4%
10,0	W 530 x 72,0	720,00	DE	W 410 x 67,0	693,79	PST	-4%
12,0	W 530 x 92,0	1104,00	DE	W 410 x 85,0	1050,70	FLT	-5%
14,0	W 610 x 113,0	1582,00	DE	W 530 x 101,0	1460,97	FLT	-8%

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela B3 – Consumo de aço para espaçamento de 3,0 m entre vigas

Vão (m)	Alma Cheia			Litzka			Consumo Redução/Ganho
	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	
6,0	W 360 x 32,9	197,40	DE	W 410 x 38,8	246,21	PST	25%
8,0	W 460 x 52,0	416,00	FLT	W 460 x 52,0	436,27	PST	5%
10,0	W 530 x 72,0	720,00	DE	W 460 x 68,0	714,48	FLT	-1%
12,0	W 610 x 101,0	1212,00	DE	W 460 x 89,0	1103,69	PST	-9%
14,0	W 610 x 140,0	1960,00	DE	W 610 x 113,0	1641,50	FLT	-16%

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela B4 – Consumo de aço para espaçamento de 3,5 m entre vigas

Vão (m)	Alma Cheia			Litzka			Consumo Redução/Ganho
	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	
6,0	W 360 x 39,0	234,00	DE	W 410 x 46,1	292,69	PST	25%
8,0	W 460 x 60,0	480,00	DE	W 460 x 60,0	503,64	PST	5%
10,0	W 530 x 82,0	820,00	DE	W 530 x 72,0	752,68	PST	-8%
12,0	W 610 x 101,0	1212,00	DE	W 530 x 92,0	1146,47	PST	-5%
14,0	W 610 x 155,0	2170,00	DE	W 610 x 113,0	1641,50	FLT	-24%

(fonte: elaborada pelo autor)

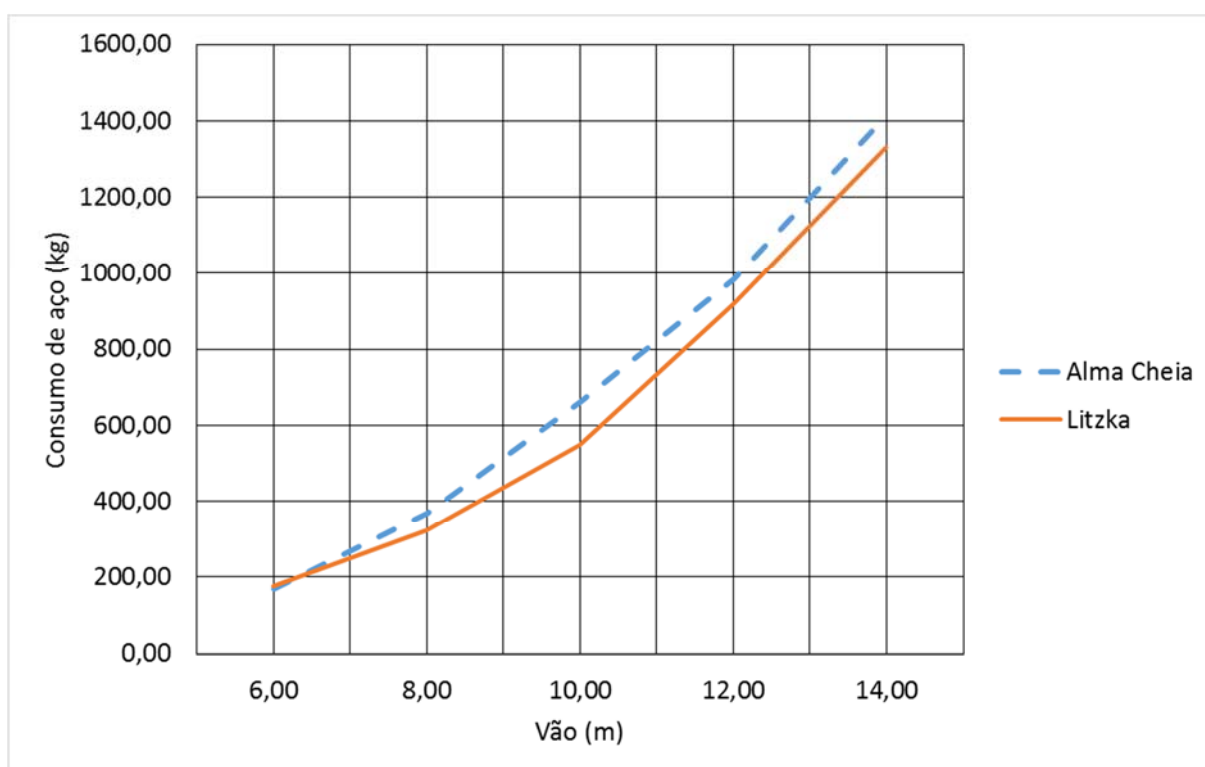
Tabela B5 – Consumo de aço para espaçamento de 4,0 m entre vigas

Vão (m)	Alma Cheia			Litzka			Consumo Redução/Ganho
	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	
6,0	W 360 x 39,0	234,00	DE	W 410 x 53,0	336,50	PST	44%
8,0	W 460 x 68,0	544,00	DE	W 460 x 68,0	571,03	PST	5%
10,0	W 530 x 92,0	920,00	DE	W 530 x 85,0	889,39	PST	-3%
12,0	W 610 x 113,0	1356,00	DE	W 610 x 101,0	1264,75	PST	-7%
14,0	W 610 x 174,0	2436,00	DE	W 610 x 140,0	2034,81	PST	-16%

(fonte: elaborada pelo autor)

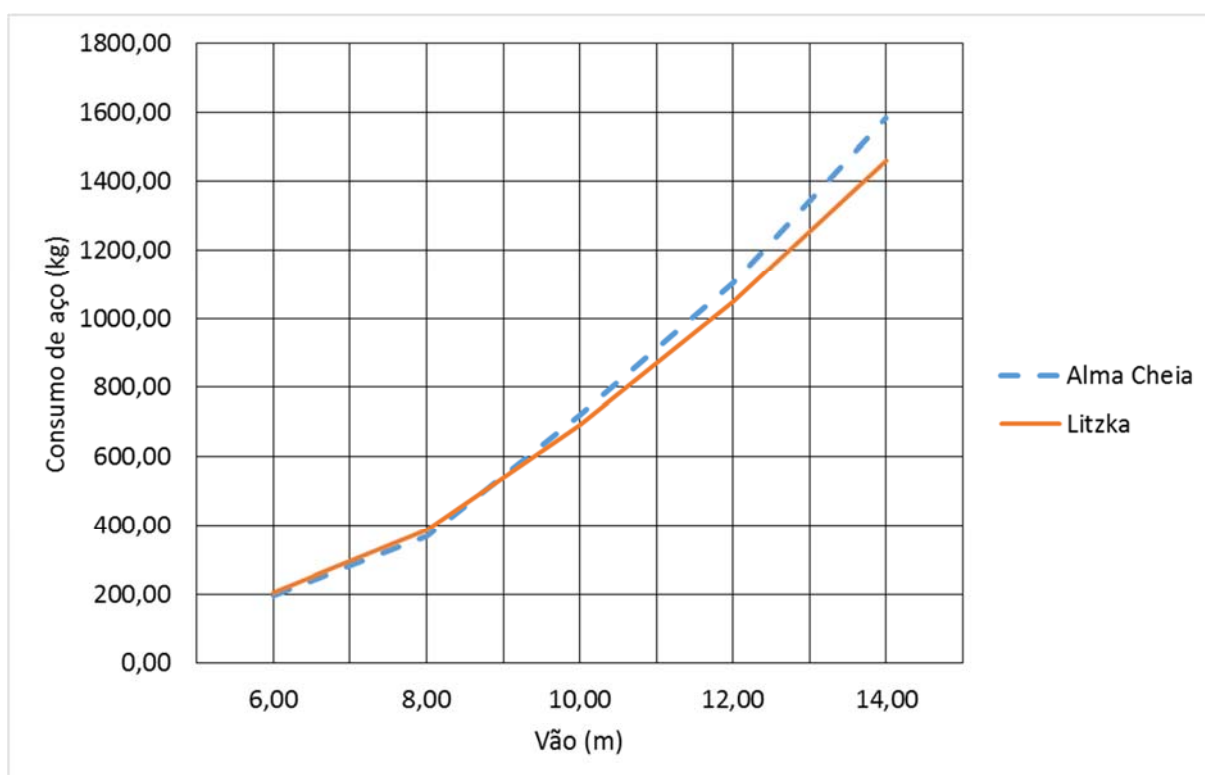


Figura B1 –Comparativo de consumo de aço para espaçamento entre vigas de 2,0 m



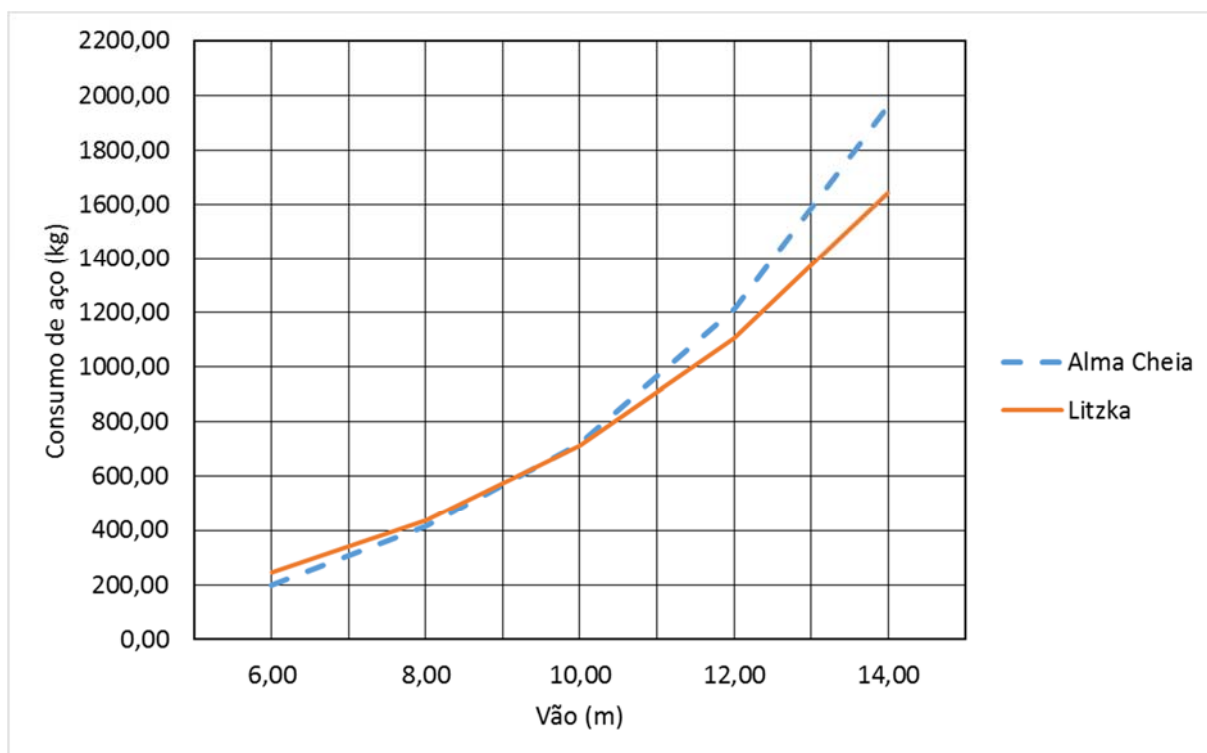
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B2 –Comparativo de consumo de aço para espaçamento entre vigas de 2,5 m



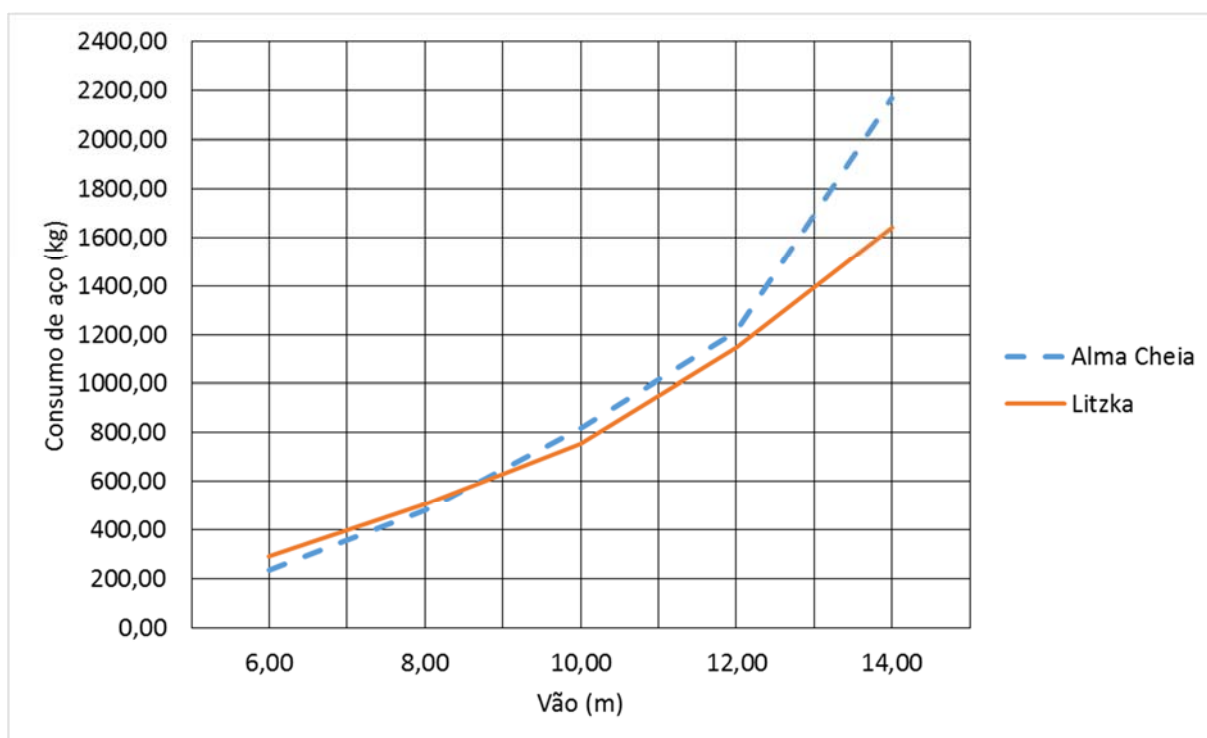
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B3 –Comparativo de consumo de aço para espaçamento entre vigas de 3,0 m



