PROJETO DE GRADUAÇÃO

ANÁLISE PRELIMINAR DE VIGAS ALVEOLARES MISTAS PROTENDIDAS PARA DIFERENTES TIPOS DE GEOMETRIAS DE ALVÉOLOS.

IGOR OLIVEIRA ALVES

Brasília, 18 de dezembro de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANÁLISE PRELIMINAR DE VIGAS ALVEOLARES MISTAS PROTENDIDAS PARA DIFERENTES TIPOS DE GEOMETRIAS DE ALVÉOLOS.

IGOR OLIVEIRA ALVES

ORIENTADOR: PROF. LUCIANO MENDES BEZERRA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2

BRASÍLIA – DF, 18 de dezembro de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANÁLISE PRELIMINAR DE VIGAS ALVEOLARES MISTAS PROTENDIDAS PARA DIFERENTES TIPOS DE GEOMETRIAS DE ALVÉOLOS.

IGOR OLVIERA ALVES

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

_____

Prof. Luciano Mendes Bezerra, PhD (UnB)
(Orientador)

_____

Prof. Vladimir Villaverde Barbán, Dsc. (UnB)
(Examinador)

_____

Eng. Gláucyo de Oliveira Santos, Msc. (UnB)
(Examinador)

BRASÍLIA/DF, 18 de dezembro de 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

ALVES, IGOR OLIVIERA
ANÁLISE PRELIMINAR DE VIGAS ALVEOLARES MISTAS PARA DIFERENTES TIPOS DE GEOMETRIAS DE ALVÉOLOS.
[Distrito Federal] 2018.
xiv, 83p., 210 x 279 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2018)
Monografia de Projeto Final. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Estruturas Mistas	2. Vigas Alveolares
3. Protensão	4. Análise Elástica
I ENC/FT/UnB	II Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALVES, I.O. (2018). Análise preliminar de vigas alveolares mistas protendidas para diferentes tipos de geometrias de alvéolos. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-002/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. xiv, 83p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Igor Oliveira Alves

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Análise preliminar de vigas alveolares mistas protendidas para diferentes tipos de geometrias de alvéolos.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2018.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

_____

Igor Oliveira Alves
QR1-A Conjunto K, n° 9, Candangolândia.
71.272-111 – Brasília/DF – Brasil
igor.alves95@gmail.com

Resumo

Este projeto apresenta como objetivo estudar o comportamento de vigas alveolares mistas protendidas e fazer a análise da influência da geometria dos alvéolos na resposta estrutural desses elementos. Para tanto, são apresentadas as conceituações necessárias para se realizar as análises propostas, fazendo-se uma revisão da bibliografia encontrada para estruturas que apresentam características similares. Vigas alveolares mistas protendias são elementos estruturais que apresentam grandes resistências por serem resultados de aplicação de várias técnicas construtivas. Primeiramente, tem-se que vigas alveolares (também chamadas de casteladas) apresentam maior rigidez a flexão devido o ganho de altura após seu processo construtivo. A aplicação de protensão em um perfil castelado garante a estas estruturas maiores resistências às solicitações externas de flexão e de cisalhamento, dependendo do traçado adotado para o cabo de protensão – como mostrado pelas formulações apresentadas no corpo do trabalho. Um exemplo de cálculo é apresentado para expor a metodologia de dimensionamento e análise proposta por esse estudo. Por um lado, este mostra que a viga apresenta grande resistência às solicitações de momentos fletores. Por outro lado, seu comportamento, em relação os efeitos dos esforços de cisalhamento, é afetado pela presença dos alvéolos. Este é um estudo preliminar que visa instigar a pesquisa sobre esse assunto.

Palavras-chave: estruturas mistas, vigas alveolares, protensão, análise elástica.

Abstract

The objective of this paper it to study the behavior of composite prestressed castellated beams (VAMP). For that, a review of the bibliography found on similar structures is made with the intent of propose an analysis for the presented structure. VAMP have great resistance due to the combination of the several construction techniques which are applied to obtain such structural element. First of all, castellated beams have higher bending stiffness when compared with regular beams with the same self-weight. Prestressing a castellated beam gives this structure bigger resistance to bending and shearing stresses. An example presents the methodology of calculation and analysis proposed in this study. In one hand, this example shows that this structure has a good resistance to bending stresses. On the other hand, its behavior under shear stresses is affected significantly by the opening is the web. This is a preliminary study that aims to instigate the research on this subject.

Key-words: composite structures, castellated beams, prestress, elastic analysis.

Lista de figuras

Figura 2.1 – Detalhes do conector de cisalhamento tipo pino com cabeça (modificado – Cavalcante, 2005) 4
Figura 2.2 – Funcionamento da viga como estrutura híbrida (a) e mista (b). 5
Figura 2.3 – Viga metálica alveolar (Cavalcante, 2005, apud Mukhanov, 1980) 5
Figura 2.4 – Esquema de construção de uma viga alveolar. 6
Figura 2.5 – Esquema de laminação de um perfil 'I' (Pfeil, 2016). 9
Figura 2.6 – Gráfico tensão x deformação – resiliência e tenacidade. 9
Figura 2.7 – Tipos de desviadores (Nelsen, 2013). 16
Figura 2.8 – Gráficos tensão deformação com e sem a presença de conectores de cisalhamento (Cavalcante, 2005). 17
Figura 2.9 – Corte para montagem de viga com alvéolos retangulares. 19
Figura 2.10 – Alvéolo retangular, características geométricas. 20
Figura 2.11 – Alvéolo circular, características geométricas. 21
Figura 2.12 – Viga com alvéolo octogonal. 23
Figura 2.13 – Alvéolo Octogonal, características geométricas. 24
Figura 2.14 – Distâncias simplificadas entre os pontos de momento nulo em uma viga contínua ou semicontínuas (NBR 8800:2008) 25
Figura 2.15 – Exemplos de traçado. (a) traçado poligonal; (b) traçado reto (modificado – Ferreira, 2007) 27
Figura 2.16 – Representação esquemática da geometria da laje homogeneizada (Cavalcante, 2005) 32
Figura 2.17 – Resultado dos dados de verificação do funcionamento da estrutura (Cavalcante, 2005) 34
Figura 3.1 – Determinação da linha neutra 36
Figura 3.2 – Seção homogeneizada 38
Figura 3.3 – Equilíbrio para obtenção da força atuante na região da solda para uma viga alveolar. 43
Figura 3.4 – Equilíbrio para obtenção da força atuante na região da solda para uma viga alveolar protendida. 44
Figura 3.5 – Relação entre os valores L2. 48
Figura 3.6 – Força inclinada de protensão. 48
Figura 3.7 – Força de restauração provocado pelos cabos de protensão (Ferreira, 2007 – adaptado) 52
Figura 3.8 – Sistemas de carregamento equivalente para aplicação de protensão. 54
Figura 4.1 – Seção transversal do perfil original – CVS 500x134. 56
Figura 4.2 – Unidade alveolar. 58
Figura 4.3 – Seção homogeneizada. 62
Figura 4.4 – Traçado do cabo. 62
Figura 4.5 – Carregamentos durante o ato de protensão 72
Figura 4.6 – Carregamentos em serviço. 72
Figura 4.7 – Deslocamentos devido a protensão. 72
Figura 4.8 – Deslocamento em serviço. 72

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Valores dos coeficientes de ponderação das resistências. 11
Tabela 2.2 – Resistência do Metal Solda 12
Tabela 2.3 – Força resistente de cálculo de soldas 12
Tabela 2.4 – Valores de Ψ_{1000}, em porcentagem (NBR 6118:2014) 31
Tabela 2.5 – Casos propostos para verificação do funcionamento da viga mista alveolar. 33
Tabela 3.1 – Valores estimados de módulo de elasticidade em função do f_{ck}. (Adaptada, NBR 6118:2014) 37
Tabela 3.2 – Distância B entre os centros dos alvéolos. 47
Tabela 4.1 – Informações do perfil original. 56
Tabela 4.2 – Parâmetros geométricos. 57
Tabela 4.3 – Informações do perfil castelado (expandido) 58
Tabela 4.4 – Carregamento devido peso próprio da estrutura. 60
Tabela 4.5 – Informações do perfil castelado e homogeneizado 61
Tabela 4.6 – Determinação da força de protensão 63
Tabela 4.7 – Dimensionamento dos cabos de protensão. 64
Tabela 4.8 – Tensões em serviço. 65
Tabela 4.9 – Resultados da verificação ao cisalhamento para seção de alma cheia no apoio . 66
Tabela 4.10 – Dimensionamento dos conectores *stud-bolt* 70
Tabela 4.11 – Deslocamentos máximos. 71
Tabela 4.12 – Cálculo dos acréscimos de tensão no cabo de protensão. 73
Tabela 4.13 – Características geométricas para o alvéolo circular 75
Tabela 4.14 – Determinação da força de protensão. 76
Tabela 4.15 – Carregamento máximo de protensão para cada geometria de alvéolo. 77
Tabela 4.16 – Análise comparativa da resistência dos montantes. 77

Lista de símbolos

A_{al} – Área da alma na região do alvéolo

A_{ch} – Área de concreto homogeneizada

A_{cs} – Área da seção transversal do pino

A_{ec} – Área efetiva do concreto

A_g – Área da seção tracionada do perfil metálico

A_p – Área do perfil metálico

A_{sh} – Área da seção homogeneizada

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

A_w – Área efetiva da solda

B – Comprimento da unidade alveolar

CG – Centro de gravidade da seção

CP – Carregamento de cargas permanentes

D_f – Diâmetro do alvéolo circular

E_{ci} – Módulo de elasticidade tangente inicial do concreto

E_{cs} – Módulo de elasticidade secante do concreto

E_p – Módulo de elasticidade do cabo de protensão

E_{st} – Módulo de elasticidade do aço

F – Distância entre a corda secante de um círculo e o perímetro

F_{hd} – Menor valor entre os limites da resistência Q_{rd}

FLT – Flambagem lateral por torção

F_n – Força vertical no n-ésimo desviador

F_{prot} – Força vertical aplicada sobre a viga nos pontos dos desviadores

F_{prot}’ – Força vertical aplicada sobre a viga nos pontos dos desviadores após os deslocamentos

F_w – Força horizontal de cisalhamento atuante na região da solda

$F_{w,Rd}$ – Força resistente de cálculo da solda

H – Altura total da viga de aço, $hp1+h_{lc}$

I_a – Momento de inércia do perfil metálico isolado;

I_{ef} – Momento de inércia efetivo que deve ser considerado;

I_{tr} – Momento de inércia da seção homogeneizada.

I_x – Momento de inércia da seção homogeneizada

L – Vão da viga

L_1 – Comprimento do alvéolo

L_2 – Espaçamento entre alvéolos

L_3 – Base do triângulo em um perfil octogonal

L_4 – Comprimento da região não alveolar

L_c – Comprimento do corte

L_{ef} – Largura efetiva da laje

LN – Linha neutra

L_p – Comprimento do cabo de protensão

M(x) – Momento solicitante em uma posição x de uma viga biapoiada;

M_{max} – Momento máximo atuando na viga considerando a aplicação de todas os carregamentos

M_{min} – Momento atuando sobre a viga protendida no ato da protensão

N_{al} – Número de alvéolos

N_{cnt} – Número de conectores

P – Força de protensão inicial

P(x) – Força de protensão no ponto x do cabo

P' – Força de protensão após acréscimos

P_0 – Força de protensão no ponto de ancoragem do cabo

P_h – Componente horizontal da força de protensão no ponto de ancoragem;

PP – Carregamento de peso próprio

P_s – Componente vertical da força de protensão, dada por $P.sen(\alpha_n)$;

Q_{rd} – Resistência de cálculo de um conector *stud-bolt;*

RB – Relaxação baixa

R_g e R_p – Coeficientes que levam em consideração a atuação em grupo de conectores e a posição dos conectores, dado nos itens O.4.2.1.2 e O.4.2.1.3 da NBR 8800:2008;

RN – Relaxação normal

SC – Carregamento de sobrecargas

V – Esforço cortante solicitante na seção;

V_1 – Cisalhamento solicitante inicial

VAMP – Viga alveolar mista protendida

V_{pl} – Esforço de cisalhamento plástico

V_{rd} – Esforço de cisalhamento resistente de cálculo

V_{rk} – Esforço de cisalhamento resistente característico

V_{sd} – Esforço de cisalhamento solicitante de cálculo

V_{sp} – Força de cisalhamento devido a protensão

W_{ip} – Módulo elástico da seção referente a fibra inferior do perfil metálico;

W_{sc} – Módulo elástico da seção referente a fibra superior da laje de concreto;

W_{sp} – Módulo elástico da seção referente a fibra superior do perfil metálico;

W_x – Módulo elástico em torno do eixo x

YCG – Posição do centro de gravidade da seção homogeneizada

b_1 – Largura da área de concreto convertida em aço

b_f – Largura do flange da viga

cte – Constante de proporcionalidade

e – Excentricidade de aplicação da carga de protensão P em relação ao centro de gravidade da seção homogeneizada;

e_c – Espessura do concreto

e_{ec} – Espessura efetiva do concreto

e_i – Excentricidade da aplicação da força de protensão a esquerda da seção;

e_{i+1} – Excentricidade da aplicação da força de protensão a direita da seção;

f – Coeficiente de atrito angular entre o cabo e os desviadores, (em rad-1)

f_{cd} – Resistência à compressão de projeto do concreto

f_{ck} – Resistência à compressão do concreto

f_{ptk} – Resistência à tração do cabo de protensão

f_{pyk} – Tensão de escoamento do cabo de protensão

f_{ucs} – Resistência última a tração dos conectores de cisalhamento;

f_w – Resistência a tração do metal de solda

f_{yd} – Tensão de escoamento de projeto do aço

f_{yk} – Tensão de escoamento do aço

h_c – Altura do corte do alvéolo

h_{ch} – Altura da chapa espaçadora

h_f – Altura do furo

h_{lc} – Altura da laje de concreto

h_{p0} – Altura do perfil original

h_{p1} – Altura do perfil castelado

h_w – Altura da alma

k – Parâmetro de proporcionalidade entre L_2 e D_f

ksi – Mil libras por polegada quadrada

m – Massa do perfil metálico original

n – Razão alvéolo/altura do perfil castelado

q – Carregamento linear sobre a viga;

q_{ex} – Carregamento externo devido as sobrecargas e cargas permanentes

t – Tempo passado depois do término das operações de protensão

t0 – Instante de aplicação de carga

t_f – Espessura do flange da viga

t_w – Largura da alma

x – Posição da seção a ser analisada na viga.

y_a – Distância entre a borda do alvéolo e o centro de gravidade do perfil 'T';

y_{ip} – Distância da LN até a face inferior do perfil metálico

y_{Ln} – Posição da linha neutra

%p – Perdas de protensão em porcentagem.

ΔM_p – Variação de momento fletor devido a protensão;

$\sum\alpha_n$ – Somatório dos ângulos, em radianos, de desvio entre o ponto de ancoragem e a distância 'x'.

α_E – Parâmetro em função da natureza do agregado que influencia o módulo de elasticidade.

α_e – Razão modular (E_{st}/E_{cs})

α_i – Coeficiente de proporcionalidade entre o E_{cs} e E_{ci}

α_n – Ângulo do cabo de protensão no n-ésimo desviador

α_p – Relação entre os módulos de elasticidade dos materiais envolvidos, no caso de vigas metálicas adota-se como igual a 1 (Ferreira, 2007)

β – Coeficiente de majoração da força de protensão para compensar as perdas de protensão;

β_c – Coeficiente de dilatação térmica do concreto

β_s – Coeficiente de dilatação térmica do aço

γ_{a1} – Coeficiente de ponderação do aço para escoamento, flambagem e instabilidade

γ_{a2} – Coeficiente de ponderação do aço para ruptura

γ_c – Coeficiente de ponderação do concreto

γ_{cs} – Coeficiente de ponderação da resistência do conector, este assume o valor de 1,25 para combinações últimas normais, especiais ou de construção. e 1,10 para combinações excepcionais.

γ_{gc} – Peso específico do concreto

γ_{gs} – Peso específico do aço

γ_p – Coeficiente de segurança aplicado à força de protensão;

γ_s – Coeficiente de ponderação do aço das armaduras

γ_{w1} – Coeficiente de ponderação da solda para casos de penetração parcial e tração ou compressão normal à seção efetiva da solda

γ_{w2} – Coeficiente de ponderação da solda para casos de penetração parcial e cisalhamento paralelo ao eixo da solda, na seção efetiva

ΔL_p – Variação do comprimento do cabo devido os deslocamentos

ΔL_p – Variação no cabo de protensão

ΔM – Variação de momento fletor;

ΔV – Variação de esforço cortante.

$\Delta\sigma_p$ – Variação da força de protensão

$\Delta\sigma_{pr}$ – Perda de tensão por relaxação do cabo do tempo t0 até o instante t de cálculo

ν_{gc} – Coeficiente de Poisson do concreto

ρ – Parâmetro igual a $\sqrt{1-k^2}$

σ_c – Tensão de compressão no concreto

σ_{cg} – Tensão atuante sobre a viga provocada pelo carregamento no ato de protensão

σ_{cp} – Tensão na viga para a força de protensão de n cabos protendidos

σ_{ip} – Tensão na fibra inferior do perfil metálico em serviço;

σ_{ip}^{0} – Tensão na fibra inferior do perfil metálico durante o ato da protensão;

σ_{pi} – Tensão inicial aplicada aos cabos de protensão

σ_{sc} – Tensão na fibra superior da laje de concreto em serviço.

σ_{sl} – Tensão no topo da laje de concreto

σ_{sp}^{0} – Tensão na fibra superior do perfil metálico durante o ato da protensão;

σ_t – Tensão de tração no aço

σ_{vm} – Tensão de Von Mises

τ_w – Tensão de cisalhamento na solda.

φ – Diâmetro nominal da cordoalha usada.

Ψ (t, t0) – Coeficiente de perda de tensão por relaxação

Ψ_{1000} – Coeficiente de relaxação do aço após 1000 h a 20°C para tensões iniciais de $0{,}5f_{ptk}$ a $0{,}8f_{ptk}$

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
1.1 OBJETIVO 2
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4
2.1 MATERIAIS 7
2.1.1 CONCRETO ARMADO 7
2.1.1.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS 8
2.1.2 AÇO ESTRUTURAL 8
2.1.2.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS 9
2.1.3 SOLDA 11
2.1.3.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS 11
2.1.4 CABOS DE PROTENSÃO 13
2.1.4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS 13
2.1.5 CONECTORES DE CISALHAMENTO 14
2.1.6 DESVIADORES E ANCORAGEM 15
2.2 VIGAS ALVEOLARES MISTAS PROTENDIDAS (VAMP) 16
2.2.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS 18
2.2.1.1 ALVÉOLO RETANGULAR 18
2.2.1.2 ALVÉOLO CIRCULAR 21
2.2.1.3 ALVÉOLO OCTOGONAL 22
2.2.1.4 LARGURA EFETIVA DA LAJE DE CONCRETO 24
2.3 PROTENSÃO 25
2.3.1 TRAÇADO DOS CABOS 27
2.3.2 FORÇAS DE PROTENSÃO 27
2.3.3 PERDAS DE PROTENSÃO 29
2.3.4 PERDAS IMEDIATAS 29
2.3.5 PERDAS AO LONGO DO TEMPO 30
2.4 ANÁLISE ELÁSTICA DA SEÇÃO 31
3. DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE 35
3.1 DETERMINAÇÃO DA LINHA NEUTRA 35
3.2 HOMOGENEIZAÇÃO DA SEÇÃO 37
3.3 TENSÕES LIMITES 38
3.4 DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE PROTENSÃO 41

3.5 DIMENSIONAMENTO DOS CONECTORES *STUD-BOLT* 41
3.6 ANÁLISE DAS TENSÕES NA SOLDA 42
3.6.1 CONSIDERAÇÕE SOBRE O MODELO 46
3.7 VERIFICAÇÃO AO CISALHAMENTO 48
3.7.1 ZONA ALVEOLAR 50
3.8 OUTRAS VERIFICAÇÕES 51
4. EXEMPLO DE CÁLCULO DE UMA VIGA ALVEOLAR MISTA PROTENDIDA 55
4.1 EXEMPLO DE CÁLCULO 55
4.1.1 DADOS: 55
4.1.2 GEOMETRIA 57
4.1.3 VERIFICAÇÃO DA ZONA NÃO ALVEOLAR 59
4.1.4 PESO PRÓPRIO 60
4.1.5 HOMOGENEIZAÇÃO DA SEÇÃO 61
4.1.6 TRAÇADO DO CABO 62
4.1.7 FORÇA DE PROTENSÃO E DIMENSIONAMENTO DOS CABOS 63
4.1.8 VERIFICAÇÃO DAS TENSÕES EM SERVIÇO 65
4.1.9 VERIFIFICAÇÃO AO CISALHAMENTO 65
4.1.9.1 VERIFIFICAÇÃO DA SEÇÃO DE ALMA CHEIA 66
4.1.9.2 VERIFIFICAÇÃO DA SEÇÃO DO ALVÉOLO 67
4.1.9.3 VERIFIFICAÇÃO DO MONTANTE 69
4.1.10 DIMENSIONAMENTO DOS CONECTORES DE CISALHAMENTO 70
4.1.11 VERIFICAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS 71
4.2 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS GEOMETRIAS DOS ALVÉOLOS 74
4.2.1 DADOS 74
4.2.2 ANÁLISE DA FORÇA DE PROTENSÃO 76
4.2.3 ANÁLISE DA FLEXÃO 76
4.2.4 ANÁLISE DO CISALHAMENTO 77
5. CONCLUSÃO 79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 81

1. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos dentro da construção civil foram muito significativos durante o século XX. O surgimento dos processos industriais aplicados na construção, o advento do concreto armado e das estruturas metálicas levaram a contribuição do surgimento de técnicas construtivas que hoje são aplicadas em todo o mundo.

O conhecimento geral das ciências dos materiais levou a aplicação de sistemas construtivos inovadores. Porém, a evolução deve continuar. Conforme a indústria da construção civil evolui tecnologicamente, a aplicação das técnicas já consolidadas e o surgimento de novas tecnologias se tornam cada vez mais demandados pelo mercado.

A aplicação de estruturas mistas alveolares já está presente nos mercados da construção civil pelo Brasil e pelo mundo. Porém, as técnicas construtivas desses elementos foram revolucionadas com o avanço das aplicações automatizadas de corte e solda dos perfis metálicos que barateou o custo de produção desses elementos. O uso de protensão em estruturas metálicas foi realizado no Brasil, de forma pioneira, pela engenheira Heloísa Maringoni. Em 2001, foi proposta a utilização de protensão em vigas metálicas para readequar o espaço da garagem do Hotel Hilton, no bairro Morumbi em São Paulo, para implementação de novas salas de convenções, Nelsen (2012).

A proposta deste trabalho é estudar um elemento estrutural que apresenta uma combinação de técnicas construtivas que proporcionam grande resistência a peça estrutural. O objeto de estudo das análises aqui propostas é a viga alveolar mista protendida (VAMP).

Nesse elemento, são consideradas as contribuições da laje de concreto que se apoia sobre o perfil metálico, isso implica em um funcionamento da viga como em uma viga “T” que apresenta maior rigidez a flexão e resistência às solicitações. Isso só pode ser considerado apenas se a estrutura funciona como mista, ou seja, apresenta a solidariedade do funcionamento entre o concreto da laje e o aço da viga.

A viga ser alveolar significa que o perfil metálico é modificado para que se tenha ganho de rigidez a flexão através do aumento de sua altura e, consequentemente, aumento do momento de inércia, sem alterar seu peso próprio. A técnica utilizada para se obter esse ganho consiste em aplicar um corte longitudinal no perfil original e castelar a viga para ter o ganho de altura desejado.

O último elemento aplicado sobre a viga para aumentar sua resistência é a protensão externa que consiste em aplicar uma força de compressão através de cabos que introduz momentos fletores contrários aos que surgem com a solicitação da viga por carregamentos

externos. A força de protensão atua na viga através de desviadores soldados em sua alma que são utilizados para implementar o traçado do cabo que, por sua vez, é fundamental para se determinar as tensões finais atuantes no perfil metálico. A protensão trabalha introduzindo um estado de tensão inicial na peça que contrabalanceia aquele que surge devido a aplicação de forças externas. O resultado da superposição desses efeitos é um estado de tensões aliviado pela força de protensão.

A aplicação de todas essas técnicas de ganho de resistência faz surgir tensões na região da solda que devem ser verificadas principalmente sob solicitações de esforços de cisalhamento.

Neste documento se faz uma revisão dos mecanismos envolvidos no funcionamento e comportamento de vigas alveolares protendidas biapoiadas e são apresentadas formulações para o cálculo e verificações que devem ser realizadas para este elemento estrutural.

Nota-se o caráter inovador deste estudo por analisar uma combinação de técnicas construtivas ainda pouco explorada – a combinação que resulta em vigas alveolares mistas protendidas. Este documento apresenta uma análise preliminar dos mecanismos envolvidos em VAMP. Qualquer resultado obtido neste documento deve ser tomado com cautela e somente deve ser utilizado após análise mais elaborada. Esse estudo é apresentado com objetivo didático e seus resultados não devem ser utilizados em situações de projeto sem análise rigorosa por parte do(a) projetista.

1.1 OBJETIVO

O objetivo geral deste documento é a análise do funcionamento de vigas alveolares mistas protendidas. Tem-se como objetivos, também, a elaboração de estudos analíticos do desempenho estrutural das VAMP perante as solicitações durante o ato de protensão e de sua vida em serviço; analisar as tensões na região da solda de montante entre os alvéolos; apresentar um exemplo de cálculo de VAMP biapoiadas e realizar uma análise comparativa entre as geometrias de alvéolos apresentadas.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O texto é organizado em 5 capítulos. O primeiro é referente a introdução do trabalho e os objetivos que se quer atingir neste estudo. O capítulo 2 é referente a revisão bibliográfica, onde se apresentam questões sobre as características dos materiais envolvidos na construção e no funcionamento de VAMP. Neste capítulo, são apresentadas três geometrias diferentes de

alvéolos e são discutidas questões sobre suas propriedades. Por fim, são apresentadas questões sobre a protensão.

O capítulo 3 apresenta as análises de verificação e dimensionamento de vigas alveolares mistas protendidas. Neste, são realizadas análises em estado elástico de verificação desses elementos. A obtenção dos esforços e tensões para análise desses elementos são mostradas neste capítulo.

