UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE TECNOLOGIA – CT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL – DECA
ENGENHARIA CIVIL

ALISSON ANDRADE DA SILVA

SOBRE CONSIDERAÇÕES NORMATIVAS APLICADAS AO DIMENSIONAMENTO DE VIGAS MISTAS: UMA ANÁLISE DA NORMA AMERICANA, EUROPEIA E BRASILEIRA

JOÃO PESSOA
2022

ALISSON ANDRADE DA SILVA

SOBRE CONSIDERAÇÕES NORMATIVAS APLICADAS AO DIMENSIONAMENTO DE VIGAS MISTAS: UMA ANÁLISE DA NORMA AMERICANA, EUROPEIA E BRASILEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa, como pré-requisito à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Hidelbrando José Farkat Diógenes.

JOÃO PESSOA

2022

Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586s Silva, Alisson Andrade da.
Sobre considerações normativas aplicadas ao dimensionamento de vigas mistas: uma análise da norma americana, europeia e brasileira / Alisson Andrade da Silva. - João Pessoa, 2022.
95 f. : il.

Orientação: Hidelbrando José Farkat Diógenes.
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Estruturas mistas. 2. Vigas mistas compactas. 3. Interação completa. 4. Análise comparativa. I. Diógenes, Hidelbrando José Farkat. II. Título.

UFPB/CT/BSCT CDU 624(043.2)

Elaborado por ONEIDA DIAS DE PONTES - CRB-15/198

FOLHA DE APROVAÇÃO

ALISSON ANDRADE DA SILVA

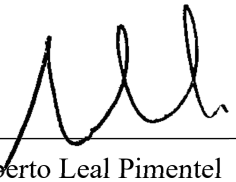
SOBRE CONSIDERAÇÕES NORMATIVAS APLICADAS AO DIMENSIONAMENTO DE VIGAS MISTAS: UMA ANÁLISE DA NORMA AMERICANA, EUROPEIA E BRASILEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso em 23/06/2022 perante a seguinte Comissão Julgadora:

Hidelbrando José Farkat Diógenes
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Aprovado

Andrea Brasiliano Silva
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB



Aprovado

Roberto Leal Pimentel
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Profª. Andrea Brasiliano Silva
Matrícula Siape: 1549557
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que sempre esteve ao meu lado cuidando de tudo. Por ter me guiado, dado forças pra enfrentar os percalços e mostrado que basta depositar a confiança nele para que tudo se torne possível.

A todo apoio dos meus pais que sempre acreditaram em mim, em especial a minha mãe, que não mediu esforços para que isso se tornasse possível.

Aos amigos que foram essenciais durante todo esse percurso e tornaram essa caminhada menos árdua.

Aos engenheiros David e Paulo, sócios da M&R Engenharia, por todos os ensinamentos passados que agregaram ainda mais na minha formação e foram fundamentais para o meu desenvolvimento profissional.

Por fim, ao meu orientador, Professor Drº. Hidelbrando, pelos direcionamentos ao longo desse trabalho. E a professora Drª. Andrea e Drº. Roberto que aceitaram o convite de participar da banca. Também, a todos os professores que passaram os seus conhecimentos e contribuíram para minha formação acadêmica e profissional.

RESUMO

As estruturas mistas de aço-concreto configuram-se uma solução estrutural vantajosa, por ambos os materiais extraírem de si suas melhores características. Os projetos são guiados por normas específicas: nos EUA, utiliza-se a ANSI/AISC 360-16; na Europa, a EUROCODE 4 (EN 1994-1-1:2004); e no Brasil, a NBR 8800:2008. Este trabalho analisou as considerações normativas, de modo a identificar qual delas apresenta resultados mais conservadores ao dimensionar essas estruturas. Para isso, realizou-se uma revisão das normas em estudo e da literatura, de modo a entender os processos de cálculo e identificar as suas diferenças. As vigas mistas foram dimensionadas considerando interação completa entre os materiais, utilizando o aço MR-250 (ASTM A-36), concreto de 25 MPa e laje com forma de aço incorporada (*steel deck*), em seguida, ocorreu as análises comparativas. Assim, foi possível observar que os coeficientes de diminuição da resistência dos materiais utilizados pela norma brasileira determinaram resultados mais conservadores quando comparada com as demais, com maiores discrepâncias quando relacionada com a norma europeia.

Palavras-chave: Estruturas mistas. Vigas mistas compactas. Interação completa. Análise comparativa.

ABSTRACT

The steel-concrete composite structures are an advantageous structural solution, because the best characteristics are extracted from both materials. The projects are guided by specific standards: in the USA the ANSI/AISC 360-16 is used; in Europe the EUROCODE 4 (EN 1994-1-1:2004); and in Brazil the NBR 8800:2008. This study analyzed the normative considerations, in order to identify which of them presents more conservative results when designing these structures. For this, a review of the standards under study and of the literature was carried out, in order to understand the calculation processes and identify their diferences. The composite beams were designed considering full interaction between the materials, which are MR-250 steel (ASTM A-36), 25 Mpa concrete and steel deck slab. Then, the comparative analysis took place. Thus, it was possible to observe that the coefficients used by the Brazilian standard for decreasing the strength of materials determined more conservative results when compared to the others, with greater discrepancies concerning the European standard.

Keywords: Composite structures. Compact composite beams. Full interaction. Comparative analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fachada frontal da Casa Bacopari 15
Figura 2 – Viga mista com laje de forma de aço incorporada (*steel deck*) 19
Figura 3 – Comparação da deformação da viga com e sem ação mista. 20
Figura 4 – Interação aço-concreto no comportamento de vigas mistas. 21
Figura 5 – Larguras efetivas. 23
Figura 6 – Conector do tipo pino com cabeça. 24
Figura 7 – Dimensão emh 26
Figura 8 – Seção homogeneizada. 27
Figura 9 – Distribuições das tensões na viga mista com Laje de concreto de concreto de acordo com a NBR 8800 30
Figura 10 – Distribuições das tensões na viga mista com LNP na viga de aço de acordo com a NBR 8800 31
Figura 11 – Distribuições das tensões na viga mista com Laje de concreto de concreto de acordo com a EUROCODE 4 34
Figura 12 – Distribuições das tensões na viga mista com LNP na mesa superior do perfil de aço de acordo com a EUROCODE 4 35
Figura 13 – Distribuições das tensões na viga mista com LNP na alma do perfil de aço de acordo com a EUROCODE 4 35
Figura 14 - Distribuições das tensões na viga mista de acordo com a ANSI/AISC 360-16 36
Figura 15 – Concepção do modelo 38
Figura 16 – Seção transversal das vigas mistas 40
Figura 17 – Tela inicial do programa Viga Mista vs 3.0 42
Figura 18 – Tela inicial do módulo de vigas mistas do programa ENERCALC Build 20 43

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparação da carga resistente de cálculo da seção transversal mista para um vão de 5 m 46
Gráfico 2 – Ábaco reunindo os perfis W 150 x 13,0, W 200 x 15,0, W 250 x 17,9 e W 310 x 21,0 e o números de conectores necessários em meia viga para que ocorra interação completa 47
Gráfico 3 – Ábaco reunindo os perfis W 360 x 32,9, W 410 x 38,8, e W 460 x 52,0 e o números de conectores necessários em meia viga para que ocorra interação completa 48
Gráfico 4 – Ábaco reunindo os perfis W 530 x 66,0 e W 610 x 101,0 e o números de conectores necessários em meia viga para que ocorra interação completa 49
Gráfico 5 – Carga resistente de cálculo para um vão de 4 metros – em $tf/m2$ 52
Gráfico 6 - Carga resistente de cálculo para um vão de 5 metros – em $tf/m2$ 54
Gráfico 7 – Carga resistente de cálculo para um vão de 6 metros – em $tf/m2$ 55
Gráfico 8 – Carga resistente de cálculo para um vão de 7 metros – em $tf/m2$ 57
Gráfico 9 – Carga resistente de cálculo para um vão de 8 metros – em $tf/m2$ 58
Gráfico 10 – Carga resistente de cálculo para um vão de 9 metros – em $tf/m2$ 60
Gráfico 11 – Carga resistente de cálculo para um vão de 10 metros – em $tf/m2$ 62
Gráfico 12 – Ábaco reunindo os perfis W 150 x 13,0, W 200 x 15,0, W 250 x 17,9 e W 310 x 21,0 com a verificação da flecha 63
Gráfico 13 – Ábaco reunindo os perfis W 360 x 32,9, W 410 x 38,8, e W 460 x 52,0 com a verificação da flecha 64
Gráfico 14 – Ábaco reunindo os perfis W 530 x 66,0 e W 610 x 101,0 com a verificação da flecha 65

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Valores adotados para Rg.....25
Tabela 2 – Valores adotados para Rp.....26
Tabela 3 – Coeficientes de resistência dos materiais. 29
Tabela 4 – Características do aço e concreto.....39
Tabela 5 – Características da laje 39
Tabela 6 – Tabela de perfis.....40
Tabela 7 – Perfis W com a LNP em posições distintas para um vão de 5 metros segundo a NBR 8800 41
Tabela 8 – Comparação da posição da linha neutra plástica para um vão de 5 metros.....44
Tabela 9 – Momento resistente de cálculo (MRd) para um vão de 5 metros – em $kN.m$.....45
Tabela 10 – Carga resistente de cálculo para um vão de 5 metros – em $tf/m2$.....45
Tabela 11 – Quantidade de conectores necessários em meia viga para que ocorra interação completa 50
Tabela 12 – Relação da posição da linha neutra plástica para um vão de 4 metros.....51
Tabela 13 – Relação da posição da linha neutra plástica para um vão de 5 metros.....53
Tabela 14 – Relação da posição da linha neutra plástica para um vão de 6 metros.....55
Tabela 15 – Relação da posição da linha neutra plástica para um vão de 7 metros.....56
Tabela 16 – Relação da posição da linha neutra plástica para um vão de 8 metros.....58
Tabela 17 – Relação da posição da linha neutra plástica para um vão de 9 metros.....59
Tabela 18 – Relação da posição da linha neutra plástica para um vão de 10 metros.....61
Tabela 19 – Flechas para as cargas em ELS em cm e flechas admissíveis para L/350 e L/250 em cm 66
Tabela 20 – Verificação das flechas para L/350.....66
Tabela 21 – Verificação das flechas para L/250.....67

LISTA DE SÍMBOLOS

A_a Área do perfil de aço;

A_{af} Área da mesa superior do perfil de aço;

A_{aw} Área da alma do perfil de aço, igual ao produto $h_w t_w$;

A_{cs} Área da seção transversal do conector;

C_{ad} Força resistente de cálculo da região comprimida do perfil de aço;

C_{cd} Força resistente de cálculo da espessura comprimida da laje de concreto;

E_c Módulo de elasticidade do concreto;

F_{hd} Força de cisalhamento de cálculo entre o componente de aço e a laje;

I_a Momento de inércia da seção do perfil de aço isolado;

I_{ef} Momento de inércia efetivo;

I_{tr} Momento de inércia da seção mista homogeneizada;

L_e Comprimento do trecho de momento positivo (distância entre pontos de momento nulo) em metros;

M_{Rd} Momento fletor resistente de cálculo;

Q_{Rd} Força resistente de cálculo de um conector de cisalhamento;

R_g Coeficiente para consideração do efeito de atuação de grupos de conectores;

R_p Coeficiente para consideração da posição do conector;

T_{ad} Força resistente de cálculo da região tracionada do perfil de aço;

b_F Largura média da mísula ou da nervura situada sobre o perfil de aço;

d_1 Distância do centro geométrico do perfil de aço até a face superior desse perfil;

d_2 Distância entre as forças de tração e compressão na treliça mista;

e_{mh} Distância da borda do fuste do conector à alma da nervura da fôrma de aço, medida à meia altura da nervura e no sentido da força cortante que atua no conector;

f_{cd} Resistência de cálculo para o concreto;

f_{ck} Resistência característica à compressão do concreto;

f_{ucs} Resistência à ruptura do aço do conector;

f_y Resistência ao escoamento do aço dos perfis;

f_{yd} Resistência de cálculo para o aço dos perfis;

h_F Altura das nervuras da laje com fôrma de aço incorporada (se não houver pré-laje ou fôrma de aço incorporada, h_F = 0);

t_c Altura da laje de concreto (se houver laje com fôrma de aço incorporada, é a espessura acima das nervuras);

t_f Espessura da mesa superior do perfil de aço;

t_w Espessura da alma;

y_c Distância do centro geométrico da parte comprimida do perfil de aço até a face superior desse perfil;

y_p Distância da linha neutra da seção plastificada até a face superior do perfil de aço;

y_t Distância do centro geométrico da parte tracionada do perfil de aço até a face inferior desse perfil;

α_E Relação entre o modulo de elasticidade do aço e o módulo de elasticidade do concreto;

η_i Grau de interação da viga mista de alma cheia;

γ_a Coeficiente de ponderação da resistência do aço estrutural para os estados-limites últimos relacionados a escoamento, flambagem e instabilidade;

γ_c Coeficiente de ponderação da resistência do concreto;

γ_{cs} Coeficiente de ponderação da resistência do conector, igual a 1,25 para combinações últimas de ações normais, especiais ou de construção e igual a 1,10 para combinações excepcionais;

a Espessura da região comprimida da laje;

b Largura efetiva da laje de concreto;

d Altura total do perfil de aço;

E Módulo de elasticidade do aço;

h Altura da alma, tomada como a distância entre faces internas das mesas;

n Número de conectores de cisalhamento a serem colocados entre a seção de momento fletor positivo solicitante de cálculo máximo e a seção adjacente de momento nulo.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

1.1 Contexto e Motivação 14

1.2 Objetivo 17

1.2.1 Objetivo Geral 17

1.2.2 Objetivos Específicos 17

1.3 Metodologia Geral do Trabalho 18

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 19

2.1 Definição 19

2.2 Ação Mista 20

2.3 Interação Parcial e Total 21

2.4 Classificação da Seção 21

2.5 Largura Efetiva da Laje 23

2.6 Grau de Interação 23

2.7 Conector de Cisalhamento 24

2.8 Resistência dos conectores 25

2.9 Homogeneização da seção 26

2.10 Momento de Inércia Efetivo 28

2.11 Verificação da Flecha 28

2.12 Momento Fletor Resistente de Cálculo em Regiões de Momento Positivo 29

2.12.1 NBR 8800:2008 29

2.12.2 EUROCODE 4 (EN 1994-1-1:2004) 33

2.12.3 ANSI/AISC 360-16 36

3 MATERIAIS E MÉTODOS 38

3.1 Concepção do Modelo 38

3.2 Características dos Materiais 38

3.3 Cálculo Analítico 40

3.4 Ferramentas de Validação 41

3.4.1 Viga Mista vs 3.0 41

3.4.2 ENERCALC Build 20 DEMO 42

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 44

4.1 Perfis W 360 x 32,9, W 460 x 52,0 e W 610 x 101,0 com um Vão de 5 Metros 44

4.2 Primeiros Perfis de Alturas Diferentes da Série W para Vãos Usuais 47

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 68

REFERÊNCIAS 70

APÊNDICE A – Dimensionamento das Vigas Mistas 72

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e Motivação

Desde o início das civilizações a construção civil está presente no cotidiano da humanidade. É composta por inúmeras e variadas atividades movimentando outras esferas como, as de fornecimento de materiais e mão de obra, conseguindo modificar o cenário econômico e social de forma satisfatória.

Com a demanda das construções em busca de atender as necessidades da sociedade, os processos construtivos precisam estar sempre renovando seus métodos e materiais, de modo que satisfaçam as exigências de segurança, econômicas, produtivas, sociais, ambientais, estéticas, entre outras.

Atualmente, com o avanço das pesquisas, tecnologias e da indústria, tornou-se factível e cada vez mais constante o uso de materiais combinados ou compostos, criando métodos e disposições construtivas que permitem desenvolver peças estruturais mais resistentes, dando a possibilidade de atender situações que antes eram desfavoráveis.

Dentre os materiais de maior utilização para dimensionar estruturas estão o concreto e o aço, principalmente de forma associada trabalhando em conjunto devido às forças de aderência entre suas superfícies. Ambos os materiais extraem de si suas melhores características, o concreto resiste aos esforços de compressão e o aço aos de tração. Com o desenvolvimento de métodos e disposições construtivas que garantem o funcionamento conjunto desses dois materiais foi possível o surgimento do sistema estrutural misto aço-concreto.

O sistema estrutural misto aço-concreto é aquele em que um perfil de aço trabalha em conjunto com o concreto armado formando uma peça estrutural como um pilar misto, viga mista, uma laje mista ou uma ligação mista (QUEIROZ; PIMENTA; MARTINS, 2012).

Dentre as peças estruturais mistas aço-concreto temos as vigas mistas onde a laje trabalha com a viga metálica por meio da simples colocação de conectores para a transmissão do fluxo de cisalhamento, desenvolvido durante a flexão, propiciando um considerável aumento na inércia do sistema estrutural (BELLEI; FERNANDO; MAURO, 2008).

De acordo com Filho (2015a) nos últimos anos praticamente todas as construções de edifícios comerciais que envolvam grandes estruturas estão adotando o aço, e as estruturas mistas têm sido as mais usadas por agilizarem os processos construtivos. Ele acredita que a

grande vantagem desse sistema estrutural se encontra no aumento da velocidade de construção, racionalizando os processos e diminuindo o gasto com mão de obra, refletindo diretamente no custo final da construção.

Filho (2015b) acrescenta que o uso das estruturas mistas, se ajusta melhor às diferentes configurações de *layout* e à escala do edifício, como também, permitem criar concepções arquitetônicas mais esbeltas. Ademais, Queiroz, Pimenta e Martins (2012) agrega que esse sistema reduz consideravelmente o consumo de aço estrutural, aumenta a rigidez da estrutura, diminui o peso próprio e o volume da estrutura trazendo economia nos custos da fundação e possibilita a dispensa de formas e escoramentos.

Apesar de todas as vantagens, a maioria das construtoras não possui a familiaridade com essa solução estrutural, o que acaba se tornando uma dificuldade em adotá-la nas construções brasileiras. Outra questão está relacionada com o custo do aço, mas isso só costuma ser encarado como um entrave por empresas que não estão familiarizadas com as vantagens construtivas do material. Precisa-se de uma melhor divulgação das vantagens dos sistemas mistos para que as construtoras possam começar a pensar em considerá-los nos projetos em que foram contratadas (FILHO, 2015b).

Ainda assim, este conceito vem ganhando cada vez mais notoriedade nas edificações brasileiras. É possível encontrar construções dos mais diversos segmentos onde foi utilizado o sistema estrutural misto de aço e concreto, como exemplo, pode-se citar a residência Casa Bacopari (Figura 1), localizada em São Paulo.

Figura 1 – Fachada frontal da Casa Bacopari

Fonte: Leonardo Finotti, 2012[1].

[1] Link: https://www.galeriadaarquitetura.com.br/slideshow/newslideshow.aspx?idproject=456&index=0

Maringoni (2014) explica que as vigas em perfis laminados calculadas como vigas mistas vencem vãos de até 10 metros e criam planos rígidos necessários para o travamento horizontal da estrutura. Além disso, o aço foi primordial para alcançarem os resultados esperados, proporcionando uma obra rápida e limpa, com a montagem da estrutura concluída em menos de um mês.

O projeto e especificações sobre vigas mistas são redigidas por normas específicas. Na Europa, as EUROCODES são responsáveis pelos regimentos das normas, reúnem um conjunto de códigos europeus de projeto estrutural para a construção de obras de Engenharia Civil. A EUROCODE que trata do projeto de estruturas mistas aço-concreto é a EUROCODE 4 (EN 1994-1-1:2004). Nos EUA, o *American National Standards Institute* (ANSI) administra e coordena os padrões da indústria. Lá, com o Instituto Americano de Construção de Aço (AISC), encarregado em atender a comunidade e indústria da construção estrutural de aço no país, são responsáveis pela elaboração da norma ANSI/AISC 360-16 que trata das especificações para edifícios de estruturas metálicas. No Brasil, o projeto e execução seguem as normas estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A NBR 8800 é a norma específica para estruturas de aço e mistas, com a última atualização no ano de 2008. Esta atualização teve referência das normas internacionais citadas incorporando o que existe de mais moderno no mundo (SANTOS, 2016).

Diante do contexto supracitado, tendo em vista todas as vantagens construtivas em adotar soluções mistas e da demanda de construções com concepções arquitetônicas mais esbeltas, o conhecimento dessas estruturas se torna relevante na escolha do sistema estrutural. Por fim, destaca-se que cada norma estudada adota fatores de segurança diferentes, assim uma análise comparativa se mostra adequada para observar qual delas é mais conservadora na hora de projetar essas estruturas.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho dedica-se em realizar um estudo comparativo quanto ao dimensionamento de vigas mistas de aço-concreto entre as informações técnicas das normas NBR 8800:2008, EUROCODE 4 (EN 1994-1:2004) e a ANSI/AISC 360-16, destacando as principais divergências encontradas e evidenciando qual destas se mostra mais conservadora em projetar essas estruturas na Europa, Estados Unidos e Brasil.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para que este trabalho seja guiado da melhor maneira, foram definidos objetivos específicos detalhados a seguir:

- Avaliar por meio de estudos analíticos, qual (is) normas fornecem resultados mais conservadores no contexto das premissas de cálculo estabelecidas neste estudo.
- Produzir ábacos para o pré-dimensionamento de vigas mistas.

1.3 Metodologia Geral do Trabalho

Inicialmente, para alcançar os objetivos enunciados, realizou-se uma revisão bibliográfica e dos documentos normativos quanto ao dimensionamento de vigas mistas com interação total. Para isso, foram utilizadas três normas relevantes que tratam do dimensionamento de vigas mistas de aço-concreto, a norma brasileira ABNT NBR 8800:2008, a americana ANSI/AISC 360-16 e a europeia EUROCODE 4 (EN 1994-1-1:2004). Além disso, foram selecionados trabalhos (artigos, livros e teses) para auxiliar no entendimento dos fundamentos conceituais e roteirização de cálculo.

Posteriormente, ocorreu o cálculo analítico das vigas mistas para o estado limite último (ELU) e a verificação para o estado limite de serviço (ELS). Para tanto, optou-se por utilizar o concreto com uma resistência característica de 25 MPa e o aço MR-250 (ASTM A-36). O dimensionamento ocorreu com a utilização da laje do tipo *Steel Deck* com altura das nervuras de 75 mm e com os perfis da série W da Gerdau Açominas. No cálculo dos conectores, foi utilizado o conector com diâmetro de 19,1 mm com resistência a ruptura de 415 MPa. Para auxiliar nos cálculos, utilizou-se o *software* PTC *Mathcad Prime* 6.0, assim como, o *Microsoft Excel* 2019. Em seguida, a validação dos resultados deu-se com o *software* Viga Mista vs 3.0 e *ENERCALC Build* 20 *DEMO*.

Por fim, realizam-se as análises dos resultados das etapas de cálculos entre as três normas. Para tal, foram selecionados três perfis com alturas diferentes de modo a comparar todos os casos apresentados pelos documentos normativos para determinação da resistência da seção mista de aço-concreto, considerando que possuam interação total entre os dois materiais. Além disso, criaram-se ábacos com os primeiros perfis de alturas diferentes da série W utilizando a carga resistente em ELU e a quantidade de conectores necessários em meia viga para que seja possível ocorrer a interação total da seção mista para uma sequência de vãos usuais nas edificações. Em seguida, outros ábacos foram criados com as cargas em ELS incluindo os gráficos das flechas dos perfis analisados anteriormente, como também, os gráficos das flechas admissíveis em cada vão, e então, realizou-se as verificações das flechas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para um melhor entendimento deste trabalho, faz-se necessário abordar alguns conceitos teóricos fundamentais. Este capítulo discute aspectos gerais com ênfase no dimensionamento de vigas mistas simplesmente apoiadas submetidas à flexão simples segundo a NBR 8800:2008, EUROCODE 4 (EN 1994-1-1:2004) e a ANSI/AISC 360-16.

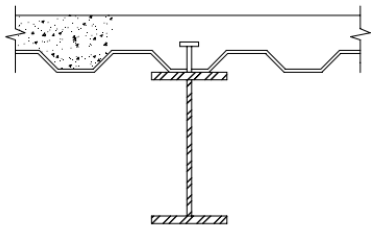
2.1 Definição

A NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008) define que as vigas mistas de aço e concreto consiste em um componente de aço simétrico em relação ao plano de flexão, onde o perfil I é o mais comum ou uma treliça, associada com uma laje de concreto acima de sua face superior. A ligação mecânica entre os dois componentes deve ser feita através de conectores de cisalhamento, de modo que o aço e a laje trabalhem em conjunto resistindo a flexão.

Quando o componente de aço é perfil I, recebe o nome de viga mista de alma cheia. Para a treliça, esta recebe o nome de treliça mista de aço e concreto. Outros perfis, como caixão ou tubular retangular, podem ser utilizados desde que siga as adaptações prescritas na NBR 8800. O elemento de concreto apresenta também variações. A laje pode ser maciça moldada in loco, mista de aço e concreto ou pré-moldada.

Neste trabalho, será estudado as vigas mistas com o perfil do tipo I com forma de aço incorporada (*steel deck*), conforme a Figura 2.

Figura 2 – Viga mista com laje de forma de aço incorporada (*steel deck*).



Fonte: (ALVA, 2000)

As vigas suportam as lajes de concreto, a maioria das quais está submetida a momentos fletores positivos, resultando uma compressão acima da linha neutra. Para a laje trabalhar em conjunto com a viga e formar um sistema misto, são inseridos conectores para a transmissão do fluxo de cisalhamento, desenvolvida durante a flexão, propiciando um aumento considerável de inércia.

Dessa forma, as vigas mistas simplesmente apoiadas colaboram para uma maior eficácia do sistema misto, de modo que as vigas de aço estão sendo tracionadas e a laje de concreto comprimida, aproveitando as melhores características de cada material.

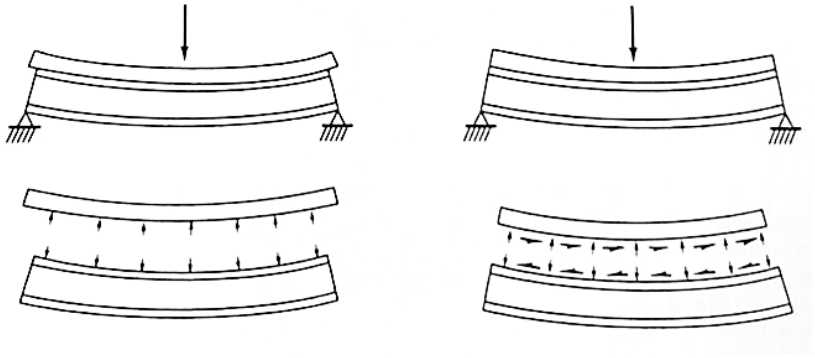
2.2 Ação Mista

A ação mista dos dois elementos estruturais é desenvolvida quando estão integralmente conectadas de modo a flexionar como um único elemento.

Salmon, Johnson e Malhas (2009) explicam que para desenvolver o conceito de comportamento misto é preciso considerar primeiro a viga onde não há ação mista (Figura 3 – (a)) de forma que o atrito aço-concreto é desprezado e ambos suportam separadamente uma parte do carregamento. Quando a laje se deforma sobre carga vertical, sua superfície inferior traciona, enquanto a mesa superior da viga está comprimida. Assim, uma descontinuidade ocorre na interface aço-concreto.

