

João André Gomes de Sousa

UTILIZAÇÃO, ANÁLISE E MODELAÇÃO DE PERFIS COMPOSTOS EM LSF— CASO DAS VERGAS

USE, ANALYSIS AND MODELLING OF COMPOSITE PROFILES IN LSF CASE OF THE HEADERS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Estruturas,
orientada pelo Professor Doutor Paulo Providência e pelo Professor Doutor Anísio Andrade.

Fevereiro de 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

João André Gomes de Sousa

Utilização, Análise e Modelação de Perfis Compostos em LSF– Caso das Vergas

Use, Analysis and Modelling of Composite Profiles in LSF Case of the Headers

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Estruturas,
orientada pelo Professor Doutor Paulo Providência e pelo Professor Doutor Anísio Andrade.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, declina qualquer
responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões
que possam surgir

Coimbra, 1 de Fevereiro de 2017

AGRADECIMENTOS

Tenho a agradecer...

...ao meu Orientador, Professor Paulo Providência, pela sua disponibilidade, orientações, supervisão, encorajamento e paciência;

... ao Professor Anísio Andrade pelos seus pareceres e opiniões;

... à PERFISA[®] - Fábrica de Perfis Metálicos, S.A., pela parceria estabelecida e pela disponibilização de informações técnicas;

... ao Engenheiro Virgílio Ferreira e ao Engenheiro Duarte Oliveira, pelas orientações, sem eles não teria sido possível estabelecer a parceria entre o autor desta dissertação e a PERFISA[®];

... aos meus pais, Carlos e Maria, por estarem sempre presentes nos momentos mais difíceis e por aquilo que sacrificaram em prol da minha educação e formação académica;

... à minha namorada, Sofia Martinho, pelo amor e apoio incondicional;

...ao meu padrinho, Carlos Barros, pelo encorajamento e pelas palavras sábias;

... às minhas irmãs, Alexandra e Sofia, pelo apoio e encorajamento;

...aos meus amigos:

Bruno Pires, Ivo Serra, Bruno Pinheiro, Ângelo Branco, Catarina Agreira e Licas, pela amizade e pela camaradagem dentro e fora do DEC;

Paula Oliveira, Laura Correia, Daniela Cardoso, Luísa Fonte e Lúcia Barreira, pela amizade e pelos bons momentos.

João Alves, Jorge Nogueira, Adriana Lopes, Ema Gouveia, Tita, Daniel Bastos, João Neto Adolfo e Beta, pela presença e pelo apoio.

... a todos o meu grande “OBRIGADO”...

Em memória da minha avó Rosa.

RESUMO

As estruturas em aço leve (LSF) surgiram nos últimos anos no nosso país. Trata-se de uma solução estrutural metálica com origem nos EUA e baseada na tipologia habitual naquele país para as construções em madeira, particularmente de moradias unifamiliares. Na prática, estas estruturas caracterizam-se por uma distribuição espacial da rigidez e resistência, que possibilita que, após a fundação, ela seja constituída apenas por perfis enformados a frio de espessura muito reduzida: estes elementos são muito leves, de modo que a erecção é efectuada apenas por dois operários com alguma experiência neste tipo de construção, dispensando qualquer tipo de equipamento pesado. Paradoxalmente, embora esta solução seja um nicho dentro de outro nicho, que é o das estruturas metálicas em Portugal, são já várias as empresas, normalmente de dimensão muito reduzida, especializadas apenas neste tipo de construção, que conseguem prosperar no campo das novas edificações ou da reabilitação de estruturas existentes.

Embora a especificidade da gestão do processo construtivo destas estruturas tenha sido rapidamente apreendida no nosso país, o seu dimensionamento ainda é relativamente opaco, porque se baseia no Método Prescritivo desenvolvido nos EUA. A presente dissertação surge na esteira do trabalho pioneiro desenvolvido por Hugo Mendes (Mendes, 2015) que, entre outros aspectos, procurou determinar a validade da aplicação do Método Prescritivo norte-americano em território nacional e no espaço europeu coberto pelos Eurocódigos.

Assim, a presente dissertação procura, a partir do estudo do caso particular das vergas – elementos estruturais usados para vencer as aberturas nos painéis usados nestas estruturas para formar paredes resistentes –, (i) avaliar se a aplicação do Método Prescritivo norte-americano está em sintonia com os Eurocódigos e (ii) desenvolver um procedimento sistemático para o dimensionamento destes elementos dirigido aos intervenientes do sector que dele possam necessitar, ou seja, projectistas e empresas de produção de perfis.

Perante a opção entre um estudo mais geral que cobrisse diferentes tipos de elementos estruturais, ou a focalização num único tipo de elementos, escolheu-se a última, (i) não apenas porque é essa a necessidade dos intervenientes referidos, ou seja, algo de concreto, (ii) mas também porque a metodologia agora desenvolvida, e levada até às suas últimas consequências práticas, poderá ser replicada de modo a orientar a realização de procedimentos similares para outros elementos estruturais: tal empreendimento é obviamente demasiado moroso e

dispendioso para uma simples dissertação de mestrado, mas poderá ser efectuada por uma associação industrial em conjunto, eventualmente, com a universidade.

Este estudo requereu obviamente uma análise comparativa detalhada entre o procedimento que está na base do Método Prescritivo e aquele que resulta da aplicação dos Eurocódigos. Uma conclusão importante, que desde já se expressa por ser contrária ao que a comunidade técnica admitia, é que *o Método Prescritivo não cumpre os requisitos dos Eurocódigos*.

Em termos práticos, para a comparação entre o Método Prescritivo e a aplicação dos Eurocódigos, considerou-se o problema da determinação do máximo vão admissível da verga. Para a solução deste problema foram estabelecidos seis procedimentos, que diferem em termos das hipóteses básicas em que se alicerçam, ou, mais precisamente, nas acções, suas combinações e na modelação dos elementos resistentes. O estudo inclui a aplicação sistemática, orientada a uma utilização profissional, de dois daqueles procedimentos para diversos casos, o método 2 (AISI) e o método 6 (EC). Todos os resultados foram cuidadosamente analisados, permitindo retirar as conclusões mais significativas.

Palavras-Chave: Método Prescritivo para LSF | Eurocódigos | Vergas | Dimensionamento de Elementos Metálicos

ABSTRACT

Light steel frame (LSF) has appeared in recent years in our country (Portugal). It is a metallic structural solution originating in the USA and based on the usual typology in that country for wood constructions. In practice, these structures are characterized by a spatial distribution of stiffness and strength, which makes it possible, after foundation, to consist only of cold-formed profiles of very low thickness: these elements are very light so that the erection is carried out only by two workers with some experience in this type of solution, dispensing any type of heavy equipment. Paradoxically, although this solution is a niche within another niche, which is that of metallic structures in Portugal, there are already several companies, usually of very small size, specialized only in it, that can thrive in the field of new buildings or rehabilitation existing structures.

Although the specificity of the management of the constructive process of these structures has been easily apprehended in our country, its design is still relatively opaque because it is based on the Prescriptive Method developed in the USA. This dissertation is following of the pioneering work developed by Hugo Mendes (Mendes, 2015), who, among other aspects, sought to determine the validity of the application of the US Prescriptive Method in national territory, and therefore in the space of the european continent covered by the Eurocodes.

Thus, the present dissertation seeks, based on the study of the particular case of headers - and structural elements used to overcome openings in the panels used in these structures to form resistant walls -, (i) to evaluate if the application of the North American Prescriptive Method is in line with the Eurocodes and (ii) to develop a systematic procedure for the design of these elements that can be used by those in the sector who need it, ie designers and producers of profiles.

Faced with the choice between a more general study covering different types of structural elements, or focusing on a single type, the latter was chosen, (i) not only because it felt to be the need of the intervening actors, that is, concrete (ii) but also because the methodology now developed and carried to its ultimate practical consequences will guide similar procedures for other structural elements: such an undertaking is obviously too time-consuming and costly for a simple master's thesis, but can be done by an industrial association together, eventually, with the university.

This study obviously required a detailed comparative analysis between the procedure that underlies the Prescriptive Method and that which results from the application of the Eurocodes. An important conclusion, which is already expressed as being contrary to what the technical community admitted, is that the Prescriptive Method does not meet the requirements of the Eurocodes.

In practical terms, for the comparison between the Prescriptive Method and the application of the Eurocodes, the problem of determining the maximum allowable span of the header was considered. In order to solve this problem, six procedures have been established, differing in terms of the basic hypotheses on which they are based, or, more precisely, on the actions, their combinations and the modeling of the resistant elements. The study includes the systematic application of two of these procedures for a number of cases, method 2 (AISI) and method 6 (EC). All the results were carefully analyzed, allowing the conclusions to be drawn.

Keywords: Prescriptive Method | Eurocodes | Headers | Design of metal elements

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE.....	vii
SIMBOLOGIA	1
1. INTRODUÇÃO.....	5
1.1. Enquadramento	5
1.2. Objectivos e etapas da dissertação.....	6
2. ESTADO DE ARTE.....	8
2.1. Vantagens na utilização de soluções em LSF	8
2.1.1. Sustentabilidade.....	9
2.1.2. Reabilitação Estrutural	10
2.2. Desvantagens na utilização de soluções em LSF.....	12
2.3. Sistematização das situações em que se usam perfis compostos em LSF	12
2.3.1. Pisos.....	12
2.3.2. Paredes.....	14
2.4. Propriedades efectivas das secções em aço leve.....	15
2.4.1. Classificação de secções.....	15
2.4.2. Secções de classe 4 – Propriedades efectivas.....	17
3. Metodologia.....	19
3.1. Considerações Iniciais	19
3.2. Estudo de Caso.....	21
3.2.1. Método 1	23
3.2.2. Método 2.....	23
3.2.3. Método 3.....	30
3.2.4. Método 4.....	41
3.2.5. Método 5.....	44
3.2.6. Método 6.....	47
4. ANÁLISE CRÍTICA DE RESULTADOS.....	64
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	75
5.1. Conclusões gerais	75
5.2. Conclusões sobre as metodologias da AISI e dos Eurocódigos e sua comparação ...	75
5.3. Trabalhos futuros	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

SIMBOLOGIA

Letras maiúsculas latinas

A_i	área do elemento i
B_i	dimensão da base do elemento i
C	coeficiente parcial (tabela C 3.4.1-1 da especificação para a concepção de elementos estruturais de aço enformados frio (AISI, 2007))
C_e	coeficiente de exposição (cl. 5.2 (7) da NP EN 1991-1-3)
C_c	coeficiente de esbelteza da alma
C_R	coeficiente do raio de concordância interno
C_S	coeficiente de comprimento de apoio do carregamento
C_t	coeficiente térmico (cl. 5.2 (8) da NP EN 1991-1-3)
C_z	coeficiente dependente da zona (Anexo Nacional da NP EN 1991-1-3)
D	valor característico da acção permanente
E	módulo de elasticidade
F_{Ed}	esforço transversal actuante
$G_{k,j}$	valor característico da acção permanente j
H	altitude do local
H_i	altura do elemento i
I	Inércia da secção transversal da verga
I_{eff}	Inércia da secção transversal da verga com propriedades efectivas
$I_{eff,red}$	Inércia da secção transversal da verga com propriedades efectivas reduzida;
L_p	valor característico da sobrecarga do piso
L_r	valor característico da sobrecarga da cobertura
$M_{c,Rd}$	momento flector resistente
M_{Ed}	momento flector actuante
P	carga concentrada

$Q_{k,l}$	valor característico da acção variável de base da combinação 1
$Q_{k,i}$	valor característico da acção variável da componente i
$R_{w,Rd}$	resistente local ao corte da alma
S_s	comprimento de apoio
Z_G''	centro geométrico da secção transversal da verga
$Z_{G,i}$	centro geométrico da secção do elemento i

Letras minúsculas latinas

\bar{b}	largura da parede do elemento
$b_{c,i}$	largura nominal do elemento idealizado i
\bar{b}_{eff}	largura efectiva da zona de compressão do elemento
b_p	largura nominal de uma parede do perfil, definida pela distância entre os pontos médios, P, dos cantos que a delimitam
$b_{p,i}$	largura idealizada de um banzo do perfil
c	dimensão recta da alma medida ao longo do plano que a contém
c_p	largura nominal de um reforço do perfil
$c_{p,i}$	largura idealizada de um reforço do perfil
f_y	tensão de cedência do material
h_p	largura nominal de uma alma do perfil
$h_{p,i}$	largura idealizada de uma alma do perfil
h_w	comprimento da alma medido entre os eixos dos banzos
k_7	coeficiente (cl. 6.1.7.1 (4) da EN 1993-1-3)
k_σ	coeficiente de encurvadura local da parede do elemento
n	número total de cantos curvos
m	número total de elementos planos da secção idealizada
q	valor de cálculo de uma carga uniformemente distribuída
r	raio de cálculo do elemento
$r_{int,i}$	raio de concordância interno do elemento i
s	valor de cálculo da acção da neve

s_k	valor característico da acção da neve ao nível do solo
t	espessura da parede do elemento
t_{cor}	espessura de cálculo da parede do elemento
u_i	coeficiente de forma para a carga da neve (cl. 5.3 da NP EN 1991-1-3)
$W_{eff,min}$	módulo de flexão mínimo da secção transversal efectiva
$W_{el,y}$	módulo elástico da secção transversal da viga, flexão em torno do eixo y
z_i	centro de gravidade do elemento i

Letras minúsculas gregas

$\gamma_{G,j}$	coeficiente parcial relativo à acção permanente j
γ_{M0}	coeficiente parcial de segurança, segundo o Anexo Nacional da NP EN 1993-1-1, $\gamma_{M0} = 1,0$
γ_{M1}	coeficiente parcial de segurança
$\gamma_{Q,1}$	coeficiente parcial relativo à acção variável 1
$\gamma_{Q,i}$	coeficiente parcial relativo à acção variável i
δ	factor de redução
δ_1	flecha resultante das acções permanentes associadas à acção variável máxima;
δ_2	flecha resultante da acção variável de base associada aos valores de combinação das restantes acções variáveis;
δ'_2	flecha resultante da acção variável máxima;
$\delta_{máx}$	flecha máxima resultante do valor acção da combinação característica
\mathcal{E}	parâmetro
θ	ângulo formado entre o plano que contém a alma do elemento e o plano que contém a superfície de carregamento
$\bar{\lambda}$	esbelteza normalizada local do elemento
ρ	factor de redução da largura efectiva
ϕ_b	factor de resistência
ϕ_j	ângulo do canto curvo j

ψ	razão entre os valores da tensão normal nas extremidades do elemento
$\psi_{0,i}$	coeficiente para determinação do valor de combinação de uma variável

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

No âmbito das estruturas em aço leve, ou, em inglês, light steel frames (LSF), o estudo efectuado nesta dissertação envolve três fases chave para alcançar os objectivos propostos mais adiante: (i) utilização, (ii) análise e (iii) modelação de perfis compostos em LSF. Como é sabido, as LSF são estruturas com uma tipologia característica para edificações dirigidas maioritariamente ao mercado da habitação, que tiveram origem, nos EUA, por adaptação directa das estruturas em madeira tipicamente utilizadas naquele sector desse país.

A principal característica destas estruturas de aço é a dispersão da rigidez e resistência da estrutura, utilizando sobretudo elementos lineares – perfis enformados a frio de espessura muito reduzida o que explica a designação de “leve” – em vez das soluções tradicionais que envolvem um reduzido número de elementos lineares em pontos-chave da estrutura e/ou elementos laminares contínuos. Esta dispersão, cuja vantagem surge sobretudo na gestão do processo de erecção em resultado da leveza dos elementos construtivos, requer porém a definição de novos procedimentos de análise e dimensionamento estruturais.

A distribuição da rigidez e resistência destas estruturas é conseguida por macro-elementos pseudo-laminares formados por uma série de perfis dispostos paralelamente e a uma distância fixa – aspecto muito importante – uns dos outros, p. ex. 60 cm. A estrutura, normalmente restringida a um máximo de dois pisos e a uma configuração paralelepípedica e com vãos limitados é definida pela ligação destes macro-elementos com função de parede ou laje. É a conjugação destes aspectos que possibilita a utilização quase exclusiva de perfis de espessura reduzida – o papel estrutural dos elementos laminares em madeira ou OSB, aos quais aqueles perfis estão ligados, pode ser considerado secundário, ver (Mendes, 2015).

Por vezes, porém, por exemplo junto às aberturas introduzidas naqueles macro-elementos laminares, o desvio do percurso das cargas e outras forças dá origem a valores muito elevados das resultantes, que são excessivos para os perfis de aço leve. Estas regiões das estruturas LSF são denominadas zonas críticas e incluem (i) aberturas em paredes, (ii) aberturas em pavimentos, (iii) aberturas em coberturas, (iv) sistemas de contraventamento, (v) consolas curtas e (vi) ligação de duas ou mais paredes. Nestes casos, em vez de recorrer a soluções tradicionais noutros materiais, como o betão armado ou perfis de aço de espessura maior, que

reduziriam parte da vantagem competitiva associada a esta solução pela ligeireza do processo construtivo, opta-se pela formação de elementos compostos por ligação de vários perfis de espessura reduzida.

Assim, a concepção, modelação, análise, avaliação e sistematização de perfis compostos para LSF, tendo em conta tanto os aspectos de fabrico em obra como de modelação análise e dimensionamento em projecto e, claro, o custo, é muito importante, porque deve permitir desenvolver soluções eficazes e eficientes e, obviamente, seguras.

No âmbito desta dissertação, serão abordadas e estudadas as possíveis soluções que o projectista poderá adoptar no caso particular das aberturas em paredes, ou, mais especificamente, da análise e dimensionamento das respectivas vergas. Optou-se por um estudo detalhado deste caso particular – o qual é levado às suas últimas consequências em termos da informação necessária ao projectista –, em vez de um estudo mais geral, e portanto menos objectivo e conclusivo, de todo e qualquer tipo de zona crítica. O procedimento aqui concebido, desenvolvido e implementado, pode ser visto como um caso piloto, que poderá ser replicado para outras situações: porém, a cobertura de todas as situações possíveis requer obviamente outros recursos, em termos de meios, investigadores e tempo, que não os que estão atribuídos a uma dissertação de mestrado – poderá eventualmente ser dirigida por uma associação industrial de empresas do ramo, possivelmente com a colaboração da Universidade.