O capítulo 4 exemplifica a filosofia de dimensionamento apresentada no capítulo anterior. Este apresenta um exemplo de cálculo que leva em consideração as análises e verificações expostas no capítulo 3, assim como apresenta uma análise comparativa entre as geometrias dos alvéolos.

O capítulo 5 é o capítulo conclusivo deste estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o avanço das tecnologias das construções e da necessidade de se construir estruturas mais leves que mantenham a sua capacidade resistente, a implementação de vigas alveolares surge de forma natural no meio da construção civil. Quando considerada como uma estrutura mista, esta apresenta uma maior resistência por poder trabalhar em conjunto com a laje de concreto que apoia sobre ela e também apresenta maior rigidez a flexão devido o ganho de momento de inércia. Adicionalmente a essas características, uma terceira maneira de aumentar a resistência dessa peça estrutural é aplicando protensão externa sobre ela.

As estruturas mistas têm por característica o funcionamento solidário de um perfil metálico e um elemento de concreto armado. Em caso de vigas, quando a transferência de esforços na interface laje-viga é garantida, pode-se considerar que, nas regiões de momentos positivos, o concreto trabalha majoritariamente comprimido, enquanto a maior parte da seção do perfil metálico trabalha a tração.

Para fazer a transferência dos esforços de cisalhamento na interface laje-viga é necessário a implementação de conectores de cisalhamento. Na Figura 2.1, é apresentado um exemplo de conector do tipo *stud-bolt* (tipo pino com cabeça) e um esquema de sua utilização. Quando essa transferência não ocorre de maneira satisfatória, ou quando ela é inexistente, a estrutura trabalha como híbrida. Neste caso, cada um dos elementos da estrutura absorve uma parcela do carregamento de modo que ambos possuem gráficos de tensão e deformação independente. (Cavalcante, 2005). Na Figura 2.2, observa-se o comportamento da estrutura quando esta funciona como híbrida e como mista.

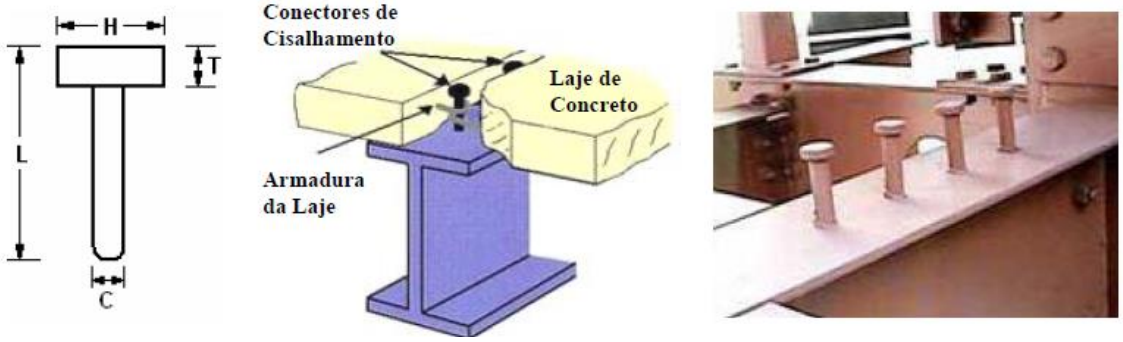
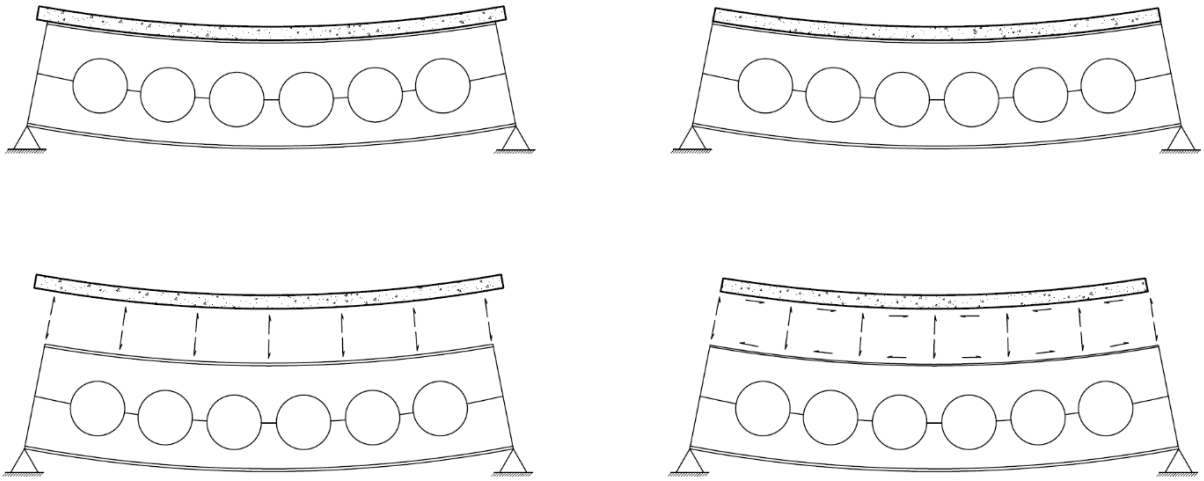


Figura 2.1 – Detalhes do conector de cisalhamento tipo pino com cabeça (modificado – Cavalcante, 2005)



a) Estrutura Híbrida b) Estrutura Mista

Figura 2.2 – Funcionamento da viga como estrutura híbrida (a) e mista (b).

A Figura 2.2-b mostra que a transferência do esforço de cisalhamento na interface laje-viga deve ser feita de tal modo que ambas sofram as deformações juntas.

Vigas alveolares metálicas são compostas por perfis de aço que apresentam em sua alma cortes do material espaçados entre si com geometrias específicas. Um exemplo desse tipo de viga pode ser visto na Figura 2.3. A metodologia de construção de uma viga alveolar consiste em fazer um corte longitudinal na alma do perfil de forma a separar a viga em dois perfis "T", que são sobrepostos (castelados) e, em seguida, soldados. Alvéolos com diferentes geometrias podem ser obtidos dependendo da geometria do corte longitudinal. A Figura 2.4 mostra um esquema do processo de produção de uma viga alveolar.

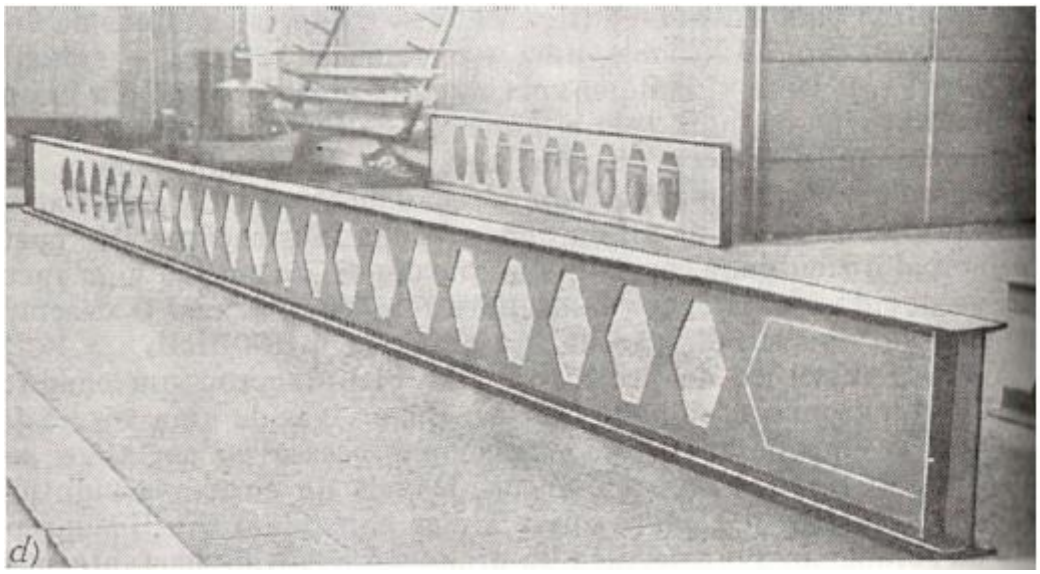


Figura 2.3 – Viga metálica alveolar (Cavalcante, 2005, apud Mukhanov, 1980)

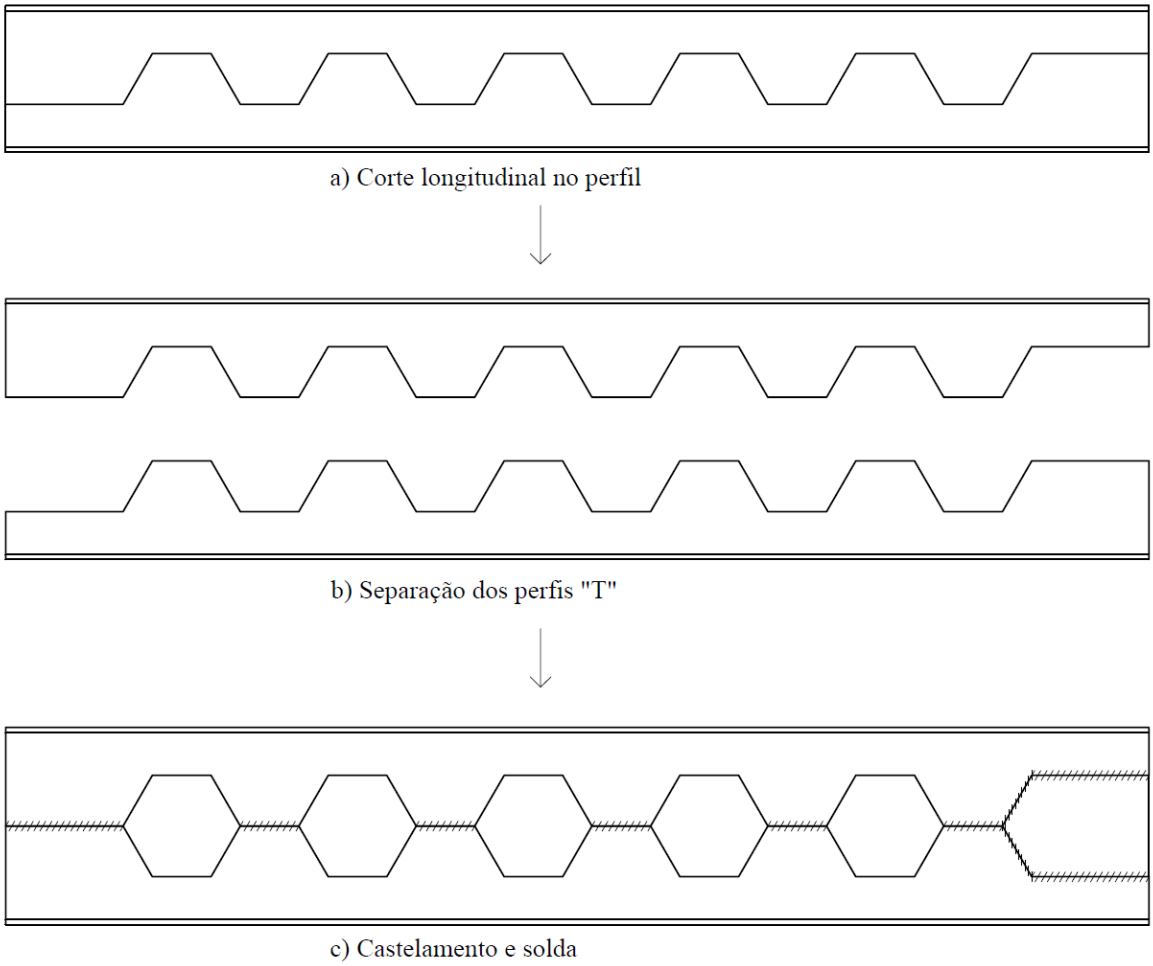


Figura 2.4 – Esquema de construção de uma viga alveolar.

Outro fator que se pode adicionar as vigas metálicas para ganho de resistência é a protensão. De acordo com Ferreira (2007):

> A protensão atua na estrutura introduzindo tensões internas diretamente opostas àquelas que vão surgir em decorrência dos carregamentos externos. Com isso há um aumento da capacidade resistente da peça, possibilitando a redução do tamanho dos perfis e como consequência, a redução dos custos das construções. Além disso, o uso da protensão em estruturas de aço pode ser uma boa opção para atender imposições arquitetônicas ou construtivas, como é o caso de limitação de altura de viga, ou até mesmo para tornar possíveis projetos arquitetônicos mais modernos e arrojados.

Vigas alveolares mistas protendidas possuem sete componentes básicos – o perfil metálico, a laje de concreto armado, a solda que une os perfis “T” resultados do corte, os cabos

de protensão, os conectores de cisalhamento, os desviadores que são utilizados para executar o traçado do cabo e a ancoragem dos cabos.

A unidade a seguir discorre sobre cada um desses materiais, pois a compreensão do funcionamento destes e de como contribuem para a resistência da peça é de suma importância para os estudos aqui propostos.

2.1 MATERIAIS

Em estruturas mistas de aço-concreto, o funcionamento solidário de seus componentes faz com que estas sejam economicamente vantajosas por apresentarem como característica a utilização de cada material para resistir o esforço solicitante que este tenha maior resistência. Assim, o objetivo de se trabalhar com vigas mistas é proporcionar uma situação em que o concreto funcione majoritariamente a compressão e o aço a tração.

Por um lado, uma viga de concreto-armado exige a presença das armaduras para combater os esforços solicitantes por conta da baixa resistência aos esforços de tração que é característica do concreto. Assim, em situações onde as solicitações são mais complexas, – peças que funcionam sob flexão-composta-oblíqua, ou sob torção – a utilização de armaduras mais robustas se faz necessária.

Por outro lado, o aço apresenta características semelhantes de resistência a tração e a compressão. Porém, vale ressaltar que peças de aço apresentam instabilidades por flambagem sob ação de solicitações de compressão que devem ser verificadas.

Utilizar estruturas onde se pode tirar o máximo da utilização do concreto – com este trabalhando majoritariamente a compressão – e do aço – este trabalhando a tração – é lógico e desejável do ponto de vista econômico e de solução de engenharia.

2.1.1 CONCRETO ARMADO

A parte de concreto armado em vigas mistas é formada pela laje de concreto que se apoia sobre o perfil metálico. A laje contribui para resistência estrutural da peça absorvendo a maior parte, se não todo, o esforço de compressão que surge devido o momento fletor atuante sobre a estrutura.

O concreto é um material que possui como característica principal sua alta resistência a esforços de compressão, enquanto sua resistência a tração é baixa.

2.1.1.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As questões normativas referentes as estruturas mistas e seus materiais são apresentadas na norma NBR 8800:2008 que, pelo item 4.5.3.1, afirma que as propriedades do concreto de densidade normal devem atender a norma NBR 6118. Os valores de resistência característica à compressão (f_{ck}) do concreto deve estar situada dentro da faixa de 20MPa a 50MPa. Ainda valem dentro desse item normativo, por exemplo, as propriedades abaixo:

- Peso específico: $\gamma_{gc} = 25\ kN/m^3$
- Coeficiente de Poisson: $\nu_{gc} = 0{,}20$
- Coeficiente de dilatação térmica: $\beta_c = 10^{-5\circ}C^{-1}$

2.1.2 AÇO ESTRUTURAL

O aço estrutural é formado por uma liga metálica composta principalmente de ferro e carbono, na qual pode haver adição de outros elementos para variar suas características como, por exemplo, sua maleabilidade ou resistência a corrosão. O aço é a liga ferro-carbono em que o teor de carbono varia desde 0,008% até 2,11% (Pfeil. W, apud Chiaverini, 2016).

O teor de carbono influencia as propriedades mecânicas do aço – quanto maior o teor de carbono, maiores são a dureza e a resistência à tração. Porém, aços com elevados teores de carbono apresentam maior fragilidade, o que não é uma característica desejável do ponto de vista estrutural. Ao projetar uma estrutura, espera-se que esta tenha uma certa ductibilidade para que mostre sinais de falha. Por apresentar boa resistência aos esforços e por preservar a maleabilidade, o aço é um material que atende a filosofia de dimensionamento desejada.

As peças estruturais de aço são compostas de perfis de geometrias com seções variadas – como por exemplo, perfis “I”, perfis “U”, entre outros. Os perfis “I”, que compõem o objeto de estudo desse trabalho, são produzidos por laminação ou por solda de placas metálicas.

Os perfis laminados são fabricados a partir de tarugos que são aquecidos e depois passam por rolos que moldam a seção e alongam a peça até que esta esteja com o formato desejado. O esquema da Figura 2.5-a mostra a seção dos rolos do laminado. A Figura 2.5-b mostra o esquema de rolos para laminação de um perfil ‘I’. A altura do perfil é determinada pela distância entre as chapas fixas e modificando a distância entre os rolos pode-se controlar a espessura da alma do perfil ‘I’. A Figura 2.5-c mostra a progressão do processo de laminação do perfil, que é feita de forma gradativa.

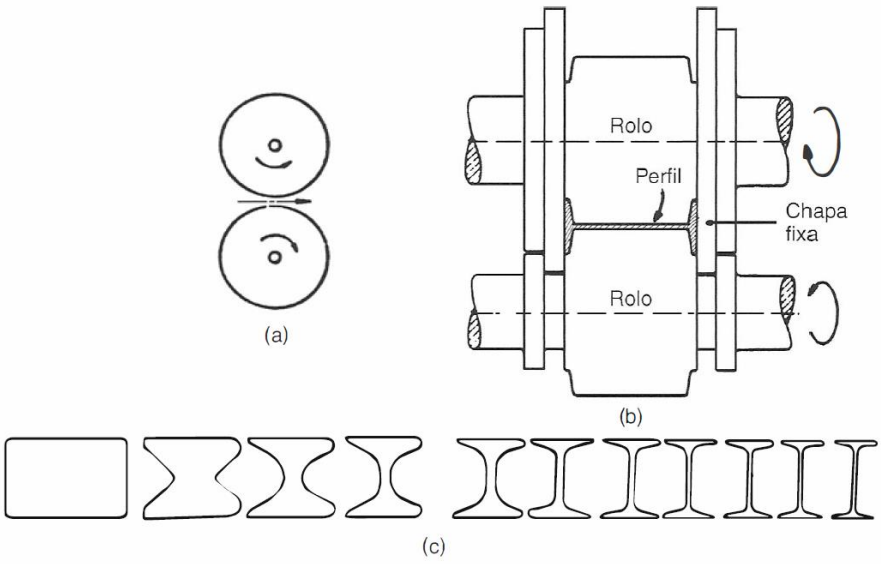


Figura 2.5 – Esquema de laminação de um perfil ‘I’ (Pfeil, 2016).

2.1.2.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Dentre as características do aço como material estrutural destacam-se sua ductilidade – a capacidade de absorver deformações quando solicitadas por carregamentos externos, a resiliência e a tenacidade. A resiliência é a capacidade de absorver energia mecânica em regime elástico, ou seja, a capacidade de restituir energia mecânica (Pfeil, 2016). A tenacidade é a soma de toda energia que pode ser absorvida por uma peça de aço levando em consideração os regimes elástico e plástico. Essa energia é indicada pela área em baixo do gráfico de tensão e deformação do aço, como pode ser observado na Figura 2.6.

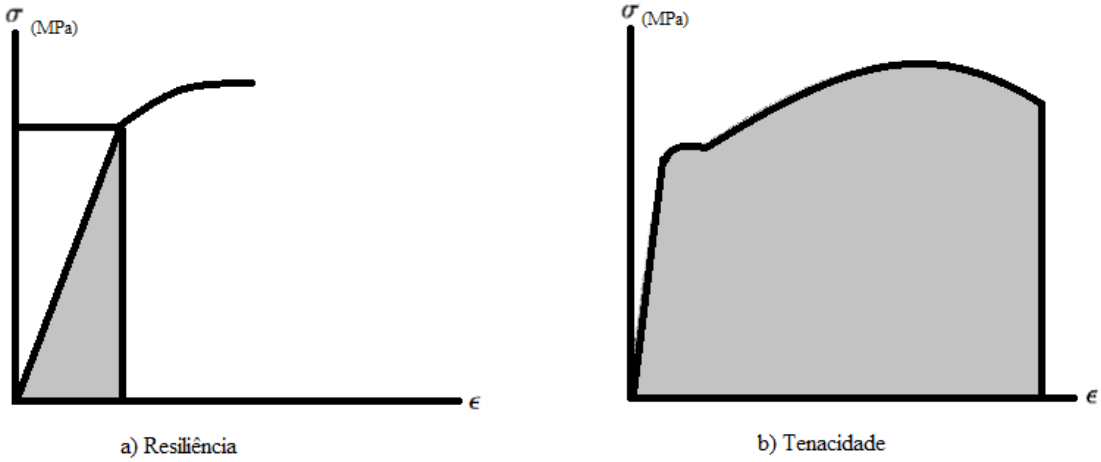


Figura 2.6 – Gráfico tensão x deformação – resiliência e tenacidade.

Em sua grande maioria, as estruturas são dimensionadas para esforços estáticos. Porém, quando ocorrem solicitações dinâmicas, é necessário levar em consideração os efeitos destas na resistência do material. A fadiga é um dos principais fatores limitantes da resistência, pois pode provocar a ruptura do material com valores de tensões muito inferiores aos valores de resistência obtidos através de ensaios com cargas estáticas.

De acordo com Pfeil (2016, p. 17):

> A resistência à fadiga das peças é geralmente determinante no dimensionamento de peças sob ação de efeitos dinâmicos importante, tais como peças de máquinas, de pontes, etc.
>
> A resistência à fadiga das peças é fortemente diminuída nos pontos de concentração de tensões, provocadas, por exemplo, por variações bruscas na forma da seção, indentações devidas à corrosão, etc.

As estruturas mistas estão sob ações de cargas dinâmicas mesmo quando utilizadas em edificações – por ação de cargas de vento, sismos, por exemplo. Assim, é necessário se ter uma preocupação com a geometria adotada para as peças estruturais para se evitar, ou minimizar, os efeitos de fadiga. Esse problema será retomado ao se falar dos aspectos construtivos do perfil com alvéolos retangulares, pois os cantos dos retângulos devem possui transições suaves para se evitar ângulos retos e, por sua vez, evitar concentrações de tensões naqueles pontos.

Os materiais utilizados para a análise nesse trabalho terão como características físicas as listadas abaixo:

- Tipo: A-36
- Peso específico: $\gamma_{gs} = 77{,}0\ kN/m^3$
- Coeficiente de dilatação térmica: $\beta_s = 12 \cdot 10^{-5} °C^{-1}$
- Tensão de escoamento: $f_{yk} = 250\ MPa$
- Tensão de escoamento de projeto: $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{a1}}$
- Limite resistente a tração: $f_u = 400\ MPa$
- Módulo de elasticidade: $E_{st} = 200\ GPa$

O coeficiente γ_{a1} é determinado conforme os parâmetros de dimensionamento para os estados-limites últimos do item 4.8.2 da norma NBR 8800:2008. A Tabela 2.1 foi retirada dessa norma e apresenta os valores que devem ser tomados para esse e outros coeficientes quando necessário.

Tabela 2.1 – Valores dos coeficientes de ponderação das resistências.

Combinações	**Aço estrutural γ_a[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				

2.1.3 SOLDA

A solda é um tipo de união por coalescência do material obtida por fusão das partes adjacentes (Pfeil, 2016). A conexão por solda dos perfis "T" deve ser feita de modo a garantir a resistência da peça estrutural e a transferência de esforços. A resistência da solda é determinante para a capacidade restiva da peça, pois a solda pode ser o fator limitante.

Quanto a aplicação da solda neste estudo, dentre vários tipos, será adotada a solda de entalhe com penetração total. Pelo item 6.2.2.1 da norma NBR 8800:2008, dentre as disposições listadas, deve-se destacar que a área efetiva (A_w) das soldas de penetração total é dada pelo produto do comprimento efetivo da solda pela espessura da garganta efetiva que deve ser tomada como igual à menor das espessuras das partes soldadas. Porém, nas análises propostas nesse trabalho tem-se espessuras iguais para as placas soldas, sendo essa a espessura da alma dos perfis.

2.1.3.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A Tabela 2.2 é uma adaptação da Tabela A.4 da norma NBR 8800:2008, onde se encontram as resistências à tração do metal da solda. A nomenclatura dos eletrodos segue a convenção da ASTM, onde o eletrodo E60 é aquele que apresenta uma resistência a ruptura de 60ksi. A resistência a tração demonstrada é a tração mínima que deve ser considerada para o metal da solda (f_w).

Tabela 2.2 – Resistência do Metal Solda

Metal de Solda	f_w (ksi)	f_w (MPa)
E60	60	415
E70	70	485
E80	80	550

A Tabela 2.3 mostra as forças resistentes de cálculo das soldas, adaptada da norma NBR 8800:2008, mostra os casos para soldas de entalhe de penetração total e parcial.

Tabela 2.3 – Força resistente de cálculo de soldas

Tipo de Solda	Tipo de Solicitação e orientação	Força resistente de cálculo $F_{w,Rd}$
Penetração total	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda	Não precisa ser considerado
	Tração ou compressão normal à seção efetiva da solda	Metal-base: $A_{MB} f_y / \gamma_{a1}$
	Cisalhamento (soma vetorial) na seção efetiva	Metal-base: $0{,}60\, A_{MB} f_y / \gamma_{a1}$
Penetração Parcial	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda	Não precisa ser considerado
	Tração ou compressão normal à seção efetiva da solda	O menor dos dois valores: Metal-base: $A_{MB} f_y / \gamma_{a1}$ Metal da solda: $0{,}60\, A_w f_w / \gamma_{w1}$
	Cisalhamento paralelo ao eixo da solda, na seção efetiva	Metal-base[1] Metal da solda: $0{,}60\, A_w f_w / \gamma_{w2}$

O valor de γ_{w1} é igual a 1,25 para combinações normais, especiais ou de construção e igual a 1,05 para combinações excepcionais. O valor de γ_{w2} é igual a 1,35 para combinações normais, especiais ou de construção e igual a 1,15 para combinações excepcionais. Os valores de γ_{a1} devem ser retirados da Tabela 2.1.

[1] O metal-base deve atender ao item 6.5 da norma NBR 8800:2008.