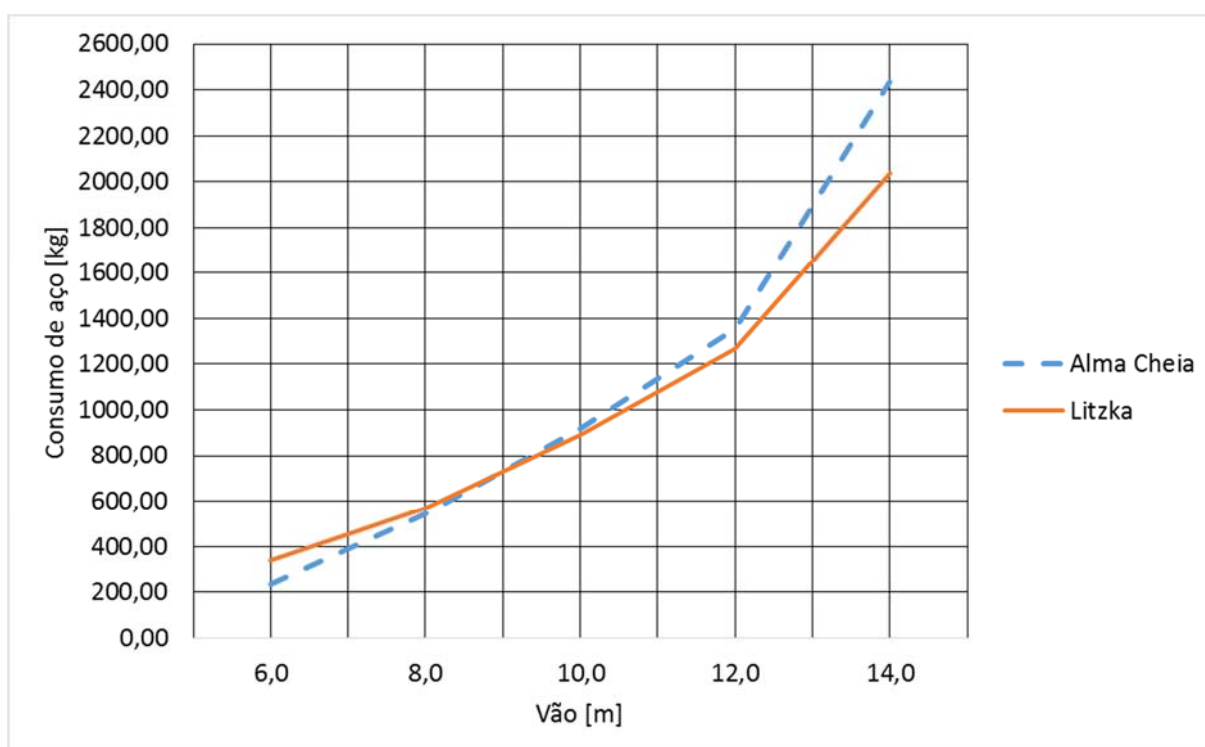
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B4 –Comparativo de consumo de aço para espaçamento entre vigas de 3,5 m



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B5 –Comparativo de consumo de aço para espaçamento entre vigas de 4,0 m



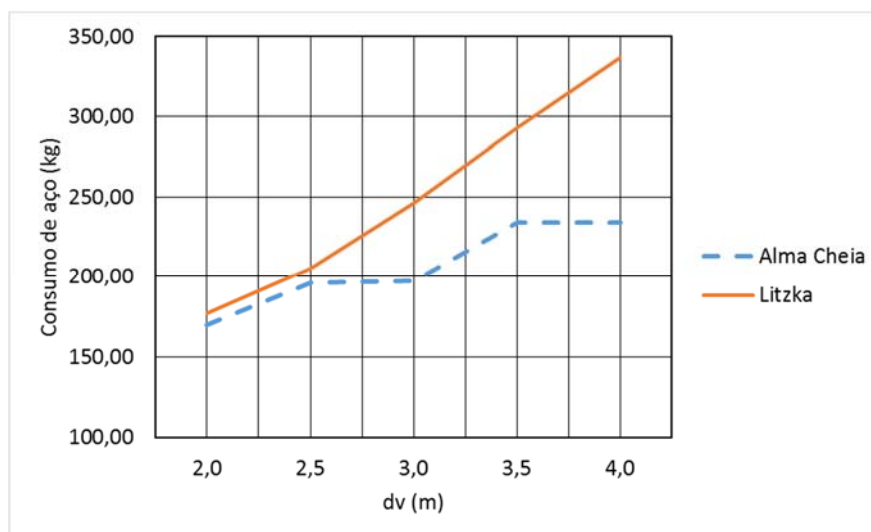
(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela B6 –Comparativo de consumo de aço para vão de 6,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas

dv (m)	Alma Cheia		Litzka	
	Perfil	Consumo (kg)	Perfil	Consumo (kg)
2,0	W 310 x 28,3	169,80	W 250 x 28,4	176,80
2,5	W 310 x 32,7	196,20	W 310 x 32,7	205,06
3,0	W 360 x 32,9	197,40	W 410 x 38,8	246,21
3,5	W 360 x 39,0	234,00	W 410 x 46,1	292,69
4,0	W 360 x 39,0	234,00	W 410 x 53,0	336,50

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B6 –Comparativo de consumo de aço para vão de 6,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas



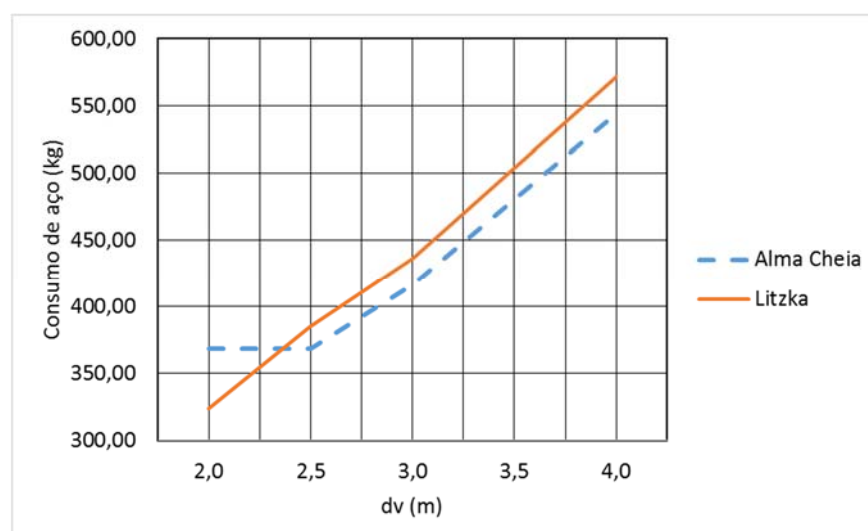
(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela B7 –Comparativo de consumo de aço para vão de 8,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas

dv (m)	Alma Cheia		Litzka	
	Perfil	Consumo (kg)	Perfil	Consumo (kg)
2,0	W 410 x 46,1	368,80	W 360 x 39,0	323,92
2,5	W 410 x 46,1	368,80	W 410 x 46,1	384,89
3,0	W 460 x 52,0	416,00	W 460 x 52,0	436,27
3,5	W 460 x 60,0	480,00	W 460 x 60,0	503,64
4,0	W 460 x 68,0	544,00	W 460 x 68,0	571,03

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B7 –Comparativo de consumo de aço para vão de 8,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas



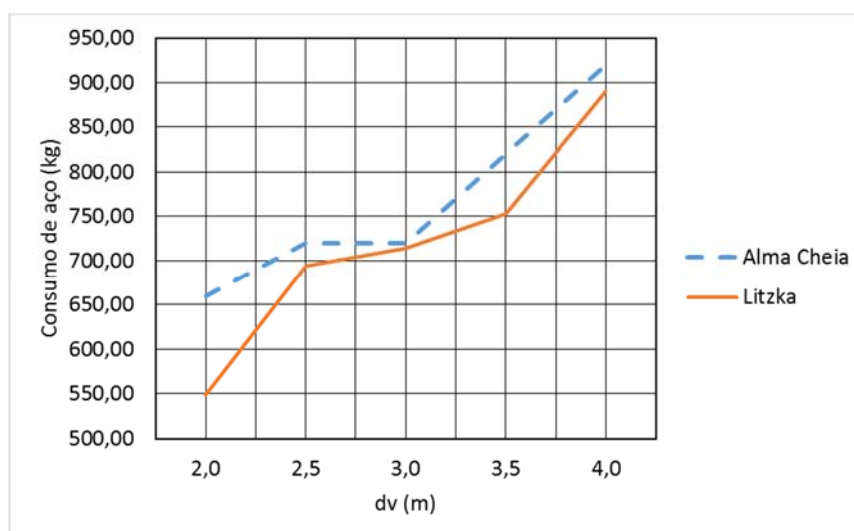
(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela B8 –Comparativo de consumo de aço para vão de 10,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas

dv (m)	Alma Cheia		Litzka	
	Perfil	Consumo (kg)	Perfil	Consumo (kg)
2,0	W 530 x 66,0	660,00	W 410 x 53,0	548,50
2,5	W 530 x 72,0	720,00	W 410 x 67,0	693,79
3,0	W 530 x 72,0	720,00	W 460 x 68,0	714,48
3,5	W 530 x 82,0	820,00	W 530 x 72,0	752,68
4,0	W 530 x 92,0	920,00	W 530 x 85,0	889,39

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B8 –Comparativo de consumo de aço para vão de 10,0 m e diferentes carregamentos



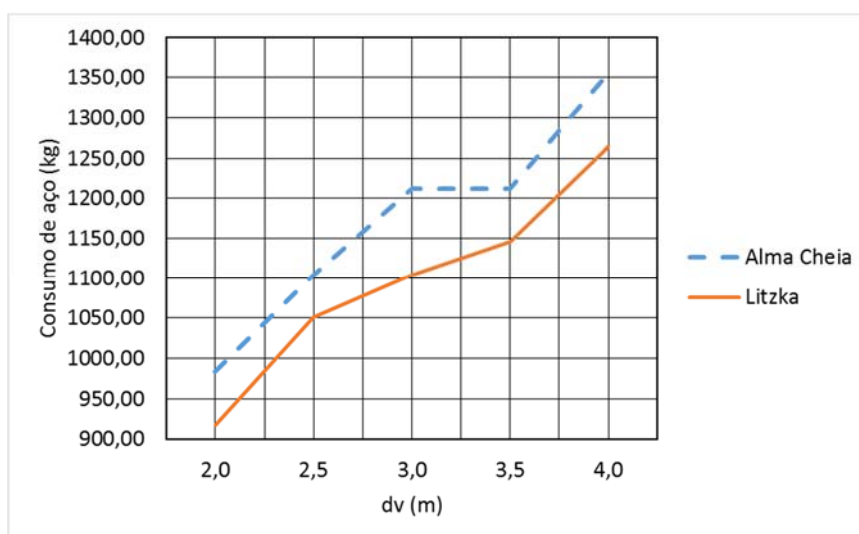
(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela B9 –Comparativo de consumo de aço para vão de 12,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas

dv (m)	Alma Cheia		Litzka	
	Perfil	Consumo (kg)	Perfil	Consumo (kg)
2,0	W 530 x 82,0	984,00	W 460 x 74,0	917,29
2,5	W 530 x 92,0	1104,00	W 410 x 85,0	1050,70
3,0	W 610 x 101,0	1212,00	W 460 x 89,0	1103,69
3,5	W 610 x 101,0	1212,00	W 530 x 92,0	1146,47
4,0	W 610 x 113,0	1356,00	W 610 x 101,0	1264,75

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B9 –Comparativo de consumo de aço para vão de 12,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas



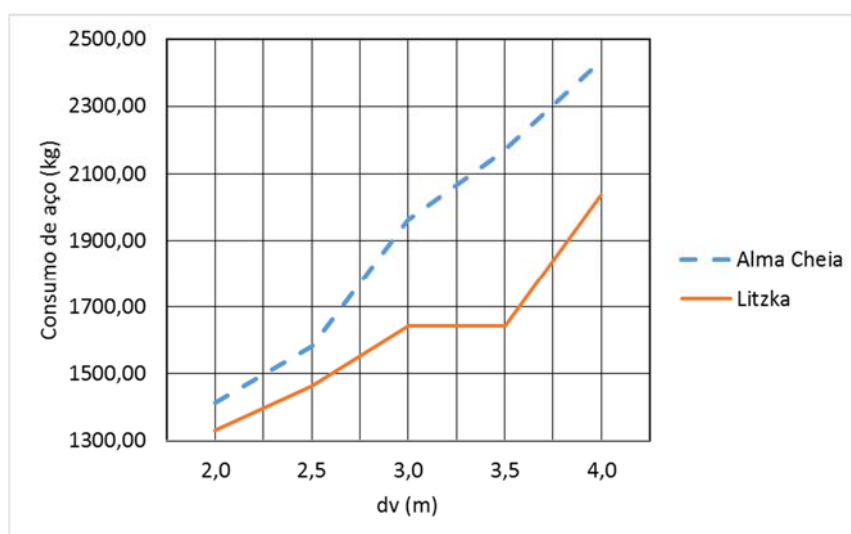
(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela B10 –Comparativo de consumo de aço para vão de 14,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas

dv (m)	Alma Cheia		Litzka	
	Perfil	Consumo (kg)	Perfil	Consumo (kg)
2,0	W 610 x 101,0	1414,00	W 530 x 92,0	1330,47
2,5	W 610 x 113,0	1582,00	W 530 x 101,0	1460,97
3,0	W 610 x 140,0	1960,00	W 610 x 113,0	1641,50
3,5	W 610 x 155,0	2170,00	W 610 x 113,0	1641,50
4,0	W 610 x 174,0	2436,00	W 610 x 140,0	2034,81