Quando um sistema atua de forma mista não há escorregamento entre a superfície aço-concreto sendo desenvolvidas forças horizontais (cisalhamento) para comprimir a superfície da laje, enquanto, simultaneamente, alonga a superfície da viga, conforme a Figura 3 – (b) (SALMON; JOHNSON; MALHAS, 2009).

Figura 3 – Comparação da deformação da viga com e sem ação mista.



a) Viga sem ação mista b) Viga com ação mista

Fonte: (SALMON; JOHNSON; MALHAS, 2009)

Em vigas de aço isoladas, onde não há ação mista, ocorre o escorregamento na interface aço-concreto e formam-se duas linhas neutras (Figura 4 – (a)). Não há consideração de resistência da laje no plano de flexão da viga (CALENZANI, 2013).

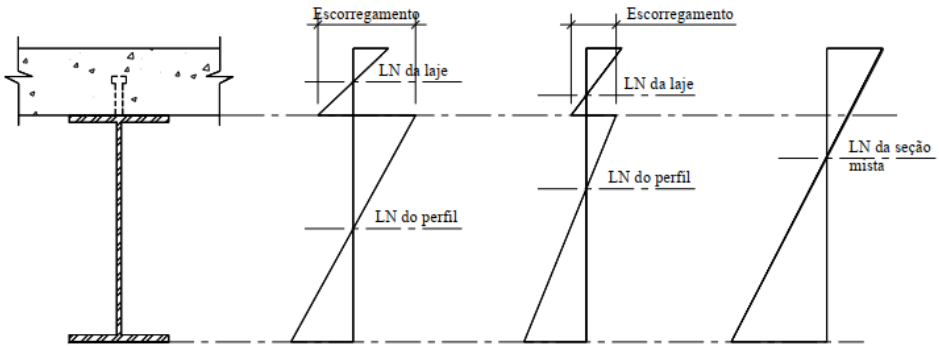
2.3 Interação Parcial e Total

Na região de momento fletor positivo, a interação entre o perfil de aço e o concreto pode ocorrer de duas formas: interação parcial e interação completa.

A interação parcial é caracterizada quando há uma descontinuidade no diagrama, apresentando duas linhas neutras na seção transversal (Figura 4 – (b)), uma passando no perfil e a outra na laje, pelo fato de ocorrer o escorregamento relativo ao nível da ligação aço-concreto (ALVA; MALITE, 2005).

Na interação total, é considerado que existe uma "ligação perfeita" entre o aço e concreto (Figura 4-c). Nesse sentido, existe apenas uma única linha neutra, pois não há escorregamento longitudinal relativo (ALVA; MALITE, 2005).

Figura 4 – Interação aço-concreto no comportamento de vigas mistas.



a) Perfil isolado b) Interação parcial c) Interação total

Fonte: (FABRIZZI, 2007)

Calenzani (2013) complementa que "na interação parcial, o estado limite último que governa o dimensionamento está relacionado ao colapso da conexão. Na interação total, o estado limite último que prevalece está relacionado ao esgotamento da resistência da seção mista à flexão".

2.4 Classificação da Seção

As vigas mistas são classificadas pela esbeltez da alma, abaixo são apresentados os valores limites para poder ser calculada uma viga mista através das propriedades elásticas ou plásticas da seção, segundo as normas estudadas para perfis "I".

De maneira prática a NBR 8800 (2008) e ANSI/AISC 360-16 dividem a análise das vigas mistas em compactas e semicompactas. Quando classificadas em compactas, consideram as propriedades plásticas da seção, pois não haverá ocorrência de flambagem local antes da plastificação total da seção. Por outro lado, as semicompactas são calculadas utilizando as

propriedades elásticas da seção, pois a flambagem local da alma ocorrerá após a plastificação total.

Além disso, a NBR 8800:2008 estabelece que nos casos onde $h/t_w > 5{,}70\sqrt{E/f_y}$, as vigas possuem alma esbelta e não poderão ser calculadas como viga mista.

Devem ser atendidas as seguintes exigências normativas, conforme a equação (1), para classificar as vigas mistas de alma cheia em compactas:

$$\frac{h}{t_w} \leq 3{,}76\sqrt{\frac{E}{f_y}} \tag{1}$$

Sendo:

h a altura da alma;

t_w a espessura da alma;

E o módulo de elasticidade do aço;

f_y a resistência ao escoamento do aço.

As vigas mistas de alma cheia são classificadas em semicompactas quando atende a equação (2).

$$3{,}76\sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 5{,}70\sqrt{\frac{E}{f_y}} \tag{2}$$

A EUROCODE 4 (EN 1994-1-1:2004) classifica as seções de vigas mistas em quatro classes distintas, onde a classe 1 e 2 deverá usar a distribuição plástica de tensões e para as classes 3 e 4, deverá ser utilizada a distribuição elástica de tensões tendo em conta os efeitos de fluência e retração.

Os valores limites para se poder calcular uma viga mista, considerando uma análise plástica em relação à alma com o perfil sujeito à flexão, é dado pela equação (3).

$$\frac{h}{t_w} \leq 83\varepsilon \tag{3}$$

Onde:

$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ com f_y em MPa.

2.5 Largura Efetiva da Laje

A largura da faixa de laje que trabalha em conjunto com uma viga de aço recebe o nome de largura efetiva. Sua determinação teórica é complexa. Entretanto, para fins práticos, as normas permitem que sejam adotados valores empíricos (FONSECA, 2015).

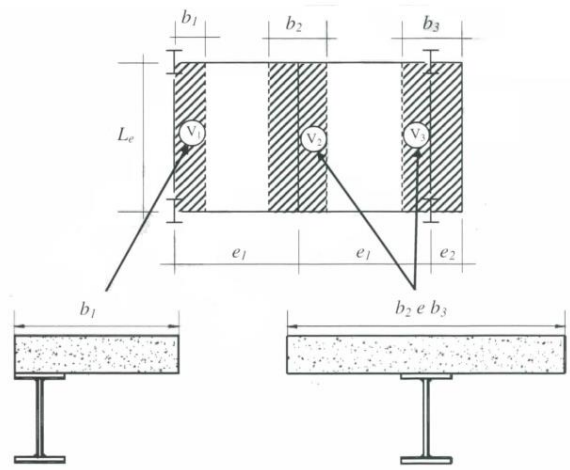
Segundo as normas estudadas, para vigas simplesmente apoiadas, a largura efetiva da laje de concreto é a soma das larguras efetivas para cada lado da linha de centro da viga, deve ser igual ao menor dos seguintes valores (Figura 5):

a) 1/8 do vão da viga mista, considerado entre linhas de centro dos apoios (L_e/8);

b) metade da distância entre a linha de centro da viga e a linha de centro da viga adjacente (e_1/2);

c) a distância da linha de centro da viga à borda de uma laje em balanço (e_2).

Figura 5 – Larguras efetivas.



Fonte: (FONSECA, 2015)

2.6 Grau de Interação

Para as vigas mistas de alma cheia, o grau de interação do concreto com o aço, é dado pela equação (4).

$$\eta_i = \frac{\sum Q_{Rd}}{F_{hd}} \tag{4}$$

Sendo:

$\sum Q_{Rd}$ o somatório das forças resistentes de cálculo dos conectores situados entre a seção de momento máximo e a seção adjacente de momento nulo;

F_{hd} é a força de cisalhamento de cálculo entre o componente de aço e a laje, obtida conforme a equação (5):

$$F_{hd} \leq \begin{cases} C_{cd} = 0{,}85.f_{cd}.b.a \\ T_{ad} = A_a.f_{yd} \end{cases} \quad (5)$$

Conforme ilustrado na Figura 9, temos:

C_{cd} valor máximo da resistência à compressão no concreto;

T_{ad} o valor máximo da resistência à tração do aço;

a é a espessura da região comprimida da laje;

b a largura efetiva da laje de concreto;

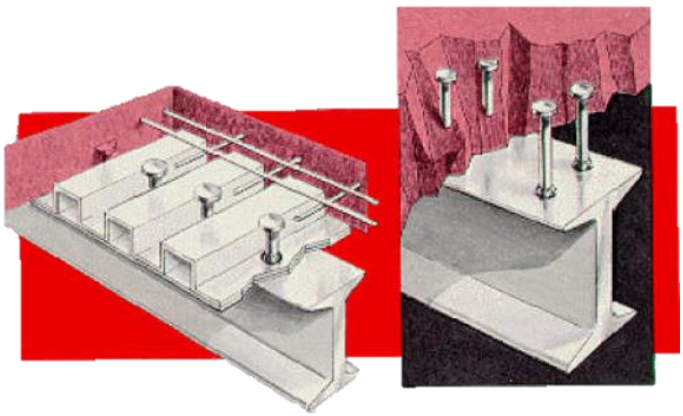
A_a é a área do perfil de aço.

Se $\eta_i \geq 1$ a interação entre o perfil de aço e a laje de concreto é completa. Caso contrário ($\eta_i < 1$) a interação é parcial.

2.7 Conector de Cisalhamento

Responsável por realizar a ligação entre o elemento de aço e a laje de concreto, assegurando o trabalho conjunto do aço-concreto. Os conectores do tipo pino com cabeça (Figura 6) são os mais utilizados devido à facilidade de fabricação utilizando o processo de soldagem semi-automático.

Figura 6 – Conector do tipo pino com cabeça.



Fonte: (CALENZANI, 2013)

2.8 Resistência dos conectores

Segundo a NBR 8800 (2008) a força resistente de cálculo de um conector é dada pelo menor valor entre as equações (6) e (7).

$$Q_{Rd} = \frac{1}{2}.\frac{A_{cs}\sqrt{f_{ck}.E_c}}{\gamma_{cs}} \quad (6)$$

$$Q_{Rd} = \frac{R_g.R_p.A_{cs}.f_{ucs}}{\gamma_{cs}} \quad (7)$$

Onde:

A_{cs} é a área de seção transversal do conector;

f_{ucs} é a resistência à ruptura do aço do conector;

E_c é o módulo de elasticidade do concreto dado pela equação (9);

γ_{cs} é o coeficiente de ponderação da resistência do conector; 1,25 para combinações últimas de ações normais, especiais ou de construção e 1,10 para combinações excepcionais.

R_g é coeficiente para consideração do efeito de atuação de grupos de conectores, ver Tabela 1.

R_p coeficiente para consideração da posição do conector, ver

Para o coeficiente R_g a NBR 8800:2008 estabelece os seguintes valores:

Tabela 1 – Valores adotados para R_g.

R_g	Situação de aplicação
1,00	- Para um conector soldado em uma nervura de fôrma de aço perpendicular ao perfil de aço; - Para qualquer número de conectores em uma linha soldados diretamente no perfil de aço; - Para qualquer número de conectores em uma linha soldados através de uma fôrma de aço em uma nervura paralela ao perfil de aço com relação b_f/h_f igual ou superior a 1,5.
0,85	- Para dois conectores soldados em uma nervura de fôrma de aço perpendicular ao perfil de aço;

	- Para um conector soldado através de uma fôrma de aço em uma nervura paralela ao perfil de aço e com relação b_f/h_f inferior a 1,5.
0,70	- Para três ou mais conectores soldados em uma nervura de fôrma de aço perpendicular ao perfil de aço.

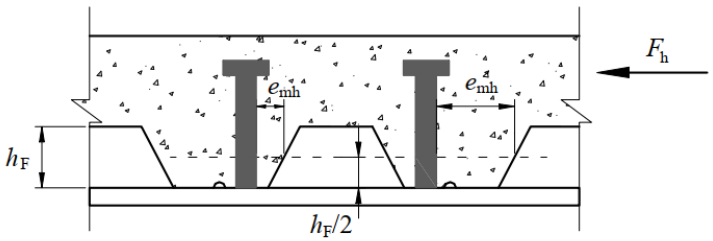
Para o coeficiente R_p a NBR 8800:2008 estabelece os seguintes valores:

Tabela 2 – Valores adotados para R_p.

R_p	Situação de aplicação
1,00	- Para conectores soldados diretamente no perfil de aço e, no caso de haver nervuras paralelas a esse perfil, pelo menos 50% da largura da mesa deve estar em contato direto com o concreto.
0,75	- Para conectores soldados em uma laje mista com as nervuras perpendiculares ao perfil de aço e e_{mh} igual ou superior a 50 mm; - Para conectores soldados através de uma fôrma de aço e embutidos em uma laje mista com nervuras paralelas ao perfil de aço;
0,60	- Para conectores soldados em uma laje mista com nervuras perpendiculares ao perfil de aço e e_{mh} inferior a 50 mm.

Em que e_{mh} é a distância da borda do fuste do conector à alma da nervura da fôrma de aço, medida à meia altura da nervura e no sentido da força cortante que atua no conector, conforme a Figura 7.

Figura 7 – Dimensão e_{mh}



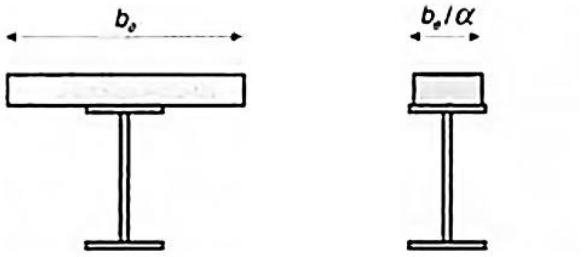
Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008)

2.9 Homogeneização da seção

O aço e o concreto devem trabalhar conjuntamente de modo a resistir às cargas que foram aplicadas. Para determinar as propriedades geométricas, deve-se obter uma seção

homogeneizada teórica, dividindo-se a largura efetiva da laje de concreto antes calculada por uma razão α, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Seção homogeneizada.



a) Viga mista b) Seção homogeneizada

Fonte: (PFEIL; PFEIL, 2009)

A razão modular α_E é obtida dividindo-se o modulo de elasticidade do aço pelo do concreto, conforme a equação (8).

$$\alpha_E = \frac{E_{aço}}{E_{concreto}} = \frac{E}{E_c} \tag{8}$$

Para ações de curta duração, a expressão empírica para o valor médio do módulo secante do concreto E_c) para o cálculo de tensões e deformações, segundo a NBR 8800, deve ser determinado através da equação (9), com E_c e f_{ck} em Mpa.

$$E_c = 0{,}85 \times 5600\sqrt{f_{ck}} \tag{9}$$

Sendo:

f_{ck} a resistência característica à compressão do concreto

Os efeitos de longa duração, como a fluência e retração do concreto, devem ser levados em conta utilizando-se a norma de concreto. No entanto, de acordo com a norma NBR 8800 esses efeitos podem ser considerados de forma simplificada multiplicando a razão modular por 3, segundo a equação (10). Tem-se então:

$$\alpha_\infty = 3 * \alpha_E \tag{10}$$

Somente após alguns anos de atuação de carga que o valor de α_∞ é atingido. Para o início da vida da obra é necessário verificar as tensões e deformações para as cargas permanentes com o módulo de deformação inicial E_c do concreto (PFEIL; PFEIL, 2009).

2.10 Momento de Inércia Efetivo

De acordo com as normas, nas regiões de momento positivo, o momento de inércia obtido por meio da homogeneização teórica da seção mista, para vigas de alma cheia, deve ser o momento de inércia efetivo, dado pela equação (11).

$$I_{ef} = I_a + \sqrt{\eta_i}(I_{tr} - I_a) \tag{11}$$

Onde:

I_{ef} é o momento de inércia efetivo;

I_a é o momento de inércia da seção do perfil isolado;

I_{tr} é o momento de inércia da seção mista homogeneizada;

η_i é o grau de interação.

2.11 Verificação da Flecha

A flecha, para vigas simplesmente apoiada com carga distribuída, é determinada pela expressão (12).

$$\delta = \frac{5qL^4}{384EI_{ef}} \tag{12}$$

O deslocamento máximo para vigas de piso e de cobertura, segundo a NBR 8800:2008, é dado pela equação (13) e (14), respectivamente.

$$\delta_{adm} = \frac{L}{350} \tag{13}$$

$$\delta_{adm} = \frac{L}{250} \tag{14}$$

2.12 Momento Fletor Resistente de Cálculo em Regiões de Momento Positivo

A seguir, será descrito os procedimentos que cada norma aborda para calcular a resistência ao momento fletor para vigas mistas simplesmente apoiadas de alma cheia com interação completa. Nesse trabalho, serão adotadas as seguintes resistências de cálculo, dada pelas equações (15) e (16).

Concreto: $$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (15)$$

Aço do perfil: $$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_a} \quad (16)$$

Sendo:

f_{ck}, f_y as resistências características dos respectivos materiais;

γ_c, γ_a coeficientes de resistência dos materiais;

A Tabela 3 descreve os coeficientes adotados pelas normas:

Tabela 3 – Coeficientes de resistência dos materiais.

Normas	$\boldsymbol{\gamma_c}$ **(Compressão no concreto)**	$\boldsymbol{\gamma_a}$ **(Tração e compressão no perfil de aço)**
NBR 8800 (2008)	1,4	1,1
EUROCODE 4 (2004)	1,5	1,0
ANSI/AISC 360 (2016)	1,0	1,0

Fonte: (AISC, 2016; ABNT, 2008; ECS, 2004)

2.12.1 NBR 8800:2008

Para as vigas compactas $\left(h/t_w \leq 3{,}76\sqrt{E/f_y}\right)$ devem ser consideradas as propriedades plásticas da seção mista e a linha neutra plástica (LNP) pode estar na laje ou no perfil.

Portando, se $0{,}85.f_{cd}.b.t_c \geq A_a.f_{yd}$ a linha neutra plástica se encontra na laje de concreto e se $A_a.f_{yd} > 0{,}85.f_{cd}.b.t_c$ a linha neutra plástica se encontra no perfil de aço.

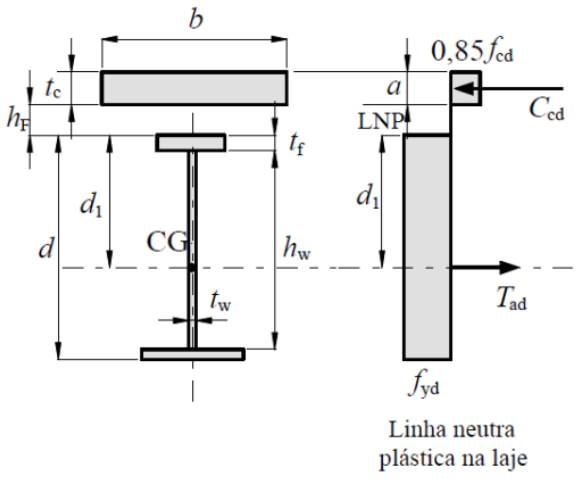
De acordo com Pfeil (2009), em viga onde a interação é completa a resistência é determinada pela plastificação do concreto ou da seção do aço, e não pela resistência do conector. Então, para determinação do momento resistente em regime plástico considera-se que:

- não existe deslizamento entre o concreto e o aço (adota-se a condição de interação completa, desprezando-se o deslizamento na ruptura);
- a área efetiva de concreto de resistência à compressão f_{ck} desenvolve tensões uniformes iguais a $\frac{0{,}85.f_{ck}}{\gamma_c}$;
- as tensões de tração no concreto são desprezíveis;
- a seção de aço atinge a tensão $\frac{f_{yk}}{\gamma_a}$ em tração ou compressão.

a) linha neutra da seção plastificada na laje de concreto

A Figura 9 mostra a distribuição de tensões sob momento positivo em que se baseia a formulação da NBR 8800 (2008) para o cálculo do momento fletor resistente com a linha neutra plástica na laje de concreto no caso de interação completa.

Figura 9 – Distribuições das tensões na viga mista com Laje de concreto de concreto de acordo com a NBR 8800



Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008)

Igualando as resultantes, encontra-se a espessura da região comprimida da laje pela equação (17):

$$a = \frac{T_{ad}}{0{,}85.f_{cd}.b} \tag{17}$$

A partir do binário de forças, chega-se, portanto, ao momento fletor resistente de cálculo, de acordo com a equação (18).

$$M_{Rd} = T_{ad}.\left(d_1 + h_F + t_c - \frac{a}{2}\right) \quad (18)$$

Onde:

d_1 é a distância do centro geométrico do perfil de aço até a face superior desse perfil;

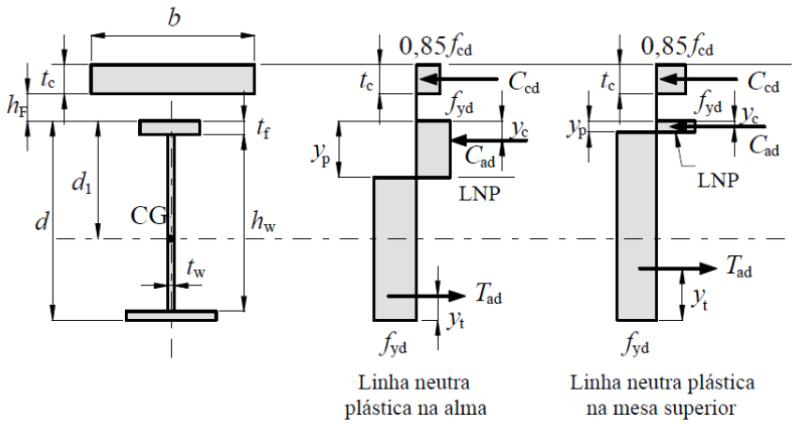
h_F é a altura das nervuras da laje com fôrma de aço incorporada (se não houver fôrma de aço incorporada, h_f = 0);

t_c é a altura da laje de concreto (se houver laje com fôrma de aço incorporada, é a espessura acima das nervuras).

b) linha neutra da seção plastificada no perfil de aço

A Figura 10 mostra a distribuição de tensões sob momento positivo onde se baseia a formulação da NBR 8800 (2008) para o cálculo do momento fletor resistente com a linha neutra plástica no perfil de aço no caso de interação completa.

Figura 10 – Distribuições das tensões na viga mista com LNP na viga de aço de acordo com a NBR 8800



Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008)

Neste caso, uma parte da seção do aço está comprimida em uma altura y_p, contribuindo com uma força C_{ad}.

O valor máximo da resistência à compressão no concreto é $C_{cd} = 0{,}85.f_{cd}.b.t_c$;

A equação (19) determina a força resistente de cálculo da região comprimida do perfil de aço.

$$C_{ad} = \frac{1}{2}\left(A_a.f_{yd} - C_{cd}\right) \quad (19)$$

A força resistente de cálculo da região tracionada do perfil de aço é dada pela equação (20).

$$T_{ad} = C_{cd} + C_{ad} \quad (20)$$

Em que:

b é a largura efetiva da laje de concreto;

t_c é a altura da laje de concreto (se houver laje com fôrma de aço incorporada, é a espessura acima das nervuras);

A_a é a área do perfil de aço.

A posição da linha neutra da seção plastificada medida a partir do topo do perfil de aço pode ser determinada como indicado a seguir:

- Para $C_{ad} \leq A_{fs}.f_{yd}$ a linha neutra plástica (LNP) está mesa superior do perfil de aço, calculada conforme a equação (21).

$$y_p = \frac{C_{ad}}{A_{fs}.f_{yd}}\,t_{fs} \quad (21)$$

Onde:

A_{fs} é a área da mesa superior do perfil de aço;

t_{fs} é a espessura da mesa superior do perfil de aço.

- Para $C_{ad} > A_{fs}.f_{yd}$ a linha neutra plástica (LNP) está na alma do perfil de aço, calculada conforme a equação (22).

$$y_p = t_{fs} + h_w\left(\frac{C_{ad} - A_{fs}.f_{yd}}{A_w.f_{yd}}\right) \quad (22)$$

Onde:

h_w é a altura da alma tomada como a distância entre faces internas das mesas;

A_w área da alma do perfil de aço, igual ao produto $h_w . t_w$, com t_w igual à espessura da alma.

O momento fletor resistente de cálculo fica igual a equação (23):

$$M_{Rd} = C_{ad}(d - y_t - y_c) + C_{cd}\left(\frac{t_c}{2} + h_F + d - y_t\right) \quad (23)$$

Em que:

d é a altura total do perfil de aço;

y_t é a distância do centro geométrico da parte tracionada do perfil de aço até a face inferior desse perfil;

y_c é a distância do centro geométrico da parte comprimida do perfil de aço até a face superior desse perfil;

h_F é a altura das nervuras da laje com fôrma de aço incorporada (se não houver fôrma de aço incorporada, $h_F = 0$).

2.12.2 EUROCODE 4 (EN 1994-1-1:2004)

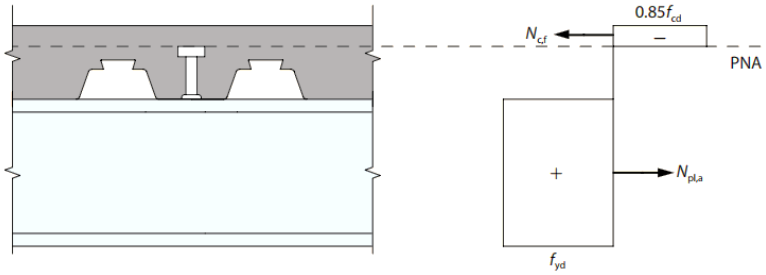
Para análise plástica das seções considera-se que o concreto em compressão resiste a uma tensão igual a $0{,}85 f_{cd}$, constante em toda a altura entre a linha neutra plástica e a fibra de concreto mais comprimida, a resistência a tração no concreto é desprezada. Já para seção de aço, a tensão de cálculo na viga de aço é dada por f_{yd}, tanto para a tração e quanto para a compressão.

A quantidade de concreto disponível para resistir a força de compressão é limitada pela largura efetiva da laje (b) e pela altura da laje de concreto (t_c).

a) linha neutra da seção plastificada na laje de concreto

A Figura 11 mostra a distribuição de tensões sob momento positivo em que se baseia a formulação da EUROCODE 4 para o cálculo do momento fletor resistente com a linha neutra plástica na laje de concreto no caso de interação completa.

Figura 11 – Distribuições das tensões na viga mista com Laje de concreto de concreto de acordo com a EUROCODE 4



Fonte: (SIMMS; HUGHES, 2011)

A linha neutra plástica se encontra na laje quando $C_{cd} \geq T_{ad}$, logo o momento resistente (M_{Rd}), da seção transversal mista, de acordo com Simms e Hughes (2011), é determinado pela expressão (24).

$$M_{Rd} = T_{ad}\left(\frac{d}{2} + t_c + h_F - \frac{T_{ad}}{C_{cd}}\frac{t_c}{2}\right) \tag{24}$$

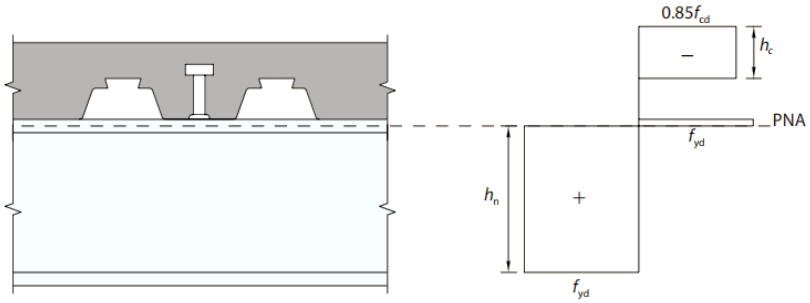
b) linha neutra da seção plastificada no perfil de aço

A linha neutra plástica se encontra no perfil quando $C_{cd} < T_{ad}$, ela pode está na mesa superior da seção de aço ou passando pela alma do perfil.