2.1.4 CABOS DE PROTENSÃO

Os cabos de protensão possuem elevadas resistências e não apresentam patamar de escoamento. Estes podem ter resistência até três vezes maior que os aços usados no concreto armado. (Ferreira, 2007).

Os diâmetros encontrados para os fios que compõe cabos de protensão variam de 4 a 9mm – Ver tabelas 2 e 3 da NBR 7482:2008 para as características normativas dos fios. Pelo item 5.3 da norma citada, o módulo de elasticidade está em função do material do fio, mas, para fios de aço-carbono comuns, pode-se tomar como sendo 205 GPa.

Ferreira (2007) cita que os aços de protensão podem ser encontrados nas seguintes formas:

- Fios trefilados de aço carbono, com diâmetro de 3 a 8mm, fornecidos em rolos ou bobinas;
- Cordoalhas: fios trefilados, enrolados em forma de hélice, com dois, três, ou sete fios, e o diâmetro pode variar de 6,5 a 15,7mm;
- Barras de aço-liga, de alta resistência, laminadas a quente, com diâmetros superiores a 12mm e comprimento limitado.

Durante a fabricação desses fios, pode-se aplicar dois tipos de tratamentos distintos que caracterizam o aço como sendo aliviado (relaxação normal – RN), ou estabilizado (relaxação baixa – RB). O tratamento de relaxação deve ser realizado porque, após a trefilação, os fios possuem elevadas taxas de tensões residuais que impossibilitam sua utilização. Aços de relaxação normal passam por um tratamento térmico que elimina essas tensões. Já fios de relaxação baixa passam por um processo termomecânico que consiste em aplicar tração enquanto este é aquecido.

2.1.4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As informações sobre as propriedades mecânicas dos cabos de protensão foram tiradas das normas NBR 6118:2014, NBR 7482:2008 e NBR 7483:2008.

- f_{ptk}: resistência à tração do cabo de protensão;
- f_{pyk}: tensão de escoamento do cabo. Pela NBR 7483:2008, esse limite corresponde a tensão que, quando aplicada ao cabo de protensão, faz com que este apresente uma deformação residual de 0,2%.

- E_p: módulo de elasticidade, pode ser considerado como 205GPa para fios (Ver NBR 7482:2008), ou 200GPa para cordoalhas (Ver item 8.4.4 da NBR 6118:2014 e a norma NBR 7483:2008).

A tensão inicial (σ_{pi}) aplicada nos fios e cordoalhas de protensão devem atender os requisitos encontrados no item 9.6.1.2.1-b da NBR 6118:2014. Em síntese, para cabos de protensão pós-tracionados tem-se que para:

- Fios de relaxação normal (RN):

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0{,}74 f_{ptk} \\ 0{,}87 f_{pyk} \end{cases} \quad (2.1)$$

- Fios de relaxação baixa (RB):

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0{,}74 f_{ptk} \\ 0{,}82 f_{pyk} \end{cases} \quad (2.2)$$

- Cordoalhas engraxadas, com aços de classe RB:

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0{,}80 f_{ptk} \\ 0{,}88 f_{pyk} \end{cases} \quad (2.3)$$

- Aços CP-85/105, fornecidos em barras:

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0{,}72 f_{ptk} \\ 0{,}88 f_{pyk} \end{cases} \quad (2.4)$$

De acordo com Ferreira (2007), esses limites são aplicados para casos de protensão em que ocorra pós-tração dos cabos, o que ocorre nas vigas metálicas protendidas. Estes limites são considerados para evitar a ruptura do cabo durante a protensão, para que a perda por relaxação do aço não seja muito elevada e para evitar tensões excessivas que deixariam o aço de protensão com maior sensibilidade à corrosão, por exemplo.

2.1.5 CONECTORES DE CISALHAMENTO

Os conectores de cisalhamento são responsáveis por fazer a conexão na interface laje-perfil metálico que garante o funcionamento solidário dos materiais e a configuração de viga mista. Os elementos mais utilizados como conectores de cisalhamento são os do tipo pino com cabeça (*stud-bolt*). A NBR 8800:2018, em seu Anexo O, traz postulados referentes a esses conectores e conectores do tipo U.

Os conectores de cisalhamento podem ser dimensionados garantindo a interação total entre os materiais (i.e., chega-se primeiro a total plastificação do perfil metálico ou até ao esmagamento da laje de concreto antes do escoamento dos conectores) ou estes podem trabalhar de forma a garantir uma interação parcial entre os elementos da estrutura mista, onde os

conectores de cisalhamento sofrem plastificação e o escorregamento na interface acontece antes do rompimento dos outros materiais.

Os conectores podem ser classificados como rígidos ou flexíveis, sendo que os primeiros são caracterizados por baixas deformações e praticamente trabalham sem deslizamento entre o perfil metálico e a laje de concreto. No entanto, estes apresentam características de colapso frágil. Já os conectores flexíveis podem apresentar deformações em situações de serviço. O conector ideal é aquele que apresenta deformações mínimas em situações de serviço e grandes deformações em estados limites últimos. Veríssimo (2007)

Vale ressaltar que os conectores *stud-bolt* podem apresentar problemas de fadiga sob ações de cargas em serviço se estes trabalharem com deformações significativas durante sua vida-útil.

A soldagem dos conectores *stud-bolt* à viga metálica é realizada por eletrofusão utilizando uma pistola específica para essa atividade. As configurações de voltagem, corrente, tempo e propriedades da pistola devem estar conforme as recomendações dos fabricantes dos aparelhos de aplicação e dos conectores. A superfície de aplicação da viga que receberá os conectores deve estar limpa e sem a presença de corrosões. (AWS, D1.5)

As propriedades mecânicas desses conectores devem ser apresentadas por seus fabricantes. A Sociedade Americana de Solda (*American Welding Society* – AWS) recomenda que conectores utilizados em vigas mistas devem apresentar resistência última a tração (f_{ucs}) maior que 415 MPa e tensão de escoamento (f_{ycs}) de no mínimo 345 MPa. São encontrados comercialmente conectores que apresentam resistências: f_{ucs} = 450MPa e f_{ycs} = 350 MPa.

2.1.6 DESVIADORES E ANCORAGEM

A ancoragem dos cabos de protensão pode ser realizada utilizando cunhas ou porcas e roscas, além de serem aplicados enrijecedores para melhorar a resposta local do perfil metálico e evitar ruptura da peça nos pontos de ancoragem. (Nelsen, 2012)

Em vigas biapoiadas, quando feita a ancoragem próxima os apoios, é interessante posicionar os cabos de forma que o centro de aplicação da força de protensão esteja próximo do centro de gravidade da seção viga protendida. Dessa forma, evita-se a aplicação de tensões indesejadas nessas regiões. Cabos de traçados retos e excêntricos, podem ser ancorados antes dos apoios para evitar o surgimento de esforços indesejados na região dos apoios, como apontado por Ferreira (2007).

Os desviadores podem ser compostos por pinos e chapas e os cabos devem passar por pontos simétricos em relação à alma do perfil metálico. Nelsen (2013) exemplifica que estes podem ser pinos soldados à alma com saliência na cabeça para manter o cabo em posição (Figura 2.7-a), podem ser chapas transversais que funcionam também como enrijecedores (Figura 2.7-b). Outros tipos também podem ser utilizados, como apresentado na Figura 2.7-c.

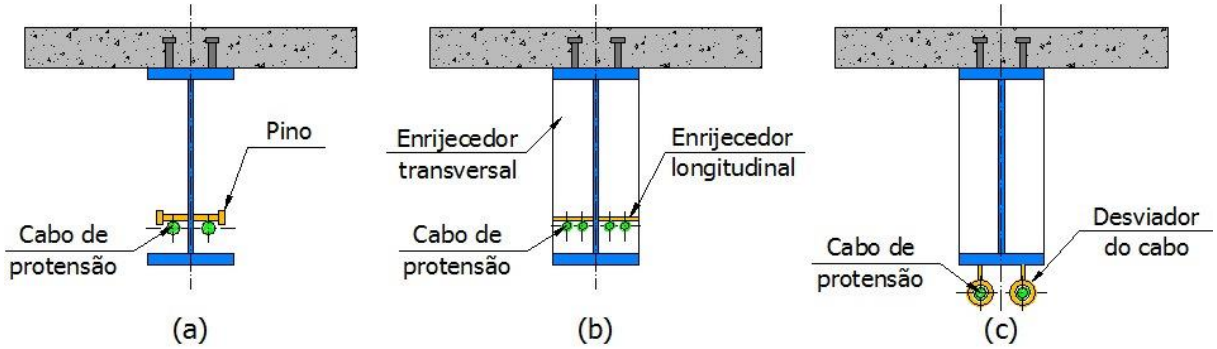


Figura 2.7 – Tipos de desviadores (Nelsen, 2013).

2.2 VIGAS ALVEOLARES MISTAS PROTENDIDAS (VAMP)

Com o avanço tecnológico dentro da construção civil foi possível obter estruturas cada vez mais esbeltas que possuem grande resistência aos esforços solicitantes. O controle de produção dos materiais trouxe uma maior confiabilidade na hora de execução e dimensionamento das estruturas garantindo ao projetista uma maior flexibilidade na utilização destes materiais.

A utilização de estruturas mistas de aço e concreto surge após os estudos que mostram que estes podem trabalhar com interação completa garantindo uma estrutura mais racionalizada, onde se obtém elementos estruturais que trabalham com as características principais de resistência de cada material – o concreto trabalhando a compressão e o aço a tração, em casos de vigas mistas, por exemplo.

São chamadas vigas mistas, as peças estruturais compostas de um perfil metálico que suporta uma laje de concreto armado. A estrutura que tem um funcionamento análogo a de uma viga “T” é bastante eficiente e adequado para uso em pisos de edifícios, em vista da facilidade construtiva e da redução do peso próprio (Cavalcante, 2005). Para se garantir a contribuição da laje para a resistência de sistema construtivo é necessário que os materiais funcionem de forma solidária. Assim, deve-se adicionar conectores de cisalhamento que garantam a junção da laje com a o perfil metálico.

Esses conectores garantem a interação entre a laje e a viga que pode ser total ou parcial. Em estruturas híbridas (onde não há nenhuma interação), ocorre o surgimento de linhas neutras independentes para os dois materiais que resistem aos esforços solicitantes de maneiras independentes, como ilustrado na Figura 2.8-a. Em situações de interação completa (Figura 2.8-b), há a ocorrência de apenas uma linha neutra na seção. Por outro lado, quando o conector passa de sua capacidade resistente e este atinge estado de tensões que o leva a plastificar ou quando ocorre fissuração no concreto, pode ocorrer uma interação parcial (Figura 2.8-c). A presença do conector nesta última situação ainda é relevante, porém, ocorre novamente o surgimento de duas linhas neutras e pode-se observar que ocorre um deslizamento entre as duas faces.

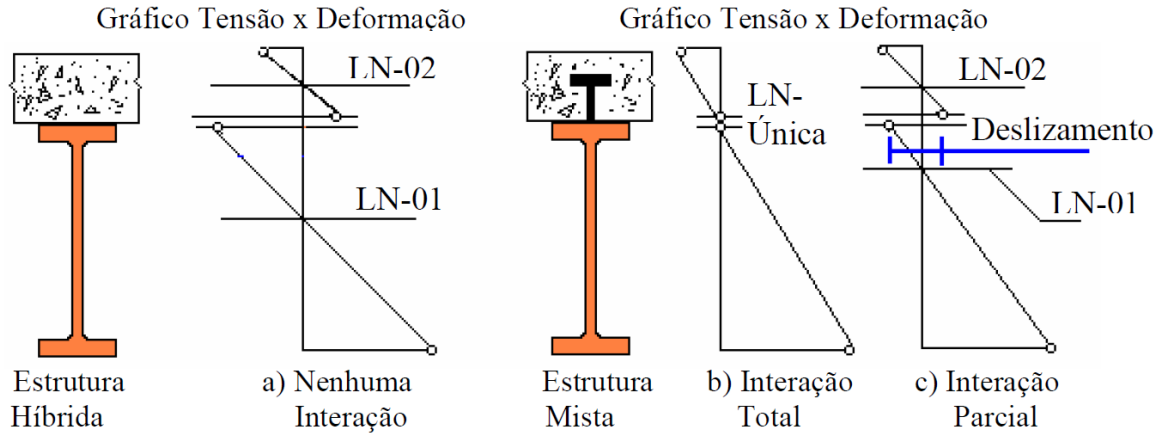


Figura 2.8 – Gráficos tensão deformação com e sem a presença de conectores de cisalhamento (Cavalcante, 2005).

O procedimento para se obter uma viga alveolar consiste em elaborar um corte longitudinal na alma da viga em ziguezague formando dois perfis ‘T’ soltos. Após esse corte, os perfis ‘T’ são castelados – sobrepostos – e soldados (como visto na Figura 2.4). Dessa forma, se obtém uma estrutura com um padrão de furos de geometria específica, esse procedimento é discutido de forma mais aprofundada no item 2.2.1.

A protensão em vigas metálicas surge como solução para utilização de grandes vãos e para readequação de estruturas já existentes, ou seja, utiliza-se a protensão como reforço de estruturas metálicas já executadas. A protensão é uma técnica construtiva muito utilizada em grandes coberturas, pontes, passarelas e é comumente utilizada em estruturas de concreto e em elementos de concreto pré-fabricados (NELSEN, 2012). A utilização dessa técnica construtiva em vigas metálicas mistas proporciona uma grande vantagem econômica e por esse motivo deve ser estudada e aplicada.

2.2.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

As vigas alveolares devem ter uma metodologia de construção que possibilite que esta seja construída a partir de um perfil metálico existente. As geometrias que serão propostas neste trabalho serão compostas de alvéolos circulares, retangulares e octogonais. Nos itens 2.2.1.1 ao 2.2.1.3, tem-se o desenvolvimento para os processos construtivos de vigas alveolares com a geometria desejada.

Vale apontar que no Anexo I da norma da NBR 8800:2008 tem orientações específicas para aberturas em vigas metálicas. Nesse, é informado que não é necessário realizar verificações específicas para executar aberturas circulares em vigas localizados no terço médio da altura da viga (entre outras condições). Todavia, as geometrias consideradas neste projeto não condizem com as orientações normativas do Anexo I desde o princípio, por exemplo, os alvéolos aqui propostos podem ser maiores que um terço da altura do perfil metálico. Logo, devem ser adotados parâmetros geométricos limitadores para as análises consideradas neste projeto em função de cada geometria adotada.

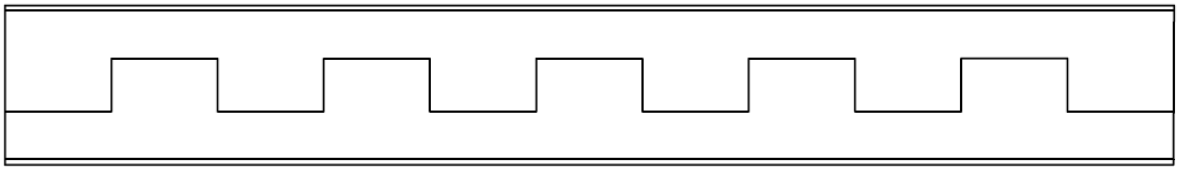
As VAMP possuem como características geométricas principais a largura efetiva e altura da laje de concreto que trabalha e conjunto com o perfil metálico, que, por sua vez, apresenta uma zona de alma cheia e uma zona alveolar. A zona de alma cheia se estende nas regiões de maiores solicitações de esforço cortante, esta deve ser determinada considerando os diagramas desse esforço. As informações referentes ao perfil (como por exemplo, o momento de inércia, área) devem ser determinadas após sua expansão pelo processo de fabricação de vigas alveolares.

Outra característica geométrica que influencia diretamente no comportamento desse elemento estrutural é o traçado dos cabos de protensão de que pode ser reto centrado, reto com excentricidade ou pode ser um traçado poligonal.

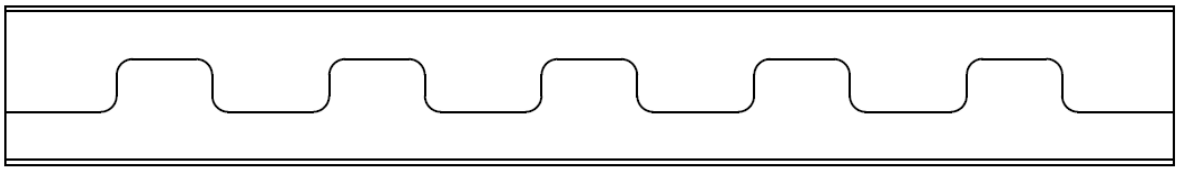
2.2.1.1 ALVÉOLO RETANGULAR

Vigas com alvéolo retangular podem ser construídas com um corte em ziguezague. Porém, o corte feito como mostrado na Figura 2.9-a apresenta ângulos retos onde pode ocorrer problemas de fadiga nos vértices dos alvéolos retangulares. Concentrações de tensões que surgem nesses pontos devem ser evitadas. Para se contornar esse problema, propõe-se realizar o corte com transições suaves com um determinado raio. O detalhe da Figura 2.9-b, mostra como esse corte deve ser realizado.

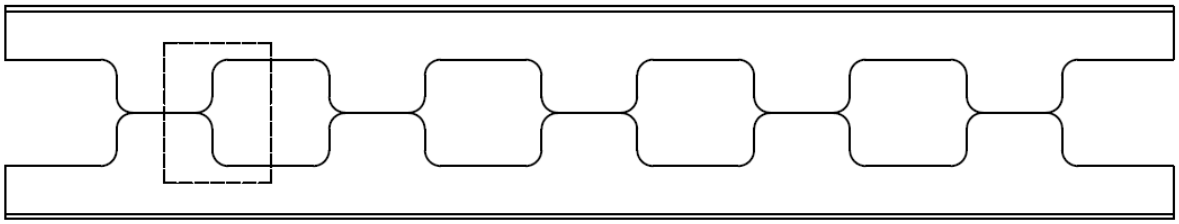
A Figura 2.9-c mostra a configuração da viga já castelada. Porém, observa-se o surgimento de outro problema, a região em destaque mostra outro local de possíveis concentrações de tensões que deve ser corrigido. Esse canto deve ser regularizado para que a face do retângulo seja reta. Para tanto, pode-se adotar diversas metodologias, aqui propõe-se que se faça um preenchimento da região hachurada da Figura 2.9-d com solda regularizando a face do alvéolo. Assim, pode-se obter um alvéolo com as dimensões desejadas e com as arestas devidamente tratadas para se evitar problemas com fadiga nessas regiões.



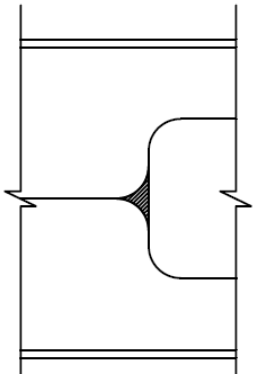
a) Corte no perfil com ângulos retos



b) Corte no perfil com ângulos retos suavizados



c) Viga após montagem



d) Detalhe do alvéolo

Figura 2.9 – Corte para montagem de viga com alvéolos retangulares.

A determinação das características geométricas de expansão do perfil é feita utilizando as variáveis apresentadas na Figura 2.10.

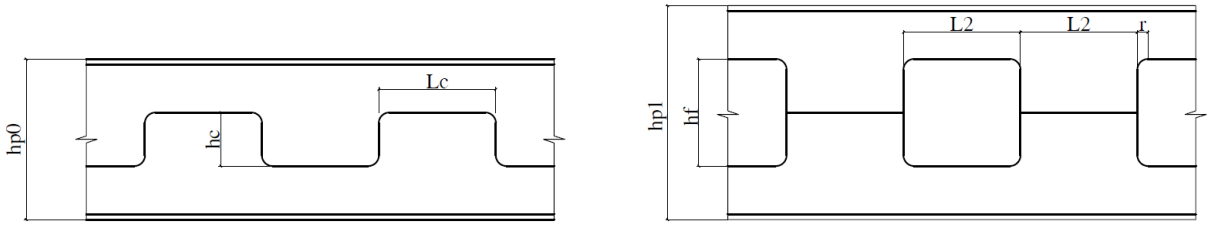


Figura 2.10 – Alvéolo retangular, características geométricas.

- Altura do alvéolo (h_f):

Como adotado por Cavalcante (2005), a altura do alvéolo (h_f) vai ser delimitada para que esta seja no máximo igual a metade da altura do perfil castelado (h_{p1}). Fazendo assim que a razão $n=h_f/ h_{p1}\leq 0{,}5$. Cavalcante toma esse limite por recomendação do Anexo L da norma NBR8800:2003.

Tomando essa limitação, é possível determinar h_{p1} em função da altura do perfil original (h_{p0}) e da razão n:

$$h_f = 2 \cdot h_c \tag{2.5}$$

$$h_f = n \cdot h_{p1} \tag{2.6}$$

$$n \leq 0{,}5 \tag{2.7}$$

$$h_{p1} = h_{p0} + h_c = h_{p0} + \frac{h_f}{2} = h_{p0} + \frac{n \cdot h_{p1}}{2} \tag{2.8}$$

$$\Rightarrow h_{p1} = \left(\frac{2}{2-n}\right) \cdot h_{p0} \tag{2.9}$$

De forma análoga, partindo das equações que deram origem a equação (2.9), pode-se tomar a altura do corte em função do coeficiente de expansão n:

$$h_{p1} = h_{p0} + h_c \Rightarrow \frac{h_f}{n} = h_{p0} + h_c \tag{2.10}$$

$$\Rightarrow \frac{2h_c}{n} = h_{p0} + h_c \tag{2.11}$$

$$\Rightarrow h_c = \left(\frac{n}{2-n}\right) \cdot h_{p0} \tag{2.12}$$

- Comprimento do alvéolo (L_2)

O comprimento do alvéolo L_2 é igual a distância entre alvéolos. A versão atual da norma NBR 8800:2008 em seu anexo I não prevê limitações para a distância entre aberturas retangulares consecutivas. Recorrendo ao projeto desta norma brasileira de 2003 (NBR8800:2003) é possível utilizar os limites mínimos para os espaçamentos presentes em seu anexo L. Este aponta que o espaçamento entre alvéolos L_2, para aberturas retangulares deve atender o limite da equação (2.13).

$$L_2 \geq h_f \tag{2.13}$$

2.2.1.2 ALVÉOLO CIRCULAR

As vigas que possuem alvéolos circulares têm um corte mais detalhado. Sua construção se torna viável por conta do avanço das tecnologias de corte e solda.

A geometria circular apresenta características muito particulares. Nota-se que o espaçamento entre alvéolos (L_2) está em função do diâmetro do alvéolo circular (D_f), por exemplo. Também se observa que L_2 é geometricamente igual ao comprimento de uma corda dentro do círculo de diâmetro D_f – conforme apresenta-se na Figura 2.11.

L_2 pode ser escolhido em etapa de projeto. Porém, o tamanho de L_2 determina o ganho de altura que se tem ao castelar a viga.

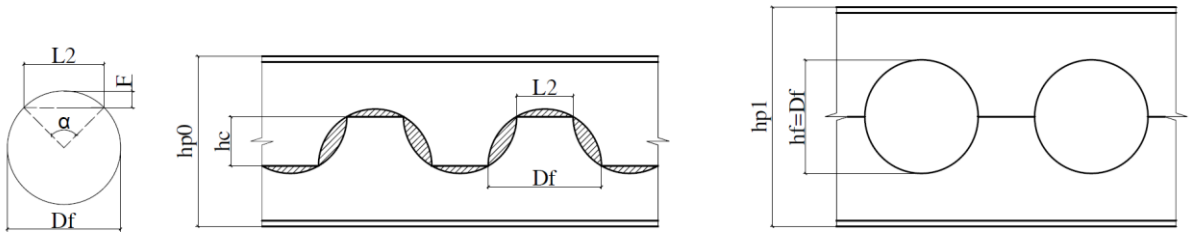


Figura 2.11 – Alvéolo circular, características geométricas.

Da geometria tem-se que:

$$F = \frac{D_f}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_f}{2}\right)^2 - \left(\frac{L_2}{2}\right)^2} \tag{2.14}$$

$$h_c = \frac{D_f}{2} - F \tag{2.15}$$

$$\Rightarrow h_c = \frac{D_f}{2} - \left(\frac{D_f}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_f}{2}\right)^2 - \left(\frac{L_2}{2}\right)^2}\right) \tag{2.16}$$

$$\Rightarrow h_c = \sqrt{\left(\frac{D_f}{2}\right)^2 - \left(\frac{L_2}{2}\right)^2} \tag{2.17}$$

Assim, como L_2 está limitado a D_f. Pode-se definir um parâmetro $k=L_2/D_f$ que servirá como parâmetro de projeto, substituindo k na equação (2.17):

$$\Rightarrow h_c = \sqrt{\left(\frac{D_f}{2}\right)^2 - \left(\frac{kD_f}{2}\right)^2} \tag{2.18}$$

$$\Rightarrow h_c = \sqrt{\left(\frac{D_f}{2}\right)^2 \cdot (1 - k^2)} \tag{2.19}$$

$$\Rightarrow h_c = \frac{D_f}{2} \cdot \sqrt{(1 - k^2)} \tag{2.20}$$

$$onde\ 0{,}4 \leq k \leq 0{,}75$$

Analogamente ao desenvolvimento realizado para a geometria retangular, pode-se definir h_{p1} e h_c em função da altura do perfil de origem h_{p0}:

Tomando:

$$\rho = \sqrt{(1 - k^2)} \tag{2.21}$$

$$h_{p1} = h_{p0} + h_c = h_{p0} + \frac{D_f}{2}\rho = h_{p0} + \frac{n \cdot h_{p1}}{2}\rho \tag{2.22}$$

$$\Rightarrow h_{p1} = \left(\frac{2}{2 - n \cdot \rho}\right) \cdot h_{p0} \tag{2.23}$$

Seguindo o mesmo raciocínio, tem-se que:

$$\Rightarrow h_c = \left(\frac{n}{2\rho - n}\right) \cdot h_{p0} \tag{2.24}$$

2.2.1.3 ALVÉOLO OCTOGONAL

Dentre as geometrias dos alvéolos mais aplicadas, as geometrias hexagonais se destacam. Padrões diferentes podem ser encontrados facilmente na literatura, exemplos destes são os padrões Litzka, Peiner e o Anglo-Saxão. A geometria octogonal consiste em adicionar a geometria hexagonal chapas espaçadoras que garantem uma maior altura a viga, aumentando ainda mais sua rigidez. Essa chapa espaçadora deve ser de mesmo aço utilizado no perfil metálico e deve ser soldada a ambos os perfis "T" que surgem do corte longitudinal da viga. Outra particularidade dessa viga é que esta apresenta dois fios de solda em cada seção entre

alvéolos. O projetista tem a liberdade de adotar a altura da chapa espaçadora, implicando em uma grande versatilidade na implementação dessas vigas. Um exemplo de configuração de uma dessas vigas é mostrado a seguir na Figura 2.12.