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura B10 –Comparativo de consumo de aço para vão de 14,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas



(fonte: elaborada pelo autor)

**APÊNDICE C– Análise do consumo de aço: vão com contenção contínua**

Tabela C1 – Consumo de aço para espaçamento entre vigas de 2,0 m

Vão (m)	Alma Cheia			Litzka			Consumo Redução/Ganho
	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	
6,0	W 310 x 28,3	169,80	DE	W 310 x 21,0	131,51	PST	-23%
8,0	W 410 x 38,8	310,40	DE	W 410 x 38,8	323,81	PST	4%
10,0	W 460 x 60,0	600,00	DE	W 410 x 46,1	477,09	PST	-20%
12,0	W 530 x 82,0	984,00	DE	W 460 x 52,0	644,27	PST	-35%
14,0	W 610 x 101,0	1414,00	DE	W 530 x 66,0	954,01	PST	-33%

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela C2 – Consumo de aço para espaçamento entre vigas de 2,5 m

Vão (m)	Alma Cheia			Litzka			Consumo Redução/Ganho
	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	
6,0	W 310 x 32,7	196,20	DE	W 310 x 32,7	205,06	PST	5%
8,0	W 410 x 46,1	368,80	DE	W 410 x 46,1	384,89	PST	4%
10,0	W 530 x 66,0	660,00	DE	W 460 x 52,0	540,27	PST	-18%
12,0	W 530 x 92,0	1104,00	DE	W 460 x 68,0	843,03	PST	-24%
14,0	W 610 x 113,0	1582,00	DE	W 530 x 82,0	1185,50	PST	-25%

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela C3 – Consumo de aço para espaçamento entre vigas de 3,0 m

Vão (m)	Alma Cheia			Litzka			Consumo Redução/Ganho
	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	
6,0	W 360 x 32,9	197,40	DE	W 410 x 38,8	246,21	PST	25%
8,0	W 460 x 52,0	416,00	DE	W 460 x 52,0	436,27	PST	5%
10,0	W 530 x 72,0	720,00	DE	W 530 x 66,0	690,01	PST	-4%
12,0	W 610 x 101,0	1212,00	DE	W 530 x 74,0	921,90	PST	-24%
14,0	W 610 x 140,0	1960,00	DE	W 530 x 101,0	1460,97	PST	-25%

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela C4 – Consumo de aço para espaçamento entre vigas de 3,5 m

Vão (m)	Alma Cheia			Litzka			Consumo Redução/Ganho
	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	
6,0	W 410 x 38,8	232,80	DE	W 410 x 46,1	292,69	PST	26%
8,0	W 460 x 60,0	480,00	DE	W 460 x 60,0	503,64	PST	5%
10,0	W 530 x 82,0	820,00	DE	W 530 x 66,0	690,01	PST	-16%
12,0	W 610 x 101,0	1212,00	DE	W 530 x 92,0	1146,47	PST	-5%
14,0	W 610 x 155,0	2170,00	DE	W 610 x 113,0	1641,50	PST	-24%

(fonte: elaborada pelo autor)

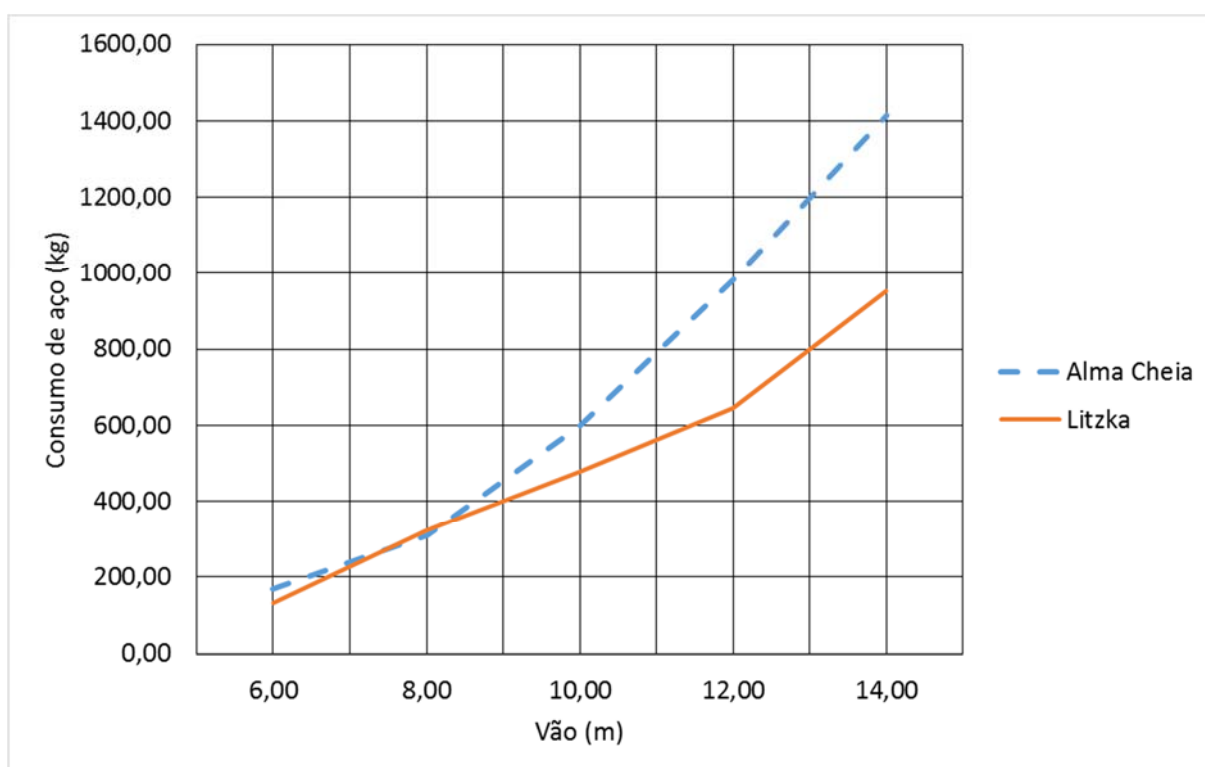
Tabela C5 – Consumo de aço para espaçamento entre vigas de 4,0 m

Vão (m)	Alma Cheia			Litzka			Consumo Redução/Ganho
	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	Perfil	Consumo (kg)	Verif. crítica	
6,0	W 410 x 38,8	232,80	DE	W 460 x 52,0	332,27	PST	43%
8,0	W 460 x 60,0	480,00	DE	W 530 x 66,0	558,01	PST	16%
10,0	W 530 x 92,0	920,00	DE	W 530 x 85,0	889,39	PST	-3%
12,0	W 610 x 113,0	1356,00	DE	W 610 x 101,0	1264,75	PST	-7%
14,0	W 610 x 174,0	2436,00	DE	W 610 x 140,0	2034,81	PST	-16%

(fonte: elaborada pelo autor)

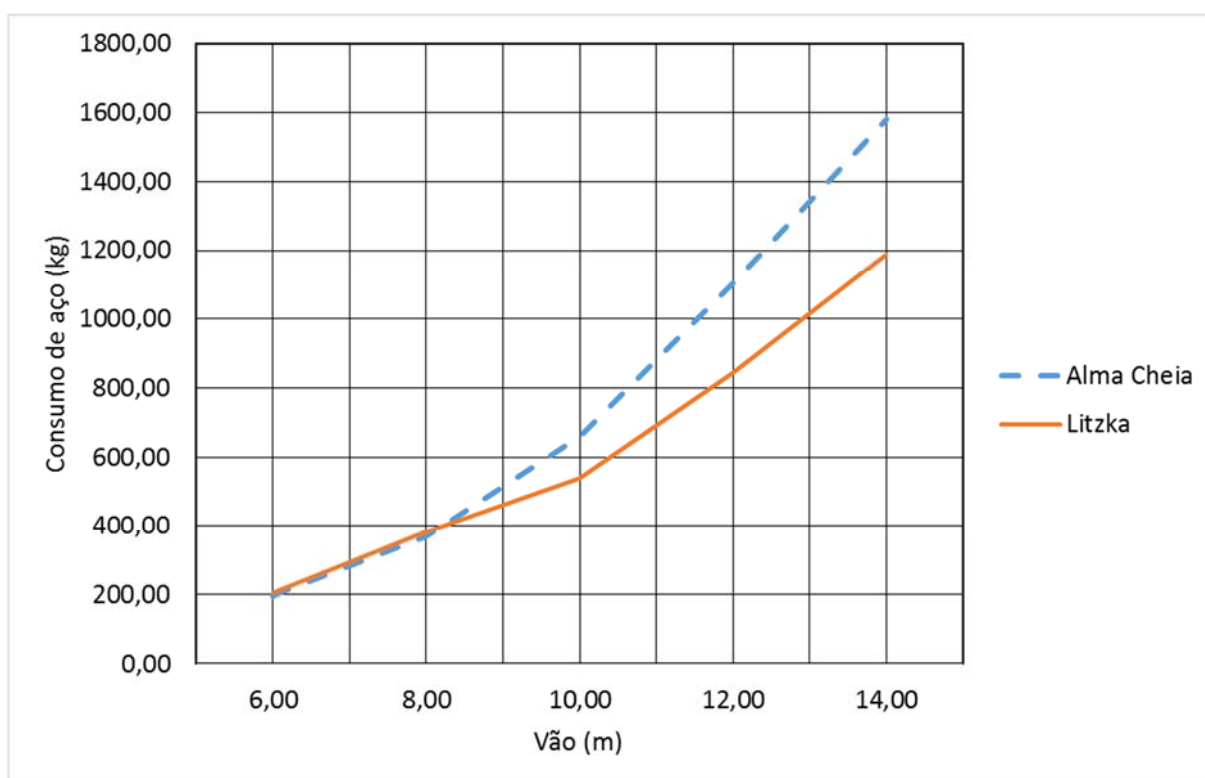


Figura C1 –Comparativo de consumo de aço para espaçamento entre vigas de 2,0 m



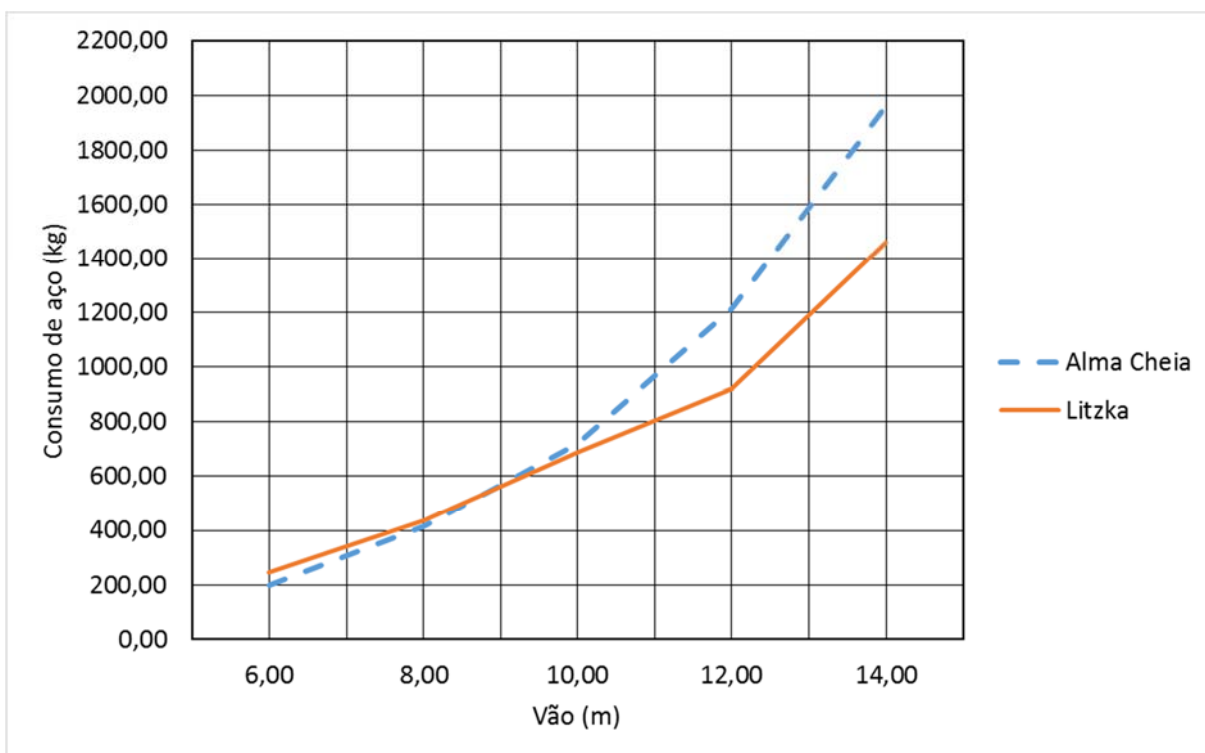
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura C2 –Comparativo de consumo de aço para espaçamento entre vigas de 2,5 m