1.2. Objectivos e etapas da dissertação

Os principais objectivos da presente dissertação são os seguintes:

- Sistematização das situações em que se usam perfis compostos;
- Determinação das configurações mais adequadas para estes perfis compostos, tanto do ponto de vista de comportamento estrutural como da possibilidade e facilidade de execução, no âmbito das técnicas construtivas das LSF;
- Desenvolvimento de um procedimento para análise, dimensionamento e modelação de perfis compostos em aço leve para LSF sujeitos a flexão;

- Aplicação desse procedimento usando os perfis de um produtor nacional (PERFISA®) e com geração de quadros de aplicação expedita.

Optou-se por uma estrutura leve para a própria dissertação, a qual assenta em dois capítulos fundamentais: o estado de arte e o estudo de caso. As principais etapas desta dissertação são apresentadas de seguida:

- (i) Estudo da bibliografia no âmbito das construções em LSF (capítulo 2);
- (ii) Sistematização das situações em que se usam perfis compostos (capítulo 2);
- (iii) Identificação e discussão das hipóteses básicas que alicerçam os procedimentos de modelação, análise e dimensionamento de perfis compostos, especificamente, no caso das vergas (capítulo 3);
- (iv) Método Prescritivo norte-americano: estudo, análise, clarificação da nomenclatura e unidades e comparação com a metodologia e requisitos dos Eurocódigos (capítulo 3);
- (v) Aplicação do Método Prescritivo norte-americano e dos Eurocódigos a um Estudo de Caso (capítulo 3);
- (vi) Análise crítica de resultados e conclusões (capítulo 4);
- (vii) Conclusões gerais e trabalhos futuros (capítulo 5).

2. ESTADO DE ARTE

O fabrico de perfis de aço enformado a frio consiste, basicamente, na dobragem e/ou quinagem de chapas de aço alongadas e com espessura reduzida à temperatura ambiente.

A construção de edifícios em LSF já se pratica há quase um século nos EUA e na Austrália. Desde meados da década de 1980 que, nos EUA, o sistema construtivo em LSF compete directamente com o sistema construtivo em madeira para edifícios de pequeno porte. No decurso de alguns eventos históricos, como furacões tropicais devastadores, as soluções em aço leve ganharam terreno, ora porque permitiam uma rápida execução que levava a uma substituição veloz de estruturas de madeira devastadas pelas tempestades tropicais, ora porque era o tipo de material disponível comercialmente associado a um bom comportamento estrutural (Silvestre et al, 2013).

Embora, a construção de estruturas de edifícios em aço leve se pratique desde os anos 1920, só em 1997 foi publicado nos EUA um documento que padronizava determinados requisitos, e que continha um método que normalizava os procedimentos e regras de execução com o intuito de facilitar o manuseamento e aplicação deste sistema construtivo. Este método é denominado por Método Prescritivo e foi desenvolvido, conjuntamente, pelo HUD (Department of Housing and Urban Development), NAHB (National Association of Home Builders) e pelo AISI (American Iron and Steel Institute) (Silvestre et al, 2013).

Já na Europa, o uso de estruturas em aço leve é mais “tímido” quando comparado com os EUA. No entanto, alguns países como o Reino Unido, a Dinamarca e a Suécia têm sido as locomotivas para o incremento do uso e/ou adopção deste tipo de solução no continente Europeu. Relativamente a Portugal, pode-se constatar que após a entrada no novo milénio, o uso deste tipo de solução tem vindo a aumentar, ainda que de forma lenta. No entanto, quando comparado com o betão armado e o aço laminado a quente, o aço leve é muito menos usado, seja pelo desconhecimento do desempenho estrutural deste tipo de estrutura (LSF), seja pelo menor enraizamento desta técnica construtiva na sociedade portuguesa (Silvestre et al, 2013).

2.1. Vantagens na utilização de soluções em LSF

As estruturas de edifícios em aço leve, ou seja, formadas por perfis ditos de aço leve, apresentam diversas vantagens. Em termos de eficiência estrutural, torna-se facilmente

perceptível que esta é extremamente elevada, uma vez que, a relação entre a capacidade resistente e o peso do elemento em LSF é muito superior à dos elementos estruturais em betão armado – aliás, o peso total de uma solução em aço leve é semelhante à de uma solução tradicional em aço laminado a quente. Os perfis em aço leve são, também, altamente otimizados a nível de obtenção de diversas soluções estruturais devido ao vasto leque disponível comercialmente em termos de formas e dimensões das secções (Silvestre & Camotim, 2006).

Outra vantagem, neste caso relativamente aos perfis laminados a quente, deve-se ao facto do fabrico dos perfis ser feito à temperatura ambiente, exibindo, desta forma, menores tensões residuais. Por outro lado, a forma da secção transversal dos perfis permite o seu encaixe, o que reduz o volume necessário para armazenamento, permitindo a optimização do espaço do estaleiro de obra, ou até a diminuição deste, e facilita o seu transporte. Finalmente, este tipo de construção permite a fácil integração doutras especialidades (Silvestre & Camotim, 2006).

Estas vantagens combinam-se para o grande trunfo deste tipo de solução (Silvestre et al, 2013) que é a possibilidade de permitir uma rápida execução: as estruturas em aço leve são fáceis de construir com uma equipa reduzida, que pode ser constituída por apenas duas pessoas, e dispensam o uso de equipamento pesado. Esta particularidade leva ao forte interesse pelas LSF na reabilitação estrutural, particularmente em zonas históricas, onde o espaço operacional, tanto interior como exterior, pode ser escasso, ou em locais onde a acção sísmica seja relevante.

2.1.1. Sustentabilidade

Em termos de sustentabilidade, o aço em geral é um material altamente sustentável uma vez que pode ser reciclado inúmeras vezes mantendo as suas propriedades inalteradas (Silva et al, 2010).

Para além deste aspecto fundamental, quando concebidas de forma correcta (impossibilidade de acumulação de água e de detritos) as estruturas de aço, em geral, podem ter uma durabilidade superior à especificada no projecto, ou seja, um maior período de vida útil. No âmbito da abordagem de ciclo de vida de uma estrutura de aço, a durabilidade desta assume uma grande importância quando associada à adaptabilidade de elementos estruturais em aço, isto é, as diferentes componentes de aço com elevada durabilidade poderão evitar as

demolições das estruturas visto que estas poderão ser reutilizadas e adaptadas às necessidades requeridas ao longo da vida útil (Simões, 2014).

Quando comparadas com as estruturas tradicionais, as estruturas em LSF apresentam um volume e/ou quantidade de desperdícios durante a construção muito reduzido armado (Silvestre et al, 2013).

Note-se porém que a noção de sustentabilidade abrange diversos campos, devendo sempre adoptar-se uma postura crítica, e não está provado, antes pelo contrário, que neste âmbito o aço leve seja superior aos outros materiais. Refira-se, por exemplo, que o ferro necessário ao fabrico do aço não é um material inesgotável, que o fabrico do aço consome muita energia e que o aço tem grandes problemas de corrosão.

2.1.2. Reabilitação Estrutural

O aço leve tem uma elevada importância na reabilitação de estruturas existentes devido às suas diversas vantagens, tais como: (i) facilidade de integração dos diferentes componentes de aço leve; (ii) reduzida massa dos elementos estruturais; (iii) construção de rápida execução; (iv) resíduos reduzidos; (v) certeza de orçamento e de tempo e (vi) custo reduzido (SCI, 2001) e (SCI, 2007).

No âmbito da reabilitação, os edifícios existentes poderão passar por diversos tipos de intervenções: (i) renovação do espaço interior, (ii) melhoramento do aspecto visual do exterior do edifício, (iii) abrandamento da deterioração de elementos estruturais e não-estruturais, (iv) redução da perda de energia e (v) alteração do tipo de utilização (SCI, 2001).

As estruturas em LSF tornam-se ideais em obras de reabilitação, uma vez que, devido ao seu reduzido peso, não acrescentam, de forma considerável, peso e/ou carregamento em edifícios degradados e debilitados ao nível do seu desempenho estrutural. As principais intervenções que se efectuam com este tipo de material são os seguintes: (i) Sobreposição ou substituição de coberturas (Over-roofing – Figura 2.1 (a)); (ii) Ampliação vertical (Roof-top – Figura 2.1 (b)); Estrutura sobreposta a paredes para suporte de revestimentos (Over-claddings – Figura 2.2 (a)); Compartimentação interior (Infill walls – Figura 2.2 (b)); Extensões modelares (Figura 2.3), (Silvestre et al, 2013) e (SCI, 2001).



Figura 2. 1- (a) Sobreposição ou substituição de coberturas e (b) ampliação vertical (Camotim et al, 2011).



Figura 2. 2- (a) Estrutura sobreposta a paredes para suporte de revestimentos e (b) compartimentação interior (Camotim et al, 2011).



Figura 2. 3- Extensões modulares (Camotim et al, 2011).

2.2. Desvantagens na utilização de soluções em LSF

Embora a produção dos perfis em aço leve possa ser efectuada à temperatura ambiente com uma perfiladora ou uma quinadeira, o uso de aços com uma tensão de cedência superior a 280MPa produz um desgaste mecânico excessivo na perfiladora (Silvestre et al, 2013).

Enumeram-se seguidamente outros inconvenientes destes perfis (Silvestre & Camotim, 2006):

- (i) Colapso por esmagamento (enfunamento) da alma devido às forças concentradas, em resultado da sua elevada esbelteza;
- (ii) Susceptibilidade a fenómenos de instabilidade devida à elevada esbelteza das paredes do perfil;
- (iii) Deformabilidade por torção, uma vez que, as secções abertas de paredes finas têm muito baixa rigidez relativamente a este tipo de esforço;
- (iv) O endurecimento do aço, o qual, embora aumente a tensão de cedência, leva à redução da ductilidade nas dobras do perfil.

2.3. Sistematização das situações em que se usam perfis compostos em LSF

No âmbito desta dissertação, interessa identificar as situações em que, para fazer face a esforços muito elevados, se torna necessária a utilização de perfis compostos em LSF. As zonas onde há tendência para o aparecimento de esforços elevados, serão denominadas zonas críticas. São exemplo de zonas críticas, as aberturas nas paredes, pavimentos e coberturas, os sistemas de contraventamento, as consolas e a ligação entre duas ou mais paredes.

2.3.1. Pisos

2.3.1.1. Consolas

O Método Prescritivo restringe o comprimento das consolas a um máximo de 60 cm. Além disso, quando sujeita à carga de dois pisos devem ser reforçadas, usando-se dois perfis C em

aço leve, através de uma ligação “*back-to-back*”, ver Figura 2.4, que se deverá prolongar para o interior da consola de um comprimento de 1,2 m. (Silvestre et al, 2013).

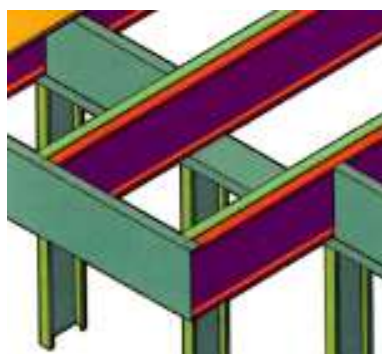


Figura 2. 4 - Vigas em consola. (Silvestre et al, 2013)

2.3.1.2. Aberturas em Pavimentos

Relativamente às aberturas em pavimentos, o Método Prescritivo estipula que estes deverão ter Trimmers de secção tubular, obtidas por combinação de C e U, ver Figura 2.5. As vigas mestras deverão ser fixadas às restantes vigas de pavimento por meio de cantoneiras e deverão ter um comprimento máximo de 2,4 m (Silvestre et al, 2013).

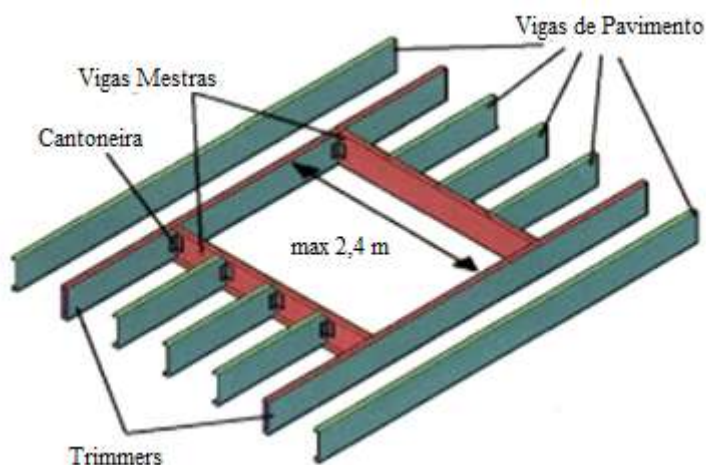


Figura 2. 5 - Abertura no pavimento. (Silvestre et al, 2013)

2.3.2. Paredes

2.3.2.1. Vergas

As aberturas em paredes estruturais requerem vergas para suportar as cargas aplicadas no vão correspondente à abertura e desviar a sua trajectória de modo a contornar a abertura. As paredes não estruturais não necessitam de vergas estruturais. O Método Prescritivo só permite a utilização de vergas acima de aberturas. Tradicionalmente, os dois tipos de vergas mais usados na construção de LSF são as vergas em caixa e as vergas “back-to-back” (composta por dois perfis C). No entanto, as vergas em dupla cantoneira poderão constituir uma alternativa economicamente vantajosa em situações de carregamento leve (Silvestre et al, 2013) e (AISI, 2004).

Vergas em caixa

O Método Prescritivo estipula que as vergas em caixa sejam formadas a partir de dois perfis C idênticos dispostos com as almas à face das paredes, formando uma configuração em caixa. Estes perfis são fixados em cima ao canal superior da parede e, em baixo, a um canal (perfil U) com as abas voltadas para baixo de modo a receberem os segmentos dos montantes colocados sobre a abertura, ver Figura 2.6. A espessura dos montantes de ombreira, que contornam a abertura, tem de ser igual ou maior à dos montantes de parede normais (AISI, 2004).

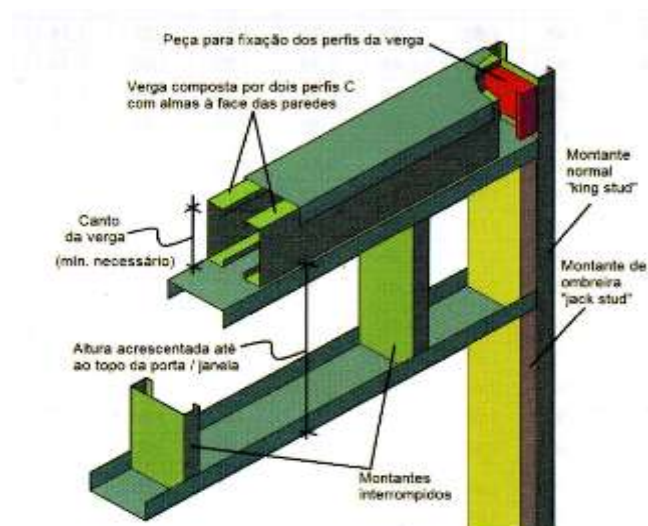


Figura 2. 6 - Verga em caixa. (Silvestre et al. 2013)

Vergas “back-to-back”

No Método Prescritivo, as vergas “back-to-back” também são constituídas por dois perfis C idênticos, dispostos alma contra alma, como o próprio nome indica, resultando numa configuração em I. À semelhança do que acontece com as vergas em caixa, os perfis também são fixados, em cima, ao canal superior da parede e, em baixo, a outro perfil em U, ver Figura 2.7. Também neste caso, os montantes de ombreira usados no enquadramento da abertura deverão ter espessura igual ou maior à dos montantes normais. (AISI, 2004).

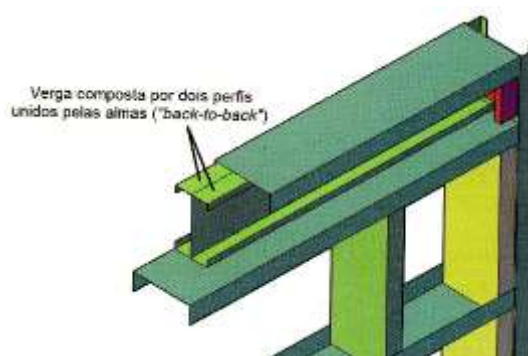


Figura 2. 7 - Verga back-to-back. (Silvestre et al, 2013)

2.4. Propriedades efectivas das secções em aço leve

2.4.1. Classificação de secções

A classificação de secções de elementos estruturais permite ter em conta os fenómenos de instabilidade local na análise da resistência e capacidade de rotação de uma secção. A ocorrência de fenómenos de encurvadura local dá-se em secções esbeltas sujeitas à compressão total ou parcial, enquanto que as secções compactas sujeitas a estes esforços podem plastificar completamente (Simões, 2014). Por outras palavras, a classificação de secções é feita de acordo com a possibilidade de a sua resistência e capacidade de rotação poderem ou não ser limitadas por fenómenos de instabilidade local (Silvestre & Camotim, 2006).

Segundo a NP EN 1993-1-1, os perfis de aço apresentam quatro classes de secções, que se apresentam de seguida (IPQ, 2010), ver Figura 2.8:

- (i) **Classe 1:** Estas secções podem atingir a resistência plástica e formar rótula plástica;
- (ii) **Classe 2:** Estas secções podem atingir a resistência plástica mas têm capacidade de rotação plástica limitada;
- (iii) **Classe 3:** Estas secções podem atingir a tensão de cedência na fibra mais comprimida (resistência elástica), mas não conseguem atingir a resistência plástica devido aos fenómenos de encurvadura local;
- (iv) **Classe 4:** Estas secções não conseguem atingir a tensão de cedência na fibra mais comprimida.

