

UNIVERSIDADE FUMEC
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - FEA

Alencar Fialho Ferreira

**ESTUDO COMPARATIVO, ANALÍTICO E NUMÉRICO DO COMPORTAMENTO
DE PERFIS DE AÇO ALVEOLARES COM PERFIS DE ALMA CHEIA PARA USO
COMO VIGAS DE COBERTURA**

Prof. Orientador: Me. Oswaldo Teixeira Baião Filho

Prof.^a Coorientadora: Dra. Jamile Salim Fuina

Belo Horizonte

Julho/2018

Alencar Fialho Ferreira

**ESTUDO COMPARATIVO, ANALÍTICO E NUMÉRICO DO COMPORTAMENTO
DE PERFIS DE AÇO ALVEOLARES COM PERFIS DE ALMA CHEIA USO COMO
VIGAS DE COBERTURA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade Fumec, como requisito parcial para a conclusão do Curso de Mestrado Profissional em Processos Construtivos.

Prof. Orientador: Me. Oswaldo Teixeira Baião Filho

Prof^a. Coorientadora: Dra. Jamile Salim Fuina

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F383e Ferreira, Alencar Fialho, 1981 -
Estudo comparativo, analítico e numérico do comportamento de perfis de aço alveolares com perfis de alma cheia para uso como vigas de cobertura / Alencar Fialho Ferreira. – Belo Horizonte, 2018.
104 f. : il. ; 29,7 cm

Orientador: Oswaldo Teixeira Baião Filho

Coorientadora: Jamile Salim Fuina

Dissertação (Mestrado em Processos Construtivos),
Universidade FUMEC, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Belo Horizonte, 2018.

1. Engenharia civil - Brasil. 2. Vigas. 3. Otimização estrutural - Brasil. I. Título. II. Baião Filho, Oswaldo Teixeira. III. Fuina, Jamile Salim. IV. Universidade FUMEC, Faculdade de Engenharia e Arquitetura.

CDU: 624.014

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Universitária-FUMEC

Belo Horizonte

Julho/2018



Universidade Fumec
Faculdade de Engenharia e Arquitetura
Curso de Mestrado Profissional em Processos Construtivos -
FEA/FUMEC

Dissertação intitulada “*Estudo Comparativo, Analítico e Numérico do Comportamento de Perfis de Aço Alveolares com Perfis de Alma Cheia para uso como Vigas de Cobertura*”, de autoria do mestrando *Alencar Fialho Ferreira*, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

Prof. Me. Oswaldo Teixeira Baião Filho – Universidade FUMEC
(Orientador)

Profa. Dra. Jamile Salim Fuina – Universidade FUMEC
(Coorientadora)

Prof. Dr. Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco – Universidade FUMEC

Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Prof. Dr. Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco – Universidade FUMEC
Coordenador do curso de Mestrado Profissional em Processos construtivos
Universidade FEA/FUMEC

Belo Horizonte, 09 de julho de 2018.
Rua Cobre, 200. Bairro Cruzeiro CEP: 30.310-190. Belo Horizonte / MG. 31 3228-3000

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por permitir que eu tenha conquistado mais uma etapa de tantas que almejo alcançar na vida.

Agradeço especialmente ao meu pai José Eustáquio Ferreira e minha mãe Maria Imaculada Fialho Ferreira por terem acreditado em minha capacidade e por me apoiar incondicionalmente durante toda minha vida acadêmica.

Sou grato a minha esposa Simone Terezinha Meurer, que com paciência e perseverança esteve ao meu lado quando precisei e, me deixou sozinho quando esta era minha necessidade, me auxiliando durante este processo árduo, porém recompensador.

Por último e não menos importante agradeço aos meus orientadores: Professor Mestre Oswaldo Teixeira Baião Filho e Professora Doutora Jamile Salim Fuina que, com paciência e maestria, me guiaram, me corrigiram e compartilham muito do imenso saber técnico e acadêmico que ambos detêm, ajudando-me a desenvolver este trabalho.

RESUMO

Os sistemas construtivos em aço podem adotar vários tipos e formas de perfis para sua constituição. O presente estudo apresenta a comparação entre dois tipos de perfis: de alma cheia e alveolares aplicados como vigas de cobertura em galpões. Para efetuar a comparação, foram feitos estudos analíticos e numéricos sobre o comportamento estrutural dos perfis estudados. O estudo analítico teve como base o dimensionamento das vigas para os estado limite último e estado limite de serviço, conforme a NBR 8800 (ABNT,2008) - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, bem como outras normas citadas no estudo. Também foram utilizados os softwares *Visual Ventos*, *SAP2000* e planilhas elaboradas no programa *Microsoft Office Excel*. Após concluído o estudo analítico, foi possível efetuar a comparação estrutural entre os perfis, apontando qual tipo de colapso governou o dimensionamento dos perfis de alma cheia e perfis alveolares, possibilitando também o apontamento dos níveis de aproveitamento dos perfis em cada vão proposto para o galpão. Desta forma, também foi identificado o percentual de aço economizado quando se utiliza o perfil alveolar em comparação com o perfil de alma cheia. O estudo numérico foi realizado utilizando-se os programas *AutoCAD* e *SAP2000* empregando-se a teoria dos elementos finitos. Os resultados da análise apontaram distribuição de tensões uniformes nos perfis que não possuem aberturas na alma e um menor nível de deslocamentos verticais neste tipo de perfil, apesar dos perfis alveolares sofrerem maiores deslocamentos, seu comportamento estrutural atende os requisitos normativos impostos pela NBR 8800 (ABNT, 2008), apresentando economia significativa de aço quando aplicado à longos vãos. Desta forma, conclui-se que é viável, podendo ser bem vantajoso o emprego dos perfis alveolares para vigas de cobertura devido à menor quantidade de aço utilizada para sua fabricação e por atender aos parâmetros estabelecidos para o dimensionamento estrutural em estado limite último e estado limite de serviço.

Palavras-chave: Perfis alveolares. Perfis de alma cheia. Estudo analítico e numérico.

ABSTRACT

Steel structural systems are made of many different kind of steel shapes.

The aim of this dissertation is a theoretical study of the factors that affect the structural behavior of cellular beams, used as roof beams, with a comparative study of some models with different spans but subjected to same load conditions and safety coefficients to show the increase of resistance and the advantages of the use of cellular beams.

For this study, the load and resistance factors and some other criteria were based on the Brazilian standard ABNT NBR 8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios and others standards and specifications.

Although cellular beams are not so much used in Brazil, it is a very efficient structural system that allows the increase of resistance of solid web steel beams without the addition of more steel, as the rolled shape is just cut and welded in a different position resulting in an alveolar shape with a depth approximately 1,5 times the original shape.

The use of this type of construction is considered as a very economical and efficient system for roof beams in North America, Europe, Japan and Australia, where its use has been growing steadily over the past years.

In the conclusion its showed that, for the spans between 25 m and 40 m the cellular beams with its low steel consumption is a very good option for use in roof steel systems

Key words: Cellular beams. Solid web steel beams. Analytical-numerical study.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 - Estados limites, deslocamentos e deformações dos perfis de alma cheia	31
Quadro 2 - Estados limites, deslocamentos e deformações dos perfis alveolares	44
Figura 1 - Fator topográfico S_1	20
Figura 2 - Coeficiente de pressão externo nas paredes da edificação	22
Figura 3 - Coeficiente de pressão externo no telhado da edificação	24
Figura 4 - Força nocional	30
Figura 5 - Perfil de aço laminado de alma cheia tipo "I"	31
Figura 6 - Flambagem lateral com torção em perfil "I" de alma cheia	32
Figura 7 - Momento fletor resistente nominal para flambagem lateral com torção de perfil "I" fletido em relação ao eixo x	33
Figura 8 - Valores dos momentos para cálculo do fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme (C_b).....	34
Figura 9 - Momento fletor resistente nominal para flambagem local da alma de perfil "I" fletido em relação ao eixo x	35
Figura 10 - Momento fletor resistente nominal para flambagem local da mesa comprimida de perfil "I" fletido em relação ao eixo x.....	36
Figura 11 - Força cortante resistente nominal em função do parâmetro de esbeltez da alma (λ) de perfil "I" fletido em relação ao eixo x	37
Figura 12 - Condições de contorno e de carregamento para obtenção do deslocamento máximo.....	38
Figura 13 - Perfil alveolar	41
Figura 14 - Seção transversal do perfil "I" original, do perfil alveolado e do perfil "Tê" superior	41
Figura 15 - Dimensões de corte padrão Peiner	41
Figura 16 - Seções transversais e vista lateral do perfil alveolar padrão Peiner	42
Figura 17 - Viga padrão Peiner deformada com formação de rótula plástica	45
Figura 18 - Formação de rótula plástica devido a esforço de cisalhamento	47
Figura 19 - Colapso por mecanismo de Vierendeel	47
Figura 20 - Formação de rótula plástica devido a esforço de cisalhamento para geometria Peiner.....	47
Figura 21 - Flambagem lateral com torção.....	51
Figura 22 - Flambagem do montante da alma por cisalhamento	54
Figura 23 - Disposição simétrica do número de alvéolos pares em relação ao vão longitudinal (L_v)...58	
Figura 24 - Disposição simétrica do número de alvéolos ímpares em relação ao o vão longitudinal (L_v)	58

Figura 25 - Perda no comprimento longitudinal do perfil original devido ao processo de montagem do perfil alveolar.....	59
Figura 26 - Aproveitamento do comprimento longitudinal do perfil original após o processo de montagem do perfil alveolar com preenchimento de chapas de aço.....	59
Figura 27 - Fluxograma do processo de incrementos e iterações	62
Figura 28 - Modelo estrutural adotado e dimensões genéricas da estrutura em estudo	66
Figura 29 - Coeficientes de pressão externa sobre as paredes da edificação.....	69
Figura 30 - Coeficientes de pressão externa sobre as paredes da edificação.....	70
Figura 31 - Combinação dos coeficientes de pressão externa e interna sobre as paredes e telhado da edificação para vento a 0°	70
Figura 32 - Combinação dos coeficientes de pressão externa e interna sobre as paredes e telhado da edificação para vento a 90°	71
Figura 33 - Esforços resultantes com aplicação das combinações dos coeficientes de pressão externa e interna sobre as paredes e telhado da edificação para vento a 0°	71
Figura 34 - Esforços resultantes com aplicação das combinações dos coeficientes de pressão externa e interna sobre as paredes e telhado da edificação para vento a 90°	71
Figura 35 - Dimensionamento da viga do pórtico de alma cheia comprimento de 25 metros, perfil W530X66 (continua)	74
Figura 36 - Dimensionamento da viga do pórtico de alma cheia comprimento de 30 metros, perfil W530X82 (continua)	76
Figura 37 - Dimensionamento da viga do pórtico de alma cheia com comprimento de 35 metros Perfil W610X101 (continua).....	78
Figura 38 - Dimensionamento da viga do pórtico de alma cheia com comprimento de 40 metros Perfil W610X140	80
Figura 39 - Representação genérica das propriedades geométricas dos perfis alveolares e do perfil de alma cheia original.....	83
Figura 40 - Propriedades geométricas do perfil alveolar empregado no vão de 25 metros.....	85
Figura 41 - Propriedades geométricas do perfil alveolar empregado no vão de 30 metros.....	85
Figura 42 - Propriedades geométricas do perfil alveolar empregado no vão de 35 metros.....	86
Figura 43 - Propriedades geométricas do perfil alveolar empregado no vão de 40 metros.....	86
Figura 44 - Comparação de desempenho entre os perfis de alma cheia para os vãos com comprimentos de 25 a 40 metros	93
Figura 45 - Comparação de desempenho entre os perfis alveolares para os vãos com comprimentos de 25 a 40 metros	93
Figura 46 - Comparação de desempenho entre os perfis de alma cheia e perfis alveolares para os vãos de 25 a 40 metros.....	95

Figura 47 - Distribuição dos elementos finitos no contorno dos alvéolos das vigas de 30 e 35 metros	96
Figura 48 - Distribuição dos elementos finitos no contorno dos alvéolos das vigas de 25 e 40 metros	96
Figura 49 - Distribuição dos elementos finitos nos montantes de extremidade e cumeeira da viga de 25 metros.....	97
Figura 50 – Expectro da distribuição das tensões na viga alveolar com comprimento de 30 metros	99
Figura 51 - Expectro da distribuição das tensões na viga com preenchimento dos alvéolos com comprimento de 30 metros	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Coeficiente de pressão externo nas paredes da edificação.....	22
Tabela 2 - Coeficiente de pressão externo no telhado da edificação	23
Tabela 3 - Valores dos coeficientes de ponderação das resistências (γ_m).....	29
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do aço estrutural ASTM A572 Grau 50	30
Tabela 5 - Parâmetros de cálculo para o momento fletor nominal resistente aos colapsos de flambagem local das mesas e da alma de perfil “I” fletido em relação ao eixo x	36
Tabela 6 - Formulações e descrição das propriedades geométricas dos perfis alveolares (continua)....	43
Tabela 7 - Fator de modificação para o diagrama de momento fletor não uniforme (C_b) em função do diagrama de momento fletor no comprimento longitudinal destravado da viga (L_b).....	53
Tabela 8 - Aplicação da pressão dinâmica do vento na estrutura	68
Tabela 9 - Configurações das hipóteses de carregamento das estruturas	72
Tabela 10 - Esforços e deslocamentos obtidos através do programa <i>SAP2000</i> - Pórtico com viga de alma cheia comprimento de 25 metros, perfil W530X66.....	73
Tabela 11- Esforços e deslocamentos obtidos através do programa <i>SAP2000</i> - Pórtico com viga de alma cheia comprimento de 30 metros, perfil W530X82.....	75
Tabela 12 - Esforços e deslocamentos obtidos através do programa <i>SAP2000</i> - Pórtico com viga de alma cheia comprimento de 35 metros, perfil W610X101.....	77
Tabela 13 - Esforços e deslocamentos obtidos através do programa <i>SAP2000</i> - Pórtico com viga de alma cheia com comprimento de 40 metros, perfil W610X140	79
Tabela 14- Tabela de esforços e deslocamentos máximos - Pórticos de alma cheia com comprimentos de 25 a 40 metros	81
Tabela 15- Deslocamentos máximos e deslocamentos admissíveis - Pórticos de alma cheia comprimentos de 25 a 40 metros	81
Tabela 16 - Propriedades geométricas dos perfis de alma cheia de origem	83
Tabela 17 - Propriedades geométricas das vigas alveolares.....	84
Tabela 18 - Dimensionamento considerando o colapso por formação de mecanismo plástico devido ao momento fletor das vigas alveolares dos pórticos com comprimentos de 25 a 40 metros	87
Tabela 19 - Dimensionamento considerando o colapso de escoamento do montante da alma por cisalhamento das vigas alveolares dos pórticos com comprimentos de 25 a 40 metros	88
Tabela 20 - Dimensionamento considerando o colapso de escoamento do montante da alma por flexão das vigas alveolares dos pórticos com comprimentos de 25 a 40 metros.....	89
Tabela 21 - Dimensionamento considerando o colapso de flambagem do montante da alma das vigas alveolares dos pórticos com comprimentos de 25 a 40 metros (continua)	89

Tabela 22 - Dimensionamento para o colapso de flambagem lateral com torção da alma das vigas alveolares dos pórticos com comprimentos de 25 a 40 metros.....	91
Tabela 23 - Dimensionamento para o ELS das vigas dos pórticos alveolares com comprimentos de 25 a 40 metros (continua).....	91
Tabela 24 - Economia de aço dos perfis alveolares em relação aos perfis de alma cheia	94
Tabela 25 - Comparação entre os deslocamentos verticais das vigas alveolares e vigas com preenchimento dos alvéolos para a posição 1	98
Tabela 26 - Comparação entre os deslocamentos verticais das vigas alveolares e vigas com preenchimento dos alvéolos para a posição 2.....	98
Tabela 27 - Comparação entre os níveis de tensão normal máxima em relação ao eixo x atingidos nas vigas alveolares e vigas com preenchimento dos alvéolos.....	99

LISTA DE SIGLAS

AA	Apoiado-apoiado
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AL	Apoiados-livres
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	Carregamento Acidental
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CP	Carregamento Permanente
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
FLA	Flambagem Lateral da Alma
FLM	Flambagem Lateral da Mesa
FLT	Flambagem Lateral com Torção
FND	Força Nocial
PS	Perfil soldado
VE	Esforços resultantes do Vento

Sumário

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos.....	16
1.1.1 Geral	16
1.1.2 Específicos	16
1.2 Justificativa	17
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1 Ações atuantes nas estruturas	18
2.1.1 Ações permanentes.....	18
2.1.2 Ações variáveis	19
2.1.3 Coeficientes de ponderação das ações	24
2.1.4 Combinações de ações	25
2.2 Prescrições normativas quanto à resistência dos materiais construtivos	28
2.3 Prescrições normativas quanto ao deslocamento horizontal das estruturas	29
2.4 Perfis de alma cheia	30
2.4.1 Dimensionamento considerando a possibilidade de flambagem lateral com torção (FLT).....	32
2.4.2 Dimensionamento considerando a possibilidade de flambagem local da mesa (FLM) e flambagem local da alma (FLA)	35
2.4.3 Dimensionamento para esforço cortante	37
2.4.4 Verificação dos deslocamentos verticais em ELS	38
2.5 Vigas alveolares	39
2.5.1 Breve histórico	39
2.5.2 Geometria dos alvéolos.....	40
2.5.3 Dimensionamento de vigas construídas com perfis alveolares.....	44
2.5.4 Verificação da flecha no ELS.....	56
2.5.5 Determinação do vão de projeto para vigas alveolares.....	56
2.6 Não-linearidade pelo método dos elementos finitos.....	59
3 MATERIAIS E MÉTODOS	63

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
4.1 Parâmetros para o dimensionamento dos perfis.....	66
4.1.1 Generalidades	66
4.1.2 Determinação da pressão dinâmica do vento atuante sobre a estrutura	68
4.1.3 Determinação dos coeficientes de pressão interna e externa nas paredes e telhado das edificações e esforços resultantes das ações do vento	68
4.2 Determinação dos esforços e das combinações de cálculo para as estruturas.....	72
4.3 Dimensionamento dos perfis de alma cheia considerando o ELU	72
4.3.1 Dimensionamento dos perfis de alma cheia considerando o ELU para o vão de 25 metros	73
4.3.2 Dimensionamento dos perfis de alma cheia considerando o ELU para o vão de 30 metros	75
4.3.3 Dimensionamento dos perfis de alma cheia considerando o ELU para o vão de 35 metros	77
4.3.4 Dimensionamento dos perfis de alma cheia considerando o ELU para o vão de 40 metros	79
4.4 Dimensionamento dos perfis de alma cheia considerando o ELS.....	81
4.5 Dimensionamento dos perfis alveolares considerando ELU	82
4.5.1 Propriedades geométricas dos perfis alveolares e sua representação gráfica	82
4.5.2 Dimensionamento dos perfis alveolares considerando o colapso por formação de mecanismo plástico devido ao momento fletor	87
4.5.3 Dimensionamento dos perfis alveolares considerando o colapso de escoamento do montante da alma devido ao esforço de cisalhamento	88
4.5.4 Dimensionamento dos perfis alveolares para o colapso de escoamento do montante da alma por flexão	88
4.5.5 Dimensionamento dos perfis alveolares considerando o colapso de flambagem do montante da alma	89
4.5.6 Dimensionamento dos perfis alveolares considerando o colapso de flambagem lateral com torção da alma	90
4.6 Dimensionamento dos perfis alveolares considerando o ELS	91
4.7 Comparação do desempenho estrutural entre os perfis de alma cheia e os perfis alveolares com base nos resultados da verificação analítica	92
4.8 Parâmetros utilizados para definição da malha de elementos finitos dos perfis alveolares e perfis sem alvéolos	95

4.9 Comparação entre os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos aplicados às vigas alveolares e vigas com preenchimento dos alveolos.....97

5 CONCLUSÃO 101

1 INTRODUÇÃO

O estudo dos sistemas construtivos em aço vem se desenvolvendo para se obter estruturas mais leves, econômicas e que apresentem maior praticidade de montagem dentro do canteiro de obras. Desta forma, a comparação entre tipologias construtivas, que podem oferecer vantagem do ponto de vista de custos e do desempenho estrutural, contribui para a continuidade do desenvolvimento dos sistemas estruturais em aço.

O presente trabalho apresenta um estudo comparativo entre dois tipos de perfis empregados como vigas de pórtico, em sistemas de cobertura para galpões. Para efetuar a comparação entre os tipos de perfis: laminados de alma cheia e alveolares, foi desenvolvido um estudo analítico e numérico, juntamente com um levantamento baseado em fundamentos teóricos que indicaram qual o melhor tipo de perfil a ser empregado em cada um dos vãos para galpões tratados neste trabalho.

O trabalho descreve os materiais e métodos que orientaram a modelagem e análise via programa computacional *SAP2000* e segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas – (ABNT, 2008) sendo que os resultados foram comparados observando-se os seguintes aspectos: a) custo - foi avaliada a relação entre a quantidade de aço empregada por metro de viga construída; b) estrutural - foram verificados os principais tipos de estados limites que estes tipos de estrutura normalmente estão sujeitos.

Ao final do trabalho, apresenta-se o melhor tipo de perfil a ser utilizado para os intervalos de vãos propostos, apontando, então, o perfil mais eficaz, atendendo as demandas estruturais e apresentando menor custo para as vigas empregadas em cobertura.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Apresentar estudo comparativo do comportamento de perfis de alma cheia e perfis alveolares de aço para uso em vigas de coberturas, utilizando-se de métodos analíticos e numéricos.

1.1.2 Específicos

1) Obter o dimensionamento estrutural de vigas de cobertura utilizando os seguintes tipos de perfis de aço: de alma cheia e alveolar, desenvolvendo um estudo analítico;

- 2) obter resultados numéricos, via simulação computacional em análise não-linear, de vigas de cobertura construídas a partir dos seguintes tipos de perfis de aço: de alma cheia e alveolar;
- 3) apresentar as vantagens e desvantagens comparativas dos perfis de alma cheia e alveolares referentes ao comportamento estrutural e ao custo, quando aplicados a sistemas de cobertura.

1.2 Justificativa

O estudo de sistemas estruturais para coberturas, utilizando perfis de alma cheia e perfis alveolares de aço, busca identificar o tipo mais eficaz do ponto de vista estrutural e que apresente menor custo, podendo oferecer melhoramentos no estado da arte sobre essa temática e, conseqüentemente, aumento do desempenho estrutural e otimização de recursos.

Desta forma, o estudo pode ser considerado como fonte de pesquisas futuras, uma vez que são utilizadas ferramentas analíticas e numéricas que oferecem confiabilidade aos resultados alcançados.

Considera-se que o estudo das vigas alveolares é importante, uma vez que a utilização deste tipo de viga oferece diversos benefícios tais como: facilidade para passagem de dutos sem que haja redução significativa na altura do espaço útil do pé direito, maiores níveis de resistência à flexão devido ao aumento da inércia utilizando-se menor quantidade de aço, além de aumentar a luminosidade e transmitir um aspecto de leveza ao ambiente, utilizando na sua fabricação processo com alto nível de automatização e confiabilidade (BRINKHUS, 2015 e BADKE-NETO; CALENZANI; FERREIRA, 2013)

Outro ponto que justifica o estudo é a comprovação de que a utilização de perfis alveolares como vigas de cobertura se mostra viável tecnicamente em relação ao outro tipo de perfil analisado para o mercado brasileiro, uma vez que este tipo de perfil é pouco difundido no Brasil e sua utilização é feita em larga escala na Europa e em países da América do Norte.

Sob o aspecto ambiental, o estudo se justifica, uma vez que, ao se comparar a quantidade de aço utilizada nos perfis alveolares e perfis de alma cheia para vencer os mesmos vãos demandados, conclui-se que há uma variação do consumo de aço e do processo de fabricação empregado. Esta variação de consumo de aço gera menor dano ao meio ambiente por reduzir a quantidade de insumos ou o número de processos para a fabricação do elemento construtivo quando se adota perfis alveolares.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será apresentada a revisão da literatura onde serão abordadas as prescrições normativas que orientam o dimensionamento de estruturas de aço mencionando as ações atuantes, os coeficientes de ponderação, combinações de esforços, propriedades geométricas dos perfis de alma cheia e alveolares, bem como as formulações para efetuar o dimensionamento destas tipologias de perfis.

2.1 Ações atuantes nas estruturas

Para efetuar o dimensionamento de uma estrutura construída em aço, devem ser seguidos os pressupostos apresentados pela NBR 8800 (ABNT, 2008) juntamente com as demais normas referenciadas.

Desta forma, este capítulo dedica-se a destacar os princípios normativos que orientam o dimensionamento das estruturas no que se referem às ações atuantes, coeficientes de ponderação das ações e resistência dos materiais que as compõe.

Também são abordadas as formulações que determinam as combinações de ações mais desfavoráveis que atuam sobre uma estrutura e que, por sua vez, dão origem aos esforços de momento fletor, cisalhamento, e esforços normais de compressão e tração para os quais é efetuado o dimensionamento.

2.1.1 Ações permanentes

As ações consideradas permanentes em uma edificação são aquelas que se mantem constantes durante quase todo tempo de vida útil da estrutura, conforme definido pela NBR 2008 (ABNT, 2008) as ações permanentes podem ser diretas ou indiretas.

a) Ações permanentes diretas

As ações permanentes diretas tratam dos carregamentos que atuam durante todo tempo de vida útil da estrutura, tais como: peso próprio da estrutura, peso dos equipamentos fixos e empuxo resultante de terras não removíveis.

As ações permanentes diretas são constituídas pelo peso próprio da estrutura e pelos pesos próprios dos elementos construtivos fixos e das instalações permanentes. Constituem também ação permanente os empuxos permanentes, causados por movimento de terra e de outros materiais granulosos quando forem admitidos não removíveis. (ABNT, 2008, p. 15.)

b) Ações permanentes indiretas

Ainda de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008) as ações permanentes indiretas são caracterizadas pela deformação devida à fluência e retração do concreto, e também devido às imperfeições dos elementos construtivos e deslocamentos dos apoios, representados em projeto como ligações entre os elementos construtivos.

Com relação as imperfeições geométricas das peças que constituem a estrutura, recomenda-se que seja adotada deformidade da ordem de $L/500$ quando a condição de contorno do elemento estrutural for apoiado em uma extremidade e livre em outra, e $L/1000$ quando sua condição de contorno apresentar apoio nas duas extremidades, onde L é o comprimento do elemento.

2.1.2 Ações variáveis

As ações variáveis ou cargas acidentais (F_{qk}) são assim denominadas porque variam de forma significativa em torno de sua média quando considerado o período de vida útil da estrutura, sendo predominantes os esforços relativos ao uso da edificação, ação do vento sobre os elementos de vedação e variação de temperatura dos materiais constituintes.

a) Considerações sobre as ações do vento

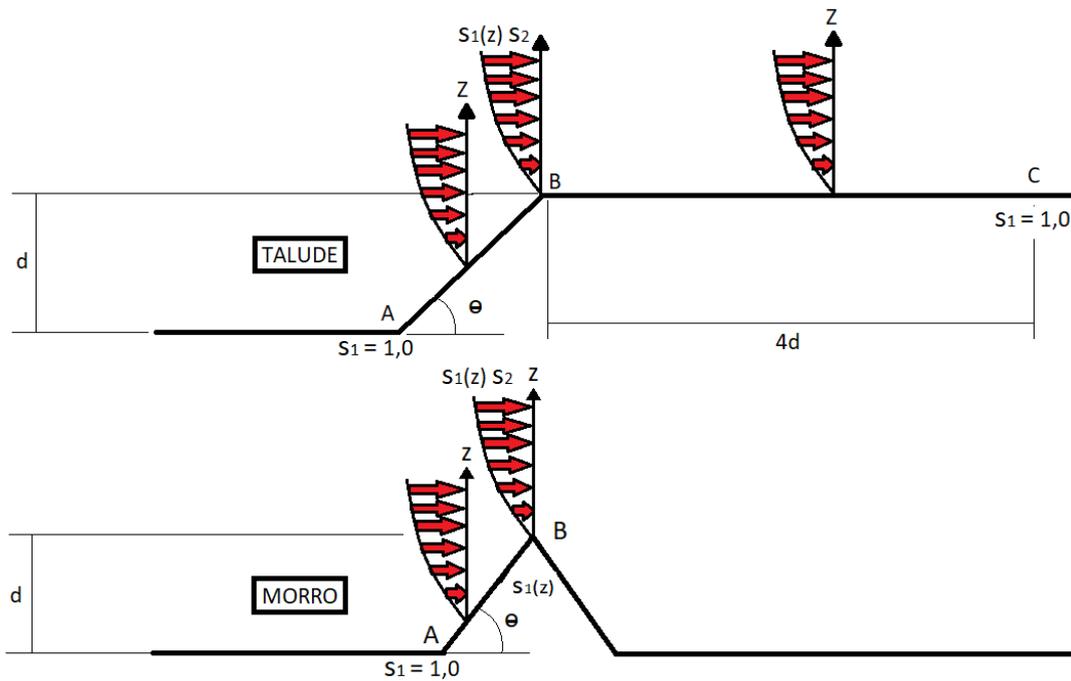
Conforme disposto pela NBR 6123 (ABNT, 1988) - Forças devidas ao vento em edificações, os esforços oriundos dos ventos produzem nas edificações efeitos de sobrepessão e sucção que devem ser considerados durante o processo de dimensionamento.

Para que estes esforços sejam mensurados de maneira que a estrutura não sofra ruína ou perda de desempenho, a norma orienta que a edificação seja enquadrada no plano geográfico, para obtenção da velocidade básica do vento (V_0), a qual a edificação está sujeita. Para obter a velocidade básica do vento recorre-se ao mapa de isopleias apresentado pela NBR 6123 (ABNT, 1988).

Para que a velocidade básica do vento possa ser convertida em velocidade característica do vento (V_k), e posteriormente em pressão dinâmica de vento (q) que, será aplicada durante o processo de dimensionamento, também devem ser obtidos os fatores S_1 , S_2 , S_3 .

O fator S_1 objetiva ponderar sobre a incidência do vento sobre a edificação baseando-se nas variações planialtimétricas do terreno onde se localiza a estrutura. A forma de obtenção do fator topográfico é demonstrada na figura 1.

Figura 1- Fator topográfico S_1



FONTE: Adaptado de ABNT (1988).

Onde:

$$\theta < 3^\circ \rightarrow S_1(z) = 1,00 \quad (1)$$

$$6^\circ \leq \theta < 17^\circ \rightarrow S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) \operatorname{tg}(\theta - 3^\circ) \geq 1,0 \quad (2)$$

$$\theta \geq 45^\circ \rightarrow S_1(z) = 1,0 + 0,31 \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) \geq 1,0 \quad (3)$$

Para os valores de θ entre 3° e 6° e entre 17° e 45° , e para os pontos entre A e B, e entre B e C, deve-se fazer interpolação linear (ABNT, 1988).

O fator S_2 leva em consideração o nível de rugosidade do terreno, as dimensões em planta e a altura da edificação acima do nível do terreno.

Este parâmetro pode variar entre 0,67 e 1,35, sendo que a NBR 6123 (ABNT, 1988) divide os tipos de terreno em cinco categorias: superfícies lisas de grandes dimensões, terrenos abertos e planos, terrenos ondulados com obstáculos, terrenos com obstáculos numerosos e terrenos com obstáculos numerosos e altos.

Também é aplicada a divisão quanto às dimensões em planta e altura, sendo três classes de enquadramento das estruturas:

- a) Face < 20m;
- b) $20m \geq \text{face} \leq 50m$;
- c) face > 50m.

Identifica-se o fator S_2 verificando-se a altura Z da edificação, medida a partir da superfície do terreno e cruzando os dados de enquadramento referentes à categoria e classe.

Por fim, obtém-se o fator S_3 , que é de cunho estatístico e relativo ao uso e aplicabilidade a qual a estrutura se destina, variando seu valor entre 0,83 e 1,10 (ABNT, 1988).

De acordo com a NBR 6123 (ABNT, 1988) calcula-se a pressão dinâmica exercida pelo vento (q) seguindo a formulação disposta pelas equações (4) e (5):

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (4)$$

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (5)$$

Onde,

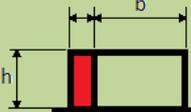
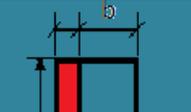
V_k é a velocidade característica do vento.

b) Coeficientes de forma externo para as paredes da edificação

A NBR 6123 (ABNT, 1988), descreve uma enorme gama de considerações sobre a aplicação dos coeficientes de forma externo para as edificações.