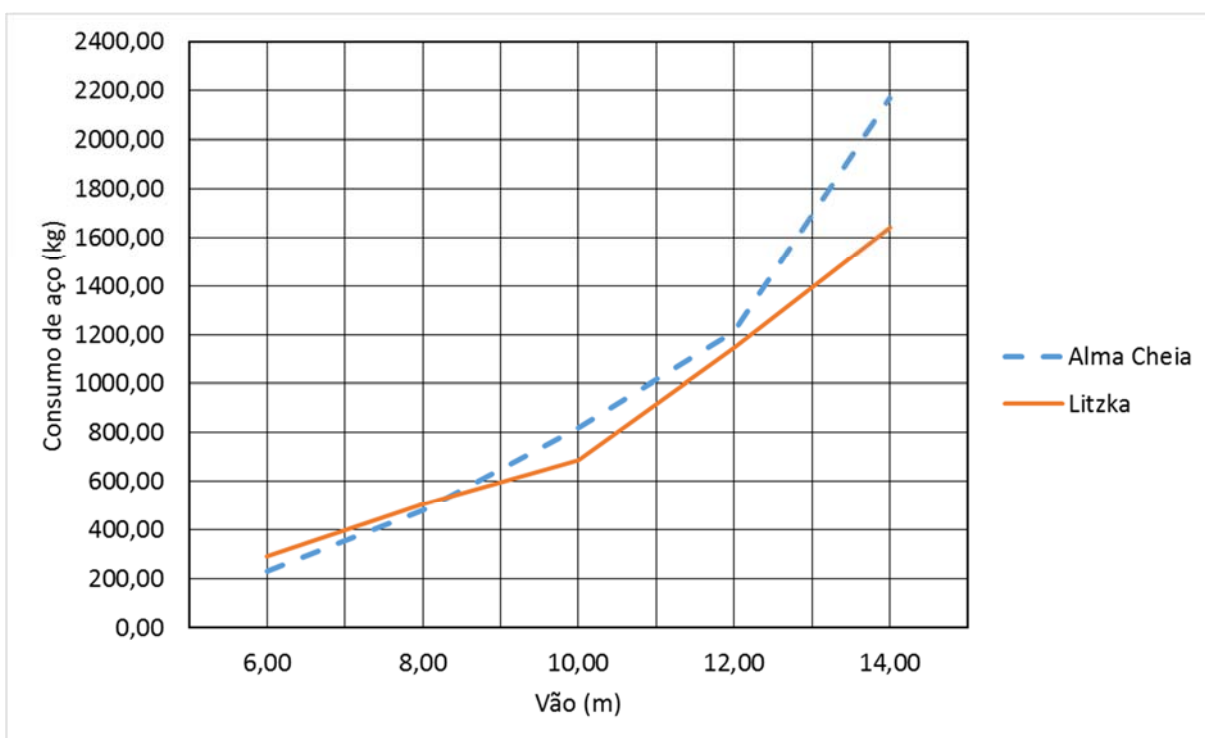
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura C3 –Comparativo de consumo de aço para espaçamento entre vigas de 3,0 m



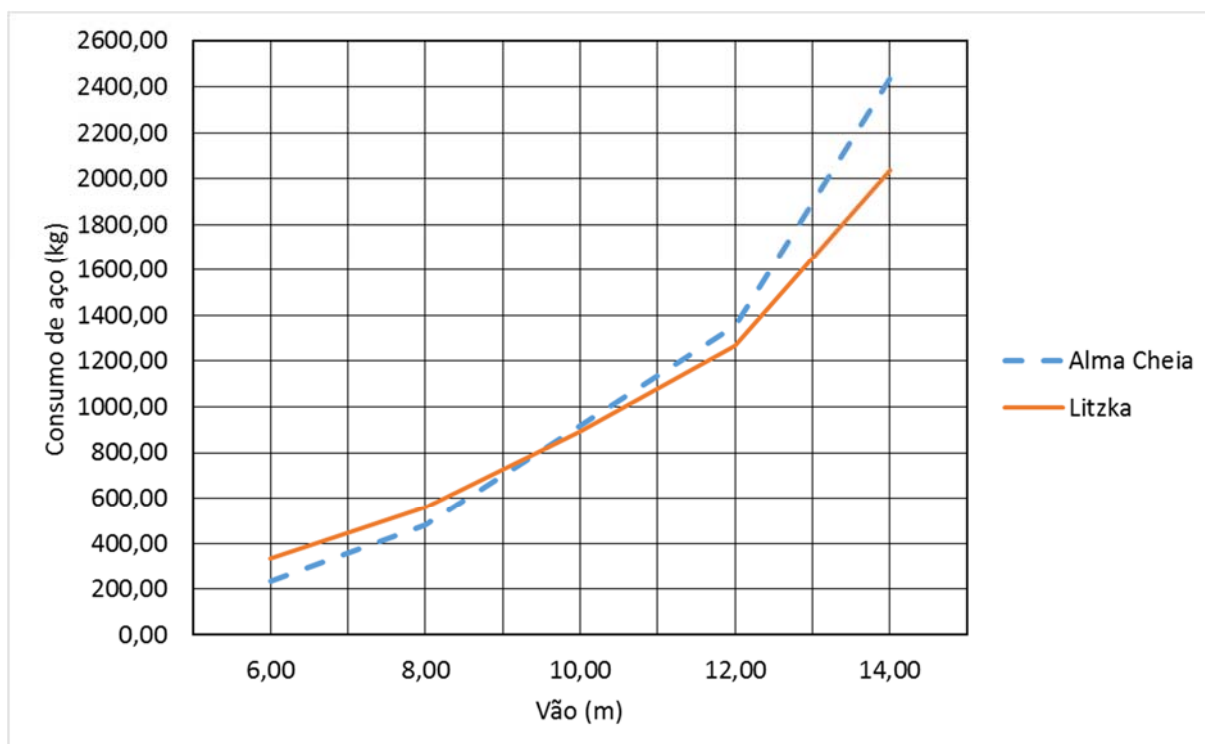
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura C4 –Comparativo de consumo de aço para espaçamento entre vigas de 3,5 m



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura C5 –Comparativo de consumo de aço para espaçamento entre vigas de 4,0 m



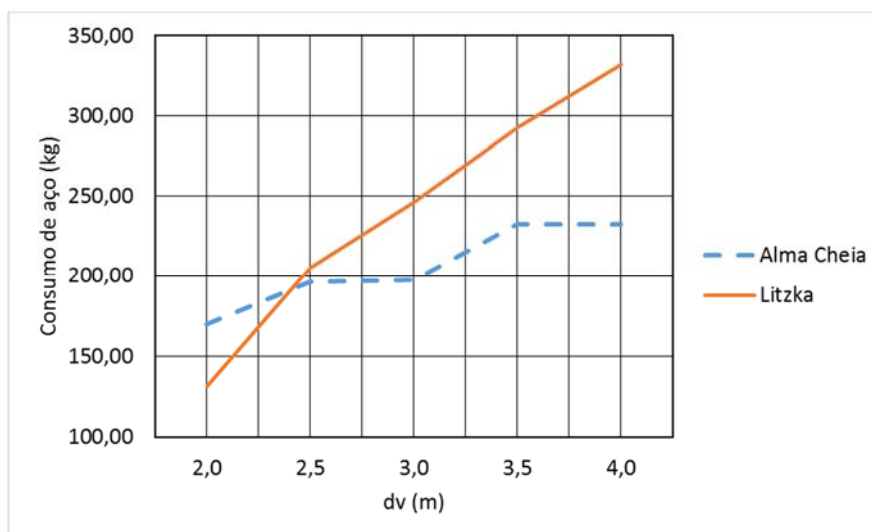
(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela C6 –Comparativo de consumo de aço para vão de 6,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas

dv (m)	Alma Cheia		Litzka	
	Perfil	Consumo (kg)	Perfil	Consumo (kg)
2,0	W 310 x 28,3	169,80	W 310 x 21,0	131,51
2,5	W 310 x 32,7	196,20	W 310 x 32,7	205,06
3,0	W 360 x 32,9	197,40	W 410 x 38,8	246,21
3,5	W 410 x 38,8	232,80	W 410 x 46,1	292,69
4,0	W 410 x 38,8	232,80	W 460 x 52,0	332,27

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura C6 –Comparativo de consumo de aço para vão de 6,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas



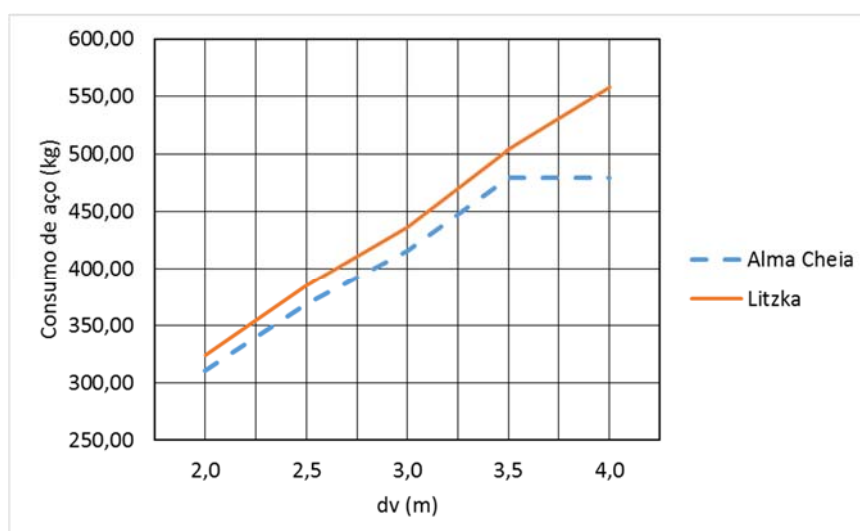
(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela C7 –Comparativo de consumo de aço para vão de 8,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas

dv (m)	Alma Cheia		Litzka	
	Perfil	Consumo (kg)	Perfil	Consumo (kg)
2,0	W 410 x 38,8	310,40	W 410 x 38,8	323,81
2,5	W 410 x 46,1	368,80	W 410 x 46,1	384,89
3,0	W 460 x 52,0	416,00	W 460 x 52,0	436,27
3,5	W 460 x 60,0	480,00	W 460 x 60,0	503,64
4,0	W 460 x 60,0	480,00	W 530 x 66,0	558,01

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura C7 –Comparativo de consumo de aço para vão de 8,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas



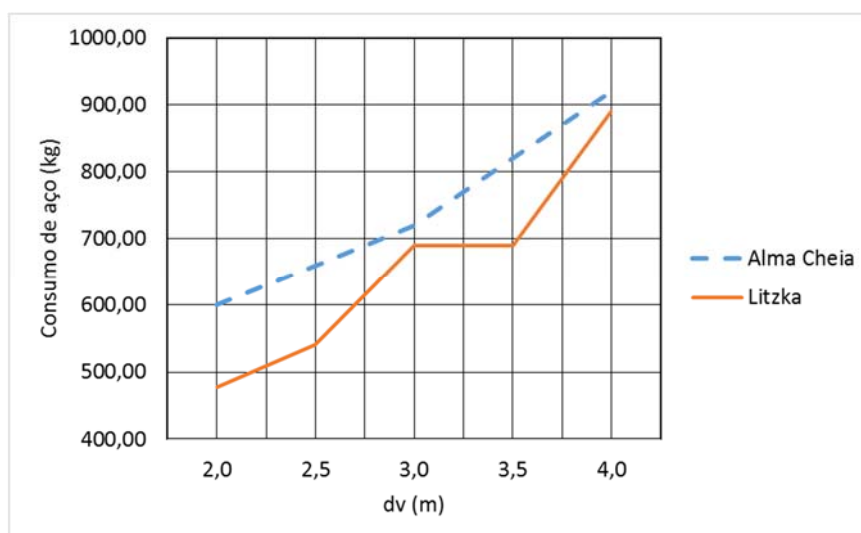
(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela C8 –Comparativo de consumo de aço para vão de 10,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas

dv (m)	Alma Cheia		Litzka	
	Perfil	Consumo (kg)	Perfil	Consumo (kg)
2,0	W 460 x 60,0	600,00	W 410 x 46,1	477,09
2,5	W 530 x 66,0	660,00	W 460 x 52,0	540,27
3,0	W 530 x 72,0	720,00	W 530 x 66,0	690,01
3,5	W 530 x 82,0	820,00	W 530 x 66,0	690,01
4,0	W 530 x 92,0	920,00	W 530 x 85,0	889,39

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura C8 –Comparativo de consumo de aço para vão de 10,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas



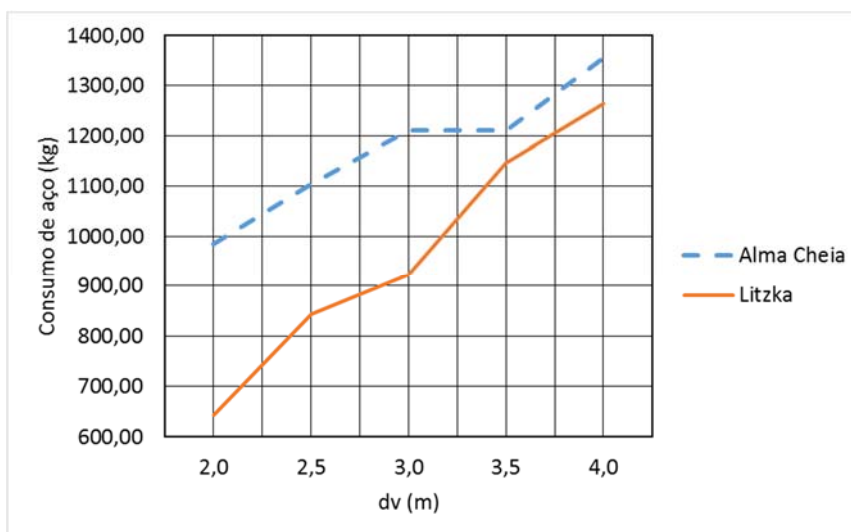
(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela C9 –Comparativo de consumo de aço para vão de 12,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas

dv (m)	Alma Cheia		Litzka	
	Perfil	Consumo (kg)	Perfil	Consumo (kg)
2,0	W 530 x 82,0	984,00	W 460 x 52,0	644,27
2,5	W 530 x 92,0	1104,00	W 460 x 68,0	843,03
3,0	W 610 x 101,0	1212,00	W 530 x 74,0	921,90
3,5	W 610 x 101,0	1212,00	W 530 x 92,0	1146,47
4,0	W 610 x 113,0	1356,00	W 610 x 101,0	1264,75