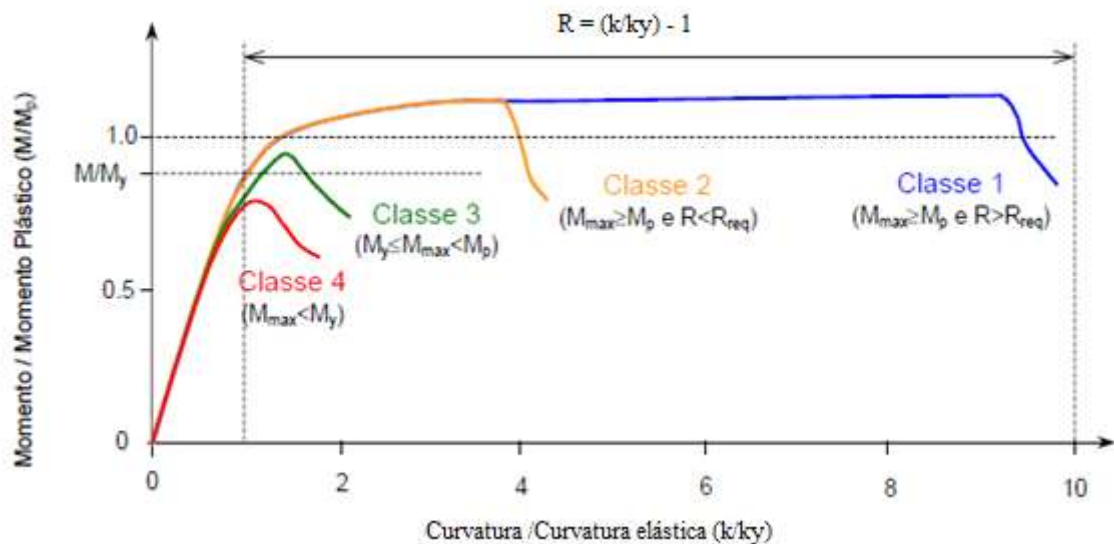


Figura 2. 8 - Curvas momento-curvatura para as diversas classes de secção preconizadas pelo EC3 (Silvestre & Camotim, 2006).

A classificação de uma secção é efectuada com base nos seguintes aspectos (Silvestre & Camotim, 2006) e (IPQ, 2010):

- (i) Esbelteza, isto é, a razão entre a largura e a espessura das paredes comprimidas (c/t);
- (ii) Esforços actuantes (esforço axial e momento flector);
- (iii) Condições de apoio da parede na secção;

(iv) Classe de aço, ou, mais precisamente, a sua tensão de cedência, f_y ;

A classificação de uma secção é determinada pela parede mais desfavorável, i.e., pela maior classe das paredes comprimidas (IPQ, 2010).

2.4.2. Secções de classe 4 – Propriedades efectivas

Frequentemente, os perfis em aço leve têm secção de Classe 4, uma vez que a sua reduzida espessura corresponde a paredes com esbelteza elevada; o que, como se referiu, corresponde a uma forte susceptibilidade à encurvadura local (Silvestre & Camotim, 2006) e (Simões, 2014).

Uma forma de considerar esta característica na análise consiste em utilizar as propriedades efectivas da secção em análise, ou seja, em vez da secção bruta usar a secção efectiva. A secção efectiva e as suas propriedades efectivas podem ser obtidas de duas formas: (i) procedimento simples, que não é iterativo; (ii) procedimento iterativo. O primeiro procedimento consiste no cálculo da secção efectiva com base na largura efectiva associada a uma distribuição de tensões primária. No entanto, a nova secção efectiva apresenta um novo centro de gravidade, o que origina um acréscimo de momento flector quando a secção está sujeita a esforço axial de compressão, o qual actua segundo o centro de gravidade bruto, ver Figura 2.9. Este acréscimo de tensão requer o cálculo de novas larguras e propriedades efectivas (Silvestre & Camotim, 2006) e (Simões, 2014).

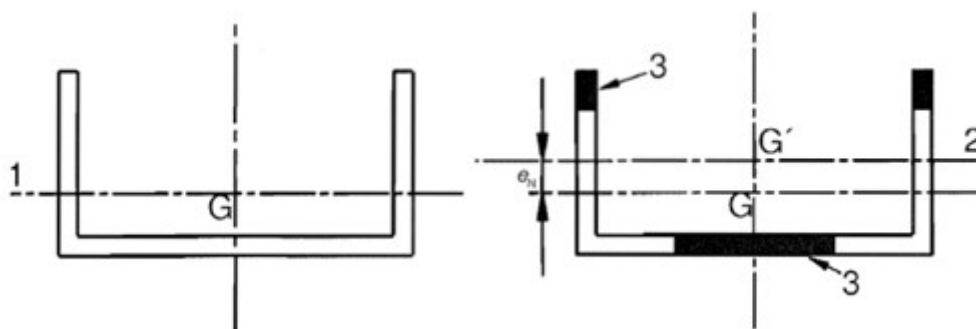


Figura 2.9 - Secção transversal de Classe 4 submetida a esforço axial de compressão: (a) secção transversal bruta; (b) secção transversal efectiva. (CEN, 2006b)

Em que:

- G é o centro de gravidade da secção transversal bruta;
- G' é o centro de gravidade da secção transversal efectiva;
- 1 é o eixo principal que passa pelo centro de gravidade da secção transversal bruta;
- 2 é o eixo principal que passa pelo centro de gravidade da secção transversal efectiva;
- 3 é a zona não efectiva.

Embora a classificação da secção possa ser efectuada com base no diagrama de tensões reais, a determinação da secção efectiva é efectuada com base nos campos de tensões individuais para compressão simples e para flexão simples. Assim, as verificações de segurança de secções de Classe 4 requerem o conhecimento das propriedades geométricas seguintes (Silvestre & Camotim, 2006):

- (i) Os valores de área efectiva (A_{eff}) e de excentricidades (e_{ny} e e_{nz}), que são calculados com base numa secção efectiva obtida para numa secção bruta sujeita a compressão. As excentricidades são originadas pela mudança do centro de gravidade da secção bruta para a secção efectiva;
- (ii) Os valores do módulo de flexão efectivo ($w_{eff,i}$), que são calculados com base numa secção efectiva obtida para uma secção bruta sujeita a flexão simples em torno do eixo i ;

3. Metodologia

3.1. Considerações Iniciais

Ao iniciar o presente estudo, foram identificadas algumas questões pertinentes, tais como:

- (i) Quais são as bases do Método Prescritivo?
- (ii) Será seguro aplicar o Método Prescritivo da AISI em território nacional ou europeu?
- (iii) O procedimento de verificação de segurança dos elementos estruturais proposto pelo Método Prescritivo está em sintonia com os Eurocódigos?
- (iv) No caso de uma resposta positiva à anterior questão, existirá uma margem de manobra que convide a tentar otimizar aquela solução?
- (v) No caso de uma resposta negativa à penúltima questão, será exequível a adaptação daquele método à filosofia e requisitos dos Eurocódigos?

Na revisão bibliográfica efectuada, embora cuidada, não foram encontrados trabalhos que tentassem esclarecer as questões mencionadas ou que respondessem às mesmas de forma objectiva. Por isso, torna-se fundamental perceber as diferenças que existem entre o Método Prescritivo e a metodologia, princípios e métodos dos Eurocódigos, no âmbito da verificação de segurança dos elementos em aço.

No que respeita ao dimensionamento e à verificação de segurança dos elementos estruturais que constituem as vergas, de modo a comparar a aplicação do Método Prescritivo com a dos Eurocódigos, efectuou-se um estudo através de um caso piloto (Estudo de Caso), estabelecendo-se seis procedimentos ou métodos para a determinação do máximo vão admissível para a verga, que diferem entre si em termos das hipóteses básicas em que se alicerçam, ou, mais precisamente, no valor e combinação de acções e na modelação dos elementos resistentes, os quais se passa a enumerar:

-
- (i) Método 1: consulta directa das tabelas incluídas na norma de estruturas de aço enformado a frio – Método Prescritivo para uma e duas habitações familiares (AISI, 2012b);
 - (ii) Método 2: verificação de segurança é definido por três documentos norte-americanos: a norma para estruturas de aço leve – concepção de vergas (AISI, 2012a), a especificação para a concepção de elementos estruturais de aço enformado a frio (AISI, 2007) e a ASCE 7 – cargas mínimas de projecto para edifícios e outras estruturas (ASCE, 1998); de facto, este é o procedimento utilizado para determinar os valores que constam do método anterior, tendo-se verificado que, se todas as condicionantes forem replicadas (material, perfil, geometria, acções, combinação), se obtêm efectivamente os valores definidos pelo Método Prescritivo;
 - (iii) Método 3: aplicação da NP EN 1993-1-1 (IPQ, 2010) e da EN 1993-1-3 (CEN, 2006a), adoptando os valores das acções definidos no Método 1 e as combinações de acções estabelecidas na NP EN 1990 (IPQ, 2009a);
 - (iv) Método 4: aplicação da NP EN 1993-1-1 e da EN 1993-1-3, adoptando os valores das acções estabelecidos na NP EN 1991-1-1 (IPQ, 2009b) e aplicando as combinações de acções estabelecidas na NP EN 1990;
 - (v) Método 5: baseado no Método 4, mas adicionando a influência dos canais onde encaixam os perfis que constituem a verga, dispostos alma contra alma, somando as propriedades resistentes das componentes de cada secção (mas ignorando a acção compósita);
 - (vi) Método 6: baseado no Método 5, mas tendo em conta o acréscimo de inércia devido à distância do centro geométrico das componentes ao centro geométrico da secção composta, i.e., considerando a acção compósita.

O Quadro 3.1. assinala as semelhanças e as diferenças que existem entre estes métodos.

Quadro 3. 1 – Comparação dos seis métodos de dimensionamento considerados.

	Mét. 1	Mét. 2	Mét. 3	Mét. 4	Mét. 5	Mét. 6
Valor das Acções	ASCE 7	ASCE7	ASCE7	NP EN 1991-1-1	NP EN 1991-1-1	NP EN 1991-1-1
Combinação de Acções	ASCE 7	ASCE 7	NP EN 1990	NP EN 1990	NP EN 1990	NP EN 1990
Modelo	Duplo C	Duplo C	Duplo C	Duplo C	Duplo C + Duplo U (sem acção compósita)	Duplo C + Duplo U (com acção compósita)
Verificações	<i>especif.</i> ¹	<i>especif.</i>	NP EN 1993-1-1 NP EN 1993-1-3	NP EN 1993-1-1 NP EN 1993-1-3	NP EN 1993-1-1 NP EN 1993-1-3	NP EN 1993-1-1 NP EN 1993-1-3

3.2. Estudo de Caso

Este estudo de caso consiste na análise de uma verga *back-to-back* do piso superior de uma habitação, com o objectivo de determinar o máximo vão admissível. Com base no Método Prescritivo (AISI, 2004), assumiram-se as seguintes hipóteses:

- (i) A verga está simplesmente apoiada;
- (ii) A largura do edifício é de 7,3 m (24’);
- (iii) Os tetos, coberturas e pisos abrangem a largura total da casa;
- (iv) O beiral da cobertura, em consola, tem um comprimento máximo de 60 cm;
- (v) A inclinação da cobertura está no intervalo de 14° a 45°;
- (vi) Não existem paredes de carga interiores.

¹ Especificação para a concepção de elementos estruturais de aço enformado a frio (AISI, 2007).

- (vii) Para além da sobrecarga da cobertura, considerou-se a acção da neve cujo valor ao nível do solo é de $1,0 \text{ kN/m}^2$ (20 psf);
- (viii) Relativamente ao material usado, trata-se de um aço S 228 GD imposto pelo Método Prescritivo;
- (ix) O perfil 800S162-54 é usado no Método 1 e o perfil C200/1,5 é usado nos restantes métodos. Estes perfis são muito semelhantes em termos de dimensões geométricas, ver Quadro 3.2. Apesar desta semelhança, as propriedades não são exactamente as mesmas afectando os resultados finais.

Quadro 3. 2 - Dimensões do perfil 800S162-54 e C200/1.5.

Perfil	c [mm]	b [mm]	t_{cor} [mm]
800S162-54	203,2	41,3	1,44
C200/1,5	200	43	1,46

A Figura 3.1 apresenta uma ilustração esquemática do estudo de caso.

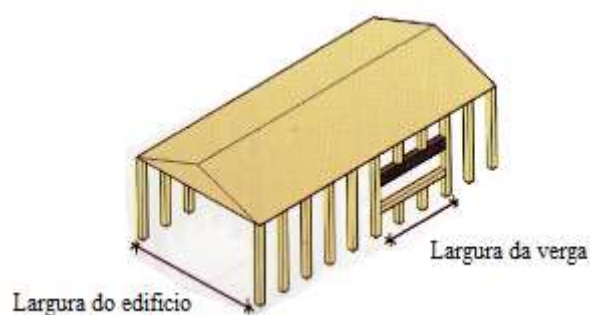


Figura 3. 1 – Modelo usado para o cálculo da largura da verga (Silvestre et al, 2013).

Para aplicar os procedimentos descritos na secção 3.1, conseguiu-se a colaboração de um produtor nacional, a PERFISA®. Através da parceria estabelecida entre o autor desta dissertação e a empresa PERFISA®, estabeleceu-se uma ponte com a indústria do sector do aço leve, a qual tornou possível, por um lado, compreender as suas necessidades e, por outro lado, desenvolver quadros de aplicação expedita, para além de um procedimento geral, de grande interesse para os projectistas das LSF.


3.2.1. Método 1

O Método 1, consiste em determinar o vão admissível a partir das tabelas incluídas na Norma do Método Prescritivo (AISI, 2012b). Para as hipóteses mencionadas, o máximo vão admissível para o caso em estudo é indicado no Quadro 3.3., ou seja, 9'-3", isto é 2,82 m.

Quadro 3.3 - Vãos admissíveis em vergas que suportem apenas carga do teto e cobertura. Aço S228.
(AISI, 2012b)

33
KSI

Table E7-7a
Back-to-Back Header Spans
Headers Supporting Roof and Ceiling Only ^{1,2}
F_y = 33 ksi



Member Designation	20 psf Ground Snow Load					30 psf Ground Snow Load				
	Building Width ³					Building Width ³				
	24'	28'	32'	36'	40'	24'	28'	32'	36'	40'
2-350S162-33	2'-11"	2'-4"	-	-	-	2'-5"	-	-	-	-
2-350S162-43	4'-8"	3'-10"	3'-5"	3'-1"	2'-9"	3'-11"	3'-5"	3'-0"	2'-8"	2'-4"
2-350S162-54	5'-8"	4'-9"	4'-4"	4'-1"	3'-8"	4'-10"	4'-4"	4'-0"	3'-8"	3'-4"
2-350S162-68	6'-1"	5'-7"	5'-2"	4'-10"	4'-6"	5'-8"	5'-3"	4'-10"	4'-6"	4'-2"
2-350S162-97	7'-8"	6'-10"	6'-5"	6'-0"	5'-8"	6'-11"	6'-5"	6'-0"	5'-8"	5'-4"
2-550S162-33	4'-6"	3'-9"	3'-1"	2'-6"	-	3'-9"	3'-2"	2'-6"	-	-
2-550S162-43	6'-2"	5'-7"	5'-0"	4'-7"	4'-2"	5'-7"	5'-0"	4'-6"	4'-1"	3'-8"
2-550S162-54	7'-6"	6'-9"	6'-3"	5'-9"	5'-4"	6'-10"	6'-3"	5'-9"	5'-4"	4'-11"
2-550S162-68	6'-7"	7'-11"	7'-4"	6'-10"	6'-5"	8'-0"	7'-4"	6'-10"	6'-5"	6'-0"
2-550S162-97	10'-5"	9'-8"	9'-0"	8'-6"	8'-0"	9'-9"	9'-0"	8'-6"	8'-0"	7'-7"
2-800S162-33	4'-6"	3'-11"	3'-5"	3'-1"	2'-4"	3'-11"	3'-6"	3'-0"	2'-3"	-
2-800S162-43	7'-7"	6'-10"	6'-2"	5'-8"	5'-2"	6'-11"	6'-2"	5'-7"	5'-1"	4'-7"
2-800S162-54	9'-3"	8'-7"	7'-11"	7'-4"	6'-10"	8'-8"	7'-11"	7'-4"	6'-9"	6'-3"
2-800S162-68	10'-7"	9'-10"	9'-4"	8'-10"	8'-5"	9'-11"	9'-4"	8'-10"	8'-4"	7'-11"
2-800S162-97	13'-9"	12'-9"	12'-0"	11'-3"	10'-8"	12'-10"	12'-0"	11'-3"	10'-7"	10'-0"
2-1000S162-43	7'-10"	6'-10"	6'-1"	5'-6"	5'-0"	6'-11"	6'-1"	5'-5"	4'-11"	4'-6"
2-1000S162-54	10'-5"	9'-9"	9'-0"	8'-4"	7'-9"	9'-10"	9'-0"	8'-4"	7'-9"	7'-2"
2-1000S162-68	12'-1"	11'-3"	10'-8"	10'-1"	9'-7"	11'-4"	10'-8"	10'-1"	9'-7"	9'-1"
2-1000S162-97	15'-3"	14'-3"	13'-5"	12'-9"	12'-2"	14'-4"	13'-5"	12'-8"	12'-1"	11'-6"
2-1200S162-54	11'-6"	10'-9"	10'-0"	9'-0"	8'-2"	10'-10"	10'-0"	9'-0"	8'-1"	7'-4"
2-1200S162-68	13'-4"	12'-6"	11'-9"	11'-2"	10'-8"	12'-7"	11'-10"	11'-2"	10'-7"	10'-1"
2-1200S162-97	16'-8"	15'-7"	14'-8"	13'-11"	13'-3"	15'-8"	14'-8"	13'-11"	13'-2"	12'-7"

For S1: 1 inch = 25.4 mm, 1 psf = 0.0479 kN/m², 1 foot = 0.305 m
¹ Deflection criteria: L/360 for live loads, L/240 for total loads
² Design load assumptions: Roof/ceiling dead load is 12 psf (0.58 kN/m²)
³ Building width is in the direction of horizontal framing members supported by the header.

3.2.2. Método 2

Neste método, o máximo vão admissível é determinado através da verificação das condições definidas pela norma norte-americana para estruturas de aço enformado a frio – concepção de

vergas (AISI, 2012a) e pela especificação para a concepção de elementos estruturais de aço enformado a frio (AISI, 2007).

3.2.2.1. Acções de Projecto

Segundo a ASCE 7 – cargas mínimas de projecto para edifícios e outras estruturas (ASCE, 1998) e para as acções mencionadas na secção 3.1, as cargas têm os valores indicados nos Quadros 3.4 e 3.5.

Quadro 3. 4 – Acções Permanentes.

Elemento	[kN/m ²]
tecto	0,24
cobertura	0,34

Quadro 3. 5 – Acções variáveis.

Elemento	[kN/m ²]
neve (solo) [s_g]	1,00
neve (cobertura) [s]	$s = 0,7 \cdot s_g = 0,7$
sobrecarga cobertura	$\max\{s; 0,77\} = 0,77$

Com base no modelo estrutural anteriormente apresentado e esquematizado na Figura 3.1, obtêm-se os valores para o carregamento linear uniformemente distribuído indicados nos Quadros 3.6 e 3.7.

Quadro 3. 6 – Acções Permanentes.