- Para $C_{cd} \geq \left(T_{ad} - 2b_f t_f f_{yd}\right)$ a linha neutra plástica (LNP) está na mesa superior do perfil de aço.

A Figura 12 mostra a distribuição de tensões sob momento positivo onde se baseia a formulação da EUROCODE 4 para o cálculo do momento fletor resistente com a linha neutra plástica na mesa superior do perfil de aço no caso de interação completa.

Figura 12 – Distribuições das tensões na viga mista com LNP na mesa superior do perfil de aço de acordo com a EUROCODE 4



Fonte: (SIMMS; HUGHES, 2011)

Desprezando a contribuição da mesa superior em compressão, conforme Simms e Hughes (2011), o momento fletor resistente da viga mista pode ser determinada de forma simplificada a partir da equação (25).

$$M_{Rd} = T_{ad}\frac{d}{2} + C_{cd}\left(\frac{t_c}{2} + h_F\right) \tag{25}$$

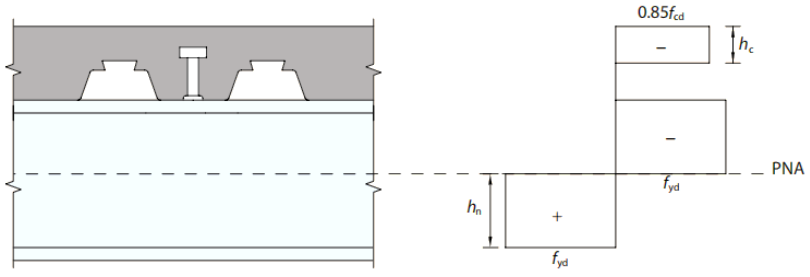
Também pode ser determinado pela expressão (26).

$$M_{Rd} = T_{ad}\frac{d}{2} + C_{cd}\frac{t_c + 2h_F}{2} - \frac{(T_{ad} - C_{cd})^2}{A_{fs}f_{yd}}\frac{t_f}{4} \tag{26}$$

- Para $C_{cd} < \left(T_{ad} - 2b_f t_f f_{yd}\right)$ a linha neutra plástica (LNP) está na alma do perfil de aço.

A Figura 13 mostra a distribuição de tensões sob momento positivo em que se baseia a formulação da EUROCODE 4 para o cálculo do momento fletor resistente com a linha neutra plástica na alma do perfil de aço no caso de interação completa.

Figura 13 – Distribuições das tensões na viga mista com LNP na alma do perfil de aço de acordo com a EUROCODE 4



Fonte: (SIMMS; HUGHES, 2011)

O momento fletor resistente, segundo Simms e Hughes (2011), pode ser dado pela equação (27).

$$M_{Rd} = M_{pl,a,Rd} + C_{cd}\left(\frac{d + t_c + 2h_F}{2}\right) - \left(\frac{{C_{cd}}^2}{F_w}\frac{d}{4}\right) \quad (27)$$

Sendo

$M_{pl,a,Rd}$ o momento fletor resistente de projeto da seção de aço ($Z_x f_{yd}$);

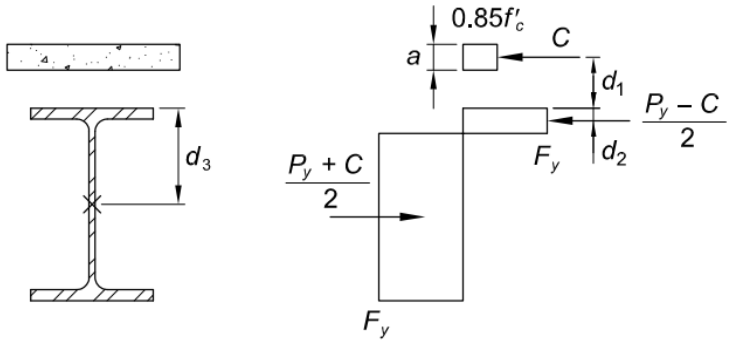
$F_w = h.t_w.f_{yd}$.

2.12.3 ANSI/AISC 360-16

Em uma viga mista com interação total a resistência da seção da laje de concreto ou do aço pode controlar a resistência à flexão na região de momento positivo.

Quando a resistência à flexão é determinada a partir da distribuição das tensões plásticas mostrada na Figura 14, a força de compressão na laje de concreto (C_{cd}) é a menor entre C_{cd} e T_{ad}. Na Figura 14, o "C" simboliza a resistência à compressão na laje, e "P_y" é a resistência à tração na seção do aço.

Figura 14 - Distribuições das tensões na viga mista de acordo com a ANSI/AISC 360-16



Fonte: AISC 360-16 (ANSI, 2016)

A espessura da região comprimida da laje (a) é dada pela equação (17).

A distribuição de tensões plásticas pode ter a LNP na alma, na mesa superior do perfil ou na laje, dependendo de qual valor governa entre a resistência à compressão ou à tração do aço, determinado da mesma maneira que as outras normas.

Quando a LNP se encontra na laje de concreto a armadura longitudinal da laje tem uma contribuição desprezível para força de compressão, exceto quando a LNP está na seção de aço. Neste caso, a área da armadura longitudinal dentro da largura efetiva da laje de concreto vezes

a tenção de escoamento da armadura pode ser adicionada na determinação da força resistente de cálculo na espessura comprimida da laje.

Usando a Figura 14, o momento fletor nominal resistente de uma viga mista é dado pela equação (28).

$$M_n = C(d_1 + d_2) + P_y(d_3 - d_2) \tag{28}$$

Onde:

d_1 é a distância do centroide da força de compressão, C, no concreto até o topo da seção de aço;

d_2 é a distância do centroide da força de compressão na seção de aço até o topo da seção de aço. Para o caso de nenhuma compressão na seção de aço, d2 = 0;

d_3 é a distância de P_y ao topo da seção de aço.

Há uma diferença na norma americana em relação à norma brasileira e europeia no ajuste de coeficientes. É desconsiderado os coeficientes de resistência dos materiais no cálculo do valor máximo da resistência à compressão no concreto e à tração do aço. A norma aplica as disposições “Load and Resistance Factor Design” (LRFD) e “Allowable Stress Design” (ASD) ficando a critério do projetista a escolha. Nesse trabalho será usada a disposição LRFD, assim existe apenas um ajuste no momento fletor nominal resistente.

Dessa forma, o momento fletor resistente de projeto é dado pela expressão (29).

$$\varphi_b . M_n \tag{29}$$

Onde, φ_b é o fator de resistência igual a 0,90.

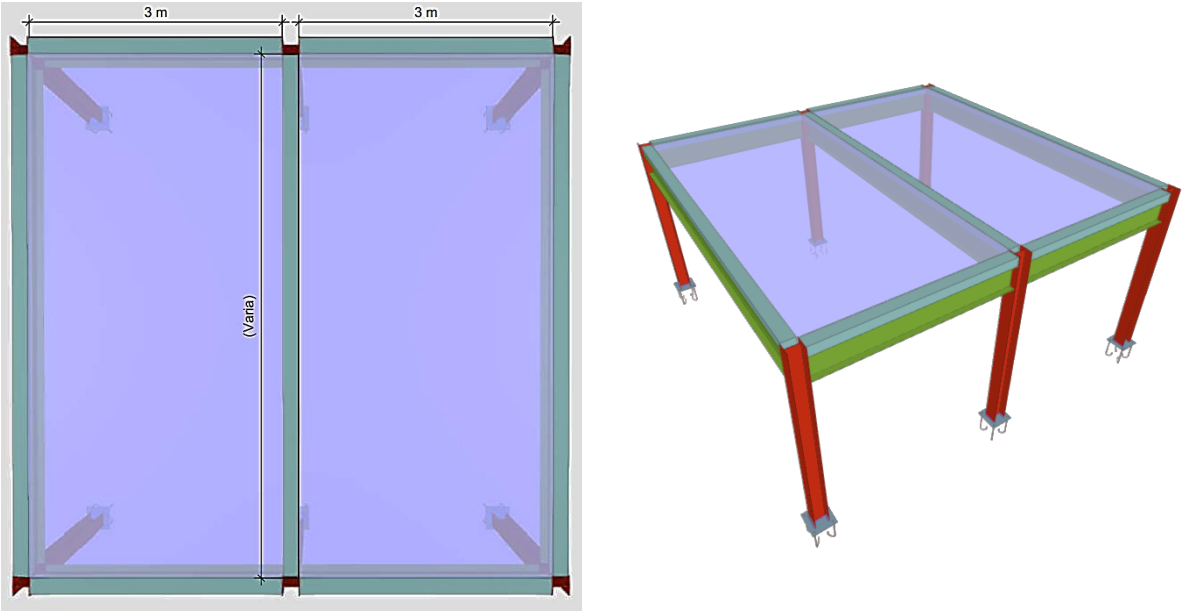
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão abordadas as situações e características dos materiais que foram necessárias para realização do dimensionamento, também serão apresentadas as ferramentas utilizadas para a validação dos resultados.

3.1 Concepção do Modelo

Para ser realizado o estudo comparativo desse trabalho, foi realizada a elaboração de uma situação base. O modelo escolhido consiste na análise de uma viga intermediária espaçada de 3 metros das vigas adjacentes, conforme a Figura 15.

Figura 15 – Concepção do modelo



Fonte: autoria própria (2022)

3.2 Características dos Materiais

Conforme apresentado na Tabela 4, o material utilizado para o perfil foi o aço MR-250 (ASTM A-36) sendo um tipo de aço estrutural ao carbono onde é utilizado em estruturas metálicas comuns. Para o concreto foi adotado uma resistência característica de 25 MPa, aplicado desde pequenas residências às grandes construções. Para o conector adotou-se um diâmetro de 19,1 mm e uma resistência à ruptura do aço do conector de 415 MPa.

Tabela 4 – Características do aço e concreto

Aço dos perfis	
Limite de Escoamento (f_y)	250 MPa
Módulo de Elasticidade (E)	200000 MPa
Concreto	
Resistencia Característica à Compressão (f_{ck})	25 MPa
Conector	
Diâmetro (d_{cs})	19,1 mm
Resistência à ruptura do aço do conector (f_{ucs})	415 MPa

Fonte: autoria própria (2022)

Em relação às dimensões da laje, adotou-se uma altura total de 140 mm, do tipo *Steel Deck*, com altura das nervuras ou dos trapézios de 75 mm, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Características da laje

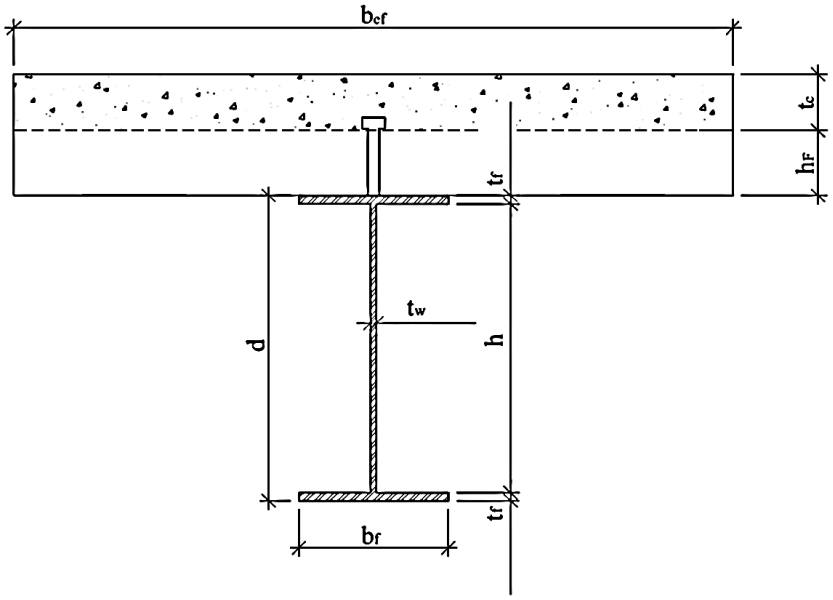
Laje (Steel Deck)	
Altura das Nervuras da Laje (h_F)	75 mm
Altura Acima da Forma de Aço (t_c)	65 mm

Fonte: autoria própria (2022)

Os perfis utilizados são os da série W da Gerdau Açominas. Foram utilizados os primeiros perfis de alturas diferentes da série.

A seguir, a Figura 16 mostra a seção transversal completa das vigas mistas e a Tabela 6 apresenta os perfis utilizados com as respectivas propriedades da seção transversal.

Figura 16 – Seção transversal das vigas mistas



Fonte: autoria própria (2022)

Tabela 6 – Tabela de perfis

Perfil	$A_a\ (cm^2)$	$d\ (mm)$	$t_w\ (mm)$	$t_f\ (mm)$	$b_f\ (mm)$	$h\ (mm)$	$Z_x\ (cm^3)$
W 150 x 13,0	16,6	148	4,3	4,9	100	138,2	96,4
W 200 x 15,0	19,4	200	4,3	5,2	100	189,6	147,9
W 250 x 17,9	23,1	251	4,8	5,3	101	240,4	211,0
W 310 x 21,0	27,2	303	5,1	5,7	101	291,6	291,9
W 360 x 32,9	42,1	349	5,8	8,5	127	332	547,6
W 410 x 38,8	50,3	399	6,4	8,8	140	381,4	736,8
W 460 x 52,0	66,6	450	7,6	10,8	152	428,4	1095,9
W 530 x 66,0	83,6	525	8,9	11,4	165	502,2	1558,0
W 610 x 101,0	130,3	603	10,5	14,9	228	573,2	2922,7

Fonte: Gerdau Açominas

3.3 Cálculo Analítico

O cálculo analítico foi realizado utilizando os conceitos apresentados no capítulo 2 de fundamentação teórica. Nesse momento, utilizou-se o *software* PTC *Mathcad Prime* 6.0 como ferramenta auxiliadora.

Como visto na fundamentação teórica, a linha neutra da seção plastificada pode estar na laje de concreto, na mesa superior ou na alma do perfil de aço. De forma que esses três casos pudessem ser analisados e comparados entre as normas, e utilizando neste primeiro momento a

norma brasileira, foi dimensionado três perfis para um vão de 5 metros, onde, em cada um deles, a posição da linha neutra plástica se difere, conforme apresentado na Tabela 7. O dimensionamento desses perfis segue no apêndice A.

Tabela 7 – Perfis W com a LNP em posições distintas para um vão de 5 metros segundo a NBR 8800

Perfil	Posição da Linha Neutra Plástica (NBR 8800)
W 360 x 32,9	Laje de Concreto
W 460 x 52,0	Mesa Superior do Perfil de Aço
W 610 x 101,0	Alma do Perfil de Aço

Fonte: autoria própria (2022)

Todos os perfis contidos na Tabela 6 também foram calculados e comparados com as normas estudadas. O cálculo foi feito em ELU e também foi realizada a verificação em ELS. O dimensionamento deles deu-se com a utilização do programa *Microsoft Excel* 2019, com intuito de se criar um ábaco utilizando a carga resistente e o número de conectores necessário para ocorrer a interação total entre os materiais para uma sequência de vãos usuais nas edificações.

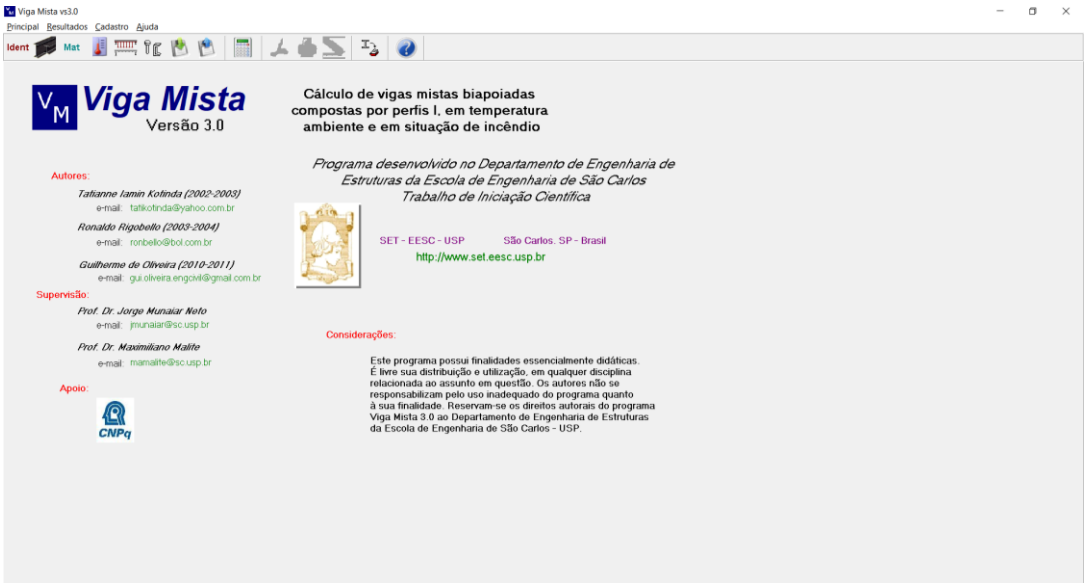
3.4 Ferramentas de Validação

Foram utilizadas duas ferramentas para validação dos resultados. Primeiramente utilizou-se o *software* "Viga Mista vs 3.0" que dimensiona os perfis seguindo a norma brasileira e, posteriormente, a validação ocorreu com o programa "ENERCALC Build 20 DEMO" que dimensiona os perfis utilizando a norma americana.

3.4.1 Viga Mista vs 3.0

O *software* "Viga Mista vs 3.0" foi desenvolvido no departamento de engenharia de estruturas da escola de engenharia de São Carlos – USP, é de livre distribuição e utilização. É utilizado para fins didáticos e realiza o cálculo para vigas mistas biapoiadas compostas por perfil I, em temperatura ambiente e em temperatura em incêndio, com base na norma brasileira. A Figura 17 traz a tela inicial do programa.

Figura 17 – Tela inicial do programa Viga Mista vs 3.0



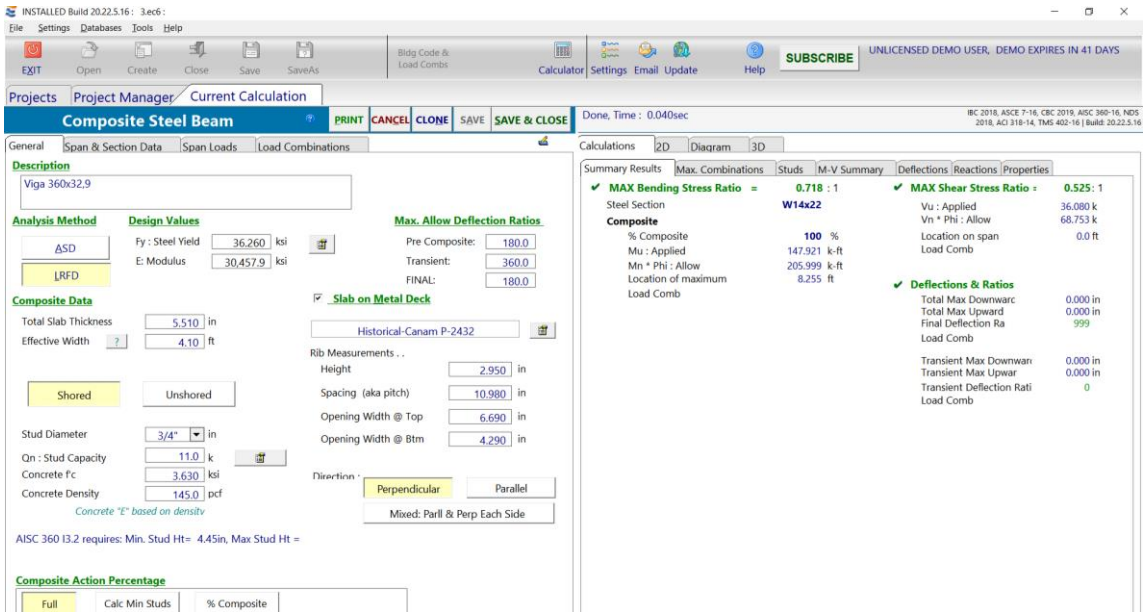
Fonte: autoria própria (2022)

O programa oferece na barra de ferramentas, localizada no canto superior esquerdo, uma sequência de passos para entrada dos dados.

3.4.2 ENERCALC Build 20 DEMO

Desenvolvido pela companhia ENERCALC INC, com sede na Califórnia, EUA. A empresa disponibiliza uma versão DEMO de 60 dias de avaliação. Ele fornece dezenas de módulos e análise de engenharia estrutural, dentre eles o módulo de vigas mistas. Os cálculos são realizados com base nas normas americanas, e utiliza o sistema de unidade de medidas adotadas nos EUA. A Figura 18 apresenta a tela inicial do módulo.

Figura 18 – Tela inicial do módulo de vigas mistas do programa ENERCALC Build 20



Fonte: autoria própria (2022)

Conforme visto na Figura 18, a entrada de dados e os resultados se encontra na própria tela inicial do módulo do programa. A parte de inserção de dados é dividida em informações gerais, seção e tamanho da viga, cargas aplicadas e, por fim, combinação de cargas. Na parte de visualização dos resultados é possível visualizar o desenho em 2D e 3D, como também, os diagramas de esforços internos e resultados numéricos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos e discussões acerca da comparação das resistências de cálculo da seção mista entre a NBR 8800:2008, EUROCODE 4 (EN 1994-1-1:2004) e a ANSI/AISC 360-16.

4.1 Perfis W 360 x 32,9, W 460 x 52,0 e W 610 x 101,0 com um Vão de 5 Metros

Inicialmente, as discussões ocorrerão com os resultados dos perfis expostos na Tabela 8, em que o dimensionamento deles constam no apêndice A. Será analisada a posição da linha neutra plástica e a resistência da seção mista para uma viga com um vão de 5 metros, relacionando as normas entre si.

Comparando a posição da linha neutra plástica (LNP), verifica-se que ela pode estar em posições distintas da seção transversal mista, conforme apresentado na Tabela 8. A razão para isso é que os coeficientes de resistência dos materiais se diferem, e consequentemente, faz com que haja disparidade na força resistente dos materiais.

Tabela 8 – Comparação da posição da linha neutra plástica para um vão de 5 metros

Perfil	NBR 8800:2008	EUROCODE 4:2004	ANSI/AISC 360-16
W 360 x 32,9	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 460 x 52,0	Mesa superior do perfil	Mesa superior do perfil	Laje de concreto
W 610 x 101,0	Alma do perfil	Alma do perfil	Mesa superior do perfil

Fonte: autoria própria (2022)

Pode-se observar também que quanto maior for o perfil, a posição da linha neutra plástica desloca-se para baixo fazendo com que, caso esteja na laje de concreto, a espessura da região comprimida (a) aumente, ou então, caso esteja no perfil de aço, a distância da linha neutra da seção plastificada até a face superior do perfil de aço (y_p) cresça. Isso está relacionado com a área da seção transversal do perfil, ocasionando uma ampliação na força resistente característica do aço.

No perfil W 360 x 32,9, em todas as normas, a localização da LNP está na laje de concreto. Isso significa que a força resistente de cálculo da espessura comprimida da laje de concreto (C_{cd}) foi predominante.

Para o perfil W 460 x 52,0, para a NBR 8800:2008 e a EUROCODE 4 a LNP está localizada na mesa do perfil de aço, enquanto para a ANSI/AISC 360-16, a LNP encontra-se na laje de concreto. Isso se explica porque a norma brasileira e europeia aplica o coeficiente de

resistência para o concreto, enquanto a norma americana não aplica. Assim, a força resistente do concreto é maior na norma americana em relação as demais.

Já para o perfil W 610 x 101,0, em todas as normas, a LNP localiza-se na seção de aço. Na NBR 8800:2008 e na EUROCODE 4:2004 encontra-se na alma do perfil, e na ANSI/AISC 360-16, está na mesa superior do perfil. Isso se explica porque na norma brasileira e europeia a força resistente de cálculo da região comprimida do perfil de aço (C_{ad}) se mostrou maior do que a força resistente de cálculo da mesa superior do perfil ($A_{fs}.f_{yd}$), enquanto na norma americana, a força resistente de cálculo de compressão na mesa superior do perfil se mostrou predominante. Isso também está relacionado com a força resistente de cálculo da espessura comprimida da laje, pois a ANSI/AISC 360-16 não utiliza coeficiente de resistência nos materiais, isso faz com que a força resistente de cálculo na laje seja maior que as outras normas.

Adiante, realizando a comparação do momento resistente de cálculo e da carga resistente de cálculo da seção transversal mista, expostos na Tabela 9 e Tabela 10, é visto que crescem conforme o aumento da seção transversal do perfil. O que já é esperado, pois, a área da seção transversal do perfil aumenta e, consequentemente, a força resistente de cálculo do aço é maior, contribuindo mais para a resistência da seção transversal mista.

Tabela 9 – Momento resistente de cálculo (M_{Rd}) para um vão de 5 metros – em $kN.m$

Perfil	NBR 8800:2008	EUROCODE 4:2004	ANSI/AISC 360-16
W 360 x 32,9	276,79	299,73	279,14
W 460 x 52,0	473,21	497,87	499,99
W 610 x 101,0	1013,70	1078,88	1046,24

Fonte: autoria própria (2022)

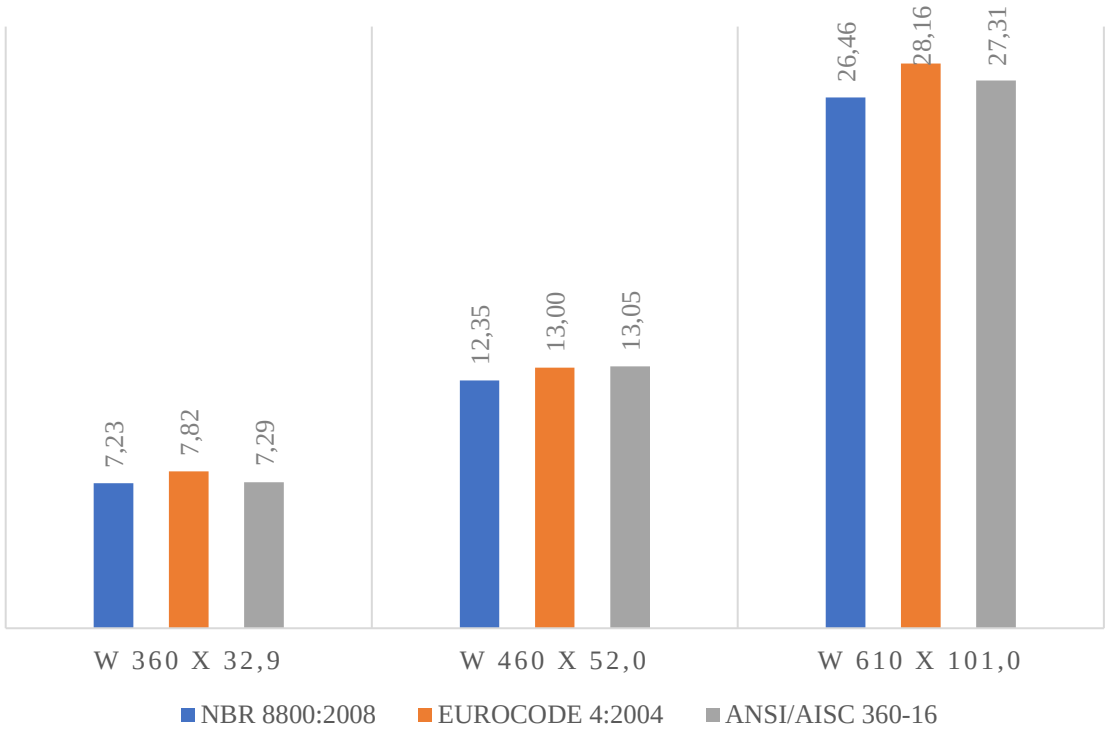
Tabela 10 – Carga resistente de cálculo para um vão de 5 metros – em tf/m^2

Perfil	NBR 8800:2008	EUROCODE 4:2004	ANSI/AISC 360-16
W 360 x 32,9	7,23	7,82	7,29
W 460 x 52,0	12,35	13,00	13,05
W 610 x 101,0	26,46	28,16	27,31

Fonte: autoria própria (2022)

O Gráfico 1 mostra os valores das cargas resistentes de cálculo encontradas para os perfis analisados em um vão de 5 metros.