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura C9 –Comparativo de consumo de aço para vão de 12,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas



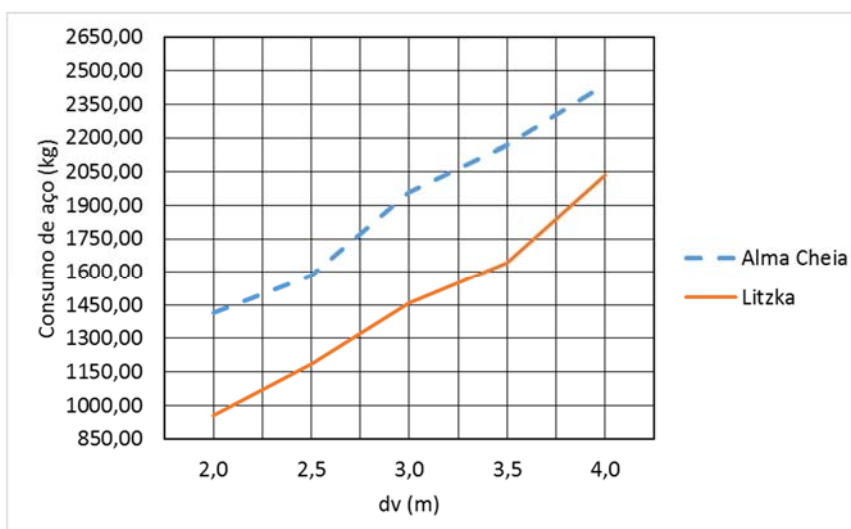
(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela C10 –Comparativo de consumo de aço para vão de 14,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas

dv (m)	Alma Cheia		Litzka	
	Perfil	Consumo (kg)	Perfil	Consumo (kg)
2,0	W 610 x 101,0	1414,00	W 530 x 66,0	954,01
2,5	W 610 x 113,0	1582,00	W 530 x 82,0	1185,50
3,0	W 610 x 140,0	1960,00	W 530 x 101,0	1460,97
3,5	W 610 x 155,0	2170,00	W 610 x 113,0	1641,50
4,0	W 610 x 174,0	2436,00	W 610 x 140,0	2034,81

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura C10 –Comparativo de consumo de aço para vão de 14,0 m e diferentes espaçamentos entre vigas



(fonte: elaborada pelo autor)

## **APÊNDICE D– Resumo das verificações das vigas**

Tabela D1 – Verificações das vigas em alma cheia – vão destravado

dv (m)	L (m)	Perfil	Alma Cheia						Flecha				
			Plastificação da seção transversal			Cortante			FLT				
			MSd (kN.cm)	MRd (kN.cm)	Sd/Rd	Vsd (kN)	VRd (kN)	Sd/Rd	MSd (kN.cm)	MRd (kN.cm)	Sd/Rd	Limite (cm)	Cálculo (cm)
2,0	6,0	W 310 x 38,7	8677,69	19301,18	45%	57,85	338,35	17%	8677,69	9248,91	94%	1,71	1,05
2,5	6,0	W 360 x 44,0	10822,50	24598,50	44%	72,15	457,06	16%	10822,50	11427,19	95%	1,71	0,92
3,0	6,0	W 360 x 51,0	12976,88	28211,59	46%	86,51	480,99	18%	12976,88	14350,12	90%	1,71	0,95
3,5	6,0	W 310 x 52,0	15097,50	26423,86	57%	100,65	453,37	22%	15097,50	15369,89	98%	1,71	1,32
4,0	6,0	W 360 x 57,8	17245,13	31827,82	54%	114,97	532,22	22%	17245,13	17476,51	99%	1,71	1,11
2,0	8,0	W 360 x 64,0	15680,00	35927,05	44%	78,40	502,80	16%	15680,00	17692,90	89%	2,29	1,68
2,5	8,0	W 360 x 72,0	19520,00	40330,50	48%	97,60	566,43	17%	19520,00	21491,99	91%	2,29	1,85
3,0	8,0	W 360 x 79,0	23350,00	45069,55	52%	116,75	626,19	19%	23350,00	25936,32	90%	2,29	1,96
3,5	8,0	W 460 x 89,0	27210,00	63335,73	43%	136,05	914,85	15%	27210,00	27320,68	100%	2,29	1,26
4,0	8,0	W 460 x 97,0	31050,00	68604,82	45%	155,25	999,70	16%	31050,00	31243,52	99%	2,29	1,32
2,0	10,0	W 360 x 91,0 (H)	24921,88	52694,05	47%	99,69	631,07	16%	24921,88	30162,75	83%	2,86	2,80
2,5	10,0	W 360 x 110,0 (H)	31093,75	64587,14	48%	124,38	772,30	16%	31093,75	42841,39	73%	2,86	2,82
3,0	10,0	W 610 x 125,0	37203,13	115960,77	32%	148,81	1370,49	11%	37203,13	39751,71	94%	2,86	1,13
3,5	10,0	W 610 x 140,0	43312,50	130883,59	33%	173,25	1521,02	11%	43312,50	50162,91	86%	2,86	1,15
4,0	10,0	W 610 x 140,0	49187,50	130883,59	38%	196,75	1521,02	13%	49187,50	50162,91	98%	2,86	1,31
2,0	12,0	W 610 x 140,0	36990,00	130883,59	28%	123,30	1521,02	8%	36990,00	38789,43	95%	3,43	1,44
2,5	12,0	W 610 x 155,0	45787,50	148949,05	31%	152,63	1460,23	10%	45787,50	66922,52	68%	3,43	1,54
3,0	12,0	W 610 x 155,0	54247,50	148949,05	36%	180,83	1460,23	12%	54247,50	66922,52	81%	3,43	1,82
3,5	12,0	W 610 x 155,0	62707,50	148949,05	42%	209,03	1460,23	14%	62707,50	66922,52	94%	3,43	2,09
4,0	12,0	W 610 x 174,0	71595,00	168839,86	42%	238,65	1622,88	15%	71595,00	81892,59	87%	3,43	2,10
2,0	14,0	W 610 x 155,0	50806,88	148949,05	34%	145,16	1460,23	10%	50806,88	53783,63	94%	4,00	2,35
2,5	14,0	W 610 x 174,0	62903,75	168839,86	37%	179,73	1622,88	11%	62903,75	66326,41	95%	4,00	2,54
3,0	14,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,5	14,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,0	14,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(fonte: elaborada pelo autor)



Tabela D2 – Verificações das vigas Litzka – vão destravado

dv (m)	L (m)	Perfil	Litzka				Cortante				FLT				Flecha	
			Plastificação da seção				VRd (kN)				MRd (kN.cm)				Cálculo (cm)	
			MSd (kN.cm)	MRd (kN.cm)	Sd/Rd		VSd (kN)	VRd (kN)	Sd/Rd		MSd (kN.cm)	MRd (kN.cm)	Sd/Rd		Limite (cm)	Cálculo (cm)
2,0	6,0	W 250 x 38,5	21285,84	23768,47	90%	57,84	98,29	59%	8676,56	9016,62	96%	1,71	0,75			
2,5	6,0	W 360 x 44,0	27838,75	35489,05	78%	72,15	137,93	52%	10822,50	13799,30	78%	1,71	0,49			
3,0	6,0	W 360 x 44,0	33279,18	35489,05	94%	86,25	137,93	63%	12937,50	13799,30	94%	1,71	0,59			
3,5	6,0	W 410 x 53,0	41874,84	48111,76	87%	100,69	171,28	59%	15103,13	19221,61	79%	1,71	0,47			
4,0	6,0	W 410 x 53,0	47738,88	48111,76	99%	114,79	171,28	67%	17218,13	19221,61	90%	1,71	0,54			
2,0	8,0	HP 250 x 62,0 (H)	29390,61	36420,70	81%	78,30	147,15	53%	15660,00	21093,62	74%	2,29	1,56			
2,5	8,0	HP 250 x 62,0 (H)	36447,36	36420,70	100%	97,10	147,15	66%	19420,00	21093,62	92%	2,29	1,93			
3,0	8,0	W 360 x 72,0	59211,48	60069,62	99%	116,40	171,36	68%	23280,00	23982,51	97%	2,29	1,10			
3,5	8,0	W 530 x 82,0	66538,82	92238,67	72%	135,70	278,70	49%	27140,00	28953,77	94%	2,29	0,57			
4,0	8,0	W 460 x 89,0	79257,00	91511,26	87%	154,85	274,59	56%	30970,00	31275,84	99%	2,29	0,74			
2,0	10,0	HP 310 x 79,0 (H)	44271,67	55636,68	80%	98,94	187,95	53%	24734,38	28935,63	85%	2,86	2,06			
2,5	10,0	W 360 x 91,0 (H)	75232,05	77833,87	97%	123,19	191,40	64%	30796,88	33596,23	92%	2,86	1,65			
3,0	10,0	W 360 x 110,0 (H)	91481,26	95640,58	96%	147,88	232,99	63%	36968,75	46536,71	79%	2,86	1,59			
3,5	10,0	W 360 x 122,0 (H)	102915,77	105379,13	98%	172,13	266,90	64%	43031,25	54296,72	79%	2,86	1,66			
4,0	10,0	HP 310 x 125,0 (H)	89334,52	90549,31	99%	195,81	306,61	64%	48953,13	54759,69	89%	2,86	2,42			
2,0	12,0	W 310 x 107,0 (H)	76114,48	82555,82	92%	120,83	193,31	63%	36247,50	40567,33	89%	3,43	2,89			
2,5	12,0	HP 310 x 125,0 (H)	70955,05	90549,31	78%	150,38	306,61	49%	45112,50	46371,09	97%	3,43	3,15			
3,0	12,0	W 610 x 155,0	132757,79	215955,61	61%	180,83	441,78	41%	54247,50	82096,34	66%	3,43	0,92			
3,5	12,0	W 610 x 155,0	153461,62	215955,61	71%	209,03	441,78	47%	62707,50	82096,34	76%	3,43	1,06			
4,0	12,0	W 610 x 155,0	174165,44	215955,61	81%	237,23	441,78	54%	71167,50	82096,34	87%	3,43	1,20			
2,0	14,0	W 610 x 155,0	106575,15	215955,61	49%	145,16	441,78	33%	50806,88	63543,38	80%	4,00	1,13			
2,5	14,0	W 610 x 155,0	130729,62	215955,61	61%	178,06	441,78	40%	62321,88	63543,38	98%	4,00	1,37			
3,0	14,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
3,5	14,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
4,0	14,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela D3 – Verificações das vigas em alma cheia – contenção central

dv (m)	L (m)	Perfil	Alma Cheia						Flecha				
			Plastificação da seção transversal			Cortante			FLT				
			MSd (kN.cm)	MRd (kN.cm)	Sd/Rd	VSD (kN)	VRd (kN)	Sd/Rd	MSd (kN.cm)	MRd (kN.cm)	Sd/Rd	Limite (cm)	Cálculo (cm)
2,0	6,0	W 310 x 28,3	8647,31	12921,82	67%	57,56	348,89	16%	8647,31	8652,98	100%	1,71	1,68
2,5	6,0	W 310 x 32,7	10787,06	15220,77	71%	71,82	388,75	18%	10787,06	10973,45	98%	1,71	1,71
3,0	6,0	W 360 x 32,9	12903,19	17174,73	75%	85,93	380,92	23%	12903,19	14520,55	89%	1,71	1,64
3,5	6,0	W 360 x 39,0	15052,50	23108,73	65%	100,26	480,54	21%	15052,50	18688,18	81%	1,71	1,55
4,0	6,0	W 360 x 39,0	17167,50	23108,73	74%	114,36	480,54	24%	17167,50	18687,23	92%	1,71	1,68
2,0	8,0	W 410 x 46,1	15538,50	27948,14	56%	77,60	530,86	15%	15538,50	19676,13	79%	2,29	1,89
2,5	8,0	W 410 x 46,1	19298,50	27948,14	69%	96,40	530,86	18%	19298,50	19676,13	98%	2,29	2,28
3,0	8,0	W 460 x 52,0	23117,50	34371,41	67%	115,49	643,58	18%	23117,50	24358,50	95%	2,29	2,05
3,5	8,0	W 460 x 60,0	26957,50	40524,95	67%	134,69	684,98	20%	26957,50	31924,43	84%	2,29	1,99
4,0	8,0	W 460 x 68,0	30797,50	40524,95	76%	153,89	684,98	22%	30797,50	38623,88	80%	2,29	1,96
2,0	10,0	W 530 x 66,0	24578,13	48864,55	50%	98,22	879,28	11%	24578,13	25467,29	97%	2,86	2,10
2,5	10,0	W 530 x 72,0	30546,88	48864,55	63%	122,09	879,28	14%	30546,88	43908,80	70%	2,86	2,28
3,0	10,0	W 530 x 72,0	36421,88	54557,88	67%	145,59	887,47	16%	36421,88	43906,40	83%	2,86	2,71
3,5	10,0	W 530 x 82,0	42453,13	64562,05	66%	169,72	943,92	18%	42453,13	54361,96	78%	2,86	2,65
4,0	10,0	W 530 x 92,0	48484,38	74011,91	66%	193,84	1023,07	19%	48484,38	64331,32	75%	2,86	2,61
2,0	12,0	W 530 x 82,0	35741,25	64562,05	55%	119,04	943,92	13%	35741,25	41851,61	85%	3,43	3,25
2,5	12,0	W 530 x 92,0	44426,25	74011,91	60%	147,99	1023,07	14%	44426,25	51400,75	86%	3,43	3,39
3,0	12,0	W 610 x 101,0	53088,75	91666,50	58%	176,87	1191,47	15%	53088,75	67584,39	79%	3,43	2,97
3,5	12,0	W 610 x 101,0	61548,75	91666,50	67%	205,07	1191,47	17%	61548,75	67582,21	91%	3,43	3,43
4,0	12,0	W 610 x 113,0	70278,75	103904,59	68%	234,17	1281,44	18%	70278,75	81429,52	86%	3,43	3,42
2,0	14,0	W 610 x 101,0	49218,75	91666,50	54%	140,53	1191,47	12%	49218,75	52367,92	94%	4,00	3,78
2,5	14,0	W 610 x 113,0	61101,25	103904,59	59%	174,48	1281,44	14%	61101,25	63541,45	96%	4,00	3,98
3,0	14,0	W 610 x 140,0	73443,13	130883,59	56%	209,74	1521,02	14%	73443,13	91986,20	80%	4,00	3,85
3,5	14,0	W 610 x 155,0	85417,50	148949,05	57%	243,96	1460,23	17%	85417,50	146182,16	58%	4,00	3,79
4,0	14,0	W 610 x 174,0	97514,38	168839,86	58%	278,52	1622,88	17%	97514,38	167506,60	58%	4,00	3,89