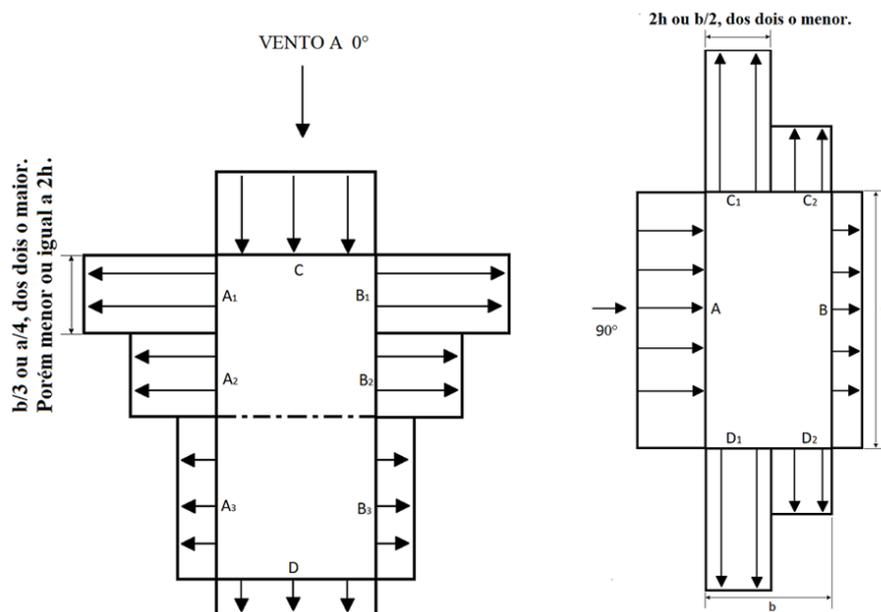
São abordados somente os parâmetros aplicáveis às estruturas de planta retangular e não-múltiplas, de acordo com o disposto na tabela 1, que, por sua vez, necessita do auxílio da figura 2, para identificar o coeficiente de pressão nas paredes da edificação.

Tabela 1- Coeficiente de pressão externo nas paredes da edificação

ALTURA RELATIVA	VALORES DE C_e PARA								C_{pe} MÉDIO
	$\alpha = 0^\circ$				$\alpha = 90^\circ$				
	A_1 e B_1	A_2 e B_2	C	D	A	B	C_1 e D_1	C_2 e D_2	
 $1 < \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-0,8	-0,5	+0,7	-0,4	+0,7	-0,4	-0,8	-0,4	-0,9
$0,2b$ ou h (o menor dos dois) $\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	-0,8	-0,4	+0,7	-0,3	+0,7	-0,5	-0,9	-0,5	-1,0
 $1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-0,9	-0,5	+0,7	-0,5	+0,7	-0,5	-0,9	-0,5	-1,1
$\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{2}{3}$	-0,9	-0,4	+0,7	-0,3	+0,7	-0,6	-0,9	-0,5	-1,1
 $1 < \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-1,0	-0,6	+0,8	-0,6	+0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-1,2
$\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6$	-1,0	-0,5	+0,8	-0,3	+0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-1,2

FONTE: Adaptado de ABNT (1988).

Figura 2 - Coeficiente de pressão externo nas paredes da edificação



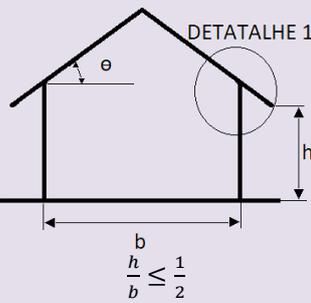
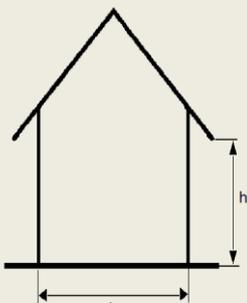
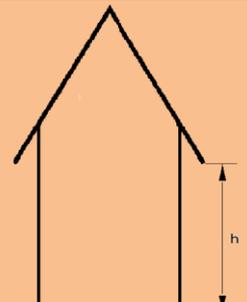
FONTE: Adaptado de ABNT (1988).

c) Coeficiente de forma externo para o telhado da edificação

De maneira análoga aos coeficientes de forma aplicados às paredes da edificação, para identificar os coeficientes de pressão no telhado da edificação também serão abordados somente os parâmetros aplicáveis às estruturas de planta retangular e não-múltiplas.

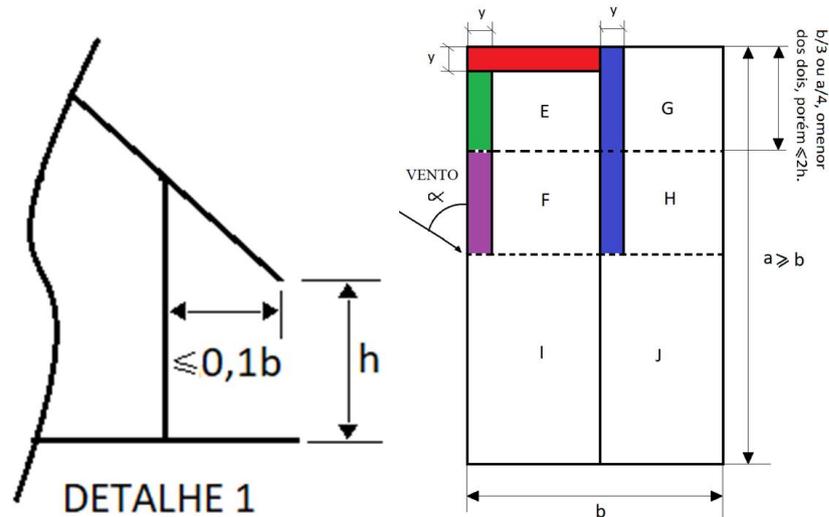
Portanto, para a obtenção destes coeficientes será utilizada a tabela 2, juntamente com a figura 3.

Tabela 2 - Coeficiente de pressão externo no telhado da edificação

ALTURA RELATIVA	θ	VALORES DE C_e PARA				C_{pe} MÉDIO			
		$\alpha = 90^\circ (A)$		$\alpha = 0^\circ$					
		EF	GH	EG	FH				
 <p>$\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$</p>	0°	-0,8	-0,4	-0,8	-0,4	-2,0	-2,0	-2,0	----
	5°	-0,9	-0,4	-0,8	-0,4	-1,4	-1,2	-1,2	-1,0
	10°	-1,2	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,4	----	-1,2
	15°	-1,0	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,2	----	-1,2
	20°	-0,4	-0,4	-0,7	-0,6	-1,0	----	----	-1,2
	30°	0	-0,4	-0,7	-0,6	-0,8	----	----	-1,1
	45°	+0,3	-0,5	-0,7	-0,6	----	----	----	-1,1
	60°	+0,7	-0,6	-0,7	-0,6	----	----	----	-1,1
 <p>$\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$</p>	0°	-0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-2,0	-2,0	-2,0	--
	5°	-0,9	-0,6	-0,9	-0,6	-2,0	-2,0	-1,5	-1,0
	10°	-1,1	-0,6	-0,8	-0,6	-2,0	-2,0	-1,5	-1,2
	15°	-1,0	-0,6	-0,8	-0,6	-1,8	-1,5	-1,5	-1,2
	20°	-0,7	-0,5	-0,8	-0,6	-1,5	-1,5	-1,5	-1,0
	30°	-0,2	-0,5	-0,8	-0,8	-1,0	----	----	-1,0
	45°	+0,2	-0,5	-0,8	-0,8	----	----	----	----
	60°	+0,6	-0,5	-0,8	-0,8	----	----	----	----
 <p>$\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6$</p>	0°	-0,8	-0,6	-0,9	-0,7	-2,0	-2,0	-2,0	--
	5°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-2,0	-2,0	-1,5	-1,0
	10°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-2,0	-2,0	-1,5	-1,2
	15°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-1,8	-1,8	-1,5	-1,2
	20°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-1,5	-1,5	-1,5	-1,2
	30°	-1,0	-0,5	-0,8	-0,7	-1,5	----	----	----
	45°	-0,2	-0,5	-0,8	-0,7	-1,0	----	----	----
	50°	+0,2	-0,5	-0,8	-0,7	----	----	----	----
	60°	+0,5	-0,5	-0,8	-0,7	----	----	----	----

FONTE: Adaptado de ABNT (1988).

Figura 3 - Coeficiente de pressão externo no telhado da edificação



FONTE: Adaptado de ABNT (1988).

d) Coeficiente de pressão interna

A NBR 6123 (ABNT, 1988), relaciona o coeficiente de pressão interna à permeabilidade da edificação, desta forma, são apresentadas várias possibilidades para a adoção destes coeficientes.

Este referencial bibliográfico tratará somente do caso em que duas faces da edificação, opostas entre si, são igualmente permeáveis, considerando as outras duas faces impermeáveis, desta forma, teremos os coeficientes de pressão interna (C_{pi}), determinados como:

- a) Vento perpendicular a uma face permeável $\rightarrow C_{pi} = +0,2$
- b) Vento perpendicular a uma face impermeável $\rightarrow C_{pi} = -0,3$

2.1.3 Coeficientes de ponderação das ações

Para que seja dimensionada uma estrutura metálica, a NBR 8800 (ABNT, 2008) prevê que sejam aplicados coeficientes de ponderação e de combinação sobre as ações que atuam sobre esta estrutura, estes coeficientes variam de acordo com a tipologia da ação e com a fase de construção, ou ainda de acordo com a excepcionalidade que esta ação atuará sobre a estrutura.

Quanto à tipologia da ação, a norma define que estas ações devem ser ponderadas pelo coeficiente (γ_f) que, por sua vez, é composto por três parcelas: referente à variabilidade,

simultaneidade de ocorrência e possibilidade de erro durante o processo de dimensionamento e execução da estrutura.

As parcelas de composição do coeficiente γ_f são descritas conforme a equação (6):

$$\gamma_f = \gamma_{f1}\gamma_{f2}\gamma_{f3} \quad (6)$$

Onde:

γ_{f1} é a parcela referente à variabilidade na qual a ação poderá atuar na estrutura;

γ_{f2} é a parcela referente à simultaneidade em que as ações atuam sobre a estrutura;

γ_{f3} é a parcela que considera a probabilidade de ocorrência de erros de modelagem, projeção e execução das estruturas.

O coeficiente γ_f é empregado de acordo com o Estado Limite Último (ELU) quando tratar-se da etapa de dimensionamento, podendo variar de acordo com a fase construtiva, a tipologia da ação que está sendo avaliada ou ainda o tipo de material empregado na construção.

O mesmo parâmetro apresenta variante quando é empregado para ação permanente ou variável, os diversos valores assumidos por este coeficiente são descritos pela NBR 8800 (ABNT, 2008).

2.1.4 Combinações de ações

Ainda conforme a NBR 8800 (ABNT, 2008), as estruturas devem ser dimensionadas à ruptura, obedecendo aos critérios do ELU que, por sua vez, considera que as ações atuantes sobre esta estrutura devem ser mensuradas individualmente e majoradas de acordo com sua natureza.

Assim, estas ações são combinadas de modo a culminarem em esforços horizontais e verticais que devem ser resistidos pelos elementos estruturais.

Para efetuar a combinação dos esforços majorados, prevê-se a utilização de parâmetros que orientam o projetista quanto à probabilidade de ocorrência simultânea das ações atuantes, estes parâmetros são definidos pela NBR 8800 (ABNT, 2008).

Desta forma, pode-se utilizar as equações descritas por tal norma para verificar quais são as combinações de esforços mais desfavoráveis que, por sua vez, exigirão maior

resistência dos elementos estruturais a serem empregados para o dimensionamento em ELU, bem como para verificação da usualidade da edificação em Estado Limite de Serviço (ELS).

a) Combinações aplicáveis em ELU

De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008) as combinações últimas dividem-se em quatro grupos: combinações normais, especiais, de construção e excepcionais.

As combinações normais são aplicadas a todas as situações de dimensionamento que não apresentem peculiaridades de carregamento ou transitoriedade de esforços. Sua composição de ações é descrita pela equação (7):

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qi} \Psi_{0j} F_{Gj,k}) \quad (7)$$

Onde:

F_d é a força de cálculo ou carregamento de cálculo;

γ_{gi} é o coeficiente de ponderação das ações permanentes;

F_G referem-se às ações permanentes;

γ_{q1} é o coeficiente de ponderação da ação variável principal;

γ_{qi} é o coeficiente de ponderação da ação variável secundária;

F_{Q1} é a ação variável principal;

Ψ_{0j} é o fator de combinação para ação variável secundária;

m quantidade de combinações entre ações permanentes e ações variáveis principais;

n quantidade de combinações entre ações permanentes e ações variáveis secundárias;

k indica valor característico da ação.

O segundo grupo trata das combinações últimas especiais, que apresentam em sua composição o fator referente à efetividade ($\Psi_{0j,ef}$) de alguma ação transitória durante o processo construtivo, ou de manutenção da edificação, podendo ainda tratar-se de um carregamento adicional que deve ser considerado devido à sua magnitude, esta combinação é descrita pela equação (8).

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \Psi_{0j,ef} F_{Qj,k}) \quad (8)$$

Onde:

$\Psi_{0j,ef}$ é o fator de combinação efetivo;

F_{Qk} é o valor característico da ação variável.

As combinações últimas de construção obedecem ao disposto para as combinações últimas especiais, considerando como ação variável principal o esforço transitório que ocorre durante o processo construtivo, podendo ser exemplificado como o esforço de momento fletor gerado devido ao içamento de uma peça.

O último grupo de combinações especificado pela NBR 8800 (ABNT, 2008) trata de esforços excepcionais ($F_{Q,exc}$), que atuam sobre a estrutura em um curto espaço de tempo, muitas vezes de maneira intensa, levando a grandes danos estruturais, este tipo de combinação considera efeitos causados por incêndios, enchentes, sismos de grande magnitude, portanto, esta combinação não é necessária para todos os tipos de edificação.

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + F_{Q,exc} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \Psi_{0j,ef} F_{Qj,k}) \quad (9)$$

Onde:

$F_{Q,exc}$ refere-se às ações excepcionais;

b) Combinações aplicáveis em ELS

A edificação deve apresentar parâmetros de utilização compatíveis com a sensibilidade humana quando se trata de conforto ao usuário, este quesito é contemplado pelas verificações efetuadas no ELS.

Desta forma, a NBR 8800 (ABNT, 2008) estabelece combinações de ações que devem ser verificadas objetivando a garantia do conforto ao usuário, classificando-as de acordo com o tempo de atuação na estrutura. Assim, as combinações podem ser quase permanentes, frequentes ou raras em ELS.

As combinações quase permanentes consideram o agrupamento de ações que irá atuar em um período maior que 50% da vida útil da estrutura, interferindo diretamente na aparência desta, entendida como deformações excessivas. A combinação quase permanente de serviço (F_{ser}) está descrita na equação (10):

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=1}^n (\Psi_{2j} F_{Qj,k}) \quad (10)$$

Onde,

Ψ_{2j} é o fator de ponderação que considera o valor das ações variáveis quase permanentes.

As combinações frequentes consideram ações que se repetem na ordem de 10^5 no período de 50 anos de vida da construção, e que continuem atuando durante pelo menos 5% deste tempo.

O objetivo dessa combinação é identificar os estados limites reversíveis como, por exemplo, vibrações excessivas ou deformações temporárias oriundas, por exemplo, de processos de limpeza e manutenção (ABNT, 2008).

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \Psi_1 F_{Q1,k} \sum_{j=2}^n (\Psi_{2j} F_{Qj,k}) \quad (11)$$

Onde,

Ψ_1 é o fator de ponderação que considera o valor das ações variáveis frequentes.

As combinações raras avaliam os esforços que causam danos estruturais permanentes, tais como fissuras ou que afetam o funcionamento de portas e janelas, desta forma, o tempo limite de atuação das ações que podem provocar este tipo de dano é de apenas algumas horas. A equação (12) descreve a combinação rara de serviço.

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + F_{Q1,k} \sum_{j=2}^n (\Psi_{1j} F_{Qj,k}) \quad (12)$$

2.2 Prescrições normativas quanto à resistência dos materiais construtivos

Quando se efetua o dimensionamento de uma estrutura, a segurança é um dos principais pontos a serem considerados, tendo em vista a necessidade de garantir que os materiais que compõem os elementos construtivos resistirão a todos os esforços a eles impostos. Assim, a NBR 8800 (ABNT, 2008) estabelece coeficientes de ponderação que devem ser aplicados aos materiais estruturais.

Os coeficientes de ponderação minoram a resistência dos materiais, quanto menor for o controle do ponto vista produtivo dos materiais, ou ainda de acordo com o emprego de um conjunto de materiais estruturais.

Para se obter a resistência de cálculo, efetua-se a divisão da resistência característica do material pelo seu respectivo coeficiente de ponderação, conforme equação (13).

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m} \quad (13)$$

Onde:

f_d é a resistência de cálculo;

f_k é a resistência característica do material;

γ_m é o coeficiente de ponderação do material.

O coeficiente de ponderação dos materiais é composto por três parcelas:

$$\gamma_m = \gamma_{m1} + \gamma_{m2} + \gamma_{m3} \quad (14)$$

Onde:

γ_{m1} considera a variabilidade da resistência dos materiais envolvidos;

γ_{m2} considera a diferença entre a resistência do material no corpo-de-prova e na estrutura;

γ_{m3} considera os desvios feitos durante a construção e as aproximações efetuadas em projeto, do ponto de vista da resistência do material.

O coeficiente γ_m assume outras nomenclaturas quando se trata de material específico, também tendo um valor específico para cada tipo ou conjunto de materiais (TABELA 3).

Tabela 3 - Valores dos coeficientes de ponderação das resistências (γ_m)

COMBINAÇÕES	AÇO ESTRUTURAL ^a γ_a		CONCRETO γ_c	AÇO DAS ARMADURAS γ_s
	ESCOAMENTO, FLAMBAGEM E INSTABILIDADE γ_{a1}	RUPTURA γ_{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

^a Inclui o aço de fôrma incorporada, usado nas lajes mistas de aço e concreto, de pinos e parafusos.

FONTE: Adaptado de ABNT (2008).

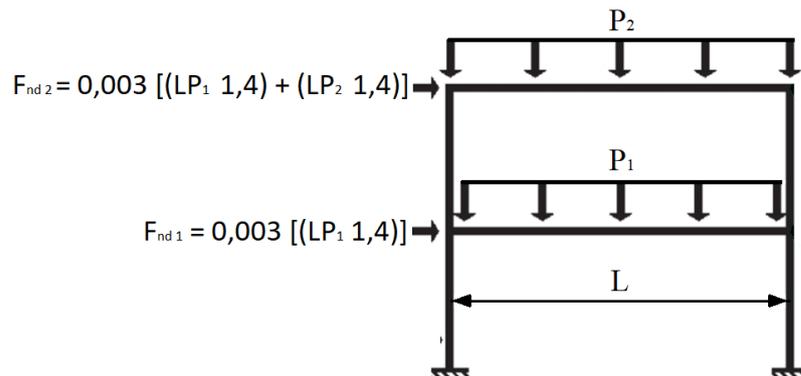
2.3 Prescrições normativas quanto ao deslocamento horizontal das estruturas

O procedimento de análise dos deslocamentos horizontais em uma edificação, onde não existem esforços horizontais, deve ser efetuado através da aplicação de força horizontal

fictícia denominada força nocional (F_{nd}), com magnitude de 0,3% dos esforços gravitacionais de cálculo correspondente ao respectivo andar.

Conforme a NBR 8800 (ABNT, 2008), o deslocamento horizontal na extremidade do pilar da estrutura de um galpão em relação a sua base não deve ultrapassar o valor de $H/300$.

Figura 4 - Força nocional



FONTE: Aptado de Fakury; Silva; Caldas (2016).

Também é previsto que, caso a combinação de esforços em análise considere algum tipo de esforço horizontal como, por exemplo, o vento, não é necessário o somatório destes esforços com a força nocional (FAKURY; SILVA; CALDAS, 2016).

2.4 Perfis de alma cheia

Os perfis de aço estrutural laminados são produzidos a partir do aço de baixa liga ASTM A572 Grau 50 e suas principais propriedades mecânicas estão dispostas na tabela 4.

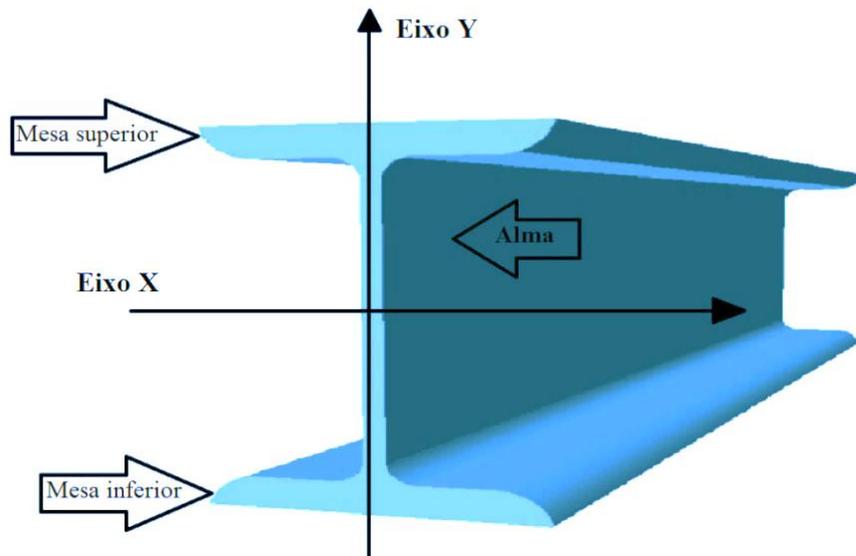
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do aço estrutural ASTM A572 Grau 50

Tensão de escoamento (f_{va})	345 MPa
Tensão de ruptura (f_{ua})	450 MPa
Módulo de elasticidade (E_a)	200.000 MPa
Módulo de elasticidade transversal (G_a)	77.000 MPa
Coefficiente de Poisson (ν_a)	0,3
Coefficiente de dilatação térmica (β_a)	$12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Massa específica (γ_a)	7.850 kg/m ³

FONTE: Adaptado de ABNT (2008).

Os perfis laminados de tipologia "I" são compostos por duas mesas dispostas paralelamente e uma alma perpendicular às mesas que as une pelo eixo de simetria correspondente à largura destas mesas (FIGURA 5).

Figura 5 - Perfil de aço laminado de alma cheia tipo "I"



FONTE: Aptado de Fakury; Silva; Caldas (2016).

O dimensionamento estrutural utilizando perfis laminados conta com parâmetros de segurança e desempenho definidos pela NBR 8800 (ABNT, 2008), sendo que os parâmetros de segurança estão ligados às condições relativas ao ELU e os parâmetros de desempenho estão ligados às condições relativas ao ELS.

Segundo a referida norma, as vigas de cobertura devem ser analisadas de acordo com os tipos de estados limites, para efetuar um estudo analítico, observam-se os estados limites dispostos no quadro 1.

Quadro 1- Estados limites, deslocamentos e deformações dos perfis de alma cheia

ESTADO LIMITE	DIMENSIONAMENTO/VERIFICAÇÃO	COLAPSO/DEFORMAÇÃO
ELU	Dimensionamento	Formação de mecanismo plástico devido à ação momento fletor
		Flambagem lateral com torção
		Flambagem local da alma
		Flambagem local da mesa
		Flambagem por cisalhamento da alma
ELS	Verificação	Escoamento da alma devido ao cisalhamento
		Flecha

FONTE: Autor (2018).

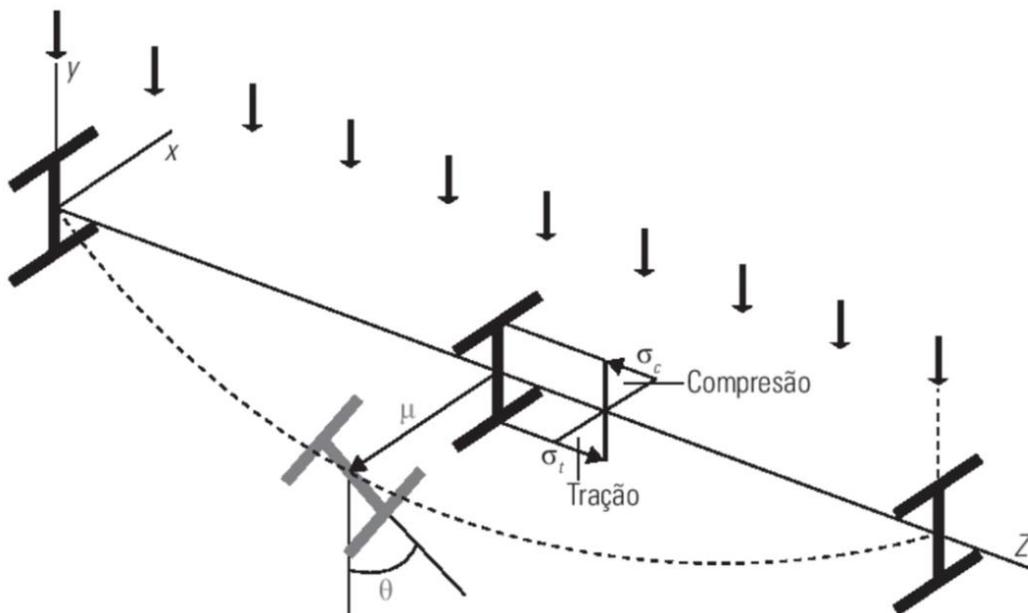
Os tipos de colapso ou deformação presentes no quadro 1 serão descritos a seguir considerando o dimensionamento (no ELU) e a verificação (no ELS) de vigas construídas com perfis de alma cheia.

2.4.1 Dimensionamento considerando a possibilidade de flambagem lateral com torção (FLT)

O colapso de vigas por flambagem lateral com torção da alma, segundo Fakury; Silva; Caldas (2016), presume que uma força solicitante que atue na face comprimida da seção transversal de um perfil “I” fletido em relação ao eixo de inércia x , possua magnitude suficiente para deslocar a face comprimida da seção transversal para fora de seu eixo de simetria longitudinal.

Enquanto isso, a mesma força solicitante atua simultaneamente na face tracionada da viga, tendendo a mantê-la em seu eixo longitudinal, assim, a parte comprimida sofre um deslocamento lateral e , como o elemento comprimido está unido ao elemento tracionado através da alma do perfil, ocorrerá a torção da alma como é demonstrado na figura 6.

Figura 6 - Flambagem lateral com torção em perfil “I” de alma cheia



FONTE: Fakury; Silva; Caldas (2016).

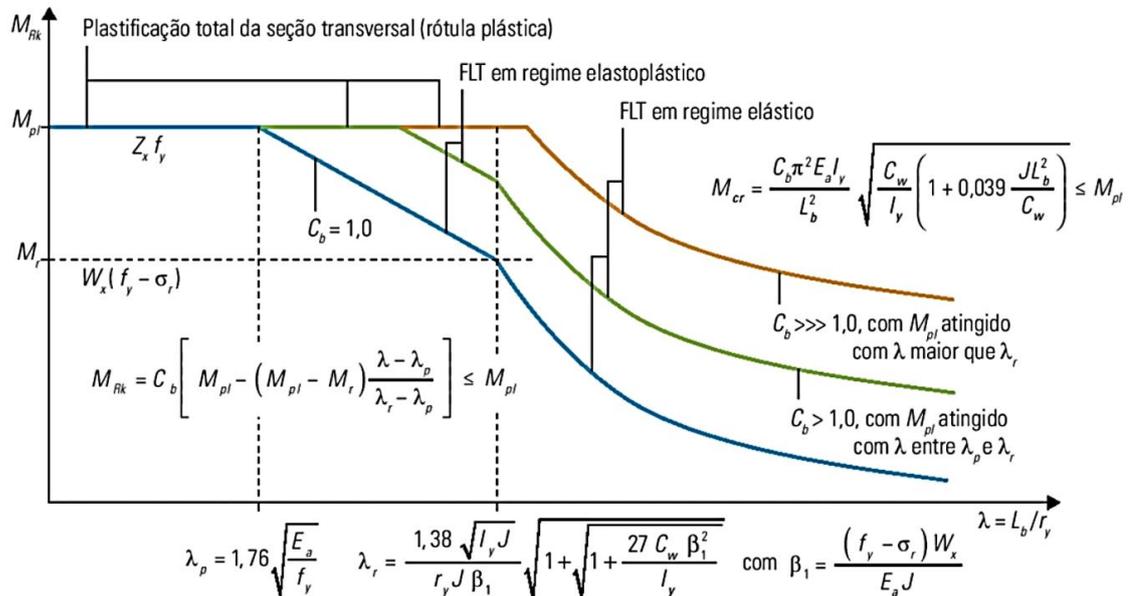
Onde,

μ é a translação lateral da viga;

θ é o ângulo de torção em torno do eixo longitudinal.

O dimensionamento para o esforço de momento fletor causador do colapso por flambagem lateral com torção pode ser efetuado com o auxílio da figura 7.

Figura 7 - Momento fletor resistente nominal para flambagem lateral com torção de perfil “I” fletido em relação ao eixo x



FONTE: Fakury; Silva e Caldas (2016).

Onde,

M_{Rk} é o momento resistente nominal;

M_{pl} é o momento de plastificação;

M_{cr} é o momento fletor resistente nominal à flambagem lateral com torção em regime elástico ou momento fletor de flambagem elástica;

M_r é o momento fletor correspondente ao início do escoamento;

W_x é o módulo de resistência elástico do perfil em relação ao eixo x;

σ_r são as tensões residuais do perfil, consideradas como: 30% da resistência ao escoamento do aço (f_y);

f_y é a tensão de escoamento do aço;

Z_x é o módulo de resistência plástica em relação ao eixo x;

λ é o parâmetro de esbeltez;

λ_p é o parâmetro de esbeltez correspondente ao início da plastificação;

λ_r é o parâmetro de esbeltez para o início do escoamento;

E_a é o módulo de elasticidade do aço;

I_y é o momento de inércia do perfil em relação ao eixo y;

L_b é o comprimento destravado;

C_w é a constante de empenamento do perfil;

r_y é o raio de giração do perfil em relação ao eixo y;

J é a constante de torção do perfil;

C_b é o fator de modificação para diagrama de momento fletor.

Onde,

$$C_w = \frac{h_0^2 I_y}{4} \quad (15)$$

$$J = \frac{1}{3} \sum (bt^3) \quad (16)$$

$$C_b = \frac{12,5 |M_{máx}|}{2,5 |M_{máx}| + 3 |M_A| + 4 |M_B| + 3 |M_C|} \leq 3,0 \quad (17)$$

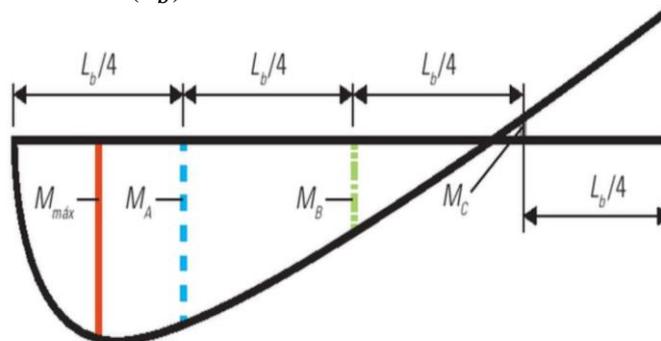
Onde,

h_0 altura medida entre os eixos de simetria das mesas do perfil “I”;

b largura do elemento apoiado livre da seção transversal;

t espessura do elemento apoiado livre da seção transversal.

Figura 8 - Valores dos momentos para cálculo do fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme (C_b)



adaptado de: Silva; Caldas (2016)

FONTE: Fakury; Silva; Caldas (2016).

Onde,

$|M_A|$ é o valor em módulo do momento fletor na seção situada a um quarto do comprimento destravado, medido a partir da extremidade esquerda;

$|M_B|$ é o valor em módulo do momento fletor na seção central do comprimento destravado;

$|M_C|$ é o valor em módulo do momento fletor na seção situada a três quartos do comprimento destravado, medido a partir da extremidade esquerda;

$|M_A|$ é o valor em módulo do momento fletor máximo no comprimento destravado, podendo coincidir com M_A , M_B ou M_C .

2.4.2 Dimensionamento considerando a possibilidade de flambagem local da mesa (FLM) e flambagem local da alma (FLA)

Os colapsos por flambagem local dos elementos apoiados-livres (AL), representados pelas abas das mesas do perfil tipo “I”, e do elemento apoiado-apoiado (AA), representado pela alma do mesmo perfil, ocorrem devido à tensão de compressão em função da atuação de momento fletor sobre a seção transversal do perfil (FAKURY; SILVA; CALDAS, 2016).