Elemento	[kN/m]
tecto	$0,24 \cdot \frac{7,30}{2} = 0,88$
cobertura	$0,34 \cdot \frac{7,3 + 1,2}{2} = 1,45$
total [D]	2,33

Quadro 3. 7 – Acções variáveis.

Elemento	[kN/m]
neve [S]	$0,7 \cdot 1 \cdot \frac{7,3 + 1,2}{2} = 2,98$
cobertura [L_r]	$0,77 \cdot \frac{7,3 + 1,2}{2} = 3,27$

3.2.2.2. *Combinação de Acções*

Segundo o estipulado na ASCE 7 (ASCE, 1998), as combinações de acções para as vergas são as seguintes:

$$q = \max \begin{cases} 1,4 \cdot D \\ 1,2 \cdot D + 1,6 \cdot L_p + 0,5 \cdot \max\{L_r; S\} \\ 1,2 \cdot D + 0,5 \cdot L_p + 1,6 \cdot \max\{L_r; S\} \end{cases} \quad (3.1)$$

obtendo-se para o problema em análise,

$$q = \max \begin{cases} 1,4 \cdot 2,33 = 3,25 \text{ kN/m} \\ 1,2 \cdot 2,33 + 1,6 \cdot 0 + 0,5 \cdot \max\{3,27; 2,98\} = 4,42 \text{ kN/m} \\ 1,2 \cdot 2,33 + 0,5 \cdot 0 + 1,6 \cdot \max\{3,27; 2,98\} = 8,02 \text{ kN/m} \rightarrow \text{valor assumido} \end{cases}$$

3.2.2.3. *Propriedades das secções utilizadas na verga back-to-back*

Quadro 3. 8 - Propriedades da secção C200/1,5 (PERFISA®).

C200×1,5						
t	c	b	h	t_{cor}	r	A
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]
1,50	15,00	43,00	200,00	1,46	2,73	445
I_{yy}	$w_{pl,y}$	$w_{el,y}$	$I_{eff,y}$	$w_{eff,y,min}$	f_y	E
[mm ⁴]	[mm ³]	[mm ³]	[mm ⁴]	[mm ³]	[MPa]	[GPa]
2418673	30268	24187	2277058	21651	228	210

3.2.2.4. Resistência à flexão

De acordo com a secção C 3.1.1 da especificação para a concepção de elementos estruturais de aço enformado a frio (AISI, 2007), o momento flector resistente de uma secção vale

$$M_{c,Rd} = w_{el,y} \cdot f_y \cdot \phi_b \quad (3.2)$$

em que $\phi_b = 0,95$.

Tratando-se de uma verga composta por dois perfis do tipo C dispostos back-to-back, o momento flector resistente é dado por duas vezes aquele valor, ou seja, considerando as propriedades individuais,

$$M_{c,Rd} = 2 \cdot (w_{el,y} \cdot f_y \cdot \phi_b) \quad (3.3)$$

O momento flector numa viga simplesmente apoiada com vão L e sujeita a uma carga distribuída uniforme, q , é máximo a meio vão, apresentando o valor

$$M_{Ed} = \frac{q \cdot L^2}{8} \quad (3.4)$$

O máximo vão admissível é determinado igualando as expressões (3.3) e (3.4),

$$M \leq M_{c,Rd} \Leftrightarrow L \leq 4 \sqrt{\frac{w_{el,y} \cdot f_y \cdot \phi_b}{q}} \quad (3.5)$$

Para o exemplo analisado, obtém-se o seguinte valor para o vão admissível da verga:

$$M \leq M_{c,Rd} \Leftrightarrow L \leq 4 \sqrt{\frac{24187 \text{ mm}^3 \cdot 228 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 0,95}{8,02 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}} = 3,23 \text{ m}$$

3.2.2.5. Combinação de flexão e esmagamento de alma

De acordo com a secção C 3.4.1 da especificação para a concepção de elementos estruturais de aço enformado a frio (AISI, 2007), o valor da resistência local ao corte da alma é dado por:

$$R_{w,Rd} = C \cdot t^2 \cdot f_y \cdot \sin \theta \cdot \left(1 - C_R \cdot \sqrt{r/t}\right) \cdot \left(1 + C_S \cdot \sqrt{S_s/t}\right) \cdot \left(1 - C_c \cdot \sqrt{c/t}\right) \quad (3.6)$$

sendo o valor dos coeficientes C_R , C_S , C_c e C definido na Tabela C 3.4.1-1 da especificação.

Antes de aplicar a expressão (3.6), é necessário analisar as condições de apoio e o tipo de carregamento, para determinar qual a secção onde o colapso terá maior probabilidade de ocorrer. Assim, e segundo tanto a secção C 3.4.1 do comentário sobre a especificação norte-americana para o projecto de elementos estruturais de aço enformado a frio (AISI, 2001), como o comentário sobre a norma para as estruturas de aço enformado a frio – Método Prescritivo para uma ou duas habitações familiares (AISI, 2004), propõem um modelo de carregamento específico adequado a vergas para ter em conta a combinação entre a flexão e o esmagamento da alma, o qual considera que a carga distribuída, q , está afastada 0,3048 m (1pé) de cada lado da carga concentrada, P , aplicada a meio vão, como se ilustra na Figura 3.2, de modo que a carga concentrada P é dada por

$$P = 2 \cdot 0,3048\text{m} \cdot q \quad (3.7)$$

Este modelo reflecte o modo de aplicação do carregamento à verga, uma vez que a distância entre as vigas das lajes do Método Prescritivo é de dois pés: este é pois a situação mais crítica em termos de combinação de flexão e esmagamento de alma.

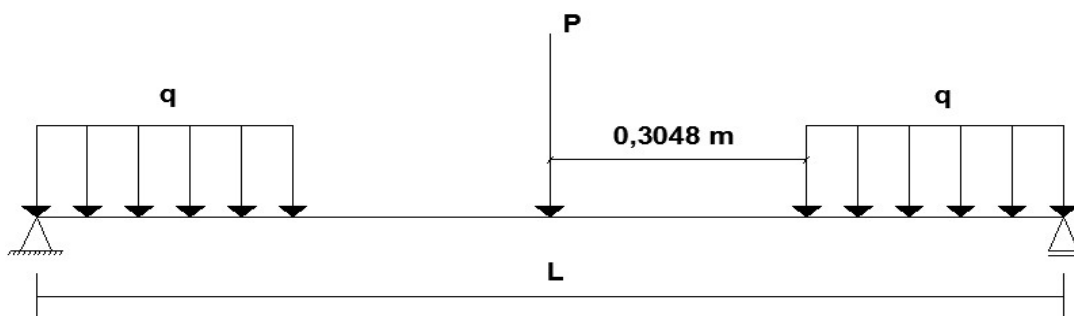


Figura 3. 2 - Modelo de carga. (AISI, 2004)

Ainda no âmbito do esmagamento da alma e , de acordo com a especificação para a concepção de elementos estruturais de aço enformado a frio (AISI, 2007), a expressão (3.6) só é válida se se verificarem as seguintes condições:

$$c/t \leq 200 \quad (3.8)$$

$$S_s/t \leq 210 \quad (3.9)$$

$$S_s/c \leq 1 \quad (3.10)$$

$$45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \quad (3.11)$$

Estas condições são de facto satisfeitas para o exemplo considerado,

$$c/t = 191.62/1.46 = 131,25 \leq 200 \rightarrow \textit{verifica!}$$

$$S_s/t = 19/1.46 = 13,01 \leq 210 \rightarrow \textit{verifica!}$$

$$S_s/c = 19/191,62 = 0,1 \leq 1 \rightarrow \textit{verifica!}$$

$$\theta = 90^\circ \rightarrow \textit{verifica!}$$

de modo que, por aplicação da expressão (3.6), se obtém o valor crítico

$$R_{w,Rd} = 20,5 \cdot 1,46^2 \cdot 228 \cdot \sin 90 \cdot \left(1 - 0,17 \cdot \sqrt{\frac{2,73}{1,46}}\right) \cdot \left(1 + 0,11 \cdot \sqrt{\frac{19}{1,46}}\right) \cdot \left(1 - 0,001 \cdot \sqrt{\frac{191,62}{1,46}}\right) = 10,56 \text{ kN}$$

Logo, para duas secções dispostas alma com alma:

$$R_{w,Rd} = 2 \cdot 10,56 = 21,12 \text{ kN}$$

Para além do esmagamento de alma, a secção C 3.5.2 da especificação para a concepção de elementos estruturais de aço enformado a frio (AISI, 2007) estipula que, no âmbito das secções com almas sem reforços sujeitas simultaneamente a momento flector e a cargas concentradas, P , devem ser satisfeitas as seguintes condições:

$$M_{Ed} \leq M_{c,Rd} \quad (3.12)$$

$$P \leq \phi_w \cdot R_{w,Rd} \quad (3.13)$$

Uma vez que se trata de uma verga back-to-back, composta por duplo C, segundo a secção C 3.5.2 daquela especificação deve ainda ser satisfeita a condição

$$0,88 \cdot \frac{P}{R_{w,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,46 \cdot \phi \quad (3.14)$$

Para o exemplo analisado, obtém-se o seguinte valor para a carga concentrada:

$$P = 2 \cdot 0,3048 \text{ m} \cdot 8,02 \text{ kN/m} = 4,89 \text{ kN}$$

O momento flector máximo para este tipo de carregamento é dado por

$$M_{Ed} = \frac{PL}{4} + q \left(\frac{L}{2} - 0,3048 \text{ m} \right)^2 \quad (3.15)$$

Substituindo esta expressão na expressão (3.14) e resolvendo em ordem a L , obtém-se o valor do máximo vão admissível para a verga. Substituindo esse valor em (3.15), obtém o valor do momento máximo correspondente.

Para o exemplo em análise, obtém-se:

$$\begin{cases} 0,88 \cdot \frac{4,89}{21,12} + \frac{M}{12,87} \leq 1,46 \cdot 0,90 \\ M_{Ed} = \frac{4,89 \cdot L}{4} + 8,02 \cdot \left(\frac{L}{2} - 0,3048 \text{ m} \right)^2 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} M \leq 12,84 \text{ kNm} \\ L \leq 2,78 \text{ m} \end{cases}$$

As condições (3.11) e (3.12) são satisfeitas por estes valores:

$$M_{Ed} = 12,84 \text{ kNm} \leq M_{c,Rd} = 12,87 \text{ kNm} \rightarrow \textit{verifica!}$$

$$P = 4,89 \text{ kN} \leq \phi_w \cdot R_{w,Rd} = 0,75 \cdot 21,12 = 15,84 \text{ kN} \rightarrow \textit{verifica!}$$

3.2.2.6. Limitação da flecha

O valor limite da flecha indicado no Comentário ao Método Prescritivo (AISI,2004) varia com o tipo de carregamento:

(i) Para o total das acções permanentes e a maior acção variável (q_1):

$$\delta_1 = \frac{L}{240} \quad (3.16)$$

(ii) Para a acção variável máxima (q_2):

$$\delta'_2 = \frac{L}{360} \quad (3.17)$$

Mas, para uma viga simplesmente apoiada sujeita a uma carga uniformemente distribuída,

$$\delta = \frac{5 q L^4}{384 E I} \quad (3.18)$$

de modo que para o exemplo em questão vem:

(i) Para o primeiro caso:

$$\frac{L}{240} = \frac{5 q_1 L^4}{384 E I} = \frac{5 \cdot 5,60 \text{ kN/m} \cdot L^4}{384 \cdot 210 \times 10^3 \text{ N/mm}^2 \cdot 2 \cdot 2 \, 418 \, 673 \text{ mm}^4} \Leftrightarrow L = 3,87 \text{ m}$$

(ii) Para o segundo caso:

$$\frac{L}{360} = \frac{5 q_2 L^4}{384 E I} = \frac{5 \cdot 3,27 \text{ kN/m} \cdot L^4}{384 \cdot 210 \times 10^3 \text{ N/mm}^2 \cdot 2 \cdot 2 \, 418 \, 673 \text{ mm}^4} \Leftrightarrow L = 4,05 \text{ m}$$

Logo, o vão admissível para a verga neste exemplo, será o menor valor obtido através dos diferentes critérios:

$$L = \min\{3,23 \text{ m}; 2,78 \text{ m}; 3,87 \text{ m}; 4,05 \text{ m}\} = 2,78 \text{ m}$$

3.2.3. Método 3

Este método tem como objectivo a determinação do máximo vão admissível para o carregamento definido no Método 1 mas aplicando as combinações de acções estabelecidas na NP EN 1990 e verificando os requisitos da NP EN 1993-1-1 e EN 1993-1-3.

3.2.3.1. *Acções de projecto*

Assumem-se as acções estabelecidas na secção 3.2.2.1.

3.2.3.2. *Combinações de acções*

Relativamente aos estados limites últimos e, de acordo com a cláusula 6.4.3.2. (3) da NP EN 1990, para situações de projecto persistentes ou transitórias (combinações fundamentais), as combinações de acções são dadas por:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3.19)$$

em que "+" significa "a combinar com" e Σ significa "o efeito combinado de".

Para efeitos de verificação da flecha máxima, no âmbito dos estados limites de utilização, é necessário considerar duas combinações distintas. A primeira, de acordo com a cláusula 6.5.3. (2) da NP EN 1990, é a combinação característica, que se refere aos efeitos de longo prazo e aspecto da estrutura, e é dada por:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3.20)$$

e a segunda, de acordo com Anexo Nacional daquela norma, considera apenas as acções variáveis da anterior, ou seja:

$$Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3.21)$$

Os valores dos coeficientes para determinação do valor de combinação de uma variável i , encontram-se no Quadro 3.9.

Quadro 3. 9 – Valor de $\psi_{0,i}$

Elemento	$\psi_{0,i}$
neve	0
Sobrec. cobertura	0,50

Aplicando a expressão (3.19) ao problema em análise, obtém-se para a carga distribuída para as combinações fundamentais de acções com a sobrecarga de cobertura e a neve, respectivamente, como acções variáveis de base:

$$A.V.B.: \text{ sob. cobertura: } 1,35 \cdot 2,33 + 1,5 \cdot 3,27 + 1,5 \cdot 0,50 \cdot 2,98 = 10,29 \text{ kN/m}$$

$$A.V.B.: \text{ neve: } 1,35 \cdot 2,33 + 1,5 \cdot 2,98 + 1,5 \cdot 0 \cdot 3,27 = 7,62 \text{ kN/m}$$

O valor de cálculo para a verificação dos estados limites últimos é, portanto, 10,29 kN/m.

Ainda para o problema em análise, os valores de cálculo da carga uniformemente distribuída para o controlo da flecha máxima, aplicando a expressão (3.20), são

$$A.V.B.: \text{ sob. cobertura: } 2,33 + 3,27 + 0,50 \cdot 2,98 = 7,09 \text{ kN/m}$$

$$A.V.B.: \text{ neve: } 2,33 + 2,98 + 0 \cdot 3,27 = 5,31 \text{ kN/m}$$

e aplicando a equação (3.21), são

$$A.V.B.: \text{ sob. cobertura: } 3,27 + 0,50 \cdot 2,98 = 4,76 \text{ kN/m}$$

$$A.V.B.: \text{ neve: } 2,98 + 0 \cdot 3,27 = 2,98 \text{ kN/m}$$

3.2.3.3. *Propriedades da secção*

As propriedades da secção foram definidas na secção 3.2.2.3.

3.2.3.4. *Classificação da secção*

De acordo com a cláusula 5.5.1. (1) da NP EN 1993-1-1, a classificação das secções transversais contempla a possibilidade da resistência e da capacidade de rotação serem limitadas pela encurvadura local. Segundo a cláusula 5.5.2. (6) da mesma norma, a classe da secção é a classe mais desfavorável, ou seja, a mais elevada dos seus componentes

comprimidos. De acordo com o ponto 5.5.2. (8) daquela norma, (i) os valores limite da relação entre as dimensões dos componentes comprimidos das Classes 1, 2 e 3 são indicados no Quadro 3.10 dessa norma (Quadro 3.10 e 3.11) e (ii) se um componente não satisfizer os limites da Classe 3, a secção é de Classe 4 (IPQ, 2010).

Quadro 3. 10 - Limites máximos das relações largura - espessura para componentes comprimidos. (IPQ, 2010)

Componentes internos comprimidos						
						Eixo de flexão
						Eixo de flexão
Classe	Componente solicitado à flexão	Componente solicitado à compressão		Componente solicitado à flexão e à compressão		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
1	$c/t \leq 72e$	$c/t \leq 33e$	quando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396 \epsilon}{13 \alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36 \epsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83e$	$c/t \leq 38e$	quando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456 \epsilon}{13 \alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5 \epsilon}{\alpha}$			
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
3	$c/t \leq 124e$	$c/t \leq 42e$	quando $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42e}{0,67 + 0,33\psi}$ quando $\psi \leq -1^{\circ}$: $c/t \leq 62e(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$			
$e = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Quadro 3. 11 - Limites máximos das relações largura - espessura para componentes comprimidos. (IPQ, 2010)

Banzos em consola						
Secções laminadas			Secções soldadas			
Classe	Componente solicitado a compressão	Componente solicitado a flexão e a compressão				
		Extremidade comprimida		Extremidade traccionada		
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
1	$c/t \leq 9e$	$c/t \leq \frac{9e}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9e}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9e}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9e}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
2	$c/t \leq 10e$	$c/t \leq \frac{10e}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10e}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10e}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10e}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)						
3	$c/t \leq 14e$	$c/t \leq 21e\sqrt{k_{\sigma}}$ Para k_{σ} , ver a EN 1993-1-5				
$e = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	e	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Para classificar as secções que constituem a verga em análise (secções C), assume-se que esta está submetida a flexão em torno do eixo de maior inércia, o que significa que o banzo e o reforço superiores estão comprimidos e a alma está parcialmente comprimida.

- (i) Classificação do banzo superior:
- Elemento interior → Quadro 3.10;
 - $f_y = 228 \text{ MPa} \rightarrow \mathcal{E} = 1,02$;
 - $\frac{c}{t} = \frac{43-2 \cdot 2-2 \cdot 1,46}{1,46} = 24,71 \leq 33,66 \rightarrow \text{classe 1}$;
- (ii) Classificação da alma:
- Elemento interior → Quadro 3.10;
 - $f_y = 228 \text{ MPa} \rightarrow \mathcal{E} = 1,02$;
 - $\frac{c}{t} = \frac{200-2 \cdot 2-2 \cdot 1,46}{1,46} = 132,25 \leq 126,48 \rightarrow \text{não verifica, logo é classe 4}$;

Conclui-se que a secção é de Classe 4, devendo-se utilizar as propriedades efectivas.