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela D4 – Verificações das vigas Litzka – contenção central

Litzka														
dv (m)	L (m)	Perfil	Plastificação da seção transversal				Cortante				FLT		Flecha	
			MSd (kN.cm)	MRd (kN.cm)	Sd/Rd	%	VSD (kN)	VRd (kN)	Sd/Rd	%	MSd (kN.cm)	MRd (kN.cm)	Sd/Rd	%
2,0	6,0	W 250 x 28,4	15454,64	16112,74	96%	57,56	93,57	62%	62%	8647,88	10201,39	85%	1,71	1,05
2,5	6,0	W 310 x 32,7	20842,55	21731,63	96%	71,82	115,84	62%	62%	10787,06	13217,35	82%	1,71	0,83
3,0	6,0	W 410 x 38,8	29588,98	32824,16	90%	86,15	113,09	76%	76%	12936,38	25863,46	50%	1,71	0,56
3,5	6,0	W 410 x 46,1	38247,97	39921,66	96%	100,52	146,24	69%	69%	15092,44	32370,41	47%	1,71	0,55
4,0	6,0	W 410 x 53,0	47777,87	48111,76	99%	114,88	171,28	67%	67%	17246,25	42682,01	40%	1,71	0,54
2,0	8,0	W 360 x 39,0	27479,05	30065,75	91%	77,24	129,49	60%	60%	15467,50	16129,88	96%	2,29	1,32
2,5	8,0	W 410 x 46,1	36726,56	39921,66	92%	96,40	146,24	66%	66%	19298,50	24200,63	80%	2,29	1,11
3,0	8,0	W 460 x 52,0	44358,06	49469,75	90%	115,49	168,09	69%	69%	23117,50	31420,52	74%	2,29	0,99
3,5	8,0	W 460 x 60,0	57881,52	57937,73	100%	134,69	193,44	70%	70%	26957,50	39353,38	69%	2,29	0,99
4,0	8,0	W 460 x 68,0	67567,56	68080,20	99%	153,89	234,88	66%	66%	30797,50	46820,67	66%	2,29	0,97
2,0	10,0	W 410 x 53,0	41206,54	48111,76	86%	97,41	171,28	57%	57%	24375,00	29818,39	82%	2,86	1,78
2,5	10,0	W 410 x 67,0	56279,60	61753,64	91%	121,78	204,28	60%	60%	30468,75	41506,89	73%	2,86	1,71
3,0	10,0	W 460 x 68,0	64358,90	68080,20	95%	145,34	234,88	62%	62%	36359,38	36557,21	99%	2,86	1,67
3,5	10,0	W 530 x 72,0	75197,55	78152,23	96%	169,09	239,41	71%	71%	42296,88	55139,55	77%	2,86	1,48
4,0	10,0	W 530 x 85,0	90407,95	93645,10	97%	193,41	308,81	63%	63%	48375,00	52607,36	92%	2,86	1,40
2,0	12,0	W 460 x 74,0	59057,46	74945,74	79%	118,44	232,84	51%	51%	35561,25	41598,29	85%	3,43	2,08
2,5	12,0	W 410 x 85,0	72061,84	78670,87	92%	147,47	256,23	58%	58%	44268,75	46046,17	96%	3,43	2,68
3,0	12,0	W 460 x 89,0	91213,84	91511,26	100%	175,97	274,59	64%	64%	52818,75	55501,96	95%	3,43	2,51
3,5	12,0	W 530 x 92,0	107342,83	107603,50	100%	204,39	307,03	67%	67%	61346,25	65909,74	93%	3,43	2,21
4,0	12,0	W 610 x 101,0	129047,36	130715,73	99%	233,27	329,75	71%	71%	70008,75	86196,54	81%	3,43	1,84
2,0	14,0	W 530 x 92,0	76282,75	107603,50	71%	139,74	307,03	46%	46%	48943,13	51021,19	96%	4,00	2,34
2,5	14,0	W 530 x 101,0	98054,31	119013,44	82%	173,43	330,45	52%	52%	60733,75	60916,92	100%	4,00	2,58
3,0	14,0	W 610 x 113,0	123538,39	148755,77	83%	207,38	384,27	54%	54%	72616,25	85777,99	85%	4,00	2,22
3,5	14,0	W 610 x 113,0	143135,59	148755,77	96%	240,28	384,27	63%	63%	84131,25	85777,99	98%	4,00	2,56
4,0	14,0	W 610 x 140,0	175780,45	188236,54	93%	275,54	455,59	60%	60%	96473,13	116165,64	83%	4,00	2,28

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela D5 – Verificações das vigas em alma cheia – contenção contínua

dv (m)	L(m)	Alma Cheia									
		Perfil		Plastificação da seção				Cortante		Flecha	
		Msd (kN.cm)	MRd (kN.cm)	Sd/Rd	Vsd (kN)	VRd (kN)	Sd/Rd	Limite (cm)	Cálculo (cm)		
2,0	6,0	W 310 x 28,3	8619,19	12921,82	67%	57,46	348,89	16%	1,71	1,67	
2,5	6,0	W 310 x 32,7	10758,94	15220,77	71%	71,73	388,75	18%	1,71	1,70	
3,0	6,0	W 360 x 32,9	12875,06	17174,73	75%	85,83	380,92	23%	1,71	1,64	
3,5	6,0	W 410 x 38,8	15023,25	23108,73	65%	100,16	480,54	21%	1,71	1,25	
4,0	6,0	W 410 x 38,8	17138,25	23108,73	74%	114,26	480,54	24%	1,71	1,43	
2,0	8,0	W 410 x 38,8	15428,00	23108,73	67%	77,14	480,54	16%	2,29	2,24	
2,5	8,0	W 410 x 46,1	19261,00	27948,14	69%	96,31	530,86	18%	2,29	2,27	
3,0	8,0	W 460 x 52,0	23080,00	34371,41	67%	115,40	643,58	18%	2,29	2,05	
3,5	8,0	W 460 x 60,0	26920,00	40524,95	66%	134,60	684,98	20%	2,29	1,99	
4,0	8,0	W 460 x 60,0	30680,00	40524,95	76%	153,40	684,98	22%	2,29	2,27	
2,0	10,0	W 460 x 60,0	24437,50	40524,95	60%	97,75	684,98	14%	2,86	2,84	
2,5	10,0	W 530 x 66,0	30406,25	48864,55	62%	121,63	879,28	14%	2,86	2,59	
3,0	10,0	W 530 x 72,0	36375,00	54557,88	67%	145,50	887,47	16%	2,86	2,71	
3,5	10,0	W 530 x 82,0	42406,25	64562,05	66%	169,63	943,92	18%	2,86	2,65	
4,0	10,0	W 530 x 92,0	48437,50	74011,91	65%	193,75	1023,07	19%	2,86	2,61	
2,0	12,0	W 530 x 82,0	35685,00	64562,05	55%	118,95	943,92	13%	3,43	3,24	
2,5	12,0	W 530 x 92,0	44370,00	74011,91	60%	147,90	1023,07	14%	3,43	3,38	
3,0	12,0	W 610 x 101,0	53032,50	91666,50	58%	176,78	1191,47	15%	3,43	2,96	
3,5	12,0	W 610 x 101,0	61492,50	91666,50	67%	204,98	1191,47	17%	3,43	3,43	
4,0	12,0	W 610 x 113,0	70222,50	103904,59	68%	234,08	1281,44	18%	3,43	3,42	
2,0	14,0	W 610 x 101,0	49153,13	91666,50	54%	140,44	1191,47	12%	4,00	3,77	
2,5	14,0	W 610 x 113,0	61035,63	103904,59	59%	174,39	1281,44	14%	4,00	3,98	
3,0	14,0	W 610 x 140,0	73377,50	130883,59	56%	209,65	1521,02	14%	4,00	3,84	
3,5	14,0	W 610 x 155,0	85351,88	148949,05	57%	243,86	1460,23	17%	4,00	3,88	
4,0	14,0	W 610 x 174,0	97448,75	168839,86	58%	278,43	1622,88	17%	4,00	3,88	

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela D6 – Verificações das vigas Litzka – contenção contínua

dv (m)	L(m)	Perfil	Litzka											
			Plastificação da seção transversal					Cortante					Flecha	
			MSd (kN.cm)	MRd (kN.cm)	Sd/Rd	Sd/Rd	VRd (kN)	VRd (kN)	Sd/Rd	Limite (cm)	Cálculo (cm)			
2,0	6,0	W 310 x 21,0	12805,20	12819,64	100%	57,19	75,91	75%	1,71	1,09				
2,5	6,0	W 310 x 32,7	20814,42	21731,63	96%	71,73	115,84	62%	1,71	0,83				
3,0	6,0	W 410 x 38,8	29556,78	32824,16	90%	86,06	113,09	76%	1,71	0,56				
3,5	6,0	W 410 x 46,1	38212,30	39921,66	96%	100,43	146,24	69%	1,71	0,54				
4,0	6,0	W 460 x 52,0	44032,95	49469,75	89%	114,75	168,09	68%	1,71	0,47				
2,0	8,0	W 410 x 38,8	26803,01	32824,16	82%	77,14	113,09	68%	2,29	1,07				
2,5	8,0	W 410 x 46,1	36689,06	39921,66	92%	96,31	146,24	66%	2,29	1,11				
3,0	8,0	W 460 x 52,0	44320,56	49469,75	90%	115,40	168,09	69%	2,29	0,99				
3,5	8,0	W 460 x 60,0	57841,23	57937,73	100%	134,60	193,44	70%	2,29	0,98				
4,0	8,0	W 530 x 66,0	61537,79	69823,94	88%	153,70	232,52	66%	2,29	0,82				
2,0	10,0	W 410 x 46,1	38246,19	39921,66	96%	96,88	146,24	66%	2,86	2,06				
2,5	10,0	W 460 x 52,0	47967,73	49469,75	97%	120,75	168,09	72%	2,86	1,90				
3,0	10,0	W 530 x 66,0	59544,92	69823,94	85%	145,13	232,52	62%	2,86	1,41				
3,5	10,0	W 530 x 66,0	69186,99	69823,94	99%	168,63	232,52	73%	2,86	1,64				
4,0	10,0	W 530 x 85,0	90361,08	93645,10	96%	193,31	308,81	63%	2,86	1,40				
2,0	12,0	W 460 x 52,0	49329,89	49469,75	100%	116,70	168,09	69%	3,43	3,07				
2,5	12,0	W 460 x 68,0	67299,48	68080,20	99%	146,10	234,88	62%	3,43	2,79				
3,0	12,0	W 530 x 74,0	78862,19	80068,19	98%	174,75	286,98	61%	3,43	2,43				
3,5	12,0	W 530 x 92,0	106066,31	107603,50	99%	204,30	307,03	67%	3,43	2,21				
4,0	12,0	W 610 x 101,0	128991,11	130715,73	99%	233,18	329,75	71%	3,43	1,84				
2,0	14,0	W 530 x 66,0	63810,78	69823,94	91%	137,38	232,52	59%	4,00	3,44				
2,5	14,0	W 530 x 82,0	89569,10	92238,67	97%	171,68	278,70	62%	4,00	3,28				
3,0	14,0	W 530 x 101,0	116941,57	119013,44	98%	206,24	330,45	62%	4,00	2,50				
3,5	14,0	W 610 x 113,0	143069,96	148755,77	96%	240,19	384,27	63%	4,00	2,56				
4,0	14,0	W 610 x 140,0	175714,83	188236,54	93%	275,45	455,59	60%	4,00	2,32				

(fonte: elaborada pelo autor)