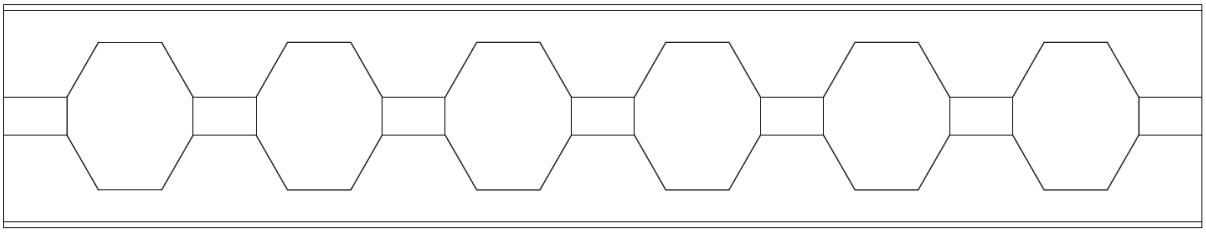


Figura 2.12 – Viga com alvéolo octogonal.

Em relação as propriedades geométricas desse alvéolo, tem-se que o ganho de altura é aumentado consideravelmente por conta das chapas espaçadoras. A geometria pode assumir uma lista extensa de combinações. Assim, para se ter um critério, define-se que a base do triângulo (L_3) seja sempre igual a metade do comprimento da face do alvéolo (L_1), conforme mostrado na Figura 2.13. Isso é uma definição feita apenas com o intuito de se elaborar as análises propostas.

Das características geométricas, pode-se tirar as seguintes relações entre as componentes dessa tipologia:

$$h_{p1} = \left(\frac{2}{2-n}\right) \cdot \left(h_{p0}\right) + h_{ch} \tag{2.25}$$

$$h_c = \left(\frac{n}{2-n}\right) \cdot \left(h_{p0}\right) \tag{2.26}$$

Onde h_{ch} é a altura da chapa espaçadora. Por fim, limita-se o tamanho da chapa espaçadora para que esta seja igual a L_1. Conforme mostrado na Figura 2.13, quando se garante que L_3 é metade de L_1, tem-se um ângulo de 60° entre a face inclinada do alvéolo e a horizontal, formando, sem a chapa espaçadora, um hexágono regular. Assim, fazendo h_{ch} ser igual a L_1, a geometria toma a forma de um octógono cujas faces tem mesmo comprimento.

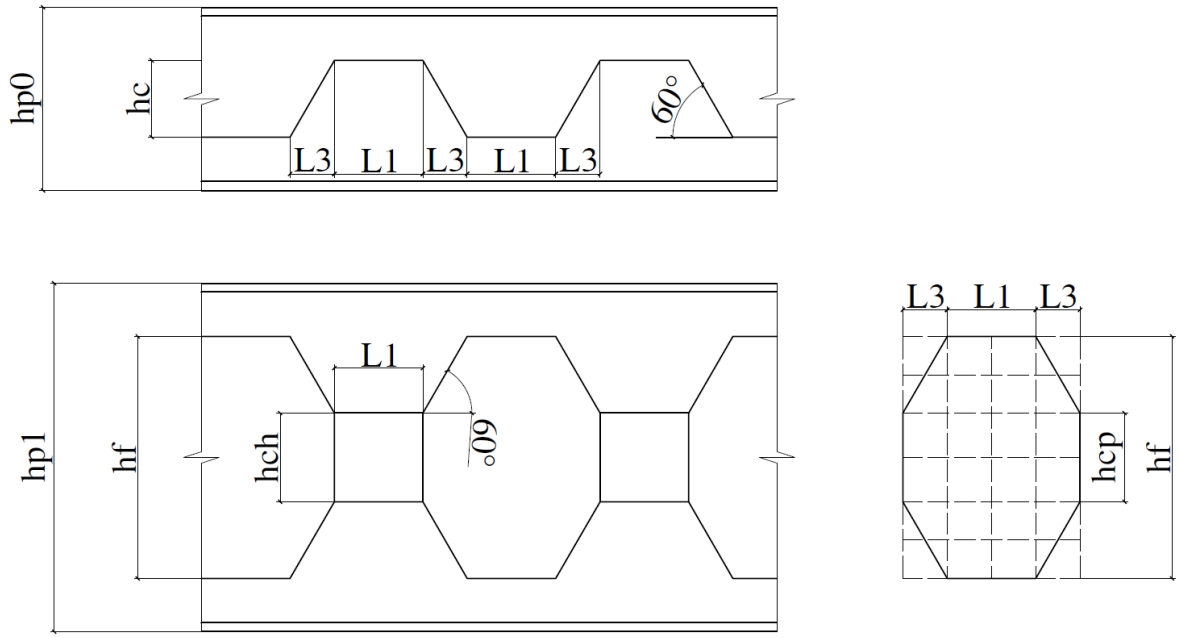


Figura 2.13 – Alvéolo Octogonal, características geométricas.

2.2.1.4 LARGURA EFETIVA DA LAJE DE CONCRETO

Para as análises de vigas alveolares mistas protendidas, a área efetiva de contribuição da laje de concreto deve ser determinada e homogeneizada usando a razão entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto (α_e). A área de concreto é determinada como sendo o produto entre a largura e a altura efetiva de concreto.

Para se determinar a resistência de uma viga mista, deve-se primeiro saber qual a área de contribuição da laje que, pelo Anexo O da norma NBR 8800:2008, deve atender aos seguintes critérios:

Em vigas biapoiadas, a largura efetiva da mesa contribuinte de concreto deve ser o menor dentre valores abaixo (item O.2.2.1):

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

Em vigas contínuas e semicontínuas, a determinação da largura efetiva deve ser feita conforme os postulados anteriores. Porém, troca-se o vão da viga pelas distâncias entre os pontos de momento nulo. No item O.2.2.2 da norma NBR 8800:2008, são dispostas maneiras simplificadas de se determinar essas distâncias. Essas distâncias estão ilustradas na Figura 2.14.

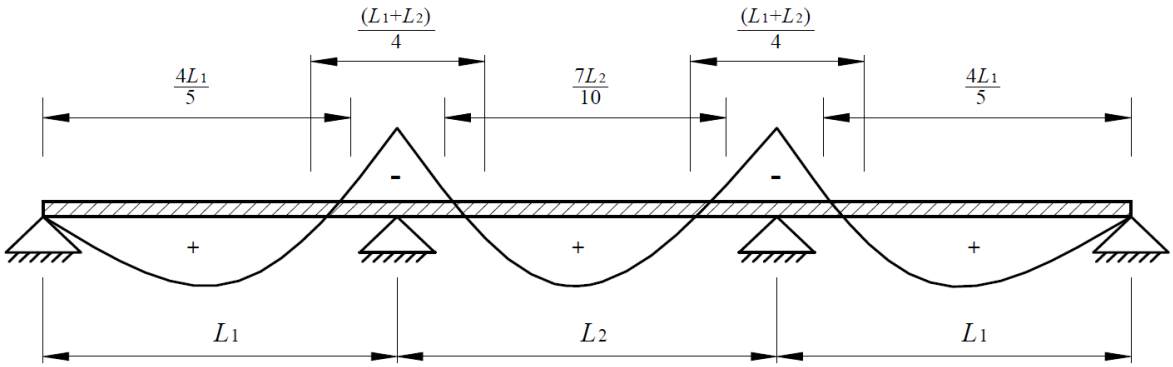


Figura 2.14 – Distâncias simplificadas entre os pontos de momento nulo em uma viga contínua ou semicontínuas (NBR 8800:2008)

A altura efetiva da laje é determinada desprezando qualquer parte da seção da laje que esteja tracionada, ou seja, quando a linha neutra da seção está situada dentro da laje de concreto e parte dela trabalha tracionada. Isso deve ser levado em consideração durante as análises em serviço e verificações em estado limite último.

2.3 PROTENSÃO

Ferreira (2007) aponta que a aplicação de protensão em vigas metálicas pode se mostrar como uma solução viável em casos de reforço em estruturas metálicas já existentes, para construção de estruturas de grandes vãos (e.g. pontes) ou ainda quando há limitação na altura da viga, impossibilitando o uso de uma viga metálica convencional.

As vantagens quanto ao ganho de resistência com aplicação de protensão são notórias. Porém, deve-se ressaltar que peças estruturais de aço que trabalham a compressão sofrem de problemas com instabilidades devido a flambagem – característica de suma importância para análise de vigas de aço protendidas. Essas instabilidades são conhecidas das aplicações de estruturas metálicas comprimidas (como flambagem local da alma, flange, flambagem global, etc.). Consequentemente, deve-se considerar os esforços de compressão aplicados na viga para análise da instabilidade da VAMP.

Como apontado por Ferreira (2007), apesar dos benefícios citados de redução da quantidade de metal utilizada, a tecnologia da protensão exige maiores cuidados na fabricação e execução da obra, fato que deve ser levado em consideração na elaboração dos projetos.

A protensão consiste em introduzir esforços internos que combatem os esforços oriundos de carregamentos externos. A estrutura é submetida a um estado de tensões que aumentam sua resistência ou melhora seu comportamento sob solicitações externas (Ferreira,

2007). Por um lado, em estruturas de concreto, a protensão pode ser utilizada para se eliminar (diminuir) os efeitos das tensões de tração que surgem no concreto, resultando em um elemento que não possui fissuração e pode trabalhar vencendo grandes vãos e solicitações de grande magnitude. Por outro lado, peças metálicas protendidas permitem o surgimento de esforços de tração em sua seção.

Como apontado por Ferreira (2007):

> Os exemplos de aplicação da protensão em outros tipos de materiais são raros. O aço, em especial, é um material que pode apresentar características bastante favoráveis quando protendido oferecendo desempenos satisfatórios principalmente pela sua capacidade de resistir bem à compressão e à tração. Nas estruturas metálicas protendidas não há a preocupação de manter toda a peça comprimida, como existe no concreto protendido, porque o aço se comporta de maneira muito eficiente quando submetido à tração.

Em vigas alveolares mistas protendidas, utiliza-se protensão externa que apresenta grandes facilidades construtivas e de manutenção por dar acesso aos cabos durante o processo construtivo e após o final das atividades de execução. No entanto, os cabos ficam expostos a ação do clima podendo sofrer uma deterioração mais rápida. A força de protensão é transmitida a viga através dos desviadores aplicados a lateral de sua alma. Isso provoca menores perdas por atrito – que ocorrem somente nos pontos que estão em contato com os desviadores – e evita-se a ocorrência de ondulações parasitas (Ferreira, 2007).

Para dimensionamento e verificação de VAMP devem ser considerados pelo menos dois estágios de funcionamento da peça estrutural. A primeira situação de carregamento da viga é dada quando esta é protendida. Neste estágio, o perfil metálico é protendido sozinho, dessa forma, as tensões no perfil devem ser limitadas a tensão de escoamento do perfil. A configuração da viga ainda não é mista e as análises devem ser feitas como apresentadas por Nunziata (1999) – para um perfil metálico isolado. A segunda situação de carregamento a ser verificada é a situação do perfil em serviço. Nesta devem ser considerados a seção mista da VAMP e os efeitos a longo prazo que acometem a laje de concreto.

Uma observação que deve ser feita é que, para se construir uma VAMP, deve-se analisar as situações onde estrutura é pré-tracionada ou pós-tracionada. Na primeira situação, a protensão é aplicada antes da concretagem da laje, dessa forma os esforços de protensão são introduzidos somente no perfil metálico. Na segunda, a laje de concreto já trabalha com o perfil

metálico, ou seja, como viga mista. Dessa forma, os esforços de protensão são introduzidos e resistidos por ambos materiais. Neste estudo, só serão considerados situações de pré-tração.

2.3.1 TRAÇADO DOS CABOS

O traçado dos cabos para protensão externa pode assumir diversos formatos, (e.g. poligonal ou reto). Este é definido em função das solicitações atuantes sobre a viga e deve ser determinado para contrabalanceá-los. Procura-se posicionar o cabo tentando acompanhar o desenho do diagrama de momentos fletores que atua na viga para provocar um diagrama de momentos oposto ao solicitante (Ferreira, 2007).

Em vigas biapoiadas, a utilização do traçado reto do cabo provoca tensões indesejadas próximos apoios, o que pode ser evitado ancorando os cabos antes das extremidades da viga, como observado na Figura 2.15-b.

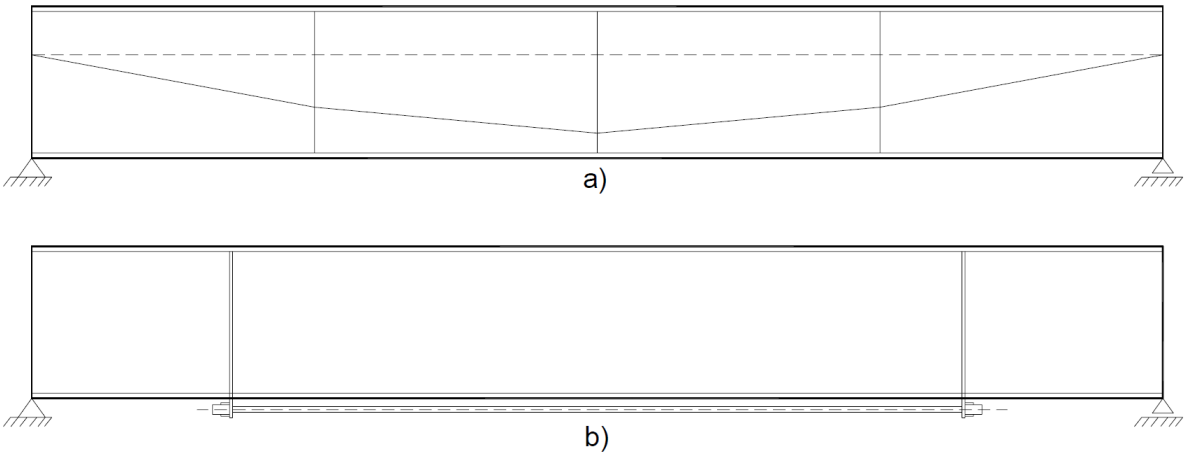


Figura 2.15 – Exemplos de traçado. (a) traçado poligonal; (b) traçado reto (modificado – Ferreira, 2007)

Cabos retilíneos podem ser utilizados com e sem excentricidade. Sendo que a utilização de excentricidade torna a protensão mais efetiva, por possibilitar forças de protensão menores. A presença de excentricidade também faz com que, durante a protensão, deformações na peça e uma contra flecha ocorram. Isso será mais discutido na seção 3.8. Observa-se que cabos retos sem excentricidade não provocam deformações (flechas).

2.3.2 FORÇAS DE PROTENSÃO

A força máxima de protensão que pode ser aplicada a um elemento depende de fatores ligados às resistências dos materiais que compõem a peça a ser protendida e dos materiais do

cabo de protensão. Ela é determinada como sendo aquela que, ao ser aplicada no elemento estrutural, não provoca o rompimento da peça.

Para cabos com traçados retos-excêntricos e parabólicos, para se determinar a força de protensão aplicada sobre a VAMP, é necessário pré-estabelecer a excentricidade de aplicação da força.

A determinação da força de protensão é feita em função dos carregamentos aplicados sobre a viga no ato da protensão e da geometria da seção em análise. Em vigas alveolares mistas protendidas, as regiões mais solicitadas de alma cheia e as seções dos alvéolos mais solicitados devem ser analisadas e a força de protensão a ser adotada deve ser a menor proveniente das análises.

Após a determinação da força de protensão, o dimensionamento dos cabos de protensão é realizado considerando os limites apresentados no item 9.6.1.2.1-b da NBR 6118:2014, como visto no item 2.1.4.1. Com o limite de tensão que pode ser aplicado sobre as cordoalhas e a força de protensão, pode-se dimensionar os cabos de protensão.

Outro ponto que deve ser levado em consideração é que, ao se aplicar os carregamentos externos após a protensão, deformações ocorrerão na peça e isso provocará um aumento da força de protensão devido alongamento do cabo.

Ferreira (2007) afirma que os cabos de protensão acompanham a deformação vertical da viga caso tenha um número suficiente de desviadores aplicados para determinar o traçado. Com isso, o acréscimo de tensões (também chamado de sobretensão) é obtido utilizando a equação (2.27). Esse valor deve ser somado às tensões provocadas pela força de protensão para dimensionamento dos cabos de protensão.

$$\Delta\sigma_p = \frac{\Delta L_p}{L_p} \cdot E_p \tag{2.27}$$

Onde:

Ep – Módulo de elasticidade do cabo de protensão;

Lp – Comprimento do cabo de protensão;

ΔLp – Variação do comprimento do cabo devido os deslocamentos;

$\Delta\sigma_p$ – Sobretensão.

Observa-se que o processo de obtenção da sobretensão é interativo. Primeiramente parte-se de uma força de protensão calculada, calcula-se os deslocamentos que são provocados pela aplicação das solicitações externas, em seguida, a sobretensão é calculada e se determina uma nova força de protensão. Com esse novo valor, calcula-se novamente as deflexões e

verifica se estas são iguais, caso isso não ocorra, este processo deve ser repetido até que os resultados convirjam.

2.3.3 PERDAS DE PROTENSÃO

A força de protensão aplicada sobre o cabo não é a força transmitida para o elemento estrutural protendido. Ocorrem perdas dessa força de protensão que devem ser levadas em consideração na hora de se especificar o cabo de protensão e as forças de protensão durante a etapa de projeto. Essas perdas podem acontecer de forma imediata (e.g. na ancoragem, por atrito nos desviadores) ou deferidas no tempo (relaxamento dos cabos).

2.3.4 PERDAS IMEDIATAS

As perdas imediatas são, usualmente, as perdas que ocorrem no macaco, por atrito dos cabos nos desviadores, por protensão sucessiva, por ancoragem, entre outras que possam acontecer.

As perdas no macaco variam entre 3% e 8%, sendo tomado usualmente o valor médio de 5% (Pfeil, 1991). O valor de perdas de protensão podem ser fornecidos pelos fabricantes dos macacos hidráulicos que serão utilizados para a execução da protensão.

As perdas por atrito em vigas metálicas ocorrem nos desviadores. Segundo Ferreira (2007), estas perdas são provocadas pela variação (desvio) do ângulo do cabo. A equação (2.28) fornece a força de protensão em um ponto x, medido a partir da ancoragem.

$$P(x) = P_0 e^{-(f \cdot \sum \alpha_n)} \tag{2.28}$$

Onde:

P_0 – força de protensão no ponto de ancoragem do cabo;

f – coeficiente de atrito angular entre o cabo e os desviadores, (em rad^{-1});

$\sum \alpha_n$ – somatório dos ângulos, em radianos, de desvio entre o ponto de ancoragem e a distância ‘x’.

As perdas por protensão sucessiva ocorrem em vigas metálicas de forma análoga a que ocorre em vigas de concreto protendido. Dessa forma, pode-se utilizar a equação presente no item 9.6.3.3.2.1 da NBR 6118:2014.

$$\Delta\sigma_{pn} = \alpha_p(\sigma_{cp} + \sigma_{cg}) \cdot \frac{n-1}{2n} \tag{2.29}$$

Onde:

$\Delta\sigma_{pn}$ – perda de protensão após n grupo de cabos;

σ_{cp} – tensão na viga para a força de protensão de n cabos protendidos;

σ_{cg} – tensão atuante sobre a viga provocada pelo carregamento no ato de protensão;

α_p – relação entre os módulos de elasticidade dos materiais envolvidos, no caso de vigas metálicas adota-se como igual a 1 (Ferreira, 2007).

2.3.5 PERDAS AO LONGO DO TEMPO

As perdas de protensão deferidas no tempo ocorrem principalmente pela relaxação do cabo de protensão. Estas podem ser calculadas como apresentado nas equações (2.30) e (2.31).

$$\psi(t, t_0) = \frac{\Delta\sigma_{pr}(t, t_0)}{\sigma_{pi}} \tag{2.30}$$

Onde:

$\Delta\sigma_{pr}$ – perda de tensão por relaxação do cabo do tempo t_0 até o instante t de cálculo;

Ψ (t, t_0) – coeficiente de perda de tensão por relaxação.

A equação (2.31) pode ser utilizada para calcular o coeficiente $\psi(t,t_0)$ em função do coeficiente ψ_{1000} no tempo t considerando. Ψ_{1000} é o coeficiente de relaxação do aço após 1000 horas a 20°C para tensões iniciais de $0{,}5f_{ptk}$ a $0{,}8f_{ptk}$ e seus valores podem ser obtidos da Tabela 2.4.

$$\Psi(t, t_0) = \Psi_{1000}\left(\frac{t - t_0}{41{,}67}\right)^{0{,}15} \tag{2.31}$$

Tabela 2.4 – Valores de Ψ_{1000}, em porcentagem (NBR 6118:2014)

σ_{pi}	**Cordoalhas**		**Fios**		**Barras**
	RN	RB	RN	RB	
$0{,}5f_{ptk}$	0	0	0	0	0
$0{,}6\ f_{ptk}$	3,5	1,3	2,5	1,0	1,5
$0{,}7\ f_{ptk}$	7,0	2,5	5,0	2,0	4,0
$0{,}8\ f_{ptk}$	12,0	3,5	8,5	3,0	7,0
Onde RN é relaxação normal RB é relaxação baixa – como visto no item 2.1.4					

A norma ainda aponta que para tempo infinito, o valor de $\Psi\ (t,\ t_0)$ pode ser adotado como sendo 2,5 vezes o valor de Ψ_{1000}.

Por questões de simplificação, as perdas por retração e fluência do concreto não foram consideradas nas análises presentes nesse estudo.

2.4 ANÁLISE ELÁSTICA DA SEÇÃO

A determinação do momento fletor resistente de uma viga alveolar mista depende de como seus elementos atuam no equilíbrio da seção. Analisando a região do alvéolo, se faz necessário responder a algumas questões: qual a contribuição do perfil "T" superior e qual a espessura da laje de concreto que deve ser considerada para o equilíbrio da seção após homogeneização desta.

Uma primeira hipótese pode ser formulada seguindo as orientações da NBR 8800:2008. Nesta é orientado que se deve considerar que a viga trabalha como uma treliça, onde o perfil "T" inferior trabalha apenas a tração, a laje de concreto armado trabalha como o banzo superior comprimido e desconsideram-se as contribuições do perfil "T" superior. Assim, a análise é conservadora e a favor da segurança. Uma segunda hipótese de análise leva em consideração a contribuição do perfil "T" superior.

Quanto as considerações em relação a espessura da laje de concreto, essa deve ser definida para que a área efetiva de concreto ($A_{ec}=L_{ef}.e_{ec}$) seja determinada e, após convertida em aço ($A_{ch}=A_{ec}.\alpha_e$), isto é: homogeneizar a seção (Cavalcante, 2005). Assim, duas situações podem ser definidas: a primeira onde a seção homogeneizada é um retângulo de altura (e_c) igual à da laje de concreto, fazendo sua largura (b_1) ser calculada como $b_1=A_{ch}/e_c$; e a segunda

situação considera apenas a espessura efetiva do concreto (e_{ec}), desprezando a área tracionada da laje, fazendo a largura (b_1) ser maior e calculada como $b_1=A_{ch}/e_{ec}$. A Figura 2.16 mostra essas situações.

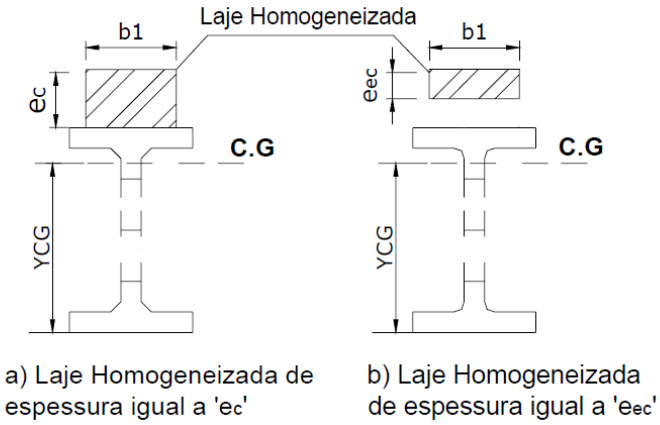


Figura 2.16 – Representação esquemática da geometria da laje homogeneizada (Cavalcante, 2005)

Cavalcante (2005) propõe seis casos de análises distintos onde as hipóteses anteriormente explanadas foram testadas, abaixo segue uma lista com as considerações que levaram a determinação dos casos:

- Contribuição dos perfis "T" para a determinação da linha neutra (LN) e a espessura equivalente da laje de concreto, ou seja, se ambos são necessários para fazer essas determinações;
- Influência dos perfis "T" para a determinação do momento de inércia da seção que é necessário para cálculo das tensões normais oriundas da solicitação do momento fletor;
- Por fim, qual o modelo de espessura da laje homogeneizada que foi considerado.

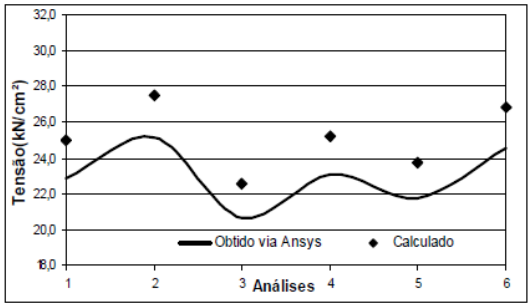
A Tabela 2.5 sintetiza essas considerações e sumariza todos os casos analisados por Cavalcante (2005). Os resultados obtidos em cada um desses casos foram comparados aos resultados de uma análise numérica realizada utilizando o método dos elementos finitos.

Tabela 2.5 – Casos propostos para verificação do funcionamento da viga mista alveolar.