3.2.3.5. Resistência à flexão

De acordo com a cláusula 6.2.5 (1)P da NP EN 1993-1-1 (IPQ, 2010), no âmbito dos estados limites últimos, a relação entre o momento flector actuante, M_{Ed} , e o resistente, $M_{c,Rd}$, deve satisfazer a condição:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1.0 \quad (3.22)$$

Conforme a cláusula 6.2.5 (2) da mesma norma, para uma secção de Classe 4, o momento flector resistente em relação a um dos seus eixos principais, é dado por:

$$M_{c,Rd} = \frac{w_{eff,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.23)$$

em que segundo o Anexo Nacional da NP EN 1993-1-1, $\gamma_{M0} = 1,0$;

Segundo as hipóteses assumidas nas considerações iniciais e à semelhança da secção 3.2.2.4, o momento flector actuante é dado pela expressão (3.4).

Introduzindo (3.4) e (3.23) em (3.22), determina-se um valor limite para o vão admissível

$$M_{Ed} \leq M_{c,Rd} \Leftrightarrow L \leq \sqrt{\frac{8 \cdot 2 \cdot (w_{eff,min} \cdot f_y)}{\gamma_{M0} \cdot q}} \quad (3.24)$$

Aplicando este resultado ao caso em estudo, obtém-se o seguinte valor para o vão admissível da verga:

$$L \leq 4 \cdot \sqrt{\frac{21651 \text{ mm}^3 \cdot 228 \text{ N/mm}^2}{10,29 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}} = 2,77 \text{ m}$$

3.2.3.6. Resistência à flexão combinada com esmagamento de alma

Antes de efectuar esta verificação, é necessário verificar se é cumprida a seguinte condição para a espessura, apresentada na cláusula 3.2.4 (1) EN 1993-1-3.

$$0,45 \text{ mm} \leq t_{cor} \leq 15 \text{ mm} \quad (3.25)$$

bem como esta outra relativa ao raio interno, na cláusula 5.1 (6):

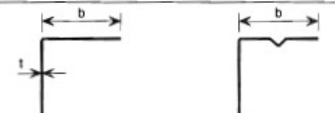
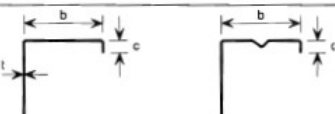
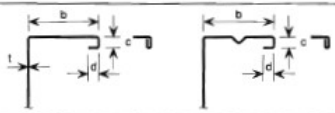

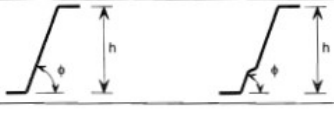
$$r_{int} \leq 0,04 \cdot t_{cor} \cdot \frac{E}{f_y} \quad (3.26)$$

Requisitos relativos à esbelteza das paredes dos perfis são também estabelecidos no Quadro 5.1 EN 1993-1-3, os quais se reproduzem no Quadro 3.12.

Aplicando ao exemplo em questão:

- Esbelteza dos banzos: $b/t = \frac{43 \cdot 1,46}{1,46} = 28,95 \leq 60 \rightarrow \text{verifica!}$
- Esbelteza dos reforços: $c/t = \frac{15 \cdot 1,46}{1,46} = 9,77 \leq 50 \rightarrow \text{verifica!}$
- Esbelteza da alma: $b/t = \frac{200 \cdot 1,46}{1,46} = 135,99 \leq 500 \rightarrow \text{verifica!}$
- Espessura: $0,45 \text{ mm} \leq t_{cor} = 1,46 \text{ mm} \leq 15 \text{ mm} \rightarrow \text{verifica!}$
- Raio interno: $r_{int} = 2,00 \text{ mm} \leq 0,04 \cdot 1,46 \cdot \frac{210 \times 10^3}{228} = 53,79 \text{ mm} \rightarrow \text{verifica!}$

Quadro 3.12 – Esbelteza máxima das paredes dos perfis (CEN, 2006a).

Element of cross-section	Maximum value
	$b/t \leq 50$
	$b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$
	$b/t \leq 90$ $c/t \leq 60$ $d/t \leq 50$
	$b/t \leq 500$
	$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ $h/t \leq 500 \sin \phi$

De acordo com a cláusula 6.1.11 da EN 1993-1-3, no âmbito das secções com almas sem reforços sujeitas simultaneamente a momento flector e a cargas concentradas, P , devem ser satisfeitas as condições:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1.0 \quad (3.27)$$

$$\frac{P}{R_{w,Rd}} \leq 1.0 \quad (3.28)$$

$$\frac{P}{R_{w,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1.25 \quad (3.29)$$

Segundo o estipulado no ponto 6.1.7.2 (4) da EN 1993-1-3, se a rotação da alma estiver impedida com uma restrição adequada ou pela geometria da secção (p. ex. vigas em duplo C, ver Figura 3.3), a resistência local ao corte da alma, $R_{w,Rd}$, é dada por, (CEN, 2006a):

$$R_{w,Rd} = \frac{k_5 + k_6}{\gamma_{M1}} \left[13,2 + 2,87 \sqrt{\frac{s_s}{t_{cor}}} \right] \cdot t_{cor}^2 \cdot f_y \quad (3.30)$$

em que:

(i) k_5 e k_6 são coeficientes dados por:

$$k_5 = 1,46 - 0,53 \cdot k \geq 0,6 \text{ com } k = \frac{f_y}{228 \text{ MPa}} \quad (3.31)$$

$$k_6 = 0,88 - 0,12 \frac{t_{cor}}{1,9} \quad (3.32)$$

(ii) h_w é o comprimento da alma medido entre os eixos dos banzos;

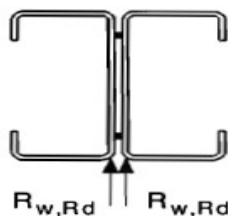


Figura 3.3 – Reacção ao corte da alma (CEN, 2006a).

A expressão (3.30) aplica-se a cargas pontuais singulares suficientemente afastadas das extremidades do perfil, $c \geq 1,5h_w$, ver Figura 3.4.

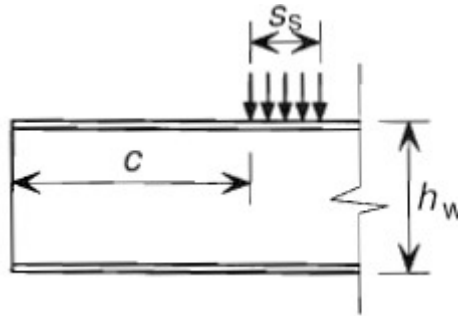


Figura 3.4 – Aplicação de carga (CEN, 2006a).

De acordo com as hipóteses assumidas e tendo em conta o modelo representado na Figura 3.5, o momento máximo para este tipo de carregamento é dado pela expressão (3.35). Substituindo esta expressão na expressão (3.29) obtém-se uma inequação de segundo grau em L

$$qL^2 - (q \cdot 4 \cdot 0,30m - P)L + M_{c,Rd} \left(4 \frac{P}{R_{w,Rd}} - 5 \right) + q(2 \cdot 0,30m)^2 \leq 0 \quad (3.33)$$

cuja resolução determina o valor do máximo vão admissível para a verga. De facto, as soluções para esta inequação estão num intervalo definido por uma raiz negativa e outra positiva que constitui esse máximo admissível

$$L_{\max} = 2 \cdot 0,30m - \frac{P}{2q} + \sqrt{(P/2q)^2 - 4 \cdot 0,30m \frac{P}{2q} - \frac{M_{c,Rd}}{q} (4P/R_{w,Rd} - 5)} \quad (3.34)$$

Reintroduzindo este máximo na expressão (3.35), determina-se o máximo momento flector correspondente

$$M_{Ed,\max} = \frac{PL_{\max}}{4} + q \left(\frac{L_{\max}}{2} - 0,30m \right)^2 \quad (3.35)$$

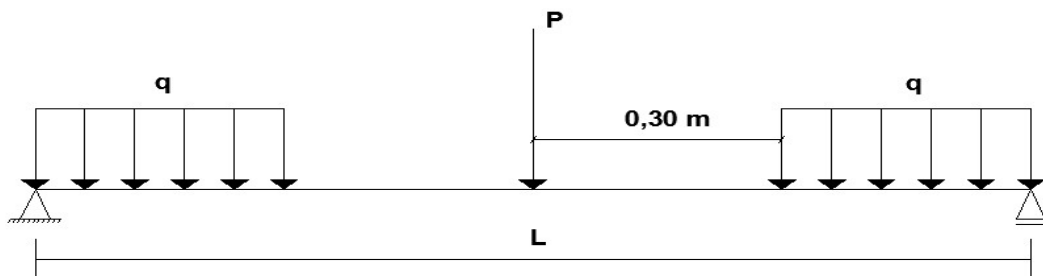


Figura 3. 5 - Modelo de carga.

A carga concentrada P é dada por

$$P = 2 \cdot 0,30\text{m} \cdot q \quad (3.36)$$

Para o exemplo analisado, obtém-se o seguinte valor para a carga concentrada:

$$P = 2 \cdot 0,30 \text{ m} \cdot 10,29 \text{ kN/m} = 6,17 \text{ kN}$$

Aplicando as expressões (3.30) a (3.32) ao problema em análise e verificando as restrições mencionadas, obtém-se o valor da resistência local ao corte da alma do perfil composto:

$$k = \frac{228}{228} = 1,00$$

$$k_5 = 1,46 - 0,53 \cdot 1,00 = 0,96$$

$$k_6 = 0,88 - 0,12 \cdot \frac{1,46}{1,9} = 0,79$$

$$R_{w,Rd} = \frac{0,96 + 0,79}{1,00} \cdot \left[13,2 + 2,87 \cdot \sqrt{\frac{19}{1,46}} \right] \cdot 1,46^2 \cdot 228 = 20,03 \text{ kN}$$

O vão máximo e o correspondente momento flector máximo são agora definidos pelas expressões (3.34) e (3.35),

$$L_{max} = 2,18\text{m}, M_{Ed,max} = 9,78 \text{ kNm}$$

satisfazendo estes valores os limites definidos pela EN 1993-1-3,

$$M_{Ed} = 9,78 \text{ kNm} \leq M_{c,Rd} = 9,88 \text{ kNm} \rightarrow \text{verifica!}$$

$$P = 6,17 \text{ kN} \leq R_{w,Rd} = 40,06 \text{ kN} \rightarrow \text{verifica!}$$

3.2.3.7. Limitação da flecha

O Anexo Nacional da NP EN 1993-1-1 indica dois valores limite para a flecha consoante o tipo de carregamento:

- (i) Para o valor de acção resultante da combinação característica, $\delta_{\max} = L/200$;
- (ii) Para a acção variável de base associada aos valores de combinação das restantes acções variáveis, $\delta_2 = L/250$;

Para uma viga simplesmente apoiada, a flecha é dada pela expressão (3.18) – combinando esta expressão com as condições anteriores vem, respetivamente,

$$\frac{5}{384} \frac{q_1 L^4}{EI} \leq \frac{L}{200} \Leftrightarrow L \leq \sqrt[3]{\frac{48 EI}{125 q_1}} \quad (3.37)$$

$$\frac{5}{384} \frac{q_2 L^4}{EI} \leq \frac{L}{250} \Leftrightarrow L \leq \sqrt[3]{\frac{38,4 EI}{125 q_2}} \quad (3.38)$$

em que q_1 e q_2 são as cargas correspondentes às combinações referidas. Note-se que a segunda expressão só é condicionante quando $q_2 > 0,8q_1$, ou seja, quando as acções variáveis são muito elevadas por comparação com as permanentes. Para o exemplo analisado, $q_2 = 4,76 < 0,8q_1 = 0,8 \cdot 7,09 = 5,67$, de modo que a primeira combinação é condicionante,

$$L \leq \sqrt[3]{\frac{48 EI}{125 q_1}} = \sqrt[3]{\frac{48 \cdot 210 \times 10^3 \text{ N/mm}^2 \cdot 2 \cdot 2277058 \text{ mm}^4}{125 \cdot 7,09 \text{ kNm}^{-1}}} = 3,73 \text{ m}$$

Logo, o vão admissível para a verga neste exemplo, será o menor valor obtido através dos diferentes critérios:

$$L = \min\{2,77 \text{ m}; 2,18 \text{ m}; 3,73 \text{ m}\} = 2,18 \text{ m}$$

3.2.4. Método 4

Adoptando os valores dos carregamentos definidos na NP EN 1991-1-1 (IPQ, 2009b) e NP EN 1991-1-3 (IPQ, 2009c), pretende-se determinar o máximo vão admissível da verga que verifica as condições definidas na NP EN 1993-1-1 e EN 1993-1-3.

3.2.4.1. Acções de Projecto

Os pesos próprios foram estabelecidos em 3.2.2.1, mas as acções variáveis apresentam novos valores.

De acordo com o ponto 6.3.4 da NP EN 1991-1-1 (IPQ, 2009b), se se admitir que cobertura é não acessível, excepto para operações de manutenção e reparação correntes, a sobrecarga é da categoria H. Segundo a cláusula 6.3.4.2 (1) da mesma norma, o valor característico mínimo da sobrecarga desta categoria é de 0,4 kN/m².

De acordo com o ponto 5.2 (3) da NP EN 1991-1-3 (IPQ, 2009c), a carga da neve em coberturas para situações persistentes/transitórias é determinada por

$$s = u_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \quad (3.39)$$

No âmbito do caso em estudo, de acordo (i) com a cláusula 5.2. (7) da NP EN 1991-1-3, se se considerar uma topografia normal, tem-se para coeficiente de exposição $C_e=1$, e (ii) com a cláusula 5.2 (8), tem-se para o coeficiente térmico, $C_t=1,0$.

Para as hipóteses iniciais e o modelo estrutural, cobertura de duas vertentes com inclinações iguais, o Quadro 5.2. (Quadro 3.13) e a Figura 5.3 (Figura 3.6), por indicação do ponto 5.3.3 da NP EN 1991-1-3 (IPQ, 2009c), determinam para o coeficiente de forma para a carga da neve, u_i , o valor 0,8.

Quadro 3.13 - Coeficientes de forma para a carga da neve. (IPQ, 2009c)

Ângulo de inclinação da vertente α	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_i	0,8	$0,8(60 - \alpha)/30$	0,0

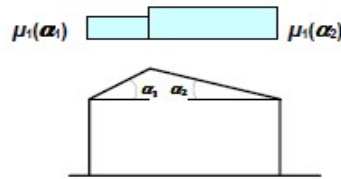


Figura 3. 6 - Coeficiente de forma para a carga da neve - cobertura de duas vertentes. (IPQ, 2009c)

Conforme o estipulado no Anexo Nacional NP EN 1991-1-3 (IPQ, 2009c), o valor característico da carga da neve ao nível do solo (s_k), expresso em kN/m^2 , é determinado por:

$$s_k = C_z \left(1 + \left(\frac{H}{500} \right)^2 \right) \quad (3.40)$$

em que C_z é o coeficiente da zona (assumindo Z1 $\rightarrow C_z = 0,3$) e H é a altitude do local ($H = 700 \text{ m}$, Bragança²);

Para o exemplo em análise, o valor característico da carga da neve ao nível do solo vale:

$$s_k = 0,3 \cdot \left(1 + \left(\frac{700}{500} \right)^2 \right) = 0,89 \text{ kN/m}^2$$

Logo, a carga da neve na cobertura neste exemplo vale:³

$$s = 0,80 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 0,89 = 0,71 \text{ kN/m}^2$$

e o Quadro 3.14 apresenta os correspondentes valores na verga.

Quadro 3.14 – Acções Variáveis.

Acção variável	$Q_{k,i}$ [kN/m]
neve	$0,71 \cdot \frac{7,3 + 1,2}{2} = 3,02$
Sobrecarga cobertura	$0,40 \cdot \frac{7,3 + 1,2}{2} = 1,70$

² Optou-se por Bragança porque se pretendia obter uma acção da neve similar à estabelecida pela ASCE 7.

³ Como se pode verificar, a acção da neve obtida pela NP EN 1991-1-3 é idêntica à da ASCE 7 devido às opções tomadas.

3.2.4.2. Combinações de acções

As combinações de acções foram estabelecidas na secção 3.2.3.2. De acordo com a expressão (3.19), obtem-se para a carga distribuída para as combinações fundamentais de acções com a sobrecarga de cobertura e a neve, respectivamente, como acções variáveis de base:

$$\begin{aligned} A.V.B.: \text{ sob. cobertura: } & 1,35 \cdot 2,33 + 1,5 \cdot 1,70 + 1,5 \cdot 0,50 \cdot 3,02 = 7,96 \text{ kN/m} \\ A.V.B.: \text{ neve: } & 1,35 \cdot 2,33 + 1,5 \cdot 3,02 + 1,5 \cdot 0 \cdot 1,70 = 7,68 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

O valor de cálculo para a verificação dos estados limites últimos é, portanto, 7,96 kN/m.

Ainda para o problema em análise, os valores de cálculo da carga uniformemente distribuída para o controlo da flecha máxima, aplicando a expressão (3.20), são

$$\begin{aligned} A.V.B.: \text{ sob. cobertura: } & 2,33 + 1,70 + 0,50 \cdot 3,02 = 5,54 \text{ kN/m} \\ A.V.B.: \text{ neve: } & 2,33 + 3,02 + 0 \cdot 1,70 = 5,35 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

e aplicando expressão (3.21), são

$$\begin{aligned} A.V.B.: \text{ sob. cobertura: } & 1,70 + 0,50 \cdot 3,02 = 3,21 \text{ kN/m} \\ A.V.B.: \text{ neve: } & 3,02 + 0 \cdot 1,70 = 3,02 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

3.2.4.3. Propriedades da secção

As propriedades da secção foram definidas na secção 3.2.2.3.

3.2.4.4. Classificação da secção

A secção é de Classe 4 como se determinou na secção 3.2.3.4

3.2.4.5. Resistência à flexão

De acordo com a expressão (3.24), o vão admissível da verga vale:

$$L \leq 4 \cdot \sqrt{\frac{21651 \text{ mm}^3 \cdot 228 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{7,96 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}} = 3,15 \text{ m}$$

3.2.4.6. Resistência à flexão combinada com esmagamento de alma

Segundo o estipulado na secção 3.2.3.6, aplicando as equações (3.30) e (3.32) ao problema em análise e verificando as restrições, obtém-se o mesmo valor para a resistência local ao corte da alma.