O dimensionamento verificando a possibilidade dos colapsos de flambagem local das mesas e da alma devido ao esforço de momento fletor segue os parâmetros descritos pelas equações (18), (19) e (20):

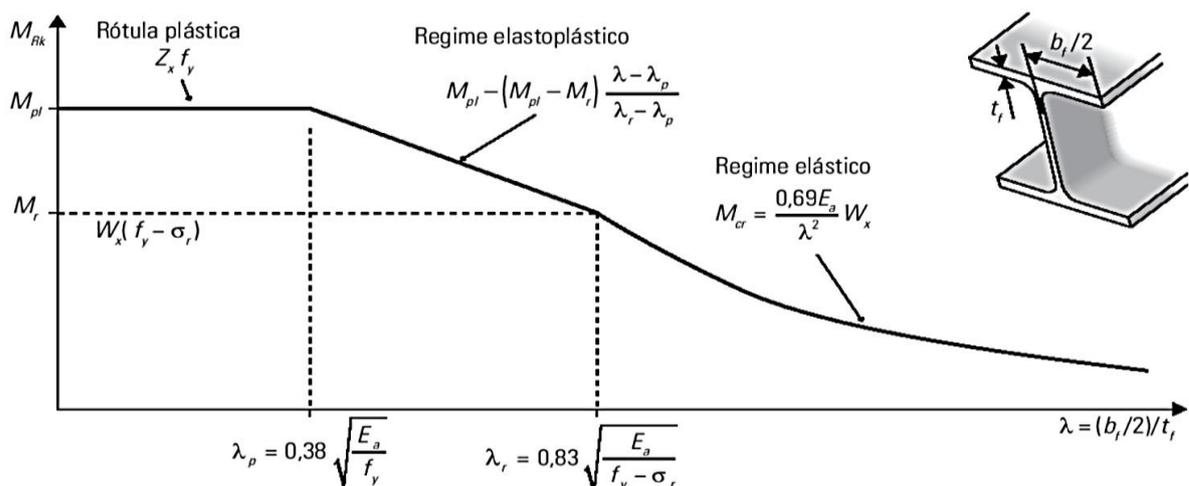
$$\begin{aligned} \text{Para } \lambda < \lambda_p, \\ M_{Rk} = M_{pl} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{Para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r, \\ M_{Rk} = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{Para } \lambda > \lambda_r, \\ M_{Rk} = M_{cr} \leq M_{pl} \end{aligned} \quad (20)$$

O dimensionamento verificando o colapso por flambagem local da alma devido ao momento fletor pode ser efetuado com o auxílio da figura 9 e da tabela 5.

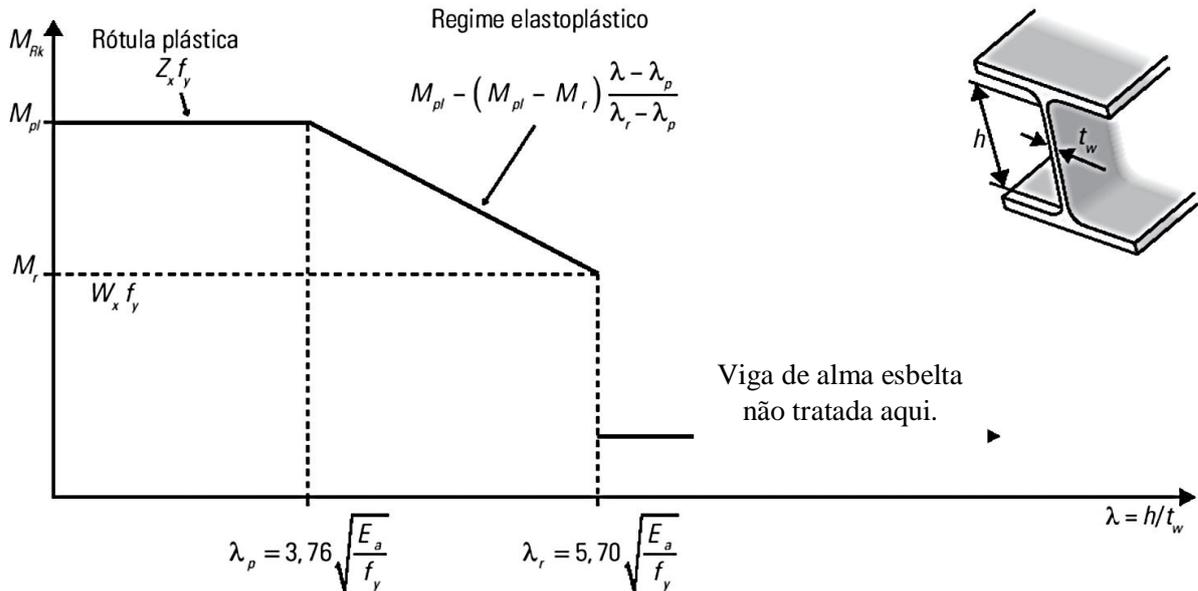
Figura 9 - Momento fletor resistente nominal para flambagem local da alma de perfil “I” fletido em relação ao eixo x



FONTE: Fakury; Silva; Caldas (2016).

O dimensionamento verificando o colapso por flambagem local da mesa comprimida devido ao momento fletor, pode ser efetuado com o auxílio da figura 10 e da tabela 5.

Figura 10 - Momento fletor resistente nominal para flambagem local da mesa comprimida de perfil "I" fletido em relação ao eixo x



FONTE: Fakury; Silva; Caldas (2016).

Tabela 5 - Parâmetros de cálculo para o momento fletor nominal resistente aos colapsos de flambagem local das mesas e da alma de perfil "I" fletido em relação ao eixo x

TIPO DE PERFIL E EIXO DE FLEXÃO	ESTADOS LIMITES	M_r	M_{cr}	λ	λ_p	λ_r
Perfil "I" ou "H" fletidos em relação ao eixo x	FLM	$(f_y - \sigma_r)W_x$	$M_{cr} = \frac{0,69E_a}{\lambda^2}W_c$ $\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E_a}{(f_y - \sigma_r)}}$	$\frac{b}{t}$ b = Metade da largura da mesa comprimida. t = espessura da mesa.	$0,38 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$	$M_{cr} = \frac{0,69E_a}{\lambda^2}W_c$ $\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E_a}{(f_y - \sigma_r)}}$
	FLA	$f_y W_x$	Caso aplicado para viga esbelta, não se enquadra nos perfis laminados padronizados.	$\frac{h}{t_w}$	$3,76 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$

FONTE: Adaptado de Fakury; Silva e Caldas (2016).

Onde,

W_c é o módulo de resistência elástico do lado comprimido da seção transversal relativo ao eixo de flexão.

Para efetuar o dimensionamento segundo a NBR:8800 (ABNT, 2008), os valores relativos aos momentos resistentes nominais (M_{Rk}) para o colapso por FLA e FLM devem ser divididos pelo coeficiente $\gamma_{a1} = 1,10$ obtendo-se, assim, o momento resistente de cálculo (M_{Rd}), conforme a equação (21):

$$M_{Rd} = \frac{M_{Rk}}{\gamma_{a1}} \quad (21)$$

2.4.3 Dimensionamento para esforço cortante

O esforço cortante atua principalmente na alma do perfil e a sua verificação é feita para situações onde a viga conta com a presença de enrijecedores transversais ou quando estes não existem.

Será abordada a teoria que descreve o dimensionamento para o esforço cortante em vigas sem enrijecedores, uma vez que na maioria dos projetos de cobertura não é necessário o emprego destes elementos devido à menor magnitude do esforço cisalhante quando comparado ao momento fletor atuante sobre a viga (FAKURY; SILVA; CALDAS, 2016).

O valor da força cortante resistente nominal (V_{Rk}) é calculado em função da esbeltez da alma do perfil e é calculada pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned} &\text{Para } \lambda < \lambda_p, \\ V_{Rk} &= V_{pl} = 0,60 A_w f_y \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} &\text{Para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r, \\ V_{Rk} &= V_i = \frac{\lambda_p}{\lambda} V_{pl} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} &\text{Para } \lambda > \lambda_r, \\ V_{Rk} &= V_{cr} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 V_{pl} \end{aligned} \quad (24)$$

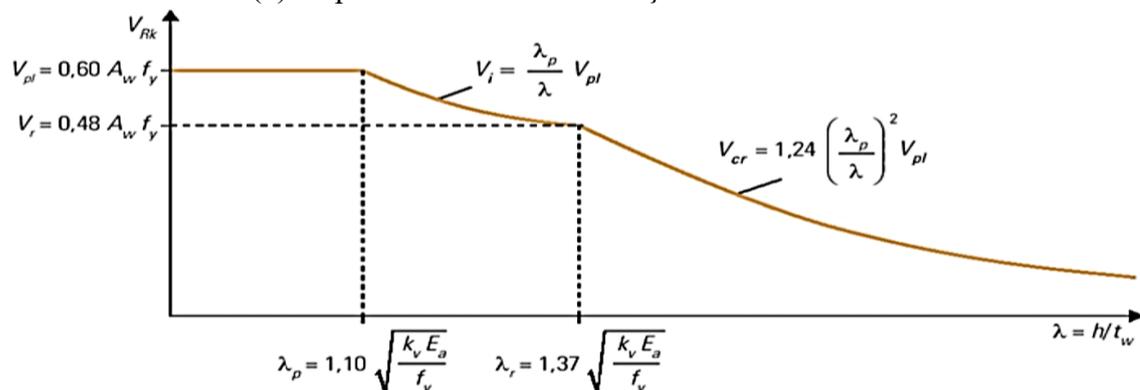
O dimensionamento para o esforço de cisalhamento da alma pode ser efetuado com o auxílio da figura 11.

Onde,

V_r força cortante correspondente ao início do escoamento por cisalhamento;

k_v coeficiente de flambagem da alma por cisalhamento.

Figura 11 - Força cortante resistente nominal em função do parâmetro de esbeltez da alma (λ) de perfil "I" fletido em relação ao eixo x



FONTE: Fakury; Silva e Caldas (2016).

Onde,

λ é o parâmetro de esbeltez da alma;

λ_p é o valor limite de esbeltez da alma para que ela se sujeite à flambagem. Para valores de esbeltez abaixo de λ_p o colapso ocorre por escoamento da alma devido ao cisalhamento.

λ_r é o limite superior de esbeltez da alma no qual a flambagem por cisalhamento ocorre em regime inelástico. Para valores acima de λ_r o colapso ocorre por flambagem no regime elástico.

V_{pl} é a força cortante de plastificação da alma;

A_w é a área efetiva de cisalhamento, considerada como a altura total do perfil (d) multiplicada pela espessura da alma (t_w);

V_i é a força cortante na qual a flambagem por cisalhamento da alma ocorre em regime elastoplástico;

V_{cr} é a força cortante nominal correspondente à flambagem da alma por cisalhamento em regime elástico;

Por fim, para obter o valor do esforço cortante de cálculo (V_{Rd}) utilizado para efetuar o dimensionamento segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008), o valor nominal da força cortante (V_{pl}) deve ser dividido pelo coeficiente (γ_{a1}):

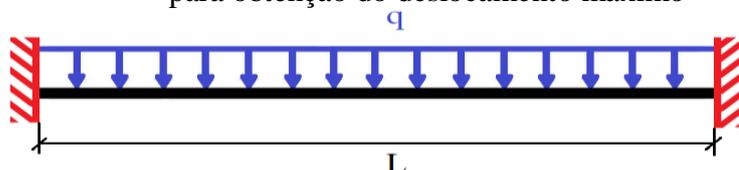
$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (25)$$

2.4.4 Verificação dos deslocamentos verticais em ELS

A determinação da flecha para vigas construídas com perfis de alma cheia dependem das condições de contorno (apoiada ou engastada) a qual esta viga está submetida, bem como da tipologia de carregamento aplicado.

Para obtenção do deslocamento vertical máximo para uma viga engastada nas duas extremidades sob a ação de carregamento distribuído (FIGURA 12) ao longo de seu comprimento utiliza-se a equação 26.

Figura 12 - Condições de contorno e de carregamento para obtenção do deslocamento máximo



FONTE: O autor (2018).

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{qL^4}{384 EI_x} \quad (26)$$

2.5 Vigas alveolares

Esta seção apresenta um histórico da criação e utilização dos perfis alveolares no mundo, demonstra as propriedades geométricas dos perfis alveolares padrão Peiner, suas principais formas de colapso, também é abordado o processo de dimensionamento destes perfis para ser utilizados como vigas de cobertura.

2.5.1 Breve histórico

Os primeiros registros literários da utilização de vigas alveolares datam do início dos anos de 1930 e ocorreram na *Republica Tcheca*, na cidade de *Plzen*. Os perfis alveolares foram produzidos pela fábrica *Sokoda* para serem utilizados na estrutura de outra fábrica localizada na cidade de *Doudleveka* (GRÜNBAUR, 2011 *apud* OLIVEIRA, 2012).

O primeiro registro de patente atendido ocorreu em 1939 no instituto de patentes inglês *British Patent Office*, sob a identificação 498281. Esse registro foi concedido a *Geoffrey Murray Boyd*, que teve a ideia da criação do modelo de perfil quando se deparou com a insuficiência de rigidez dos perfis existentes, diante da necessidade de sustentação de uma talha que deveria ser instalada em uma fábrica, localizada na cidade de *Buenos Aires*. Na época, *Boyd* trabalhava na *Brith Structural Steel Company*, empresa britânica responsável pela construção da estrutura da fábrica localizada na Argentina (KNOWLES, 1991 *apud* OLIVEIRA, 2012).

O fato da patente ser concedida a *Boyd*, no ano de 1939, coincide com o início da Segunda Guerra Mundial e, devido à magnitude do conflito e o envolvimento das grandes potências da época, os recursos econômicos foram destinados à manutenção do confronto.

Desta forma, o tempo de vigência da patente decorreu-se sem que houvesse proveito ou desenvolvimento da tecnologia idealizada pelo inglês (BRINKHUS, 2015).

Após expirada a patente concedida a *Boyd*, a solução construtiva pôde ser manipulada por qualquer edificador que dispusesse de recursos para executá-la. Porém, a competitividade do sistema comparado aos métodos construtivos existentes foi comprometida devido ao alto

custo da mão de obra para execução dos processos de corte e solda dos perfis. Os processos eram efetuados manualmente, consumindo muito tempo para obtenção de um perfil alveolar em condições de aplicação (LITZKA, 1960 *apud* OLIVEIRA, 2012 e BRINKHUS, 2015).

Assim, os perfis alveolares foram abandonados como solução construtiva competitiva entre os anos de 1960 e 1990 (VIEIRA et al., 2015).

A partir da década de 1990, foram incorporados diversos avanços à área de automação industrial, destacando-se a criação de máquinas de Comando Numérico Computadorizado (CNC) que viabilizaram o corte automatizado, oferecendo maior precisão de corte e reduzindo o tempo para execução do trabalho. Adicionalmente, a automação possibilitou a produção em maior escala sem que houvesse grande interferência humana no manuseio das peças (SILVEIRA, 2011).

Atualmente, a produção deste tipo de perfil pode ser facilitada devido a aparatos tecnológicos que vão do içamento mecânico dos perfis através de talhas, passando pelo corte a laser, que oferece precisão e acabamento superior às peças, até a soldagem efetuada por braços ou cabeçotes mecânicos, que unem as peças e fazem a verificação da qualidade da solda, oferecendo melhor acabamento e confiabilidade estrutural ao processo (FORTES, 2005 e BRINKHUS, 2015).

2.5.2 Geometria dos alvéolos

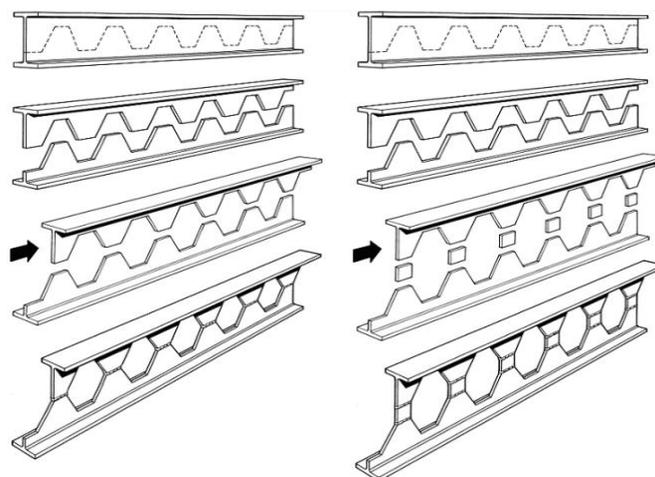
Os perfis alveolares podem seguir diversos padrões para a definição da geometria de suas aberturas. O padrão Peiner, também conhecido no Brasil como padrão castelado, possui como geometria de seus alvéolos aberturas hexagonais regulares.

A transformação de vigas de alma cheia em vigas alveolares consiste na divisão de um perfil de aço de seção transversal do tipo “I”, efetuando-se um corte longitudinal na alma que será deslocada verticalmente e unindo-se as duas partes do perfil por soldagem (FIGURAS 13 e 14).

O padrão Peiner oferece aumento da seção transversal otimizada em 1,5 vezes a altura do perfil original, sem que ocorra perda considerável de material, a não ser por pelo comprimento de meio passo, devido ao deslocamento das partes do perfil original durante o processo de junção destas partes.

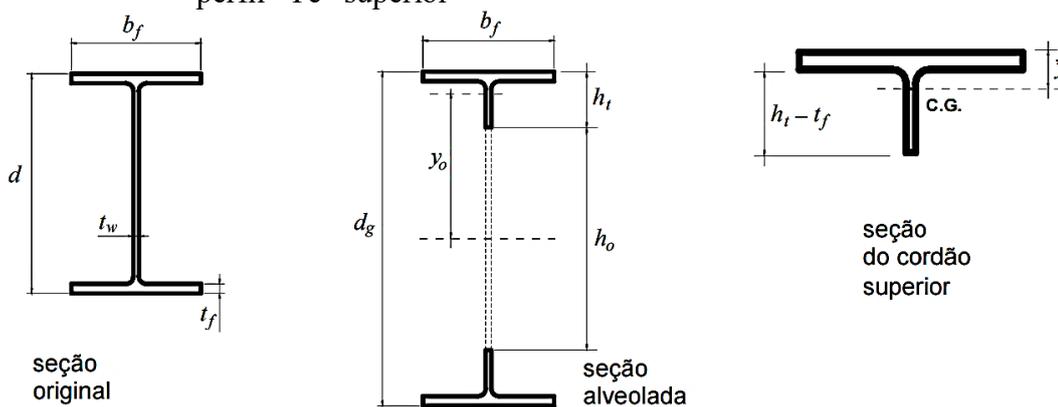
A geometria dos alvéolos do padrão Peiner tem sua modelagem apresentada na figura 15.

Figura 13 - Perfil alveolar



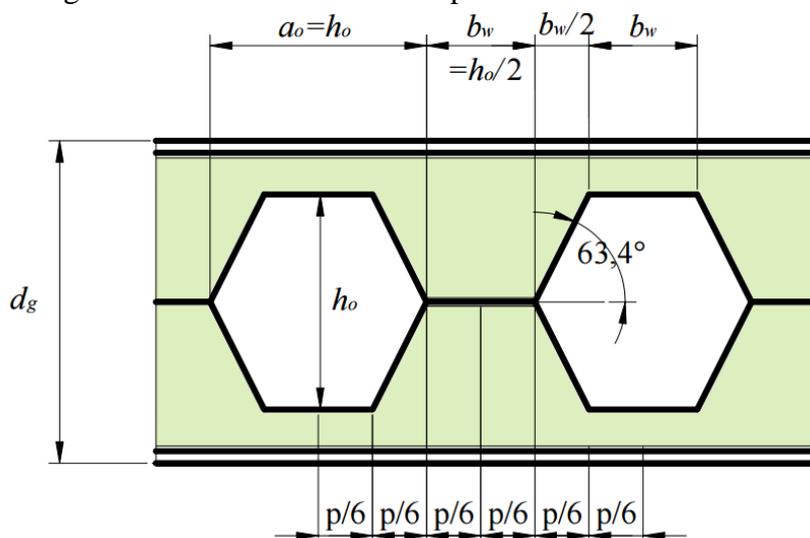
FONTE: Grünbauer (2012) *apud* Veríssimo et al. (2012)

Figura 14 - Seção transversal do perfil “I” original, do perfil alveolado e do perfil “Tê” superior



FONTE: Oliveira et al. (2012).

Figura 15 - Dimensões de corte padrão Peiner



FONTE: Veríssimo et al. (2012).

A geometria Peiner possui extensa bibliografia sobre seu comportamento estrutural e sobre suas principais formas de colapso, havendo estudos elaborados sobre o processo de fabricação dos perfis, bem como sua aplicabilidade em sistemas de cobertura.

Os perfis alveolares padrão Peiner contam com equações que determinaram as propriedades geométricas equivalentes descritas por Cimadevila, Gutiérrez e Rodríguez (2000) e Bradley (2003) em trabalhos que obtiveram resultados reconhecidos quando confrontados experimentalmente por outros autores.

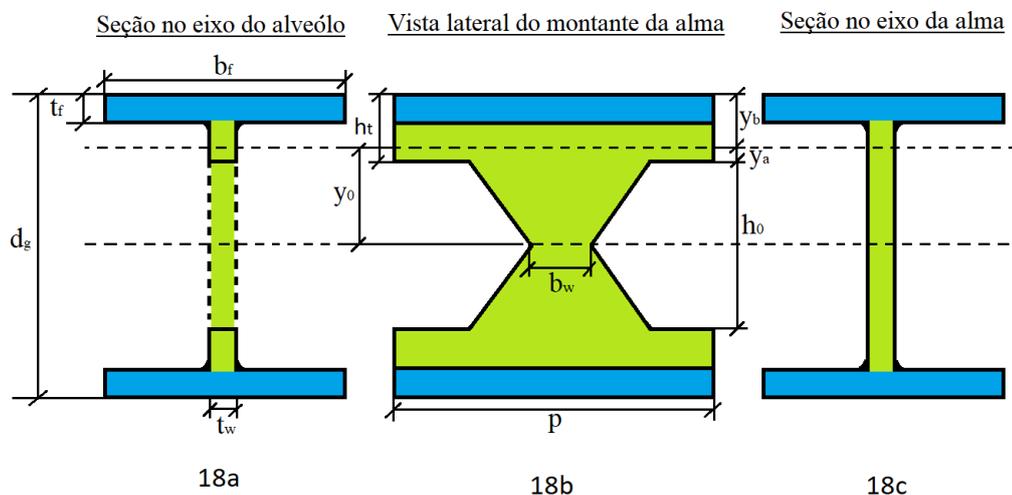
Os resultados obtidos por Oliveira (2012), que estudou algumas geometrias de perfis alveolares descrevendo seu comportamento estrutural ao serem empregados em sistemas de cobertura, originam-se de análises não lineares e possibilitam concluir que o padrão Peiner ofereceu melhor desempenho estrutural para projetos desta natureza.

Por esses motivos, o padrão Peiner é um dos tipos mais difundidos quando a opção é o sistema construtivo com vigas alveolares (NAKAMURA, 2012 e TAMAKI, 2010 *apud* PAPPALARDO JUNIOR; RAIA; DINIS, 2012).

Considerando que não existe normalização brasileira específica para elaboração de projetos utilizando vigas alveolares, e que esta tipologia de viga não é contemplada pela NBR 8800 (ABNT, 2008).

Assim, o processo de dimensionamento se baseia em formulações para o cálculo das propriedades geométricas equivalentes da seção transversal, definidas nos trabalhos de alguns autores, entre eles: Cimadevila, Gutiérrez e Rodríguez (2000); Bradley (2003) e Oliveira; Veríssimo; Vieira et al. (2012).

Figura 16 - Seções transversais e vista lateral do perfil alveolar padrão Peiner



FONTE: Adaptado de Veríssimo et al. (2012).

A figura 16 mostra as duas seções transversais e a vista lateral, onde se pode observar todas as variáveis necessárias para a obtenção das propriedades geométricas da viga alveolar padrão Peiner.

Conforme Silveira (2011), as propriedades geométricas da seção transversal das vigas alveolares podem ser calculadas para a seção em que se tem integridade da alma do perfil (FIGURA 16c) ou para a seção transversal de menor resistência localizada no eixo dos alvéolos (FIGURA 16a).

Onde,

p é o passo composto por 3 b_w , onde b_w é a menor largura do montante da alma, localizada à meia altura de d_g ;

As propriedades geométricas são obtidas a partir das formulações apresentadas na tabela 6.

Tabela 6 - Formulações e descrição das propriedades geométricas dos perfis alveolares (continua)

FORMULAS PARA OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS	UNIDADES	DESCRIÇÃO
$d_g = kd$	(cm)	Altura do perfil alveolar.
$h_0 = d$ se $k = 1,5$	(cm)	Distância vertical entre as faces paralelas dos alvéolos.
$h_t = \frac{d_g - h_0}{2}$	(cm)	Distância entre a face da mesa e a face paralela do alvéolo.
$A_t = \frac{A_g}{2} - [t_w d (k - 1)]$	(cm ²)	Área da seção transversal de um "Tê".
$y_0 = \frac{h_0}{2} + h_t - y_b$	(cm)	Distância entre o centro de gravidade do "Tê" e o centro de gravidade do perfil.
$y_b = \frac{b_f t_f^2 + h_t^2 t_w - t_f^2 t_w}{2(b_f t_f + h_t t_w - t_f t_w)}$	(cm)	Distância da face da mesa ao centro de gravidade do "Tê".
$Z_{x0} = 2 A_t y_0$	(cm ³)	Módulo de resistência plástico da seção vazada, composta por dois "Tês".
$I_t = \frac{b_f t_f^3}{12} + b_f t_f \left(y_b - \frac{t_f}{2} \right)^2 + t_w \left(h_t - t_f \right) \left(y_b - \frac{h_t t_f}{2} \right)^2$	(cm ⁴)	Momento de inércia do "Tê" em relação ao seu centro de gravidade.
$I_{x0} = 2 (I_t + A_t y_0^2)$	(cm ⁴)	Momento de inércia da seção vazada, composta por dois "Tês".
$I_{x1} = 2 \left[I_t + A_t y_0^2 + \frac{t_w \left(\frac{d}{2} \right)^3}{3} \right]$	(cm ⁴)	Momento de inércia da seção de alma cheia.
$I_{x,e} = 2 (I_t + A_t y_0^2) + t_w \left(\frac{\left(\frac{d}{2} \right)^3}{2,57} \right)$	(cm ⁴)	Momento de inércia equivalente do perfil alveolar.
$I_{y0} = \frac{t_f b_f^3}{12} + \frac{\left(h_t - \frac{t_f}{2} \right) t_w^3}{12}$	(cm ⁴)	Momento de inércia da seção vazada, composta por dois "Tês".
$I_{y1} = \frac{t_f b_f^3}{6} + \frac{\left(d_g - \frac{t_f}{2} \right) t_w^3}{12}$	(cm ⁴)	Momento de inércia da seção de alma cheia.
$C_{w0} = \frac{\left(\frac{b_f^3 t_f^3}{4} + h_t^3 t_w^3 \right)}{36}$	(cm ⁶)	Constante de empenamento da seção vazada, composta por dois "Tês".

Tabela 6 – Formulações e descrição das propriedades geométricas dos perfis alveolares (fim)

FORMULAS PARA OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS	UNIDADES	DESCRIÇÃO
$C_{w1} = \frac{d_g^2 I_{y1}}{4}$	(cm ⁶)	Constante de empenamento da seção de alma cheia.
$J_0 = \frac{(b_f t_f^3 + h_t t_w^3)}{3}$	(cm ⁶)	Constante de torção do perfil da seção vazada, composta por dois “Tês”.
$J_1 = \frac{(2 b_f t_f^3 + h_t t_w^3)}{3}$	(cm ⁶)	Constante de torção do perfil da seção de alma cheia
$r_{y0} = \sqrt{\frac{I_{y0}}{2A_t}}$	(cm)	Raio de giração do perfil na seção vazada, composta por dois “Tês”.
$r_{y1} = \sqrt{\frac{I_{y1}}{(2A_t + h_0 t_w)}}$	(cm)	Raio de giração do perfil na seção de alma cheia.
$r_{x0} = \sqrt{\frac{I_{x0}}{2A_t}}$	(cm)	Raio de giração do perfil na seção vazada, composta por dois “Tês”.
$r_{x1} = \sqrt{\frac{I_{x1}}{(2A_t + h_0 t_w)}}$	(cm)	Raio de giração do perfil na seção de alma cheia.
$W_{x0} = \frac{4 y_0^2 A_t}{d_g}$	(cm ³)	Módulo resistencial à flexão da seção vazada.

FONTE: Adaptado de Silveira (2011).

Onde:

k é o coeficiente de expansão do perfil alveolar;

d é a altura do perfil original;

A_g é a área bruta do perfil de alma cheia de origem.

2.5.3 Dimensionamento de vigas construídas com perfis alveolares

As formas de colapso das vigas alveolares se diferem das vigas de alma cheia por apresentarem almas vazadas; e tensões não distribuídas uniformemente por toda estrutura da viga, que concentram-se nas bordas dos alvéolos, gerando instabilidades na alma (SILVEIRA, 2011).

Os principais tipos de estado limites últimos e de serviço que podem ocorrer nas vigas alveolares, de acordo com Silveira (2011) estão dispostas no quadro 2.

Quadro 2 - Estados limites, deslocamentos e deformações dos perfis alveolares

ESTADO LIMITE	DIMENSIONAMENTO/VERIFICAÇÃO	COLAPSO/DEFORMAÇÃO
ELU	Dimensionamento	Formação de mecanismo plástico devido ao momento fletor
		Escoamento do montante da alma por cisalhamento
		Escoamento do montante da alma por flexão
		Flambagem do montante da alma
ELS	Verificação	Flambagem lateral com torção
		Flecha

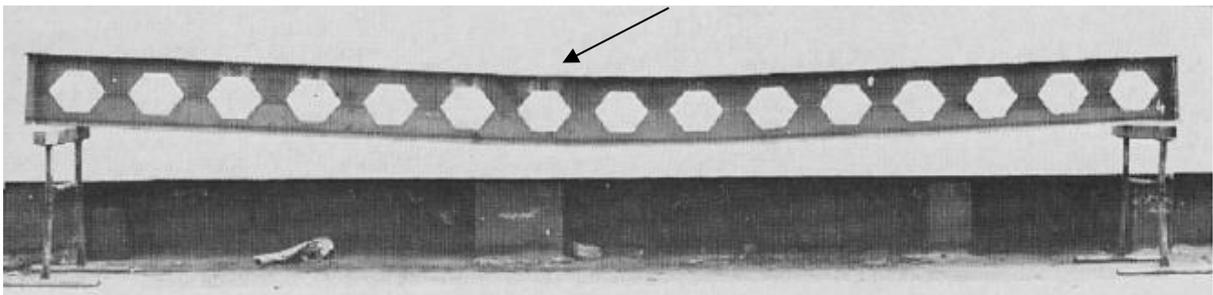
FONTE: Adaptado de Silveira (2011).

Os tipos de colapso ou deformação presentes no quadro 2 são descritos a seguir considerando o dimensionamento (no ELU) e a verificação (no ELS) de vigas construídas com perfis castelados.

2.5.3.1 Dimensionamento considerando a possibilidade de colapso por formação de mecanismo plástico devido ao momento fletor

O colapso por formação de mecanismo plástico devido à tensões de escoamento de compressão e tração pode ser observado em vigas biapoiadas vencendo longos vãos, sujeitas a cargas uniformemente distribuídas ou a momento fletor puro (FIGURA 17).

Figura 17 - Viga padrão Peiner deformada com formação de rótula plástica



FONTE: Kanning (1974) *apud* Martinho (2014).

Este tipo de colapso leva ao escoamento do perfil “Tê” superior da viga por compressão, e ao escoamento do perfil “Tê” inferior da viga por tração, provocando a deformação dos alvéolos localizados no centro do vão.

Considerando uma viga biapoiada com carregamento uniformemente distribuído, a viga deve resistir aos esforços que podem produzir a formação de mecanismo plástico, para isto deve ser satisfeita a seguinte expressão:

$$M_{sd} + c V_{sd} \leq \frac{M_{pl0}}{\gamma_{a1}} \quad (49)$$

Onde,

$$c = \frac{\gamma_0 \gamma_a b_w A_t}{2 I_t} \quad (50)$$

$$M_{sd} = \frac{q_d L^2}{8} \quad (51)$$

$$V_{sd} = \frac{q_d L}{2} \quad (52)$$

$$M_{pl0} = Z_{x0} f_y \quad (53)$$

Onde:

M_{pl0} é o momento de plastificação da seção vazada;

c é a constante que multiplica a força cortante de cálculo;

γ_{a1} é o coeficiente de ponderação da resistência do elemento de aço à plastificação (de acordo com NBR 8800 (ABNT, 2008) é adotado 1,1);

q_d é a carga uniformemente distribuída de cálculo ao longo de todo comprimento da viga;

M_{sd} é o momento solicitante de cálculo;

V_{sd} é a força cortante solicitante de cálculo;

f_y é a tensão de escoamento do aço;

L é o vão da viga.

2.5.3.2 Dimensionamento considerando a possibilidade de escoamento do montante da alma por cisalhamento

Outra forma comum de colapso por formação de mecanismo plástico em vigas alveolares ocorre em vigas fabricadas com perfis de menor altura, aplicadas em pequenos vãos e submetidos a elevados esforços cortantes.

Os esforços de cisalhamento, por sua vez, acarretarão tensões no contorno dos alvéolos, onde o esforço cortante é crítico (LAWSON et al., 2002 *apud* VIEIRA, 2014).

O acúmulo de tensões poderá levar a momentos secundários nos montantes que, por sua vez, se deformarão diferencialmente, formando rótulas plásticas nos vértices dos alvéolos, que passarão a ter formato de paralelogramos (BADKE NETO, 2015).