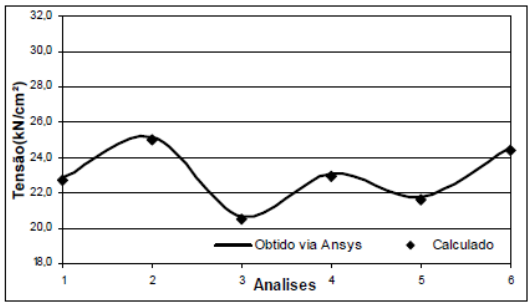
Casos	Área do perfil para determinar "LN" e "e_{ec}".	Modelo de espessura da laje homogeneizada	Seção do aço adotada no cálculo de "I_x"
01	2 perfis "T"	Espessura = e_c	2 perfis "T"
02		Espessura = e_{ec}	
03	Perfil "T" inferior	Espessura = e_c	Perfil "T" inferior
04		Espessura = e_{ec}	
05	Perfil "T" inferior	Espessura = e_c	2 perfis "T"
06		Espessura = e_{ec}	

Os resultados obtidos estão sintetizados nos gráficos da Figura 2.17. Pode-se observar na Figura 2.17-b que os resultados do caso-02 são os que mais se aproximaram do modelo numérico. Assim, considerar a contribuição do perfil "T" superior para determinação da LN da seção e para determinar o momento de inércia da seção é de suma relevância, o que se torna imprescindível para a análise proposta neste trabalho. Observa-se notoriamente que os casos que mais diferem da análise numérica são aqueles que utilizam a espessura da laje homogeneizada como a altura total da laje (e_c).

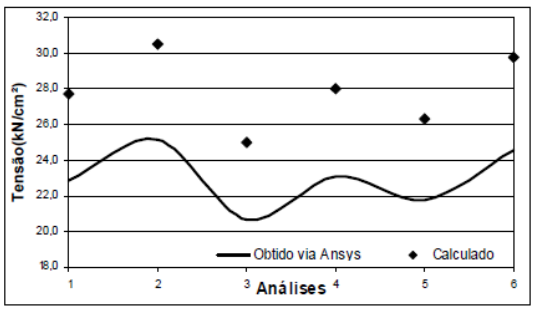
Observa-se que é necessário considerar na determinação da posição da linha neutra e dos outros fatores anteriormente citados a espessura da laje homogeneizada como sendo a espessura comprimida da laje de concreto – ou seja, e_{ec} – e deve-se considerar a contribuição do perfil "T" superior.



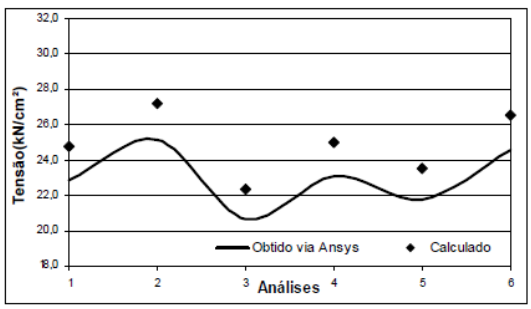
a) Dados obtidos para a Caso-01.



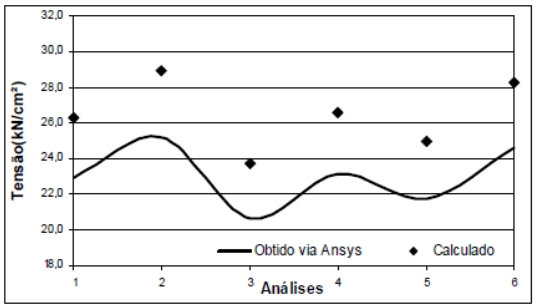
b) Dados obtidos para a Caso-02



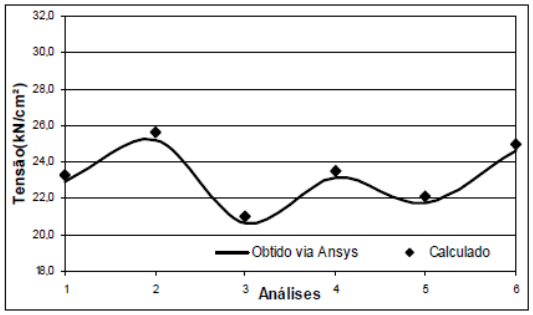
c) Dados obtidos para a Caso-03



d) Dados obtidos para a Caso-04



e) Dados obtidos para a Caso-05



f) Dados obtidos para a Caso-06

Figura 2.17 – Resultado dos dados de verificação do funcionamento da estrutura (Cavalcante, 2005).

Esses resultados serão utilizados no escopo da análise deste projeto. Porém, vale ressaltar que estes foram obtidos considerando geometrias diferentes das que estarão em análise nesse projeto. Cavalcante (2005) desenvolveu essas análises para vigas alveolares de geometria hexagonal, todavia, como a geometria dos álveos não interfere diretamente nas hipóteses propostas, é razoável propor a consideração destes resultados nas análises deste documento.

3. DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE

O dimensionamento de elementos protendidos deve ser realizado em regime elástico utilizando uma metodologia onde as tensões atuantes em pontos críticos de seções especificadas em análise são limitadas considerando as resistências dos materiais.

Primeiramente, determina-se a posição da linha neutra. Em seguida, por ser um elemento composto de dois materiais distintos, o aço e o concreto, a seção transversal da VAMP deve ser homogeneizada para se realizar a análise elástica para seu dimensionamento. As características geométricas da seção homogeneizada devem ser determinadas.

Devem ser controladas as tensões que surgem na peça durante o ato de protensão e em situações de carregamentos posteriores que possam surgir durante a vida útil da peça. Pelo menos duas situações devem ser consideradas: analisa-se as tensões durante o ato de protensão e durante o carregamento total que a peça poderá sofrer em serviço.

Na análise durante o ato de protensão, o perfil metálico trabalha sozinho – caso de pré-tração. Isso implica que as tensões que surgem devido a protensão são introduzidas somente no perfil metálico. Na análise da peça em serviço, se torna necessário conhecer a posição da linha neutra da seção pois é necessário ignorar a parte tracionada da laje para determinação das características geométricas da seção homogeneizada.

Durante a protensão do perfil metálico, obtém-se uma força de protensão preliminar fazendo a análise das tensões nas seções analisadas. Desta forma, é possível determina a força de protensão máxima que se pode aplicar na peça para que esta não rompa durante os procedimentos de protensão. Por fim, faz-se a verificação em relação as tensões na seção em situação de serviço, ou seja, com todas as cargas e solicitações atuando sobre o elemento estrutural e considerando o elemento como misto. Essas verificações devem ser realizadas pelo menos para a seção de alma cheia mais solicitada da viga alveolar e para a seção do alvéolo mais solicitado, sempre preservando as tensões nos pontos críticos abaixo das tensões limites.

3.1 DETERMINAÇÃO DA LINHA NEUTRA

A posição da linha neutra é determinada fazendo o equilíbrio de forças horizontais na seção em análise. Observando a Figura 3.1, vê-se que a tensão de compressão na laje de concreto é proporcional a posição da linha neutra (y_{Ln}), enquanto a força de tração é proporcional ao restante da altura da viga mista. Abaixo é mostrado o desenvolvimento de obtenção da posição da linha neutra.

$$\sigma_t = cte \cdot y_{Ln} \tag{3.1}$$

$$\sigma_c = cte \cdot (H - y_{Ln}) \tag{3.2}$$

$$\Rightarrow \left(L_{ef} \cdot y_{Ln}\right) \cdot \sigma_c \cdot cte = (b_f \cdot t_f) \cdot \sigma_t \cdot cte \tag{3.3}$$

$$\Rightarrow \left(L_{ef} \cdot y_{Ln}\right) \frac{y_{Ln}}{2} = (b_f \cdot t_f) \cdot (H - y_{Ln}) \tag{3.4}$$

$$\Rightarrow \frac{y_{Ln}^2}{2}\left(\frac{L_{ef}}{b_f t_f}\right) + y_{Ln} - H = 0 \tag{3.5}$$

Onde:

H – Altura total da viga de aço, $h_{p1}+h_{lc}$;

b_f – Largura do flange da viga;

cte – Constante de proporcionalidade;

t_f – Espessura do flange da viga;

y_{Ln} – Posição da linha neutra;

σ_c – Tensão de compressão no concreto;

σ_t – Tensão de tração no aço.

Resolvendo a equação (3.5), se obtém a expressão da equação (3.6) para a posição da linha neutra. As análises aqui apresentadas são formuladas para os casos em que a linha neutra sempre cai dentro da laje de concreto.

$$y_{Ln} = \frac{-b_f \cdot t_f + \sqrt{b_f \cdot t_f (b_f \cdot t_f + 2 \cdot H \cdot L_{ef})}}{L_{ef}} \tag{3.6}$$

Com essa posição da linha neutra, a seção deve ser homogeneizada.

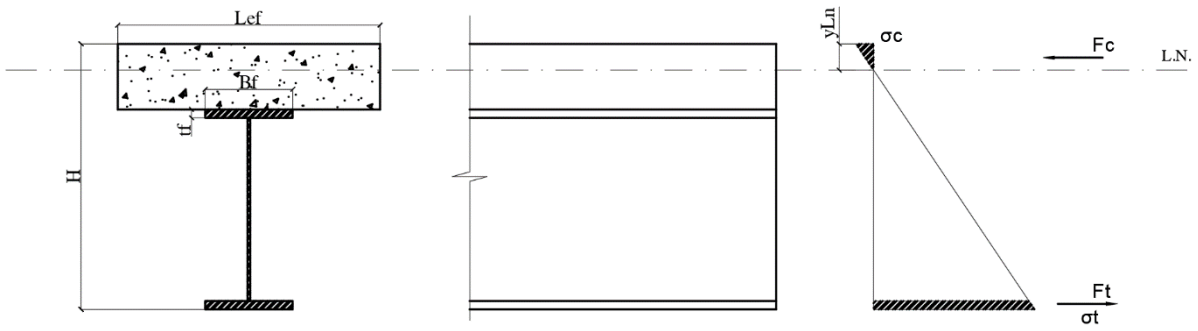


Figura 3.1 – Determinação da linha neutra

3.2 HOMOGENEIZAÇÃO DA SEÇÃO

A seção transversal da VAMP é composta de dois materiais com respostas elásticas distintas. Para se realizar a análise, é necessário fazer a homogeneização da seção que é realizada utilizando a razão entre os módulos de elasticidade do concreto e do aço. Deve-se usar o módulo secante do concreto (E_{cs}) que pode ser determinado utilizando a formulação presente no item 8.2.8 da NBR 6118:2014 apresentados nas equações (3.7) a (3.9), ou ainda pode-se utilizar os valores encontrados na Tabela 3.1.

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \tag{3.7}$$

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} \tag{3.8}$$

$$\alpha_i = 0{,}8 + 0{,}2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \leq 1{,}0 \tag{3.9}$$

Onde:

E_{ci} – módulo de elasticidade tangente inicial do concreto;

E_{cs} – módulo de elasticidade secante do concreto;

f_{ck} – resistência a compressão característica do concreto, em MPa;

α_E – parâmetro em função da natureza do agregado que influencia o módulo de elasticidade.

Tabela 3.1 – Valores estimados de módulo de elasticidade em função do f_{ck}. (Adaptada, NBR 6118:2014)

Classe de resistência	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60	C70	C80	C90
Eci (GPa)	25	28	31	33	35	38	40	42	43	45	47
Ecs (GPa)	21	24	27	29	32	34	37	40	42	45	47
α_i	0,85	0,86	0,88	0,89	0,90	0,91	0,93	0,95	0,98	1,00	1,00

O módulo de elasticidade do perfil metálico (E_{st}) tem valor de 200 GPa, Pfeil (2016).

Dessa forma, a razão modular é determinada pela equação (3.10).

$$\alpha_e = \frac{E_{st}}{E_{cs}} \tag{3.10}$$

O cálculo das tensões dependem do momento de inércia da seção que deve ser determinado considerando a posição da linha neutra e se desconsiderando a região tracionada

da laje. Esse pressuposto é baseado nos estudos realizados por Cavalcante (2005), onde, em uma análise de uma seção alveolar, ele determina que a formulação correta para obtenção das características geométricas, como o momento de inércia, depende dessa hipótese.

A Figura 3.2 mostra uma seção equivalente de concreto em aço após homogeneização

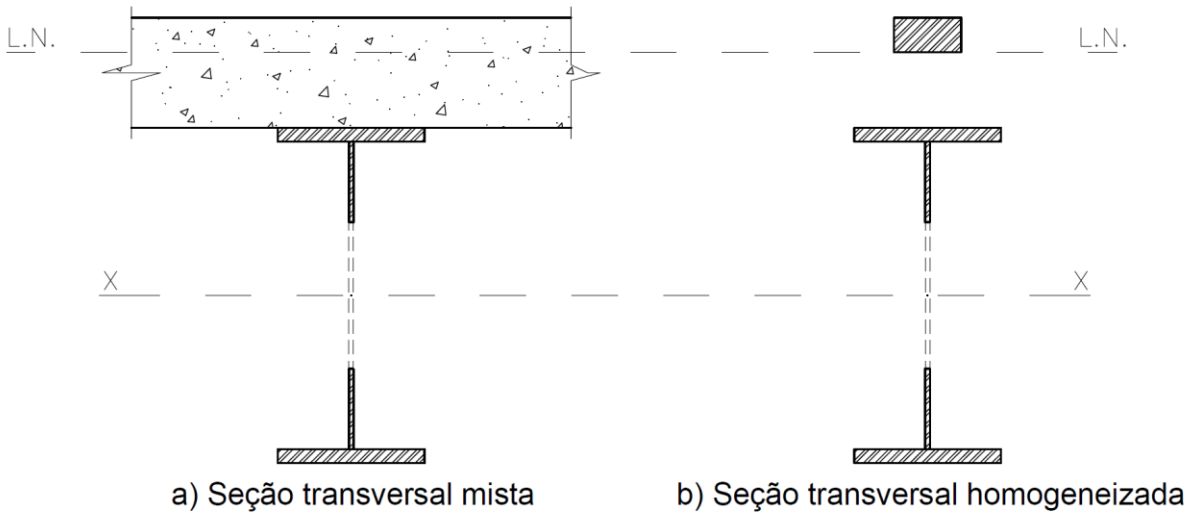


Figura 3.2 – Seção homogeneizada

Após a determinação da seção homogeneizada, determina-se suas características geométricas como: área, momento de inércia, centro de gravidade. A análise elástica é realizada com esses dados assumindo uma distribuição linear de tensões na seção conforme posto no item O.1.2.1 do Anexo O da norma NBR 8800:2008.

Este item normativo ainda afirma que as considerações em relação a efeitos de longa duração (fluência e retração do concreto) devem ser levados em consideração utilizando as prescrições normativas da NBR 6118:2014. Porém, estes efeitos podem ser considerados simplificadamente triplicando a razão modular α_e.

3.3 TENSÕES LIMITES

As tensões na seção transversal crítica em estudo devem ser limitadas para evitar o rompimento do elemento estrutural no ato da protensão e durante sua vida em serviço. Essas tensões devem ser determinadas e verificadas para seções com alma cheia e seções na região do alvéolo em vigas alveolares mistas protendidas.

Os limites a serem considerados devem ser tais que, no ato da protensão as tensões no topo e na fibra inferior do perfil metálico não ultrapassem a tensão de escoamento do aço (f_{yd}).

As tensões em situação de serviço devem ser calculadas considerando todas as solicitações que atuam sobre a viga durante sua vida útil e estas devem ser limitadas a resistência à compressão do concreto e do aço, assim como à resistência à tração do aço do perfil metálico.

A força máxima de protensão é determinada conhecendo os limites de resistência dos materiais e a excentricidade com a qual a força é aplicada. Conhecendo as propriedades dos elementos que compõem o cabo de protensão, determina-se a quantidade de cabos de protensão a serem adotados nas vigas. Mais questões sobre a força de protensão serão analisadas no item 3.4.

As tensões na seção são calculadas usando formulações em regime elástico para o perfil metálico no ato da protensão e para a seção mista homogeneizada quando se analisa a VAMP em serviço. Após a determinação dos momentos de inércia da seção, da posição da linha neutra e dos módulos elásticos da seção para os pontos críticos, pode-se determinar qual a tensão atuante em cada ponto de análise.

Nunziata (1999) formula as equações para obtenção das tensões normais a seção para um perfil metálico. A seguir, são apresentadas as formulações para obtenção dessas tensões em vigas alveolares mistas protendidas. As equações (3.11) e (3.12) são referentes as tensões que surgem no ato da protensão.

$$\sigma_{sp}^{0} = \frac{\gamma_p \beta P}{A_p} - \frac{\gamma_p \beta P e}{W_{sp}} + \frac{M_{min}}{W_{sp}} \leq -f_{yd} \tag{3.11}$$

$$\sigma_{ip}^{0} = \frac{\gamma_p \beta P}{A_p} + \frac{\gamma_p \beta P e}{W_{ip}} - \frac{M_{min}}{W_{ip}} \leq f_{yd} \tag{3.12}$$

$$\beta = \frac{100}{100 - \%p} \tag{3.13}$$

Onde:

A_p – Área do perfil metálico;

M_{min} – Momento atuando sobre a viga protendida no ato da protensão, este ocorre pela presença do peso próprio do elemento e qualquer outro carregamento externo atuando sobre ele no momento da protensão;

P – Força de protensão final, após consideração das perdas;

W_{ip} – Módulo elástico da seção referente a fibra inferior do perfil metálico;

W_{sp} – Módulo elástico da seção referente a fibra superior do perfil metálico;

e – Excentricidade de aplicação da carga de protensão P em relação ao centro de gravidade da seção homogeneizada;

β – coeficiente de majoração da força de protensão para compensar as perdas de protensão;

γ_p – coeficiente de segurança aplicado à força de protensão;

σ_{ip}^{0} – tensão na fibra inferior do perfil metálico durante o ato da protensão;

σ_{sp}^{0} – tensão na fibra superior do perfil metálico durante o ato da protensão;

%p – perdas de protensão em porcentagem.

Por convenção, tensões de compressão foram determinadas como positivas.

De forma análoga, as tensões que atuam na seção em serviço são apresentadas nas equações (3.14) e (3.15).

$$\sigma_{sc} = \frac{M_{max}}{W_{sc}} \leq 0{,}7 \cdot f_{ck} \tag{3.14}$$

$$\sigma_{ip} = \frac{\gamma_p P}{A_{sh}} + \frac{\gamma_p Pe}{W_{ip}} - \frac{M_{max}}{W_{ip}} \leq -f_{yd} \tag{3.15}$$

Onde:

A_{sh} – Área da seção homogeneizada;

M_{max} – é o momento máximo atuando na viga considerando a aplicação de todas os carregamentos;

W_{sc} – Módulo elástico da seção referente a fibra superior da laje de concreto;

σ_{ip} – tensão na fibra inferior do perfil metálico em serviço;

σ_{sc} – tensão na fibra superior da laje de concreto em serviço.

A tensão na laje de concreto é referente os momentos solicitantes que surgem devido a introdução do peso próprio da laje e de todos os carregamentos externos que atuam sobre a VAMP em sua vida em serviço. Dessa forma, as tensões que surgem durante o ato de protensão são resistidas somente pelo perfil metálico – caso de pré-tração como apontado no item 2.3.

3.4 DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE PROTENSÃO

Manipulando a equação (3.11), pode-se obter a força de protensão que deve atuar sobre a viga no ato da protensão.

$$\frac{\gamma_p \beta P}{A} - \frac{\gamma_p \beta P e}{W_{sp}} + \frac{M_{min}}{W_{sp}} \leq \sigma_{sp}^0 \tag{3.16}$$

$$P\left(\frac{\gamma_p \beta}{A} - \frac{\gamma_p \beta e}{W_{sp}}\right) \leq \sigma_{sp}^0 - \frac{M_{min}}{W_{sp}} \tag{3.17}$$

$$P \leq \frac{\left(\sigma_{sp}^0 - \frac{M_{min}}{W_{sp}}\right)}{\left(\frac{\gamma_p \beta}{A} - \frac{\gamma_p \beta e}{W_{sp}}\right)} \tag{3.18}$$

Observa-se que a força P determinada é aquela que deve ser aplicada inicialmente nos cabos, pois, ds questões relacionadas às perdas são consideradas ao se utilizar o coeficiente β. Da equação (3.18) se tem, então, a força de protensão que deve ser utilizada para dimensionar os cabos de protensão.

3.5 DIMENSIONAMENTO DOS CONECTORES *STUD-BOLT*

O dimensionamento dos conectores de cisalhamento deve ser realizado como apresentado no anexo O da NBR 8800:2008. A força resistente de cálculo de um conector de cisalhamento do tipo *stud-bolt* é dada pelo menor valor entre as expressões encontradas na equação (3.19).

$$Q_{rd} \leq \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_{cs}}}{\gamma_{cs}} \\ \frac{R_g \, R_p \, A_{cs} \, f_{ucs}}{\gamma_{cs}} \end{cases} \tag{3.19}$$

Onde:

A_{cs} – Área da seção transversal do pino;

f_{ucs} – Resistência última a tração dos conectores de cisalhamento;

Q_{rd} – Resistência de cálculo de um conector *stud-bolt;*

R_g e R_p – Coeficientes que levam em consideração a atuação em grupo de conectores e a posição dos conectores, dado nos itens O.4.2.1.2 e O.4.2.1.3 da NBR 8800:2008;

γ_{cs} – Coeficiente de ponderação da resistência do conector, este assume o valor de 1,25 para combinações últimas normais, especiais ou de construção. e 1,10 para combinações excepcionais.

Segundo Pfeil (2016), a primeira parte da equação (3.19) é referente à resistência do apoio do pino no concreto, enquanto a segunda parte é referente à resistência a flexão do pino dada em termos de cisalhamento aparente.

A filosofia de dimensionamento considerado aqui é de que os conectores de cisalhamento devem sempre garantir a interação total entre o perfil metálico e a laje de concreto. Deve-se, assim, adicionar ao perfil metálico um número de conectores que seja suficiente para garantir que a ruptura ocorra no material e não pelo escoamento dos conectores. A norma permite o dimensionamento considerando a plastificação dos conectores, porém, para as análises aqui propostas, essa situação não se torna interessante.

O número de conectores deve ser tal que garanta o funcionamento da viga como mista até o momento de sua ruptura. Considerando isso, deve-se determinar que a resistência de 'n' conectores deve ser maior que a menor das resistências apresentadas na equação (3.20) e (3.21).

$$n \cdot Q_{rd} \geq 0{,}85 f_{cd} L_{ef} h_{lc} \tag{3.20}$$

$$n \cdot Q_{rd} \geq A_{st} f_{yd} \tag{3.21}$$

Os 'n' conectores podem ser distribuídos com espaçamento igual. Deve-se ressaltar que o número de conectores encontrados é para a região entre a seção de momento positivo máximo e a seção adjacente de momento nulo, como apresentado no item O.2.3.1.1.1 do Anexo O da NBR 8800:2008. Para vigas biapoiadas, esse número de conectores é para metade da viga, visto que a seção de momento positivo máximo é o centro da viga e a seção de momento nulo são os apoios.

3.6 ANÁLISE DAS TENSÕES NA SOLDA

As soldas em vigas metálicas devem ser realizadas por soldadores profissionais certificados e devem apresentar uma excelente qualidade de execução para que estas nunca sejam os pontos de limitação de resistência dos elementos estruturais. Dessa forma, as soldas da alma de vigas alveolares mistas protendidas devem ser executadas sempre com a maior prudência visando a segurança do elemento estrutural. Porém, determinar as tensões atuantes nesse componente da VAMP é de suma relevância para compreensão do funcionamento e aplicabilidade das técnicas construtivas em conjunto.

A região da solda em vigas alveolares encontra-se, usualmente, no centro de gravidade da peça. Quando se realiza a solidarizarão dos elementos de concreto armado com os perfis metálicos das vigas e este conjunto começa a trabalhar como estrutura mista, ocorre um descolamento da linha neutra da seção e tensões normais a região da solda surgem devido o momento fletor. Dessa forma, tem-se um estado em que a região da solda está solicitada por tensões cisalhantes e tensões normais. A protensão também introduz novas solicitações normais a região da solda devido a aplicação da força de compressão sobre o elemento. Isso caracteriza uma situação complexa de incrementos de tensão na região central do perfil metálico, que deve ser analisada com cuidado.

Cavalcante (2005) elaborou modelos analíticos de obtenção das tensões na solda para vigas alveolares mistas e os comparou com modelos numéricos através de análises de elementos finitos. Baseando-se nos procedimentos apresentados no Manual Brasileiro Para Cálculo de Estruturas Metálicas para vigas alveolares isoladas, Cavalcante (2005) montou um modelo que se apresentou como uma solução conservadora que se apresenta a favor da segurança e será adotado como inspiração para o modelo apresentado neste trabalho.

Para obtenção da força atuante na região da solda (F_w), faz-se o equilíbrio de momentos de um perfil "T" isolado (ver Figura 3.3-b). A Figura 3.3 mostra a seção e os esforços considerados para obtenção da equação de equilíbrio de momentos. A equação (3.22) apresenta o resultado do equilíbrio de momentos e, conhecendo o valor de F_w, pode-se determinar a tensão na solda (t_w) com a equação (3.23).

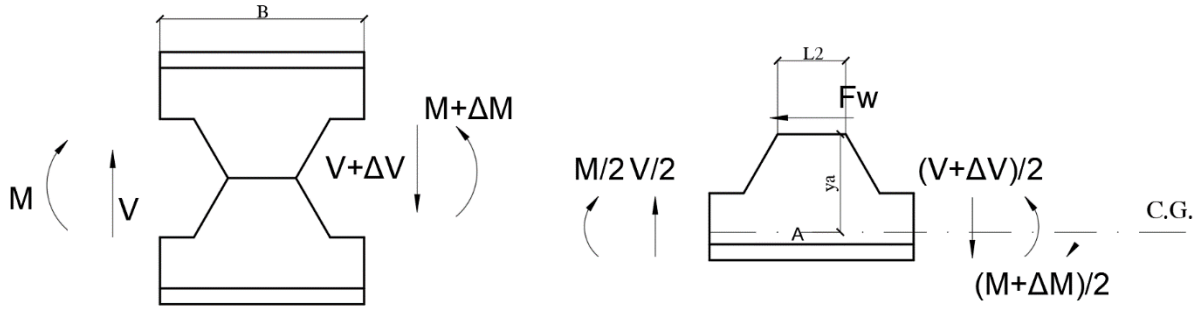


Figura 3.3 – Equilíbrio para obtenção da força atuante na região da solda para uma viga alveolar.

$$F_w = \frac{B(2V + \Delta V) + 2\Delta M}{4y_a} \tag{3.22}$$

$$\tau_w = \frac{F_w}{L_2 \cdot t_w} \tag{3.23}$$

Onde:

B – distância entre os pontos médios dos alvéolos;

V – esforço cortante solicitante na seção;

y_a – distância entre a borda do alvéolo e o centro de gravidade do perfil 'T';

ΔM – variação de momento fletor;

ΔV – variação de esforço cortante.