O vão máximo e o correspondente momento flector máximo são agora definidos pelas expressões (3.34) e (3.35)

$$L_{\max} = 2,46\text{m}, M_{Ed,\max} = 9,82 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = 9,82 \text{ kNm} \leq M_{c,Rd} = 9,88 \text{ kNm} \rightarrow \textit{verifica!}$$

$$P = 4,78 \text{ kN} \leq R_{w,Rd} = 40,06 \text{ kN} \rightarrow \textit{verifica!}$$

3.2.4.7. Limitação da flecha

A limitação da flecha é descrita na secção 3.2.3.7. Para o exemplo analisado, $q_2 = 3,21 < 0.8q_1 = 0.8 \cdot 5,54 = 4,43$, de modo que a primeira combinação é condicionante,

$$L \leq \sqrt[3]{\frac{48 EI}{125 q_1}} = \sqrt[3]{\frac{48 \cdot 210 \times 10^3 \text{ N/mm}^2 \cdot 2 \cdot 2277058 \text{ mm}^4}{125 \cdot 5,54 \text{ kNm}^{-1}}} = 4,05 \text{ m}$$

Logo, o vão admissível para a verga, é o menor valor obtido através dos diferentes critérios:

$$L = \min\{3,15 \text{ m}; 2,46 \text{ m}; 4,05 \text{ m}\} = 2,46 \text{ m}$$

3.2.5 Método 5

O Método 5 é similar ao Método 4, mas inclui a contribuição directa para a resistência dos canais onde encaixam os perfis que constituem a verga. A contribuição dos canais é considerada de forma simplificada, desprezando o efeito compósito, por mera adição das suas propriedades resistentes.

3.2.5.1. Acções de Projecto

As acções de projecto foram estabelecidas na secção 3.2.4.1.

3.2.5.2. Combinação de acções

As combinações de acções foram estabelecidas na secção 3.2.4.2.

3.2.5.3. Propriedades da secção

As propriedades dos perfis C foram definidas na secção 3.2.2.3 e as dos perfis U (canais) apresentam-se no Quadro 3.15.

Quadro 3.15 - Propriedades da secção U 93/1,5 (informação fornecida pela PERFISA®).

U93×1,5								
t	b	h	t _{cor}	r	A			
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]			
1,50	43,00	93,00	1,46	2,73	253			
I _{zz}	W _{pl,z}	W _{el,z}	I _{eff,z} ⁺	W _{eff,z,min} ⁺	I _{eff,z} ⁻	W _{eff,z,min} ⁻	f _y	E
[mm ⁴]	[mm ³]	[mm ³]	[mm ⁴]	[mm ³]	[mm ⁴]	[mm ³]	[MPa]	[GPa]
45662	2699	1390	40592	1346	33864	933	228	210

3.2.5.4. Classificação da secção

A classificação das secções é efectuada conforme descrito na secção 3.2.3.4 onde se concluiu que as secções do tipo C são de Classe 4. Aplicando o mesmo procedimento para a secção do tipo U e assumindo que está submetida a compressão:

(i) Classificação da alma:

- Elemento interior → Quadro 3.10;
- $f_y = 228 \text{ MPa} \rightarrow \mathcal{E}=1,02$;
- $\frac{c}{t} = \frac{200 - 2 \cdot 2 \cdot 1,46}{1,46} = 132,25 \leq 126,48 \rightarrow \text{não verifica, logo é classe 4}$;

Ou seja, a secção U também é de classe 4.

3.2.5.5. Resistência à flexão

Aplicando a expressão (3.23) ao exemplo em análise, obtém-se o valor para o vão admissível da verga:

$$L \leq \sqrt{\frac{8 \cdot (2 \cdot 21651 \text{ mm}^3 + 933 \text{ mm}^3 + 1346 \text{ mm}^3) \cdot 228 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{7,96 \frac{\text{kN}}{\text{m}}} = 3,23 \text{ m}}$$

3.2.5.6. Resistência à flexão combinada com esmagamento de alma

Segundo o estipulado na secção 3.2.3.6, aplicando as equações (3.30) e (3.32) ao problema em análise e verificando as restrições, obtém-se o mesmo valor para a resistência local ao corte da alma.

O vão máximo e o correspondente momento flector máximo são agora definidos pelas expressões (3.34) e (3.35)

$$L_{\max} = 2,52 \text{ m}, M_{Ed, \max} = 10,34 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = 10,32 \text{ kNm} \leq M_{c, Rd} = 10,39 \text{ kNm} \rightarrow \textit{verifica!}$$

$$P = 4,78 \text{ kN} \leq R_{w, Rd} = 40,06 \text{ kN} \rightarrow \textit{verifica!}$$

3.2.5.7. Limitação da flecha

A limitação da flecha é descrita na secção 3.2.3.7. Para o exemplo analisado, $q_2 = 3,21 < 0,8q_1 = 0,8 \cdot 5,54 = 4,43$, de modo que a primeira combinação é condicionante,

$$L \leq \sqrt[3]{\frac{48 EI}{125 q_1}} = \sqrt[3]{\frac{48 \cdot 210 \times 10^3 \text{ N/mm}^2 \cdot 2 \cdot (2277058 + 33864) \text{ mm}^4}{125 \cdot 5,54 \text{ kNm}^{-1}}} = 4,07 \text{ m}$$

Logo, o vão admissível para a verga neste exemplo, será o menor valor obtido através dos diferentes critérios:

$$L = \min\{3,23 \text{ m}; 2,52 \text{ m}; 4,07 \text{ m}; \} = 2,52 \text{ m}$$

3.2.6. Método 6

Este método é igual ao Método 5, excepto que considera a acção compósita, ou colaborativa, dos canais auxiliares, ou seja, a sua contribuição para a inércia relativa ao centro geométrico da secção composta.

3.2.6.1. Acções de Projecto

As acções de projecto foram estabelecidas na secção 3.2.4.1.

3.2.6.2. Combinação de acções

As combinações de acções são as mesmas estabelecidas na secção 3.2.4.2.

3.2.6.3. Propriedades gerais das secções

As propriedades da secção são as mesmas assumidas na secção 3.2.5.3.

3.2.6.4. Classificação da secção

Como se mostrou na secção 3.2.5.4., as secções do tipo C e U são de Classe 4.

3.2.6.5. Secção Idealizada

De acordo com a cláusula 5.1 da EN 1993-1-3 (CEN, 2006a), pode-se desprezar a influência dos cantos redondos do perfil e usar uma secção idealizada se se verificarem as seguintes condições:

$$r_{int} \leq 5 t_{cor} \quad (3.41)$$

$$r_{int} \leq 0,10 b_p \quad (3.42)$$

em que b_p é a largura nominal de uma parede do perfil, definida pela distância entre os pontos médios, P, dos cantos que a delimitam, ver Figura 3.7.

Para o caso em estudo, a influência dos cantos redondos pode ser desprezada:

- (i) Para a secção C200×1,5:

$$r_{int} = 2 \text{ mm} \leq 5 \cdot t_{cor} = 5 \cdot 1,46 = 7,3 \text{ mm}$$

$$r_{int} = 2 \text{ mm} \leq 0,10 \cdot b_p = 0,10 \cdot \min(196,94; 39,94) = 3,99 \text{ mm}$$

(ii) Para a secção U93×1,5:

$$r_{int} = 2 \text{ mm} \leq 5 \cdot t_{cor} = 5 \cdot 1,46 = 7,3 \text{ mm}$$

$$r_{int} = 2 \text{ mm} \leq 0,10 \cdot b_p = 0,10 \cdot \min(89,94; 41,47) = 4,15 \text{ mm}$$

Portanto, as larguras dos elementos que constituem a secção idealizada são dadas por:

(i) Para a secção C200×1,5:

$$h_{p,i} = h_p + 2 \cdot g_r = 196,94 + 2 \cdot 0,80 = 198,54 \text{ mm}$$

$$b_{p,i} = b_p + 2 \cdot g_r = 39,94 + 2 \cdot 0,80 = 41,54 \text{ mm}$$

$$c_{p,i} = c_p + g_r = 13,47 + 0,80 = 14,27 \text{ mm}$$

(ii) Para a secção U93×1,5:

$$h_{p,i} = h_p + 2 \cdot g_r = 89,94 + 2 \cdot 0,80 = 91,54 \text{ mm}$$

$$b_{p,i} = b_p + g_r = 41,47 + 0,80 = 42,27 \text{ mm}$$

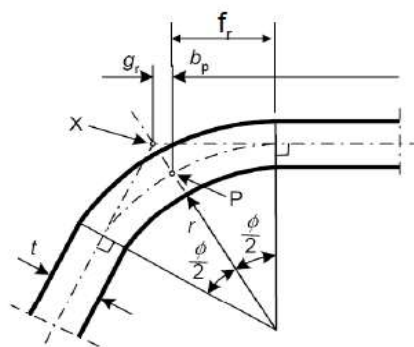


Figura 3. 7 - Canto adjacente a uma parede: o ponto P determina a largura nominal desta (b_p ou h_p).
(Camotim et al, 2011)

A análise da Figura 3.7 (Camotim et al, 2011), permite escrever,

$$r_m = r + \frac{t}{2} \quad (3.43)$$

$$g_r = r_m \cdot \left[\tan \frac{\phi}{2} - \sin \frac{\phi}{2} \right] \quad (3.44)$$

$$f_r = r_m \cdot \sin \frac{\phi}{2} \quad (3.45)$$

Aplicando estas três expressões, obtêm-se os valores para a largura nominal dos elementos que constituem a verga back-to-back do caso em estudo apresentados no Quadro 3.16.

Quadro 3.16 - Larguras nominais para as secções em questão.

Elemento	r_m [mm]	ϕ [°]	g_r [mm]	f_r [mm]	Alma (h_p) [mm]	Banzo (b_p) [mm]	Reforços (c_p) [mm]
C200×1,5	2,73	90,00	0,80	1,93	196,94	39,94	13,47
U93×1,5	2,73	90,00	0,80	1,93	89,94	41,47	-

3.2.6.6. *Secção efectiva para a instabilidade local – cálculo das larguras efectivas*

Como já foi mencionado, uma forma de ter em conta os fenómenos de instabilidade local passa por determinar a secção efectiva do perfil a analisar, ou seja, calcular a largura efectiva das suas paredes, conforme está previsto na EN 1993-1-5 (CEN, 2006b).

Para efectuar o cálculo da largura efectiva, tem que se ter em atenção a distribuição de tensões nos vários elementos comprimidos, i.e., almas e/ou banzos, apresentando-se de seguida os procedimentos estipulados na norma acima mencionada.

Considere-se primeiro o procedimento para o cálculo sucessivo da largura efectiva das paredes ou elementos de uma secção sujeita a flexão (Silvestre e Camotim, 2006):

- (i) Considerar a secção bruta. Calcular, para os elementos paralelos ao eixo de flexão:
 - a. O parâmetro ψ , dado pela razão entre os valores da tensão normal nas suas extremidades, $\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$;
 - b. A largura efectiva;
- (ii) Considerar a secção composta pelas áreas efectivas dos elementos paralelos ao eixo de flexão e áreas brutas dos elementos perpendiculares ao eixo de flexão e a distribuição de tensões nesta secção quando sujeita a flexão. Calcular, para os elementos perpendiculares ao eixo de flexão:
 - a. O parâmetro ψ ;
 - b. A largura efectiva;
- (iii) Considerar a secção composta pelas áreas efectivas. Calcular as propriedades efectivas relevantes, ou seja, $w_{eff,min}$ e I_{eff} .

Apresenta-se de seguida o procedimento de cálculo da largura efectiva de um elemento. A cláusula 5.5.2 da EN 1993-1-3 remete para a cláusula 4.4 da EN 1993-1-5, relativa ao cálculo da largura efectiva de uma parede de uma secção de aço enformado a frio:

- (i) Determinação do centro geométrico da secção composta;
- (ii) Determinação da razão $\psi = \sigma_2/\sigma_1$ entre as tensões na extremidade do elemento, σ_1 e σ_2 , esquematicamente representadas nos Quadros 3.17 e 3.18;
- (iii) Com base no valor de ψ , determinação do valor do coeficiente de encurvadura local da parede do elemento, k_σ , conforme indicado nos mesmos Quadros 3.17 e 3.18;
- (iv) Determinação da esbelteza normalizada local do elemento:

$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{b}}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} \quad (3.46)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235\text{MPa}}{f_y}} \quad (3.47)$$

(v) Determinação do factor de redução de largura efectiva, ρ :

a. Para paredes interiores comprimidas:

$$\rho = \begin{cases} 1 & \text{se } \bar{\lambda}_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot \psi} \\ \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 & \text{se } \bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot \psi} \end{cases} \quad (3.48)$$

b. Para paredes em consolas comprimidas:

$$\rho = \begin{cases} 1 & \text{se } \bar{\lambda}_p \leq 0,748 \\ \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 & \text{se } \bar{\lambda}_p > 0,748 \end{cases} \quad (3.49)$$

(vi) Determinação da largura efectiva da zona de compressão do elemento:

$$\bar{b}_{eff} = \rho \cdot \bar{b} \quad (3.50)$$

A cláusula 5.5.3.2 (5) da EN 1993-1-3 estipula regras específicas para o cálculo da sua largura efectiva dos reforços, indicando para o factor de encurvadura local (CEN, 2006a):

$$k_\sigma = \begin{cases} 0,5 & \text{se } \frac{c_p}{b_p} \leq 0,35 \\ 0,5 + 0,83 \cdot \left(\frac{c_p}{b_p} - 0,35\right)^{\frac{2}{3}} & \text{se } 0,35 < \frac{c_p}{b_p} < 0,60 \end{cases} \quad (3.51)$$

Quadro 3.17 - Elementos internos comprimidos.

Stress distribution (compression positive)		Effective ^p width b_{eff}				
		$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{c1} = 0,5 b_{eff} \quad b_{c2} = 0,5 b_{eff}$				
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{c1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff} \quad b_{c2} = b_{eff} - b_{c1}$				
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{c1} = 0,4 b_{eff} \quad b_{c2} = 0,6 b_{eff}$				
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$\frac{AC_1}{AC_2} - 1 > \psi \geq -3 \frac{AC_1}{AC_2}$
Buckling factor k_n	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

Quadro 3.18 - Elementos comprimidos em consola.

Stress distribution (compression positive)		Effective ^p width b_{eff}				
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho c$				
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$				
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$0 > \psi > -1$	-1	$1 \geq \psi \geq -3$		
Buckling factor k_n	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$		
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho c$				
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$				
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	
Buckling factor k_n	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8	

Aplicando este procedimento de cálculo da largura efectiva ao caso de estudo, vem,

(i) Cálculo do centro geométrico da peça com as dimensões idealizadas:

$$Z_G = \frac{\sum A_i \cdot z_i}{\sum A_i} \quad (3.52)$$

De acordo com a Figura 3.8 e exemplificando para o elemento 1, obtém-se os valores no Quadro 3.19.

$$z_1 = 42,27 \cdot \frac{1}{2} = 21,14 \text{ mm}$$

$$A_1 = 42,27 \cdot 1,46 = 61,71 \text{ mm}^2$$

Quadro 3.19 - Cálculo do centro geométrico da secção composta.

Elemento	Z _{i,G} [mm]	A _i [mm ²]	A _i ·Z _{i,G}
1	21,14	61,71	1304,33
2	21,14	61,71	1304,33
3	42,27	133,65	5649,32
4	50,93	20,83	1061,18
5	50,93	20,83	1061,18
6	43,73	60,65	2652,15
7	43,73	60,65	2652,15
8	143,07	289,87	41471,36
9	143,07	289,87	41471,36
10	242,27	60,65	14693,29
11	242,27	60,65	14693,29
12	235,07	20,83	4897,40
13	235,07	20,83	4897,40
14	222,53	61,71	13732,98
15	222,53	61,71	13732,98
16	243,73	133,65	32574,12
Σ		1419,82	197848,81
Z_G [mm] (tracção)			139,35

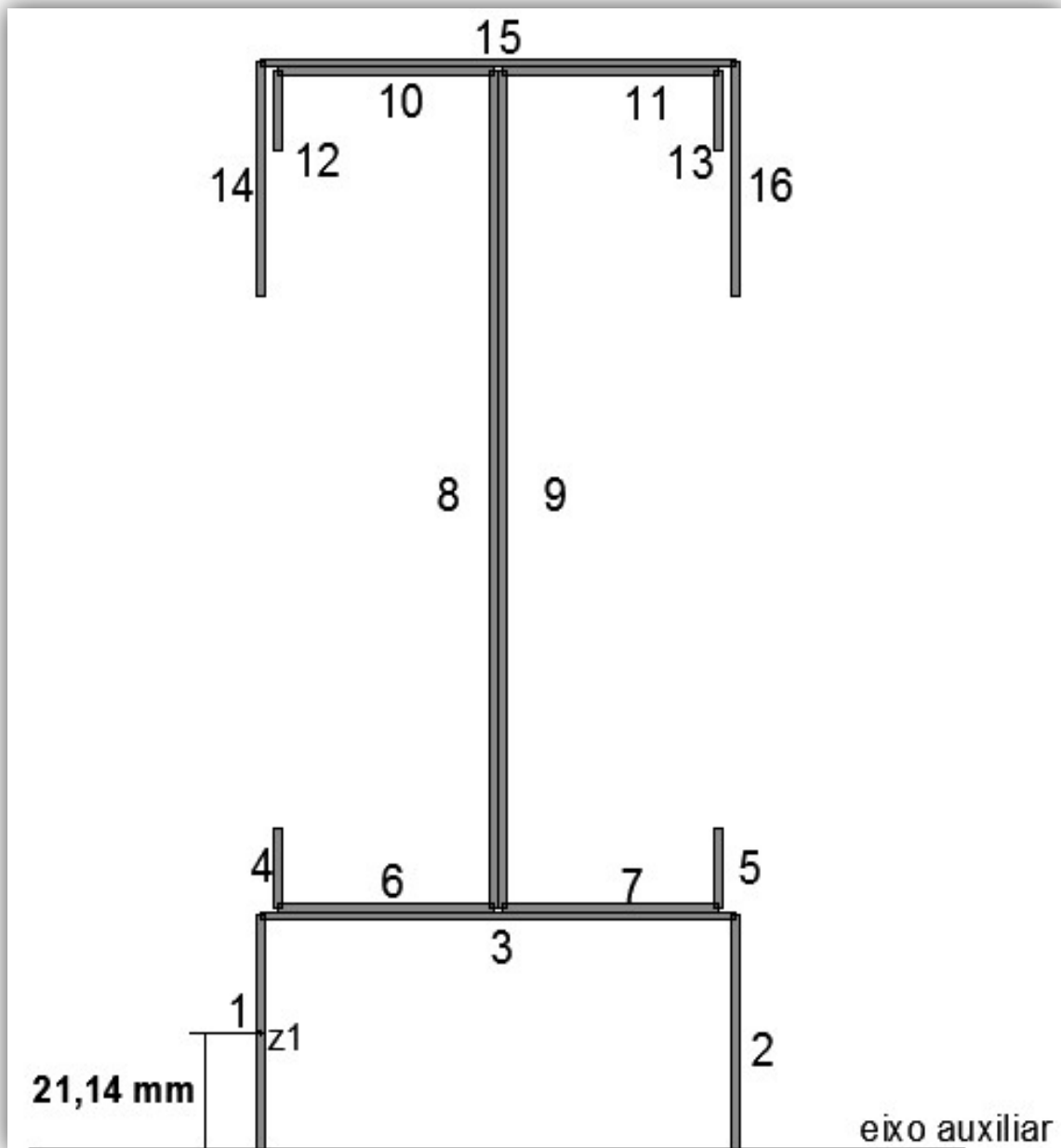


Figura 3. 8 - Secção transversal com as dimensões idealizadas.