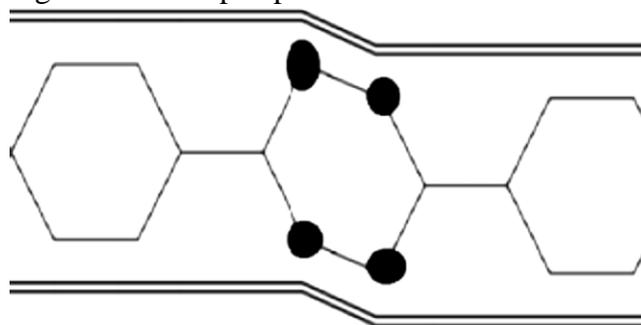
O colapso é explicado pelo mecanismo de Vierendeel, que tem sua teoria largamente aplicada no dimensionamento de treliças e se aproxima da teoria utilizada para explicar o comportamento das vigas alveolares (OLIVEIRA et al., 2012), conforme figuras 18 e 19.

Figura 18 - Formação de rótula plástica devido a esforço de cisalhamento



FONTE: Tsavdaridis; D' Mello (2010) *apud* Vieira (2014).

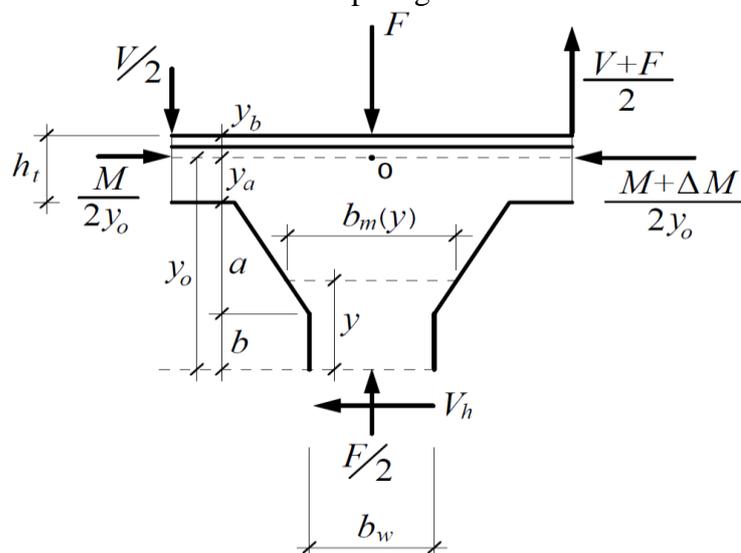
Figura 19 - Colapso por mecanismo de Vierendeel



FONTE: Veríssimo (1996) *apud* Martinho (2014).

Para as vigas alveolares padrão Peiner este tipo de colapso poderá ocorrer nos pontos onde a tensão cisalhante atingir os valores críticos. Para a verificação da capacidade de resistência do montante da alma de uma viga alveolar padrão Peiner pode-se partir do equilíbrio de forças no ponto “O” (VERÍSSIMO et al., 2012), como mostrado na figura 20.

Figura 20 - Formação de rótula plástica devido a esforço de cisalhamento para geometria Peiner



FONTE: Silveira (2011).

O somatório de momentos em relação ao ponto “O” (FIGURA 20) é obtido através da equação (54), e considerando as tensões elásticas distribuídas na menor largura do montante da alma (b_w), a tensão de cisalhamento máxima é descrita pelas equações (55) e (56).

Desta forma considerando-se o carregamento distribuído, pode-se desprezar a parcela de força ($F/2$), devido a sua pequena magnitude, quando comparada ao esforço cortante (V) (VERÍSSIMO; VIEIRA; SILVEIRA et al., 2012), tornando possível a obtenção do esforço cortante resistente para a menor largura do montante da alma expresso por V_{Rk1} segundo a equação (57) e particularizada para o padrão de perfil Peiner conforme a equação (58).

$$-V_h y_0 + \frac{V p}{2} + \frac{V + F p}{2} \frac{p}{2} = 0 \rightarrow V_h = \left(V \frac{F}{2} \right) \frac{p}{2 y_0} \quad (54)$$

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{3}{2} \frac{V_h}{b_w t_w} = \frac{3}{4} \frac{\left(V + \frac{F}{2} \right) p}{b_w t_w y_0} \leq \tau_y = \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (55)$$

Desta forma, obtém-se,

$$V + \frac{F}{2} \leq \frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{b_w t_w y_0 f_y}{p} \quad (56)$$

Logo:

$$V_{Rk1} \leq \frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{b_w t_w y_0}{p} f_y \quad (57)$$

Para o padrão Peiner,

$$V_{Rk1} \leq \frac{4}{9\sqrt{3}} t_w y_0 f_y \quad (58)$$

Onde,

V_h é o esforço cortante à meia altura do montante da alma;

V é o esforço cisalhante provocado pelo carregamento distribuído externo, aplicado no eixo da seção vazada;

F é o esforço provocado pelo carregamento distribuído externo, aplicado no eixo do montante da alma;

p é a distância entre eixos da seção vazada, também chamado de passo, ($3 b_w$) para padrão Peiner;

$\tau_{m\acute{a}x}$ é a tensão de cisalhamento máxima à meia altura do montante da alma;

τ_y é a tensão de cisalhamento máxima resistente da seção transversal que compreende o montante da alma;

V_{Rk1} é a força cortante resistente do montante da alma.

Para que o dimensionamento esteja de acordo com os parâmetros de segurança impostos pela NBR 8800 (ABNT, 2008) a força cortante resistente de cálculo deve ser dividido pelo coeficiente de ponderação da resistência (γ_{a1}), que para estruturas de aço é 1,1, conforme equação (59).

$$V_{Rd1} = \frac{V_{Rk1}}{\gamma_{a1}} \quad (59)$$

2.5.3.3 Dimensionamento para o escoamento do montante da alma por flexão

Ainda segundo Veríssimo et al. (2012), o esforço cortante na região da meia altura do montante da alma (V_h) irá provocar um momento fletor no montante da alma em que estiver atuando. Este momento fletor é o resultado da multiplicação de V_h pelo braço de alavanca y .

O momento fletor provocado por $V_h y$ atua sobre a área da seção transversal determinada por $t_w b_m(y)$ apresentando uma tensão normal conforme equação (60).

$$\sigma = \frac{V_h y}{\frac{t_w b_m^2}{6}} = \frac{6 V_h y}{t_w b_m^2} \quad (60)$$

Assim como se calcula o esforço resistente ao cisalhamento do montante da alma, despreza-se o valor da parcela de força ($F/2$) devido à sua pequena magnitude diante do esforço causado pelo momento.

Desta forma, após aplicar a equação (54) na equação (60), obtém-se a equação (61) que determina a tensão normal no montante da alma.

$$\sigma = \frac{3 V p y}{y_0 t_w b_m^2} \quad (61)$$

Para vigas alveolares de padrão Peiner, os valores que podem ser assumidos por $b_m(y)$ limitam-se a $(a + b)$, logo obtém-se para a função $b_m = b_w \quad \forall \quad y \leq b$:

$$b_m = \frac{b_w}{a}(y + a - b) \quad \text{par } ab < y < a + b \quad (62)$$

Para encontrar a distância entre o ponto de aplicação da força V_h e a área onde atua o momento fletor, ou seja, o valor do braço de alavanca y , deve-se igualar a função b_m a zero e derivá-la em relação à y , obtendo a equação (63).

$$y = a - b \quad \text{se } b_m = b_w \quad y = a \quad (63)$$

Onde,

a é a altura de meio alvéolo, podendo ser considerada como $h_0/2$ para os perfis de padrão Peiner;

b é o comprimento referente à metade da altura da chapa expansora, considerada como zero nos perfis que não possuem este tipo de artifício.

Substituindo-se os valores do braço de alavanca y na função que determina a tensão normal, obtém-se a tensão máxima devido ao esforço de momento fletor provocado por V_h y :

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{0,75 a^2 p V}{y_0 t_w b_w^2 (a - b)} \leq f_y \quad (64)$$

Desta forma tem-se o valor resistente característico para que não ocorra colapso por escoamento do montante da alma devido à flexão em vigas alveolares de padrão Peiner conforme a equação (65).

$$V_{Rk2} = \frac{y_0 t_w b_w^2 (a - b)}{0,75 a^2 p} f_y \quad (65)$$

Assim, deve-se adequar os valores característicos ao limite de segurança colocado pela NBR 8800 (ABNT 2008), submetendo a resistência ao coeficiente de minoração (γ_{a1}), que em estruturas de aço assume o valor 1,10 conforme a equação (66).

$$V_{Rd2} = \frac{V_{Rk2}}{\gamma_{a1}} \quad (66)$$

2.5.3.4 Dimensionamento considerando a possibilidade de colapso por flambagem lateral com torção

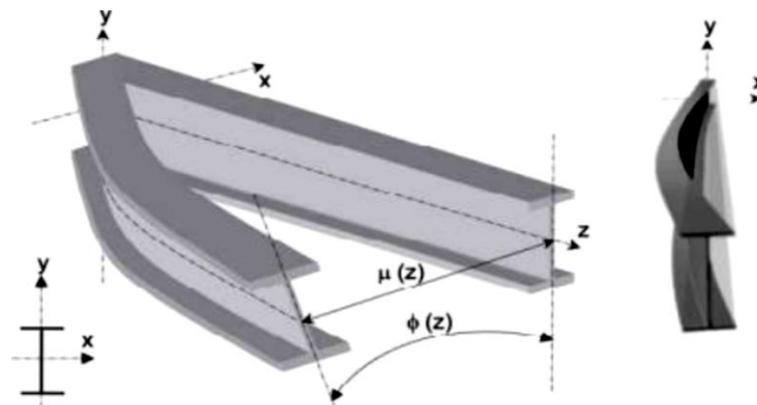
As vigas alveolares podem sofrer flambagem lateral com torção do perfil quando não ocorre o travamento da mesa comprimida ao longo do comprimento da viga.

Segundo Vieira et al. (2015), as vigas construídas a partir de perfis alveolares têm maiores chances de sofrer colapso por flambagem lateral, devido às aberturas na alma ao longo da viga.

Essas aberturas diminuem a resistência do perfil à torção, reduzindo a capacidade resistente deste tipo de viga, aumentando as chances de ocorrência desta modalidade de colapso.

Há casos em que a flambagem lateral com torção ocorre juntamente com a flambagem local da alma, gerando a distorção da alma (FIGURA 21).

Figura 21 - Flambagem lateral com torção



FONTE: Sayed-Ahmed (2004) *apud* Brinkhus (2015).

Para se efetuar o dimensionamento considerando o colapso por flambagem lateral com torção em perfis alveolares de padrão Peiner, Veríssimo et al. (2012) sugerem que sejam seguidos os parâmetros válidos para vigas de alma cheia, impostos pela NBR 8800 (ABNT, 2008), porém, adotando-se algumas modificações.

As alterações devem-se ao fato da alma ser vazada, ocorrendo portanto, a perda de rigidez do perfil quando comparado ao perfil de alma cheia, e desta forma, as recomendações são:

- a) substituir o emprego do parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento (λ_r) pelo comprimento destravado (L_r);

- b) substituir o emprego do parâmetro de esbeltez correspondente ao início da plastificação (λ_p) pelo comprimento destravado (L_p);
- c) utilizar as propriedades geométricas da seção vazada para determinar a constante de empenamento da seção transversal (C_{w0});
- d) adotar fator de correção que majora em 20% o comprimento destravado referente ao início do escoamento ($L_{r,cor} = 1,2 L_r$);
- e) considerar o momento fletor resistente máximo (M_{Rk}) como 90% do momento de plastificação da seção transversal.

Os valores correspondentes aos comprimentos destravados referentes ao limite de plastificação (L_p) e ao início do escoamento corrigido ($L_{r,cor}$) para os perfis alveolares são determinados pelas equações (67) e (68).

$$L_p = 1,76 r_y \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (67)$$

$$L_{r,cor} = \frac{1,66 \sqrt{I_y J}}{J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (68)$$

Onde,

$$\beta_1 = \frac{0,7 f_y W_x}{EJ} \quad (69)$$

Desta forma, o momento fletor resistente pode ser obtido em função do comprimento destravado da viga (L_b) através das equações (70) a (72).

Se $L_b > L_{r,cor}$

$$M_{Rk} = M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \quad (70)$$

Se $L_p < L_b \leq L_{r,cor}$

$$M_{Rk} = M_{cr} = C_b \left[0,90 M_{pl} - (0,90 M_{pl} - M_{r,cor}) \frac{L_b - L_p}{L_{r,cor} - L_p} \right] \leq 0,90 M_{pl} \quad (71)$$

Se $L_b < L_p$

$$M_{Rk} = 0,90 M_{pl} \quad (72)$$

Onde,

M_{cr} é o momento fletor de flambagem elástica ou momento crítico elástico;

I_y é o momento de inércia do perfil em relação ao eixo y , considerando a seção vazada;

L_b é o comprimento destravado da viga;

M_{pl} é o momento de plastificação;

C_b é o fator de modificação para o diagrama de momento fletor não uniforme, conforme estabelecido na NBR 8800 (ABNT, 2008), que considera a influência do momento fletor ao longo do comprimento destravado da viga (L_b), podendo assumir diferentes valores de acordo com as condições de contorno e formato do diagrama de momento fletor. São demonstrados alguns exemplos na tabela 7.

Tabela 7 - Fator de modificação para o diagrama de momento fletor não uniforme (C_b) em função do diagrama de momento fletor no comprimento longitudinal destravado da viga (L_b)

Carregamento e condições de contorno	Forma do diagrama de momento fletor	C_b	Carregamento e condições de contorno	Forma do diagrama de momento fletor	C_b
		1,00			1,00
		1,35			2,38
		1,67			1,92
		2,17			2,14
		2,27			2,08
		1,14			1,71
		1,32			1,95

FONTE: Fakury, Silva; Caldas (2016).

Por fim, a obtenção do momento fletor de flambagem elástica corrigido referente ao início do escoamento para o comprimento destravado ($L_{r,cor}$) é feita através da equação (73).

$$M_{r,cor} = \frac{0,31 E}{L_{r,cor}^2} \sqrt{I_y (1000 C_w + 39 J L_b^2)} \quad (73)$$

Assim, pode ser feita a ponderação do momento fletor nominal resistente, obtendo-se o momento fletor resistente de cálculo, de acordo com o item 4.8.2 da NBR 8800 (ABNT, 2008). Assim, o momento fletor resistente de cálculo é obtido dividindo-se o momento resistente de cálculo (M_{Rk}) pelo coeficiente γ_{a1} , conforme equação (74).

$$M_{R,d} = \frac{M_{Rk}}{\gamma_{a1}} \quad (74)$$

2.5.3.5 Dimensionamento considerando a possibilidade de colapso por flambagem do montante da alma

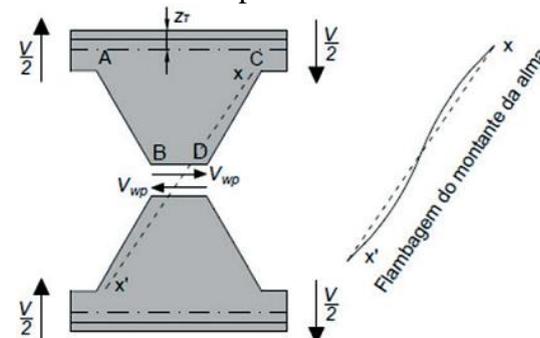
A flambagem do montante da alma poderá ocorrer de acordo com as tensões sollicitantes de momento fletor ou esforço cortante.

Oliveira et al. (2012) definem os fatores críticos a serem observados para ocorrência de flambagem do montante da alma:

- 1) largura da menor dimensão do montante da alma;
- 2) geometria do alvéolo;
- 3) espessura da alma;
- 4) assimetria da posição do alvéolo em relação ao eixo de simetria da viga.

Uma das causas de ocorrência da flambagem do montante da alma pode ser a atuação de esforço cortante superior à capacidade resistente da alma da viga, causando a flambagem do montante da alma por cisalhamento (FIGURA 22).

Figura 22 - Flambagem do montante da alma por cisalhamento



FONTE: Badke Neto; Calenzani; Ferreira (2015).

O esforço cortante ($V/2$) gera o esforço resultante (V_{wp}) na região da meia altura do montante da alma na região soldada, gerando uma região tracionada entre os pontos A e B, que tendem a permanecer como estão em relação ao eixo vertical de simetria, e uma região comprimida entre os pontos C e D, que tendem a se deslocar para fora do eixo vertical de simetria da viga (VIEIRA, 2014).

Conforme Delesques (1964) *apud* Silveira (2011), as vigas alveolares que apresentam maior vulnerabilidade a esta tipologia de colapso possuem em sua configuração geométrica uma chapa expansora inserida à meia altura do montante da alma que, tem a função de ampliar o fator de expansão do perfil (K).

Quando se trata de perfis padrão Peiner, o esforço cortante crítico que gera o colapso de flambagem do montante da alma pode ser descrito de maneira simplificada pela equação (75).

$$V_{cr} = \frac{E_a (4y_0 - 0,8a - 2b)t_w^3}{3,54 y_0^2} \quad (75)$$

Onde,

E_a é o módulo de elasticidade longitudinal do aço;

V_{cr} é o esforço cisalhante crítico para a flambagem do montante da alma;

Os demais valores são retirados da figura 20.

Conforme afirmado por Silveira (2011) as condições limites para a força cortante aplicada aos perfis de padrão Peiner seguem o disposto nas equações (76) a (78).

$$V_{Sd} \leq \frac{2}{3} V_{cr} \quad \text{Se } \frac{V_{cr}}{V_{Rk2}} \leq 1 \quad (76)$$

$$V_{Sd} \leq \frac{V_{Rk2} + V_{cr}}{3} \quad \text{Se } 1 \leq \frac{V_{cr}}{V_{Rk2}} \leq 2 \quad (77)$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rk2} \quad \text{Se } \frac{V_{cr}}{V_{Rk2}} \geq 2 \quad (78)$$

Onde,

V_{Rk2} é a força cortante nominal resistente máxima calculada para o estado limite último de colapso do montante da alma por flexão.

2.5.4 Verificação da flecha no ELS

Para as vigas alveolares, conforme Cimadevila, Gutiérrez e Rodríguez (2000) *apud* Silveira (2011), a flecha deve ser calculada considerando os esforços de momento fletor e de força cortante, sendo que o segundo representa entre 5 e 20% do deslocamento total da viga.

Desta forma, podemos expressar a flecha total de uma viga alveolar decompondo as parcelas que a compõem, conforme a equação (79).

$$f_{tot} = f_M + f_V \quad (79)$$

Onde,

f_{tot} é a flecha total apresentada pela viga;

f_M é a parcela da flecha total correspondente ao esforço de momento fletor;

f_V é a parcela da flecha total correspondente ao esforço de cisalhamento.

Considerando-se uma viga alveolar padrão Peiner biengastada submetida a um carregamento horizontal distribuído tem-se as equações (80) e (81):

$$f_M = \frac{q L^4}{384 E I_e} \quad (80)$$

$$f_V = \frac{q L^2}{8 G A_e} \quad (81)$$

Onde,

L é o vão da viga;

G é o módulo de elasticidade transversal do aço;

A_e é a área equivalente da viga alveolar determinada pelo inverso da equação (82).

$$\frac{1}{A_e} = 4,154 \frac{a^3}{t_w y_0^2 p^2} + 1,248 \frac{a}{t_w y_0^2} + \frac{p^2}{1684,8 I_t} + \frac{t_w y_a^5}{22,5 I_t^2} \quad (82)$$

2.5.5 Determinação do vão de projeto para vigas alveolares

Como afirma Oliveira et al. (2012), o montante de extremidade da viga deve seguir duas orientações:

1) possuir largura útil suficiente para fixação, aparafusada ou por soldagem, de cantoneiras compatíveis com a resistência do perfil. Estas cantoneiras têm como função efetuar as

ligações viga-viga ou viga-pilar. Segundo Baião Filho e Silva (2010) devem possuir dimensões mínimas de:

- a) 76 mm para perfis das séries W150 a W460;
 - b) 102 mm para perfis da séries W530 a W610.
- 2) possuir largura maior ou igual ao montante da alma utilizado nos outros passos (b_w).

Uma visão mais conservadora é apresentada por Leonart (1988) *apud* Oliveira (2012), que afirma que os montantes de extremidade das vigas alveolares (b_{we}) devem possuir, no mínimo, uma vez e meia a largura dos demais montantes ($b_{w,min} = 1,5 b_w$), uma vez que estes montantes estão sujeitos a esforço cortante crítico por estarem junto aos apoios.

Ainda conforme Oliveira; Veríssimo; Vieira et al. (2012), o vão de projeto é denominado L_v . Como já foi estabelecida a largura mínima para os montantes de extremidade ($b_{w,min}$), pode-se efetuar o dimensionamento do vão longitudinal no qual são distribuídos os alvéolos (L_d) conforme a formulação disposta na equação (83).

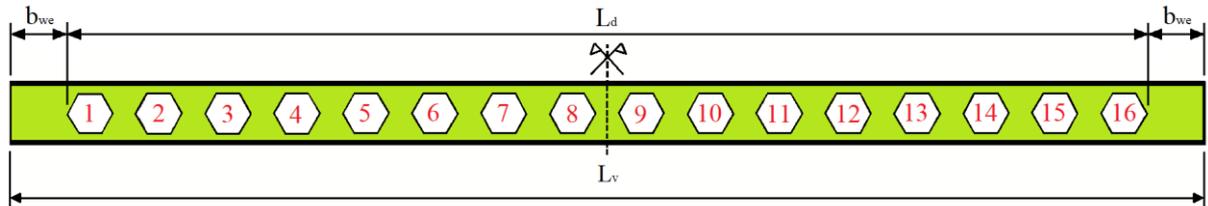
$$L_d \leq L_v - 2 \left(b_{w,min} - \frac{b_w}{2} \right) \quad (83)$$

Obtendo-se L_d , pode-se calcular o número de alvéolos inteiros (n) que serão dispostos ao longo da viga, observando que n é função do passo (p) e deve sofrer arredondamento ao número inteiro inferior quando este apresentar casas decimais, conforme equação (84).

$$n = INT \left(\frac{L_d}{p} \right) \quad (84)$$

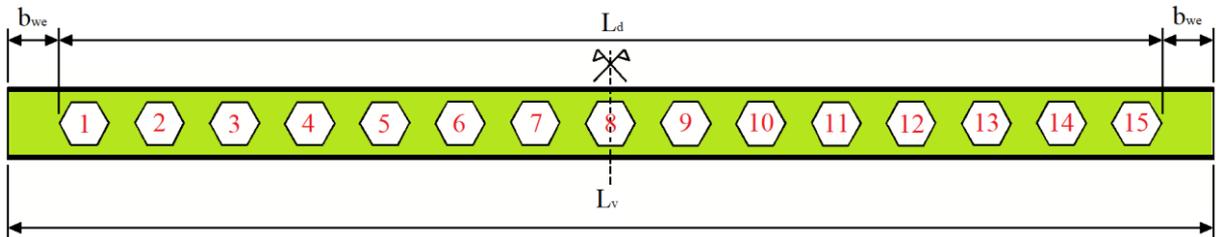
Quanto à distribuição dos alvéolos inteiros (n) sobre o comprimento longitudinal da viga (L_d), estes devem ser distribuídos a partir do eixo transversal da viga, observando que quando n for um número par, o eixo transversal da viga coincidirá com o eixo transversal de um montante, logo, quando n for um número ímpar a coincidência ocorrerá com o eixo do alvéolo, desta forma, estabelece-se a simetria na viga conforme Oliveira et al (2012) e é demonstrada nas figuras 23 e 24.

Figura 23 - Disposição simétrica do número de alvéolos pares em relação ao vão longitudinal (L_v)



FONTE: Adaptado de Oliveira et al. (2012).

Figura 24 - Disposição simétrica do número de alvéolos ímpares em relação ao o vão longitudinal (L_v)



FONTE: Adaptado de Oliveira et al. (2012).

Poderá ocorrer um aumento no comprimento dos montantes de extremidade devido ao arredondamento no número de alvéolos. Para a efetivação deste ajuste deve-se seguir o disposto na equação (85).

$$b_{we} = \frac{L_v - (n p)}{2} + b_{w,min} - \frac{b_w}{2} \quad (85)$$

Segundo Oliveira (2012), existem comprimentos residuais correspondentes a frações do passo. Pode-se denominar o número de passos inteiros de n e o comprimento residual de z , seguindo as equações (86) e (87).

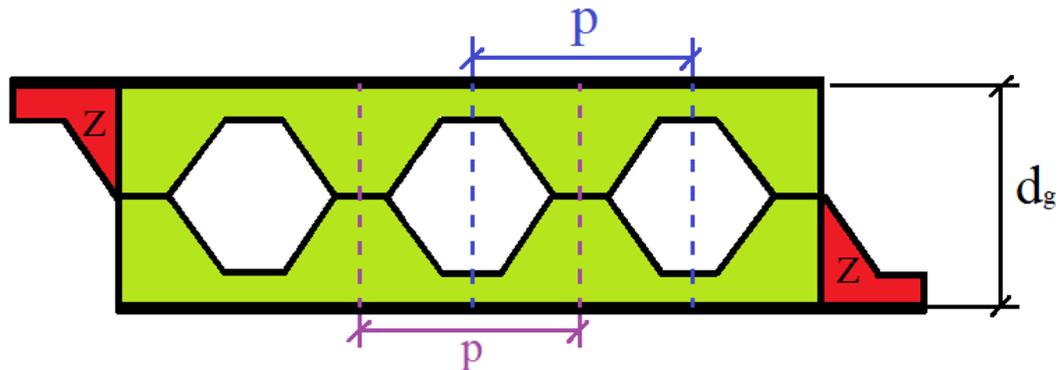
$$z = \frac{L_v - n p}{2} \quad (86)$$

Logo,

$$L_v = n p + 2z \quad (87)$$

Durante o processo de montagem do perfil alveolar deve ser observada a ocorrência de perda equivalente à metade do passo ($p/2$) no comprimento do perfil devido ao deslocamento de parte do perfil para que seja obtida maior altura, conforme mostra a figura 25.

Figura 25 - Perda no comprimento longitudinal do perfil original devido ao processo de montagem do perfil alveolar



FONTE: O autor (2018).

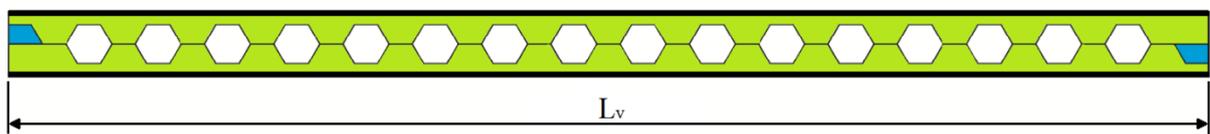
Desta forma, o comprimento de corte (L_c) pode ser definido segundo a equação (88) e a porcentagem que indica o quanto o perfil original deve ser maior que o perfil alveolar para cobrir o vão L_v é dada pela equação (89).

$$L_c = L_v + \frac{p}{2} \quad (88)$$

$$\frac{L_c}{L_v} = \% \text{ Perfil original deve ser maior que o vão} \quad (89)$$

Também é possível um melhor aproveitamento do perfil original através de preenchimento com chapas de aço (FIGURA 26).

Figura 26 - Aproveitamento do comprimento longitudinal do perfil original após o processo de montagem do perfil alveolar com preenchimento de chapas de aço



■ Preenchimento com chapa de aço

FONTE: Adaptado de Oliveira et al. (2012).

2.6 Não-linearidade pelo método dos elementos finitos

O comportamento das estruturas é naturalmente não-linear, apresentando relação tensão-deformação desproporcional, porém, objetivando a simplificação do

dimensionamento, adotam-se premissas que possibilitam realizar uma análise linear. Estas simplificações, além de facilitarem os cálculos, podem superdimensionar as estruturas, tornando-as menos econômicas e mais seguras do ponto de vista das condições usuais de serviço (CORRÊA, 2015).

Ainda conforme Corrêa (2015), as premissas que são adotadas quando se simplifica o comportamento das estruturas são:

- a) relação entre o campo de deformação e o campo de deslocamentos lineares baseada na teoria da elasticidade;
- b) proporcionalidade entre tensões e deformações;
- c) linearidade das equações que envolvem as tensões e as cargas aplicadas à estrutura, onde se admite que exista um limite que impede a movimentação do corpo rígido tornando a solução do problema linear única;
- d) adota-se a sobreposição das ações atuantes na estrutura, calculadas de forma linear e solucionadas separadamente para verificação do equilíbrio.

A análise não-linear busca através de projeções prever o comportamento real de estruturas baseando-se em parâmetros referentes às ações impostas às estruturas e às propriedades dos materiais que as compõe.

Um dos métodos mais utilizados para efetuar a análise não-linear de uma estrutura é o método dos elementos finitos, que utiliza de processo incremental-iterativo para prever os deslocamentos e deformações da estrutura através do controle de variáveis. Estas variáveis são expressas por matrizes e vetores, que têm como função atribuir cargas, e rigidez ao material. De acordo com Fuina (2004), as equações que descrevem este processo são:

$$[K]_{j-1}^i \{\delta U\}_j^i = \delta \lambda_j^i \{P\} + \{Q\}_{j-1}^i \quad (90)$$

onde,

$[K]_{j-1}^i$ é a matriz de rigidez tangente na iteração $(j - 1)$ do passo (i) que é função do campo de deslocamentos $(\{U\}_j^i)$;

$\{\delta U\}_j^i$ é o vetor deslocamentos incrementais da iteração (j) do passo (i) ;

$\delta \lambda_j^i$ é o incremento do fator de cargas na iteração (j) do passo (i) ;

$\{P\}$ é o vetor de cargas de referência;

$\{Q\}_{j-1}^i$ é o vetor de forças residuais da iteração $(j - 1)$ do passo (i) .

No início do processo, é estabelecido um valor para o fator de carga ($\delta\lambda_j$) que, por sua vez, gerará um vetor de deslocamento ($\{U\}_j$). Este vetor é composto por dois outros vetores correspondentes à carga de referência ($\{\delta U\}_j^P$), e à carga residual ($\{\delta U\}_j^Q$), conforme as equações (91) a (93).

$$\{U\}_j = \delta\lambda_j\{\delta U\}_j^P + \{\delta U\}_j^Q \quad (91)$$

Onde,

$$[K]_{j-1}\{\delta U\}_j^P = \{P\} \quad (92)$$

e

$$[K]_{j-1}\{\delta U\}_j^Q = \{Q\}_{j-1} \quad (93)$$

A verificação do equilíbrio da estrutura é feita ao final de cada iteração, Para que o processo incremental-iterativo prossiga para o próximo passo, é necessário que o vetor de forças residuais e/ou o vetor de deslocamentos apresente convergência, redistribuindo as tensões pela estrutura sem que ocorra colapso. Desta forma, Fuina (2004) apresenta a atualização do fator de carga, vetor de deslocamento e vetor de cargas residuais respectivamente, para que um novo passo se inicie, conforme as equações (94) a (96).

$$\lambda_j = \lambda_{j-1} + \delta\lambda_j \quad (94)$$

$$\{U\}_j = \{U\}_{j-1} + \{\delta U\}_j \quad (95)$$

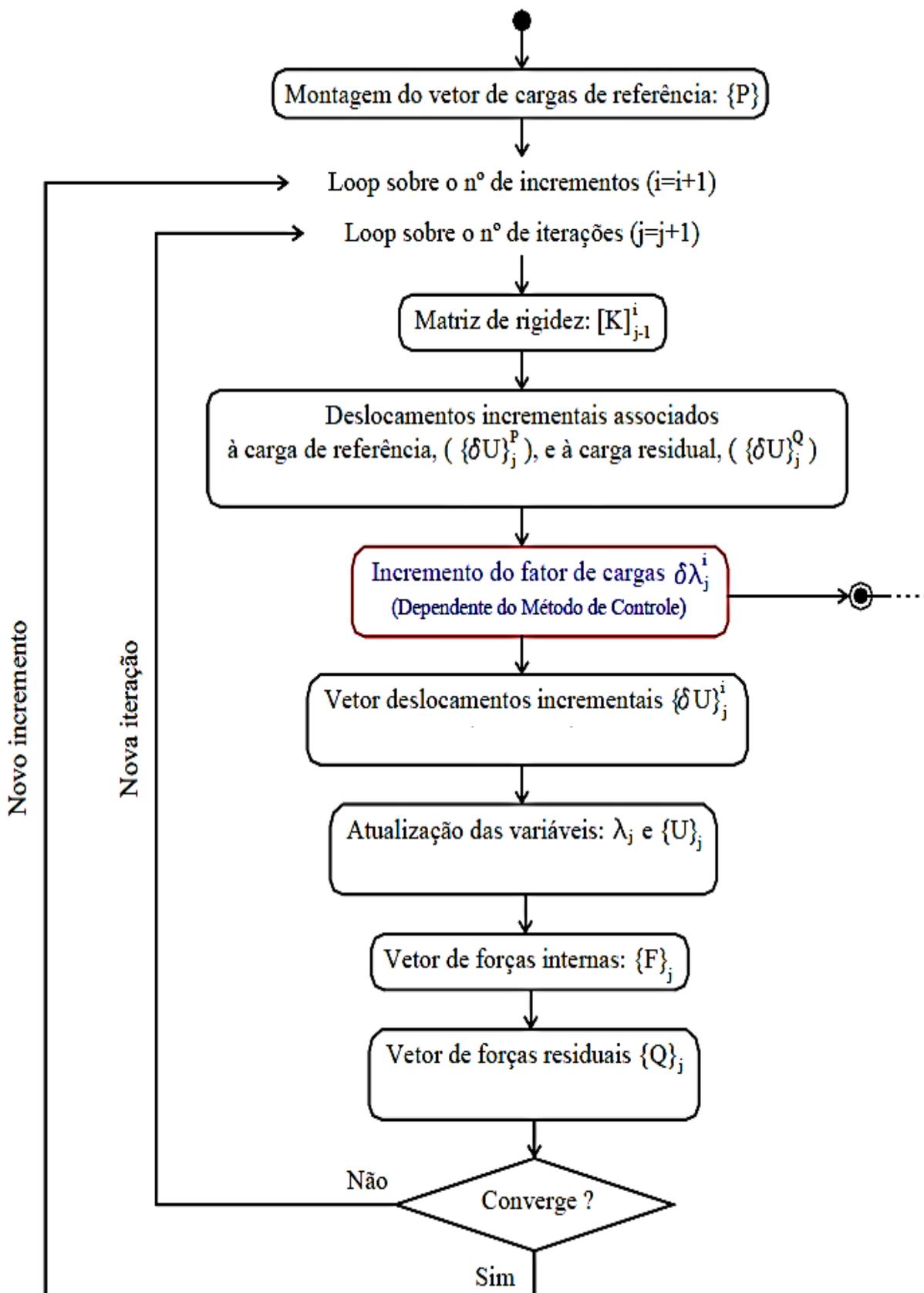
$$\{Q\}_j = \lambda_j\{P\} - \{F\}_j \quad (96)$$

Onde,

$\{F\}_j$ é o vetor de forças equivalentes às tensões internas ao final da iteração (j).