Gráfico 1 – Comparação da carga resistente de cálculo da seção transversal mista para um vão de 5 m



Fonte: autoria própria (2022)

Para o perfil W 360 x 32,9, verifica-se que a NBR 8800:2008 apresenta menores valores do que as demais. Comparando-a com a EUROCODE:2004, a norma brasileira revela-se mais conservadora em 7,65%. Com relação a ANSI/AISC 360-16, houve uma diferença de apenas 0,84%. Com isso, é possível notar, neste caso, que os resultados da norma brasileira quando comparados com a norma americana se mostraram praticamente similares, enquanto para a norma europeia, houve uma maior discrepância, enfatizando que a EUROCODE 4:2004 manifesta-se a menos conservadora entre as três.

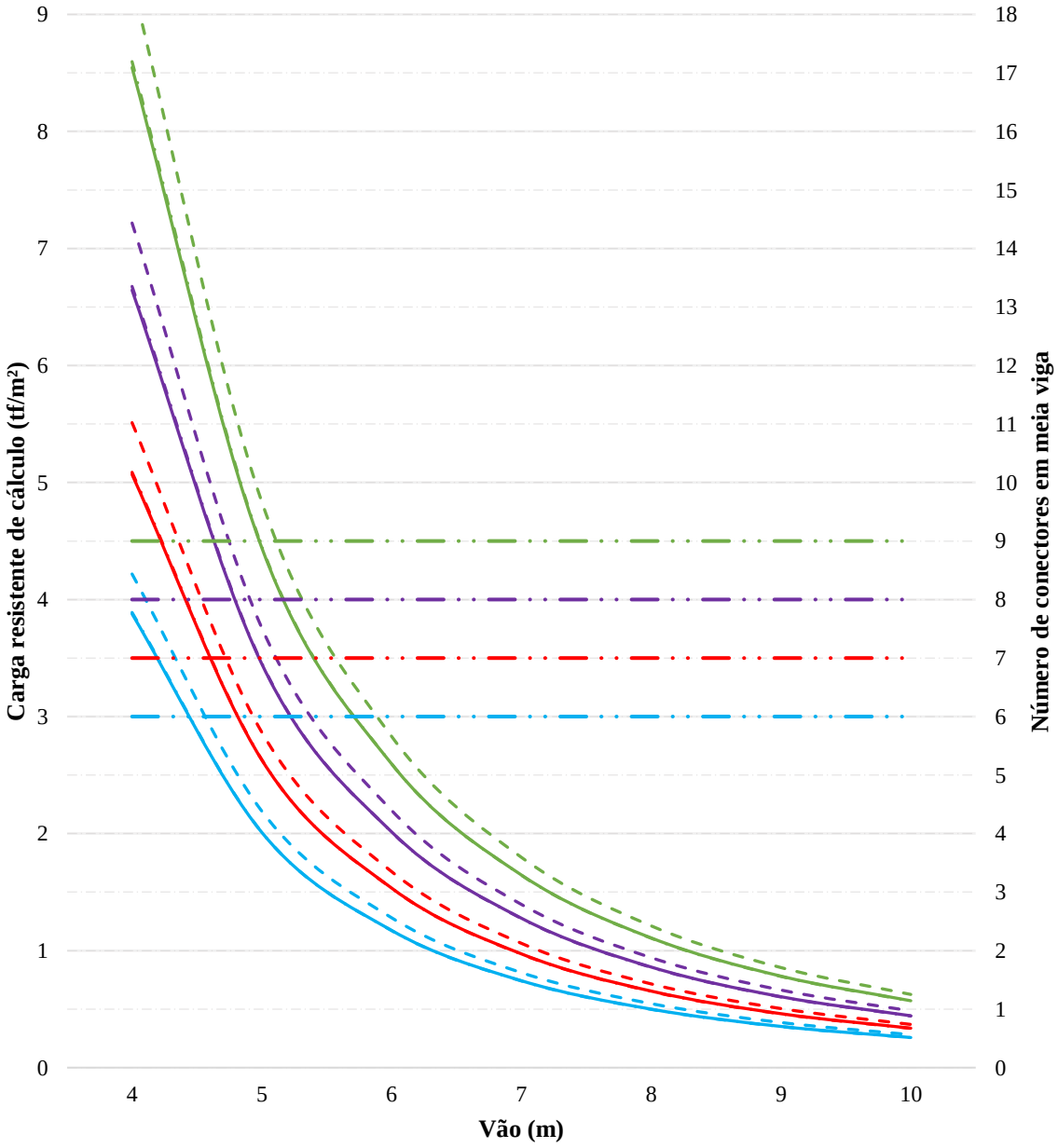
O perfil W 460 x 52,0, observa-se que a NBR 8800:2008 se mostra mais conservadora nos seus resultados com uma diferença de 5,36% para a ANSI/AISC 360-16 e de 4,95% para a EUROCODE 4:2004, além disso, observa-se que a norma europeia e americana apresentou resultados muito próximos, com uma diferença de 0,42%.

Em relação ao perfil W 610 x 101,0 identifica-se que os três resultados foram mais discrepantes, não havendo similaridade entre os resultados, o que difere do que foi visualizado nos gráficos dos perfis anteriores. Ainda assim, a norma brasileira se mostra mais conservadora com uma diferença de 6,04% para norma europeia e de 3,11% para a norma americana. Entre a norma americana e europeia, a americana se mostra mais conservadora com 3,03% de diferença.

4.2 Primeiros Perfis de Alturas Diferentes da Série W para Vãos Usuais

Em seguida, segue as análises e comparações gerais para vãos usuais nas edificações utilizando os primeiros perfis de alturas diferentes da série W. O Gráfico 2 apresenta um ábaco reunindo os gráficos dos perfis W 150 x 13,0, W 200 x 15,0, W 250 x 17,9 e W 310 x 21,0 relacionando o vão e a carga resistente de cálculo, como também, os gráficos dos respectivos números de conectores necessários em meia viga, calculados segundo a NBR 8800:2008, para que ocorra interação completa.

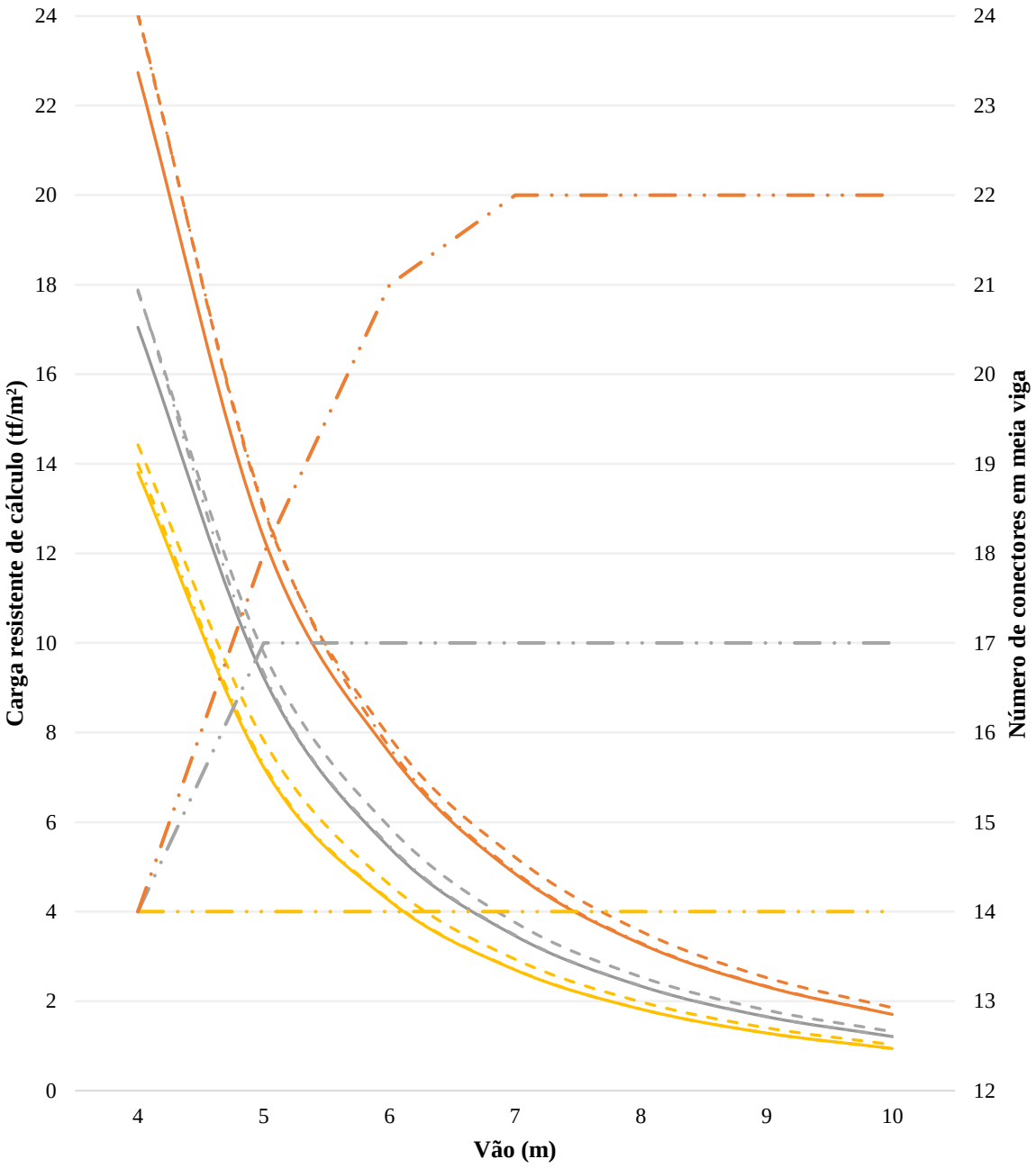
Gráfico 2 – Ábaco reunindo os perfis W 150 x 13,0, W 200 x 15,0, W 250 x 17,9 e W 310 x 21,0 e o números de conectores necessários em meia viga para que ocorra interação completa



Fonte: autoria própria (2022)

O Gráfico 3 apresenta um ábaco reunindo os gráficos dos perfis W 360 x 32,9, W 410 x 38,8, e W 460 x 52,0 relacionando o vão e a carga resistente de cálculo, como também, os gráficos dos respectivos números de conectores necessários em meia viga, calculados segundo a NBR 8800:2008, para que ocorra interação completa.

Gráfico 3 – Ábaco reunindo os perfis W 360 x 32,9, W 410 x 38,8, e W 460 x 52,0 e o números de conectores necessários em meia viga para que ocorra interação completa

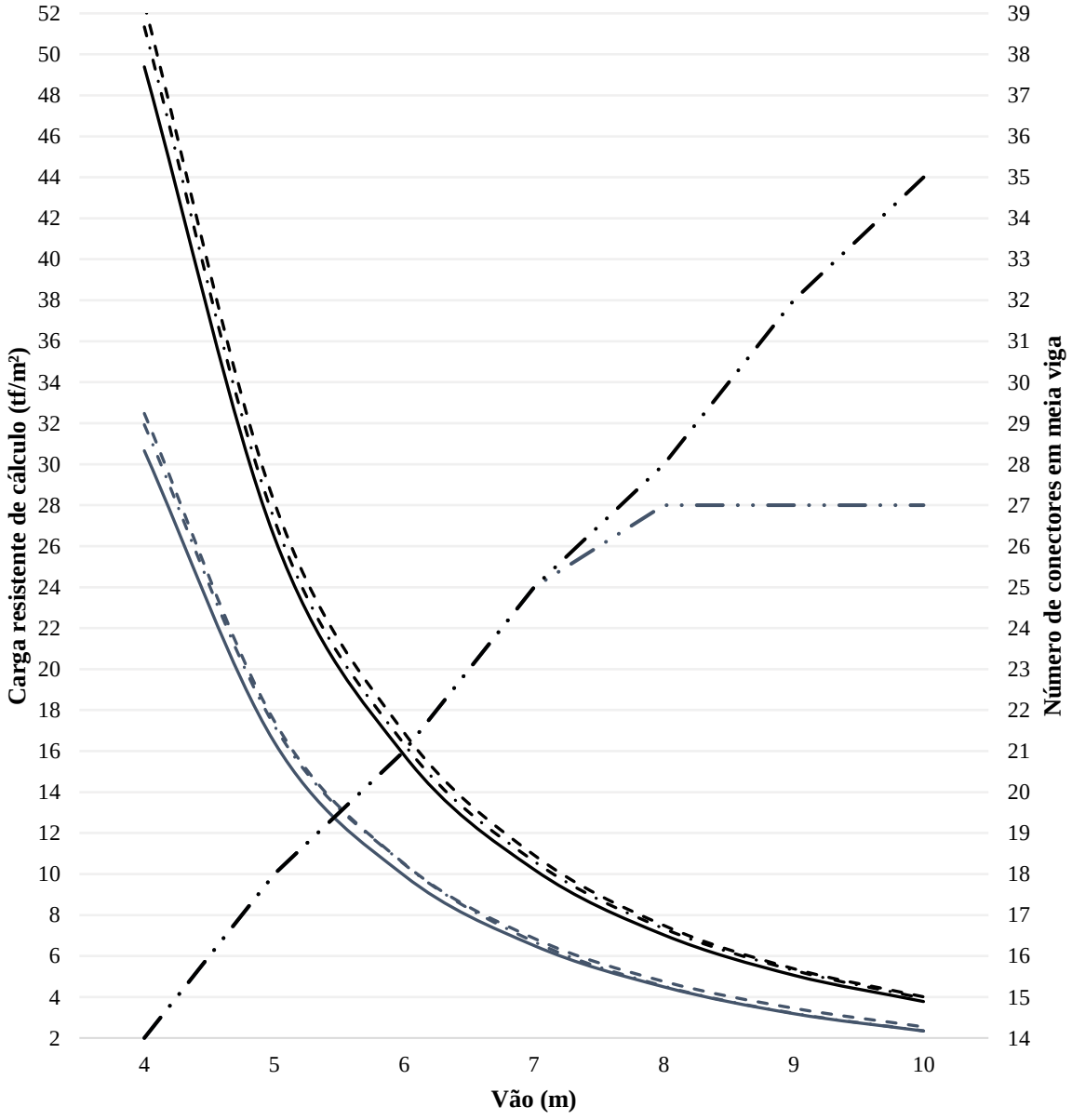


Fonte: autoria própria (2022)

O Gráfico 4 apresenta um ábaco reunindo os gráficos dos perfis W 530 x 66,0 e W 610 x 101,0 relacionando o vão e a carga resistente de cálculo, como também, os gráficos dos

respectivos números de conectores necessários em meia viga, calculados segundo a NBR 8800:2008, para que ocorra interação completa.

Gráfico 4 – Ábaco reunindo os perfis W 530 x 66,0 e W 610 x 101,0 e o números de conectores necessários em meia viga para que ocorra interação completa



Fonte: autoria própria (2022)

LEGENDA:

W 150 x 13,0 W 200 x 15,0 W 250 x 17,9 W 310 x 21,0
W 360 x 32,9 W 410 x 38,8 W 460 x 52,0 W 530 x 66,0
W 610 x 101,0

NBR 8800:2008 EUROCODE 4:2004 ANSI/AISC 360-16
Conectores

- **Quantidade de Conectores**

Segue, na Tabela 11, a quantidade de conectores necessários em meia viga para que ocorra interação completa na seção transversal mista de aço-concreto.

Tabela 11 – Quantidade de conectores necessários em meia viga para que ocorra interação completa

Perfil/Vão	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m	9 m	10 m
W 150 x 13,0	6	6	6	6	6	6	6
W 200 x 15,0	7	7	7	7	7	7	7
W 250 x 17,9	8	8	8	8	8	8	8
W 310 x 21,0	9	9	9	9	9	9	9
W 360 x 32,9	14	14	14	14	14	14	14
W 410 x 38,8	14	17	17	17	17	17	17
W 460 x 52,0	14	18	21	22	22	22	22
W 530 x 66,0	14	18	21	25	27	27	27
W 610 x 101,0	14	18	21	25	28	32	35

Fonte: autoria própria (2022)

- **Vão de 4 metros**

Para um vão de 4 metros, observa-se que para os perfis iniciais, não há diferenças significativas dos valores encontrados da NBR 8800:2008 quando comparada com a ANSI/AISC 360-16, em que, para ambas as normas, a LNP se localiza na laje de concreto. A diferença entre elas, só começa a ser considerada, quando a LNP encontrada com a norma brasileira está localizada na mesa superior do perfil, sendo a maior diferença no perfil W 460 x 52,0, onde em ambas as normas, a LNP está localizada na mesa superior, com uma discrepância de 5,30%.

Relacionando a NBR 8800:2008 com os valores da EUROCODE 4:2004, constata-se que, para todos os perfis, os resultados dados pela norma brasileira mostraram-se mais conservadores. Para os perfis iniciais, quando a LNP, nas duas normas, se encontra na laje de concreto, houveram as maiores diferenças, com uma discrepância de 8,08% para o primeiro perfil, enquanto os perfis intermediários, em que a LNP se localiza na mesa superior, tiveram as menores diferenças com 4,29% para o perfil W 360 x 32,9.

Comparando a ANSI/AISC 360-16 com a EUROCODE 4:2004, verifica-se que as maiores diferenças ocorreram para que os perfis que a LNP está na laje de concreto, onde a norma americana foi menor em 7,80% para o perfil W 150 x 13,0. As menores diferenças foram

para os perfis intermediários W 410 x 38,8 e W 460 x 52,0, não havendo diferenças consideráveis.

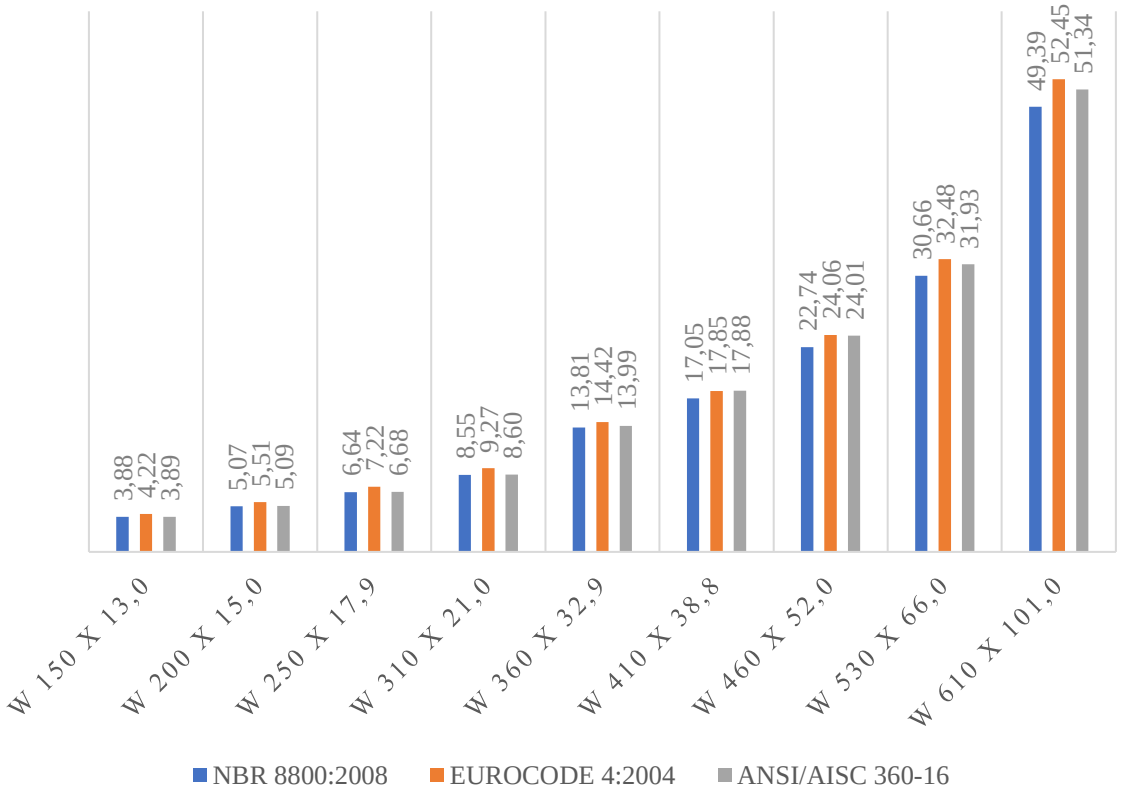
A Tabela 12 exibe a relação entre as normas da posição da linha neutra plástica para cada perfil e o Gráfico 5 exibe os valores da carga resistente de cálculo de cada seção transversal mista para um vão de 4 metros.

Tabela 12 – Relação da posição da linha neutra plástica para um vão de 4 metros

Perfil	**NBR 8800:2008**	**EUROCODE 4:2004**	**ANSI/AISC 360-16**
W 150 x 13,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 200 x 15,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 250 x 17,9	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 310 x 21,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 360 x 32,9	Laje de concreto	Mesa superior do perfil	Laje de concreto
W 410 x 38,8	Mesa superior do perfil	Mesa superior do perfil	Laje de concreto
W 460 x 52,0	Mesa superior do perfil	Mesa superior do perfil	Mesa superior do perfil
W 530 x 66,0	Alma do perfil	Alma do perfil	Mesa superior do perfil
W 610 x 101,0	Alma do perfil	Alma do perfil	Alma do perfil

Fonte: autoria própria (2022)

Gráfico 5 – Carga resistente de cálculo para um vão de 4 metros – em tf/m^2



Fonte: autoria própria (2022)

- **Vão de 5 metros**

A respeito de um vão de 5 metros, comparando a NBR 8800:2008 com a ANSI/AISC 360-16, observa-se que para os perfis iniciais, em que nas duas normas a linha neutra plástica (LNP) está localizada na laje de concreto, não ocorreram diferenças consideráveis. As maiores disparidades de valores deram-se nos perfis de maiores alturas, onde a LNP começa a localiza-se no perfil de aço, com a norma brasileira resultando uma carga resistente de cálculo de 5,36% menor que o da norma americana no perfil W 460 x 52,0.

Quando se compara a NBR 8800:2008 com a EUROCODE 4:2004, é possível notar que a norma brasileira expressa valores mais conservadores, as maiores diferenças são nos perfis iniciais, onde, em ambas as normas, a LNP se localiza na laje de concreto. A maior divergência está no primeiro perfil com 8,29%, e a menor situa-se no perfil W 460 x 52,0, onde a LNP localiza-se na mesa superior do perfil, com 4,95%.

Da ANSI/AISC 360-16 para EUROCODE 4:2004, a norma americana resulta-se com menores valores de resistência de cálculo, mostrando-se com maior discrepância nos valores da resistência dos perfis iniciais, com 8,26% para o perfil W 150 x 13,0. Para os maiores perfis,

em que a LNP se encontra na mesa superior, ocorre as menores diferenças, com uma discrepância insignificante para o perfil W 460 x 52,0.

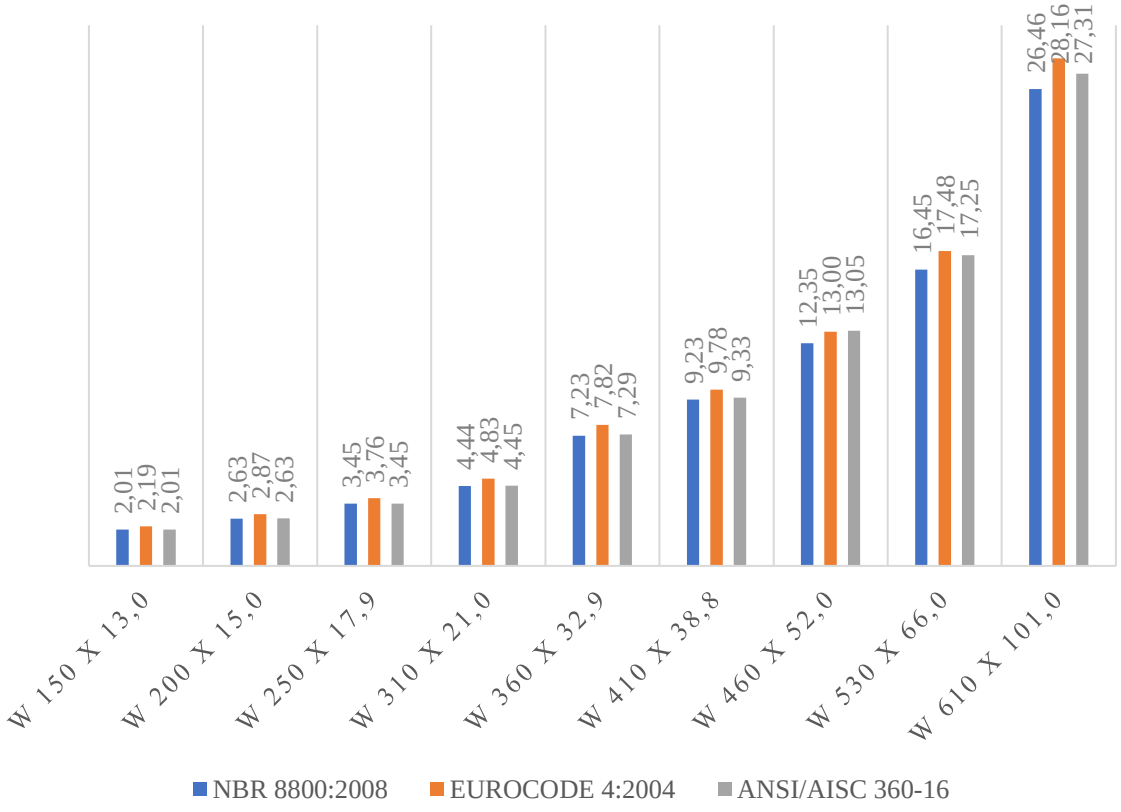
A Tabela 13 informa a relação entre as normas da posição da linha neutra plástica para cada perfil e o Gráfico 6 exibe os valores da carga resistente de cálculo de cada seção transversal mista para um vão de 5 metros.