(ii) Cálculo da largura efectiva das paredes paralelas ao eixo de flexão, ver Quadros 3.20.

Quadro 3. 20 - Largura efectiva do banzo superior de C200×1,5 e da alma de U U93×1,5.

	C200×1,5	U93×1,5
Elemento	Interior	Interior
ψ	1,00	1,00
k_{σ}	4,00	4,00
ϵ (S280)	1,02	1,02
$b = b_i$ [mm]	41,54	91,54
t_{cor} [mm]	1,46	1,46
λ_p	0,49	1,09
ρ	1,00	0,73
b_{eff} [mm]	41,54	67,16
$b_{eff,1}$ [mm]	20,77	33,58
$b_{eff,2}$ [mm]	20,77	33,58

- (iii) Determinação do centro geométrico da secção para as dimensões efectivas dos elementos paralelos ao eixo de flexão (Z_G'), ver Quadro 3.21.

Quadro 3.21 - Cálculo do centro geométrico da secção composta.

Elemento	$Z_{i,G}$ [mm]	A_i [mm²]	$A_i \cdot Z_{i,G}$
1	21,14	61,71	1304,33
2	21,14	61,71	1304,33
3	42,27	133,65	5649,32
4	50,93	20,83	1061,18
5	50,93	20,83	1061,18
6	43,73	60,65	2652,15
7	43,73	60,65	2652,15
8	143,07	289,87	41471,36
9	143,07	289,87	41471,36
10	242,27	60,65	14693,29
11	242,27	60,65	14693,29
12	235,07	20,83	4897,40
13	235,07	20,83	4897,40
14	222,53	61,71	13732,98
15	222,53	61,71	13732,98
16	243,73	98,05	23897,25
Σ		1384,22	189171,94
Z_G' [mm] (tracção)			136,66

- (iv) Cálculo das largura efectivas das paredes dos elementos perpendiculares ao eixo de flexão, ver Quadro 3.22, 3.23 e 3.24.

Quadro 3.22 - Largura efectiva da alma de C200×1,5.

C200×1,5	
Alma	
Elemento	Interior
σ_1 [MPa]	228,00
σ_2 [MPa]	-177,41
ψ	-0,78
k_σ	18,63
ϵ (S280)	1,02
$h=h_i$ [mm]	198,54
t_{cor} [mm]	1,46
λ_p	1,09
ρ	0,81
h_c [mm]	106,34
h_{eff} [mm]	86,42
$h_{eff,1}$ [mm]	34,57
$h_{eff,2}$ [mm]	51,85

Quadro 3.23 - Largura efectiva do reforço superior de C200×1,5.

C200×1,5	
Reforço Superior	
Elemento	Saliente
Tipo	single edge fold
b_i [mm]	41,54
c_i [mm]	14,27
k_σ	0,50
t_{cor} [mm]	1,46
ε (S280)	1,02
λ_p	0,48
ρ	1,00
c_{eff} [mm]	14,27

Quadro 3.24 - Largura efectiva do banzo de U93×1,5.

U93×1,5	
Banzo	
Elemento	Consola
σ₂ [MPa]	-108,10
σ₁ [MPa]	-179,84
ψ	0,60
k_σ	0,61
ε (S280)	1,02
b = b_i [mm]	42,27
t_{cor} [mm]	1,46
λ_p	1,28
ρ	0,67
b_{eff} [mm]	28,15

- (v) Determinação do centro geométrico e das propriedades efectivas da secção com as dimensões efectivas (Z_G''), ver Quadro 3.25.

Quadro 3.25 - Cálculo do centro geométrico da secção composta.

Elemento	$Z_{i,G}$ [mm]	A_i [mm ²]	$A_i \cdot Z_{i,G}$	I [mm ⁴]
1	21,14	61,71	1304,33	765531
2	21,14	61,71	1304,33	765531
3	42,27	133,65	5649,32	1072252
4	50,93	20,83	1061,18	136727
5	50,93	20,83	1061,18	136727
6	43,73	60,65	2652,15	470845
7	43,73	60,65	2652,15	470845
8,t	89,90	134,62	12102,19	332140
9,t	89,90	134,62	12102,19	332140
8,c2	161,93	75,71	12259,00	85506
9,c2	161,93	75,71	12259,00	85506
8,c1	225,85	50,47	11399,01	451126
9,c1	225,85	50,47	11399,01	451126
10	243,73	60,65	14781,83	759293
11	243,73	60,65	14781,83	759293
12	236,53	20,83	4927,82	228677
13	236,53	20,83	4927,82	228677
14	229,59	41,10	9435,59	395378
15	229,59	41,10	9435,59	395378
16	243,73	98,05	23897,25	1227521
Σ		1284,84	169392,79	9550216
Z_G'' [mm] (tracção)			131,84	
Z [mm] (compressão)			112,62	
I_{eff} [mm ⁴]			9550216	
$I_{eff,red}$ [mm ⁴]			8753371	
$W_{eff,1}$ [mm ³]			66394	
$W_{eff,2}$ [mm ³]			77725	
$W_{eff,min}$ [mm ³]			66394	

No entanto, e de acordo com o artigo 5.1 (4) da EN 1993-1-3, a utilização da secção idealizada no cálculo das propriedades geométricas da secção deve ser corrigida (CEN, 2006a):

$$I_{eff,red} = I_{eff} \cdot (1 - 2 \cdot \delta) \quad (3.54)$$

em que o factor de redução δ é dado por:

$$\delta = 0,43 \cdot \frac{\sum_{j=1}^n r_{int,j} \cdot \frac{\phi_j}{90}}{\sum_{i=1}^m b_{c,i}} \quad (3.55)$$

Aplicando a expressão à secção transversal da verga em análise, obtêm-se os valores do Quadro 3.26.

Quadro 3.26 - Factor de redução, δ .

Factor de redução		
C200x1,5	rj [mm]	2,00
	bi [mm]	41,54
	hi [mm]	198,54
	ci [mm]	14,27
	ϕ_j	90,00
U93x1,5	rj [mm]	2,00
	bi [mm]	42,27
	hi [mm]	91,54
	ϕ_j	90,00
δ		0,04

3.2.6.7. Resistência à flexão

De acordo com a secção 3.2.3.5, aplicando a equação (3.24) ao exemplo, obtém-se o vão admissível da verga:

$$L \leq \sqrt{\frac{8 \cdot 66393,99 \text{ mm}^3 \cdot 228 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{7,96 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}} = 3,90 \text{ m}$$

3.2.6.8. Resistência à flexão combinada com esmagamento de alma

Segundo o estipulado na secção 3.2.3.6, aplicando as equações (3.30) e (3.32) ao problema em análise e verificando as restrições, obtém-se o mesmo valor para a resistência local ao corte da alma.

O vão máximo e o correspondente momento flector máximo são agora definidos pelas expressões (3.34) e (3.35)

$$L_{\max} = 3,00 \text{ m}, M_{Ed,\max} = 15,04 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = 15,04 \text{ kNm} \leq M_{c,Rd} = 15,14 \text{ kNm} \rightarrow \text{verifica!}$$

$$P = 4,78 \text{ kN} \leq R_{w,Rd} = 40,06 \text{ kN} \rightarrow \text{verifica!}$$

3.2.6.9. Limitação da flecha

A limitação da flecha é descrita na secção 3.2.3.7. Para o exemplo analisado, $q_2 = 3,21 < 0,8q_1 = 0,8 \cdot 5,54 = 4,43$, de modo que a primeira combinação é condicionante,

$$L \leq \sqrt[3]{\frac{48 EI}{125 q_1}} = \sqrt[3]{\frac{48 \cdot 210 \times 10^3 \text{ N/mm}^2 \cdot 8753371,39 \text{ mm}^4}{125 \cdot 5,54 \text{ kNm}^{-1}}} = 5,03 \text{ m}$$

O vão admissível para a verga é o menor valor obtido pelos diferentes critérios:

$$L = \min\{3,90 \text{ m}; 3,00 \text{ m}; 5,03 \text{ m}\} = 3,00 \text{ m}$$

O Quadro 3.27. assinala as semelhanças e as diferenças, em termos de resultados das acções e vãos admissíveis, que existem entre estes métodos.

Quadro 3.27 – Comparação dos 6 métodos.

		Mét. 1	Mét. 2	Mét. 3	Mét. 4	Mét. 5	Mét. 6
Peso	tecto	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
	cobertura	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
Próprio [kN/m ²]	neve (solo)	1,00	1,00	1,00	0,89	0,89	0,89
	neve (cob)	(0,7)	0,7	0,7	0,71	0,71	0,71
	sobrecarga cobertura	(0,77)	0,77	0,77	0,4	0,4	0,4
Acções Variáveis [kN/m ²]	ULS	(8,02)	8,02	10,29	7,96	7,96	7,96
	SLS₁	(5,30)	5,30	7,09	5,54	5,54	5,54
	SLS₂	(3,27)	3,27	4,76	3,21	3,21	3,21
q [kN/m]	ULS	(8,02)	8,02	10,29	7,96	7,96	7,96
	SLS₁	(5,30)	5,30	7,09	5,54	5,54	5,54
	SLS₂	(3,27)	3,27	4,76	3,21	3,21	3,21
Modelo	Duplo C	Duplo C	Duplo C	Duplo C	Duplo C + Duplo U (sem acção compósita)	Duplo C + Duplo U (com acção compósita)	
Perfil	800S162- 54	C200×1,5	C200×1,5	C200×1,5	C200×1,5 + U93×1,5	C200×1,5 + U93×1,5	
L [m]	2,82	2,78	2,18	2,46	2,52	3,00	

4. ANÁLISE CRÍTICA DE RESULTADOS

Tal como descrito na secção 1.3, um dos objectivos desta dissertação é o desenvolvimento de um procedimento para a modelação, análise e dimensionamento de perfis compostos em aço leve sujeitos a flexão, e gerar quadros de aplicação expedita para os perfis da gama de um produtor nacional (PERFISA®). Outro objectivo é a comparação dos procedimentos do método da AISI com a metodologia e requisitos dos Eurocódigos, de modo a estabelecer se é possível aplicar de forma segura o procedimento americano em território nacional ou europeu.

Com base nestes objectivos, o estudo consubstanciado nos Quadros seguidamente apresentados, e que é o cúmulo do trabalho realizado, neste documento tem duas funções:

1. Por um lado, constitui uma transposição cientificamente correcta do método da AISI para a filosofia e especificidades dos Eurocódigos. Assim, estes quadros mostram uma possível via para a utilização de um método semelhante ao da AISI para o dimensionamento e verificação da segurança e condições de serviço de LSF para habitação;
2. Por outro lado, permite avaliar de forma sistemática a diferença entre as soluções obtidas pelos dois métodos. Note-se a este propósito, que valores negativos do erro relativo no terceiro conjunto de coluna dos Quadros 4.2 a 4.5 indicam que a solução da AISI é *insegura*. Ora, observa-se que tal situação não só pode acontecer, como sucede com bastante frequência, mostrando que o método possivelmente mais utilizado no nosso país para o dimensionamento deste tipo de estruturas não é aceitável. Este resultado acaba por surpreender o próprio autor deste estudo, que pretendia apenas averiguar se as margens de segurança, que imaginava existirem na utilização do método da AISI, eram suficientemente grandes para que se tentasse estabelecer um procedimento alternativo economicamente mais vantajoso.





Os Quadros 4.2 a 4.5 resultam da aplicação sistemática das fórmulas descritas na secção 3.2.2 (Método 2) e na secção 3.2.6 (Método 6), através da programação destas no Microsoft Office Excel 2007.

Adoptaram-se os seguintes valores para a largura do edifício: (i) 7,3 m; (ii) 8,5 m; (iii) 9,8 m e (iv) 11 m, uma vez que são estes os valores que se encontram nas tabelas do método da AISI.


Mas podem obviamente ser usados outros valores, em função das necessidades mais apropriadas para os projectistas nacionais. No que toca aos valores da acção da neve, o método da AISI apresenta quatro valores: (i) 1,0 kN/m²; (ii) 1,4 kN/m²; (iii) 2,4 kN/m² e (iv) 3,4 kN/m². No entanto, optou-se por apresentar os resultados considerando o valor da acção da neve de 1,0 kN/m², uma vez que os outros valores são excessivos para o território nacional. Por último, relativamente ao tipo de aço, os aços S280GD e S320GD são os mais vendidos pelo produtor nacional (PERFISA®), daí ter-se optado pela utilização destes. No que toca aos perfis, estes foram escolhidos através da sua semelhança geométrica relativamente aos perfis produzidos nos EUA, no entanto pode, obviamente, considerar-se outros perfis, em função das necessidades dos fabricantes e projectistas.

O Quadro 4.1 apresenta a legenda da escala atribuída ao erro relativo, quando se compara o método da AISI com a metodologia e os requisitos dos Eurocódigos. A utilização desta escala colorida proporciona uma leitura qualitativa dos resultados mais rápida, porque os valores críticos, ou seja, em que o método americano é insatisfatório, surgem assinalados a vermelho.


Quadro 4. 1 - Legenda da escala atribuída ao erro relativo.

	[%]
	$x \leq 0$
	$0 < x \leq 5$
	$5 < x \leq 10$
	$10 < x$


Quadro 4.2 - Vãos admissíveis de vergas suportando carga do teto e cobertura.

 S280GD Neve 1kN/m ²	AISI				EC				(EC-AISI)/(AISI) [%]			
	Largura do edifício [m]				Largura do edifício [m]				Largura do edifício [m]			
	7,3	8,5	9,8	11	7,3	8,5	9,8	11	7,3	8,5	9,8	11
C90/1,5	1,82	1,69	1,58	1,48	1,90	1,75	1,62	1,51	4,6	3,7	2,7	1,7
C90/2,0	2,11	1,97	1,84	1,75	2,29	2,13	1,99	1,87	8,9	8,4	7,8	7,2
C90/2,5	2,32	2,18	2,04	1,94	2,61	2,44	2,28	2,15	12,4	11,9	11,5	11,1
C90/3,0	2,50	2,34	2,20	2,09	2,87	2,69	2,52	2,38	15,0	14,7	14,3	14,0
C150/1,5	2,51	2,34	2,18	2,06	2,68	2,47	2,28	2,13	6,5	5,6	4,6	3,6
C150/2,0	2,92	2,73	2,56	2,43	3,23	3,00	2,80	2,64	10,5	9,9	9,3	8,7
C150/2,5	3,25	3,04	2,85	2,71	3,68	3,43	3,21	3,03	13,4	12,9	12,4	12,0
C150/3,0	3,51	3,29	3,09	2,94	4,05	3,78	3,54	3,36	15,4	15,1	14,7	14,3
C200/1,5	3,04	2,83	2,63	2,48	3,24	2,99	2,76	2,57	6,6	5,7	4,7	3,7
C200/2,0	3,55	3,31	3,10	2,94	3,92	3,64	3,39	3,20	10,6	10,0	9,4	8,8
C200/2,5	3,95	3,69	3,47	3,29	4,47	4,17	3,89	3,68	13,3	12,8	12,4	11,9
C200/3,0	4,28	4,01	3,77	3,58	4,93	4,60	4,31	4,08	15,1	14,7	14,3	14,0
C250/1,5	3,54	3,29	3,07	2,89	3,76	3,47	3,20	2,98	6,2	5,3	4,3	3,3
C250/2,0	4,14	3,87	3,62	3,43	4,56	4,23	3,94	3,71	10,1	9,5	8,8	8,2
C250/2,5	4,62	4,32	4,05	3,85	5,21	4,85	4,53	4,28	12,7	12,3	11,8	11,4
C250/3,0	5,03	4,70	4,42	4,19	5,75	5,36	5,02	4,75	14,4	14,0	13,7	13,3


Quadro 4.3 - Vão admissíveis de vergas suportando cargas do teto e cobertura

 S320GD Neve 1kN/m ²	AISI				EC				(EC-AISI)/(AISI) [%]			
	Largura do edifício [m]				Largura do edifício [m]				Largura do edifício [m]			
	7,3	8,5	9,8	11	7,3	8,5	9,8	11	7,3	8,5	9,8	11
C90/1,5	1,95	1,82	1,70	1,60	2,02	1,87	1,72	1,61	3,7	2,7	1,6	0,5
C90/2,0	2,25	2,10	1,97	1,87	2,44	2,27	2,11	1,99	8,3	7,7	7,1	6,5
C90/2,5	2,42	2,31	2,18	2,07	2,77	2,59	2,42	2,29	14,6	11,9	11,0	10,6
C90/3,0	2,54	2,43	2,32	2,23	3,06	2,86	2,68	2,54	20,5	17,9	15,3	13,8
C150/1,5	2,70	2,51	2,35	2,21	2,85	2,63	2,43	2,27	5,6	4,6	3,4	2,3
C150/2,0	3,13	2,92	2,74	2,60	3,44	3,20	2,98	2,81	10,0	9,3	8,6	8,0
C150/2,5	3,46	3,24	3,05	2,89	3,91	3,65	3,41	3,23	13,0	12,5	12,0	11,5
C150/3,0	3,74	3,51	3,30	3,13	4,32	4,03	3,78	3,58	15,3	14,9	14,5	14,1
C200/1,5	3,26	3,04	2,83	2,68	3,45	3,18	2,93	2,74	5,7	4,7	3,5	2,4
C200/2,0	3,79	3,54	3,32	3,15	4,17	3,88	3,61	3,40	10,0	9,4	8,7	8,0
C200/2,5	4,22	3,95	3,70	3,52	4,76	4,44	4,15	3,92	12,9	12,4	11,9	11,4
C200/3,0	4,57	4,28	4,02	3,82	5,26	4,91	4,59	4,35	15,0	14,6	14,2	13,8
C250/1,5	3,80	3,54	3,30	3,11	4,00	3,69	3,40	3,18	5,3	4,2	3,1	2,0
C250/2,0	4,43	4,14	3,88	3,67	4,85	4,51	4,19	3,95	9,5	8,8	8,1	7,5
C250/2,5	4,94	4,62	4,33	4,11	5,54	5,16	4,82	4,56	12,3	11,8	11,3	10,8
C250/3,0	5,37	5,02	4,72	4,48	6,13	5,72	5,35	5,07	14,3	13,9	13,5	13,1

Quadro 4. 4 - Vãos admissíveis de vergas suportando cargas do tecto, cobertura e piso.