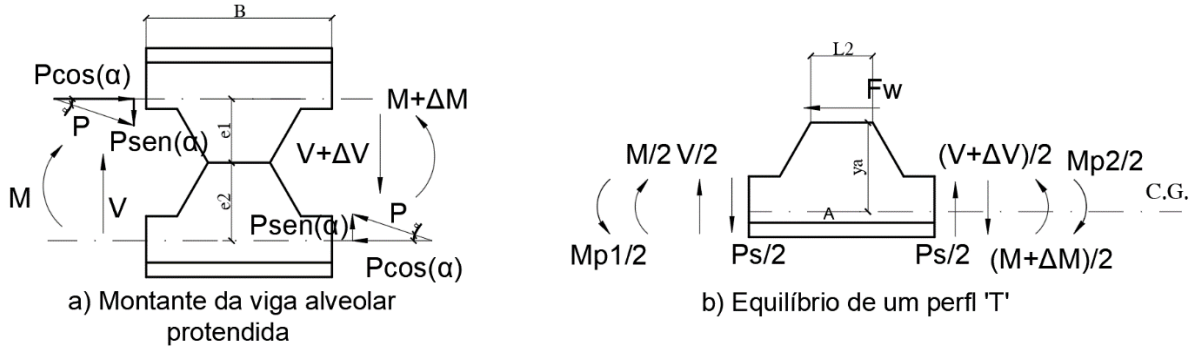


Figura 3.4 – Equilíbrio para obtenção da força atuante na região da solda para uma viga alveolar protendida.

Seguindo a mesma elaboração e considerando as forças introduzidas pela aplicação da protensão externa (ver Figura 3.4), determina-se que as tensões na solda podem ser calculadas usando as equações de (3.24) a (3.26), que foram obtidas através do desenvolvimento a seguir.

Calculando o somatório de momentos em torno do ponto A e igualando-o a zero:

$$\sum M_A = 0$$

$$\Rightarrow F_w \cdot y_a - \frac{V + \Delta V}{2} \cdot \frac{B}{2} - \frac{M_{P2}}{2} - \frac{V}{2} \cdot \frac{B}{2} - \frac{M}{2} + \frac{P_s}{2} \cdot \frac{B}{2} + \frac{(M + \Delta M)}{2} + \frac{P_s}{2} \cdot \frac{B}{2} + \frac{M_{P1}}{2} = 0$$

$$\Rightarrow 2F_w \cdot y_a - \frac{B(V + \Delta V)}{2} - M_{P2} - \frac{BV}{2} + \frac{BP_s}{2} + \Delta M + \frac{BP_s}{2} + M_{P1} = 0$$

$$\Rightarrow 2F_w \cdot y_a = \frac{B(V+\Delta V)}{2} + \frac{BV}{2} - BP_s - \Delta M + (M_{P2} - M_{P1})$$

$$\Rightarrow 2F_w \cdot y_a = \frac{B}{2}[2(V - P_s) + \Delta V] - \Delta M + (M_{P2} - M_{P1})$$

Fazendo $(\mathrm{M_{P2}} - \mathrm{M_{P1}}) = \Delta \mathrm{M_P}$ e isolando a força $\mathrm{F_w}$:

$$\Rightarrow 2F_w \cdot y_a = \frac{B}{2}[2(V - P_s) + \Delta V] + (\Delta M + \Delta M_P)$$

$$\Rightarrow F_w = \frac{\frac{B}{2}[2(V - P_s) + \Delta V] + (\Delta M + \Delta M_P)}{2y_a}$$

$$F_w = \frac{B \cdot [2(V - P_s) + \Delta V] + 2(\Delta M + \Delta M_p)}{4y_a} \tag{3.24}$$

$$\Delta M_p = Pcos(\alpha_i) \cdot [e_{i+1} - e_i] \tag{3.25}$$

$$\tau_w = \frac{F_w}{L_2 t_w} \tag{3.26}$$

Onde:

$\Delta \mathrm{M_p}$ – variação de momento fletor devido a protensão;

e_i – excentricidade da aplicação da força de protensão a esquerda da seção;

e_{i+1} – excentricidade da aplicação da força de protensão a direita da seção;

$\mathrm{P_s}$ – a componente vertical da força de protensão, dada por $\mathrm{P.sen}(\alpha_n)$;

α_n – inclinação do cabo de protensão na seção

τ_w – tensão de cisalhamento na solda.

A Figura 3.4 apresenta a seção considerada para elaboração desse modelo, esta é parte de uma viga com alvéolos circulares, porém, a lógica de dedução também é aplicável para as geometrias retangulares e octogonais.

3.6.1 CONSIDERAÇÕE SOBRE O MODELO

O modelo elaborado, conforme mostrado por Cavalcante (2005), é conservador quando aplicado em vigas mistas alveolares. Com a adição de protensão, é razoável assumir que este também se apresentará conservador e a favor da segurança em VAMP, o que justifica sua utilização para verificações e dimensionamentos desses elementos estruturais.

Observa-se que a primeira parcela da soma do numerador da equação (3.24) está em função dos momentos gerados pelos esforços de cisalhamento em torno do ponto A. Neste termo fica claro que a introdução de uma força de protensão aplicada com traçado poligonal apresenta a diminuição dos efeitos de cisalhamento oriundos das solicitações externas, como será visto no item 3.7, e consequente diminuição das tensões na região da solda.

Por outro lado, os momentos gerados pela força de protensão estão representados na segunda parcela da soma do numerador pelo termo ΔM_p que está em função da diferença de excentricidade entre as seções feitas nos alvéolos consecutivos, como mostrado na equação (3.25). Levando isso em consideração, observa-se que a protensão introduz esforços na zona da solda da alma de vigas alveolares mistas protendidas somente quando o traçado do cabo é poligonal. Se este for reto, mesmo que excêntrico, os termos de momento são zerados e não há componente vertical das forças de protensão.

Quanto a geometria do alvéolo, observa-se que este não apresentou influência na elaboração deste modelo. Esta avaliação seria melhor elaborada utilizando procedimentos numéricos (em softwares de elementos finitos, por exemplo). Porém, observa-se que estes influenciam as tensões na região da solda através de suas características geométricas. A geometria circular, por possuir limitações quanto ao espaçamento entre os alvéolos, pode apresentar tensões maiores na região da solda simplesmente por ter que limitar o comprimento de solda L_2 durante a sua etapa construtiva. Isso implica em uma desvantagem na utilização dessa geometria.

Observando a Figura 3.5, é possível determinar a distância entre as seções, considerando que estas serão feitas sempre a meia seção de alvéolos consecutivos. Dessa forma, obtém-se os valores de B em função do comprimento da solda L_2 para cara uma das geometrias, desde que consideremos que os alvéolos octogonais são realizados de forma regular, onde o comprimento L_1 é igual a metade de L_2. Com isso, tem-se que os comprimentos B assumem os valores apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Distância B entre os centros dos alvéolos.

Geometria	Comprimento B em função de L_2
Octogonal	$3L_2$
Retangular	$2L_2$
Circular	$\left(\frac{k+1}{k}\right)L_2$

Para se obter a mesma tensão para as três geometrias, deve-se ter que o comprimento L_2 seja igual nas três geometrias. Assim, pode-se comparar a geometria circular com as geometrias octogonal e retangular. Igualando as relações apresentas na Tabela 3.2:

$$\left(\frac{k+1}{k}\right)L_2 = 3L_2 \Rightarrow k = 0{,}5 \tag{3.27}$$

$$\left(\frac{k+1}{k}\right)L_2 = 2L_2 \Rightarrow k = 1 \tag{3.28}$$

A relação apresentada na equação (3.27) mostra que para se obter o mesmo comprimento L_2 para um alvéolo circular quando comparado com um alvéolo octogonal, o termo k (que é a razão entre o comprimento L_2 e o diâmetro do furo D_f) deve apresentar uma relação 0,5. Isso é um fator limitante para aplicação de alvéolos circulares, dado que a expansão do perfil é inversamente proporcional ao valor k, como mostrado na seção 2.2.1.2. Da mesma forma, a equação (3.28) mostra que o fator k deve ser igual a um para se obter o mesmo comprimento de solda que um alvéolo retangular, com esse valor a viga com alvéolos circulares não apresentaria expansão.

A geometria circular apresenta grandes particularidades em relação a sua construção e utilização. Começando pelo corte para sua construção que é mais elaborado do que as outras duas geometrias discutidas nesse estudo. Esta ainda apresenta limitações geométricas quanto os ganhos de altura e resistência e esta tendência se repete na obtenção das tensões nas soldas. Considerando esses fatores, a utilização dessa geometria para os alvéolos de uma VAMP necessita de uma atenção maior do projetista.

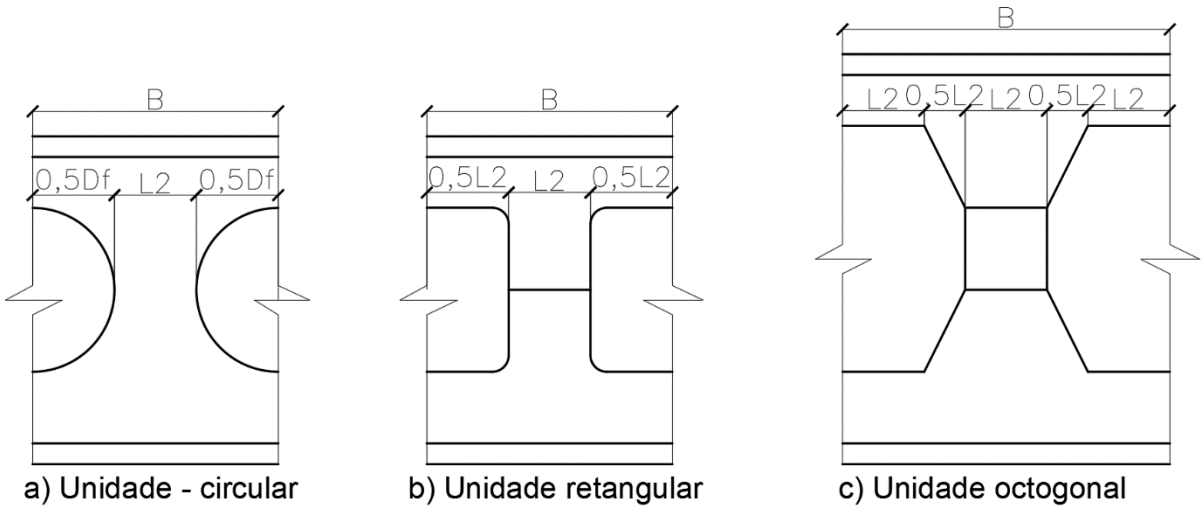


Figura 3.5 – Relação entre os valores L2.

3.7 VERIFICAÇÃO AO CISALHAMENTO

Para se verificar vigas protendidas ao cisalhamento é necessário considerar os esforços internos oriundos das solicitações externas assim como os esforços que ocorrem devido a protensão. Como apontado por Nunziata (1999), em vigas protendidas com o traçado do cabo poligonal, surgem esforços de cisalhamento devido a inclinação do cabo de protensão. Esta é calculada conforme a equação (3.29). Observando a Figura 3.6, fica claro o surgimento desse estado de cortante aliviado, pois a solicitação de cisalhamento é diminuída pela protensão.

$$V_{sp} = \gamma_p \beta P \cdot sen(\alpha) \tag{3.29}$$

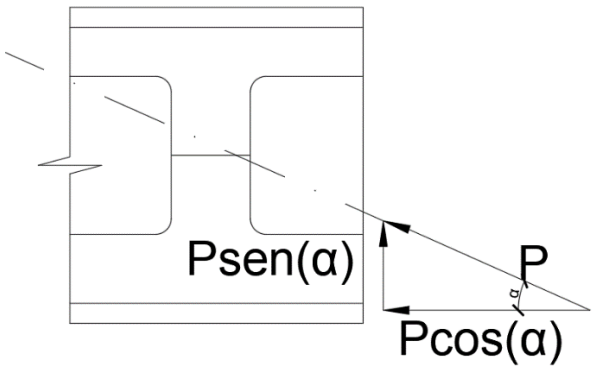


Figura 3.6 – Força inclinada de protensão.

Considerando a introdução dessa parcela ao cisalhamento atuante na viga, a tensão de cisalhamento máxima é calculada usando os esforços resultantes apresentados na equação (3.30) – durante o ato de protensão e equação (3.31) – situação após as perdas.

$$V_{sd} = V_1 - \gamma_p \beta P \cdot sen(\alpha) \tag{3.30}$$

$$V_{sd} = V_1 - \gamma_p P \cdot sen(\alpha) \tag{3.31}$$

Em perfis I, o cisalhamento é resistido principalmente pela alma e a tensão máxima de cisalhamento é dada pela equação (3.32).

$$\tau_{máx} = \frac{V_{sd}}{t_w \cdot h_w} \tag{3.32}$$

Como apresentado por Nunziata (1999), após obter a tensão de cisalhamento máxima, aplica-se o critério de escoamento de Von Mises para encontrar a tensão proveniente da solicitação simultânea do momento fletor e da força cortante. Limita-se essa tensão ao escoamento do aço do perfil metálico, como apresentado na equação (3.33)

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq f_{yd} \tag{3.33}$$

Lubke (2017) aponta que um dos estados limite últimos aplicáveis para o dimensionamento da peça é o rasgamento do montante (seção de alma cheia de vigas alveolares) na região da solda. Ainda é considerado que a ruptura deve ocorrer no metal base pelo fato de a solda apresentar maior limite de escoamento inferior do que o aço do metal base. Com isso, as tensões que surgem nessa região, que foram encontradas e discutidas no item 3.6, devem ser limitadas também pelo critério de Von Mises para regiões que estão solicitadas por cortantes puros. Dessa forma, é obtido o limite apresentado na equação (3.34).

$$\tau_{máx} = \frac{3}{2} t_w \leq \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} \tag{3.34}$$

$$\Rightarrow \frac{3}{2} \frac{B \cdot [2(V - P_s) + \Delta V] + 2(\Delta M + \Delta M_p)}{4 y_a \cdot L_2 t_w} \leq \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} \tag{3.35}$$

Na equação (3.35), as variações de esforço cortante e de momentos fletores na seção são muito pequenas para determinação dessa tensão máxima e podem desprezadas para essa análise. Simplificando e manipulando a equação (3.35), é possível determinar um valor de força cortante resistivo característico para vigas alveolares mistas protendida apresentado na equação (3.36).

$$V_{rk} = \frac{4}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{L_2 t_w y_a}{B} \cdot f_{yd} + Psen(\alpha_i) \tag{3.36}$$

Pela NBR8800:2008, define-se que o cortante resistente de cálculo é dado pela equação (3.37).

$$V_{rd} = \frac{V_{rk}}{\gamma_{a1}} \tag{3.37}$$

3.7.1 ZONA ALVEOLAR

Vigas alveolares apresentam uma zona de alma cheia e uma zona alveolar. A norma NBR 8800:2008 determina, em seu Anexo I, que nos cálculos para abertura em vigas metálicas ou mista de aço e concreto, nas condições específicas apresentadas no item I.3, não é necessário se realizar verificações específicas para as aberturas para os estados limites de dimensionamento. A construção das vigas alveolares seguindo com as configurações indicadas no anexo I da norma se mostra inviável. Dessa forma, é necessário se obter outra maneira de determinar a zona alveolar da viga.

A análise proposta nesse documento leva em consideração vigas biapoiadas. Nessa configuração de apoio, as maiores solicitações de esforço cortante estão nas extremidades da viga. Com isso em mente, a região alveolar da viga pode ser delimitada determinando-se uma distância (L_4) da extremidade da viga em que a área da seção transversal do alvéolo da viga resista ao esforço de cisalhamento solicitante, ou seja, a solicitação é menor que o cortante resistente.

Sabendo a força cortante resistente da seção transversal do alvéolo, a distância L_4 pode ser definida em função do carregamento sobre a viga biapoiada:

$$V_{rd} = \frac{q_{ex} \cdot L}{2} - q_{ex} \cdot L_4 \tag{3.38}$$

$$\Rightarrow L_4 = \frac{q_{ex} \cdot L - 2V_{rd}}{2q_{ex}} \tag{3.39}$$

$$L_4 = \frac{L}{2} - \frac{V_{rd}}{q_{ex}} \tag{3.40}$$

$$V_{rd} = \frac{0{,}60 A_{al} f_{yd}}{\gamma_{a1}} \tag{3.41}$$

Onde:

A_{al} – área da alma na região central do alvéolo;

q_{ex} – solicitação externa devido as sobrecargas e cargas permanentes – não considera peso próprio do perfil metálico.

Utilizando as equações (3.40) e (3.41), obtêm-se o comprimento no qual a região de alma cheia deve se estender em função do carregamento aplicado sobre a viga (q_{ex}), suas características físicas e geométricas. Observa-se que esse carregamento é oriundo somente das sobrecargas e do peso próprio da laje de concreto, já que para determinação dos carregamentos devido peso próprio do perfil metálico está em função do número de alvéolos, que só pode ser determinado após se conhecer a região alveolar. Dessa forma, a equação (3.40) é utilizada, de certa forma, como um pré-dimensionamento. Após o cálculo do número de alvéolos, deve-se posicioná-los ao longo da viga e verificar se os montantes mais externos estão dentro da zona alveolar.

3.8 OUTRAS VERIFICAÇÕES

Juntamente com as limitações dos esforços normais a seção já discutida, é necessário realizar outras verificações referentes a estabilidade das vigas alveolares mistas protendidas. A verificação do momento fletor para a seção de aço; a força cortante; as flambagens local de alma e da mesa comprimida; assim como outras verificações devem ser realizadas conforme as recomendações da NBR 8800:2008 (Nelsen, 2012).

As formulações normativas relacionadas as essas instabilidades foram elaboradas para perfis metálicos convencionais, sendo necessário realizar estudos e elaborações específicas para o objeto aqui em estudo. Ferreira (2007) aponta que estudos específicos de flexo-compressão devem ser realizados para vigas protendidas, pois estas apresentam particularidades em seu funcionamento considerando a presença dos cabos de protensão e dos desviadores na alma da viga. Por exemplo, em caso de flambagem lateral com torção (FLT), a presença dos cabos de protensão proporciona um efeito favorável a segurança visto que os cabos provocam uma força de restauração na viga forçando a peça estrutural a sua posição original, conforme mostrados na Figura 3.7.

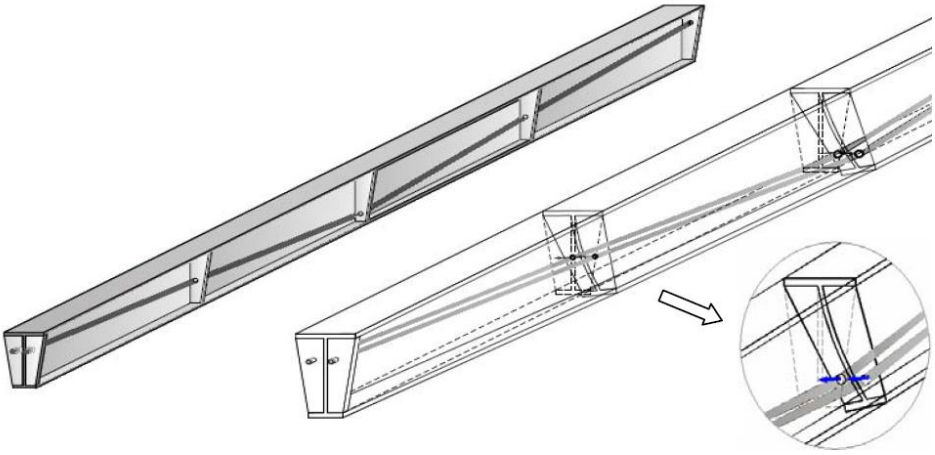


Figura 3.7 – Força de restauração provocado pelos cabos de protensão (Ferreira, 2007 – adaptado)

Estas instabilidades podem ocorrer em vigas alveolares mistas protendidas. Dessa forma, é necessário tomar providencias quanto a utilização desses elementos para evitar essas instabilidades. Como hipótese simplificadora, serão impostos os limites normativos apresentados no Anexo O da NBR 8800:2008 para se evitar essas instabilidades. Como apontado por Melo (2016), a presença da laje de concreto gera uma contenção lateral contínua sobre o perfil metálico limitando os efeitos que poderiam ocorrer devido a FLT. Considerando os efeitos de flambagem global, deve-se garantir que há travamentos laterais da VAMP para diminuir seu comprimento livre e assim evitar a flambagem global da peça. Instabilidades locais podem ser evitadas utilizando perfis considerados compactos ou perfis esbeltos que sejam devidamente construídos com a presença de enrijecedores, Nelsen (2012).

Vigas mistas de aço e concreto são consideradas compactas caso a relação entre a altura do perfil e a largura da alma satisfaça os limites apresentados para vigas biapoiadas no item O.1.1.2-c da NBR 8800:2008. Essa relação deve ser inferior ao limite apresentado na equação (3.42). Se for menor que o limite da equação (3.43), o perfil é considerado compacto, caso contrário, esbelto.

$$\frac{h}{t_w} \leq 5{,}70\sqrt{\frac{E_{st}}{f_{yd}}} \tag{3.42}$$

$$\frac{h}{t_w} \leq 3{,}76\sqrt{\frac{E_{st}}{f_{yd}}} \tag{3.43}$$

Outra verificação que deve ser realizada consiste da determinação dos deslocamentos sofridos pela VAMP. Pensando na evolução de carregamento da viga alveolar mista protendida, vê-se claramente dois estágios principais nos quais os deslocamentos devem ser determinados. Primeiramente, durante a protensão, o perfil metálico deve apresentar uma deflexão vertical que não apresente uma magnitude muito elevada para não prejudicar a elaboração das formas da laje. Dessa forma, a flecha devido a protensão deve ser controlada e pode ser utilizada como parâmetro para determinação da força de protensão que deve ser aplicada sobre o perfil metálico, ou seja, não se deve aplicar uma força de protensão que cause uma deformação maior do que o limite estabelecido.

Nunziata (1999) fala em seu livro que o sistema de protensão pode ser substituído por um carregamento externo equivalente a protensão. As cargas equivalentes que devem ser aplicadas sobre o perfil dependem diretamente do traçado do cabo de protensão e da posição dos desviadores.

A Figura 3.8-a mostra que, para cabos de traçado horizontal excêntrico, o sistema equivalente é composto das cargas horizontais de compressão que atuam sobre o centro de gravidade da seção da viga com momentos fletores aplicados onde o cabo é ancorado.

Para cabos de traçado poligonal, o sistema equivalente de cargas é dado por forças verticais aplicados nas posições dos desviadores como apresentado na Figura 3.8-b. Essas forças verticais são calculadas utilizando a equação (3.44), considerando as mudanças de inclinação do cabo de protensão.

Durante o ato de protensão, a flecha final é calculada com sendo a superposição dos efeitos da protensão e das cargas externas atuantes sobre a viga – efeitos devidos o peso próprio do perfil e outras cargas que podem estar atuando sobre a VAMP.

$$F_n = P_h[tan(\alpha_{n-1}) - tan(\alpha_n)] \tag{3.44}$$

Onde

F_n – é a força vertical no n-ésimo desviador;

P_h – é componente horizontal da força de protensão no ponto de ancoragem;

α_n – é o ângulo de desvio do cabo no n-ésimo desviador.

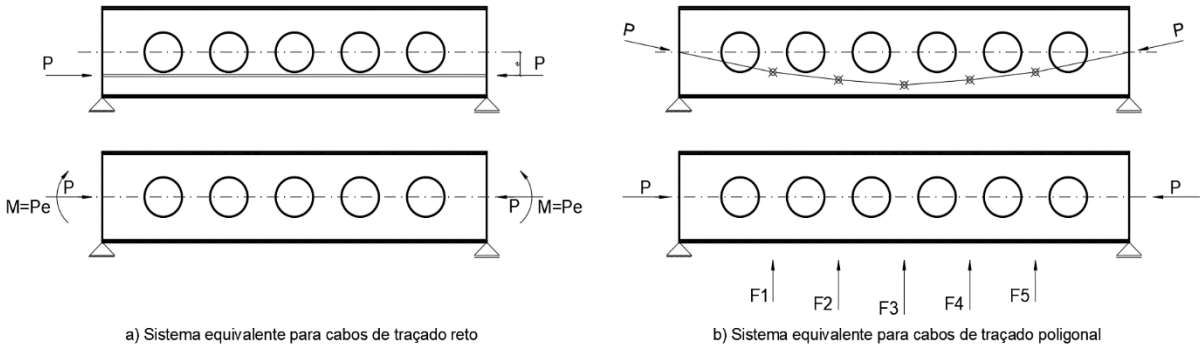


Figura 3.8 – Sistemas de carregamento equivalente para aplicação de protensão.

Da mesma forma, para análise das deformações em serviço, devem ser consideradas a superposição dos efeitos que atuam sobre a viga alveolar mista protendida. A NBR 8800:2008, em seu anexo O, determina que os deslocamentos devem ser calculados considerando os efeitos de longa duração no concreto da laje e nas regiões de momentos positivos, o momento de inércia deve ser substituído pelo seu valor efetivo, calculado pela equação (3.45).

$$I_{ef} = I_a + \sqrt{\frac{\sum Q_{rd}}{F_{hd}}}\,(I_{tr} - I_a) \tag{3.45}$$

Onde:

F_{hd} – é o menor valor entre os limites apresentados na equação (3.20);

I_a – é o momento de inércia do perfil metálico isolado;

I_{ef} – é o momento de inércia efetivo que deve ser considerado;

I_{tr} – é o momento de inércia da seção homogeneizada.