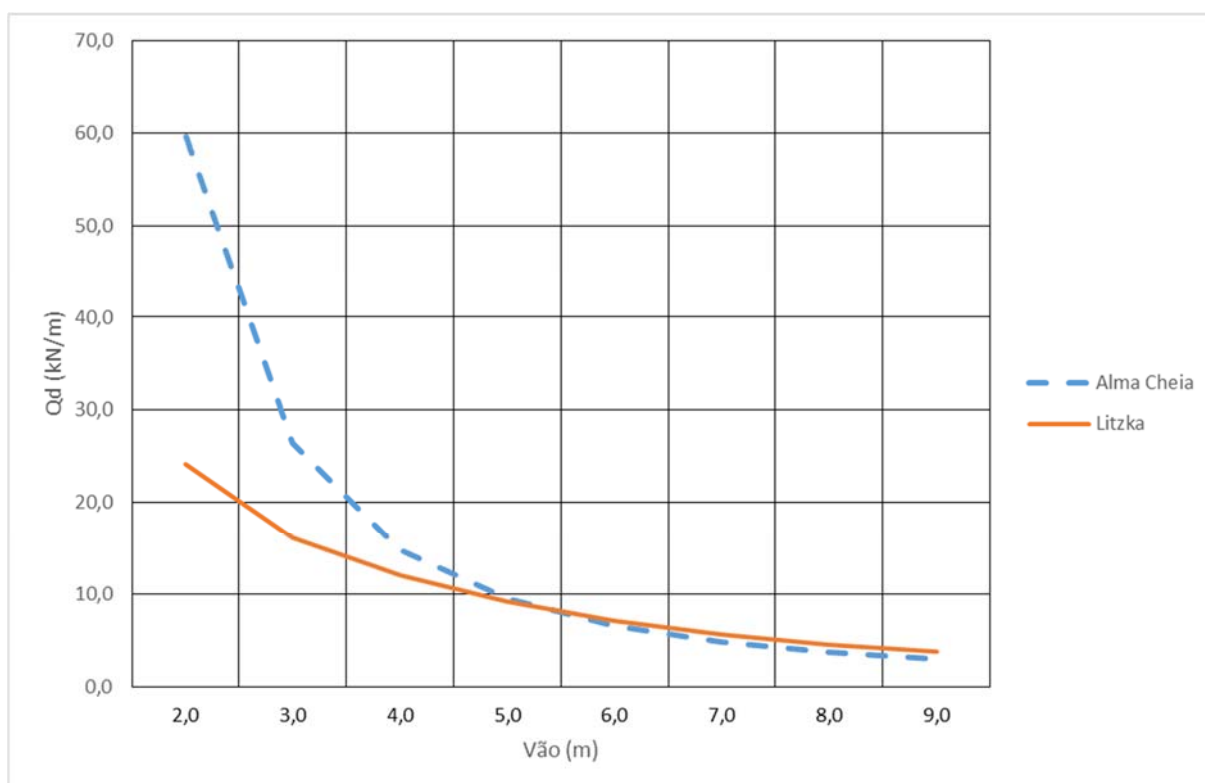
**APÊNDICE E– Análise do comportamento estrutural: plastificação da  
seção transversal**

Tabela E1 – Comparativo plastificação da seção transversal para vigas alveolares e de alma cheia – W150x13,0

Vão (m)	Alma Cheia	Litzka	$\Delta Qd$ (%)
	Qd (kN/m)	Qd (kN/m)	
2,0	59,6	24,2	-59%
3,0	26,5	16,1	-39%
4,0	14,9	12,1	-19%
5,0	9,5	9,2	-3%
6,0	6,6	7,2	9%
7,0	4,9	5,7	17%
8,0	3,7	4,6	23%
9,0	2,9	3,8	28%

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura E1 – Comparativo plastificação da seção transversal para vigas alveolares e de alma cheia – W150x13,0



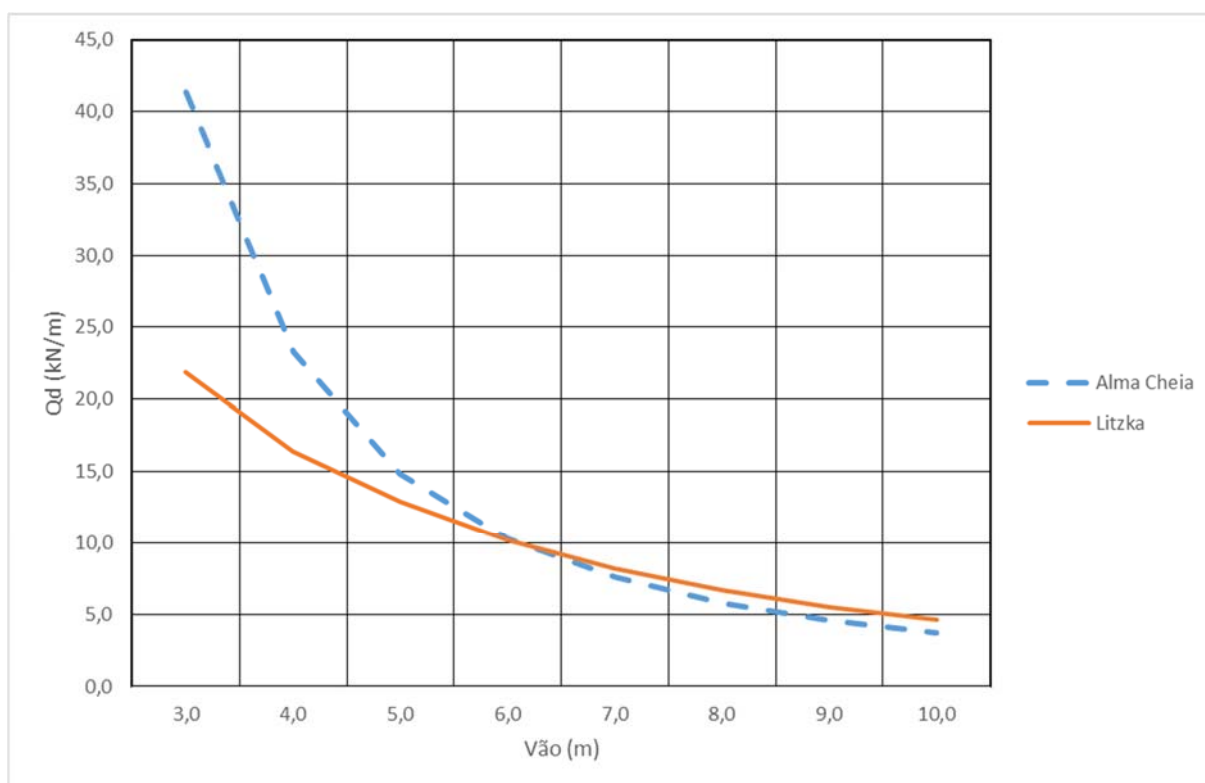
(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela E2 – Comparativo plastificação da seção transversal para vigas alveolares e de alma cheia – W200x15,0

Vão (m)	Alma Cheia	Litzka	$\Delta Qd$ (%)
	Qd (kN/m)	Qd (kN/m)	
3,0	41,3	21,9	-47%
4,0	23,3	16,4	-29%
5,0	14,9	12,9	-13%
6,0	10,3	10,2	-1%
7,0	7,6	8,2	8%
8,0	5,8	6,7	15%
9,0	4,6	5,5	20%
10,0	3,7	4,6	24%

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura E2 – Comparativo plastificação da seção transversal para vigas alveolares e de alma cheia – W200x15,0



(fonte: elaborada pelo autor)

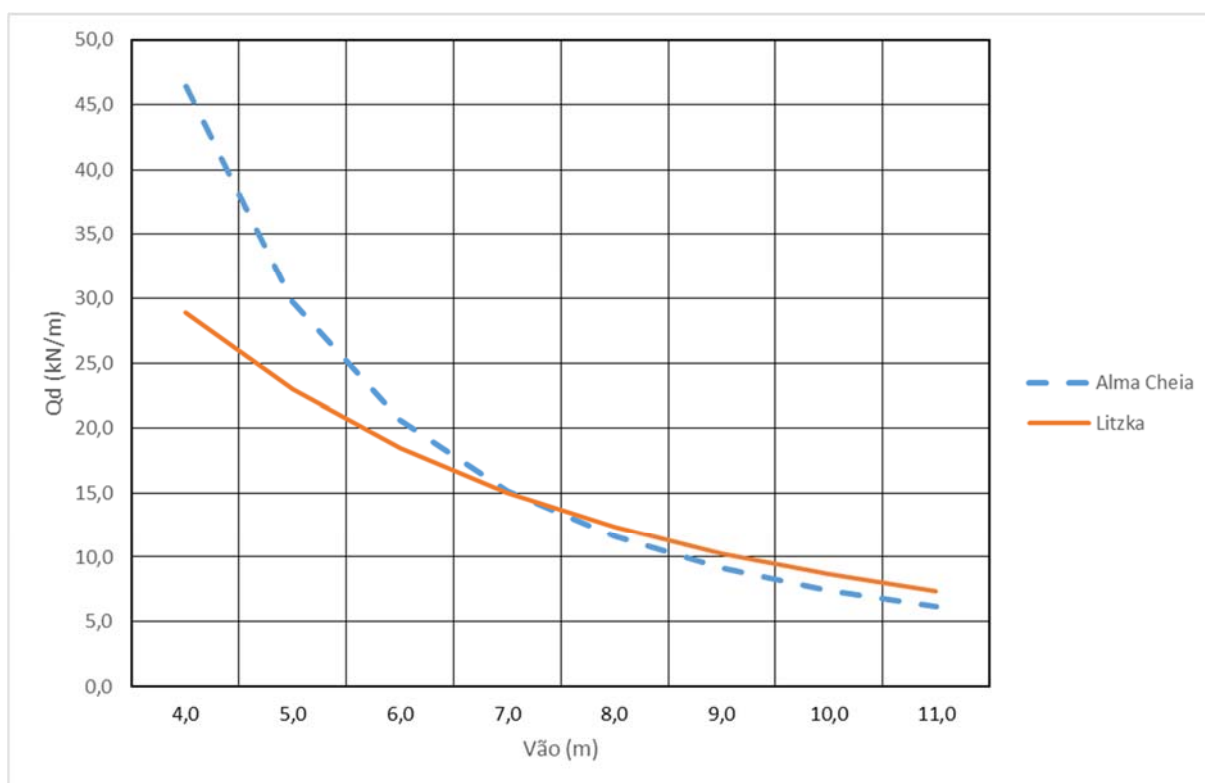


Tabela E3 – Comparativo plastificação da seção transversal para vigas alveolares e de alma cheia – W310x21,0

Vão (m)	Alma Cheia	Litzka	$\Delta Qd$ (%)
	Qd (kN/m)	Qd (kN/m)	
4,0	46,4	28,9	-38%
5,0	29,7	23,0	-23%
6,0	20,6	18,5	-10%
7,0	15,2	15,0	-1%
8,0	11,6	12,3	6%
9,0	9,2	10,3	12%
10,0	7,4	8,6	16%
11,0	6,1	7,4	20%

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura E3 – Comparativo plastificação da seção transversal para vigas alveolares e de alma cheia – W310x21,0



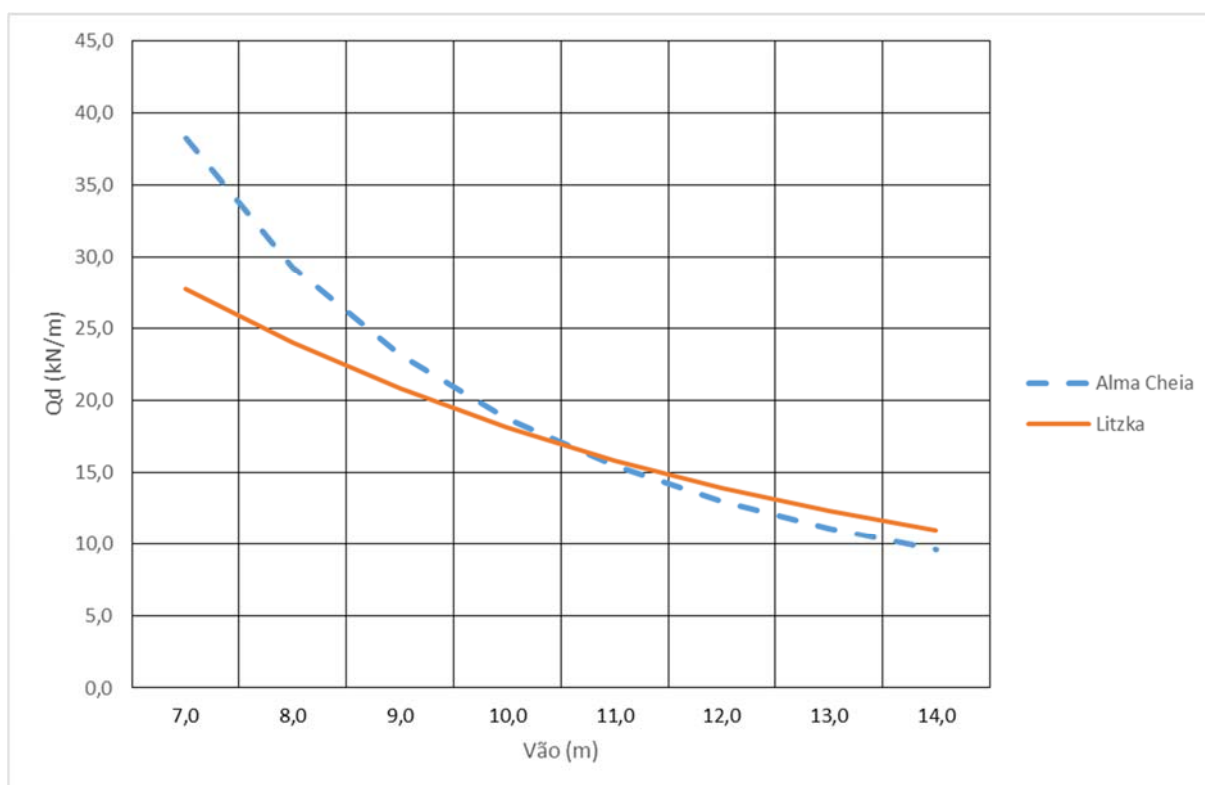
(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela E4 – Comparativo plastificação da seção transversal para vigas alveolares e de alma cheia – W410x38,8