Observa-se que, na primeira iteração de cada passo, o vetor de cargas residuais ($\{Q\}_{j-1}$) é nulo (FIGURA 27).

Figura 27 - Fluxograma do processo de incrementos e iterações



FONTE: Fuina (2004).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo visa comparar o desempenho de perfis de alma cheia e perfis alveolares empregados como vigas de cobertura, utilizando-se de ferramentas analíticas e numéricas para analisar o comportamento estrutural. Para atender aos objetivos específicos do presente trabalho, apresenta, a seguir, a descrição metodológica.

São estabelecidos parâmetros comuns para comparação entre os elementos construtivos utilizando vigas de alma cheia e vigas alveolares. Para tal, foi efetuada pesquisa literária sobre as situações mais frequentes de uso dos dois tipos de perfil e suas principais formas de colapso. São apresentados os parâmetros de cálculo definidos em normas técnicas.

Quanto aos comprimentos das vigas são considerados para os dois tipos de viga: 25, 30, 35 e 40 metros, sendo que, o espaçamento entre os pórticos dos galpões é de 10 metros, com relação aos pilares, foi adotado uma altura de 10 metros e rigidez infinita do perfil.

As vigas foram sujeitas a uma carga permanente de $0,25 \text{ kN/m}^2$, sendo esta dividida em: $0,15 \text{ kN/m}^2$ correspondente ao peso médio da estrutura de cobertura, referente às telhas, terças, tirantes, contraventamentos de cobertura, mãos francesas e tesouras, e ainda $0,10 \text{ kN/m}^2$ correspondendo à utilidades referentes às tubulações e elementos para iluminação. A sobrecarga de $0,25 \text{ kN/m}^2$ representa o valor mínimo estabelecido pela norma técnica NBR 8800 (ABNT, 2008).

Os esforços relativos ao vento seguiram os parâmetros estabelecidos pela NBR 6123 (ABNT, 1988). Como todas as estruturas se encontram localizadas na região metropolitana de Belo Horizonte, apresentam o mesmo valor de pressão de vento.

Para obtenção dos esforços resultantes da pressão dinâmica nas paredes e no telhado da estrutura dos galpões foi utilizado o programa computacional Visual Ventos, desenvolvido na Universidade de Passo Fundo (RS), (CHAMBERLAIN; CHIARELLO, 1988). As estruturas foram verificadas de acordo com parâmetros de segurança relacionados ao ELU e de desempenho relacionados ao ELS, conforme disposto na NBR 8800 (ABNT, 2008).

Para efetuar os cálculos das vigas de alma cheia, foi feito lançamento dos dados referentes ao modelo da estrutura no programa de análise estrutural *SAP2000*, utilizando-se de uma estrutura bidimensional composta por barras e nós. Por meio de uma análise computacional de segunda ordem, foram obtidos os esforços referentes ao momento fletor, esforço cortante, força normal tração e compressão nas barras.

Em um segundo momento, foram utilizadas planilhas elaboradas no programa Microsoft Excel (JACOB, 2017). Nessas planilhas, foram inseridos os dados referentes ao comprimento do vão, esforços atuantes máximos de momento fletor, esforço cortante, compressão e tração nas barras, bem como os comprimentos destravados em relação aos eixos x e y, e os coeficientes de flambagem referentes aos eixos x, y e z.

Desta forma, a planilha forneceu o perfil que apresentava menor massa por metro de viga, cumprindo todos os requisitos rescritos da NBR 8800 (ABNT, 2008).

Para efetuar o estudo analítico das vigas alveolares utilizou-se os mesmos valores referentes aos esforços máximos de momento fletor, esforço cortante, compressão e tração nas barras obtidos para as vigas de alma cheia no programa de análise estrutural *SAP2000*, objetivando estabelecer um parâmetro de comparação.

Posteriormente, foram aplicadas as fórmulas para obtenção das propriedades equivalentes para esta tipologia de perfil, bem como as formulações que orientam seu dimensionamento, ressaltando a utilização dos coeficientes de ponderação que tornam o perfil alveolar aplicável segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008).

Foi efetuada uma comparação entre os perfis de alma cheia relacionando as formas de colapso, e identificando qual destas formas apresenta maior risco para a estrutura. Também foi efetuada uma comparação similar para os perfis alveolares apontando qual o estado limite governaria o dimensionamento desta tipologia de perfil.

Ainda foi efetuada a comparação entre as tipologias de perfis, ressaltando a relação peso/metro dos perfis de alma cheia e alveolares.

O estudo das vigas alveolares utilizando a teoria dos elementos finitos partiu do desenho dos perfis no programa *AutoCAD*, onde também foram desenhados nestes perfis os elementos finitos, procurou-se construir elementos quadrilaterais. Para o comprimento das arestas dos elementos finitos foi adotado um valor mínimo de 5 cm e máximo de 6,5 cm.

Os elementos finitos presentes nas mesas dos perfis possuem uma de suas arestas passando pelo eixo de simetria da mesa, para que haja coincidência com a aresta dos elementos finitos presentes na alma.

Desta forma, optou-se por dividir longitudinalmente as mesas dos perfis em seis partes iguais, obtendo simetria para os elementos finitos localizados nas mesas. Quanto aos elementos finitos da alma, buscou-se manter o comprimento de suas arestas entre 5 cm e 6,5 cm, adaptando o formato dos elementos finitos localizados na região de contorno dos alvéolos para os formatos de paralelogramo ou triângulo. No sentido transversal das vigas foram

empregados elementos finitos nas mesas e na alma de maneira que suas arestas fossem coincidentes para viabilizar convergência da análise computacional.

Posteriormente, foi efetuada a importação dos perfis alveolares como elementos *Shell* para o programa de análise estrutural *SAP2000*, onde foram atribuídos a eles o material aço ASTM A572 Grau 50, espessura para mesas e alma dos perfis de alma cheia que os originaram.

Também foi efetuado o processo de carregamento e atribuição das condições de contorno de engaste para as bases dos pilares e nas ligações com as vigas. Quanto aos outros pontos da estrutura, estes foram impedidos de se deslocarem na direção longitudinal do galpão, adotada no programa como eixo de orientação y.

Foi efetuada análise computacional de segunda ordem considerando as 13 combinações de esforços programadas.

Assim, seguiu-se os mesmos critérios adotados para as vigas alveolares, porém, agora, efetuou-se o enchimento dos alvéolos mantendo-se a mesma altura do perfil alveolar, espessura das mesas e alma, material, carregamentos, condições de contorno e hipóteses de carregamento, fazendo uma análise não linear dos perfis sem os alvéolos.

Os resultados relativos ao deslocamento máximo vertical e à tensão normal máxima em relação ao eixo x foram comparados, demonstrando os efeitos estruturais do processo de alveolamento de uma viga de alma cheia na estrutura de um pórtico.

Foi efetuada a comparação dos resultado para os perfis alveolares e perfis com preenchimento dos alvéolos apontado o deslocamento vertical em três pontos das vigas também foi feita uma análise crítica com relação a uniformidade da distribuição das tensões normais em relação ao eixo x ao longo do comprimento das vigas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O capítulo apresenta os parâmetros adotados para obtenção do perfil de menor peso, e capaz de atender as prescrições normativas referentes aos principais estados limites que podem atuar sobre as vigas de alma cheia e alveolares empregadas como vigas de cobertura para os comprimentos dos vãos adotados.

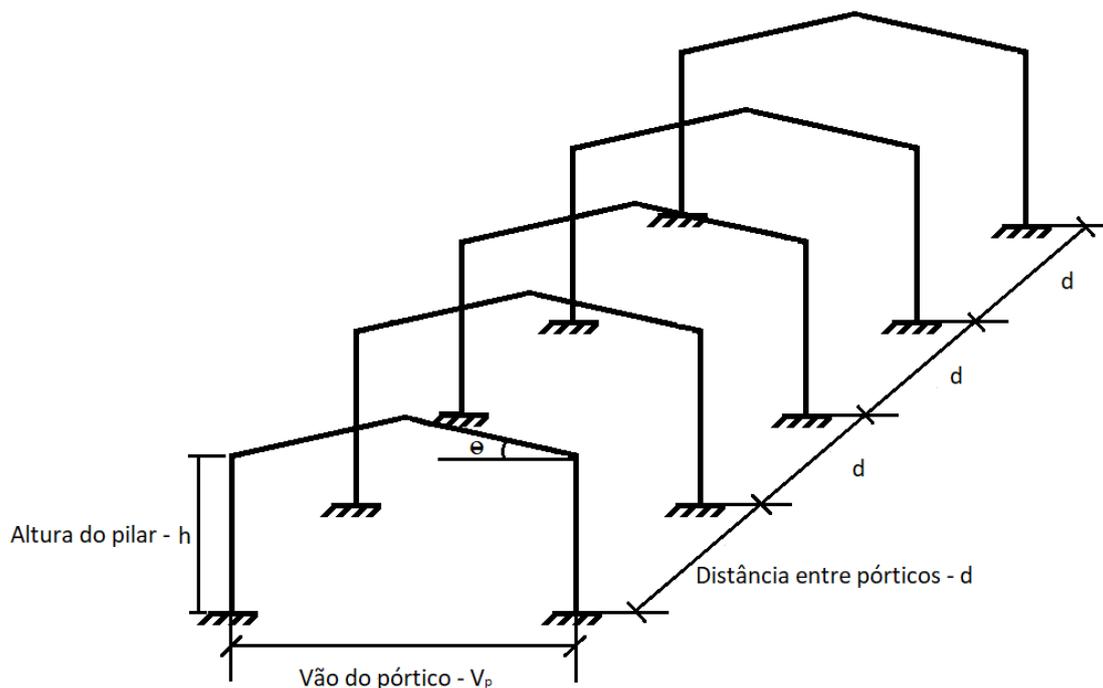
Também são apresentadas comparações de desempenho estrutural das vigas de alma cheia e alveolares considerando os tipos de colapso que governaram o dimensionamento, por fim é feita a comparação entre os tipos de perfis adotados, mostrando qual destes apresentou menor quantidade de aço por metro de viga empregado.

4.1 Parâmetros para o dimensionamento dos perfis

4.1.1 Generalidades

O modelo estrutural adotado para o estudo das vigas de cobertura construídas a partir de perfis de alma cheia e alveolares foi o pórtico engastado, no qual as dimensões são apresentadas na figura 30.

Figura 28 - Modelo estrutural adotado e dimensões genéricas da estrutura em estudo



FONTE: O autor (2018).

Onde,

$V_p = 25$ a 40m interpolado de 5m

$d = 10\text{m}$

$\theta = 5^\circ$

$h = 10\text{m}$

O estudo analítico presume que as edificações, localizam-se na região metropolitana de Belo Horizonte, portanto, estão sujeitas à mesma velocidade básica do vento com magnitude de 35m/s .

Os fatores que influenciam na pressão dinâmica do vento atuante sobre as estruturas (S_1, S_2 e S_3), serão os mesmos adotados para todas as estruturas analisadas, logo a pressão dinâmica que resulta nos esforços horizontais e verticais sobre as estruturas também é a mesma.

Os coeficientes de forma externos nas paredes das edificações são calculados de acordo com a tabela 1 e a figura 2. Já os coeficientes de fôrma externos relativos ao telhado são calculados de acordo com a tabela 2 e figura 3.

Quanto aos coeficientes de pressão interna (C_{pi}), tratados na seção (2.1.2), estes terão os mesmos valores adotados em todos os casos deste estudo, uma vez que as vigas de cobertura analisadas são de galpões que possuem fechamentos impermeáveis em duas faces paralelas de sua estrutura, e fechamentos permeáveis nas outras duas faces.

Os pilares que receberão as cargas das vigas serão engastados nas bases e fixados às vigas. Desta forma, haverá transferência de momentos fletores oriundos dos esforços horizontais e verticais para as vigas e será adotado somente um tipo de pilar para todas as estruturas, visando a simplificação da comparação entre tipologias de perfis utilizados para as vigas.

O aço utilizado para a fabricação dos dois tipos de perfis empregados como vigas é o ASTM A572 Grau 50, que tem suas propriedades descritas conforme o quadro 1.

Quanto aos carregamentos permanentes, estes apresentam magnitude total de $0,25\text{ kN/m}^2$ adotados para os perfis de alma cheia e alveolares, como mencionado anteriormente.

Com relação aos carregamentos acidentais, adotou-se $0,25\text{ kN/m}^2$, que é o mínimo estabelecido pela NBR 8800 (ABNT, 2008) para vigas de cobertura, estes valores foram adotados para às vigas de alma cheia e alveolares.

4.1.2 Determinação da pressão dinâmica do vento atuante sobre a estrutura

As estruturas em estudo localizam-se em terreno plano, distante de taludes, portanto, seu fator (S_1), é de 1,0.

Como se trata de edificações previstas para a região metropolitana de Belo Horizonte foi considerado que estas se enquadram na categoria IV, por pertencerem a subúrbio de grande cidade altamente povoada, suas dimensões em planta apresentam-se entre 20 e 50 m e sua altura é inferior a 20 m, logo, são enquadradas na classe B (ABNT, 1988).

Quanto à altura da estrutura, a NBR 6123 (ABNT, 1988) determina que sejam utilizados três fatores S_2 diferentes, portanto, três velocidades características e, por fim, três intensidades de pressão dinâmica do vento, dadas de acordo com a tabela 8.

Com relação ao coeficiente estatístico S_3 , as edificações são enquadradas no grupo 2, de acordo com o disposto na NBR 6123 (ABNT, 1988). Desta forma, seu fator S_3 será igual a 1,0.

Assim, estes valores estão de acordo com o proposto pela NBR 6123 (ABNT, 1988) no que se refere aos coeficientes aplicados para obtenção da velocidade característica resultante relativa à incidência do vento sobre as estruturas.

Conforme estabelecido nas equações (4) e (5), as velocidades características, bem como as pressões dinâmicas do vento atuantes nas edificações em estudo estão mostrados na tabela 8.

Tabela 8 - Aplicação da pressão dinâmica do vento na estrutura

Altura de incidência do vento	Coefficiente S_2	Velocidade característica (m/s)	Pressão dinâmica (kN/m ²)
$h \leq 5\text{m}$	0,76	26,60	0,434
$5\text{ m} \leq h \leq 10\text{ m}$	0,83	29,05	0,517
$10\text{ m} < h \leq 15$	0,88	30,80	0,581

FONTE: O autor (2018).

4.1.3 Determinação dos coeficientes de pressão interna e externa nas paredes e telhado das edificações e esforços resultantes das ações do vento

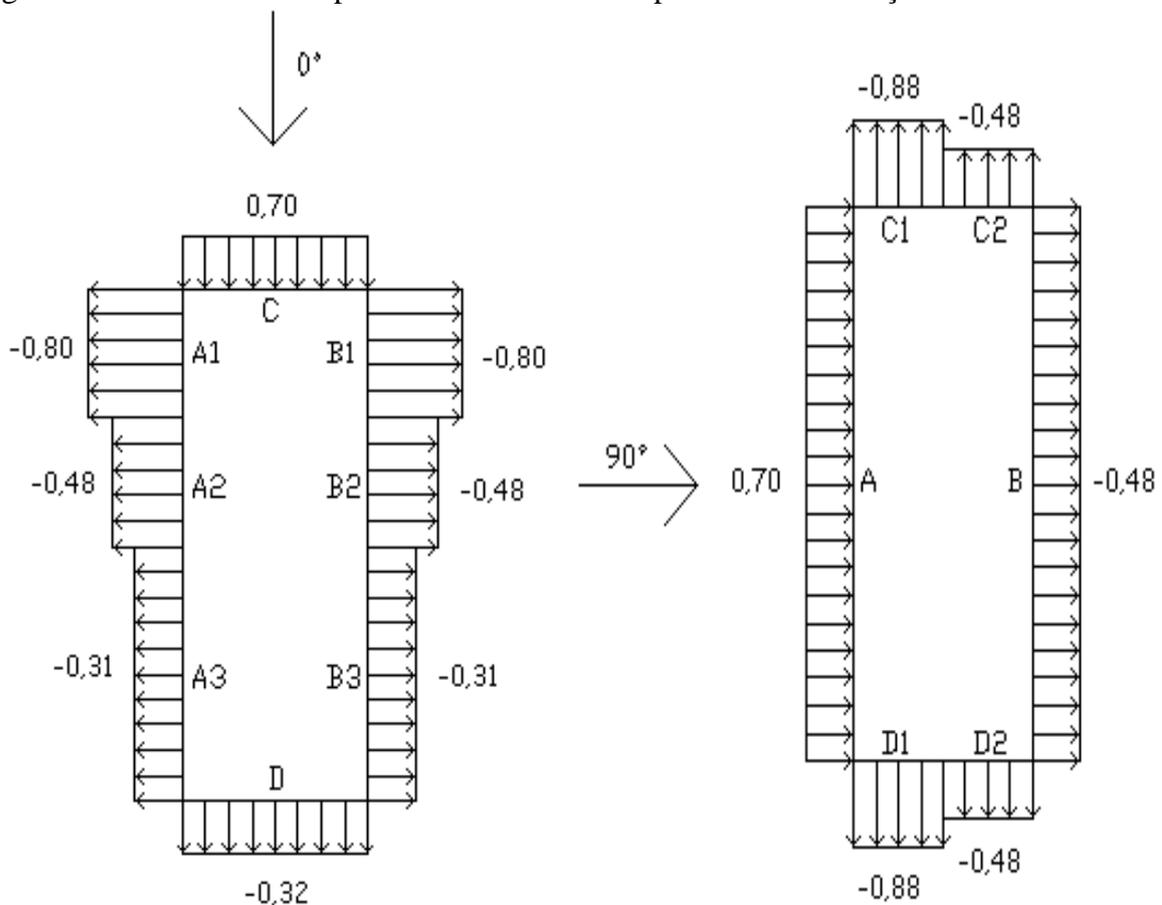
Como foi apresentada na seção 2.1.2, é necessária a determinação dos coeficientes de pressão internos e externos sobre as paredes e o telhado das edificações.

Conforme mostrado pelas tabelas 1 e 2, juntamente com as figuras 2 e 3 os coeficientes de pressão externos aplicados nas paredes e no telhado das edificações, foram calculados e estão demonstrados nas figuras 29 e 30.

Apesar da NBR 6123 (ABNT, 1988) apresentar os coeficientes, foram adotados os resultados obtidos pelo programa de cálculo dos coeficientes de pressão externo e interno *Visual Ventos*, por indicar resultados mais conservadores que os normatizados para as paredes das edificações e os mesmos coeficientes normatizados para o telhado das edificações.

Como, $\frac{h}{b} \leq 0,5$ e $2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$ aplicam-se a todos os casos deste estudo, tem-se os resultados apresentados na figura 29.

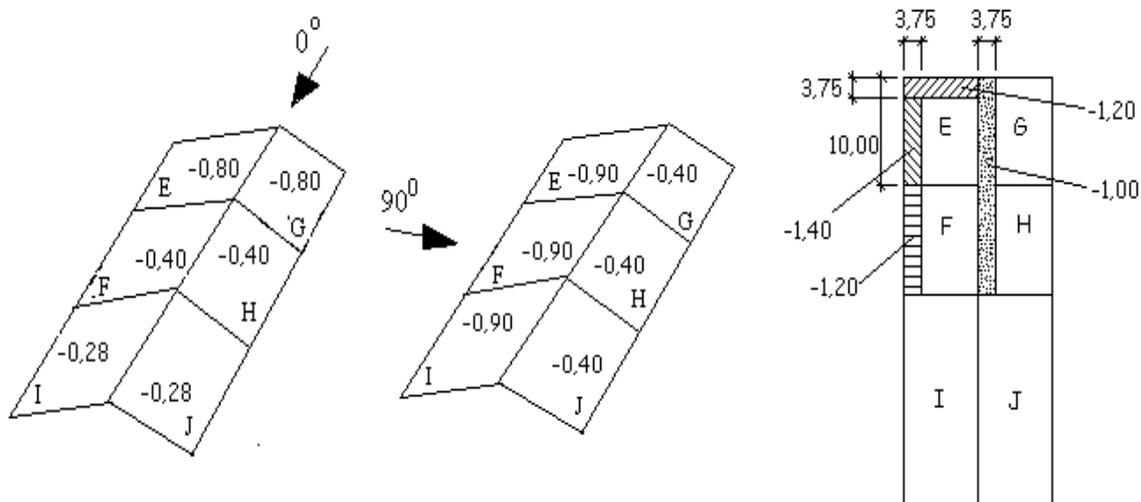
Figura 29 - Coeficientes de pressão externa sobre as paredes da edificação



FONTE: O autor (2018).

Como $\frac{h}{b} \leq 0,5$ e $\theta = 5^\circ$ aplica-se a todos os casos deste estudo, tem-se os resultados apresentados na figura 30.

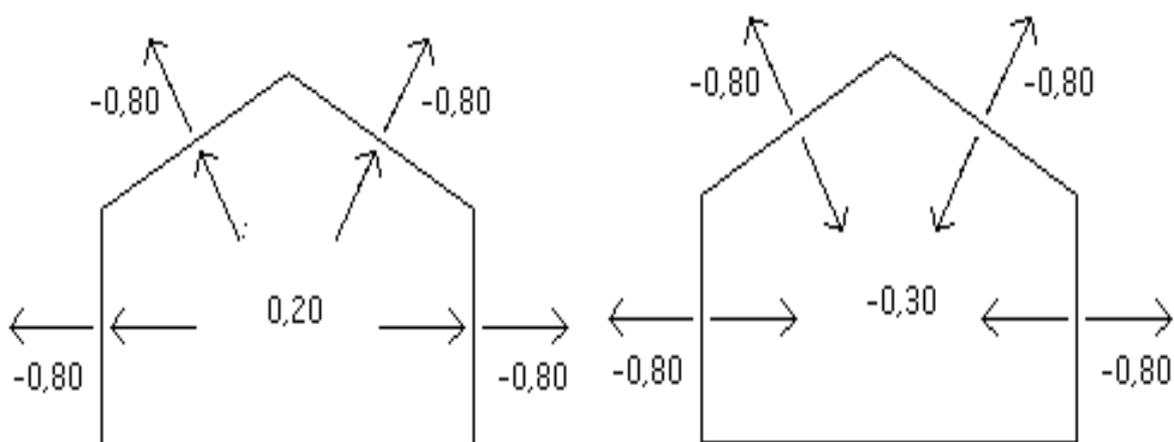
Figura 30 - Coeficientes de pressão externa sobre as paredes da edificação



FONTE: O autor (2018).

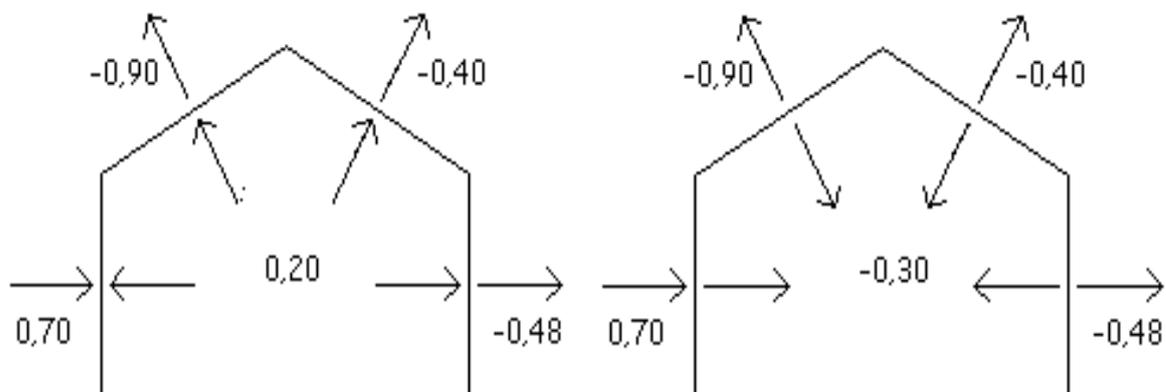
Conforme visto na seção 2.1.2, os coeficientes de pressão interna variam de acordo com a incidência do vento nas faces permeáveis e impermeáveis da edificação, portanto, apresentam valores de $C_{pi} = +0,2$ ou $C_{pi} = -0,3$, desta forma, a soma das resultantes entre os coeficientes de pressão interno e externo nas paredes e nas faces do telhado da edificação são apresentados nas figuras 31 e 32.

Figura 31 - Combinação dos coeficientes de pressão externa e interna sobre as paredes e telhado da edificação para vento a 0°



FONTE: O autor (2018).

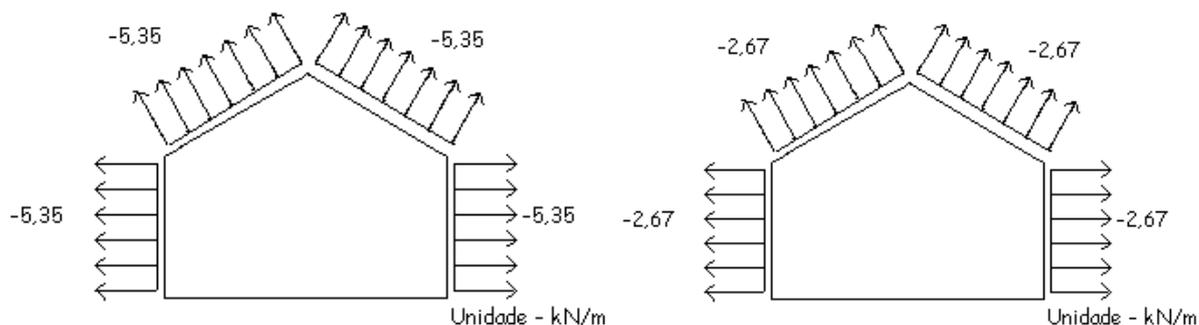
Figura 32 - Combinação dos coeficientes de pressão externa e interna sobre as paredes e telhado da edificação para vento a 90°



FONTE: O autor (2018).

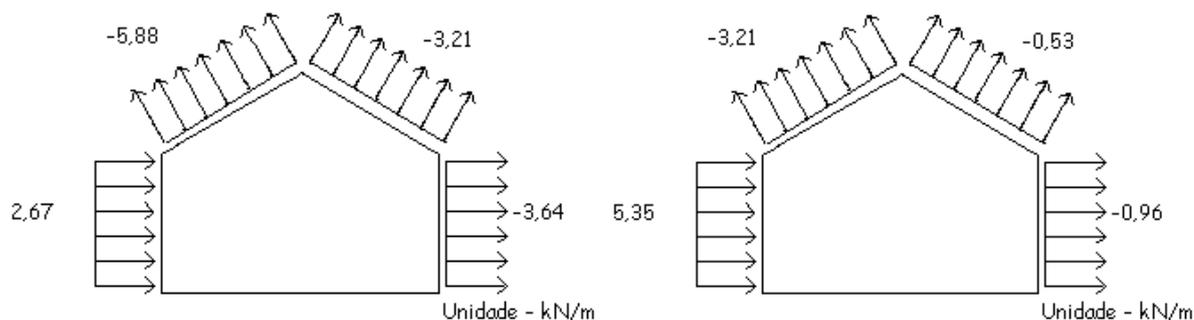
Os esforços resultantes das combinações dos coeficientes são apresentados nas figuras 33 e 34.

Figura 33 - Esforços resultantes com aplicação das combinações dos coeficientes de pressão externa e interna sobre as paredes e telhado da edificação para vento a 0°



FONTE: O autor (2018).

Figura 34 - Esforços resultantes com aplicação das combinações dos coeficientes de pressão externa e interna sobre as paredes e telhado da edificação para vento a 90°



FONTE: O autor (2018).

4.2 Determinação dos esforços e das combinações de cálculo para as estruturas

Como apresentado na seção 2.1.4 para as combinações últimas de carregamento aplicáveis às estruturas, serão adotadas na dissertação apenas os casos de combinação normal.

Apesar dessa dissertação não tratar do dimensionamento dos pilares, estes são engastados nas bases e travados nas vigas em sua outra extremidade, portanto, transferem os esforços relativos ao momento fletor para as vigas e, desta forma, devem ser considerados (TABELA 9).

Tabela 9 - Configurações das hipóteses de carregamento das estruturas

Hipótese	FATOR MULTIPLICADOR E CARREGAMENTOS					
	Carregamento Permanente (CP)	Carregamento Acidental (CA)	Carregamento Vento a 0° (VE 0°)	Carregamento Vento a 90° 1 (VE 90° 1)	Carregamento Vento a 90° 2 (VE 90° 2)	Carregamento Nocional (F _{nd})
H1	1,4	1,5	-	-	-	X 1,4
H2	1,4	-	1,4	-	-	-
H3	1,4	-	-	1,4	-	-
H4	1,4	-	-	-	1,4	-
H5	1,0	-	1,4	-	-	-
H6	1,0	-	-	1,4	-	-
H7	1,0	-	-	-	1,4	-
H8	1,4	1,5	1,4 x 0,6	-	-	-
H9	1,4	1,5	-	1,4 x 0,6	-	-
H10	1,4	1,5	-	-	1,4 x 0,6	-
H11	1,4	1,5 x 0,7	1,4	-	-	-
H12	1,4	1,5 x 0,7	-	1,4	-	-
H13	1,4	1,5 x 0,7	-	-	1,4	-

FONTE: O autor (2018).

As combinações de ações propostas mostram concordância com o disposto na NBR 8681 (ABNT, 2003) – Ações e segurança nas estruturas – Procedimento, e com as aplicações expostas por Fakury; Silva; Caldas (2016).

4.3 Dimensionamento dos perfis de alma cheia considerando o ELU

Para se efetuar o processo de dimensionamento das vigas compostas por perfis de alma cheia seguiram-se duas etapas:

1 - lançamento dos dados referentes ao comprimento do vão, seção transversal, carregamentos, restrições dos apoios e combinações de esforços no programa de análise estrutural *SAP2000* utilizando-se de uma estrutura bidimensional composta por barras e nós.

Através da análise computacional, foram obtidos os esforços referentes ao momento fletor, esforço cortante e esforço normal de tração e compressão nas barras;

2 - em um segundo momento, foi utilizada uma planilha elaborada no programa Microsoft Office Excel Jacob (2017), em que foram inseridos os dados referentes ao comprimento do vão, esforços resultantes máximos de momento fletor, esforço cortante, esforço normal compressão e tração nas barras, bem como os comprimentos destravados em relação aos eixos x e y e os coeficientes de flambagem referentes aos eixos x, y e z. Assim, a planilha forneceu o perfil que apresentou menor massa por metro, cumprindo todos os requisitos prepostos pela NBR 8800 (ABNT, 2008).

4.3.1 Dimensionamento dos perfis de alma cheia considerando o ELU para o vão de 25 metros

Os esforços resultantes máximos para o pórtico com comprimento de 25 metros, analisado através do programa *SAP2000*, estão apresentados na tabela 10.