4. EXEMPLO DE CÁLCULO DE UMA VIGA ALVEOLAR MISTA PROTENDIDA

Vigas alveolares mistas protendidas apresentam grandes particularidades para se dimensionar e fazer as verificações. Um exemplo será mostrado a seguir para mostrar a metodologia de cálculo. Para fins desse exemplo, considera-se que a construção da estrutura foi escorada e que a viga está devidamente travada ao longo de seu comprimento.

4.1 EXEMPLO DE CÁLCULO

4.1.1 DADOS:

Vão (L): 15 metros

Carregamentos:

- Peso próprio (PP) – determinado na seção 4.1.4.
- Carga Permanente (CP) – 12,0 kN/m
- Sobrecarga (SC) – 18,0 kN/m

Aço – A36

- f_{yd} = 250 MPa
- f_u = 400 Mpa
- Peso específico = 77kN/m³
- Módulo de elasticidade: 200GPa

Concreto

- f_{ck} = 35 Mpa
- Peso específico = 25kN/m³
- Módulo de elasticidade = 29,4GPa

Cabo de protensão

- Cordoalhas – CP 190 RB 12,7

Perfil Original: CVS 500x134.

Altura da laje de concreto: 15cm.

Largura efetiva: 1,875 m – determinada como sendo 1/8 do vão.

As características do perfil original foram tiradas das tabelas encontradas nos anexos em Pfeil (2016) e estão apresentadas na Tabela 4.1. A seção transversal do perfil é conforme apresentado na Figura 4.1.

Tabela 4.1 – Informações do perfil original.

PERFIL ORIGINAL			
Altura	h_{p0}	mm	500
Área	A	cm²	170,5
Alma	t_w	mm	12,5
	h_w	mm	468
Mesa	t_f	mm	16
	b_f	mm	350
Eixo X-X	I_x	cm4	76293
	W_x	cm³	3052
Massa	m	kg/m	133,8

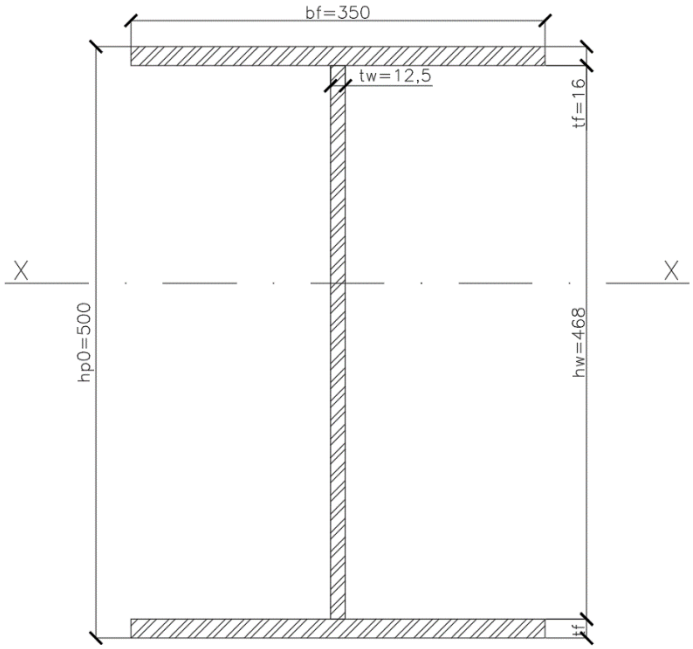


Figura 4.1 – Seção transversal do perfil original – CVS 500x134.

4.1.2 GEOMETRIA

Primeiramente, deve-se definir as características geométricas e o número de alvéolos que serão utilizados nesta viga, neste exemplo serão utilizados alvéolos circulares.

A determinação foi feita de forma geométrica. Considerando as equações de (4.1) a (4.4), pode-se determinar a expansão de um perfil alveolar de geometria circular.

É necessário determinar o parâmetro k – razão entre L_2 e o diâmetro do furo (D_f), como na equação (4.1) – e o parâmetro n, que é a razão entre o furo da viga e a altura do perfil final, ver equação (4.3).

Os valores determinados encontram-se na Tabela 4.2.

$$k = \frac{L_2}{D_f} \tag{4.1}$$

$$\rho = \sqrt{(1 - k^2)} \tag{4.2}$$

$$n = \frac{D_f}{h_{p1}} \tag{4.3}$$

$$h_{p1} = \left(\frac{2}{2 - n \cdot \rho}\right) \cdot h_{p0} \tag{4.4}$$

Tabela 4.2 – Parâmetros geométricos.

k	0,480
n	0,500
ρ	0,877
L_2 (mm)	154,0
D_f (mm)	320,0

Considerando os parâmetros geométricos apresentados na Tabela 4.2 se determinou, usando a equação (4.4), a altura e a geometria do perfil expandido. A Tabela 4.3 resume as informações geométricas da seção do perfil castelado.

Tabela 4.3 – Informações do perfil castelado (expandido)

PERFIL CASTELADO			
Altura	h_{p1}	mm	640
Área	A_{ch}	cm²	188
	A_{al}	cm²	148
Alma	t_w	mm	12,5
	h_w	mm	608
	h_f	mm	320
Mesa	t_f	mm	16
	b_f	mm	350
Seção – alma cheia			
Eixo X-X	I_x	cm4	132461
	W_x	cm³	4139
	i_x	cm	26,54
Seção – alvéolo			
Eixo X-X	I_x	cm4	129048
	W_x	cm³	4033
	i_x	cm	29,53

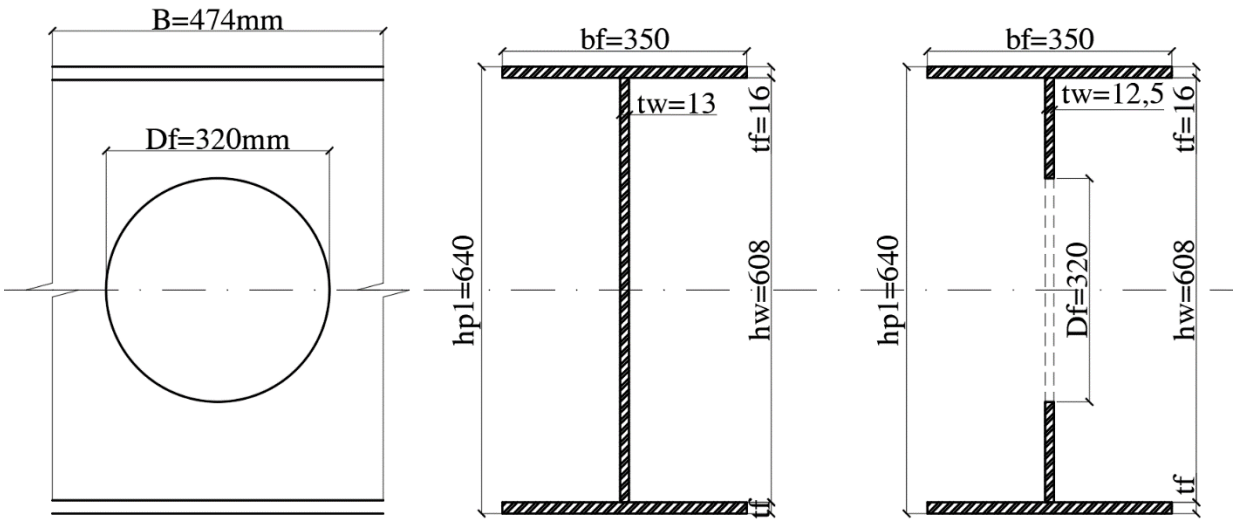


Figura 4.2 – Unidade alveolar.

O número de alvéolos foi determinado considerando o comprimento de solda L_2, o diâmetro do furo e o vão a ser vencido através da equação (4.5). Este valor é determinado pelo vão a ser vencido divido pelo comprimento de uma unidade alveolar (B) como mostrado na Figura 4.2-a. A Figura 4.2-b e Figura 4.2-c mostram as seções do montante e do alvéolo, respectivamente.

$$N_{al} = \frac{L}{B} \tag{4.5}$$

Onde:

B – comprimento da unidade alveolar;

L – vão da viga;

N_{al} – número de alvéolos.

4.1.3 VERIFICAÇÃO DA ZONA NÃO ALVEOLAR

A região não alveolar tem um comprimento L_4 de 46,7 cm., como pode ser visto na Figura 4.4 – ver item 4.1.6. A verificação discutida no item 3.7.1 mostra que a zona L_4 assume um valor negativo. Assim, a zona determinada de forma geométrica atende a resistência ao esforço cisalhante. As equações de (4.6) a (4.8) mostram os cálculos realizados para essa verificação:

$$q = PP_c + CP + SC = 7{,}0312 + 12 + 15 = 34{,}0312\ kN/m \tag{4.6}$$

$$V_{rd} = \frac{0{,}60 A_a f_{yd}}{\gamma_{a1}} = V_{rd} = \frac{0{,}60 \cdot (36) \cdot 25}{1{,}1} = 490{,}9kN \tag{4.7}$$

$$L_4 = \frac{L}{2} - \frac{V_{rd}}{q} = \frac{15}{2} - \frac{490{,}9}{34{,}0312} = -6{,}925\ m \tag{4.8}$$

4.1.4 PESO PRÓPRIO

O peso próprio da estrutura é composto pelo peso da laje de concreto e o peso do perfil expandido. O carregamento linear devido peso da laje de concreto é determinado com a seção de concreto sobre a viga e o peso específico do concreto armado como mostrado na equação (4.9).

$$PP_c = L_{ef} \cdot h_c \cdot \gamma_c \tag{4.9}$$

Onde

h_c – altura da laje de concreto;

PP_c – Peso próprio da laje de concreto;

γ_c – Peso específico do concreto armado.

O peso próprio do perfil expandido é calculado considerando o peso específico do aço (77kN/m³). O volume total do perfil é determinado multiplicando a área da seção transversal da seção cheia da VAMP pelo vão que esta vence e subtraindo o volume referente os vazios dos alvéolos. O peso total da peça é dado pelo volume resultante multiplicado pelo peso específico do aço. Esse valor é divido pelo vão vencido pela viga, dessa forma obtém-se o carregamento linear (em N/m) devido peso próprio do perfil metálico. Os valores das parcelas de peso próprio devido são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Carregamento devido peso próprio da estrutura.

Peso Próprio	Valor em kN/m
PP_c	7,031
PP_p	1,293
Soma (PP_t)	8,324

4.1.5 HOMOGENEIZAÇÃO DA SEÇÃO

A homogeneização da seção é realizada dividindo a área de concreto pela razão modular α_e, considerando a largura e a altura efetiva da laje – calculada com a equação (3.6), como apontado no item 3.2.

A Tabela 4.5 apresenta os valores das características geométricas da seção homogeneizada. A Figura 4.3 mostra a seção homogeneizada em aço. Foram considerados os efeitos de longa duração no concreto armado.

Tabela 4.5 – Informações do perfil castelado e homogeneizado

PERFIL HOMOGENEIZADO			
Altura	$h_{p1'}$	mm	640,0
	h_c	mm	150,0
	y_{Ln}	cm	6,542
Largura efetiva	L_{ef}	cm	9,188
Área	A_{ch}	cm²	248,0
	A_{al}	cm²	208,0
Alma	t_w	mm	12,5
	h_w	mm	608,0
	h_f	mm	320,0
Mesa	t_f	mm	16,0
	b_f	mm	352,0
Seção – alma cheia			
Eixo X-X	I_x	cm4	539436
Seção – alvéolo			
Eixo X-X	I_x	cm4	536023

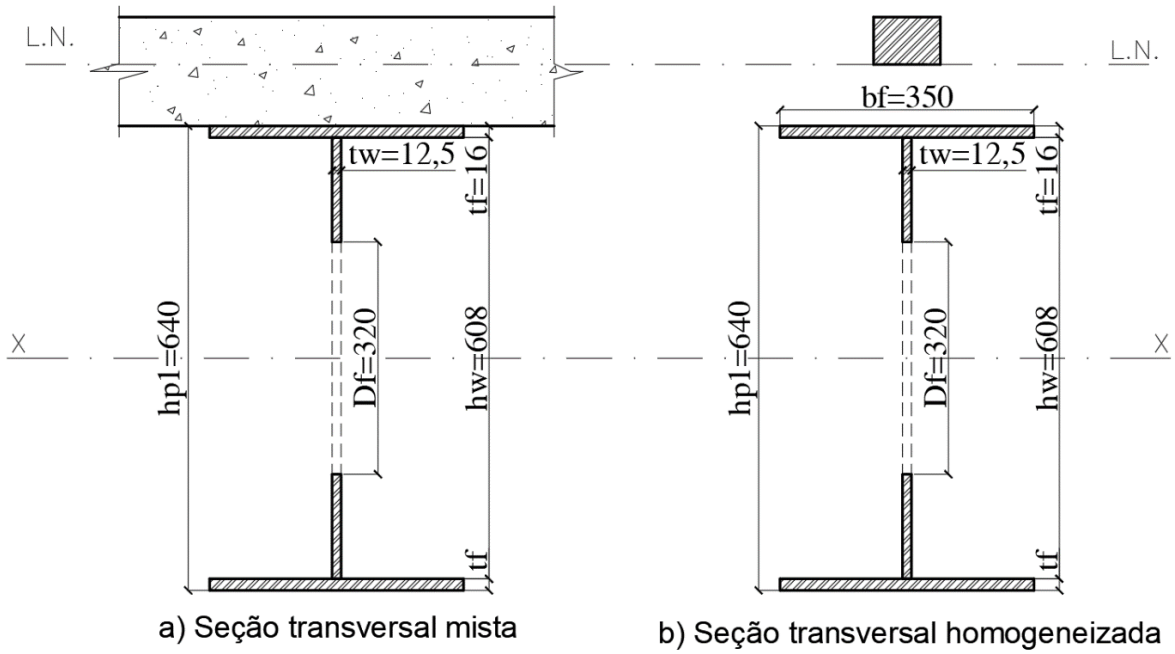


Figura 4.3 – Seção homogeneizada.

4.1.6 TRAÇADO DO CABO

O traçado do cabo nessa viga é reto na parte central e está posicionado a 5 cm da face inferior do perfil. Foram adicionados três desviadores, um no centro do vão e os outros dois posicionados a 276 cm das faces. O desviador central foi colocado para compatibilizar as deformações da viga com o cabo de protensão para evitar diminuição das excentricidades. Os dois desviadores nas exterminadas do vão foram adicionados para que seja possível a ancoragem no centro de gravidade do perfil. Esta seção do cabo de protensão, por estar inclinada, contribui para a resistência do perfil metálico ao cisalhamento.

A Figura 4.4 mostra o traçado longitudinal do cabo e os pontos de ancoragem.

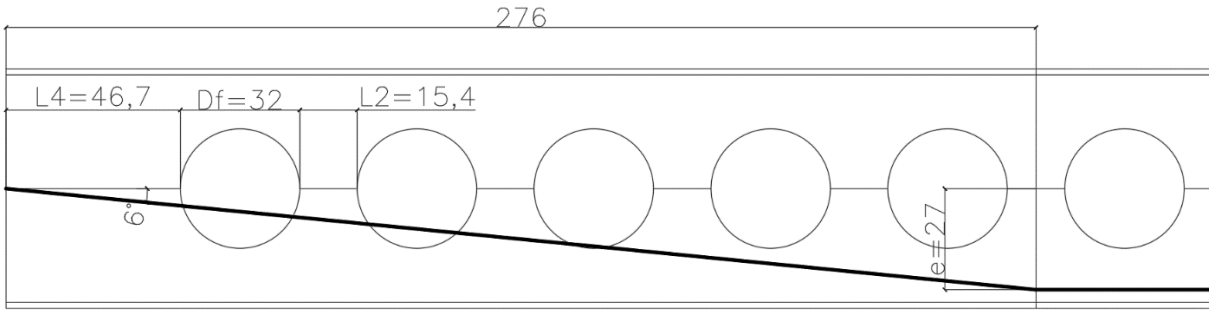


Figura 4.4 – Traçado do cabo.

4.1.7 FORÇA DE PROTENSÃO E DIMENSIONAMENTO DOS CABOS

A determinação da força de protensão deve ser feita considerando os limites de tensão apresentados no item 3.3. Essa verificação deve ser realizada para a seção de alma cheia e para a seção central do alvéolo mais solicitado, adotando a menor força de protensão encontrada.

Durante a protensão, o perfil metálico trabalha sozinho. Dessa forma, seguindo os procedimentos descritos no item 3.4, obteve-se os valores encontrados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Determinação da força de protensão

	Unidades	Seção de alma cheia	Seção do Alvéolo
Momento de inércia	cm^4	132461	129048
y_{ip}	cm	32,00	32,00
W_{ip}	cm^3	4139	4033
M_{min}	kNm	36,36	36,32
e	cm	27,0	27,0
Perdas	%	15	15
γ_p	-	1,2	1,2
P	kN	1411,93	1244,20

Onde:

e – excentricidade do cabo calculada como a distância do centro de gravidade do cabo de protensão até a linha neutra da seção;

y_{ip} – distância da parte inferior do perfil metálico para o CG.

Observa-se que o momento mínimo (M_{min}) que deve ser utilizado para verificação da seção do alvéolo é diferente da solicitação que é utilizada na região de alma cheia. O momento fletor solicitante em qualquer seção de vigas biapoiadas pode ser obtido através da equação (4.10) que é a distribuição desse esforço em uma estrutura isostática com essa configuração de apoios.

$$M(x) = \frac{ql}{2}x - \frac{qx^2}{2} \tag{4.10}$$

Onde:

M(x) – momento solicitante em uma posição x de uma viga biapoiada;

l – é o vão da viga;

q – é o carregamento linear sobre a viga;

x – posição da seção a ser analisada na viga.

Determina-se que a força de protensão após ocorrência das perdas deve ser de 1200 kN. Majorando esse valor pelo coeficiente β, obtém-se o valor da força de protensão inicial que deve ser aplicada sobre os cabos de protensão. Através da equação (2.3), reproduzida abaixo, determina-se a tensão máxima inicial que se pode aplicar sobre os cabos de protensão. Considerando as características das cordoalhas que compõe os cabos, calcula-se que devem ser utilizados dois cabos com 5 cordoalhas. Os resultados obtidos estão sintetizados na Tabela 4.7. Observa-se que o número de cabos deve ser par, pois deve-se utilizar o mesmo número de cabos em cada lado da alma do perfil metálico.

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0{,}80 f_{ptk} \\ 0{,}88 f_{pyk} \end{cases}$$

Tabela 4.7 – Dimensionamento dos cabos de protensão.

P^0	1411,765	kN
β	1,18	-
$\sigma_{pi}{}^0$	1476,2	MPa
φ	12,7	mm
Área 1 cordoalha	100,9	mm²
Área necessária	956,34	mm²
Número de Cordoalhas	10	cordoalhas

Onde:

P^0 – Força de protensão inicial;

φ – diâmetro nominal da cordoalha usada.

4.1.8 VERIFICAÇÃO DAS TENSÕES EM SERVIÇO

As tensões em serviço são calculadas considerando a seção homogeneizada deferida no tempo, ou seja, considerando os efeitos de longa duração no concreto. Assim, utilizando as características geométricas da seção homogeneizadas encontradas na Tabela 4.5, calculou-se as tensões atuantes no topo da laje de concreto e na parte inferior do perfil metálico – utilizando as equações (3.14) e (3.15).

Tabela 4.8 – Tensões em serviço.

		Alma Cheia	Alvéolos
q	kN/m	38,32	38,32
Posição	m	7,5	7,263
M_{max}	kNm	1077,86	1076,79
σ_{sl}	MPa	13,07	13,14
σ_{ip}	MPa	-34,52	-23,81

O valor negativo encontrado para a tensão na fibra inferior do perfil metálico indica que esta está sobre tração. Os valores de tensão não podem ultrapassar os limites apresentado no item 3.3, como observado abaixo, os valores são menores do que os limites desse exemplo.

$$\sigma_{sl} = 13{,}07 \leq 0{,}7 f_{cd} = 24{,}5 MPa \quad \text{OK}$$

$$\sigma_{ip} = -34{,}52 \leq -f_{yd} = -227{,}3 MPa \quad \text{OK}$$

4.1.9 VERIFICAÇÃO AO CISALHAMENTO

As maiores solicitações de esforço de cisalhamento acontecem nas regiões mais próximas dos apoios da viga. Verificando os critérios de esbeltez apresentados na NBR 8800:2008, verifica-se que o perfil metálico se apresenta como compacto.

$$\lambda_p = 1{,}1 \sqrt{\frac{k_v E}{f_{yd}}} = 1{,}1 \sqrt{\frac{5 \cdot 200000}{250}} = 69{,}57 \tag{4.11}$$

$$\lambda = \frac{h_w}{t_w} = \frac{640}{12{,}5} = 51{,}2 \tag{4.12}$$

Como a seção alveolar se estende até próximo os apoios, três regiões distintas estão sobre solicitação de esforços de cisalhamentos de magnitude considerável. Dessa forma, deve-se verificar a seção de alma cheia próxima ao apoio, a seção do alvéolo mais solicitado pelo esforço cortante e o montante mais solicitado.

4.1.9.1 VERIFICAÇÃO DA SEÇÃO DE ALMA CHEIA

Utilizando o critério de escoamento de Von Mises, conforme mostrado no item 3.7, deve-se verificar as tensões que estão atuando na região do apoio. As tensões normais que atuam sobre essa seção são oriundas somente dos esforços de compressão da aplicação da protensão, visto que o cabo foi aplicado sobre o centro de gravidade da seção, não provocando momentos devido a protensão nessa região e não há momentos fletores solicitantes devido os carregamentos externos. O esforço de cisalhamento solicitante (V) pode ser obtido, para vigas biapoiadas, através da equação (4.13).

$$V = q\left(\frac{l}{2} - x\right) = 38{,}32 \cdot \left(\frac{15}{2} - 0\right) = 287{,}4kN \tag{4.13}$$

$$V_s = V - \gamma_p P \cdot sen(\alpha) = 287{,}4 - 1{,}2 \cdot 1200 \cdot sen(6°) = 162{,}0\ kN \tag{4.14}$$

$$\sigma = \frac{\gamma_p P}{A_p} = \frac{(1{,}2 \cdot 1200)}{188} = 76{,}6MPa \tag{4.15}$$

$$\tau = \frac{V_s}{t_w \cdot h_w} = \frac{162}{1{,}25 \cdot 60{,}8} = 21{,}32 \tag{4.16}$$

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{76{,}6^2 + 3 \cdot 21{,}32^2} = 85{,}04 < 227{,}3f_{yd} \tag{4.17}$$

Os resultados estão apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Resultados da verificação ao cisalhamento para seção de alma cheia no apoio

Variável	Valor	Unidade
q	38,32	kN/m
x	0,00	m
P_s	125,43	kN
V_s	162,00	kN
σ	76,60	MPa
τ	21,32	MPa
σ_{vm}	85,04	MPa

4.1.9.2 VERIFICAÇÃO DA SEÇÃO DO ALVÉOLO

A verificação para a seção do alvéolo foi feita considerando as mesmas equações e formulações usadas para analisar as tensões na região de alma cheia no apoio. As diferenças nesta seção são as solicitações e as características geométricas, visto que o momento de inércia e área são diferentes, por exemplo. Para obtenção das tensões normais nessa seção, deve-se considerar os efeitos do carregamento axial da força de protensão, os momentos introduzidos por tal força – já que ocorrem excentricidades do cabo nesta seção – e os momentos fletores oriundos das solicitações externas. As tensões que surgem devido os momentos fletores solicitantes externos devem ser obtidas considerando a seção trabalhando como mista, ou seja, considerar as características da seção homogeneizada.

A metodologia consiste em obter as tensões normais no bordo superior e inferior do perfil metálico e utilizar a maior em valor absoluto dentre as duas para se calcular as tensões de Von Mises. A tensão de cisalhamento é calculada como a solicitação de cortante divido pela área da seção de aço na região central do alvéolo.

- Tensões atuantes na seção no ato da protensão:

$$V = q\left(\frac{l}{2} - x\right) = 1{,}29 \cdot \left(\frac{15}{2} - 0{,}627\right) = 8{,}87kN \tag{4.18}$$

$$V_{min} = V_s - \gamma_p P \cdot sen(\alpha) = 8{,}87 - 1{,}2 \cdot 1200 \cdot sen(6°) = -141{,}65\ kN \tag{4.19}$$

$$M_{min} = \frac{q_{pp} l}{2} x - \frac{q_{pp} x^2}{2} = \frac{1{,}29 \cdot 15}{2} \cdot 0{,}627 - \frac{1{,}29 \cdot 0{,}627^2}{2} = 5{,}81kNm \tag{4.20}$$

$$\sigma_{sp} = \frac{\gamma_p P}{A_{al}} - \frac{\gamma_p Pe}{W_{sp}} + \frac{M_{min}}{W_{sp}} = \tag{4.21}$$

$$= \frac{1{,}2 \cdot 1200 \cdot 10^3}{148 \cdot 10^{-4}} - \frac{1{,}2 \cdot 1200 \cdot 0{,}66 \cdot 10^3}{132461 \cdot 10^{-6}} + \frac{5{,}81 \cdot 10^3}{132461 \cdot 10^{-6}} = 90{,}17MPa$$

$$\sigma_{ip} = \frac{\gamma_p P}{A_{al}} + \frac{\gamma_p Pe}{W_{ip}} - \frac{M_{min}}{W_{ip}} = \tag{4.22}$$

$$= \frac{1{,}2 \cdot 1200 \cdot 10^3}{148 \cdot 10^{-4}} + \frac{1{,}2 \cdot 1200 \cdot 0{,}66 \cdot 10^3}{132461 \cdot 10^{-6}} - \frac{5{,}81 \cdot 10^3}{132461 \cdot 10^{-6}} = 104{,}43MPa$$

$$\tau = \frac{|V_{min}|}{A_{al}} = \frac{141{,}65}{36} = 39{,}35MPa \tag{4.23}$$

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{104{,}43^2 + 3 \cdot 39{,}35^2} = 124{,}70 < 227{,}3 = f_{yd} \tag{4.24}$$

- Tensões atuantes em serviço:

$$V = q\left(\frac{l}{2} - x\right) = 38{,}32 \cdot \left(\frac{15}{2} - 0{,}627\right) = 263{,}37kN \tag{4.25}$$

$$V_{max} = V_s - \gamma_p P \cdot sen(\alpha) = 263{,}37 - 1{,}2 \cdot 1200 \cdot sen(6°) = 112{,}85\ kN \tag{4.26}$$

$$M_{max} = \frac{q_{pp} l}{2} x - \frac{q_{pp} x^2}{2} = \frac{38{,}32 \cdot 15}{2} \cdot 0{,}627 - \frac{38{,}32 \cdot 0{,}627^2}{2} = 172{,}67kNm \tag{4.27}$$

$$\sigma_{sp} = \frac{\gamma_p P}{A_{al}} - \frac{\gamma_p Pe}{W_{sp}} + \frac{M_{max}}{W_{sp}} =$$

$$= \frac{1{,}2 \cdot 1200 \cdot 10^3}{148 \cdot 10^{-4}} - \frac{1{,}2 \cdot 1200 \cdot 0{,}66 \cdot 10^3}{132461 \cdot 10^{-6}} + \frac{172{,}67 \cdot 10^3}{63781{,}5 \cdot 10^{-6}} = 92{,}83MPa \tag{4.28}$$

$$\sigma_{ip} = \frac{\gamma_p P}{A_{al}} + \frac{\gamma_p Pe}{W_{ip}} - \frac{M_{max}}{W_{ip}} =$$

$$= \frac{1{,}2 \cdot 1200 \cdot 10^3}{148 \cdot 10^{-4}} + \frac{1{,}2 \cdot 1200 \cdot 0{,}66 \cdot 10^3}{132461 \cdot 10^{-6}} - \frac{172{,}67 \cdot 10^3}{63781{,}5 \cdot 10^{-6}} = 101{,}77MPa \tag{4.29}$$

$$\tau = \frac{|V_{min}|}{A_{alw}} = \frac{112{,}85}{36} = 31{,}35MPa \tag{4.30}$$

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{101{,}77^2 + 3 \cdot 31{,}35^2} = 115{,}35 < 227{,}3 = f_{yd} \tag{4.31}$$

Observa-se que as tensões calculadas pelo critério de Von Mises para a seção estão abaixo do limite de escoamento do material do perfil metálico. Conclui-se que a seção resiste às solicitações de cisalhamento nesta região.