 S280GD Neve 1kN/m ²	AISI				EC				(EC-AISI)/(AISI) [%]			
	Largura do edifício [m]				Largura do edifício [m]				Largura do edifício [m]			
	7,3	8,5	9,8	11	7,3	8,5	9,8	11	7,3	8,5	9,8	11
C90/1,5	1,20	1,09	0,98	0,90	0,92	0,75	0,00	0,00	-23,3	-31,1	-	-
C90/2,0	1,45	1,35	1,25	1,17	1,31	1,18	1,05	0,94	-10,1	-12,6	-15,6	-19,0
C90/2,5	1,63	1,52	1,42	1,34	1,56	1,43	1,31	1,22	-4,2	-5,6	-7,2	-8,9
C90/3,0	1,77	1,65	1,55	1,46	1,76	1,63	1,51	1,41	-0,4	-1,4	-2,5	-3,6
C150/1,5	1,68	1,54	1,40	1,30	1,35	1,15	0,94	0,73	-19,5	-25,0	-32,8	-43,8
C150/2,0	2,03	1,88	1,75	1,64	1,85	1,68	1,52	1,38	-8,5	-10,7	-13,2	-15,9
C150/2,5	2,28	2,13	1,99	1,88	2,20	2,03	1,86	1,73	-3,3	-4,7	-6,2	-7,7
C150/3,0	2,48	2,32	2,17	2,06	2,48	2,29	2,12	1,99	-0,2	-1,2	-2,3	-3,3
C200/1,5	2,03	1,86	1,70	1,58	1,64	1,41	1,17	0,95	-19,1	-24,1	-31,1	-39,9
C200/2,0	2,45	2,28	2,12	1,99	2,25	2,04	1,84	1,68	-8,4	-10,6	-13,1	-15,6
C200/2,5	2,77	2,58	2,41	2,28	2,67	2,46	2,26	2,10	-3,5	-4,8	-6,4	-7,8
C200/3,0	3,02	2,82	2,65	2,51	3,00	2,78	2,57	2,41	-0,6	-1,6	-2,7	-3,7
C250/1,5	2,36	2,16	1,98	1,84	1,90	1,64	1,37	1,12	-19,3	-24,2	-30,8	-38,8
C250/2,0	2,86	2,65	2,47	2,32	2,60	2,36	2,14	1,95	-8,9	-11,0	-13,5	-15,9
C250/2,5	3,23	3,01	2,82	2,66	3,10	2,85	2,62	2,44	-4,1	-5,4	-6,9	-8,3
C250/3,0	3,54	3,30	3,10	2,93	3,49	3,23	2,99	2,80	-1,3	-2,3	-3,3	-4,4

Quadro 4. 5 - Vãos admissíveis de vergas suportando carga do tecto, cobertura e piso.

 S320GD Neve 1kN/m ²	AISI				EC				(EC-AISI)/(AISI) [%]			
	Largura do edifício [m]				Largura do edifício [m]				Largura do edifício [m]			
	7,3	8,5	9,8	11	7,3	8,5	9,8	11	7,3	8,5	9,8	11
C90/1,5	1,31	1,20	1,09	1,01	1,00	0,83	0,63	0,00	-23,6	-30,5	-42,0	-
C90/2,0	1,56	1,45	1,35	1,27	1,40	1,26	1,13	1,02	-10,7	-13,1	-16,1	-19,3
C90/2,5	1,75	1,63	1,52	1,44	1,67	1,53	1,40	1,30	-4,7	-6,1	-7,8	-9,4
C90/3,0	1,89	1,77	1,66	1,57	1,88	1,74	1,61	1,51	-0,7	-1,7	-2,8	-3,9
C150/1,5	1,82	1,67	1,54	1,43	1,45	1,24	1,03	0,83	-20,4	-25,7	-33,0	-42,4
C150/2,0	2,18	2,02	1,88	1,78	1,98	1,79	1,62	1,48	-9,2	-11,4	-14,0	-16,6
C150/2,5	2,44	2,28	2,13	2,02	2,35	2,16	1,99	1,85	-3,8	-5,2	-6,8	-8,3
C150/3,0	2,65	2,48	2,33	2,20	2,64	2,44	2,26	2,12	-0,5	-1,5	-2,6	-3,7
C200/1,5	2,20	2,03	1,86	1,74	1,76	1,52	1,27	1,05	-20,1	-25,1	-31,7	-39,8
C200/2,0	2,64	2,45	2,28	2,15	2,39	2,17	1,97	1,80	-9,2	-11,4	-13,9	-16,4
C200/2,5	2,96	2,76	2,59	2,45	2,84	2,62	2,41	2,24	-4,0	-5,4	-6,9	-8,4
C200/3,0	3,23	3,02	2,83	2,68	3,20	2,96	2,75	2,57	-0,9	-1,9	-3,0	-4,0
C250/1,5	2,56	2,36	2,17	2,02	2,04	1,76	1,48	1,23	-20,4	-25,2	-31,6	-39,1
C250/2,0	3,07	2,86	2,66	2,51	2,77	2,52	2,28	2,08	-9,7	-11,9	-14,3	-16,8
C250/2,5	3,46	3,23	3,02	2,86	3,30	3,04	2,79	2,60	-4,6	-6,0	-7,5	-9,0
C250/3,0	3,78	3,53	3,31	3,14	3,73	3,44	3,19	2,99	-1,5	-2,5	-3,7	-4,7


Do ponto de vista quantitativo, a comparação dos resultados das duas metodologias permite retirar as seguintes conclusões:

- Quando a verga suporta apenas cargas do teto e cobertura, o procedimento estabelecido pelo Método Prescritivo norte-americano é mais seguro, ou seja, mais conservador, que a aplicação dos requisitos dos Eurocódigos. Além disso, também se verifica que o erro não é excessivo, sendo quase sempre, para a situação estudada, inferior a 10-15% - ou seja, neste caso o Método Prescritivo é uma boa opção;
- Já para o caso em que a verga suporta a carga de um piso para além das cargas do teto e cobertura, o procedimento estabelecido pelo Eurocódigo é mais severo que o método da AISI, ou seja, não se deve usar o Método Prescritivo.

Para além da importância da análise do erro relativo dos resultados para os Métodos 2 e 6, é fundamental perceber qual o critério que condiciona o máximo vão admissível da verga. Este tipo de informação não é disponibilizado pelos quadros do Método Prescritivo, o que dificulta a análise do projectista. O critério condicionante encontra-se representado nos Quadros 4.6 a 4.9.


Também o resultado geral destes quadros é algo surpreendente, ao indicar que as forças concentradas inerentes a esta tipologia estrutural, e que resultam do espaçamento dos montantes das paredes e vigas das lajes, serem suficientemente elevados para despoletar a encurvadura ou esmagamento da alma dos perfis utilizados. Este resultado poderia indiciar o eventual interesse em utilizar perfis com uma espessura superior, mas a análise dos resultados mostra que de facto o ganho percentual no valor do vão é sempre menor que o aumento percentual da espessura.

Quadro 4. 6 - Critério condicionante para vergas suportando carga do tecto e cobertura.


 S280GD Neve: 1,0 kN/m ²	AISI – Método 2				EC – Método 6			
	Largura do edifício [m]				Largura do edifício [m]			
	7,3	8,5	9,8	11	7,3	8,5	9,8	11
C90/1,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C90/2,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C90/2,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C90/3,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C150/1,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C150/2,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C150/2,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C150/3,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C200/1,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C200/2,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C200/2,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C200/3,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C250/1,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C250/2,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C250/2,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C250/3,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A

M- momento flector resistente; A- esmagamento de alma; δ - limitação da flecha; M + A- combinação do momento flector com esmagamento de alma.


Quadro 4. 7 - Critério condicionante da verga suportando cargas do teto e cobertura.

 S320GD Neve: 1,0 kN/m ²	AISI – Método 2				EC – Método 6			
	Largura do edifício [m]				Largura do edifício [m]			
	7,3	8,5	9,8	11	7,3	8,5	9,8	11
C90/1,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C90/2,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C90/2,5	δ	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C90/3,0	δ	δ	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C150/1,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C150/2,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C150/2,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C150/3,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C200/1,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C200/2,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C200/2,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C200/3,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C250/1,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C250/2,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C250/2,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C250/3,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A

Quadro 4. 8 - Critério condicionante de vão de verga suportando carga do tecto, cobertura e piso.

 S280GD Neve: 1,0 kN/m ²	AISI – Método 2				EC – Método 6			
	Largura do edifício [m]				Largura do edifício [m]			
	7,3	8,5	9,8	11	7,3	8,5	9,8	11
C90/1,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C90/2,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C90/2,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C90/3,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C150/1,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C150/2,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C150/2,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C150/3,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C200/1,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C200/2,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C200/2,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C200/3,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C250/1,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C250/2,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C250/2,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C250/3,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A

Quadro 4. 9 - Critério condicionante de vão da verga suportando carga do tecto, cobertura e piso.

 S320GD Neve: 1,0 kN/m ²	AISI – Método 2				EC – Método 6			
	Largura do edifício [m]				Largura do edifício [m]			
	7,3	8,5	9,8	11	7,3	8,5	9,8	11
C90/1,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C90/2,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C90/2,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C90/3,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C150/1,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C150/2,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C150/2,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C150/3,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C200/1,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C200/2,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C200/2,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C200/3,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C250/1,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C250/2,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C250/2,5	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A
C250/3,0	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A	M + A

O motivo pelo qual a combinação do esmagamento de alma com o momento flector é a condicionante, ou quase sempre, prende-se com o tipo de elemento, que, estando simplesmente apoiado apresenta momento flector máximo a meio-vão, e com o tipo de carregamento típico deste tipo de estruturas, ou seja, definido por cargas pontuais espaçadas de 60 cm (ou do valor do espaçamento uniforme entre os perfis). As cargas pontuais são críticas do ponto de vista de esmagamento da alma, o que, combinado com o momento máximo na secção de meio-vão, esgota a capacidade resistente destas peças muito esbeltas. Os resultados também mostram se se aumentar a espessura dos perfis, os fenómenos de esmagamento, e o momento flector, continuam a ser críticos.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões gerais

De uma forma geral, o trabalho efectuado mostrou que

- (i) É possível a adaptação do Método Prescritivo da AISI à filosofia de verificação da segurança e dimensionamento dos Eurocódigos;
- (ii) Que essa adaptação depende das características dos perfis enformados a frio considerados;
- (iii) Que essa adaptação deve ser efectuada separadamente para cada um dos tipos de zonas críticas, implicando portanto um volume de trabalho e de resultados muito grande;
- (iv) A análise dos resultados requer a comparação detalhada das hipóteses e implementação do Método Prescritivo com os Eurocódigos – como o primeiro não é familiar ao profissional europeu, é aconselhada alguma dedicação ao mesmo;
- (v) Contrariamente ao que se depreende da prática habitual, ou pelo menos, da omissão generalizada relativamente a este aspecto, os resultados obtidos deixam-nos apreensivos no que toca à responsabilidade do projectista.

5.2. Conclusões sobre as metodologias da AISI e dos Eurocódigos e sua comparação

Relativamente ao Método Prescritivo da AISI, destacam-se os seguintes aspectos:

- (i) Em termos práticos, torna-se muito útil uma vez que permite ao projectista a consulta expedita das tabelas de cálculo de modo a obter o resultado pretendido;
- (ii) Apesar de o projectista ter a vantagem de obter soluções através da consulta de tabelas sem efectuar qualquer cálculo, perde alguma sensibilidade relativamente à avaliação de segurança da estrutura e à grandeza dos coeficientes de segurança efectivos;

- (iii) Adaptação limitada à realidade europeia, relativamente tanto às dimensões dos perfis metálicos como à quantificação e combinação de acções;
- (iv) Por comparação com os Eurocódigos, relativamente ao caso da verga que suporta apenas carga do tecto e cobertura, o procedimento estabelecido pelo Método da AISI é mais conservador.
- (v) Em cerca de 99,5% dos casos o critério condicionante é a combinação esmagamento de alma com o momento flector.

Relativamente aos métodos e requisitos dos Eurocódigos destacam-se os seguintes aspectos:

- (i) Em termos práticos, o processo de dimensionamento e de verificação de segurança dos elementos estruturais de aço leve é muito moroso e trabalhoso para o projectista de edificações em LSF;
- (ii) Sendo um processo moroso e trabalhoso, torna-se fundamental estabelecer parcerias entre as instituições detentoras de conhecimento e as indústrias produtoras de perfis de aço leve para o desenvolvimento de tabelas de cálculo expedito;
- (iii) Por comparação com o Método da AISI, relativamente ao caso de vergas que suportam a carga de um piso para além do tecto e da cobertura, os Eurocódigos são mais severos.
- (iv) Sendo o método e requisitos do Eurocódigo mais severo, conclui-se que não é seguro aplicar o Método Prescritivo em território nacional, ou no espaço europeu abrangido pelos Eurocódigos.
- (v) O critério condicionante é, sempre, a combinação do esmagamento de alma com o momento flector.

No final deste capítulo, torna-se fundamental salientar o facto de, em certos casos, o Eurocódigo ser mais severo que o Método Prescritivo norte-americano. Assim, para além das conclusões no âmbito do trabalho inicialmente previsto, e, seguramente, mais importante que estas, a principal conclusão desta dissertação, imprevisível quando os trabalhos foram iniciados, é que não é seguro aplicar os procedimentos estabelecidos pelo Método Prescritivo

em território nacional ou europeu. Desta forma, as questões apresentadas na secção 3.1 desta dissertação:

- Será seguro aplicar o Método Prescritivo da AISI em território nacional ou europeu?
- Quais são as bases do Método Prescritivo?
- O procedimento de verificação de segurança dos elementos estruturais proposto pelo Método Prescritivo está em sintonia com os Eurocódigos?
- No caso de uma resposta positiva à anterior questão, existirá uma margem de manobra que convide a tentar otimizar aquela solução?
- No caso de uma resposta negativa à penúltima questão, será exequível a adaptação daquele método à filosofia e requisitos dos Eurocódigos?

estão, agora, respondidas de forma objectiva. Algo que na bibliografia actual, é inexistente.

5.3. Trabalhos futuros

No que toca aos trabalhos futuros, sugerem-se os seguintes temas:

- (i) Utilização, análise e modelação de perfis compostos em LSF – Caso de aberturas nos pavimentos;
- (ii) Utilização, análise e modelação de perfis compostos em LSF – Caso das vigas em consola;
- (iii) Utilização, análise e modelação de montantes que suportam as vergas das aberturas;
- (iv) Geração de quadros de aplicação expedita para vergas e para outros casos;
- (v) Estudo da influência das placas OSB no comportamento da estrutura em aço leve, modelação destas placas e impacto no dimensionamento;

- (vi) Concepção, análise e dimensionamento de treliças em LSF para vergas;
- (vii) Análise de ciclo de vida: Estrutura em aço leve versus Estrutura em betão armado, por exemplo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AISI/Committee, 2001. Commentary on North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. In AISI, ed. AISI - American Iron and Steel Institute, p. 216.

AISI/Committee, 2004. Commentary on the Standard for Cold-Formed Steel Framing - Prescriptive Method for One and Two Family Dwelling. In S. F. Alliance, ed. AISI - American Iron and Steel Institute, p. 108.

AISI/Committee, 2007. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. In S. F. Alliance, ed. AISI - American Iron and Steel Institute, p. 193.

AISI/Committee, 2012a. North American Standard for Cold-Formed Steel Framing - Header Design. In S. F. Alliance, ed. AISI - American Iron and Steel Institute, p. 32.

AISI/Committee, 2012b. Standard for Cold-Formed Steel Framing - Prescriptive Method for One and Two Family Dwellings. In S. F. Alliance, ed. AISI - American Iron and Steel Institute.

ASCE, C., 1998. ASCE 7 - Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. In ASCE - American Society of Civil Engineers.

Camotim, D., Silvestre, N., Santos & A., Santos, F., 2011. Slides do curso de formação CMM: “Projecto de Estruturas em Aço Leve.”

CEN, 2006a. *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*, Bruxelas.

CEN, 2006b. *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-5: General rules - Plated structural elements.*, Bruxelas.

IPQ, 2009a. *Eurocódigo 0 - Bases para o projecto de estruturas*, Caparica.

IPQ, 2009b. *Eurocódigo 1: Acções em estruturas, Parte 1-1: Acções gerais, pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios*, Caparica.

IPQ, 2009c. *Eurocódigo 1: Acções em estruturas, Parte 1-3: Acções gerais, Acções da neve*, Caparica.

IPQ, 2010. *Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.*, Caparica.

Mendes, H.O., 2015., Dissertação para obtenção de Grau de Mestre: *Procedimento para Análise e Dimensionamento de Estruturas de Aço Leve*. Faculdade de Ciências e Tecnologias - Universidade de Coimbra.

SCI, 2007. *Energy Efficient Housing using Light Steel Framming*,

SCI, 2001. *Light Steel Framing in Renovation: Roof-top Extensions, Internal walls and over-claddings.*,

Silva, L.S., Simões, R. & Gervásio, H., 2010. *Design of Steel Structures*, Bruxelas: ECCS - European Convention for Constructional Steelwork.

Silvestre, N. & Camotim, D., 2006. *Apontamentos de “Análise e Dimensionamento de Elementos Estruturais de Aço Enformado a Frio, Aço - Inox e Alumínio,”* IST - Instituto Superior Técnico.

Silvestre, N., Pires, J. & Santos, A., 2013. *manual de Conceção de Estruturas e Edifícios em LSF - Light Steel Framing*, CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.

Simões, R., 2014. *manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas 3ª Edição*, CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.