Vão (m)	Alma Cheia	Litzka	$\Delta Qd$ (%)
	Qd (kN/m)	Qd (kN/m)	
7,0	38,2	27,7	-28%
8,0	29,3	24,0	-18%
9,0	23,1	20,8	-10%
10,0	18,7	18,1	-3%
11,0	15,5	15,8	2%
12,0	13,0	13,9	7%
13,0	11,1	12,3	11%
14,0	9,6	11,0	15%

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura E4 – Comparativo plastificação da seção transversal para vigas alveolares e de alma cheia – W410x38,8



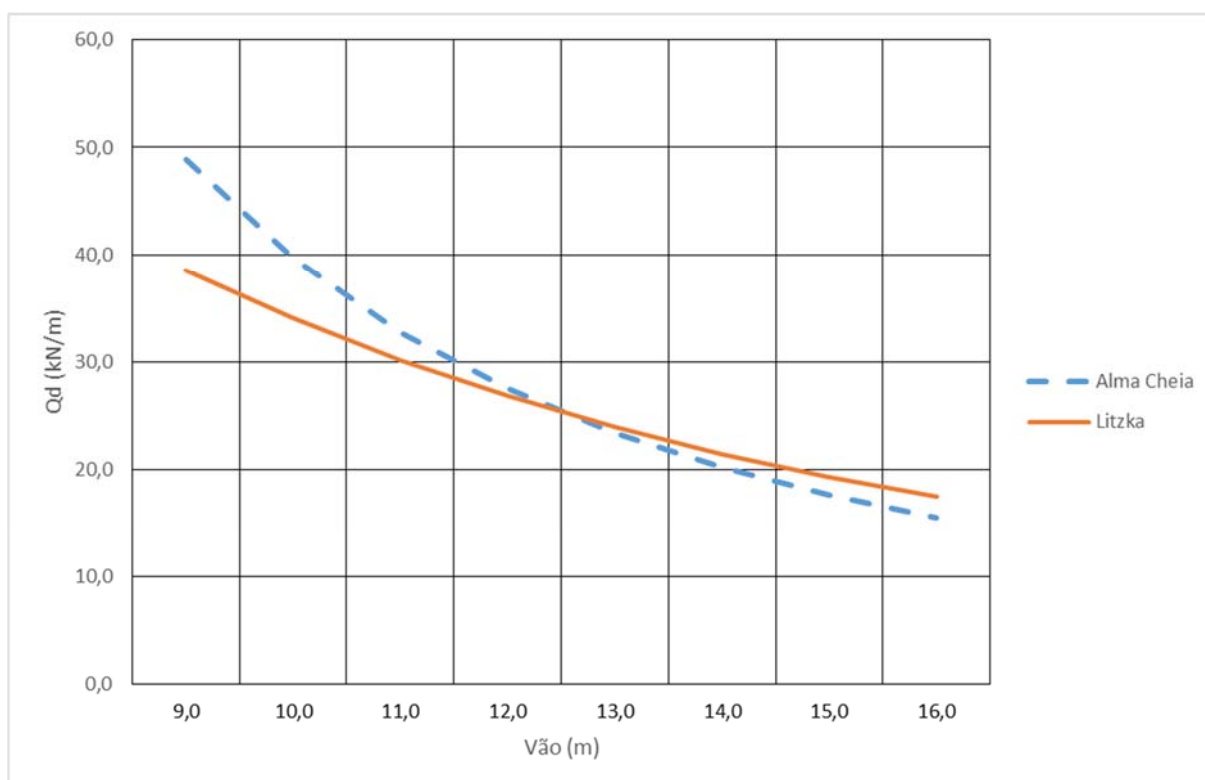
(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela E5 – Comparativo plastificação da seção transversal para vigas alveolares e de alma cheia – W510x66,0

Vão (m)	Alma Cheia	Litzka	$\Delta Qd$ (%)
	Qd (kN/m)	Qd (kN/m)	
9,0	48,9	38,5	-21%
10,0	39,6	34,0	-14%
11,0	32,7	30,2	-8%
12,0	27,5	26,8	-2%
13,0	23,4	24,0	2%
14,0	20,2	21,5	6%
15,0	17,6	19,3	10%
16,0	15,5	17,4	13%

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura E5 – Comparativo plastificação da seção transversal para vigas alveolares e de alma cheia – W510x66,0



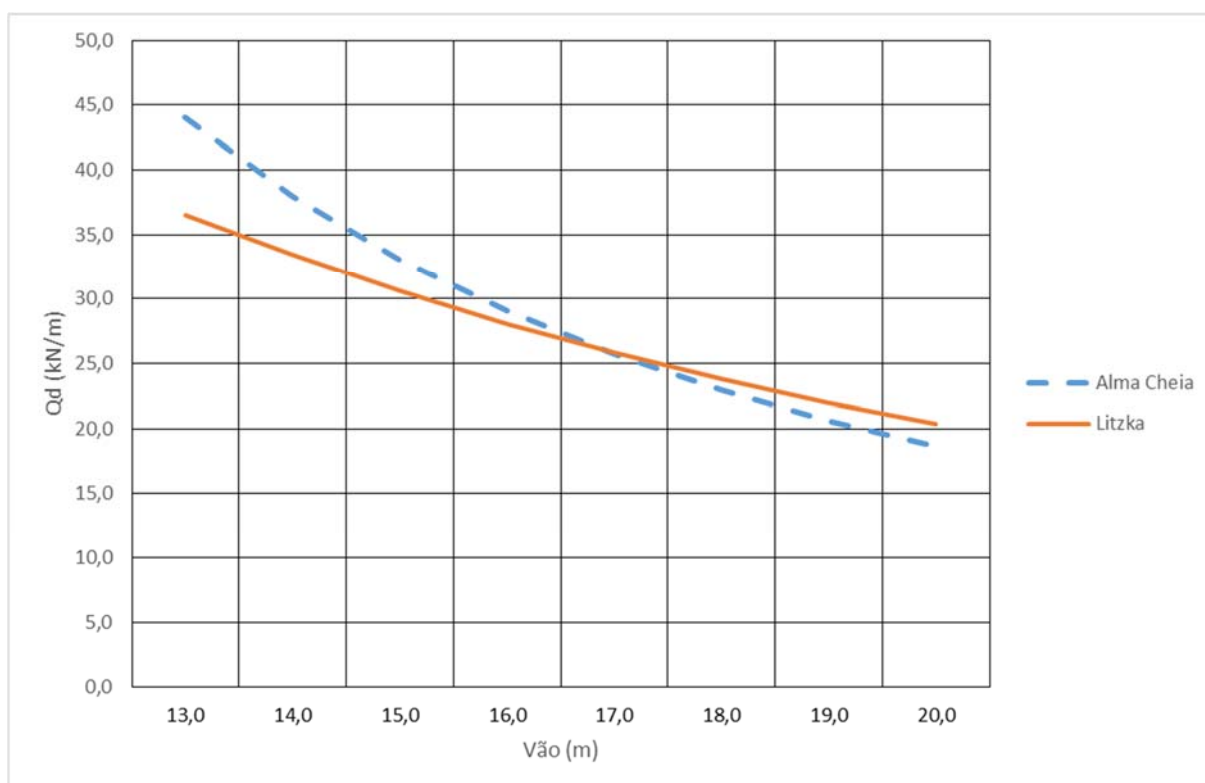
(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela E6 – Comparativo plastificação da seção transversal para vigas alveolares e de alma cheia – W610x101,0

Vão (m)	Alma Cheia	Litzka	$\Delta Qd$ (%)
	Qd (kN/m)	Qd (kN/m)	
13,0	44,0	36,5	-17%
14,0	38,0	33,4	-12%
15,0	33,1	30,6	-7%
16,0	29,1	28,1	-3%
17,0	25,7	25,8	0%
18,0	23,0	23,8	4%
19,0	20,6	22,0	7%
20,0	18,6	20,3	9%

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura E6 – Comparativo plastificação da seção transversal para vigas alveolares e de alma cheia – W610x101,0



(fonte: elaborada pelo autor)

## **APÊNDICE F– Planilhas de dimensionamento das vigas metálicas**

Figura F1 – Planilha de dimensionamento das vigas metálicas de alma cheia

ENTRADA DE DADOS	
Perfil	W 360 x 44,0
Carregamento / Vão	
ppm [kN/m]	0,44
ppd [kN/m]	8,75
q [kN/m]	7,50
L [cm]	600,00
Lb [cm]	600,00
Propriedades do Aço	
Aço	AR350
E [kN/cm <sup>2</sup> ]	20000
Coeficientes de Ponderação	
$\gamma_{a1}$	1,10
$\gamma_c$	1,40
$\gamma_q$	1,25
$\gamma_q$	1,50
$\Psi_2$	0,60
Cargas de Cálculo	
Qd [kN/m] - ELU	24,05
Qd [kN/m] - ELS	13,69

VERIFICAÇÃO DA RUPTURA - ELU - Combinação Normal			
Plastificação da Seção			
Resistências		Solicitações	
MRd [kN.cm]	24598,50	MSd [kN.cm]	10822,50
VRd [kN]	457,06	VSD [kN]	72,15
Condição - Momento Fletor		Perfil adequado	
Condição - Esforço Cortante		Perfil adequado	
Flambagem Lateral com Torção			
Resistências		Solicitações	
MRd [kN.cm]	11148,48	MSd [kN.cm]	10822,50
Condição - Momento Fletor		Perfil adequado	

VERIFICAÇÃO DA FLECHA - ELS - Combinação Quase Permanente	
Deslocamento Admissível - [cm]	1,71
Deslocamento Real - [cm]	0,94
Condição	
Perfil Adequado	

Estimativa de Consumo de Aço	
Perfil	W 360 x 44,0
pp [kgf/m]	44
L [cm]	600
Peso Final [kgf]	264,00

Coeficientes de Ponderação da Resistência - $\gamma_a$		
Combinações	Aço Estrutural	
	Escoamento/Flambagem/Instabilidade	Ruptura [ $\gamma_{a2}$ ]
Normais	1,10	1,35
Especiais/Construção	1,10	1,35
Excepcionais	1,00	1,15

Tensão de Escoamento e Ruptura dos Aços Estruturais			
Tipo	ASTM	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_u$ (kN/cm <sup>2</sup> )
MR250	A36	25,0	40,0
AR290	A572G42	29,0	41,5
AR350	A572G50	34,5	45,0
AR 350 COR	A588	35,0	48,5
AR415	A572G60	41,5	52,0

COMBINAÇÕES UTILIZADAS	
ELU - Combinação Normal	
$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} \times F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} \times F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \times \Psi_{0j} \times F_{Qj,k})$	
ELS - Combinação Quase Permanente	
$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=1}^n (\Psi_{2j} \times F_{Qj,k})$	

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura F2 – Planilha de dimensionamento das vigas metálicas de alveolares

ENTRADA DE DADOS	
Perfil	W 360 x 44,0
Razão de Expansão	1,5
Tipo	Litzka
Carregamento / Vão	
ppm [kN/m]	0,44
ppd [kN/m]	10,50
q [kN/m]	9,00
L [cm]	600,00
Lb [cm]	600,00
Propriedades do Aço	
Aço	AR350
E [kN/cm <sup>2</sup> ]	20000
G [kN/cm <sup>2</sup> ]	7700
Coeficientes de Ponderação	
γa1	1,10
γc	1,40
γg	1,25
γq	1,50
Ψ2	0,60
Cargas de Cálculo	
Qd [kN/m] - ELU	28,75
Qd [kN/m] - ELS	16,34

VERIFICAÇÃO DA RUPTURA - ELU - Combinação Normal			
Plastificação da Seção			
Resistências		Solicitações	
MRd [kN.cm]	35489,05	MSd [kN.cm]	33279,18
VRd [kN]	137,93	VSd [kN]	86,25
Condição - Momento Fletor		Perfil adequado	
Condição - Cortante		Perfil adequado	
Flambagem Lateral com Torção			
Resistências		Solicitações	
MRd [kN.cm]	13799,30	MSd [kN.cm]	12937,50
Condição - Momento Fletor		Perfil adequado	

VERIFICAÇÃO DA FLECHA - ELS - Combinação Quase Permanente	
Deslocamento Admissível - [cm]	1,71
Deslocamento Real - [cm]	0,59
Condição	
Perfil Adequado	

Estimativa de Consumo de Aço	
Perfil	W 360 x 44,0
pp [kgf/m]	44
L [cm]	600
Peso Final [kgf]	282,46

Coeficientes de Ponderação da Resistência - γa		
Combinações	Aço Estrutural	
	Escoamento/Flambagem/Instabilidade	Ruptura [γa2]
Normais	1,10	1,35
Especiais/Construção	1,10	1,35
Excepcionais	1,00	1,15

Tensão de Escoamento e Ruptura dos Aços Estruturais			
Tipo	ASTM	f <sub>y</sub> (kN/cm <sup>2</sup> )	f <sub>u</sub> (kN/cm <sup>2</sup> )
MR250	A36	25,0	40,0
AR290	A572G42	29,0	41,5
AR350	A572G50	34,5	45,0
AR 350 COR	A588	35,0	48,5
AR415	A572G60	41,5	52,0

COMBINAÇÕES UTILIZADAS	
ELU - Combinação Normal	
$Fd = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} \times F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} \times F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \times \Psi_{0j} \times F_{Qj,k})$	
ELS - Combinação Quase Permanente	
$Fser = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=1}^n (\Psi_{2j} \times F_{Qj,k})$	

(fonte: elaborada pelo autor)