4.1.9.3 VERIFICAÇÃO DO MONTANTE

O montante mais solicitado pelo esforço cortante é aquele que está mais próximo aos apoios. A tensão de cisalhamento que ocorre na sua região central – região da solda – deve ser verificada comparando o a força resistente e a solicitação externa. Utilizando formulações apresentadas nas equações apresentadas na seção 3.7:

$$V_{rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}}\left(\frac{4}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{L_2 t_w y_a}{B} \cdot f_{yd} + Psen(\alpha_i)\right) = \tag{4.32}$$

$$\frac{1}{1{,}1}\left(\frac{4}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{0{,}15 \cdot 0{,}01259 \cdot 0{,}0963}{B} \cdot 250 \cdot 10^6 + 1200sen(6)\right) = 193{,}9kN$$

$$V_s = q\left(\frac{l}{2} - x\right) = 38{,}32 \cdot \left(\frac{15}{2} - 0{,}864\right) = 254{,}32kN \tag{4.33}$$

Observa-se que, para a seção mais próxima do apoio, a força solicitante é superior à máxima resistente. Para solucionar esse problema, pode-se estudar a implementação de uma geometria diferente. Ou seja, mudar as configurações das alturas de corte e altura de perfil castelado, modificar o perfil original, estudar a mudança dos materiais do perfil metálico, entre outras soluções.

Neste exemplo de cálculo, para solucionar esse problema, será adotada a seguinte alternativa: serão suprimidos todos os alvéolos da região mais solicitada, ou seja, toda a região anterior ao primeiro desviador da viga, assim, na região de maior esforço cortante, este será suportado pela viga com seção de alma cheia, o primeiro alvéolo se encontrará em uma região de menor solicitação, logo estará com menores tensões e o primeiro montante encontrará uma solicitação bem menor.

A equação (4.34) calcula qual é a solicitação nesse ponto, e verifica-se que esta é menor que a força resistente da peça.

$$V_s = q\left(\frac{l}{2} - x\right) = 38{,}32 \cdot \left(\frac{15}{2} - 2{,}76\right) = 181{,}66kN < 193{,}9kN \tag{4.34}$$

4.1.10 DIMENSIONAMENTO DOS CONECTORES DE CISALHAMENTO

Os conectores de cisalhamento usados para esse exemplo são do tipo pino com cabeça (*stud-bolt*). O cálculo é feito conforme apresentado na seção 3.5. A Tabela 4.10 apresenta os valores envolvidos nos cálculos de dimensionamento dos conectores.

Tabela 4.10 – Dimensionamento dos conectores *stud-bolt*

Variável	Valor	Unidade
A_{cs}	1,27	cm²
f_{cd}	25	MPa
E_{cs}	29403	MPa
f_{ucs}	415	MPa
L_{ef}	1,875	m
h_c	15	cm
A_{al}	102	cm^4
f_{yd}	227,27	MPa
Qrd 1	43,55	kN
Qrd 2	42,16	kN
Qn 1	5976,56	kN
Qn 2	2318,18	kN
N_{cnt}	55	-

$$Q_{rd} \leq \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \frac{A_{cs}\sqrt{f_{ck}E_{cs}}}{\gamma_{cs}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1{,}27 \cdot \sqrt{25 \cdot 29403}}{1{,}25 \cdot 10^3} = 43{,}55kN \\ \frac{A_{cs}\, f_{ucs}}{\gamma_{cs}} = \frac{1{,}27 \cdot 415}{1{,}25 \cdot 10^3} = 42{,}16kN \end{cases} \tag{4.35}$$

Pela equação (4.35), tem-se que Q_{rd} é igual a 42,16kN.

Utilizando a equação (4.37), calcula-se o número de conectores necessários.

$$n \cdot Q_{rd} \geq 0{,}85 f_{cd} L_{ef} h_c = 0{,}85 \cdot 25 \cdot 1{,}875 \cdot 0{,}15 \cdot 10^{-2} = 5976{,}65kN \tag{4.36}$$

$$n \cdot Q_{rd} \geq A_a f_{yd} = 102 \cdot 227{,}27 \cdot 10^{-4} = 2318{,}18kN$$

$$\Rightarrow n = \frac{2318{,}18}{42{,}16} \approx 55 \tag{4.37}$$

Aplicam-se 110 conectores em toda extensão da viga, visto que o número ‘n’ calculado na equação (4.37) é referente a metade da viga, como apontado no item 3.5. O espaçamento é de 13 cm entre eles.

4.1.11 VERIFICAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS

Os deslocamentos foram determinados usando os carregamentos equivalentes apresentados da Figura 4.5 e Figura 4.6. Na Figura 4.5, está representado o carregamento equivalente à protensão mais o carregamento devido peso próprio do perfil metálico castelado. A Figura 4.6 mostra o carregamento equivalente a aplicação da força de protensão pelo cabo reto e excêntrico e o todos os carregamentos aplicados sobre a viga. As características da seção adicionadas para cálculo das deformações consideram os efeitos de longo prazo no concreto, como apontado no item 3.8. A Figura 4.5-c e Figura 4.5d, mostram a deformada da VAMP sobre tais carregamentos. Os deslocamentos encontrados estão sintetizados na Tabela 4.11.

Os deslocamentos foram calculados utilizando o software Ftool v4.00.

- Cálculo da inércia efetiva:

$$I_{ef} = I_a + \sqrt{\frac{\sum Q_{rd}}{F_{hd}}}(I_{tr} - I_a) = \tag{4.38}$$

$$132461 + \sqrt{\frac{55 \cdot 42{,}16}{2318{,}18}} \cdot (539436 - 132461) = 539490\ cm^4$$

Tabela 4.11 – Deslocamentos máximos.

Flecha – Protensão (cm)	-3,21
Flecha – Em seviço (cm)	-1,47

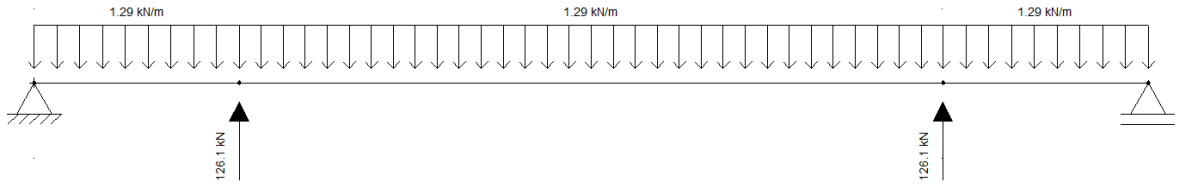


Figura 4.5 – Carregamentos durante o ato de protensão

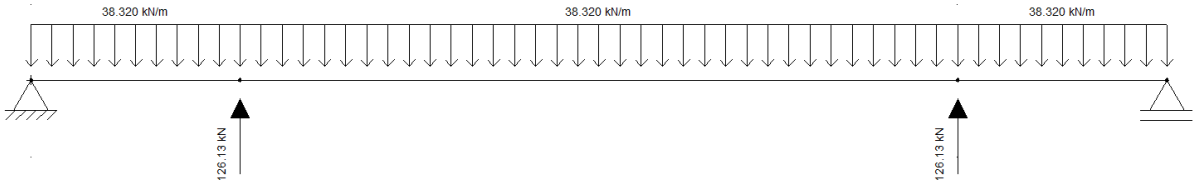


Figura 4.6 – Carregamentos em serviço.

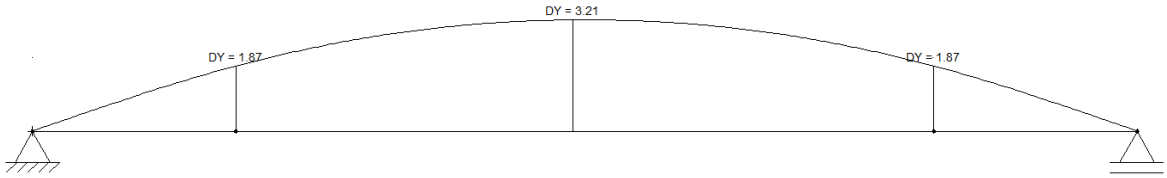


Figura 4.7 – Deslocamentos devido a protensão.

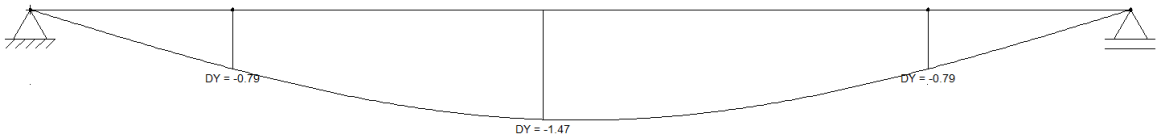


Figura 4.8 – Deslocamento em serviço.

Esses deslocamentos provocam acréscimos de tensão no cabo de protensão que são calculados pela equação (2.27). Este aumento da força de protensão ocorre porque o cabo acompanha a deformação da viga. Os valores da Tabela 4.12 mostram que o acréscimo de tensão que acontece pela variação de comprimento não é significativo para mudar o dimensionamento dos cabos de protensão e nem a verificação dos deslocamentos.

Tabela 4.12 – Cálculo dos acréscimos de tensão no cabo de protensão.

Parâmetro	Valor	Unidade
P	1200	kN
e	27,00	cm
F_{prot}	126,13	kN
L_p	7,505	m
ΔL_p	0,543	mm
E_p	202000	MPa
$\Delta\sigma_p$	14,62	Mpa
P’	1201,5	kN
$F_{prot'}$	126,28	kN

Onde:

P – força de protensão inicial

e – excentricidade do centroide dos cabos

F_{prot} – força vertical aplicada sobre a viga nos pontos dos desviadores

L_p – comprimento inicial do cabo de protensão

ΔL_p – variação do comprimento do cabo devido os deslocamentos

E_p – módulo de elasticidade do cabo de protensão

$\Delta\sigma_p$ – acréscimo de tensão no cabo de protensão

P’ – força de protensão após acréscimos

$F_{prot'}$ – força vertical aplicada sobre a viga nos pontos dos desviadores após os deslocamentos.

Vê-se claramente que a ordem de magnitude das forças equivalentes a protensão antes e após o deslocamento dos cabos é praticamente a mesma, ou seja, o acréscimo de tensão no cabo de protensão é desprezível para fins desse exemplo.

4.2 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS GEOMETRIAS DOS ALVÉOLOS

A seguir, uma análise comparativa será realizada entre as três geometrias apresentadas no item 2.2.1. Nesta análise serão determinados os carregamentos máximos que podem ocorrer em VAMP de diferentes alvéolos que trabalham nas mesmas condições da estrutura apresentada no exemplo de cálculo do item 4.1, ou seja, serão vigas biapoiadas que vencem um vão de 15 metros e que sejam construídas a partir do perfil metálico que possui as características apresentadas na Tabela 4.1 sob carregamento linearmente distribuído.

A análise é composta por três etapas:

- A primeira consiste em verificar qual a força de protensão máxima que pode ser aplicado a VAMP, considerando que a excentricidade máxima do cabo no centro da viga é a mesma para todos os perfis;
- A segunda etapa tem por objetivo verificar as peças a flexão na seção do alvéolo mais solicitado que é a seção que apresenta as limitações para as tensões que surgem devido a flexão. Nesta etapa será verificado qual o carregamento distribuído máximo que a viga resiste, ou seja, o carregamento que provoca as tensões máximas na peça antes de atingir os limites de escoamento do aço ou do esmagamento do concreto – conforme os limites apresentados no item 3.3;
- Na terceira e última análise, serão realizadas as verificações que se referem a força resistente do montante entre alvéolos.

4.2.1 DADOS

As três vigas que serão analisadas diferem somente na geometria dos alvéolos que as compõem e nas consequências de se utilizar essas geometrias. Dessa forma, são mantidas iguais para as três estruturas os seguintes parâmetros:

Vão (L): 15 metros

Aço – A36

- f_y = 250 MPa
- f_u = 400 Mpa
- Peso específico = 77kN/m³
- Módulo de elasticidade: 200GPa

Concreto

- f_{ck} = 35 Mpa
- Peso específico = 25kN/m³
- Módulo de elasticidade = 29,4GPa

Cabo de protensão

- Cordoalhas – CP 190 RB 12,7
- Excentricidade máxima do cabo: 5 cm da face inferior do perfil metálico.
- Traçado do cabo é reto.

Perfil Original: CVS 500x134

Altura da laje de concreto: 15cm.

Largura efetiva: 1,875 m – determinada como sendo 1/8 do vão.

As propriedades que dependem da geometria dos alvéolos consistem da altura do perfil castelado (h_{p1}), o número de alvéolos (N_{al}), o peso próprio da estrutura e a distância entre alvéolos (L_2).

Será adotado o mesmo valor para a razão altura do alvéolo/altura do perfil castelado para todas as geometrias (n=0,5).

A Tabela 4.13 apresenta os valores das variáveis geométricas para cada alvéolo.

Tabela 4.13 – Características geométricas para o alvéolo circular

Variável	Alvéolo Circular	Alvéolo Retangular	Alveólo Octogonal
h_{p1} (mm)	640	667	821
H_f (D_f) (mm)	320	333,5	410,5
n	0,5	0,5	0,5
k	0,48	-	-
h_{ch} (mm)	-	-	154
L_2 (mm)	154	333,5	154
N_{al}	30	22	26

Para a geometria circular foram utilizados os mesmos valores do exemplo anterior. A geometria retangular apresenta um comprimento L_2 igual à altura do furo e para o alvéolo octogonal foi determinado que a distância L_2 seria igual à do alvéolo circular, para fins de comparação. A altura da chapa espaçadora apresenta o mesmo valor de L_2.

Observa-se que para a mesma relação entre a altura do furo e do perfil castelado o alvéolo octogonal apresentou a maior expansão, por conta da presença da chapa espaçadora. O

alvéolo circular apresentou menor expansão e a geometria retangular apresenta maior distância entre alvéolos.

4.2.2 ANÁLISE DA FORÇA DE PROTENSÃO

A força de protensão foi determinada utilizando as formulações apresentadas no item 3.4. A Tabela 4.14 apresenta os valores encontrados para a força de protensão máxima que pode ser aplicado ao perfil metálico considerando as geometrias estudadas.

Tabela 4.14 – Determinação da força de protensão.

	Alvéolo circular		Alvéolo retangular		Alvéolo octogonal	
	Alma cheia	Alvéolo	Alma cheia	Alvéolo	Alma cheia	Alvéolo
q_{min} (kN/m)	1,29	1,29	1,32	1,32	1,40	1,40
M_{min} (kNm)	36,36	36,32	37,15	37,07	39,40	39,34
P (kN)	1411,93	1244,20	1422,74	1248,22	1494,58	1295,91

O carregamento q_{min} é dado somente pelo peso próprio dos perfis metálicos. Observa-se que a viga de alvéolo circular apresenta menor peso próprio e o octogonal apresenta o maior. Isso acontece porque, na construção do alvéolo octogonal ocorre a adição da chapa espaçadora e na construção de vigas casteladas de alvéolo circular parte do material é retirada da peça. Por outro lado, a força de protensão máxima que pode ser aplicada no alvéolo octogonal é maior em comparação com as outras geometrias.

4.2.3 ANÁLISE DA FLEXÃO

Do item anterior observa-se que a seção do alvéolo mais solicitado pelos momentos fletores é quem determina a força de protensão máxima. Os alvéolos mais próximos do centro do vão são os mais solicitados e, para evitar ultrapassar os limites apresentados no item 3.3, não a força de protensão calculadas para essas regiões não pode ser ultrapassada.

Aplicando uma força de protensão de 1200 kN em cada geometria a 5 cm da face inferior do perfil metálico, foram determinados os valores de carregamentos $q_{máx}$ que podem ser aplicados sobre as VAMP para que ocorra a ruptura do elemento estrutural, ou seja, quando se atinge os limites determinados no item 3.3. A Tabela 4.15 mostra os valores encontrados para cada geometria.

A verificação foi realizada somente para a seção do alvéolo mais solicitado pois esta apresenta sempre as maiores tensões por apresentar menor área da seção transversal e menor inércia, quando comparada com a seção cheia.

Tabela 4.15 – Carregamento máximo de protensão para cada geometria de alvéolo.

	Alvéolo circular		Alvéolo Retangular		Alvéolo Octogonal	
q (kN/m)	71,44		76,1		106,2	
M_{max} (kNm)	2009,25		2140,31		2989,88	
Tensão limite (MPa)	Laje de concreto	Perfil metálico	Laje de concreto	Perfil metálico	Laje de concreto	Perfil metálico
	24,5	-227,27	24,5	-227,27	24,5	-227,27
Tensão atuante (MPa)	24,5	-149,58	24,5	-154,76	24,5	-185,85

Observa-se que o alvéolo octogonal apresentou maior resistência a flexão, garantindo um carregamento final de até 106,2 kN/m. Este resultado é esperado pois este alvéolo apresentou maior expansão ao se castelar a viga, garantindo maior rigidez a flexão.

4.2.4 ANÁLISE DO CISALHAMENTO

Para comparar as geometrias dos alvéolos, a resistência dos montantes será calculada conforme os procedimentos apresentados nos itens 3.7 e 4.1.9.3. A força resistente de cada montante será calculada e observa-se que os efeitos da protensão não serão considerados, visto que nesse exemplo o traçado do cabo de protensão é reto.

A Tabela 4.16 apresenta os valores das variáveis envolvidas e das resistências encontradas.

Tabela 4.16 – Análise comparativa da resistência dos montantes.

Variável	Alvéolo circular	Alvéolo retangular	Alvéolo octogonal
L_2 (mm)	154,00	333,50	154,00
t_w (mm)	12,50	12,50	12,50
y_a (mm)	96,33	98,58	109,12
B (mm)	474,00	667,00	462,00
V_{rd} (kN)	68,40	107,80	79,55

Observa-se que o alvéolo retangular apresenta a maior resistência dentre as geometrias. Isso acontece por este apresentar uma maior distância entre alvéolos consecutivos. Comparando as geometrias circular e octogonal, estas apresentam os mesmos comprimentos para L_2, porém, o alvéolo octogonal apresentou maior resistência em seu montante por apresentar maior valor de y_a.

Por fim, considerando as três análises, fica claro as vantagens de se utilizar estruturas alveolares pois estas podem apresentar grandes capacidades resistentes. Destaca-se os alvéolos octogonais que apresentam um melhor comportamento para resistir aos esforços analisados.

5. CONCLUSÃO

Neste estudo, apresenta-se uma proposta preliminar de análise do comportamento de vigas alveolares mistas protendidas. Através da compilação de informações encontradas em bibliografia referente a estruturas similares, foram elaboradas formulações sobre atuação de protensão em vigas alveolares mistas.

Foi demonstrado, através das análises e formulações analíticas, que a implementação das técnicas construtivas estudas nesse documento resulta em elementos estruturais com um comportamento de grande interesse para a construção civil. Da combinação das técnicas envolvidas na construção de VAMP, obtêm-se uma peça estrutural que apresenta excelente resposta às solicitações externas.

A protensão se demonstrou como grande aliada pois entrega uma maior resistência a peça estrutural, tanto para solicitações de momentos fletores quanto pra solicitações de esforço cortante. O traçado poligonal dos cabos de protensão é mais eficiente, quando comparado com o traçado reto, pois este introduz esforços que contrabalanceiam as tensões provocadas pela flexão da peça de forma que a excentricidade da aplicação da força acompanha o diagrama de momentos fletores solicitantes. Isso implica em um melhor aproveitamento da força de protensão. Observa-se também que o traçado poligonal contrabalanceia as solicitações de cisalhamento a inclinação do cabo de protensão. Assim, esse traçado apresenta vantagens significativas quando comparados com o traçado reto dos cabos.

Estudando a geometria dos alvéolos de VAMP, observa-se a grande influência que estes apresentam nas resistências desses elementos estruturais. As limitações para implementação dos alvéolos circulares fazem ser necessário um estudo mais elaborado do comportamento das vigas que apresentam essa característica geométrica. Alvéolos retangulares apresentaram maior resistência para os montantes entre alvéolos quando comparado com as outras geometrias porque sua construção resulta em maiores distâncias entre aberturas consecutivas. A aplicação de perfis expandidos, como o alvéolo octogonal, mostra que, além da utilização do castelamento do perfil metálico, a adição da chapa espaçadora entrega a viga maior rigidez a flexão e garante que esta trabalhe melhor aos esforços fletores solicitantes.

Esse estudo é apresentado de forma pioneira no âmbito da construção civil por estudar um elemento estrutural que apresenta essa grande combinação de técnicas construtivas. Observa-se que as formulações presentes aqui foram desenvolvidas a partir de pensamentos relacionados com assuntos similares encontrados na literatura. Visto que este trabalho tem um enfoque didático, estudos futuros sobre o comportamento dessas estruturas devem ser

realizados para corroborar os postulados deste documento. Dessa forma, os resultados aqui apresentados devem ser tomados com cautela e toda e qualquer verificação demonstrada nesse estudo é preliminar e podem servir de base para formulações futuras baseadas na experimentação e aplicação em situações acadêmicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS D1.5M/D1.5. Structural Welding Code – Steel. Miami, FL. United States of America, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7482: Fios de aço para estruturas de concreto protendido – Especificação. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7483: Cordoalhas de aço para estruturas de concreto protendido – Especificação. Rio de Janeiro, 2008.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7197: Projeto de estruturas de concreto protendido – Procedimento. Rio de Janeiro, 1989.

BATHE, J. K. (2016). “Finite Element Procedures.” Prentice Hall, Pearson Education, Inc. 2nd Edition, 4th printing. Massachusetts, United States.

CAVALCANTE, O.R.O. (2005). Estudo das tensões na solda da alma de vigas mistas de aço alveolares em estruturas mistas. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 171 p.

CAVALCANTE, O.R.O. (2010). Estudo de conectores de cisalhamento do tipo ‘V’ em vigas mistas. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD – 006A/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 192p.

CISER. Parafuso e porcas. *Stud-Bolts* CISER – Prático, Rápido e Seguro. Catálogo disponível em: <http://www.ciser.com.br/htcms/media/pdf/destaques/br/folheto-stud-bolts.pdf> Acesso em: 10 Dez. 2018.

FERREIRA, A. C. (2007). Vigas metálicas protendidas: Análise estática, modal e de ruptura do cabo de protensão e aplicativo computacional para projetos. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-003A/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 252p.

KNOWLES, P.R. "Castellated Beams". Structural and Building Board, Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Part 1. 1991, 90, June, 521-536.

LAWSON, R. M.; HICKS, S. J. (2011). Design of composite beams with large web openings. Published by SCI, Ascot, Berkshire, UK.

LUBKE, G. P. (2017). Dimensionamento otimizado de vigas alveolares de aço. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES. 204 p.

MELO, M. L. (2016). Protensão em Pontes de Vigas Mistas em aço e Concreto. Projeto de Graduação, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 102p.

NELSEN, A. C. H. (2013). Comportamento estrutural de vigas mistas de aço e concreto com protensão externa. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP. 194p.

NELSEN, A. C. H.; SOUZA, A. S. C. (2012). Vigas mistas de aço e concreto com protensão externa: conceitos e aplicações. Congresso Latino-americano da construção metálica. Associação Brasileira de Construção Metálica. São Paulo, SP.

NEW YORK STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (2008), Steel construction manual, 3rd ed. New York, USA.

NUNZIATA, V. (1999). Strutturre in acciaio precompresso. Editora Dario Flaccovio. Palermo, Itália.

PFEIL, W.; (1991). Concreto Protendido: processos construtivos, perdas de protensão. Editora EDC, 3a Edição. Rio de Janeiro, Brasil.

PFEIL, W.; PFEIL, M. (2016). Estruturas de Aço – Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR 8800:2008. Editora LTC, 8a Edição. Rio de Janeiro, Brasil.

QUEIROZ, G. (2012). Estruturas mistas. Volume 1. Instituto aço Brasil/CBCA, 2ª Edição. Rio de Janeiro, Brasil.

VERÍSSIMO, G. S. (2007). Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento. Tese de Doutorado em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 290p.

VERÍSSIMO, G. S.; et al. (2012). Dimensionamento de vigas alveolares de aço. Congresso Latino-americano da construção metálica. Associação Brasileira de Construção Metálica. São Paulo, SP.