Tabela 13 – Relação da posição da linha neutra plástica para um vão de 5 metros

Perfil	**NBR 8800:2008**	**EUROCODE 4:2004**	**ANSI/AISC 360-16**
W 150 x 13,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 200 x 15,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 250 x 17,9	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 310 x 21,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 360 x 32,9	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 410 x 38,8	Laje de concreto	Mesa superior do perfil	Laje de concreto
W 460 x 52,0	Mesa superior do perfil	Mesa superior do perfil	Laje de concreto
W 530 x 66,0	Mesa superior do perfil	Mesa superior do perfil	Mesa superior do perfil
W 610 x 101,0	Alma do perfil	Alma do perfil	Mesa superior do perfil

Fonte: autoria própria (2022)

Gráfico 6 - Carga resistente de cálculo para um vão de 5 metros – em tf/m^2



Fonte: autoria própria (2022)

- **Vão de 6 metros**

Em um vão de 6 metros, relacionando-se a NBR 8800:2008 com ANSI/AISC 360-16, observa-se que para os perfis iniciais, onde em ambas as normas a linha neutra plástica encontra-se na laje de concreto, não há diferenças significativas. A maiores diferenças se encontra no perfil W 530 x 66,0 com a norma brasileira dando uma resistência menor em 5,28%, mostrando-se mais conservadora.

Comparando a NBR 8800:2008 com a EUROCODE 4:2004, a norma brasileira resultou menores valores de resistência, com uma diferença de até 8,43% para os perfis iniciais, em que, para as duas normas, a LNP se encontra na laje de concreto. À medida que a seção do perfil de aço aumenta e a linha neutra desce para a região do aço, a diferença diminui, chegando até 4,49% para perfil W 460 x 52,0, depois deste, sobe para 6,49% para o último perfil.

Analisando os valores da ANSI/AISC 360-16 com os da EUROCODE 4:2004, a norma americana resulta menores valores de carga resistente de cálculo, com divergências mais relevantes, para os perfis que a LNP passa na laje de concreto, chegando a 8,57% para o primeiro perfil. Já para as maiores seções transversais dos perfis de aço, as diferenças dos resultados são menores, com uma discrepância ínfima para o perfil W 530 x 66,0.

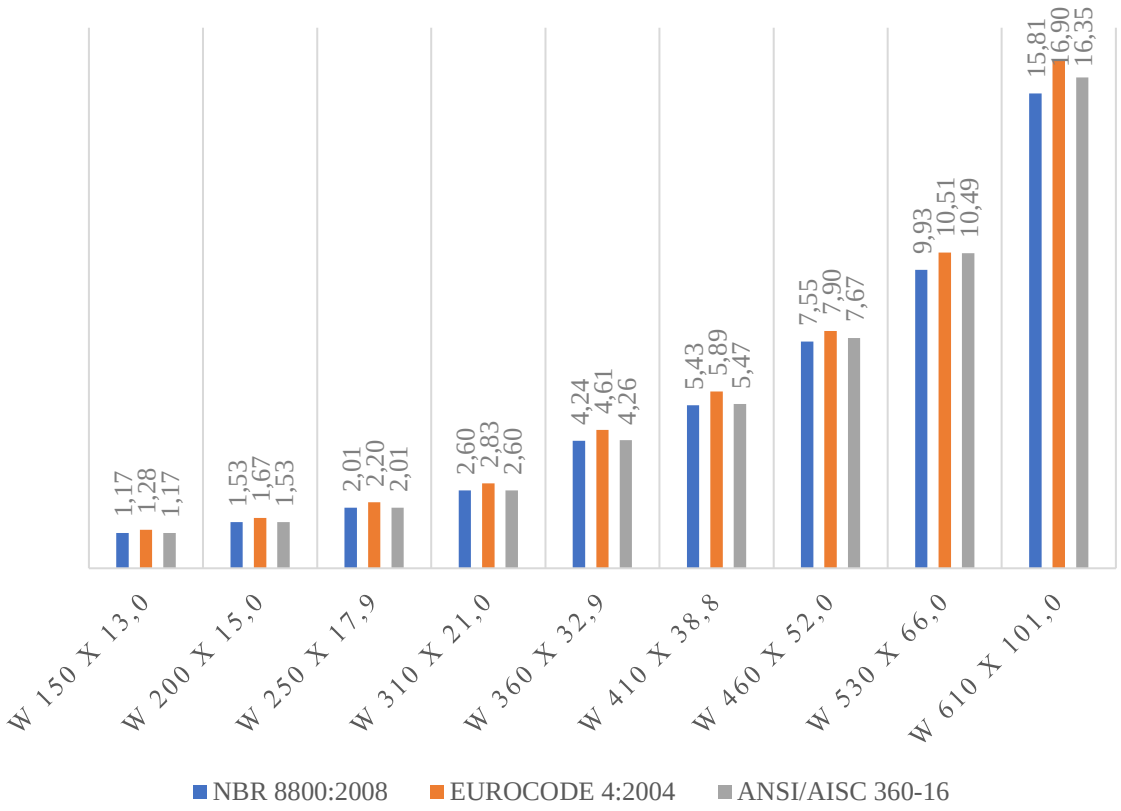
A Tabela 14 informa a relação entre as normas da posição da linha neutra plástica para cada perfil e o Gráfico 7 exibe os valores da carga resistente de cálculo de cada seção transversal mista para um vão de 6 metros.

Tabela 14 – Relação da posição da linha neutra plástica para um vão de 6 metros

Perfil	NBR 8800:2008	EUROCODE 4:2004	ANSI/AISC 360-16
W 150 x 13,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 200 x 15,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 250 x 17,9	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 310 x 21,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 360 x 32,9	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 410 x 38,8	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 460 x 52,0	Mesa superior do perfil	Mesa superior do perfil	Laje de concreto
W 530 x 66,0	Mesa superior do perfil	Mesa superior do perfil	Mesa superior do perfil
W 610 x 101,0	Mesa superior do perfil	Alma do perfil	Mesa superior do perfil

Fonte: autoria própria (2022)

Gráfico 7 – Carga resistente de cálculo para um vão de 6 metros – em tf/m^2



Fonte: autoria própria (2022)

- **Vão de 7 metros**

No que se refere ao vão de 7 metros, analisando os valores de resistência obtidos com a NBR 8800:2008 com a ANSI/AISC 360-16, verifica-se que não há diferenças significativas para os primeiros perfis, em que, para ambas as normas, a LNP se encontra na laje de concreto. Observa-se que quando a linha neutra se encontra no perfil de aço, as diferenças são maiores com 3,77% para o perfil W 610 x 101,0, sendo que os resultados da norma brasileira se mostram mais conservadores.

Relacionando a NBR 8800:2008 com a EUROCODE 4:2004, a norma brasileira se apresenta mais conservadora que a europeia, resultando maiores diferenças para os perfis iniciais, onde a linha neutra se posiciona na laje de concreto, com a maior discrepância de 8,53% para o perfil W 150 x 13,0. Para os perfis maiores, as diferenças diminuem, ficando com 5,13% no perfil W 530 x 66,0, em que a LNP se encontra na mesa superior do perfil.

Acerca da ANSI/AISC 360-16 com a EUROCODE 4:2004, a norma americana obteve menores valores de resistência. Os resultados mais divergentes estão para os primeiros perfis, chegando a 8,78% no perfil inicial, diminuindo à medida que a seção transversal aumenta, ficando com 2,40% no perfil W 530 x 66,0.

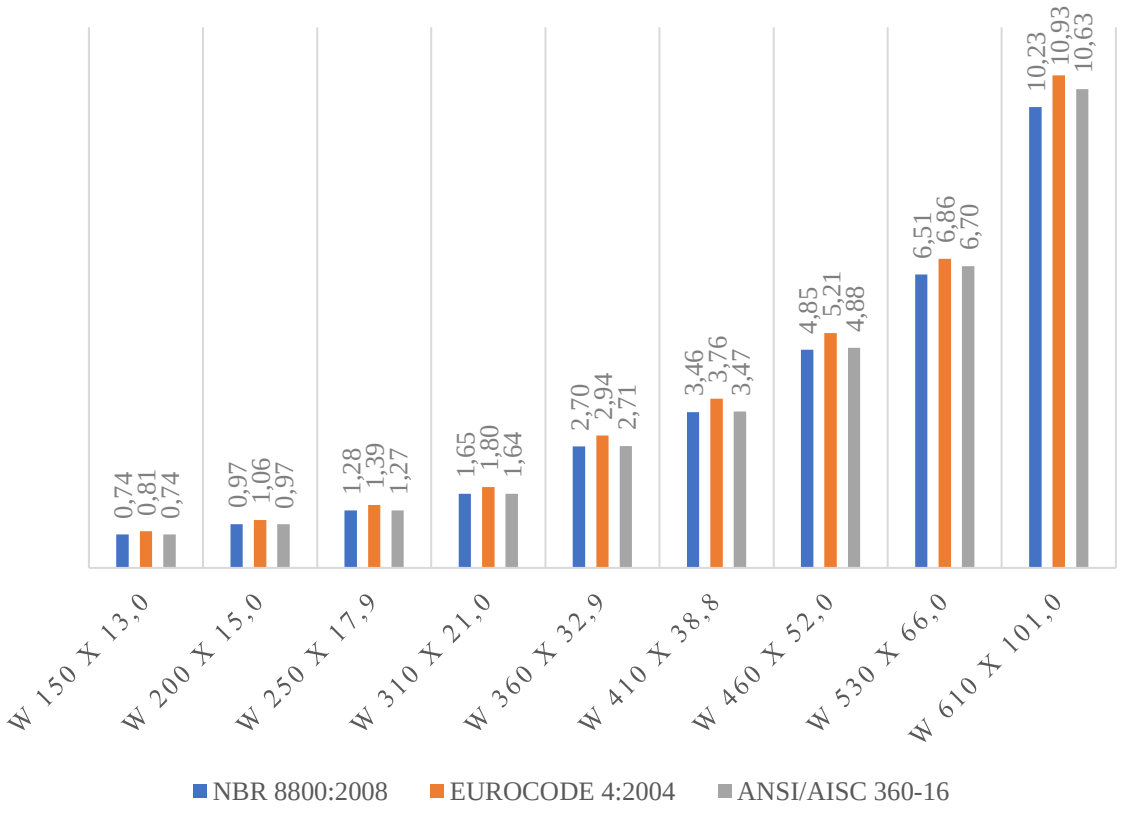
A Tabela 15 informa a relação entre as normas da posição da linha neutra plástica para cada perfil e o Gráfico 8 exibe os valores da carga resistente de cálculo de cada seção transversal mista para um vão de 7 metros.

Tabela 15 – Relação da posição da linha neutra plástica para um vão de 7 metros

Perfil	NBR 8800:2008	EUROCODE 4:2004	ANSI/AISC 360-16
W 150 x 13,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 200 x 15,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 250 x 17,9	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 310 x 21,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 360 x 32,9	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 410 x 38,8	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 460 x 52,0	Laje de concreto	Mesa superior do perfil	Laje de concreto
W 530 x 66,0	Mesa superior do perfil	Mesa superior do perfil	Laje de concreto
W 610 x 101,0	Mesa superior do perfil	Mesa superior do perfil	Mesa superior do perfil

Fonte: autoria própria (2022)

Gráfico 8 – Carga resistente de cálculo para um vão de 7 metros – em tf/m^2



Fonte: autoria própria (2022)

- **Vão de 8 metros**

Com relação ao vão de 8 metros e comparando a NBR 8800:2008 com ANSI/AISC 360-16, observa-se que somente há uma maior diferença de 4,19% para o perfil W 610 x 101,0, onde a norma brasileira se mostra mais conservadora.

No que diz respeito a NBR 8800:2008 com a EUROCODE 4:2004, observa-se que a norma brasileira também é mais conservadora. Para os perfis iniciais, em que para ambas as normas, a LNP se encontra na laje de concreto, a diferença chega a 8,60% para o primeiro perfil. A menor divergência está no perfil W 530 x 66,0 com 5,55%.

Entre a ANSI/AISC 360-16 e a EUROCODE 4:2004 verifica-se que a norma americana possui os menores valores de resistência. Para os menores perfis, onde, em ambas as normas, a LNP está passando na laje de concreto, apresentam-se as maiores diferenças chegando a 8,94% para o primeiro perfil. À medida que o perfil aumenta de seção, a discrepância diminui ficando com 2,08% no último perfil.

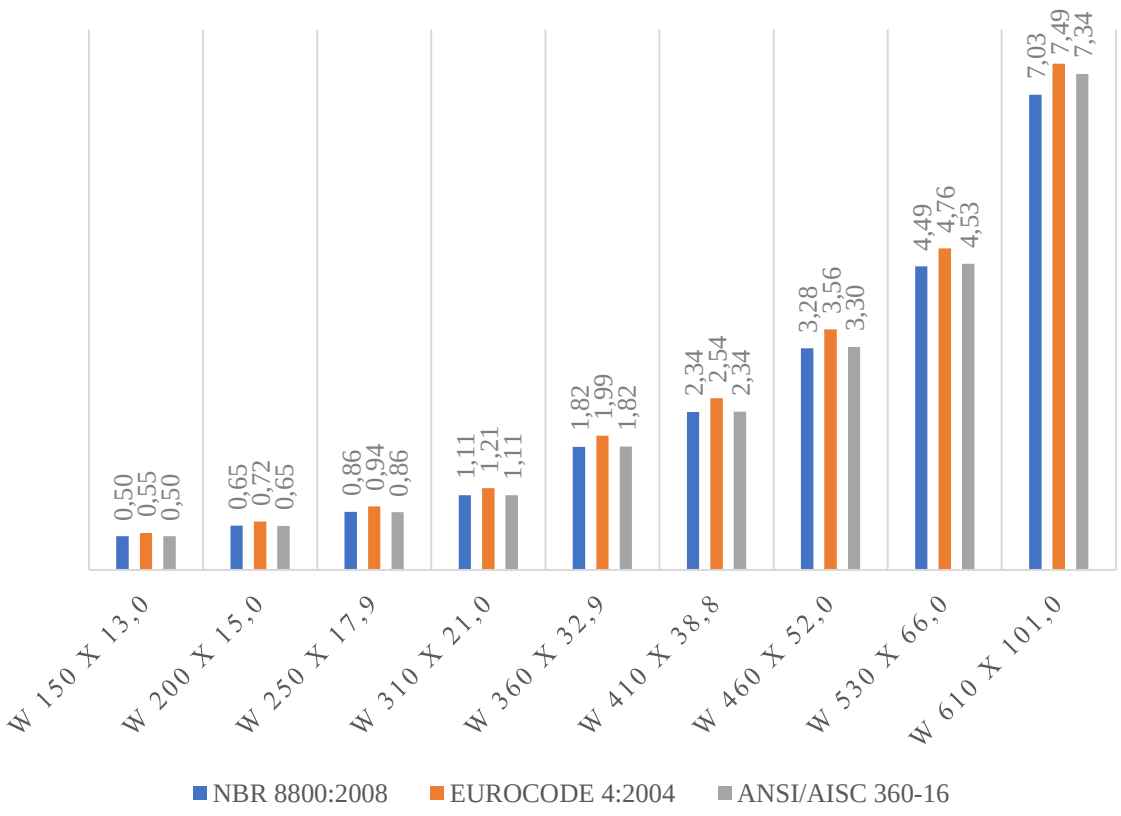
A Tabela 16 informa a relação entre as normas da posição da linha neutra plástica para cada perfil e o Gráfico 9 exibe os valores da carga resistente de cálculo de cada seção transversal mista para um vão de 8 metros.

Tabela 16 – Relação da posição da linha neutra plástica para um vão de 8 metros

Perfil	NBR 8800:2008	EUROCODE 4:2004	ANSI/AISC 360-16
W 150 x 13,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 200 x 15,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 250 x 17,9	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 310 x 21,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 360 x 32,9	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 410 x 38,8	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 460 x 52,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 530 x 66,0	Laje de concreto	Mesa superior do perfil	Laje de concreto
W 610 x 101,0	Mesa superior do perfil	Mesa superior do perfil	Mesa superior do perfil

Fonte: autoria própria (2022)

Gráfico 9 – Carga resistente de cálculo para um vão de 8 metros – em tf/m^2



Fonte: autoria própria (2022)

- **Vão de 9 metros**

Agora, para um vão de 9 metros, relacionando a NBR 8800:2008 com ANSI/AISC 360-16, verifica-se que não há diferenças consideráveis para os perfis que, nas duas normas, a LNP

localiza-se na laje de concreto. Ademais, para o último perfil, a norma brasileira resulta menor valor de resistência, com uma diferença de 4,55%.

Verificando a relação da NBR 8800:2008 com a EUROCODE 4:2004, destaca-se que a norma brasileira se mostra mais conservadora, com uma diferença de até 8,66% para o primeiro perfil. A menor discrepância entre os resultados de resistência está no último perfil, em que a linha neutra se encontra na mesa superior, com 5,94%.

A respeito da ANSI/AISC 360-16 e a EUROCODE 4:2004, verifica-se que a americana é mais conservadora, com as maiores diferenças onde a LNP se encontra na laje de concreto, chegando até 9,06% para o perfil inicial. No último perfil, existe uma diferença de 1,45%, isso porque, nas duas normas, a LNP se encontra na seção de aço.

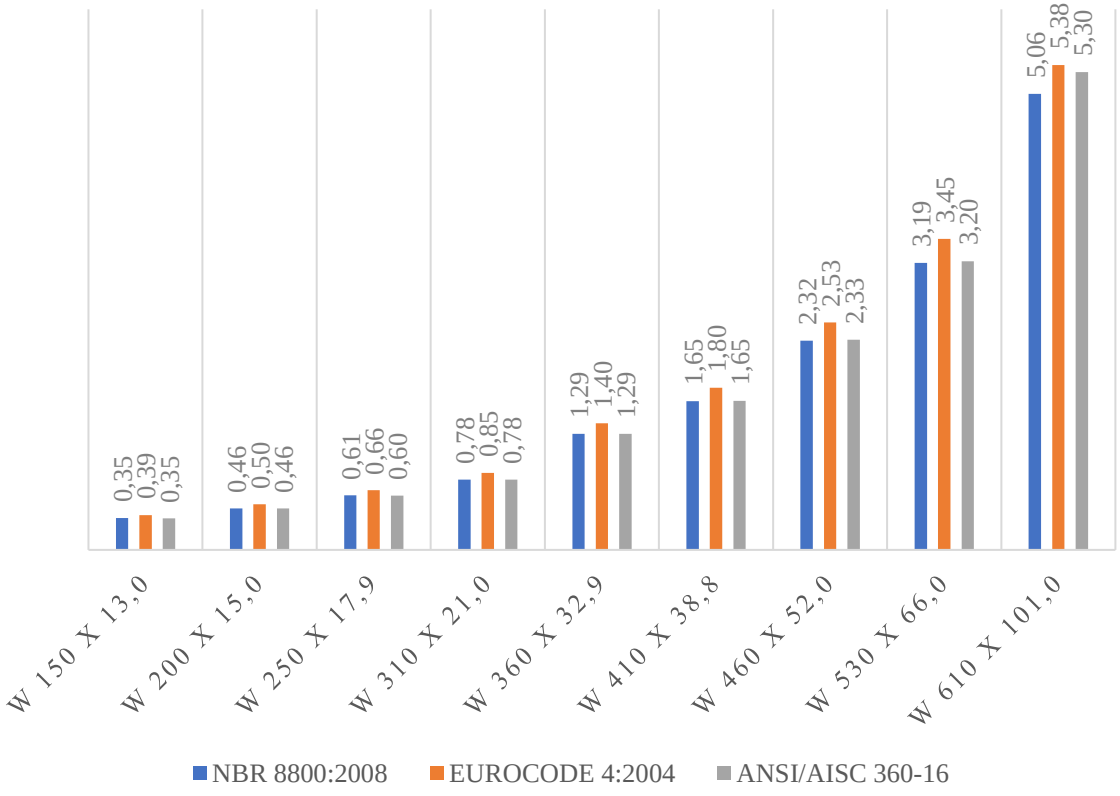
A Tabela 17, informa a relação entre as normas da posição da linha neutra plástica para cada perfil e o Gráfico 10 exibe os valores da carga resistente de cálculo de cada seção transversal mista para um vão de 9 metros.

Tabela 17 – Relação da posição da linha neutra plástica para um vão de 9 metros

Perfil	**NBR 8800:2008**	**EUROCODE 4:2004**	**ANSI/AISC 360-16**
W 150 x 13,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 200 x 15,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 250 x 17,9	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 310 x 21,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 360 x 32,9	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 410 x 38,8	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 460 x 52,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 530 x 66,0	Laje de concreto	Mesa superior do perfil	Laje de concreto
W 610 x 101,0	Mesa superior do perfil	Mesa superior do perfil	Mesa superior do perfil

Fonte: autoria própria (2022)

Gráfico 10 – Carga resistente de cálculo para um vão de 9 metros – em tf/m^2



Fonte: autoria própria (2022)

- **Vão de 10 metros**

No vão de 10 metros, relacionando a NBR 8800:2008 com a ANSI/AISC 360-16, observa-se que não há diferenças consideráveis para os perfis em que a posição da LNP, para ambas as normas, se encontra na laje de concreto. Somente para último perfil, onde a LNP desceu para a seção de aço, depara-se uma dessemelhança, onde a norma brasileira mostra-se com 3,84% a menos de resistência.

No que diz respeito NBR 8800:2008 com a EUROCODE 4:2004, constata-se que a norma brasileira manifesta resultados mais conservadores. Para os perfis iniciais, a discrepância alcança 8,70% para o primeiro perfil, ficando acima de 8,0% para todos os perfis em que a LNP, nas duas normas, se localiza na laje de concreto. Quando a LNP está na seção de aço, as diferenças diminuem, indo para 5,72% no último perfil.

Quando se compara a ANSI/AISC 360-16 com a EUROCODE 4:2004, percebe-se que a norma americana exibe menores valores de resistência. Para os perfis em que a LNP, posiciona-se na laje de concreto, há maiores divergências, com 9,16% para o perfil inicial. À proporção que aumenta a seção transversal do perfil a LNP desloca-se para baixo, no momento

que ela está na seção de aço a diferença diminui, ficando com 1,95% para o perfil W 610 x 101,0.

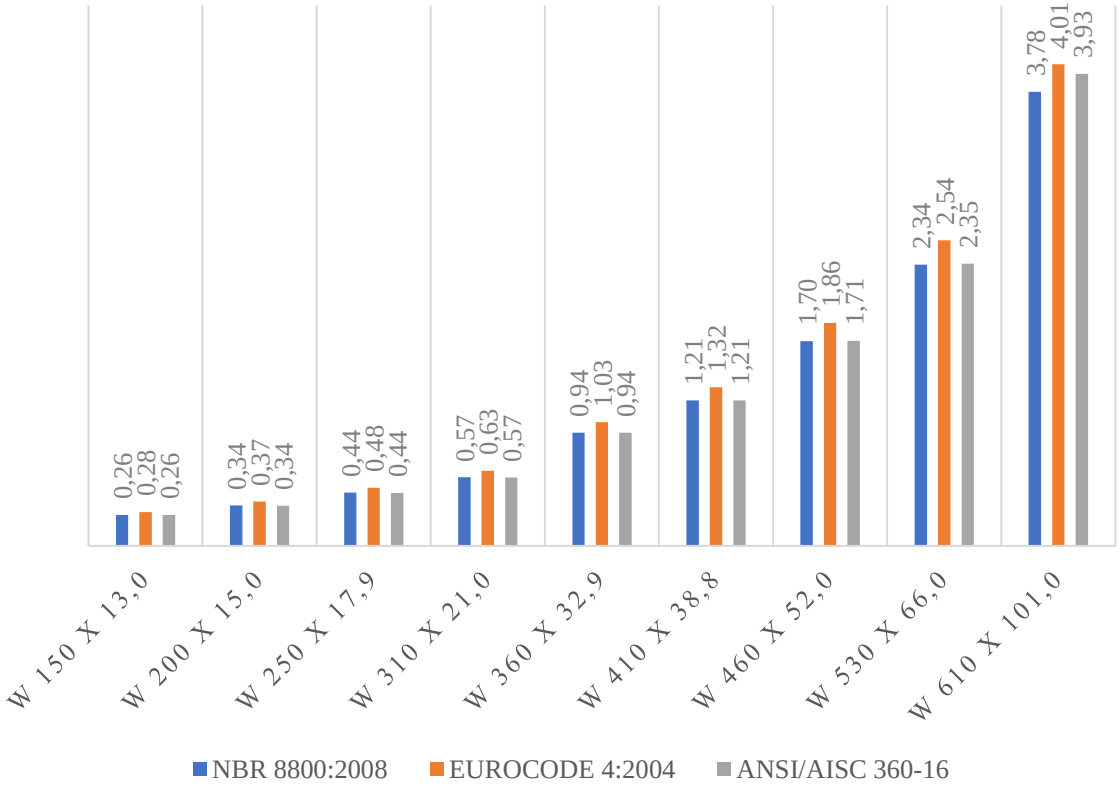
A Tabela 18, informa a relação entre as normas da posição da linha neutra plástica para cada perfil e o Gráfico 11 exibe os valores da carga resistente de cálculo de cada seção transversal mista para um vão de 10 metros.

Tabela 18 – Relação da posição da linha neutra plástica para um vão de 10 metros

Perfil	**NBR 8800:2008**	**EUROCODE 4:2004**	**ANSI/AISC 360-16**
W 150 x 13,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 200 x 15,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 250 x 17,9	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 310 x 21,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 360 x 32,9	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 410 x 38,8	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 460 x 52,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 530 x 66,0	Laje de concreto	Laje de concreto	Laje de concreto
W 610 x 101,0	Mesa superior do perfil	Mesa superior do perfil	Laje de concreto

Fonte: autoria própria (2022)

Gráfico 11 – Carga resistente de cálculo para um vão de 10 metros – em tf/m^2



Fonte: autoria própria (2022)

Assim, é possível observar, comumente, que a NBR 8800:2008 apresenta resultados mais conservadores que as demais normas. As diferenças encontradas se dão pelos diferentes coeficientes de diminuição da resistência dos materiais, visto que o processo de cálculo entre elas é semelhante.

Verifica-se que relacionando a NBR 8800:2008 com a ANSI/AISC 360-16, não há diferenças significativas nos valores de resistência de cálculos obtidos, quando, em ambas as normas, a linha neutra plástica (LNP) está localizada na laje de concreto. A discrepância entre elas, só começa a ser maior, quando a LNP está localizada no perfil de aço, com a norma brasileira apresentando resultados mais conservadores.