Tabela 10 - Esforços e deslocamentos obtidos através do programa *SAP2000* - Pórtico com viga de alma cheia comprimento de 25 metros, perfil W530X66

ESFORÇOS E DESLOCAMENTOS - PÓRTICO COM VIGAS DE ALMA CHEIA 25 m - PERFIL W530X66						
Hipóteses	Esforços máximos nas vigas					
	Esforço cortante (kN)	Momento fletor (+) (kN.cm)	Momento fletor (-) (kN.cm)	Esforço axial (kN)	Deslocamento vertical na direção do eixo z(cm)	Deslocamento horizontal do nó de extremidade na direção do eixo x (cm)
H1	58,86	6.089,70	18.060,72	-379,89	-1,57	1,140
H2	32,01	9.638,07	3.200,99	+203,82	+1,97	0,537
H3	37,46	10.536,59	4.336,19	+145,39	+1,72	3,580
H4	21,81	2.807,96	5.845,76	-46,78	-0,76	3,040
H5	39,99	12.013,95	3.987,27	+254,33	+2,46	0,720
H6	45,41	12.918,12	5.117,75	+198,78	+1,09	3,760
H7	15,58	3.944,01	3.382,09	+7,44	+0,40	3,200
H8	22,18	2.262,06	6.753,06	-142,31	-1,35	0,570
H9	36,52	4.093,06	10.661,10	-178,44	-1,84	1,300
H10	54,93	6.020,51	16.333,62	-296,93	-2,79	0,100
H11	11,07	1.115,06	3.346,50	70,67	+0,70	0,680
H12	16,57	4.245,94	3.048,94	+14,14	+0,46	3,140
H13	43,12	5.012,08	4.916,94	-183,03	-2,02	2,610

FONTE: O autor (2018).

Observando-se os resultados apresentados, constata-se que a hipótese que apresenta os valores críticos para o dimensionamento é a hipótese 1, desta forma, estes valores foram utilizados na planilha que indicou o perfil mais leve capaz de vencer o vão de 25 metros.

Quanto ao deslocamento horizontal em relação ao x, este foi utilizado para verificação exigida pela NBR 8800 (ABNT, 2008) relacionada ao nível de deslocabilidade da estrutura, que deve ser menor que $h/300$, logo $1.000\text{cm}/300 = 3,33\text{cm}$, sendo que neste quesito, a estrutura não cumpre a exigência normativa.

Esta dissertação não se dedicou ao dimensionamento dos pilares, porém, como sugestão para resolver a questão dos deslocamentos horizontais excessivos, pode-se empregar pilares que possuam maior rigidez que, por sua vez, reduziram a magnitude destes deslocamentos. Para o processo de dimensionamento foi utilizada uma planilha elaborada por Jacob (2017). Os resultados são apresentados na figura 35.

Figura 35 - Dimensionamento da viga do pórtico de alma cheia comprimento de 25 metros, perfil W530X66 (continua)

Esforços e Distâncias			
Lx (mm)	25000		
Ly (mm)	2500		
N(kN)	-379,76		
Vx(kN)	0		
Vy(kN)	58,86		
Mx(kN.cm)	18060,82		
My(kN.cm)	0		
kx	1		
ky	1	kz	1
d (mm)	0		
Lb (mm)	2500		
Material			
ASTM A572GR50			
Fy (kN/cm²)	34,5		

Dados para Cálculo de NRd			
Q	0,84		
Nex(kN)	1132,1	r0(cm)	20,7
Ney(kN)	2774,3	Nez(kN)	4814,70
λ0	1,46		
χ	0,408		

Esbeltez Limite FLA X-X		Esbeltez Limite FLA Y-Y	
λ _{alma}	56,43	λ _{alma}	56,43
λ _p	91,65	λ _p	27,30
λ _r	138,94	λ _r	34,13
Mr	45960,90	Mr	2683,39
Compacta		Esbelta	

Esbeltez Limite FLM X-X		Esbeltez Limite FLM Y-Y	
λ _{mesa}	7,24	λ _{mesa}	7,24
λ _p	9,26	λ _p	9,26
λ _r	24,18	λ _r	24,18
Mr	32172,63	Mr	2509,19
Compacta		Compacta	

Momento Plástico =Z _{fy} X-X		Momento Plástico =Z _{fy} Y-Y	
Mpl(kN.cm)	53751	Mpl(kN.cm)	5727

MRd X-X		MRd Y-Y	
FLA	53751	FLA	3259
FLM	53751	FLM	5727
1,5*W*Fy	62674	1,5*W*Fy	4888

Resultado: **81,9%**

W 530 x 66,0

d(mm)	525	Wx(cm³)	1332,2	rx(cm)	20,46
bf(mm)	165	Wy(cm³)	103,9	ry(cm)	3,2
d'(mm)	478	Zx(cm³)	1558	Área(cm²)	83,6
tw(mm)	8,9	Zy(cm³)	166	ho/tw	53,7
tf(mm)	11,4	Ix(cm⁴)	34971	b/tf	7,2
h(mm)	502,2	Iy(cm⁴)	857	Peso (kg/m)	66,0

1. Verificação da Esbeltez do perfil

Limite	Real	Status	%	
200	122	OK	61,1%	λ _x
200	78	OK	39,1%	λ _y
2. Resistência à tração

Nrd(kN)	Nsd(kN)	Status	%	Coef. S
N.A	0	N.A	0,0%	1,1
3. Resistência à Compressão

Nrd(kN)	Nsd(kN)	Status	%	Coef. S
899	379,76	OK	42,2%	1,1
4. Resistência à Flexão eixo X-X

Mrd(kN.cm)	Msd(kN.cm)	Status	%	Coef. S
40486	18060,82	OK	44,6%	1,1
5. Resistência à Flexão eixo Y-Y

Mrd(kN.cm)	Msd(kN.cm)	Status	%	Coef. S
3259	0	N.A	0,0%	1,1
6. Resistência ao esforço cortante eixo X

Vrd(kN)	Vsd(kN)	Status	%	Coef. S
708	0	N.A	0,0%	1,1
7. Resistência ao esforço cortante eixo Y

Vrd(kN)	Vsd(kN)	Status	%	Coef. S
879	58,86	OK	6,7%	1,1
8. Resistência aos esforços Combinados

Nsd/Nrd 0,422

Combinação	Limite	Resultado	Cálculo
N.Mx.My	100%	OK	81,9%

Figura 35 - Dimensionamento da viga do pórtico de alma cheia comprimento de 25 metros, perfil W530X66 (final)

Esforço Cortante X		Esforço Cortante Y	
λ_{Mesa}	7,24	λ_{Alma}	56,43
λ_p	26,81	λ_p	59,96
A_w	37,62	A_w	46,73
V_{rdx} (kN)	707,94	V_{rdy}	879,28
k_v	1	k_v	5

Esbeltez Limite FLT X-X		Estado Limite FLT	
$\lambda(lb)$	78,13	B1	0,0498
λ_p	42,90	M_{cr}	75796,08
λ_r	125,36	M_{rd}	40485,54
M_r	32172,63	M_{pl}	53751,00
Semi-Compacta			

FONTE: Adaptado de Jacob (2017).

4.3.2 Dimensionamento dos perfis de alma cheia considerando o ELU para o vão de 30 metros

Os resultados referentes à obtenção dos esforços resultantes máximos para o pórtico com viga de alma cheia e comprimento de 30 metros, analisado no programa *SAP2000*, estão apresentados na tabela 11.

Tabela 11- Esforços e deslocamentos obtidos através do programa *SAP2000* - Pórtico com viga de alma cheia comprimento de 30 metros, perfil W530X82

ESFORÇOS E DESLOCAMENTOS - PÓRTICO COM VIGAS DE ALMA CHEIA 30 m - PERFIL W530X82						
Hipóteses	Esforços máximos nas vigas					
	Esforço cortante (kN)	Momento fletor (+) (kN.cm)	Momento fletor (-) (kN.cm)	Esforço axial (kN)	Deslocamento vertical na direção do eixo z(cm)	Deslocamento horizontal do nó de extremidade na direção do eixo x (cm)
H1	67,71	8.262,35	23.777,73	-499,94	-5,13	1,923
H2	36,59	12.525,30	4.253,59	+265,62	+2,83	1,005
H3	43,58	14.178,33	5.967,64	+192,75	+2,06	3,631
H4	25,82	3.979,57	8.146,84	-60,88	-1,24	2,622
H5	45,69	15.606,36	5.289,85	+330,66	+3,54	1,325
H6	52,64	17.252,87	6.992,11	+258,65	+3,35	3,942
H7	18,64	5.640,11	4.913,85	+9,68	+0,69	2,913
H8	25,44	3.041,89	8.838,51	-186,36	-1,95	0,918
H9	42,44	5.651,43	14.285,57	-233,68	-2,79	0,696
H10	63,70	8.293,95	21.790,13	-389,90	-4,39	0,157
H11	12,67	4.359,85	1.488,10	+92,17	+0,97	0,194
H12	19,76	6.029,93	4.475,92	+18,42	+0,86	2,846
H13	50,38	6.985,39	16.730,94	-239,59	-3,09	1,892

FONTE: O autor (2018).

Analisando os resultados apresentados na tabela 11, verifica-se que os valores críticos para o dimensionamento em ELU são apresentados pela hipótese 1, seguindo a mesma

tendência de esforços obtidos quando se analisa a viga do pórtico com comprimento de 25 metros.

Desta forma, estes valores foram inseridos na planilha que foi utilizada para realizar o dimensionamento, obtendo o perfil de menor massa linear, capaz de vencer o vão proposto.

Com relação ao deslocamento horizontal em relação ao eixo x, este apresentou valor maior que $h/300$, $1000\text{cm}/300 = 3,33\text{cm}$, não atendendo à exigência da NBR 8800 (ABNT, 2008).

Assim, os resultados do dimensionamento das vigas estão apresentados na figura 36.

Figura 36 - Dimensionamento da viga do pórtico de alma cheia comprimento de 30 metros, perfil W530X82 (continua)

Esforços e Distâncias			
Lx (mm)	30000		
Ly (mm)	2500		
N(kN)	-499,94		
Vx(kN)	0		
Vy(kN)	67,71		
Mx(kN.cm)	23777,73		
My(kN.cm)	0		
kx	1		
ky	1	kz	1
d (mm)	0		
Lb (mm)	2500		
Material			
ASTM A572GR50			
Fy (kN/cm ²)	34,5		
Dados para Cálculo de NRd			
Q	0,88		
Nex(kN)	1069,4	r0(cm)	21,8
Ney(kN)	6565,1	Nez(kN)	9967,88
λ0	1,72		
χ	0,296		
Esbeltez Limite FLA X-X		Esbeltez Limite FLA Y-Y	
λalma	52,78	λalma	52,78
λp	91,65	λp	27,30
λr	138,94	λr	34,13
Mr	62162,10	Mr	5017,32
Compacta		Esbelta	
Esbeltez Limite FLM X-X		Esbeltez Limite FLM Y-Y	
λmesa	7,86	λmesa	7,86
λp	9,26	λp	9,26
λr	24,18	λr	24,18
Mr	43513,47	Mr	4687,52
Compacta		Compacta	
Momento Plástico =Z.fy X-X		Momento Plástico =Z.fy Y-Y	
Mpl(kN.cm)	71018	Mpl(kN.cm)	10443
MRd X-X		MRd Y-Y	
FLA	71018	FLA	6088
FLM	71018	FLM	10443
1,5*W*Fy	84767	1,5*W*Fy	9132

Resultado: 93,7%

W 530 x 82,0

d(mm)	528	Wx(cm ³)	1801,8	rx(cm)	21,34
bf(mm)	209	Wy(cm ³)	194,1	ry(cm)	4,41
d'(mm)	477	Zx(cm ³)	2058,5	Área(cm ²)	104,5
tw(mm)	9,5	Zy(cm ³)	302,7	ho/tw	50,2
tf(mm)	13,3	Ix(cm ⁴)	47569	b/tf	7,9
h(mm)	501,4	Iy(cm ⁴)	2028	Peso (kg/m)	82,0

1. Verificação da Esbeltez do perfil

Limite	Real	Status	%	
200	141	OK	70,3%	λx 70,3%
200	57	OK	28,3%	λy

2. Resistência à tração

Nrd(kN)	Nsd(kN)	Status	%	Coef. S
N.A	0	N.A	0,0%	1,1

3. Resistência à Compressão

Nrd(kN)	Nsd(kN)	Status	%	Coef. S
853	499,94	OK	58,6%	1,1

4. Resistência à Flexão eixo X-X

Mrd(kN.cm)	Msd(kN.cm)	Status	%	Coef. S
60220	23777,73	OK	39,5%	1,1

5. Resistência à Flexão eixo Y-Y

Mrd(kN.cm)	Msd(kN.cm)	Status	%	Coef. S
6088	0	N.A	0,0%	1,1

6. Resistência ao esforço cortante eixo X

Vrd(kN)	Vsd(kN)	Status	%	Coef. S
1046	0	N.A	0,0%	1,1

7. Resistência ao esforço cortante eixo Y

Vrd(kN)	Vsd(kN)	Status	%	Coef. S
944	67,71	OK	7,2%	1,1

8. Resistência aos esforços Combinados

Nsd/Nrd 0,586

Combinação	Limite	Resultado	Cálculo
N.Mx.My	100%	OK	93,7%

Figura 36 - Dimensionamento da viga do pórtico de alma cheia comprimento de 30 metros, perfil W530X82 (final)

Esforço Cortante X		Esforço Cortante Y	
λ_{Mesa}	7,86	λ_{Alma}	52,78
λ_p	26,81	λ_p	59,96
Aw	55,59	Aw	50,16
Vrdx (kN)	1046,18	Vrdy	943,92
kv	1	kv	5

Esbeltez Limite FLT X-X		Estado Limite FLT	
$\lambda(lb)$	56,69	B1	0,0414
λ_p	42,90	Mcr	176459,63
λ_r	122,30	Mrd	60220,27
Mr	43513,47	Mpl	71018,25
Semi-Compacta			

FONTE: Adaptado de Jacob (2017).

4.3.3 Dimensionamento dos perfis de alma cheia considerando o ELU para o vão de 35 metros

Os esforços resultantes máximos obtidos para a viga do pórtico com comprimento de 35 metros, analisado no programa *SAP2000*, estão apresentados na tabela 12.

Tabela 12 - Esforços e deslocamentos obtidos através do programa *SAP2000* - Pórtico com viga de alma cheia comprimento de 35 metros, perfil W610X101

ESFORÇOS E DESLOCAMENTOS - PÓRTICO COM VIGAS DE ALMA CHEIA 35 m - PERFIL W610X101						
Hipóteses	Esforços máximos nas vigas					
	Esforço cortante (kN)	Momento fletor (+)(kN.cm)	Momento fletor (-) (kN.cm)	Esforço axial (kN)	Deslocamento vertical na direção do eixo z (cm)	Deslocamento horizontal do nó de extremidade na direção do eixo x (cm)
H1	76,53	10.083,46	30.049,81	-629,49	-7,80	3,152
H2	40,86	15.483,04	5.366,65	+328,61	+4,14	1,811
H3	49,38	18.100,49	7.758,16	+239,16	+4,20	3,859
H4	29,84	5.361,36	10.812,96	-75,60	-2,10	2,062
H5	50,97	19.260,72	6.666,47	+409,25	+5,18	2,366
H6	59,41	21.853,07	9.017,70	+320,56	+5,28	4,404
H7	21,68	7.622,24	6.745,07	+12,07	+1,23	2,563
H8	28,61	3.915,62	11.060,82	-232,92	-2,96	1,484
H9	48,35	7.479,40	18.333,51	-292,21	-4,35	0,209
H10	72,53	11.003,01	27.915,38	-489,41	-6,78	1,112
H11	14,18	5.413,11	1.891,13	+114,54	+1,48	0,418
H12	22,93	8.100,05	6.193,70	+22,93	+1,55	2,495
H13	57,69	9.332,49	21.699,48	-299,47	-4,90	0,825

FONTE: O autor (2018).

Observando os resultados apresentados na tabela 12, verifica-se que os valores críticos para o dimensionamento em ELU são apresentados pela hipótese 1, demonstrando coerência entre os valores dos esforços quando comparados com a análise dos pórticos com comprimentos de 25 e 30 metros.

Assim, foram inseridos os dados referentes à hipótese crítica na planilha utilizada para realizar o dimensionamento, obtendo-se o perfil de menor peso por metro, que cumprisse a função estrutural.

O deslocamento horizontal em relação ao eixo x também apresentou valor maior que $h/300$, $1000\text{cm}/300 = 3,33\text{cm}$, em desconformidade com a exigência da NBR 8800 (ABNT, 2008). Os resultados relativos ao dimensionamento das vigas são apresentados na figura 37.

Figura 37 - Dimensionamento da viga do pórtico de alma cheia com comprimento de 35 metros Perfil W610X101 (continua)

Esforços e Distâncias			
Lx (mm)	35000		
Ly (mm)	2500		
N(kN)	-629,49		
Vx(kN)	0		
Vy(kN)	76,53		
Mx(kN.cm)	30049,81		
My(kN.cm)	0		
kx	1		
ky	1	kz	1
d (mm)	0		
Lb (mm)	2500		
Material			
ASTM A572GR50			
Fy (kN/cm ²)	34,5		
Dados para Cálculo de NRd			
Q	0,87		
Nex(kN)	1271,8	r0(cm)	24,8
Ney(kN)	9553,1	Nez(kN)	14450,93
λ0	1,75		
χ	0,285		
Esbeltez Limite FLA X-X		Esbeltez Limite FLA Y-Y	
λalma	54,59	λalma	54,59
λp	91,65	λp	27,30
λr	138,94	λr	34,13
Mr	88113,00	Mr	6689,62
Compacta		Esbelta	
Esbeltez Limite FLM X-X		Esbeltez Limite FLM Y-Y	
λmesa	7,65	λmesa	7,65
λp	9,26	λp	9,26
λr	24,18	λr	24,18
Mr	61679,10	Mr	6250,02
Compacta		Compacta	
Momento Plástico =Z.fy X-X		Momento Plástico =Z.fy Y-Y	
Mpl(kN.cm)	100833	Mpl(kN.cm)	13973
MRd X-X		MRd Y-Y	
FLA	100833	FLA	8117
FLM	100833	FLM	13973
1,5*W*Fy	120154	1,5*W*Fy	12175

Resultado: **92,7%**

W 610 x 101,0			
d(mm)	603	Wx(cm ³)	2554
bf(mm)	228	Wy(cm ³)	258,8
d'(mm)	541	Zx(cm ³)	2922,7
tw(mm)	10,5	Zy(cm ³)	405
tf(mm)	14,9	Ix(cm ⁴)	77003
h(mm)	573,2	Iy(cm ⁴)	2951
rx(cm)	24,31	Área(cm ²)	130,3
ry(cm)	4,76	ho/tw	51,5
		b/tf	7,7
		Peso (kg/m)	101,0

1. Verificação da Esbeltez do perfil

Limite	Real	Status	%	
				72,0%
200	144	OK	72,0%	λx
200	53	OK	26,3%	λy

2. Resistência à tração

Nrd(kN)	Nsd(kN)	Status	%	Coef. S
N.A	0	N.A	0,0%	1,1

3. Resistência à Compressão

Nrd(kN)	Nsd(kN)	Status	%	Coef. S
1014	629,49	OK	62,1%	1,1

4. Resistência à Flexão eixo X-X

Mrd(kN.cm)	Msd(kN.cm)	Status	%	Coef. S
87367	30049,81	OK	34,4%	1,1

5. Resistência à Flexão eixo Y-Y

Mrd(kN.cm)	Msd(kN.cm)	Status	%	Coef. S
8117	0	N.A	0,0%	1,1

6. Resistência ao esforço cortante eixo X

Vrd(kN)	Vsd(kN)	Status	%	Coef. S
1279	0	N.A	0,0%	1,1

7. Resistência ao esforço cortante eixo Y

Vrd(kN)	Vsd(kN)	Status	%	Coef. S
1191	76,53	OK	6,4%	1,1

8. Resistência aos esforços Combinados

Nsd/Nrd 0,621

Combinação	Limite	Resultado	Cálculo
N.Mx.My	100%	OK	92,7%

Figura 37 - Dimensionamento da viga do pórtico de alma cheia com comprimento de 35 metros Perfil W610X101 (continua)

Esforço Cortante X		Esforço Cortante Y	
λ_{Mesa}	7,65	λ_{Alma}	54,59
λ_p	26,81	λ_p	59,96
A_w	67,94	A_w	63,32
V_{rdx} (kN)	1278,58	V_{rdy}	1191,47
k_v	1	k_v	5

Esbeltez Limite FLT X-X		Estado Limite FLT	
$\lambda(lb)$	52,52	B1	0,0368
λ_p	42,90	M_{cr}	291309,79
λ_r	122,54	M_{rd}	87367,14
M_r	61679,10	M_{pl}	100833,15
Semi-Compacta			

FONTE: Adaptado de Jacob (2017).

4.3.4 Dimensionamento dos perfis de alma cheia considerando o ELU para o vão de 40 metros

Os resultados referentes aos esforços resultantes máximos obtidos para a viga do pórtico com comprimento de 40 metros, analisado pelo programa *SAP2000*, estão apresentados na tabela 13.

Tabela 13 - Esforços e deslocamentos obtidos através do programa *SAP2000* - Pórtico com viga de alma cheia com comprimento de 40 metros, perfil W610X140

ESFORÇOS E DESLOCAMENTOS - PÓRTICO COM VIGAS DE ALMA CHEIA 40 m - PERFIL W610X140						
Hipóteses	Esforços máximos nas vigas					
	Esforço cortante (kN)	Momento fletor (+) (kN.cm)	Momento fletor (-) (kN.cm)	Esforço axial (kN)	Deslocamento vertical na direção do eixo z (cm)	Deslocamento horizontal do nó de extremidade na direção do eixo x (cm)
H1	87,23	12.825,54	39.051,55	-705,52	-7,03	3,452
H2	46,92	20.437,74	7.091,48	+372,96	+3,88	1,923
H3	56,69	23.846,14	10.233,38	+271,08	+3,78	3,559
H4	34,07	6.988,28	14.112,20	-85,55	-1,88	1,660
H5	58,56	25.452,58	8.811,20	+464,88	+4,85	2,501
H6	68,26	28.835,73	11.921,90	+363,70	-4,75	4,129
H7	24,79	9.969,64	8.799,21	+13,58	+1,28	2,188
H8	32,72	5.105,37	14.474,96	-262,56	-2,66	1,556
H9	55,16	9.704,67	23.903,74	-329,22	-3,92	0,532
H10	82,63	14.199,79	36.281,94	-549,81	-6,11	1,507
H11	16,26	7.123,99	2.487,18	+129,70	+1,34	0,465
H12	26,23	10.601,47	8.077,22	+25,88	+1,38	2,127
H13	65,77	12.091,32	28.252,01	-337,46	-4,40	0,347

FONTE: O autor (2018).

Observando os resultados apresentados na tabela 13, constata-se que a hipótese que apresenta os valores críticos para o dimensionamento em ELU é a hipótese 1, seguindo coerentemente os resultados obtidos para os vãos de 25 , 30 e 35 metros.

Quanto ao deslocamento horizontal em relação ao eixo x, novamente ficou com valor superior a $h/300$, $1000\text{cm}/300 = 3,33\text{cm}$, descumprindo a exigência da NBR 8800 (ABNT, 2008).

O processo de dimensionamento tem os resultados apresentados na figura 38.

Figura 38 - Dimensionamento da viga do pórtico de alma cheia com comprimento de 40 metros Perfil W610X140

Esforços e Distâncias	
Lx (mm)	40000
Ly (mm)	2500
N(kN)	-705,52
Vx(kN)	0
Vy(kN)	87,23
Mx(kN.cm)	39051,55
My(kN.cm)	0
kx	1
ky	1
kz	1
d (mm)	0
Lb (mm)	2500
Material	
ASTM A572GR50	
Fy (kN/cm²)	34,5

Dados para Cálculo de Nrd			
Q	0,94		
Nex(kN)	1424,1	r0(cm)	25,6
Ney(kN)	14616,1	Nez(kN)	22385,37
λ_0	2,02		
χ	0,215		
Esbeltez Limite FLA X-X		Esbeltez Limite FLA Y-Y	
λ_{alma}	43,71	λ_{alma}	43,71
λ_p	91,65	λ_p	27,30
λ_r	138,94	λ_r	34,13
Mr	125942,25	Mr	10149,68
Compacta		Esbelta	

Esbeltez Limite FLM X-X		Esbeltez Limite FLM Y-Y	
λ_{mesa}	5,18	λ_{mesa}	5,18
λ_p	9,26	λ_p	9,26
λ_r	24,18	λ_r	24,18
Mr	88159,58	Mr	9481,29
Compacta		Compacta	

Momento Plástico =Z.fy X-X		Momento Plástico =Z.fy Y-Y	
Mpl(kN.cm)	143972	Mpl(kN.cm)	21183

MRd X-X		MRd Y-Y	
FLA	143972	FLA	12313
FLM	143972	FLM	21183
$1,5 \cdot W \cdot F_y$	171739	$1,5 \cdot W \cdot F_y$	18470
Esforço Cortante X		Esforço Cortante Y	
λ_{mesa}	5,18	λ_{alma}	43,71
λ_p	26,81	λ_p	59,96
Aw	102,12	Aw	80,83
Vrdx (kN)	1921,71	Vrdy	1521,02
kv	1	kv	5

Esbeltez Limite FLT X-X		Estado Limite FLT	
$\lambda(lb)$	49,80	B1	0,0191
λ_p	42,90	Mcr	462976,24
λ_r	130,69	Mrd	126896,24
Mr	88159,58	Mpl	143971,95
Semi-Compacta			

Resultado: **89,5%**

W 610 x 140,0					
d(mm)	617	Wx(cm³)	3650,5	rx(cm)	25,06
bf(mm)	230	Wy(cm³)	392,6	ry(cm)	5,02
d'(mm)	541	Zx(cm³)	4173,1	Área(cm²)	179,3
tw(mm)	13,1	Zy(cm³)	614	ho/tw	41,3
tf(mm)	22,2	Ix(cm⁴)	112619	b/tf	5,2
h(mm)	572,6	Iy(cm⁴)	4515	Peso (kg/m)	140,0

1. Verificação da Esbeltez do perfil

Limite	Real	Status	%	
200	160	OK	79,8%	λ_x
200	50	OK	24,9%	λ_y

2. Resistência à tração

Nrd(kN)	Nsd(kN)	Status	%	Coef. S
N.A	0	N.A	0,0%	1,1

3. Resistência à Compressão

Nrd(kN)	Nsd(kN)	Status	%	Coef. S
1135	705,52	OK	62,1%	1,1

4. Resistência à Flexão eixo X-X

Mrd(kN.cm)	Msd(kN.cm)	Status	%	Coef. S
126896	39051,55	OK	30,8%	1,1

5. Resistência à Flexão eixo Y-Y

Mrd(kN.cm)	Msd(kN.cm)	Status	%	Coef. S
12313	0	N.A	0,0%	1,1

6. Resistência ao esforço cortante eixo X

Vrd(kN)	Vsd(kN)	Status	%	Coef. S
1922	0	N.A	0,0%	1,1

7. Resistência ao esforço cortante eixo Y

Vrd(kN)	Vsd(kN)	Status	%	Coef. S
1521	87,23	OK	5,7%	1,1

8. Resistência aos esforços Combinados

Nsd/Nrd 0,621

Combinação	Limite	Resultado	Cálculo
N.Mx.My	100%	OK	89,5%

FONTE: Adaptado de Jacob (2017).

De forma geral, os resultados referentes aos esforços máximos obtidos pelo programa de análise estrutural *SAP2000* apresentam coerência para todos os vãos propostos.

A planilha utilizada para o dimensionamento também aponta coerência quanto ao peso e momento de inércia das seções transversais dos perfis adotados de acordo com os esforços apresentados para cada vão (TABELA 14).

Tabela 14- Tabela de esforços e deslocamentos máximos - Pórticos de alma cheia com comprimentos de 25 a 40 metros

ESFORÇOS, DESLOCAMENTOS E DIMENSIONAMENTOS DAS VIGAS DOS PÓRTICOS DE ALMA CHEIA - VÃOS DE 25 A 40 METROS								
Comprimento dos vãos	Esforços e deslocamentos máximos					Dimensionamento		
	Momento fletor (kN.cm)	Esforço cortante (kN)	Esforço axial de compressão (kN)	Deslocamento horizontal (cm)	Deslocamento vertical (cm)	Perfil (mm x kg/m)	Inércia do perfil (cm ⁴)	Aproveitamento do perfil (%)
25m	18.060,72	58,86	379,89	3,760	-3,57	W530X66	34.971	81,9
30m	23.777,73	67,71	499,94	3,942	-5,13	W530X82	47.569	93,7
35m	30.049,81	76,53	629,49	4,404	-7,80	W610X101	77.003	92,7
40m	39.051,55	87,23	705,52	4,129	-7,03	W610X140	112.619	89,5

FONTE: O autor (2018).

4.4 Dimensionamento dos perfis de alma cheia considerando o ELS

Para efetuar as verificações das vigas construídas a partir dos perfis de alma cheia, em relação ao deslocamento vertical, esta é comparada à referência de valor limite para o deslocamento de uma viga de cobertura dada por $L/250$, apresentada na tabela 15, juntamente com os resultados de deslocamentos obtidos através do programa de análise estrutural *SAP2000* para cada vão.

Tabela 15- Deslocamentos máximos e deslocamentos admissíveis - Pórticos de alma cheia comprimentos de 25 a 40 metros

DESLOCAMENTO VERTICAL X DESLOCAMENTO LIMITE - VIGAS DOS PÓRTICOS DE ALMA CHEIA - VÃOS DE 25 A 40 METROS			
Comprimento dos vãos(m)	Deslocamento vertical (cm)	Deslocamento limite (cm)	
25	-3,57	2.500/250	10
30	-5,13	3.000/250	12
35	-7,80	3.500/250	14
40	-7,03	4.000/250	16

FONTE: O autor (2018).

Observando os resultados obtidos na tabela 15, constata-se que as flechas não ultrapassam os valores impostos para a usualidade da estrutura, estabelecidos pela NBR 8800 (ABNT, 2008).

4.5 Dimensionamento dos perfis alveolares considerando ELU

Para efetuar o estudo analítico dos perfis alveolares, foram mantidos os esforços máximos obtidos durante o processo de análise dos perfis de alma cheia, visando criar um parâmetro de comparação do desempenho estrutural entre os comprimentos de vãos, bem como entre os tipos de perfil.

Os perfis adotados para serem alveolados foram escolhidos de acordo com os seguintes critérios:

1° - perfil imediatamente mais leve que o perfil de alma cheia utilizado para vencer o mesmo vão;

2° - quando o perfil imediatamente mais leve obtiver sucesso no processo de dimensionamento, será utilizado o perfil da mesma família ou família anterior e peso inferior, este procedimento será repetido sucessivamente até que o processo seja interrompido devido ao perfil não atingir os requisitos estruturais mínimos para vencer o vão proposto.

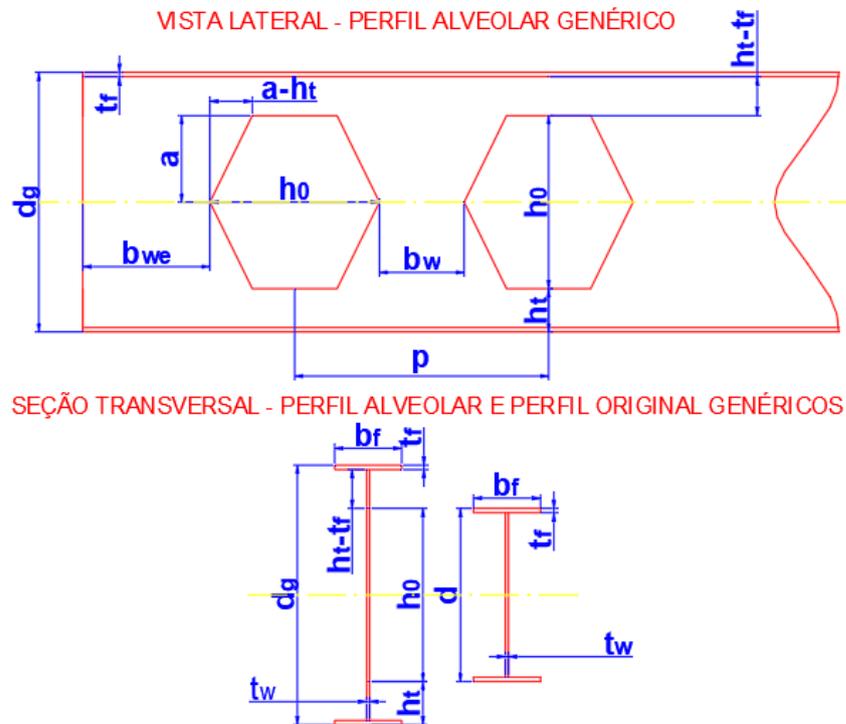
Desta forma, garante-se que os perfis adotados apresentem o melhor desempenho estrutural diante dos vãos e esforços propostos. Ressalta-se que para efetuar este estudo analítico serão utilizadas as equações propostas na literatura, uma vez que, a norma brasileira não contempla o dimensionamento desta tipologia de perfil.