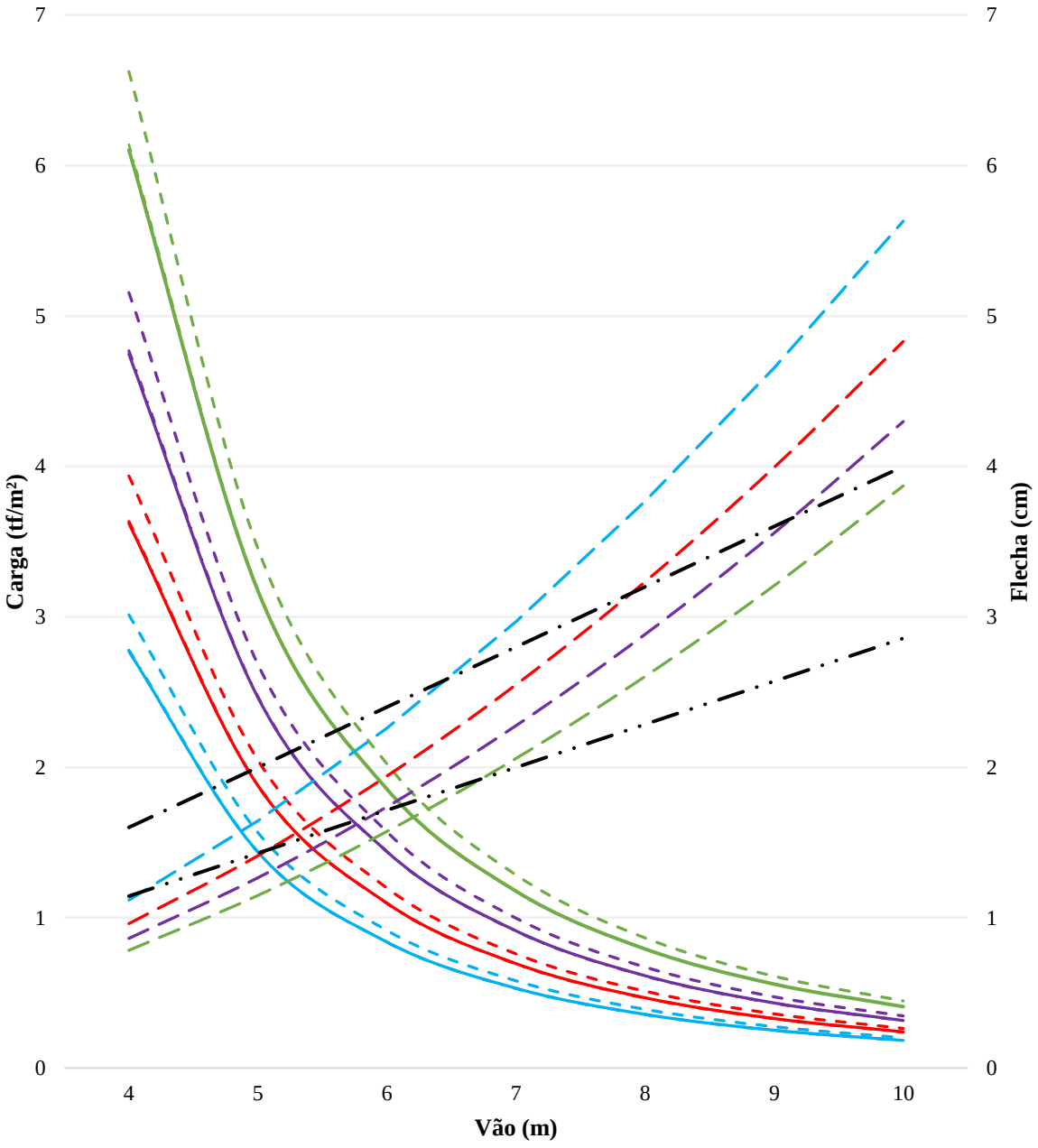
É visto, também, que comparando a NBR 8800:2008 com a EUROCODE 4:2004, a norma europeia exibe resultados superiores. Constata-se uma maior diferença, quando a LNP, nas duas normas, se encontra na laje de concreto. À medida que a seção do perfil de aço aumenta e a LNP localiza-se no perfil, as diferenças dos resultados diminuem.

- **Verificação da flecha**

Para determinação da flecha utiliza-se a equação (12) com o momento de inercia efetivo dado pela equação (11). A carga deve estar em ELS, para isso, divide-se a carga resistente de cálculo por 1,4.

O Gráfico 12 relaciona uma sequência de vãos usuais nas edificações para a carga no eixo esquerdo em ELS e a flecha no eixo direito para os perfis W 150 x 13,0, W 200 x 15,0, W 250 x 17,9 e W 310 x 21,0, como também, os gráficos das flechas admissíveis de L/250 e L/350.

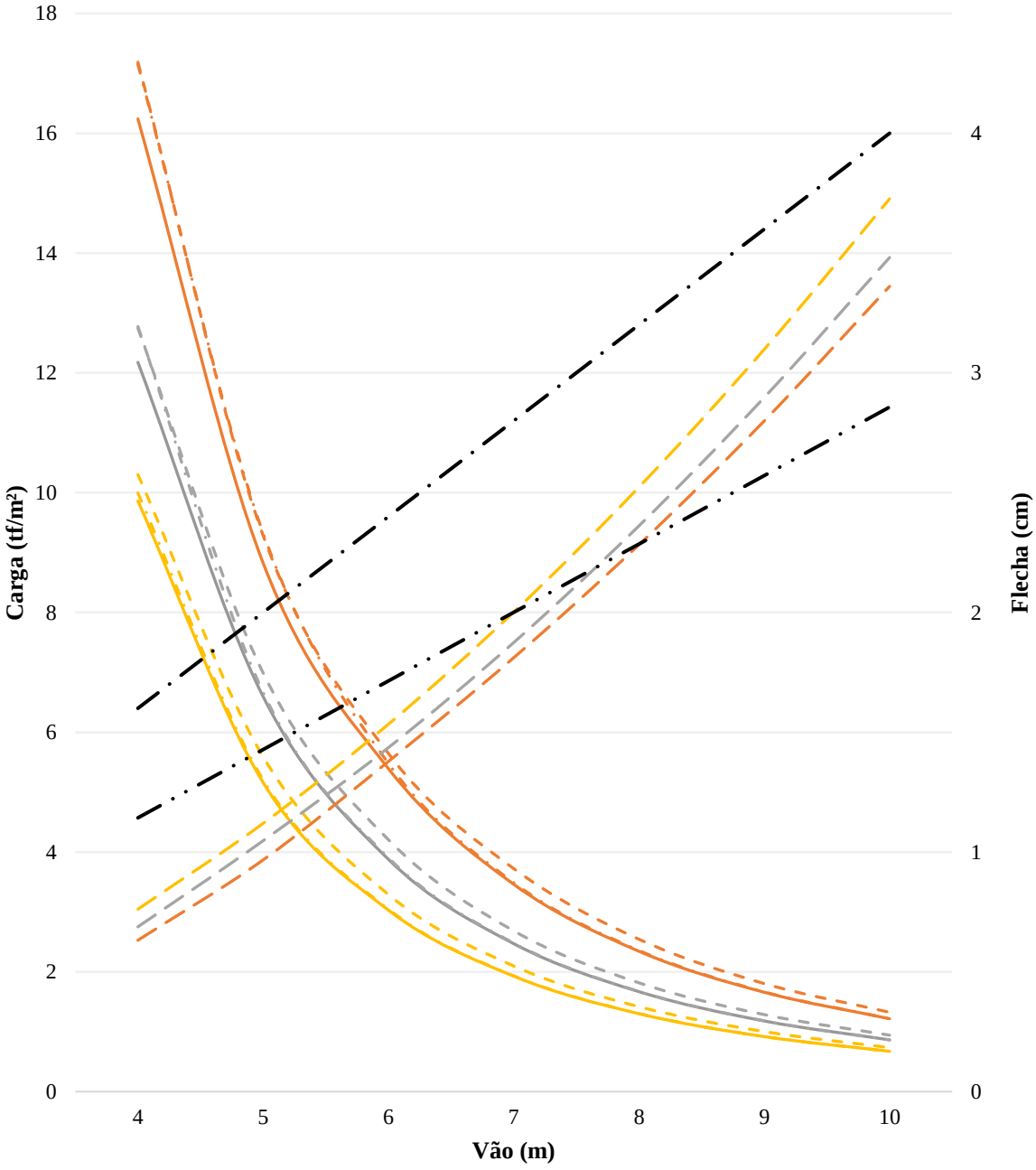
Gráfico 12 – Ábaco reunindo os perfis W 150 x 13,0, W 200 x 15,0, W 250 x 17,9 e W 310 x 21,0 com a verificação da flecha



Fonte: autoria própria (2022)

O Gráfico 13 relaciona uma sequência de vãos usuais nas edificações para a carga no eixo esquerdo em ELS e a flecha no eixo direito para os perfis W 360 x 32,9, W 410 x 38,8, e W 460 x 52,0, como também, os gráficos das flechas admissíveis de L/250 e L/350.

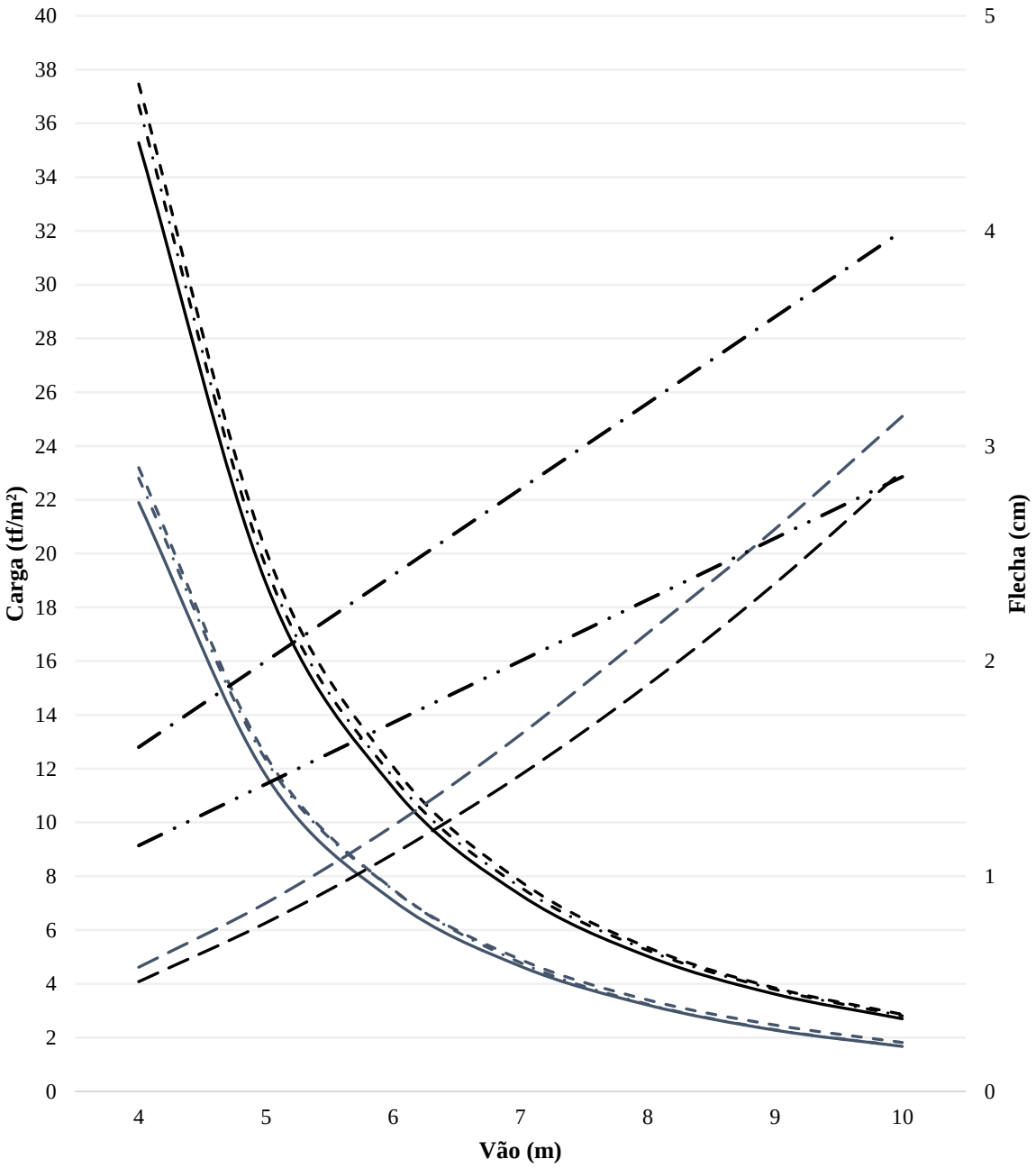
Gráfico 13 – Ábaco reunindo os perfis W 360 x 32,9, W 410 x 38,8, e W 460 x 52,0 com a verificação da flecha



Fonte: autoria própria (2022)

O Gráfico 14 relaciona uma sequência de vãos usuais nas edificações para a carga no eixo esquerdo em ELS e a flecha no eixo direito para os perfis W 530 x 66,0 e W 610 x 101,0, como também, os gráficos das flechas admissíveis de L/250 e L/350.

Gráfico 14 – Ábaco reunindo os perfis W 530 x 66,0 e W 610 x 101,0 com a verificação da flecha



Fonte: autoria própria (2022)

LEGENDA:

W 150 x 13,0 | W 200 x 15,0 | W 250 x 17,9 | W 310 x 21,0
W 360 x 32,9 | W 410 x 38,8 | W 460 x 52,0 | W 530 x 66,0
W 610 x 101,0

NBR 8800:2008 | EUROCODE 4:2004 | ANSI/AISC 360-16
L/250 | L/350 | Flecha dos perfis

A Tabela 19 apresenta os valores numéricos das flechas em centímetros para as cargas em ELS em relação a cada vão, como também, os valores das flechas admissíveis para L/350 e L/250. A Tabela 20 e Tabela 21 realizam as verificações das flechas para L/350 e L/250, respectivamente.

Tabela 19 – Flechas para as cargas em ELS em cm e flechas admissíveis para L/350 e L/250 em cm

Perfil/Vão	**4 m**	**5 m**	**6 m**	**7 m**	**8 m**	**9 m**	**10 m**
W 150 x 13,0	1,12	1,64	2,26	2,97	3,77	4,66	5,63
W 200 x 15,0	0,96	1,41	1,94	2,55	3,23	3,99	4,83
W 250 x 17,9	0,86	1,27	1,74	2,28	2,88	3,56	4,30
W 310 x 21,0	0,78	1,15	1,57	2,06	2,60	3,21	3,87
W 360 x 32,9	0,76	1,12	1,53	2,00	2,52	3,10	3,73
W 410 x 38,8	0,69	1,05	1,44	1,87	2,36	2,90	3,48
W 460 x 52,0	0,63	0,97	1,38	1,81	2,28	2,80	3,36
W 530 x 66,0	0,58	0,88	1,24	1,66	2,13	2,61	3,14
W 610 x 101,0	0,51	0,78	1,10	1,47	1,89	2,36	2,88
Flecha Admissível (l/350)	1,14	1,43	1,71	2,00	2,29	2,57	2,86
Flecha Admissível (l/250)	1,60	2,00	2,40	2,80	3,20	3,60	4,00

Fonte: autoria própria (2022)

Tabela 20 – Verificação das flechas para L/350

Perfil/Vão	**4 m**	**5 m**	**6 m**	**7 m**	**8 m**	**9 m**	**10 m**
W 150 x 13,0	Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende
W 200 x 15,0	Atende	Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende
W 250 x 17,9	Atende	Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende
W 310 x 21,0	Atende	Atende	Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende
W 360 x 32,9	Atende	Atende	Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende
W 410 x 38,8	Atende	Atende	Atende	Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende
W 460 x 52,0	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Não Atende	Não Atende
W 530 x 66,0	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Não Atende	Não Atende
W 610 x 101,0	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Não Atende

Fonte: autoria própria (2022)

Tabela 21 – Verificação das flechas para L/250

Perfil/Vão	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m	9 m	10 m
W 150 x 13,0	Atende	Atende	Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende
W 200 x 15,0	Atende	Atende	Atende	Atende	Não Atende	Não Atende	Não Atende
W 250 x 17,9	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Não Atende
W 310 x 21,0	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
W 360 x 32,9	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
W 410 x 38,8	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
W 460 x 52,0	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
W 530 x 66,0	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
W 610 x 101,0	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende

Fonte: autoria própria (2022)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescente uso do aço nas edificações comerciais e residenciais, torna as estruturas mistas de aço e concreto um destaque no mercado de construção por unir as vantagens de cada material, configurando uma solução estrutural vantajosa, dado que agiliza o processo construtivo e permite criar concepções arquitetônicas mais esbeltas.

Os projetos são guiados por normas específicas. No Brasil, a NBR 8800:2008 é o documento normativo utilizada para o dimensionamento dessas estruturas, enquanto na Europa e EUA utiliza-se a EUROCODE 4 (EN 1994-1-1:2004) e a ANSI/AISC 360-16, respectivamente.

Diante disto, este trabalho partiu-se do entendimento de que cada norma possui suas próprias considerações. Desse modo, constatou-se, que a análise da norma americana, europeia e brasileira se mostrou relevante, visto que os fatores de segurança aplicados na determinação da resistência da seção transversal mista, se diferem, resultando em valores discrepantes entre elas.

No projeto, firmou-se um estudo comparativo do dimensionamento de vigas mistas aço-concreto entre as normas NBR 8800:2008, EUROCODE 4 (EN 1994-1:2004) e a ANSI/AISC 360-16, de modo a identificar as diferenças encontradas e evidenciar qual delas se mostra mais conservadora. Assim, como objetivo específico inicial, se deu em avaliar por meio de estudos analíticos, qual (is) normas fornecem resultados mais conservadores no contexto das premissas de cálculo estabelecidas neste estudo. Percebe-se que esta finalidade foi atingida, onde foi verificado que a norma brasileira apresentou valores de carga resistente de cálculo mais conservadores.

Como último objetivo específico, sucedeu em produzir ábacos para o pré-dimensionamento de vigas mistas. Assim, foram elaborados em ELU relacionando a carga resistente de cálculo com o vão, como também, a quantidade de conectores necessários para que ocorra interação total na seção transversal mista de aço-concreto. Além disso, também houve a produção de ábacos para a verificação do ELS relacionando a carga característica e as flechas encontradas com o vão.

Para isso, buscou-se estudar o dimensionamento de vigas mistas de aço concreto simplesmente apoiado com interação total entre os dois materiais. Isso foi possível, com a utilização dos documentos normativos e da seleção de trabalhos como artigo, livros e teses que ajudaram no entendimento do conteúdo e roteirização de cálculo.

Após isso, houve a identificação das diferenças normativas na determinação do momento fletor resistente de cálculo da seção transversal mista. Assim, percebeu-se que as normas aplicam distintos coeficientes de diminuição da resistência dos materiais, visto que o processo de cálculo entre elas é semelhante.

Em seguida, realizou-se o cálculo analítico. Isso foi possível, determinando as características dos materiais e seguindo o processo de cálculo conforme prescreve os documentos normativos. Após isso, os resultados dos procedimentos de cálculo foram validados com a utilização de *softwares* estruturais.

Por fim, realizaram-se as análises dos resultados e a confecção de ábacos para o pré-dimensionamento, comparando as normas entre si, de modo a identificar a mais conservadora. Assim, efetuou-se as análises das normas para os perfis que constam no apêndice A e, posteriormente, vão a vão constatando as diferenças entre os resultados.

Visto isso, constata-se que a NBR 8800:2008, comumente, fornece resultados mais conservadores, enquanto, a EUROCODE 4:2004, propicia maiores resultados de carga resistente de cálculo.

É importante destacar que o corrente estudo conta com várias limitações, a saber, as características dos materiais e o tipo de laje foram fixadas, dado que, são fatores predominante na determinação da resistência. Assim, a utilização do concreto e aço com resistências diferentes das quais foram escolhidas, bem como, a alteração do tipo de laje, produzirá resultados diferentes ao exposto nesse trabalho. Além disso, os valores da resistência da seção mista encontrados com a norma americana correspondem com a utilização das disposições "*Load and Resistance Factor Design"* (LRFD), então a opção de utilizar a "*Allowable Stress Design"* (ASD), também produzirá diferentes resultados.

Sugere-se, em futuros trabalhos, a realização da análise das normas estudadas, de modo a identificar qual delas é mais conservadora ao dimensionar vigas mistas considerando ligação parcial entre o aço o concreto.

REFERÊNCIAS

ALVA, Gerson. Sobre o projeto de edifícios em estrutura mista aço-concreto. *[S. l.]*, 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Gerson-Alva/publication/34738306_Sobre_o_projeto_de_edificios_em_estrutura_mista_aco-concreto/links/59db8c4645851508a43a0aee/Sobre-o-projeto-de-edificios-em-estrutura-mista-aco-concreto.pdf. Acesso em: 18 mar. 2022.

ALVA, Gerson Moacyr Sisniegas; MALITE, Maximiliano. Comportamento Estrutural E Dimensionamento De Elementos Mistos Aço-Concreto. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, *[S. l.]*, v. 7, 2005.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **AISC 360:2016 - Specification for Structural Steel Buildings**. Chicago.

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

BELLEI, Ildone; PINHO, Fernando; PINHO, Mauro. **Edifícios de Múltiplos Andares em Aço**. 2ª ed. São Paulo: PINI, 2008.

CALENZANI, Fernanda. **Estruturas mistas aço-concreto Vigas mistas aço-concreto**. Espirito Santo. Disponível em: https://ecivilufes.files.wordpress.com/2013/11/2-vigas-mistas-parte-i.pdf. Acesso em: 30 abr. 2022.

ENERCALC. [s.d.]. Disponível em: https://enercalc.com/Downloads/FreeTrial. Acesso em: 26 maio. 2022.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings**. Brussels.

FABRIZZI, Marcela. Contribuição para o projeto e dimensionamento de edifícios de múltiplos andares com elementos estruturais mistos aço-concreto. *[S. l.]*, 2007.

FILHO, Roberto. Depoimentos. **Arquitetura & Aço**, Rio de Janeiro, v. 42, p. 16, 2015. a. Disponível em: https://www.cbca-acobrasil.org.br/site/revista-arquitetura-e-aco/arquitetura-aco-n-42-especial-10-anos. Acesso em: 20 abr. 2022.

FILHO, Roberto. O Aço em Edifícios Multiandares. **Arquitetura & Aço**, Rio de Janeiro, v. 43, p. 16–19, 2015. b. Disponível em: https://www.cbca-acobrasil.org.br/site/revista-arquitetura-e-aco/arquitetura-aco-n-43-edificios-multiandares. Acesso em: 20 abr. 2022.

FONSECA, FT Da. Dimensionamento de estruturas mistas de aço e concreto conforme a ABNT NBR 8800: 2008. *[S. l.]*, 2015. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/RAOA-BDALSU. Acesso em: 4 abr. 2022.

MARINGONI, Heloísa. Jardim Secreto. **Arquitetura & Aço**, Rio de Janeiro, v. 40, p. 16–17, 2014. Disponível em: https://www.cbca-acobrasil.org.br/site/revista-arquitetura-e-aco/arquitetura-aco-n-40---residencias. Acesso em: 21 abr. 2022.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. **Estruturas de Aço Dimensionamento Prático**. [s.l: s.n.].

QUEIROZ, Gilson; PIMENTA, Roberval; MARTINS, Alexander. **Estruturas Mistas**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/CBCA, 2012. v. 1

SALMON, Charles; JOHNSON, John; MALHAS, Faris. **Steel Structures: Design and Behavior**. 5ª ed. [s.l.] : Pearson, 2009.

SANTOS, Rogério. Estudo comparativo entre o dimensionamento de estruturas articuladas em aço para treliça em arco pela NBR 8800: 2008, EUROCODE 3 e ANSI/AISC 360-05. *[S. l.]*, 2016. Disponível em: http://repositorio.unesc.net/handle/1/4253. Acesso em: 4 abr. 2022.

SIMMS, W. I.; HUGHES, A. F. **Composite Design of Steel Framed Buildings**. Ascot, Berkshire: SCI, 2011.

Softwares – Departamento de Engenharia de Estruturas. [s.d.]. Disponível em: https://set.eesc.usp.br/?page_id=237. Acesso em: 18 maio. 2022.