4.5.1 Propriedades geométricas dos perfis alveolares e sua representação gráfica

A figura 39 representa de forma genérica algumas das propriedades geométricas que foram calculadas para os perfis alveolares, juntamente com estas são apresentadas as propriedades dos perfis de alma cheia que deram origem aos perfis alveolares, objetivando o melhor entendimento do processo de expansão da alma destes perfis.

A partir das dimensões apresentadas acima foram calculadas as demais propriedades necessárias para se efetuar o dimensionamento considerando ELU e ELS dos perfis alveolares. Estas propriedades estão dispostas nas tabelas 16 e 17.

Figura 39 - Representação genérica das propriedades geométricas dos perfis alveolares e do perfil de alma cheia original



FONTE: O autor (2018).

Tabela 16 - Propriedades geométricas dos perfis de alma cheia de origem

PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DOS PERFIS DE ALMA CHEIA DE ORIGEM					
Vãos	Unidade	Valores aplicados			
	(m)	25	30	35	40
Perfis de origem	mm x kg/m	W460X60	W530X66	W530X72	W530X92
d	(cm)	45,50	52,50	52,40	53,30
h _w	(cm)	42,80	50,20	50,20	50,20
b _f	(cm)	15,30	16,50	20,70	20,90
t _w	(cm)	0,80	0,89	0,90	1,02
t _f	(cm)	1,33	1,14	1,09	1,56
A _g	(cm ²)	76,20	83,60	91,60	117,60
I _x	(cm ⁴)	25.652,00	34.971,00	39.969,00	55.157,00
W _x	(cm ³)	1.127,60	1.332,20	1.525,50	2.069,70
r _x	(cm)	18,35	20,46	20,89	21,65
Z _x	(cm ³)	1.292,10	1.588,00	1.755,90	2.359,80
I _y	(cm ⁴)	796,00	857,00	1615,00	2.379,00
W _y	(cm ³)	104,10	103,90	156,00	227,60
r _y	(cm)	3,23	3,20	4,20	4,50
Z _y	(cm ³)	163,40	166,00	244,60	354,70
J	(cm ⁴)	34,60	31,52	33,41	75,50
C _w	(cm ⁶)	387.230,00	562.854,00	1.060.548,00	1.588.565,00

FONTE: O autor (2018).

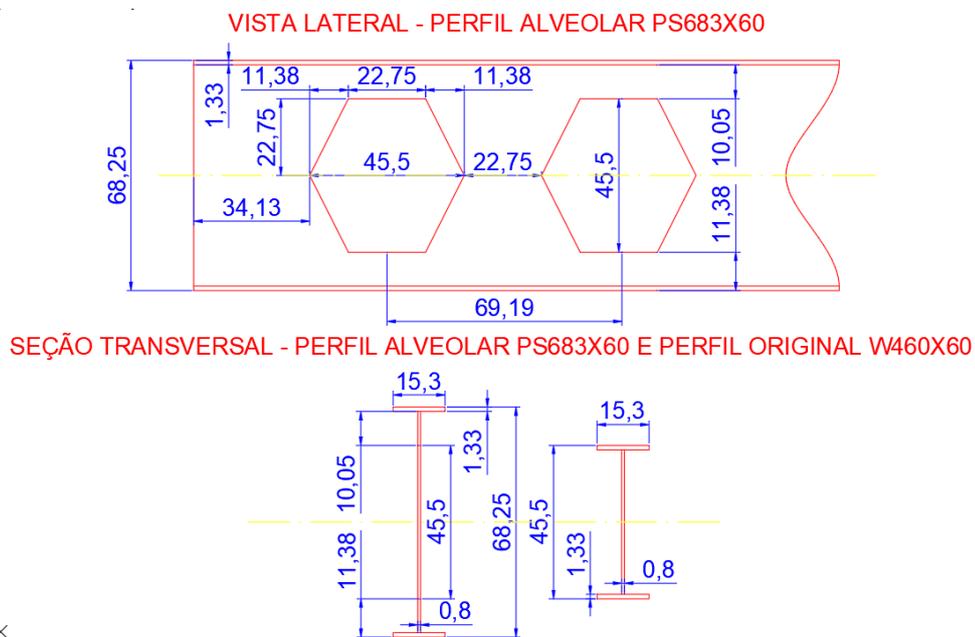
Tabela 17 - Propriedades geométricas das vigas alveolares

PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DOS PERFIS ALVEOLARES					
Vãos	Unidade	Valores aplicados			
	(m)	25	30	35	40
Perfis alveolares	(mm x kg/m)	PS683X60	PS788X66	PS786X72	PS800X92
$d_g = kd$	(cm)	68,250	78,750	78,600	79,950
$h_0 = d_{sek} = 1,5$	(cm)	45,500	52,500	52,400	53,300
$h_t = \frac{d_g - h_0}{2}$	(cm)	11,375	13,125	13,100	13,300
$A_t = \frac{A_g}{2} - [t_w d (k - 1)]$	(cm ²)	19,900	18,438	22,220	32,150
$y_b = \frac{b_f t_f^2 + h_t^2 t_w - t_f^2 t_w}{2 (b_f t_f + h_t t_w - t_f t_w)}$	(cm)	2,275	2,945	2,612	2,570
$y_0 = \frac{h_0}{2} + (h_t - y_b)$	(cm)	31,850	34,430	36,688	37,380
$Z_{x0} = 2 A_t y_0$	(cm ³)	1.276,630	1.269,641	1.630,415	2.403,530
$I_t = \frac{b_f t_f^3}{12} + b_f t_f \left(y_b - \frac{t_f}{2} \right)^2 + \frac{t_w (h_t - t_f)^3}{12} + t_w (h_t - t_f) \left(y_b - \frac{h_t + t_f}{2} \right)^2$	(cm ⁴)	256,930	422,860	445,784	495,290
$I_{x0} = 2 (I_t + A_t y_0^2)$	(cm ⁴)	40.887,880	44.559,450	60.708,223	90.834,680
$I_{x1} = 2 \left[I_t + A_t y_0^2 + \frac{t_w \left(\frac{d}{2} \right)^3}{3} \right]$	(cm ⁴)	47.167,630	55.291,600	71.499,070	103.705,330
$I_{x,e} = 2 (I_t + A_t y_0^2) + t_w \left(\frac{\left(\frac{d}{2} \right)^3}{2,57} \right)$	(cm ⁴)	44.027,760	50.823,350	67.006,377	98.346,730
$I_{y0} = \frac{t_f b_f^3}{12} + \frac{\left(h_t - \frac{t_f}{2} \right) t_w^3}{12}$	(cm ⁴)	397,420	427,680	1.568,390	1.172,710
$I_{y1} = \frac{t_f b_f^3}{6} + \frac{(d_g - t_f) t_w^3}{12}$	(cm ⁴)	796,780	858,06 0	1.616,050	2.350,120
$C_{w0} = \frac{\left(\frac{b_f^3 t_f^3}{4} + h_t^3 t_w^3 \right)}{36}$	(cm ⁶)	79,450	90,490	79,810	300,890
$C_{w1} = \frac{d_g^2 I_{y1}}{4}$	(cm ⁶)	927.862,760	1.330.328,180	2.496.668,090	3.755.493,230
$J_0 = \frac{(b_f t_f^3 + h_t t_w^3)}{3}$	(cm ⁴)	13,940	11,230	12,120	30,150
$J_1 = \frac{(2 b_f t_f^3 + h_t t_w^3)}{3}$	(cm ⁴)	25,940	10,840	21,050	55,590
$r_{y0} = \sqrt{\frac{I_{y0}}{2A_t}}$	(cm)	3,160	3,410	5,940	4,270
$r_{y1} = \sqrt{\frac{I_{y1}}{(2A_t + h_0 t_w)}}$	(cm)	3,230	3,200	4,200	4,450
$r_{x0} = \sqrt{\frac{I_{x0}}{2A_t}}$	(cm)	32,050	34,760	36,960	37,590
$r_{x1} = \sqrt{\frac{I_{x1}}{(2A_t + h_0 t_w)}}$	(cm)	24,880	25,720	27,940	29,560
$W_{x0} = \frac{4 y_0^2 A_t}{d_g}$	(cm ³)	1.175,700	1.110,190	1.522,050	2.247,510

FONTE: O autor (2018).

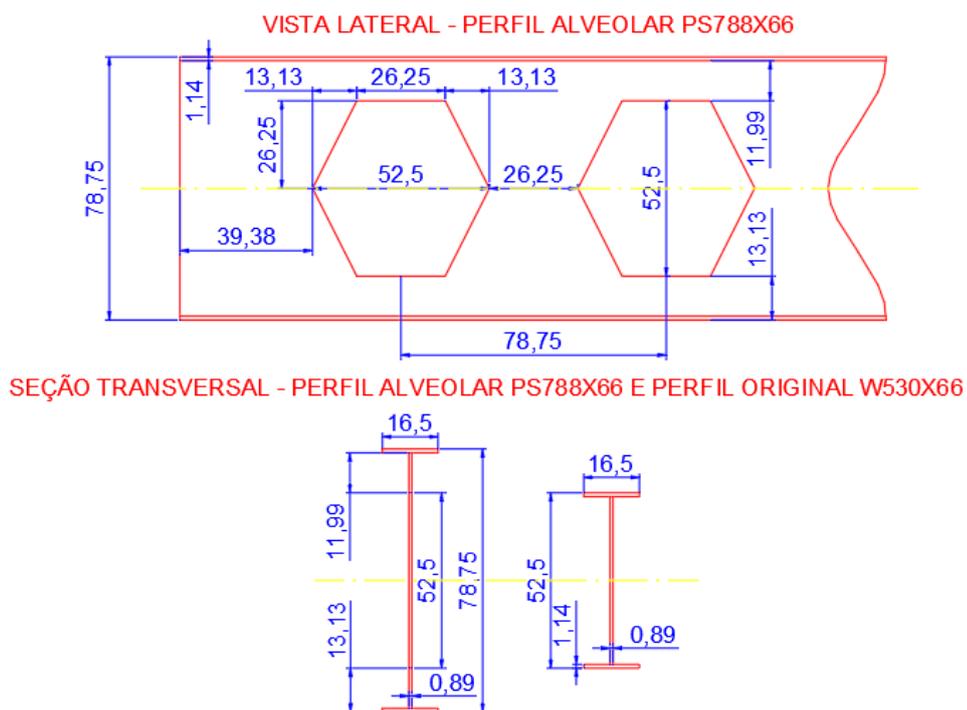
Após apresentados os cálculos das propriedades, são apresentadas nas figuras 40 a 43 a aplicação destas medidas nos perfis alveolares.

Figura 40 - Propriedades geométricas do perfil alveolar empregado no vão de 25 metros



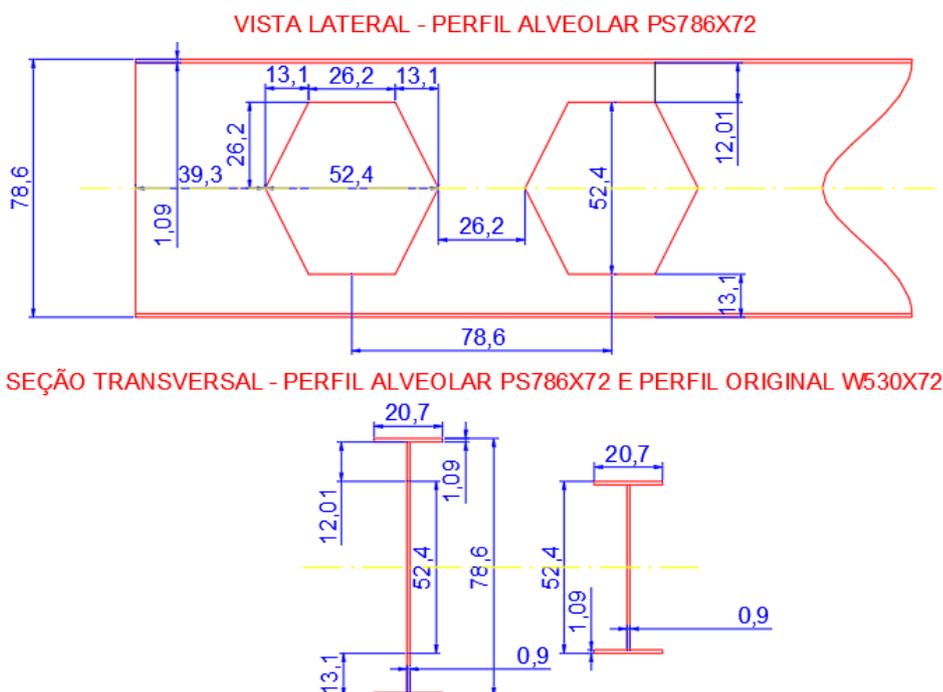
FONTE: O autor (2018).

Figura 41 - Propriedades geométricas do perfil alveolar empregado no vão de 30 metros



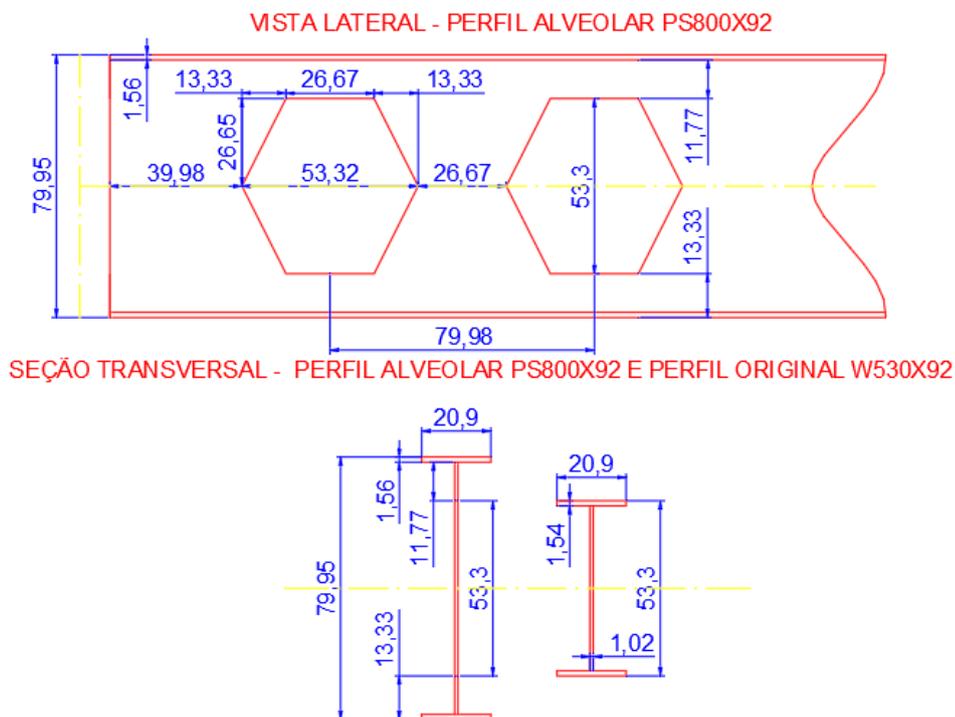
FONTE: O autor (2018).

Figura 42 - Propriedades geométricas do perfil alveolar empregado no vão de 35 metros



FONTE: O autor (2018).

Figura 43 - Propriedades geométricas do perfil alveolar empregado no vão de 40 metros



FONTE: O autor (2018).

4.5.2 Dimensionamento dos perfis alveolares considerando o colapso por formação de mecanismo plástico devido ao momento fletor

Para efetuar o dimensionamento considerando o colapso por formação de mecanismo plástico devido ao momento fletor dos perfis alveolares, estes devem atender à situação mais desfavorável de uma viga que possui alma vazada.

Os estudos realizados por Cimadevilla; Gutiérrez; Rodríguez (2000) indicam que existe uma parcela de momento fletor significativa, gerada devido ao esforço cortante.

Por esta razão, o momento fletor atuante na viga deve ser somado ao produto da constante c e o esforço cortante V atuantes na seção, resultando em um momento fletor consideravelmente maior que o obtido durante o processo de análise do perfil de alma cheia (SILVEIRA, 2011), conforme apresentado na tabela 18.

Tabela 18 - Dimensionamento considerando o colapso por formação de mecanismo plástico devido ao momento fletor das vigas alveolares dos pórticos com comprimentos de 25 a 40 metros

DIMENSIONAMENTO PARA O COLAPSO POR FORMAÇÃO DE MECANISMO PLÁSTICO DEVIDO AO MOMENTO FLETOR PERFIS ALVEOLARES					
Vãos	Unidade	Valores aplicados			
	(m)	25	30	35	40
Perfis alveolares	(mm x kg/m)	PS683X60	PS788X66	PS786X72	PS800X92
$c = \frac{y_0 (h_t - y_b) b_w A_t}{2 I_t}$	(cm)	255,35	200,59	251,25	346,92
M_{sd} = Valor obtido no SAP2000	(kN.cm)	18.060,72	23.777,73	30.049,81	39.051,55
V_{sd} = Valor obtido no SAP2000	(kN)	58,86	67,71	76,53	87,23
$M_{p10} = Z_{x0} f_y$	(kN.cm)	44.043,73	43.802,61	56.249,32	82.921,78
$\frac{M_{p10}}{Y_{a1}}$	(kN.cm)	40.039,75	39.820,55	51.135,75	75.383,44
$c V_{sd}$	(kN.cm)	15.030,06	13.581,70	19.228,23	30.261,71
$M_{sd} + c V_{sd}$	(kN.cm)	33.090,78	37.359,43	49.278,04	69.613,26
$M_{sd} + c V_{sd} \leq \frac{M_{p10}}{Y_{a1}}$	(kN.cm)	33.090 < 40.039	37.359 < 39.820	49.278 < 51.135	69.613 < 75.383
Aproveitamento do perfil $\frac{M_{sd} + c V_{sd}}{\frac{M_{p10}}{Y_{a1}}}$	(%)	82,6%	93,82%	96,37%	92,3%
Situação encontrada na verificação		OK	OK	OK	OK

FONTE: O autor (2018).

4.5.3 Dimensionamento dos perfis alveolares considerando o colapso de escoamento do montante da alma devido ao esforço de cisalhamento

A verificação do escoamento do montante da alma devido ao cisalhamento deve ser feita baseando-se no esforço cisalhante máximo atuante na viga, e considerando a situação mais crítica da seção transversal, ou seja, na região da meia altura do montante da alma, onde o valor b_w é mínimo, em conformidade com o estudo de Bradley (2003).

As formulações, bem como os valores aplicados ao perfil, se encontram dispostas na tabela 19.

Tabela 19 - Dimensionamento considerando o colapso de escoamento do montante da alma por cisalhamento das vigas alveolares dos pórticos com comprimentos de 25 a 40 metros

DIMENSIONAMENTO PARA O COLAPSO DE ESCOAMENTO DO MONTANTE DA ALMA POR CISALHAMENTO - PERFIS ALVEOLARES					
Vãos	Unidade	Valores aplicados			
	(m)	25	30	35	40
Perfis alveolares	(mm x kg/m)	PS683X60	PS788X66	PS786X72	PS800X92
$V_{Rk1} \leq \frac{4}{9\sqrt{3}} t_w y_0 f_y$	(kN)	225,57	271,27	292,31	337,53
$V_{Rd1} = \frac{V_{Rk1}}{\gamma_{a1}}$	(kN)	205,06	246,61	265,34	306,85
V_{sd} = Valor obtido no SAP2000	(kN)	58,86	67,71	76,53	87,23
$V_{sd} \leq \frac{V_{Rk1}}{\gamma_{a1}}$	(kN)	$58,86 \leq 205,06$	$67,71 \leq 246,61$	$76,53 \leq 265,34$	$87,23 \leq 306,85$
Aproveitamento do perfil $\frac{V_{sd}}{V_{Rk1}}$	(%)	28,7 %	27,46 %	28,8 %	28,43 %
Situação encontrada na verificação		OK	OK	OK	OK

FONTE: O autor (2018).

4.5.4 Dimensionamento dos perfis alveolares para o colapso de escoamento do montante da alma por flexão

Outra forma de colapso para o qual a literatura técnica recomenda a verificação é o escoamento do montante da alma por flexão. Este colapso pode ocorrer devido ao esforço cortante, que comprime o montante da alma levando-o à flexão.

Seguindo o mesmo raciocínio do escoamento do montante da alma devido ao cisalhamento, a verificação é feita a partir do esforço cisalhante máximo, atuando sobre a

região onde o montante da alma apresenta menor largura, o dimensionamento é apresentado na tabela 20.

Tabela 20 - Dimensionamento considerando o colapso de escoamento do montante da alma por flexão das vigas alveolares dos pórticos com comprimentos de 25 a 40 metros

DIMENSIONAMENTO PARA O COLAPSO DE ESCOAMENTO DO MONTANTE DA ALMA POR FLEXÃO - PERFIS ALVEOLARES					
Vãos	Unidade	Valores aplicados			
	(m)	25	30	35	40
Perfis alveolares	(mm x kg/m)	PS683X60	PS788X66	PS786X72	PS800X92
$V_{Rk2} = \frac{y_0 t_w b_w^2 (a-b)}{0,75 a^2 p} f_y$	(kN)	390,69	469,85	506,29	584,84
$V_{Rd2} = \frac{V_{Rk2}}{\gamma_{a1}}$	(kN)	355,18	427,14	460,27	531,67
V_{sd} = Valor obtido no SAP2000	(kN)	58,86	67,71	76,53	87,23
$V_{sd} \leq \frac{V_{Rk2}}{\gamma_{a1}}$	(kN)	$58,86 \leq 355,18$	$67,71 \leq 427,14$	$76,53 \leq 460,27$	$87,23 \leq 531,67$
Aproveitamento do perfil $\frac{V_{sd}}{\frac{V_{Rk2}}{\gamma_{a1}}}$	(%)	16,6 %	15,85 %	16,63 %	16,41 %
Situação encontrada na verificação		OK	OK	OK	OK

FONTE: O autor (2018).

4.5.5 Dimensionamento dos perfis alveolares considerando o colapso de flambagem do montante da alma

O colapso por flambagem nos perfis alveolares é crítico para o montante da alma, devido à esta região possuir esbelteza maior que as outras partes do perfil e não contar com apoios em suas extremidades (VIEIRA et al. 2015).

Assim, o esforço determinante para o dimensionamento quanto à flambagem do montante da alma é o cisalhamento, que deve ser considerado máximo para garantir que a viga não sofra este colapso (TABELA 21).

Tabela 21 - Dimensionamento considerando o colapso de flambagem do montante da alma das vigas alveolares dos pórticos com comprimentos de 25 a 40 metros (continua)

DIMENSIONAMENTO PARA O COLAPSO DE FLAMBAGEM DO MONTANTE DA ALMA - PERFIS ALVEOLARES					
Vãos	Unidade	Valores aplicados			
	(m)	25	30	35	40
Perfis alveolares	(mm x kg/m)	PS683X60	PS788X66	PS786X72	PS800X92
$V_{Rk2} = \frac{y_0 t_w b_w^2 (a-b)}{0,75 a^2 p} f_y$	(kN)	390,69	469,85	506,29	584,84
$V_{cr} = \frac{E_a (4y_0 - 0,8a - 2b)t_w^3}{3,54 y_0^2}$	(kN)	311,39	392,16	384,91	550,02

Tabela 21 - Dimensionamento considerando o colapso de flambagem do montante da alma das vigas alveolares dos pórticos com comprimentos de 25 a 40 metros (final)

DIMENSIONAMENTO PARA O COLAPSO DE FLAMBAGEM DO MONTANTE DA ALMA - PERFIS ALVEOLARES					
Vãos	Unidade	Valores aplicados			
	(m)	25	30	35	40
$\text{Como } \frac{V_{cr}}{V_{Rk2}} \leq 1$ $\text{logo } V_{sd} \leq \frac{2}{3} V_{cr}$	(kN)	Como $0,79 \leq 1$ $V_{sd} \leq 207,59$	Como $0,83 \leq 1$ $V_{sd} \leq 261,44$	Como $0,76 \leq 1$ $V_{sd} \leq 256,61$	Como $0,94 \leq 1$ $V_{sd} \leq 366,68$
$V_{sd} = \text{Valor obtido no SAP2000}$	(kN)	58,86	67,71	76,53	87,23
$V_{sd} \leq \frac{2}{3} V_{cr}$	(kN)	$58,86 \leq 207,59$	$67,71 \leq 261,44$	$76,53 \leq 256,61$	$87,23 \leq 366,68$
Aproveitamento do perfil $\frac{V_{sd}}{\frac{2}{3} V_{cr}}$	(%)	28,35 %	25,90 %	29,82 %	23,79 %
Situação encontrada na verificação		OK	OK	OK	OK

FONTE: O autor (2018).

Os resultados relacionados à flambagem do montante da alma se assemelham às conclusões obtidas por Vieira et al. (2015) no que se refere ao ponto crítico em que os perfis alveolares de padrão Peiner atingem o colapso por flambagem da alma.

Os autores afirmam que este tipo de colapso é atingido em regime inelástico e facilitado quanto maior for a esbeltez da alma. Considerando que o perfil alveolar de padrão Peiner sem a presença de chapa expansora apresenta menor risco de ocorrência de colapso por flambagem do montante da alma devido à largura do seu montante da alma ser maior que a largura do montante da alma de outras tipologias de perfis alveolares.

4.5.6 Dimensionamento dos perfis alveolares considerando o colapso de flambagem lateral com torção da alma

A flambagem lateral acompanhada de distorção da alma ocorre devido à instabilidade dos elementos apoiados-livres submetidos à compressão, devido à ação de momento fletor que, tendem a se deslocar para fora do eixo de simetria do perfil.

Este processo de deslocamento pode ser combatido de maneira simples, aplicando travamentos nos elementos sujeitos à compressão, reduzindo, assim, seu comprimento destravado impedindo seu deslocamento lateral.

Para o dimensionamento dos perfis alveolares, este tipo de flambagem é demasiadamente crítico, por possuírem uma alma vazada e com maior altura que os perfis de alma cheia, tornando sua alma um elemento extremamente esbelto.

Desta forma, foi adotado um comprimento de travamento lateral para todos os vãos de 100 cm, que se mostrou suficiente para combater este tipo de colapso (TABELA 22).

Tabela 22 - Dimensionamento para o colapso de flambagem lateral com torção da alma das vigas alveolares dos pórticos com comprimentos de 25 a 40 metros

DIMENSIONAMENTO PARA O COLAPSO DE FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO DA ALMA - PERFIS ALVEOLARES					
Vãos	Unidade	Valores aplicados			
	(m)	25	30	35	40
Perfis alveolares	(mm x kg/m)	PS683X60	PS788X66	PS786X72	PS800X92
$L_p = 1,76 r_{yo} \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	(cm)	133,90	144,5	251,71	180,94
$\beta_1 = \frac{0,7 f_y W_{x0}}{E j_0}$	(1/cm)	0,102	0,119	0,1516	0,090
$L_{r,cor} = \frac{1,66 \sqrt{I_{y0}}}{I_0 \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_{w0} \beta_1^2}{I_{y0}}}}$	(cm)	123,74	122,95	176,84	163,8
L_b	(cm)	100	100	100	100
Como $L_b < L_p$ $M_{Rk} = 0,90 M_{pl}$	(kN.cm)	40.039,75	39.820,55	51.135,75	75.383,44
M_{Sd}	(kN.cm)	18.060,72	23.777,73	30.049,81	39.051,55
Aproveitamento do perfil $\frac{M_{Sd}}{0,90 M_{pl}}$	(%)	45,10 %	59,17 %	58,76 %	51,80 %
Situação encontrada na verificação		OK	OK	OK	OK

FONTE: O autor (2018).

4.6 Dimensionamento dos perfis alveolares considerando o ELS

Para o dimensionamento dos perfis alveolares conforme o ELS (flecha) deve ser considerado o deslocamento produzido pelo momento fletor, juntamente com a parcela de deslocamento produzida pelo esforço cortante atuante na viga.

Assim, são constatadas flechas maiores que as obtidas durante o processo de dimensionamento dos perfis de alma cheia (TABELA 23).

Tabela 23 - Dimensionamento para o ELS das vigas dos pórticos alveolares com comprimentos de 25 a 40 metros (continua)

DIMENSIONAMENTO PARA ELS (FLECHA) - PERFIS ALVEOLARES					
Vãos	Unidade	Valores aplicados			
	(m)	25	30	35	40
Perfis alveolares	(mm x kg/m)	PS683X60	PS788X66	PS786X72	PS800X92
$f_M = \frac{q L^4}{384 E I_{x,e}}$	(cm)	5,78	10,38	14,58	16,95
$\frac{1}{A_e} = 4,154 \frac{a^3}{t_w y_0^2 p^2} + 1,248 \frac{a}{t_w y_0^2} + \frac{p^2}{1684,8 I_t} + \frac{t_w y_0^5}{22,5 I_f^2}$	(1/cm ²)	0,08554	0,07542	0,07062	0,06671

Tabela 23 - Dimensionamento para o ELS das vigas dos pórticos alveolares com comprimentos de 25 a 40 metros (final)

DIMENSIONAMENTO PARA ELS (FLECHA) - PERFIS ALVEOLARES					
Vãos	Unidade	Valores aplicados			
	(m)	25	30	35	40
A_e	(cm ²)	11,69	13,26	14,16	14,99
$f_v = \frac{q L^2}{8 G A_e}$	(cm)	0,43	0,55	0,70	0,87
$f_{tot} = f_M + f_v$	(cm)	6,21	10,93	15,28	17,82
$f_{adm} = \frac{L}{250}$	(cm)	10	12	14	16
$f_{tot} \leq f_{adm}$	(cm)	6,21 ≤ 10	10,93 ≤ 12	15,28 ≥ 14	17,82 ≥ 16
Situação encontrada na verificação		OK	OK	Aplicar contra flecha	Aplicar contra flecha

FONTE: Silveira (2011), adaptado pelo autor (2018).

As contra flechas a serem aplicadas nas vigas dos vãos de 35 e 40 metros são de 1,28 e 1,82 cm, respectivamente. Estes valores apresentam pequena ordem de grandeza quando analisados frente ao comprimento dos vãos propostos.

Desta forma, o recurso da aplicação de uma contra flecha para estes vãos será eficaz, não havendo a necessidade do redimensionamento dos perfis, tendo em vista que estes atendem à todos os requisitos estruturais necessários para a garantia da estabilidade das estruturas.

4.7 Comparação do desempenho estrutural entre os perfis de alma cheia e os perfis alveolares com base nos resultados da verificação analítica

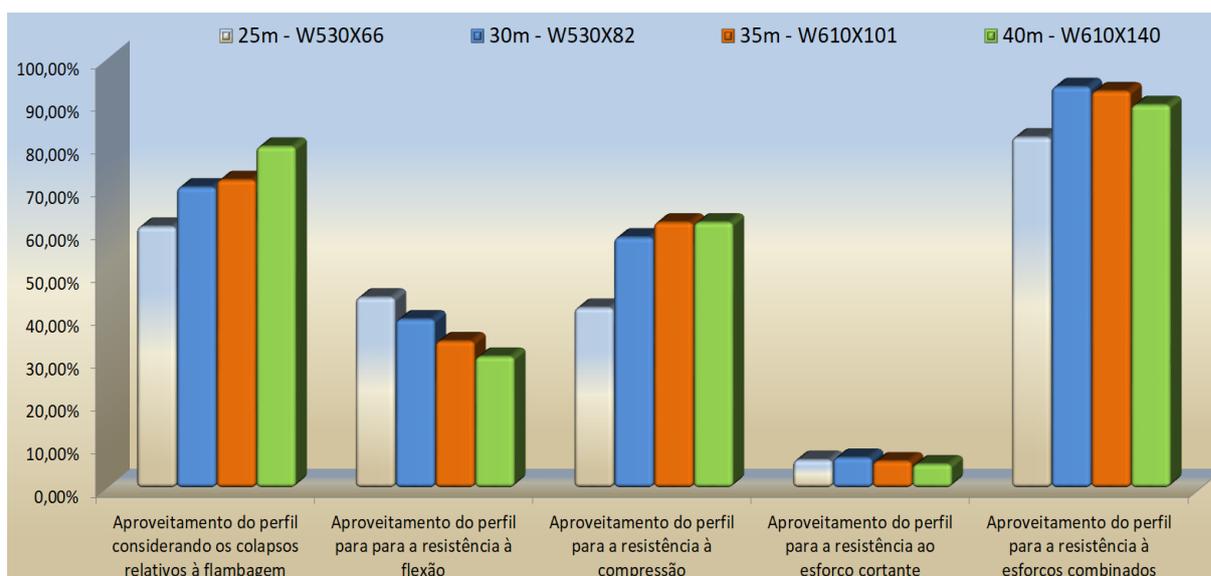
A comparação entre as tipologias de perfis será baseada no desempenho estrutural de cada um, observando qual o esforço que governou o dimensionamento. Desta forma, para facilitar a visualização dos resultados, eles foram condensados e demonstrados nas figuras 44 a 47.