APÊNDICE A – Dimensionamento das Vigas Mistas

VIGA MISTA COM INTERAÇÃO COMPLETA DE ACORDO COM A NBR 8800
VÃO DE 5 m - LNP NA LAJE

Aço:

$f_y := 250\ MPa$

$E := 200000\ MPa$

Concreto:

$f_{ck} := 25\ MPa$

Laje:

$h_F := 75\ mm$

$t_c := 65\ mm$

Vão da viga:

$L_e := 5\ m$

Espaçamento entre vigas:

$L_{ab} := 3\ m$

Dados do perfil:

$A_a := 42.1\ cm^2$

$d := 349\ mm$

$t_w := 5.8\ mm$

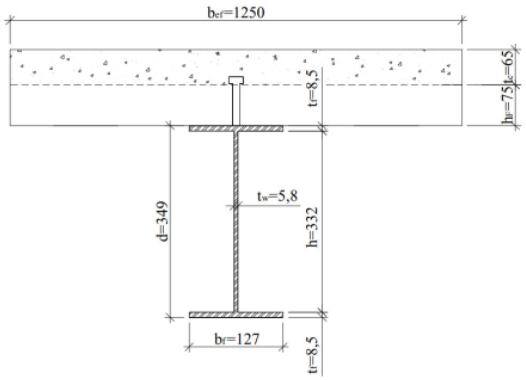
$t_f := 8.5\ mm$

$b_f := 127\ mm$

$h := d - 2 \cdot t_f = 332\ mm$

$I_a := 8358\ cm^4$

Perfil W 360x32,9



- Classificação da seção

$viga.compacta := \text{if}\left(\frac{h}{t_w} \le 3.6 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}\ ,\ \text{"Viga mista compacta, pode ser utilizada as propriedades plásticas da seção mista"}\ ,\ \text{"Viga mista não compacta, não pode ser utilizada as propriedades plásticas da seção mista"}\right)$

$viga.compacta =$ "Viga mista compacta, pode ser utilizada as propriedades plásticas da seção mista"

- Largura efetiva da laje

$$b := min\left(\frac{1}{4} \cdot L_e\ ,\ L_{ab}\right) = 1250\ mm$$

- Posição da linha neutra plástica e momento resistente

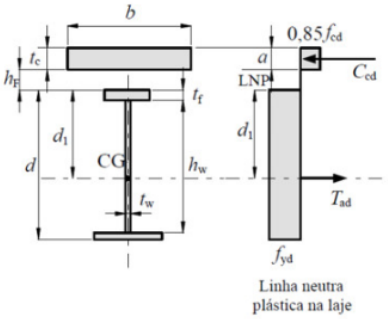
$\gamma_c := 1.4$ $\qquad$ $\gamma_a := 1.1$

$f_{cd} := \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 17.86\ MPa$ $\qquad$ $f_{yd} := \frac{f_y}{\gamma_a} = 227.27\ MPa$

$C_{cd} := 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot t_c = 1233.26\ kN$ $\qquad$ $T_{ad} := A_a \cdot f_{yd} = 956.82\ kN$

$LNP.check := \text{if}\left(C_{cd} \ge T_{ad}\ ,\ \text{"A linha neutra plástica se encontra na laje de concreto"}\ ,\ \text{"A linha neutra plástica se encontra no perfil de aço"}\right)$

$LNP.check =$ "A linha neutra plástica se encontra na laje de concreto"



Linha neutra plástica na laje

$$a := \frac{T_{ad}}{0.85 \cdot f_{cd} \cdot b} = 50.43\ mm \qquad d_1 := \frac{d}{2} = 174.5\ mm$$

$$M_{Rd} := T_{ad} \cdot \left(d_1 + h_F + t_c - \frac{a}{2}\right) = 276.79\ kN \cdot m$$

$$q_d := \frac{8 \cdot M_{Rd}}{{L_e}^2} = 9032.02\ \frac{kgf}{m} \qquad \frac{q_d}{b} = 7225.61\ \frac{kgf}{m^2}$$

- Cálculo dos conectores

$d_{cs} := 19.1\ mm \qquad A_{cs} := \frac{\pi \cdot d_{cs}^{\ 2}}{4} = 2.87\ cm^2 \qquad \gamma_{cs} := 1.25 \qquad f_{ucs} := 415\ MPa$

$E_c := 0.85 \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}\ MPa^{0.5} = 23800\ MPa$

$Q_{Rd.1} := \frac{1}{2} \cdot \frac{A_{cs} \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_c}}{\gamma_{cs}} = 88.4\ kN$

$R_g := 1 \qquad R_p := 0.75 \qquad V_{hd} := min\left(C_{cd}, T_{ad}\right) = 956.82\ kN$

$Q_{Rd.2} := \frac{R_g \cdot R_p \cdot A_{cs} \cdot f_{ucs}}{\gamma_{cs}} = 71.34\ kN \qquad Q_{Rd} := \min\left(Q_{Rd.1}, Q_{Rd.2}\right)$

$n_{cs} := \frac{V_{hd}}{Q_{Rd}} = 13.41 \qquad n_{cs} := \text{ceil}\left(n_{cs}\right) = 14$

- Verificação da flecha

- Seção homogeneizada

$\alpha_E := \frac{E}{E_c} = 8.4 \qquad \alpha_\infty := 3 \cdot \alpha_E = 25.21 \qquad b_{tr} := \frac{b}{\alpha_\infty} = 49.58\ mm$

- Altura da linha neutra

$A_{conc} := b_{tr} \cdot t_c = 32.23\ cm^2$

$y := \frac{A_{conc} \cdot \frac{t_c}{2} + A_a \cdot \left(\frac{d}{2} + h_F + t_c\right)}{A_{conc} + A_a} = 19.22\ cm$

- Cálculo do momento de inércia da seção transformada

$I_{laje} := \frac{b_{tr} \cdot t_c^{\ 3}}{12} + A_{conc} \cdot \left(y - \frac{t_c}{2}\right)^2 = 8335.77\ cm^4$

$I_{perfil} := I_a + A_a \cdot \left(\frac{d}{2} + h_F + t_c - y\right)^2 = 14652.48\ cm^4$

$I_{tr} := I_{laje} + I_{perfil} = 22988.25\ cm^4 \qquad \eta_i := 1 \qquad I_{ef} := I_a + \sqrt{\eta_i} \cdot \left(I_{tr} - I_a\right) = 22988.25\ cm^4$

- Cálculo da flecha

$$\delta := \frac{5 \cdot \frac{q_d}{1.4} \cdot L_e^{\,4}}{384\ E \cdot I_{ef}} = 1.12\ cm$$

- Flecha admissível

$$\delta_{adm.350} := \frac{L_e}{350} = 1.43\ cm \qquad \delta_{adm.250} := \frac{L_e}{250} = 2\ cm$$

$check.flecha.350 := \text{if}\left(\delta \le \delta_{adm.350}\ ,\ \text{“A verificação da flecha está atendida”}\ ,\ \text{“A verificação da flexa não foi atendida”}\right)$

$check.flecha.350 = \text{“A verificação da flecha está atendida”}$

$check.flecha.250 := \text{if}\left(\delta \le \delta_{adm.250}\ ,\ \text{“A verificação da flecha está atendida”}\ ,\ \text{“A verificação da flexa não foi atendida”}\right)$

$check.flecha.250 = \text{“A verificação da flecha está atendida”}$

Validação dos resultados com o *software* "Viga Mista vs 3.0"

Relatório Viga: PERFIL W 360 x 32,9 COM VÃO DE 5 METROS

Observações: TCC

Dados de Entrada

Geometria

Mesa Superior ---- bf [mm] = 127 tf [mm] = 8.5
Mesa Inferior ------- bf [mm] = 127 tf [mm] = 8.5
Alma ---------- hw [mm] = 332 tw [mm] = 5.8
Geometria da laje:
- h1 [mm] =65 - h2 [mm] =75
- L1 [mm] =170 - L2 [mm] =109 - L3 [mm] =109

Materiais

Aço ---------- fy [MPa] = 250
Concreto ---------- fck [MPa] = 25 g [KN/m3] = 25

Tipo de Construção

Escorada
Momento fletor solicitande [KN.m] = nominal: 0
Momento fletor solicitande [KN.m] = cálculo: 0

Temperatura

Analisar apenas em temperatura ambiente.

Conectores

Tipo: Pino com Cabeça ("Stud Bolts")
Diâmetro do conector [mm] = 19.1
Limite de resistência à tração do aço do conector [MPa] = 415
Comprimento do pino após a soldagem [mm] = 115
Número de conectores de cisalhamento por nervura = 1

Resultados para Temperatura Ambiente - de acordo com a ABNT NBR 8800:2008

Interação Completa

Momento Resistente de Cálculo [kN.m] = 276.69
Resistência Mínima dos Conectores no Trecho [kN] = 956.41
Número de Conectores Necessários em Meia Viga = 14.00
Posição da Linha Neutra y [mm] = -89.59
OBS: Posição da Linha Neutra a partir do topo da viga de aço
Positivo para baixo
Tensão de tração [kN/cm²] = 0.00
Tensão de compressão [kN/cm²] = 0.00

VIGA MISTA COM INTERAÇÃO COMPLETA DE ACORDO COM A NBR 8800
VÃO DE 5 m - LNP NA MESA

Aço:

$f_y := 250\ MPa$

$E := 200000\ MPa$

Concreto:

$f_{ck} := 25\ MPa$

Laje:

$h_F := 75\ mm$

$t_c := 65\ mm$

Vão da viga:

$L_e := 5\ m$

Espaçamento entre vigas:

$L_{ab} := 3\ m$

Dados do perfil:

$A_a := 66.6\ cm^2$

$d := 450\ mm$

$t_w := 7.6\ mm$

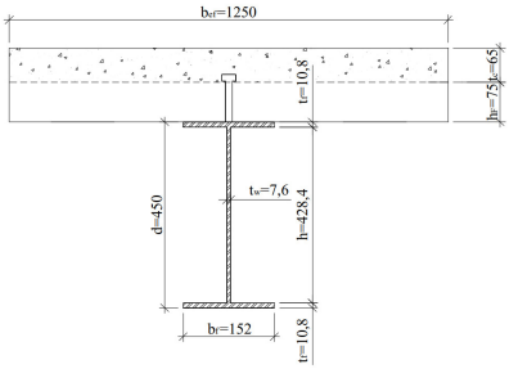
$t_f := 10.8\ mm$

$b_f := 152\ mm$

$h := d - 2 \cdot t_f = 428.4\ mm$

$I_a := 21370\ cm^4$

Perfil W 460x52



- Classificação da seção

$viga.compacta := \text{if}\left(\frac{h}{t_w} \le 3.6 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}},\ \text{"Viga mista compacta, pode ser utilizada as propriedades plásticas da seção mista"},\ \text{"Viga mista não compacta, não pode ser utilizada as propriedades plásticas da seção mista"}\right)$

$viga.compacta = \text{"Viga mista compacta, pode ser utilizada as propriedades plásticas da seção mista"}$

- Largura efetiva da laje

$$b := min\left(\frac{1}{4} \cdot L_e, L_{ab}\right) = 1250\ mm$$

- Posição da linha neutra plástica (y_p) e momento resistente

$\gamma_c := 1.4$

$\gamma_a := 1.1$

$f_{cd} := \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 17.86\ MPa$

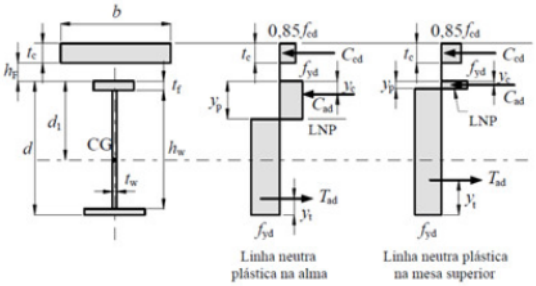
$f_{yd} := \frac{f_y}{\gamma_a} = 227.27\ MPa$

$C_{cd} := 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot t_c = 1233.26\ kN$

$T_{ad} := A_a \cdot f_{yd} = 1513.64\ kN$

$LNP.check := \text{if}\left(C_{cd} \ge T_{ad},\ \text{"A linha neutra plástica se encontra na laje de concreto"},\ \text{"A linha neutra plástica se encontra no perfil de aço"}\right)$

$LNP.check = \text{"A linha neutra plástica se encontra no perfil de aço"}$



$$C_{ad} := \frac{1}{2} \cdot \left(A_a \cdot f_{yd} - C_{cd}\right) = 140.19\ kN$$

$$T_{ad} := C_{cd} + C_{ad} = 1373.45\ kN$$

$A_{fs} := b_f \cdot t_f = 16.42\ cm^2$

$A_{fs} \cdot f_{yd} = 373.09\ kN$

$LNP.check := \text{if}\left(C_{ad} \le A_{fs} \cdot f_{yd}\text{ , “A linha neutra plástica está na mesa superior do perfil de aço” , “A linha neutra plástica está na alma do perfil de aço”}\right)$

$LNP.check =$ “A linha neutra plástica está na mesa superior do perfil de aço”

$t_{fs} := t_f \qquad h_w := h \qquad A_w := h_w \cdot t_w = 32.56\ cm^2$

$$y_p := \frac{C_{ad}}{A_{fs} \cdot f_{yd}} \cdot t_{fs} = 4.06\ mm$$

$A_w = 32.56\ cm^2 \qquad A_{fi} := A_{fs} = 16.42\ cm^2 \qquad A_{fs.t} := b_f \cdot \left(t_f - y_p\right) = 10.25\ cm^2$

$$y_t := \frac{A_{fi} \cdot \frac{t_f}{2} + A_w \cdot \frac{d}{2} + A_{fs.t} \cdot \left(t_f + h + \frac{t_f - y_p}{2}\right)}{A_{fi} + A_w + A_{fs.t}} = 201.78\ mm \qquad y_c := \frac{y_p}{2} = 2.03\ mm$$

$$M_{Rd} := C_{ad} \cdot \left(d - y_t - y_c\right) + C_{cd} \cdot \left(\frac{t_c}{2} + h_F + d - y_t\right) = 473.21\ kN \cdot m$$

$$q_d := \frac{8 \cdot M_{Rd}}{{L_e}^2} = 15441.38\ \frac{kgf}{m} \qquad \frac{q_d}{b} = 12353.1\ \frac{kgf}{m^2}$$

- Cálculo dos conectores

$d_{cs} := 19.1\ mm \qquad A_{cs} := \frac{\pi \cdot {d_{cs}}^2}{4} = 2.87\ cm^2 \qquad \gamma_{cs} := 1.25 \qquad f_{ucs} := 415\ MPa$

$E_c := 0.85 \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}\ MPa^{0.5}$

$$Q_{Rd.1} := \frac{1}{2} \cdot \frac{A_{cs} \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_c}}{\gamma_{cs}} = 88.4\ kN$$

$R_g := 1 \qquad R_p := 0.75 \qquad V_{hd} := min\left(C_{cd}, T_{ad}\right) = 1233.26\ kN$

$$Q_{Rd.2} := \frac{R_g \cdot R_p \cdot A_{cs} \cdot f_{ucs}}{\gamma_{cs}} = 71.34\ kN \qquad Q_{Rd} := \min\left(Q_{Rd.1}, Q_{Rd.2}\right)$$

$$n_{cs} := \frac{V_{hd}}{Q_{Rd}} = 17.29 \qquad n_{cs} := \text{ceil}\left(n_{cs}\right) = 18$$

- Verificação da flecha

  - Seção homogeneizada

$$\alpha_E := \frac{E}{E_c} = 8.4 \qquad \alpha_\infty := 3 \cdot \alpha_E = 25.21 \qquad b_{tr} := \frac{b}{\alpha_\infty} = 49.58\ mm$$

- Altura da linha neutra

$$A_{conc} := b_{tr} \cdot t_c = 32.23\ cm^2$$

$$y := \frac{A_{conc} \cdot \frac{t_c}{2} + A_a \cdot \left(\frac{d}{2} + h_F + t_c\right)}{A_{conc} + A_a} = 25.66\ cm$$

- Cálculo do momento de inércia da seção transformada

$$I_{laje} := \frac{b_{tr} \cdot {t_c}^3}{12} + A_{conc} \cdot \left(y - \frac{t_c}{2}\right)^2 = 16294.67\ cm^4$$

$$I_{perfil} := I_a + A_a \cdot \left(\frac{d}{2} + h_F + t_c - y\right)^2 = 29200.43\ cm^4$$

$$I_{tr} := I_{laje} + I_{perfil} = 45495.09\ cm^4 \qquad \eta_i := 1 \qquad I_{ef} := I_a + \sqrt{\eta_i} \cdot \left(I_{tr} - I_a\right) = 45495.09\ cm^4$$

- Cálculo da flecha

$$\delta := \frac{5 \cdot \frac{q_d}{1.4} \cdot {L_e}^4}{384\ E \cdot I_{ef}} = 0.97\ cm$$

- Flecha admissível

$$\delta_{adm.350} := \frac{L_e}{350} = 1.43\ cm \qquad \delta_{adm.250} := \frac{L_e}{250} = 2\ cm$$

$check.flecha.350 := \text{if}\left(\delta \le \delta_{adm.350}, \text{“A verificação da flecha está atendida”}, \text{“A verificação da flexa não foi atendida”}\right)$

$check.flecha.350 = \text{“A verificação da flecha está atendida”}$

$check.flecha.250 := \text{if}\left(\delta \le \delta_{adm.250}, \text{“A verificação da flecha está atendida”}, \text{“A verificação da flexa não foi atendida”}\right)$

$check.flecha.250 = \text{“A verificação da flecha está atendida”}$

Validação dos resultados com o *software* "Viga Mista vs 3.0"

Relatório Viga: PERFIL W 460 x 52,0 COM VÃO DE 5 METROS

Observações: TCC

Dados de Entrada

Geometria

Mesa Superior ---- bf [mm] = 152 tf [mm] = 10.8
Mesa Inferior ------- bf [mm] = 152 tf [mm] = 10.8
Alma ------------------- hw [mm] = 428 tw [mm] = 7.6
Geometria da laje:
- h1 [mm] =65 - h2 [mm] =75
- L1 [mm] =170 - L2 [mm] =109 - L3 [mm] =109

Materiais

Aço ------------------ fy [MPa] = 250
Concreto ---------- fck [MPa] = 25 g [KN/m3] = 25

Tipo de Construção

Escorada
Momento fletor solicitande [KN.m] = nominal: 0
Momento fletor solicitande [KN.m] = cálculo: 0

Temperatura

Analisar apenas em temperatura ambiente.

Conectores

Tipo: Pino com Cabeça ("Stud Bolts")
Diâmetro do conector [mm] = 19.1
Limite de resistência à tração do aço do conector [MPa] = 415
Comprimento do pino após a soldagem [mm] = 115
Número de conectores de cisalhamento por nervura = 1

Resultados para Temperatura Ambiente - de acordo com a ABNT NBR 8800:2008

Interação Completa

Momento Resistente de Cálculo [kN.m] = 472.90
Resistência Mínima dos Conectores no Trecho [kN] = 1233.26
Número de Conectores Necessários em Meia Viga = 18.00
Posição da Linha Neutra y [mm] = 4.06
OBS: Posição da Linha Neutra a partir do topo da viga de aço
Positivo para baixo
Tensão de tração [kN/cm²] = 0.00
Tensão de compressão [kN/cm²] = 0.00

VIGA MISTA COM INTERAÇÃO COMPLETA DE ACORDO COM A NBR 8800
VÃO DE 5 m - LNP NA ALMA DO PERFIL DE AÇO

Aço:

$f_y := 250\ MPa$

$E := 200000\ MPa$

Concreto:

$f_{ck} := 25\ MPa$

Laje:

$h_F := 75\ mm$

$t_c := 65\ mm$

Vão da viga:

$L_e := 5\ m$

Espaçamento entre vigas:

$L_{ab} := 3\ m$

Dados do perfil:

$A_a := 130.3\ cm^2$

$d := 603\ mm$

$t_w := 10.5\ mm$

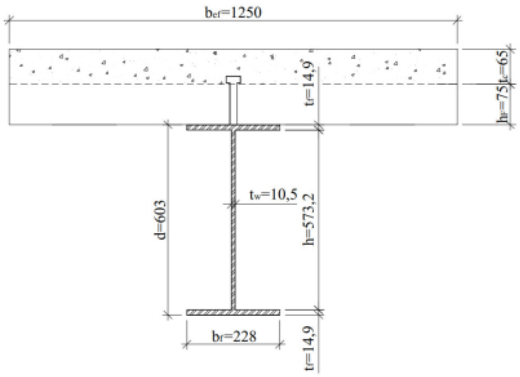
$t_f := 14.9\ mm$

$b_f := 228\ mm$

$h := d - 2 \cdot t_f = 573.2\ mm$

$I_a := 77003\ cm^4$

Perfil W 610x101



- Classificação da seção

$viga.compacta := \text{if}\left(\frac{h}{t_w} \le 3.6 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}\ ,\ \text{"Viga mista compacta, pode ser utilizada as propriedades plásticas da seção mista"}\ ,\ \text{"Viga mista não compacta, não pode ser utilizada as propriedades plásticas da seção mista"}\right)$

$viga.compacta = \text{"Viga mista compacta, pode ser utilizada as propriedades plásticas da seção mista"}$

- Largura efetiva da laje

$$b := min\left(\frac{1}{4} \cdot L_e\ ,\ L_{ab}\right) = 1250\ mm$$

- Posição da linha neutra plástica (y_p) e momento resistente

$\gamma_c := 1.4$

$\gamma_a := 1.1$

$f_{cd} := \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 17.86\ MPa$

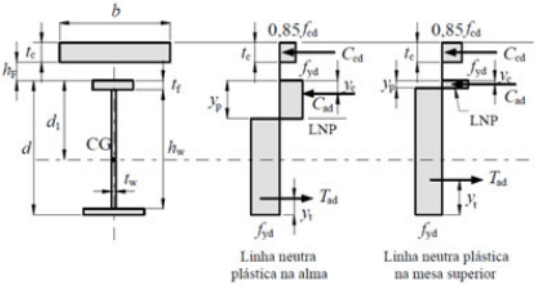
$f_{yd} := \frac{f_y}{\gamma_a} = 227.27\ MPa$

$C_{cd} := 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot t_c = 1233.26\ kN$

$T_{ad} := A_a \cdot f_{yd} = 2961.36\ kN$

$LNP.check := \text{if}\left(C_{cd} \ge T_{ad}\ ,\ \text{"A linha neutra plástica se encontra na laje de concreto"}\ ,\ \text{"A linha neutra plástica se encontra no perfil de aço"}\right)$

$LNP.check = \text{"A linha neutra plástica se encontra no perfil de aço"}$



$C_{ad} := \frac{1}{2} \cdot \left(A_a \cdot f_{yd} - C_{cd}\right) = 864.05\ kN$

$T_{ad} := C_{cd} + C_{ad} = 2097.31\ kN$

$A_{fs} := b_f \cdot t_f = 33.97\ cm^2$

$A_{fs} \cdot f_{yd} = 772.09\ kN$

$LNP.check := \text{if}\left(C_{ad} \le A_{fs} \cdot f_{yd}\text{, “A linha neutra plástica está na mesa superior do perfil de aço”, “A linha neutra plástica está na alma do perfil de aço”}\right)$

$LNP.check =$ “A linha neutra plástica está na alma do perfil de aço”

$t_{fs} := t_f \qquad h_w := h \qquad A_w := h_w \cdot t_w = 60.19\ cm^2$

$$y_p := t_{fs} + h_w \cdot \left(\frac{C_{ad} - A_{fs} \cdot f_{yd}}{A_w \cdot f_{yd}}\right) = 53.44\ mm$$

$A_{wt} := t_w \cdot \left(d - t_f - y_p\right) = 56.14\ cm^2 \qquad A_{wc} := t_w \cdot \left(y_p - t_f\right) = 4.05\ cm^2$

$$y_t := \frac{A_{fs} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{wt} \cdot \left(\frac{d - t_f - y_p}{2} + t_f\right)}{A_{fs} + A_{wt}} = 178.64\ mm \qquad y_c := \frac{A_{fs} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{wc} \cdot \left(\frac{y_p - t_f}{2} + t_f\right)}{A_{fs} + A_{wc}} = 10.29\ mm$$

$$M_{Rd} := C_{ad} \cdot \left(d - y_t - y_c\right) + C_{cd} \cdot \left(\frac{t_c}{2} + h_F + d - y_t\right) = 1013.7\ kN \cdot m$$

$$q_d := \frac{8 \cdot M_{Rd}}{L_e^{\,2}} = 33077.87\ \frac{kgf}{m} \qquad \frac{q_d}{b} = 26462.3\ \frac{kgf}{m^2}$$

- Cálculo dos conectores

$d_{cs} := 19.1\ mm \qquad A_{cs} := \frac{\pi \cdot d_{cs}^{\,2}}{4} = 2.87\ cm^2 \qquad \gamma_{cs} := 1.25 \qquad f_{ucs} := 415\ MPa$

$E_c := 0.85 \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}\ MPa^{0.5}$

$$Q_{Rd.1} := \frac{1}{2} \cdot \frac{A_{cs} \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_c}}{\gamma_{cs}} = 88.4\ kN$$

$R_g := 1 \qquad R_p := 0.75 \qquad V_{hd} := min\left(C_{cd}, T_{ad}\right) = 1233.26\ kN$

$$Q_{Rd.2} := \frac{R_g \cdot R_p \cdot A_{cs} \cdot f_{ucs}}{\gamma_{cs}} = 71.34\ kN \qquad Q_{Rd} := \min\left(Q_{Rd.1}, Q_{Rd.2}\right)$$

$$n_{cs} := \frac{V_{hd}}{Q_{Rd}} = 17.29 \qquad n_{cs} := \text{ceil}\left(n_{cs}\right) = 18$$

- Verificação da flecha

  - Seção homogeneizada

$$\alpha_E := \frac{E}{E_c} = 8.4 \qquad \alpha_\infty := 3 \cdot \alpha_E = 25.21 \qquad b_{tr} := \frac{b}{\alpha_\infty} = 49.58\ mm$$

- Altura da linha neutra

$$A_{conc} := b_{tr} \cdot t_c = 32.23\ cm^2$$

$$y := \frac{A_{conc} \cdot \frac{t_c}{2} + A_a \cdot \left(\frac{d}{2} + h_F + t_c\right)}{A_{conc} + A_a} = 36.04\ cm$$

- Cálculo do momento de inércia da seção transformada

$$I_{laje} := \frac{b_{tr} \cdot {t_c}^3}{12} + A_{conc} \cdot \left(y - \frac{t_c}{2}\right)^2 = 34764.96\ cm^4$$

$$I_{perfil} := I_a + A_a \cdot \left(\frac{d}{2} + h_F + t_c - y\right)^2 = 85573.9\ cm^4$$

$$I_{tr} := I_{laje} + I_{perfil} = 120338.87\ cm^4 \qquad \eta_i := 1 \qquad I_{ef} := I_a + \sqrt{\eta_i} \cdot \left(I_{tr} - I_a\right) = 120338.87\ cm^4$$

- Cálculo da flecha

$$\delta := \frac{5 \cdot \frac{q_d}{1.4} \cdot {L_e}^4}{384\ E \cdot I_{ef}} = 0.78\ cm$$

- Flecha admissível

$$\delta_{adm.350} := \frac{L_e}{350} = 1.43\ cm \qquad \delta_{adm.250} := \frac{L_e}{250} = 2\ cm$$

$check.flecha.350 := \text{if}\left(\delta \le \delta_{adm.350}, \text{“A verificação da flecha está atendida”}, \text{“A verificação da flexa não foi atendida”}\right)$

$check.flecha.350 = \text{“A verificação da flecha está atendida”}$

$check.flecha.250 := \text{if}\left(\delta \le \delta_{adm.250}, \text{“A verificação da flecha está atendida”}, \text{“A verificação da flexa não foi atendida”}\right)$

$check.flecha.250 = \text{“A verificação da flecha está atendida”}$

Validação dos resultados com o *software* "Viga Mista vs 3.0"

Relatório Viga: PERFIL W 610 x 101 COM VÃO DE 5 METROS

Observações: TCC

Dados de Entrada

Geometria

Mesa Superior ---- bf [mm] = 228 tf [mm] = 14.9
Mesa Inferior ------- bf [mm] = 228 tf [mm] = 14.9
Alma ---------- hw [mm] = 573 tw [mm] = 10.5
Geometria da laje:
- h1 [mm] =65 - h2 [mm] =75
- L1 [mm] =170 - L2 [mm] =109 - L3 [mm] =109

Materiais

Aço ---------- fy [MPa] = 250
Concreto ---------- fck [MPa] = 25 g [KN/m3] = 25

Tipo de Construção

Escorada
Momento fletor solicitande [KN.m] = nominal: 0
Momento fletor solicitande [KN.m] = cálculo: 0

Temperatura

Analisar apenas em temperatura ambiente.