A princípio, é avaliado para qual comprimento de vão obteve-se o melhor aproveitamento do perfil de alma cheia. Analisando a figura 46, observa-se que a condição de dimensionamento que mais exigiu da capacidade resistente dos perfis foram relativas aos colapsos por flambagem.

Porém, observando o aproveitamento final dos perfis que determinaram sua aprovação considerando o ELU, a combinação de esforços é a que melhor demonstra o índice de aproveitamento de todos os comprimentos de perfis analisados.

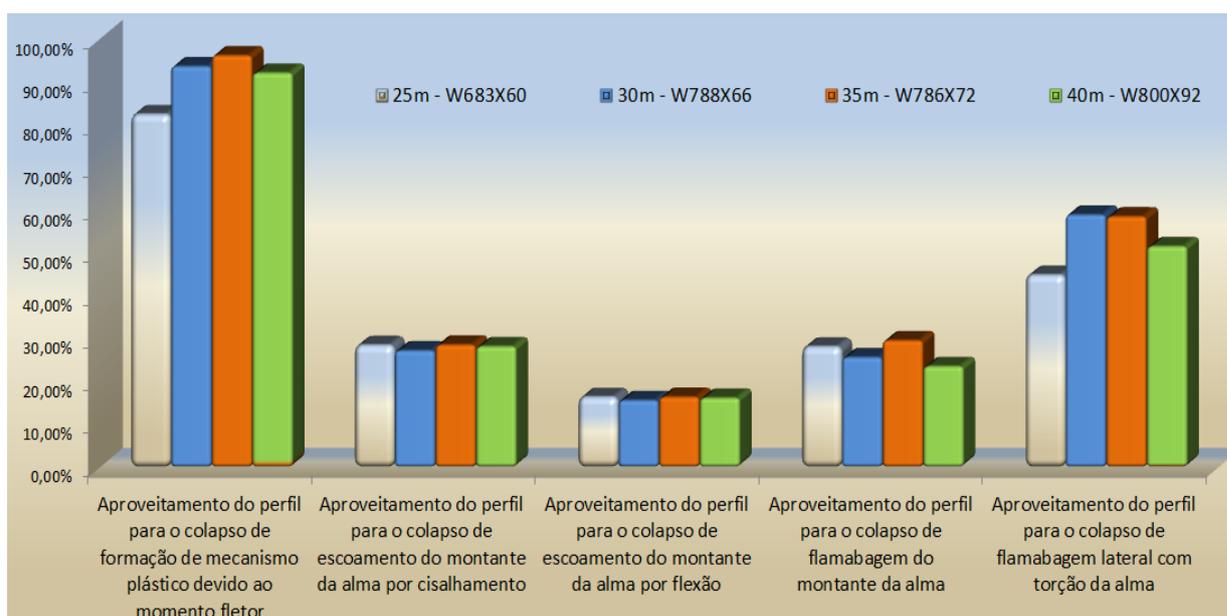
Observando os resultados apresentados pela combinação de esforços, verifica-se que o vão que apresentou desempenho máximo foi o de 30 metros, atingindo um aproveitamento de 93,70%.

Figura 44 - Comparação de desempenho entre os perfis de alma cheia para os vãos com comprimentos de 25 a 40 metros



FONTE: O autor (2018).

Figura 45 - Comparação de desempenho entre os perfis alveolares para os vãos com comprimentos de 25 a 40 metros



FONTE: Silveira (2011), adaptado pelo autor (2018).

Seguindo o mesmo raciocínio aplicado aos perfis de alma cheia, os perfis alveolares apresentam resultados diferentes, tanto para a forma de colapso crítica, quanto para o comprimento do vão que obteve melhor desempenho.

A forma de colapso que governou o dimensionamento dos perfis alveolares foi a formação de mecanismo plástico devido ao esforço de momento fletor, onde se obteve a maior solicitação diante da resistência do perfil, este resultado é coerente com o estudo apresentado por Silveira (2011).

Como observado na formulação utilizada para a verificação do momento fletor solicitante, o esforço de momento fletor deve ser somado a uma parcela composta pelo produto da constante c multiplicada pelo esforço cisalhante na viga V como afirma Verissimo et al. (2012).

A condição de travamento das vigas aos pilares foi determinante para que o colapso por formação de mecanismo plástico devido ao momento fletor governasse o dimensionamento, uma vez que, tratando-se de pórtico biengastado, os esforços máximos de momento fletor e cisalhamento ocorrem sempre junto aos apoios, culminando em uma combinação de esforços máximos para a verificação da viga nestas regiões.

Com relação ao comprimento do perfil alveolar que obteve o melhor desempenho, este ocorreu no vão de 35 metros, com resultado de 96,37% de aproveitamento.

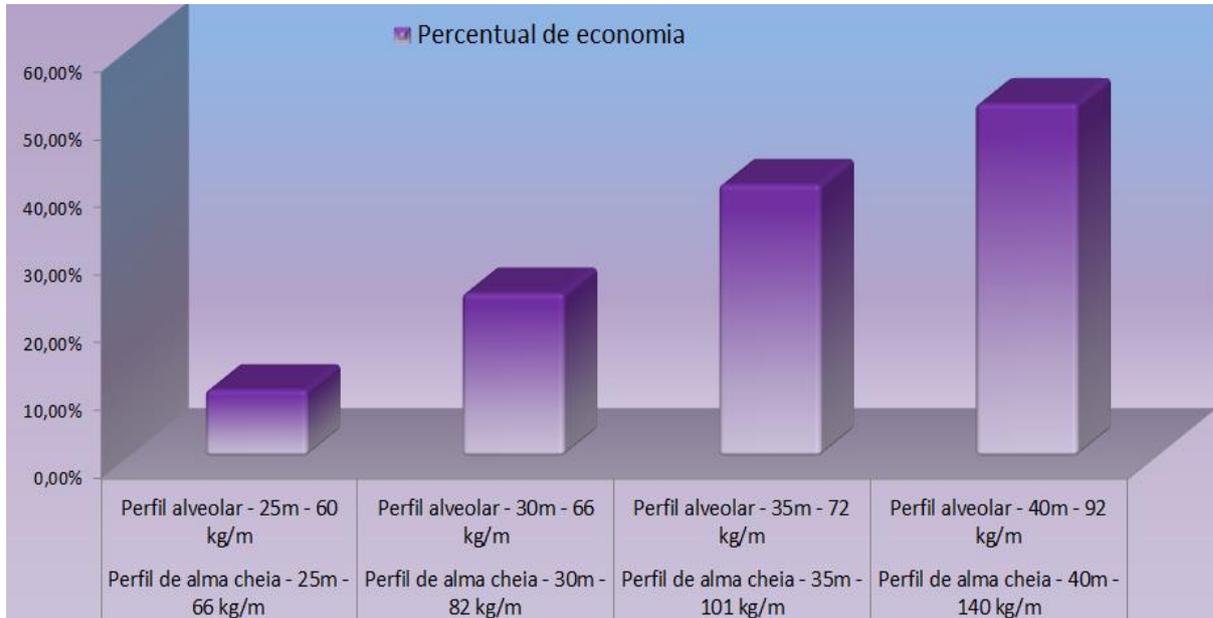
Os perfis alveolares apresentaram significativa economia de aço, apontando valores crescentes de acordo com o aumento do comprimento dos vãos conforme mostrado na tabela 24 e na figura 46.

Tabela 24 - Economia de aço dos perfis alveolares em relação aos perfis de alma cheia

RELAÇÃO PESO/METRO – PERFIS DE ALMA CHEIA X PERFIS ALVEOLARES					
Vãos	Unidades	Valores aplicados			
	(m)	25	30	35	40
Perfis de alma cheia	(mm/kgf)	W530X66	W530X82	W610X101	W610X140
Perfis alveolares	(mm x kg/m)	PS683X60	PS788X66	PS786X72	PS800X92
Redução na utilização de aço	(kgf/m)	6	16	29	48
Percentual de redução na utilização de aço	(%)	10	24,24	40,27	52,17

FONTE: O autor (2018).

Figura 46 - Comparação de desempenho entre os perfis de alma cheia e perfis alveolares para os vãos de 25 a 40 metros



FONTE: Silveira (2011); Jacob (2017), adaptado pelo autor (2018).

Efetuada-se a comparação entre as tipologias de perfis, identifica-se que o percentual de economia de aço varia entre 10% para o vão de 25 metros e 52,17% para o vão de 40 metros. Este resultado refere-se à quantidade de aço por metro de viga utilizada para vencer o vão. Os resultados obtidos estão em concordância com Oliveira (2012) e Verissimo et al. (2012), que afirmam que as vigas alveolares têm capacidade de suportar entre 10% e 50% mais carregamentos que o perfil de alma cheia que os originou.

Ressalta-se que o estudo não aborda os custos referentes aos processos de aquisição dos perfis de alma cheia que, por sua vez, bem como os custos de fabricação dos perfis alveolares, que passam por processo de corte e solda antes de serem disponibilizados para o uso estrutural.

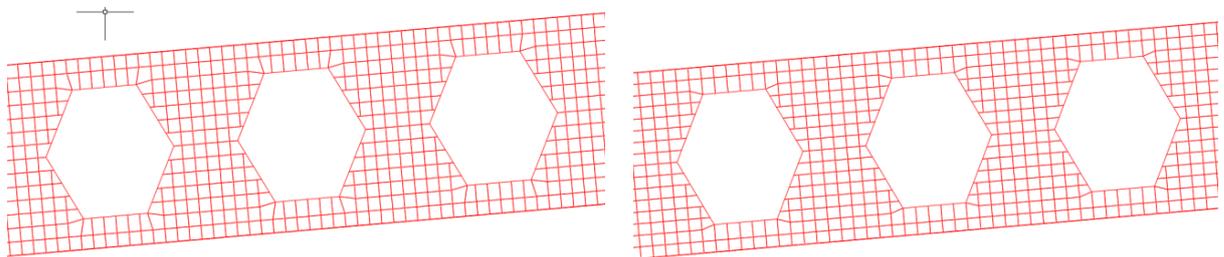
4.8 Parâmetros utilizados para definição da malha de elementos finitos dos perfis alveolares e perfis sem alvéolos

O formato dos elementos finitos dos perfis alveolares não foi o mesmo para todos os comprimentos de vigas na região do contorno dos alvéolos devido ao número de elementos finitos no sentido transversal da alma dos perfis.

A variação no número de elementos determinou o formato dos elementos localizados na região da meia altura da alma da seguinte forma:

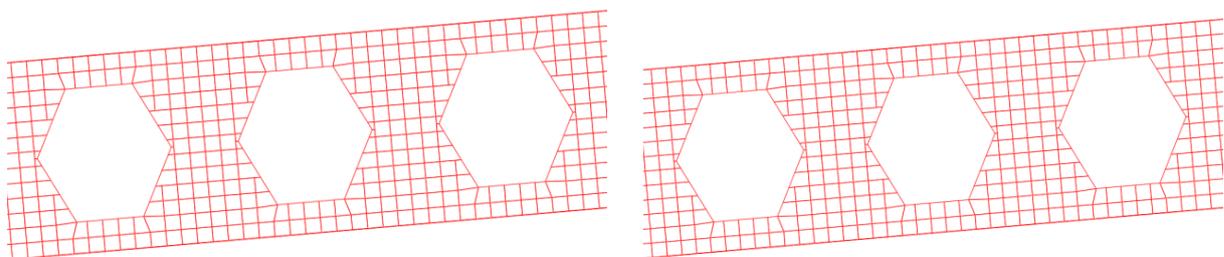
- a) quando o número de elementos finitos é par, seu formato assume o disposto na figura 47 como nas vigas de 30 e 35 metros de comprimento;
- b) quando o número de elementos é ímpar, seu formato assume o disposto na figura 48 nas vigas de 25 e 40 metros.

Figura 47 - Distribuição dos elementos finitos no contorno dos alvéolos das vigas de 30 e 35 metros



FONTE: O autor (2018).

Figura 48 - Distribuição dos elementos finitos no contorno dos alvéolos das vigas de 25 e 40 metros

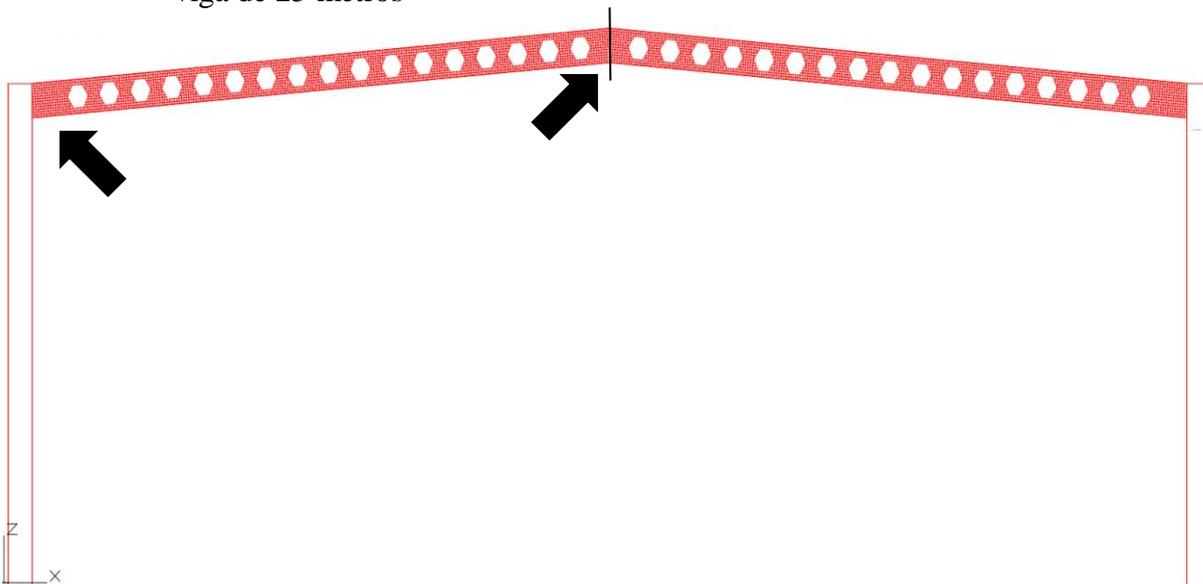


FONTE: O autor (2018).

Para o dimensionamento da largura dos montantes de extremidades localizados nas regiões junto aos pilares e à cumeeira das coberturas, foram posicionados alvéolos respeitando o limite mínimo de 1,5 vezes a largura dos montantes.

Em todos os comprimentos de vãos este limite foi superado, apresentando diferença de comprimento entre o montante de extremidade localizado junto ao pilar e o montante de extremidade localizado na cumeeira da cobertura, como exemplo é mostrado o pórtico de 25 metros na figura 49.

Figura 49 - Distribuição dos elementos finitos nos montantes de extremidade e cumeeira da viga de 25 metros



FONTE: O autor (2018).

Para demonstrar os efeitos da inserção de aberturas na alma dos perfis, foram analisados os deslocamentos verticais em duas posições das vigas alveolares e das vigas com preenchimento dos alvéolos. As posições onde foram verificados os deslocamentos são:

1) localiza-se no eixo de simetria do alvéolo central das vigas que compõem a tesoura de cobertura, quando o número de alvéolos for ímpar, como é o caso das vigas de 25, 35 e 40 metros; esta posição não coincide com um quarto do vão, devido à variação entre a dimensão dos montantes de extremidades junto aos pilares e de cumeeira.

Quando o número de alvéolos for par, como é o caso da viga de 30 metros, o alvéolo analisado será o mais próximo do eixo de simetria do vão.

2) localiza-se no eixo de simetria dos vãos, na cumeeira da cobertura.

4.9 Comparação entre os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos aplicados às vigas alveolares e vigas com preenchimento dos alveolos

Os deslocamentos observados para os perfis alveolares foram sensivelmente maiores que os constatados nos perfis onde foi efetuado o preenchimento dos alvéolos, isto se deve ao fato de que perfis que possuem as mesmas dimensões e não apresentam alma vazada possuem maior rigidez à flexão. Os resultados são mostrados nas tabelas 25 a 28.

Tabela 25 - Comparação entre os deslocamentos verticais das vigas alveolares e vigas com preenchimento dos alvéolos para a posição 1

DESLOCAMENTOS VERTICAIS DAS VIGAS ALVEOLARES X VIGAS COM PREENCHIMENTO DOS ALVÉOLOS					
Vãos	Unidades	Valores aplicados			
	(m)	25	30	35	40
Vigas alveolares	(mm x kg/m)	PS683X60	PS788X66	PS786X72	PS800X92
Deslocamentos verticais	(cm)	1,11	1,88	3,21	4,6
Vigas sem alvéolos	(mm/kgf)	PS683X70	PS788X78	PS786X85	PS800X107
Deslocamentos verticais	(cm)	0,91	1,52	2,84	3,91

FONTE: O autor (2018).

Como esperado, ocorreu aumento dos deslocamentos verticais com o aumento do comprimento dos vãos. Quando analisa-se a viga alveolar de 25 metros, esta apresenta deslocamento da ordem de 1,1 cm; os valores foram crescendo até atingirem 4,6 cm para o vão de 40 metros. Verificando os resultados das vigas onde foi efetuado o preenchimento dos alvéolos observa-se coerência com os resultados apresentados pelas vigas alveolares.

Quando comparados os deslocamentos dos perfis alveolares com os perfis sem alvéolos, identifica-se que os perfis alveolares apresentam deslocamentos maiores que os sem alvéolos, e também pode ser observado que quanto maior o vão, maior o gradiente de crescimento dos deslocamentos.

Estes resultados se devem à menor rigidez à flexão dos perfis de alma vazada quando comparados aos perfis sem aberturas na alma.

Tabela 26 - Comparação entre os deslocamentos verticais das vigas alveolares e vigas com preenchimento dos alvéolos para a posição 2

DESLOCAMENTOS VERTICAIS DAS VIGAS ALVEOLARES X VIGAS COM PREENCHIMENTO DOS ALVÉOLOS					
Vãos	Unidades	Valores aplicados			
	(m)	25	30	35	40
Vigas alveolares	(mm x kg/m)	PS683X60	PS788X66	PS786X72	PS800X92
Deslocamentos verticais	(cm)	1,60	2,57	4,11	6,94
Vigas sem alvéolos	(mm/kgf)	PS683X70	PS788X78	PS786X85	PS800X107
Deslocamentos verticais	(cm)	1,45	2,21	3,59	5,10

FONTE: O autor (2018).

Através da análise da posição 2 observa-se os deslocamentos apresentados na posição 1 são plausíveis e assemelham-se aos resultados dos estudos apresentados por Silveira (2011) e Verissimo et al. (2012).

A segunda análise efetuada pelo estudo numérico verifica o nível de tensão normal máxima em relação ao eixo x, apresentado pelos dois tipos de perfis (TABELA 27).

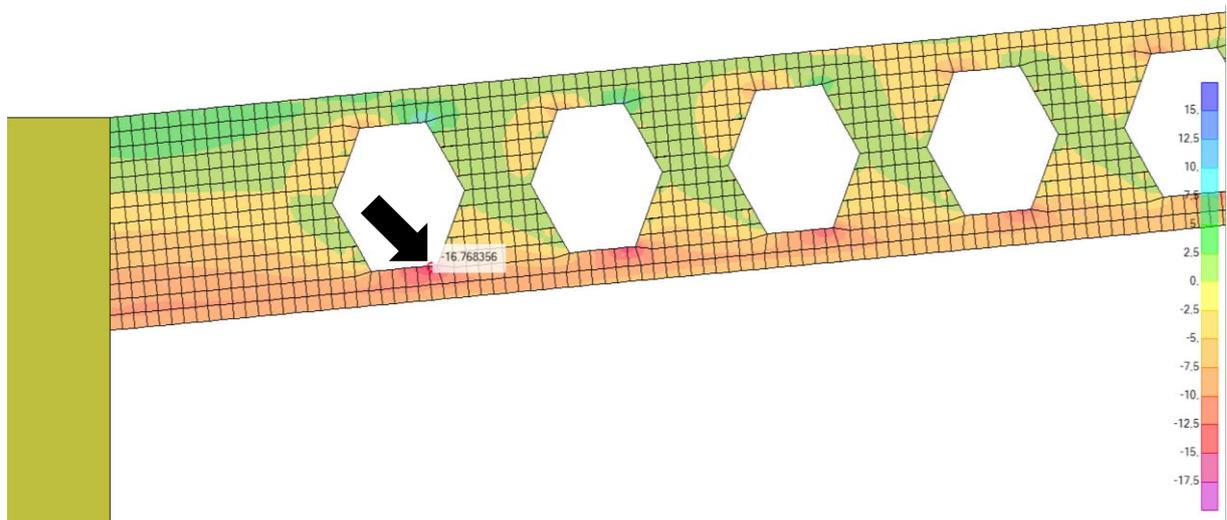
Tabela 27 - Comparação entre os níveis de tensão normal máxima em relação ao eixo x atingidos nas vigas alveolares e vigas com preenchimento dos alvéolos

TENSÃO MÁXIMA NAS VIGAS ALVEOLARES X VIGAS COM PREENCHIMENTO DOS ALVÉOLOS					
Vãos	Unidades	Valores aplicados			
	(m)	25	30	35	40
Vigas alveolares	(mm x kg/m)	PS683X60	PS788X66	PS786X72	PS800X92
Tensão máxima	(kN/cm ²)	11,43	16,76	21,55	20,20
Vigas sem alvéolos	(mm/kgf)	PS683X70	PS788X78	PS786X85	PS800X107
Tensão máxima	(kN/cm ²)	7,2	9,24	10,23	11,17

FONTE: O autor (2018).

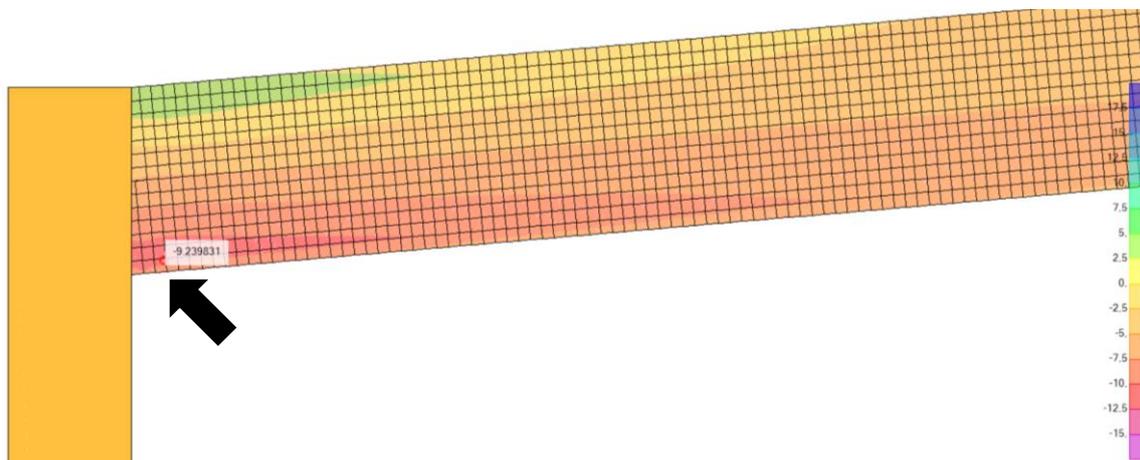
Observa-se que a tensão máxima atingida nos perfis sem aberturas na alma é menor que a dos perfis alveolares, isto se deve ao fato da distribuição das tensões nas vigas alveolares não serem uniformes e se concentrarem no entorno dos alvéolos, como exemplo são mostrados os espectros de tensões nas vigas de 30 metros, conforme figura 50.

Figura 50 – Expectro da distribuição das tensões na viga alveolar com comprimento de 30 metros



FONTE: O autor (2018).

Figura 51 - Espectro da distribuição das tensões na viga com preenchimento dos alvéolos com comprimento de 30 metros



FONTE: O autor (2018).

Os resultados estão em conformidade com os estudos realizados por Oliveira (2012), Silveira (2011), Brinkhus (2015), Cimadevila, Gutiérrez e Rodríguez (2000) e Bradley (2003), que apontam a falta de uniformidade da distribuição de tensões nas vigas alveolares que, por sua vez, é uma de suas desvantagens em relação aos perfis de alma cheia, por modificarem seu comportamento estrutural deixando-as mais susceptíveis a colapsos por flexão e, principalmente, por esforço cisalhante concentrado.

Apesar dos resultados do estudo efetuado utilizando o método dos elementos finitos apontar maiores níveis de deslocamento e concentração de tensões na região do contorno dos alvéolos, o dimensionamento das vigas de alma cheia e das vigas alveolares mostram que sua utilização como vigas de cobertura é muito vantajosa, uma vez que, além de atender aos requisitos normativos exigidos pela NBR 8800 (ABNT, 2008) para o ELU e ELS, apresentam redução significativa na quantidade de aço empregado por metro de viga.

5 CONCLUSÃO

Conforme visto durante o processo de dimensionamento das vigas de alma cheia e alveolares, estas tipologias construtivas apresentam diferenças substanciais nas formas de colapso. Estas diferenças levam o calculista a buscar informações nas normas técnicas brasileiras, bem como em trabalhos acadêmicos e demais literaturas técnicas para que o ELU e ELS sejam satisfeitos.

O processo de análise estrutural apresentou resultados que viabilizaram a comparação do desempenho dos perfis quando avaliadas as principais formas de colapso, bem como a avaliação entre as tipologias de perfis estudados.

Dentre os perfis de alma cheia, o melhor desempenho foi apresentado pelo perfil W530X82 dimensionado para o vão de 30 metros, sendo seu aproveitamento governado pela combinação de esforços apontando 93,70% da utilização de sua resistência.

Quando efetuou-se o estudo analítico dos perfis alveolares, foram identificados resultados diferentes dos encontrados para os perfis de alma cheia, onde o melhor aproveitamento do perfil foi atingido quando se avaliou a possibilidade de colapso por formação de mecanismo plástico devido aos esforços provocados pelo momento fletor, apresentando utilização da resistência do perfil W786X72 da ordem de 96,37% empregado para o vão com comprimento de 35 metros.

A comparação entre os dois tipos de perfis estudados baseada nos resultados do dimensionamento analítico, mostrou que o emprego de perfis alveolares para vigas de cobertura apresenta vantagem considerando a quantidade de aço empregada por metro de vão, sendo que, o gradiente de economia cresce de acordo com o aumento do comprimento do vão.

Comparando-se os perfis de alma cheia com os perfis alveolares observou-se uma redução na quantidade de aço empregada nas vigas para o vão com comprimento de 25 metros foi de 10%, atingindo economia de 52,17% e quando avaliada para o vão de 40 metros. Estes resultados, apesar de impactantes eram esperados devido aos apontamentos feitos por outros autores que já indicavam aumento da rigidez dos perfis alveolares em função da ampliação da altura da alma dos perfis de origem, o que, em última instância leva à redução da quantidade de aço empregada para vencer o mesmo vão.

Quando avaliado o resultado do estudo numérico elaborado pelo método dos elementos finitos, identifica-se que os deslocamentos verticais (flechas) são crescentes de

acordo com o aumento do comprimento dos vãos, observando que a comparação da magnitude desses deslocamentos entre os perfis alveolares e os perfis sem alvéolos mostra maior sensibilidade dos perfis alveolares em relação aos perfis sem aberturas.

Em relação ao nível de tensão normal máxima em relação ao eixo x o estudo numérico aponta que os perfis sem aberturas na alma possuem distribuição das tensões mais uniformes, portanto, o valor da tensão máxima é inferior ao apresentado nos perfis alveolares.

Conclui-se que o emprego dos perfis alveolares para uso em vigas de cobertura é viável dos pontos de vista: econômico por apresentarem menor quantidade de aço por metro de viga, ambiental por empregar menos recursos naturais e humanos e por fim, estrutural devido ao fato de cumprirem os requisitos impostos durante o processo de dimensionamento para atender ELU e ELS.

6 REFERÊNCIAS

- ALAMBERT, Flávio Correa d'; PINHEIRO, Marcelo Brisola. Treliças tipo steel joist. **Série Manual de construção em aço**. Instituto brasileiro de Siderurgia, Centro Brasileiro da Construção em Aço, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, ABNT, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, ABNT, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, ABNT, 2013.
- BADKE NETO, Augusto, CALENZANI, Adenilcia Fernanda Grobério, FERREIRA, Walnório Graça. Estudo de Metodologias para o Dimensionamento de Vigas de Aço e Vigas Mistas de Aço e Concreto com Perfil Celular. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, vol.8, nº 6. São Paulo, São Paulo. Nov./Dec., 2013.
- BADKE NETO, Augusto. **Estudo de metodologias para o dimensionamento de vigas de aço e vigas mistas de aço e concreto com perfis celulares**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. Espírito Santo, Vitória, 2015.
- BAIÃO FILHO, T. Oswaldo; SILVA, C. V. Antonio. **Ligações para estruturas de aço**, Guia prático para estruturas com perfis laminados. 2ª Edição, Perfis Gerdau Açominas, 2010.
- BRADLEY, T. Patrick. **Stability of Castellated Beams During Erection**. Thesis. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. Estados Unidos da América, Virginia, 2003.
- BRINKHUS, Raquel Nailê. **Análise de vigas casteladas e vigas casteladas mistas**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- CHAMBERLAIN, Zacarias Martin Pravia; CHIARELLO, Juliana Ana. **Programa computacional Visual Ventos**. Universidade do Passo Fundo. Disponível em: <http://www.ertools.upf.br/index.php?option=com_docman&Itemid=20>. Acesso em: 03/04/2018
- CIMADEVILA, Francisco Javier Estévez; GUTIÉRREZ, Emilio Martín; RODRÍGUEZ, José Antonio Vázquez. **Vigas alveoladas**. Vol. 3, Livro; Madri: A Coruña: Biblioteca Técnica Universitária, 2000.
- CORRÊA, Manuel Ritto. **Introdução ao comportamento não linear de estruturas**. Notas de aula, Curso de mestrado. Universidade de Lisboa, Portugal, Lisboa, 2015.

FAKURY, Ricardo Hallal; SILVA, Ana Lydia Reis de Castro e; CALDAS, Rodrigo Barreto. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. São Paulo: Person Education do Brasil, 2016.

FORTES, Cleber. **Soldagem MIG/MAG. ESAB**. Apostila, 2005.

FUINA, Jamile Salim. **Métodos de controle de deformações para análise não-linear de estruturas**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

JACOB, Felipe. **Planilha de Dimensionamento: Perfis Laminados Gerdau ABNT NBR 8800:2008**. Disponível em: < <http://calculistadeaco.com.br/downloads-gratis/>>. Acesso em 15/05/2018.

MARTINHO, Mário Rui Eduardo. **Vigas de aço Alveoladas: Análise e Dimensionamento Estrutural**. Dissertação de mestrado. Universidade Nova de Lisboa. Portugal, Lisboa, 2014.

OLIVEIRA, Luiza Baptista de. **Procedimentos para definição das características geométricas de vigas alveolares de aço para sistemas de piso e de cobertura**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Viçosa; Viçosa, Minas Gerais, 2012.

OLIVEIRA, Luiza Batista De; VERÍSSIMO, Gustavo De Souza; VIEIRA, Washington Batista; CARVALHO, José Maria Franco De; PAES, José Luiz Rangel. **Definição da Geometria de Vigas Alveolares de Aço para Sistemas de Piso e Cobertura**. Anais. XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Juiz de Fora, Minas gerais, 2012.

PAPPALARDO JUNIOR, Alfonso; RAIÁ, Fabio; DINIS, Henrique. Estudo sobre o **Comportamento de Vigas Celulares e Casteladas**. Anais. XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia - COBENGE. Belém do Pará, 2012.

SAP2000. **Software utilizado para a análise estrutural**. Disponível em: < <http://www.multiplus.com/software/sap2000/>>. Acesso 03/01/2018

SILVEIRA, Eliane Gomes da. **Avaliação do comportamento de vigas alveolares de aço com ênfase nos modos de colapso por plastificação**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas gerais, 2011.

VERÍSSIMO, Gustavo de Souza; VIEIRA, Washington Batista; SILVEIRA, Eliane Gomes da; RIBEIRO, José Carlos Lopes; PAES, José Luiz Rangel; BEZERRA, Eduardo Matos; CASTRO e SILVA, Ana Lydia Reis de; FAKURY, Ricardo Hallal. **Dimensionamento de Vigas Alveolares de Aço**. Apresentação em congresso, Construmetal-ABCCEM, São Paulo, agosto, 2012.

VIEIRA, Hugo Cesar. **Análise Numérica da Flambagem do Montante de Alma Devido ao Cisalhamento em Vigas de Aço Celulares**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

VIEIRA, Washington Batista; VERÍSSIMO, Gustavo De Souza; RIBEIRO, José Carlos Lopes; PAES, Jose Luiz Rangel. Simulação Numérica do Comportamento de Vigas Casteladas de Aço com Ênfase na Flambagem do Montante da Alma. **Ciência & Engenharia**, v.24, n.1, p. 105-13, jan- jun, Minas Gerais, Uberlândia, 2015.