Conectores

Tipo: Pino com Cabeça ("Stud Bolts")
Diâmetro do conector [mm] = 19.1
Limite de resistência à tração do aço do conector [MPa] = 415
Comprimento do pino após a soldagem [mm] = 115
Número de conectores de cisalhamento por nervura = 1

Resultados para Temperatura Ambiente - de acordo com a ABNT NBR 8800:2008

Interação Completa

Momento Resistente de Cálculo [kN.m] = 1013.51
Resistência Mínima dos Conectores no Trecho [kN] = 1233.26
Número de Conectores Necessários em Meia Viga = 18.00
Posição da Linha Neutra y [mm] = 53.47
OBS: Posição da Linha Neutra a partir do topo da viga de aço
Positivo para baixo
Tensão de tração [kN/cm²] = 0.00
Tensão de compressão [kN/cm²] = 0.00

VIGA MISTA COM INTERAÇÃO COMPLETA DE ACORDO COM A EUROCODE 4
VÃO DE 5 m - LNP NA LAJE

Aço:

$f_y := 250\ MPa$

$E := 200000\ MPa$

Concreto:

$f_{ck} := 25\ MPa$

Laje:

$h_F := 75\ mm$

$t_c := 65\ mm$

Vão da viga:

$L_e := 5\ m$

Espaçamento entre vigas:

$L_{ab} := 3\ m$

Dados do perfil:

Perfil W 360x32,9

$A_a := 42.1\ cm^2$

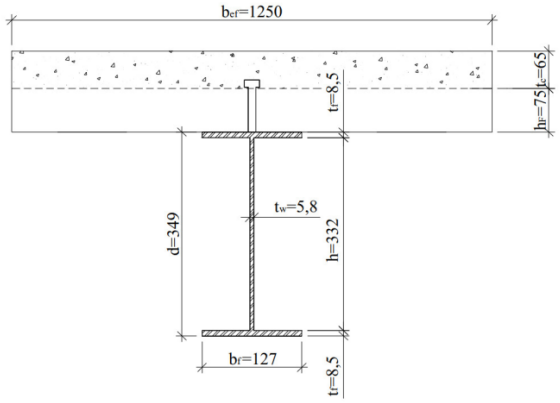
$d := 349\ mm$

$t_w := 5.8\ mm$

$t_f := 8.5\ mm$

$b_f := 127\ mm$

$h := d - 2 \cdot t_f = 332\ mm$



- Verificação da seção

$$\varepsilon := \sqrt{\frac{235\ MPa}{f_y}} = 0.97$$

$check.seção := \text{if}\left(\frac{h}{t_w} < 83\varepsilon\ ,\ \text{“Pode ser considerada as propriedades plástica da seção”}\ ,\ \text{“Não pode ser considerada as propriedades plástica da seção”}\right) = \text{“Pode ser considerada as propriedades plástica da seção”}$

$check.seção = \text{“Pode ser considerada as propriedades plástica da seção”}$

- Largura efetiva da laje

$$b := min\left(\frac{1}{4} \cdot L_e\ , L_{ab}\right) = 1250\ mm$$

- Momento resistente

$\gamma_c := 1.5$

$\gamma_a := 1.0$

$f_{cd} := \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 16.67\ MPa$

$f_{yd} := \frac{f_y}{\gamma_a} = 250\ MPa$

$C_{cd} := 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot t_c = 1151.04\ kN$

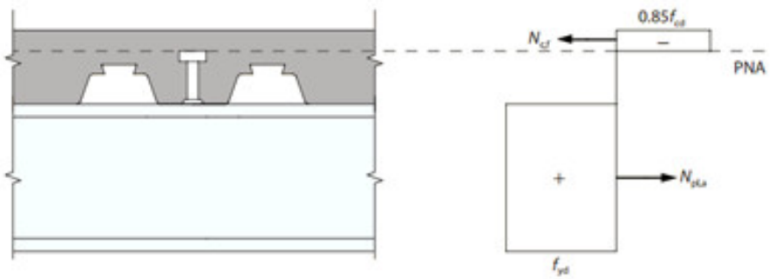
$T_{ad} := A_a \cdot f_{yd} = 1052.5\ kN$

$LNP.check := \text{if}\left(C_{cd} \geq T_{ad}\ ,\ \text{“A linha neutra plástica se encontra na laje de concreto”}\ ,\ \text{“A linha neutra plástica se encontra no perfil de aço”}\right)$

$LNP.check = \text{“A linha neutra plástica se encontra na laje de concreto”}$

A força de compressão no concreto na interação completa é a menor entre C_{cd} e T_{ad}

$$C_{cd} := min\left(C_{cd}\ , T_{ad}\right) = 1052.5\ kN$$



Igualando as equações ($C_{cd} = T_{ad}$), encontramos a posição da linha neutra plástica:

$$a := \frac{T_{ad}}{0.85 \cdot f_{cd} \cdot b} = 59.44\ mm$$

Fazendo o somatório dos momentos igual a zero na posição da LNP, temos:

$$M_{Rd} := C_{cd} \cdot \left(\frac{a}{2}\right) + T_{ad} \cdot \left(\frac{d}{2} + h_F + t_c - a\right) = 299.73\ kN \cdot m$$

Ou,

$$d_1 := \frac{d}{2} = 174.5\ mm \qquad M_{Rd} := T_{ad} \cdot \left(d_1 + h_F + t_c - \frac{a}{2}\right) = 299.73\ kN \cdot m$$

Ou então,

$$C_{cd} := 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot t_c = 1151.04\ kN \qquad T_{ad} := A_a \cdot f_{yd} = 1052.5\ kN$$

$$M_{Rd} := T_{ad} \cdot \left(\frac{d}{2} + t_c + h_F - \frac{T_{ad}}{C_{cd}} \cdot \frac{t_c}{2}\right) = 299.73\ kN \cdot m$$

$$q_d := \frac{8 \cdot M_{Rd}}{{L_e}^2} = 9780.58\ \frac{kgf}{m} \qquad \frac{q_d}{b} = 7824.46\ \frac{kgf}{m^2}$$

VIGA MISTA COM INTERAÇÃO COMPLETA DE ACORDO COM A EUROCODE 4
VÃO DE 5 m - LNP NA MESA DE AÇO

Aço:

$f_y := 250\ MPa$

$E := 200000\ MPa$

Concreto:

$f_{ck} := 25\ MPa$

Laje:

$h_F := 75\ mm$

$t_c := 65\ mm$

Vão da viga:

$L_e := 5\ m$

Espaçamento entre vigas:

$L_{ab} := 3\ m$

Dados do perfil:

$A_a := 66.6\ cm^2$

$d := 450\ mm$

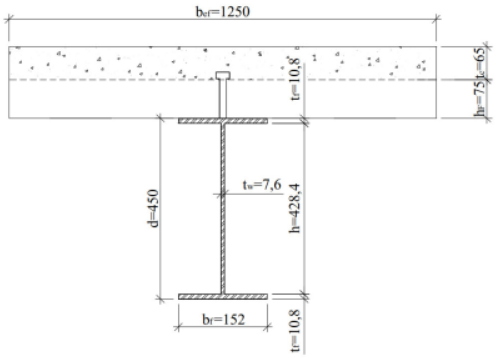
$t_w := 7.6\ mm$

$t_f := 10.8\ mm$

$b_f := 152\ mm$

$h := d - 2 \cdot t_f = 428.4\ mm$

Perfil W 460x52



- Verificação da seção

$$\varepsilon := \sqrt{\frac{235\ MPa}{f_y}} = 0.97$$

$$check.seção := \text{if}\left(\frac{h}{t_w} < 83\varepsilon\ ,\ \text{“Pode ser considerada as propriedades plástica da seção”}\ ,\ \text{“Não pode ser considerada as propriedades plástica da seção”}\right) = \text{“Pode ser considerada as propriedades plástica da seção”}$$

$check.seção =$ “Pode ser considerada as propriedades plástica da seção”

- Largura efetiva da laje

$$b := min\left(\frac{1}{4} \cdot L_e\ ,\ L_{ab}\right) = 1250\ mm$$

- Momento resistente

$\gamma_c := 1.5$

$\gamma_a := 1.0$

$f_{cd} := \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 16.67\ MPa$

$f_{yd} := \frac{f_y}{\gamma_a} = 250\ MPa$

$C_{cd} := 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot t_c = 1151.04\ kN$

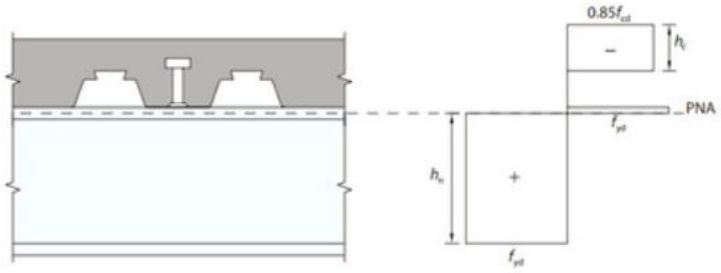
$T_{ad} := A_a \cdot f_{yd} = 1665\ kN$

$$LNP.check := \text{if}\left(C_{cd} \geq T_{ad}\ ,\ \text{“A linha neutra plástica se encontra na laje de concreto”}\ ,\ \text{“A linha neutra plástica se encontra no perfil de aço”}\right)$$

$LNP.check =$ “A linha neutra plástica se encontra no perfil de aço”

$$LNP.check := \text{if}\left(C_{cd} \geq T_{ad} - 2 \cdot b_f \cdot t_f \cdot f_{yd}\ ,\ \text{“A linha neutra plástica está na mesa superior do perfil de aço”}\ ,\ \text{“A linha neutra plástica está na alma do perfil de aço”}\right)$$

$LNP.check =$ “A linha neutra plástica está na mesa superior do perfil de aço”



Portanto,

$$M_{Rd} := T_{ad} \cdot \frac{d}{2} + C_{cd} \cdot \left(\frac{t_c}{2} + h_F \right) = 498.36 \ kN \cdot m$$

Ou,

$$A_{fs} := b_f \cdot t_f$$

$$M_{Rd} := T_{ad} \cdot \frac{d}{2} + C_{cd} \cdot \frac{t_c + 2\ h_F}{2} - \frac{\left(T_{ad} - C_{cd}\right)^2}{A_{fs} \cdot f_{yd}} \cdot \frac{t_f}{4} = 496.62 \ kN \cdot m$$

Ou ainda,

$$C_{ad} := \frac{1}{2} \cdot \left(A_a \cdot f_{yd} - C_{cd} \right) = 256.98 \ kN \qquad T_{ad} := C_{cd} + C_{ad} = 1408.02 \ kN$$

$$A_{fs} := b_f \cdot t_f = 16.42 \ cm^2 \qquad A_{fs} \cdot f_{yd} = 410.4 \ kN$$

$LNP.check := \text{if}\left(C_{ad} \le A_{fs} \cdot f_{yd}, \text{“A linha neutra plástica está na mesa superior do perfil de aço”}, \text{“A linha neutra plástica está na alma do perfil de aço”}\right)$

$LNP.check =$ “A linha neutra plástica está na mesa superior do perfil de aço”

$$t_{fs} := t_f \qquad h_w := h \qquad A_w := h_w \cdot t_w = 32.56 \ cm^2$$

$$y_p := \frac{C_{ad}}{A_{fs} \cdot f_{yd}} \cdot t_{fs} = 6.76 \ mm$$

$$A_w = 32.56 \ cm^2 \qquad A_{fi} := A_{fs} = 16.42 \ cm^2 \qquad A_{fs.t} := b_f \cdot \left(t_f - y_p \right) = 6.14 \ cm^2$$

$$y_t := \frac{A_{fi} \cdot \frac{t_f}{2} + A_w \cdot \frac{d}{2} + A_{fs.t} \cdot \left(t_f + h + \frac{t_f - y_p}{2} \right)}{A_{fi} + A_w + A_{fs.t}} = 183.66 \ mm \qquad y_c := \frac{y_p}{2} = 3.38 \ mm$$

$$M_{Rd} := C_{ad} \cdot \left(d - y_t - y_c \right) + C_{cd} \cdot \left(\frac{t_c}{2} + h_F + d - y_t \right) = 497.87 \ kN \cdot m$$

$$q_d := \frac{8 \cdot M_{Rd}}{{L_e}^2} = 16246.09 \ \frac{kgf}{m} \qquad \frac{q_d}{b} = 12996.87 \ \frac{kgf}{m^2}$$

VIGA MISTA COM INTERAÇÃO COMPLETA DE ACORDO COM EUROCODE 4
VÃO DE 5 m - LNP NA ALMA DO PERFIL DE AÇO

Aço:

$f_y := 250\ MPa$

$E := 200000\ MPa$

Concreto:

$f_{ck} := 25\ MPa$

Laje:

$h_F := 75\ mm$

$t_c := 65\ mm$

Vão da viga:

$L_e := 5\ m$

Espaçamento entre vigas:

$L_{ab} := 3\ m$

Dados do perfil:

$A_a := 130.3\ cm^2$

$d := 603\ mm$

$t_w := 10.5\ mm$

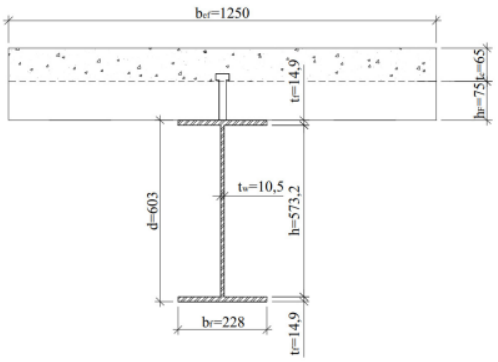
$t_f := 14.9\ mm$

$b_f := 228\ mm$

$h := d - 2 \cdot t_f = 573.2\ mm$

$Z_x := 2922.7\ cm^3$

Perfil W 610x101



- Verificação da seção

$$\varepsilon := \sqrt{\frac{235\ MPa}{f_y}} = 0.97$$

$check.seção := \text{if}\left(\frac{h}{t_w} < 83\varepsilon\ ,\ \text{"Pode ser considerada as propriedades plástica da seção"}\ ,\ \text{"Não pode ser considerada as propriedades plástica da seção"}\right) = \text{"Pode ser considerada as propriedades plástica da seção"}$

$check.seção =$ "Pode ser considerada as propriedades plástica da seção"

- Largura efetiva da laje

$$b := min\left(\frac{1}{4} \cdot L_e\ ,\ L_{ab}\right) = 1250\ mm$$

- Momento resistente

$\gamma_c := 1.5$

$\gamma_a := 1.0$

$f_{cd} := \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 16.67\ MPa$

$f_{yd} := \frac{f_y}{\gamma_a} = 250\ MPa$

$C_{cd} := 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot t_c = 1151.04\ kN$

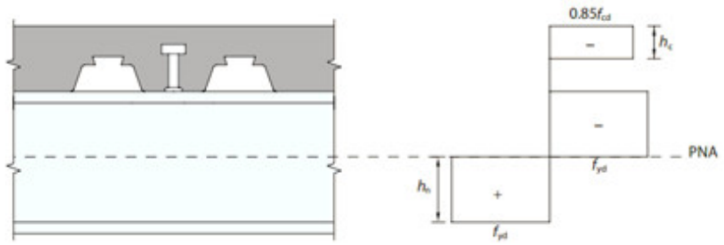
$T_{ad} := A_a \cdot f_{yd} = 3257.5\ kN$

$LNP.check := \text{if}\left(C_{cd} \geq T_{ad}\ ,\ \text{"A linha neutra plástica se encontra na laje de concreto"}\ ,\ \text{"A linha neutra plástica se encontra no perfil de aço"}\right)$

$LNP.check =$ "A linha neutra plástica se encontra no perfil de aço"

$LNP.check := \text{if}\left(C_{cd} \geq T_{ad} - 2 \cdot b_f \cdot t_f \cdot f_{yd}\ ,\ \text{"A linha neutra plástica está na mesa superior do perfil de aço"}\ ,\ \text{"A linha neutra plástica está na alma do perfil de aço"}\right)$

$LNP.check =$ "A linha neutra plástica está na alma do perfil de aço"



$F_w := h \cdot t_w \cdot f_{yd} = 1504.65\ kN$

$$M_{Rd} := Z_x \cdot f_{yd} + C_{cd} \cdot \frac{d + t_c + 2 \cdot h_F}{2} - \frac{{C_{cd}}^2}{F_w} \cdot \frac{d}{4} = 1068.71\ kN \cdot m$$

Ou,

$C_{ad} := \frac{1}{2} \cdot \left(A_a \cdot f_{yd} - C_{cd}\right) = 1053.23\ kN$ $\quad T_{ad} := C_{cd} + C_{ad} = 2204.27\ kN$

$A_{fs} := b_f \cdot t_f = 33.97\ cm^2$ $\quad A_{fs} \cdot f_{yd} = 849.3\ kN$

$LNP.check := \text{if}\left(C_{ad} \le A_{fs} \cdot f_{yd}\ ,\ \text{“A linha neutra plástica está na mesa superior do perfil de aço”}\ ,\ \text{“A linha neutra plástica está na alma do perfil de aço”}\right)$

$LNP.check =$ “A linha neutra plástica está na alma do perfil de aço”

$t_{fs} := t_f$ $\quad h_w := h$ $\quad A_w := h_w \cdot t_w = 60.19\ cm^2$

$$y_p := t_{fs} + h_w \cdot \left(\frac{C_{ad} - A_{fs} \cdot f_{yd}}{A_w \cdot f_{yd}}\right) = 92.59\ mm$$

$A_{wt} := t_w \cdot \left(d - t_f - y_p\right)$ $\quad A_{wc} := t_w \cdot \left(y_p - t_f\right)$

$$y_t := \frac{A_{fs} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{wt} \cdot \left(\frac{d - t_f - y_p}{2} + t_f\right)}{A_{fs} + A_{wt}} = 161.84\ mm \qquad y_c := \frac{A_{fs} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{wc} \cdot \left(\frac{y_p - t_f}{2} + t_f\right)}{A_{fs} + A_{wc}} = 16.41\ mm$$

$$M_{Rd} := C_{ad} \cdot \left(d - y_t - y_c\right) + C_{cd} \cdot \left(\frac{t_c}{2} + h_F + d - y_t\right) = 1078.88\ kN \cdot m$$

$$q_d := \frac{8 \cdot M_{Rd}}{{L_e}^2} = 35204.69\ \frac{kgf}{m} \qquad \frac{q_d}{b} = 28163.75\ \frac{kgf}{m^2}$$

VIGA MISTA COM INTERAÇÃO COMPLETA DE ACORDO COM A ANSI/AISC 360-16
VÃO DE 5 m - LNP NA LAJE

Aço:

$f_y := 250\ MPa = 36.26\ ksi$

$E := 200000\ MPa = 29007.55\ ksi$

Espaçamento entre vigas:

$L_{ab} := 3\ m$

Perfil W 360x32,9 - Equivalente W14x22

Concreto:

$f_{ck} := 25\ MPa = 3.63\ ksi$

Laje:

$h_F := 75\ mm$

$t_c := 65\ mm$

$h_F + t_c = 5.51\ in$

Dados do perfil:

$A_a := 42.1\ cm^2 = 6.53\ in^2$

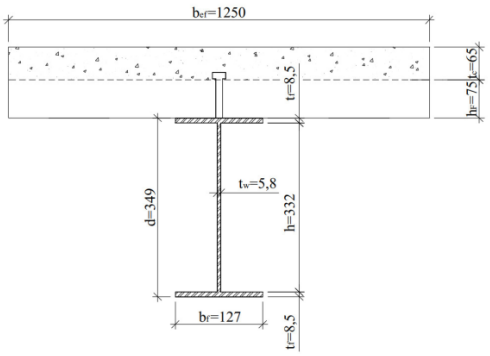
$d := 349\ mm = 13.74\ in$

$t_w := 5.8\ mm = 0.23\ in$

$t_f := 8.5\ mm = 0.33\ in$

$b_f := 127\ mm = 5\ in$

$h := d - 2 \cdot t_f = 332\ mm$



Vão da viga:

$L_e := 5\ m = 16.4\ ft$

- Classificação da seção

$viga.compacta := \text{if}\left(\frac{h}{t_w} \le 3.6 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}\ ,\ \text{"Viga mista compacta, pode ser utilizada as propriedades plásticas da seção mista"}\ ,\ \text{"Viga mista não compacta, não pode ser utilizada as propriedades plásticas da seção mista"}\right)$

$viga.compacta =$ "Viga mista compacta, pode ser utilizada as propriedades plásticas da seção mista"

- Largura efetiva da laje

$b := min\left(\frac{1}{4} \cdot L_e\ ,\ L_{ab}\right) = 1250\ mm \qquad b = 4.1\ ft$

- Momento resistente

$\gamma_c := 1.0$

$\gamma_a := 1.0$

$f_{cd} := \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 25\ MPa$

$f_{yd} := \frac{f_y}{\gamma_a} = 250\ MPa$

$C_{cd} := 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot t_c = 1726.56\ kN$

$T_{ad} := A_a \cdot f_{yd} = 1052.5\ kN$

$LNP.check := \text{if}\left(C_{cd} \ge T_{ad}\ ,\ \text{"A linha neutra plástica se encontra na laje de concreto"}\ ,\ \text{"A linha neutra plástica se encontra no perfil de aço"}\right)$

$LNP.check =$ "A linha neutra plástica se encontra na laje de concreto"

$a := \frac{T_{ad}}{0.85 \cdot f_{cd} \cdot b} = 39.62\ mm$

$M_n := T_{ad} \cdot \left(\frac{d}{2} + h_F + t_c - \frac{a}{2}\right) = 310.16\ kN \cdot m$

$\phi_b := 0.90$

$\phi_b \cdot M_n = 279.14\ kN \cdot m$

$\phi_b \cdot M_n = 205.89\ kip \cdot ft$

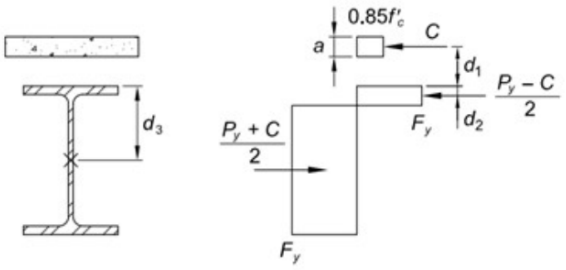
$q_d := \frac{8 \cdot (\phi_b \cdot M_n)}{{L_e}^2} = 9108.71\ \frac{kgf}{m}$

$\frac{q_d}{b} = 7286.97\ \frac{kgf}{m^2}$

Ou então,

$C := T_{ad} \qquad P_y := T_{ad}$

$d_1 := h_F + t_c - \frac{a}{2} \qquad d_2 := 0 \qquad d_3 := \frac{d}{2}$



$M_n := C \cdot (d_1 + d_2) + P_y \cdot (d_3 - d_2) = 228.76 \ kip \cdot ft$

$M_n = 310.16 \ kN \cdot m$

$\phi_b \cdot M_n = 279.14 \ kN \cdot m$ $\qquad$ $\phi_b \cdot M_n = 205.89 \ kip \cdot ft$

Composite Steel Beam PRINT FINISHED

General | Span & Section Data | Span Loads | Load Combinations

Description

Perfil W 360 x 32,9 com uma vão de 5 metros

Analysis Method

ASD

LRFD

Design Values

Fy : Steel Yield 36.260 ksi

E: Modulus 29,007.6 ksi

Max. Allow Deflection Ratios

Pre Composite: 180.0

Transient: 360.0

FINAL: 180.0

Composite Data

Total Slab Thickness 5.510 in

Effective Width ? 4.10 ft

Shored | Unshored

Stud Diameter 3/4" in

Qn : Stud Capacity 11.0 k

Concrete f'c 3.630 ksi

Concrete Density 159.150 pcf

Concrete "E" based on density

Slab on Metal Deck

Rib Measurements . .

Height 2.950 in

Spacing (aka pitch) 10.980 in

Opening Width @ Top 6.690 in

Opening Width @ Btm 4.290 in

Direction . Perpendicular | Parallel | Mixed: Parll & Perp Each Side

AISC 360 I3.2 requires: Min. Stud Ht= 4.45in, Max Stud Ht =

Composite Action Percentage

Full | Calc Min Studs | % Composite

Done, Time : 0.030sec

Calculations | 2D | Diagram | 3D

Summary Results | Max. Combinations | Studs | M-V Summa

✔ **MAX Bending Stress Ratio** = 0.490 : 1

Steel Section W14x22

Composite

% Composite 100 %

Mu : Applied 100.855 k-ft

Mn * Phi : Allow 205.999 k-ft

Location of maximum 8.255 ft

Load Comb

VIGA MISTA COM INTERAÇÃO COMPLETA DE ACORDO COM A ANSI/AISC 360-16
VÃO DE 5 m - LNP NA LAJE

Aço:

$f_y := 250\ MPa = 36.26\ ksi$

$E := 200000\ MPa = 29007.55\ ksi$

Espaçamento entre vigas:

$L_{ab} := 3\ m$

Perfil W 460x52 - Equivalente W 18x35

Concreto:

$f_{ck} := 25\ MPa = 3.63\ ksi$

Laje:

$h_F := 75\ mm = 2.95\ in$

$t_c := 65\ mm = 2.56\ in$

$h_F + t_c = 5.51\ in$

Vão da viga:

$L_e := 5\ m = 16.4\ ft$

Dados do perfil:

$A_a := 66.6\ cm^2 = 10.32\ in^2$

$d := 450\ mm = 17.72\ in$

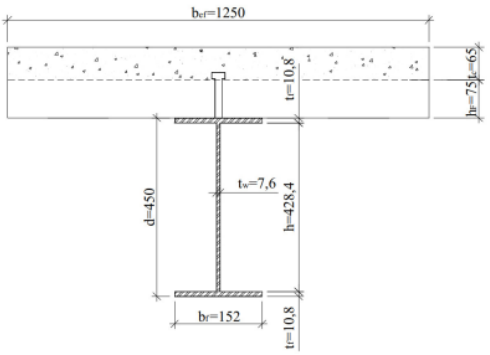
$t_w := 7.6\ mm = 0.3\ in$

$t_f := 10.8\ mm = 0.43\ in$

$b_f := 152\ mm = 5.98\ in$

$h := d - 2 \cdot t_f = 428.4\ mm$

$h = 16.87\ in$



- Classificação da seção

$viga.compacta := \text{if}\left(\frac{h}{t_w} \le 3.6 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}\ ,\ \text{"Viga mista compacta, pode ser utilizada as propriedades plásticas da seção mista"}\ ,\ \text{"Viga mista não compacta, não pode ser utilizada as propriedades plásticas da seção mista"}\right)$

$viga.compacta =$ "Viga mista compacta, pode ser utilizada as propriedades plásticas da seção mista"

- Largura efetiva da laje

$b := min\left(\frac{1}{4} \cdot L_e, L_{ab}\right) = 1250\ mm \qquad b = 4.1\ ft$

- Momento resistente

$\gamma_c := 1.0$ $\qquad$ $\gamma_a := 1.0$

$f_{cd} := \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 25\ MPa$ $\qquad$ $f_{yd} := \frac{f_y}{\gamma_a} = 250\ MPa$

$C_{cd} := 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot t_c = 1726.56\ kN$ $\qquad$ $T_{ad} := A_a \cdot f_{yd} = 1665\ kN$

$LNP.check := \text{if}\left(C_{cd} \ge T_{ad}\ ,\ \text{"A linha neutra plástica se encontra na laje de concreto"}\ ,\ \text{"A linha neutra plástica se encontra no perfil de aço"}\right)$

$LNP.check =$ "A linha neutra plástica se encontra na laje de concreto"

$a := \frac{T_{ad}}{0.85 \cdot f_{cd} \cdot b} = 62.68\ mm$ $\qquad$ $M_n := T_{ad} \cdot \left(\frac{d}{2} + h_F + t_c - \frac{a}{2}\right) = 555.54\ kN \cdot m$

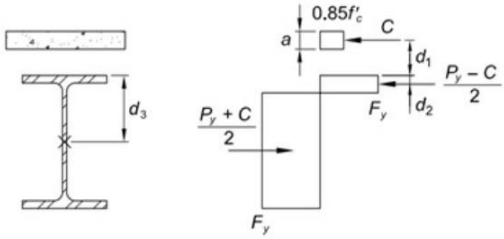
$\phi_b := 0.90$ $\qquad$ $\phi_b \cdot M_n = 499.99\ kN \cdot m$ $\qquad$ $\phi_b \cdot M_n = 368.77\ kip \cdot ft$

$q_d := \frac{8 \cdot (\phi_b \cdot M_n)}{L_e^{\ 2}} = 16315.06\ \frac{kgf}{m}$ $\qquad$ $\frac{q_d}{b} = 13052.05\ \frac{kgf}{m^2}$

Ou então,

$C := T_{ad} \qquad P_y := T_{ad}$

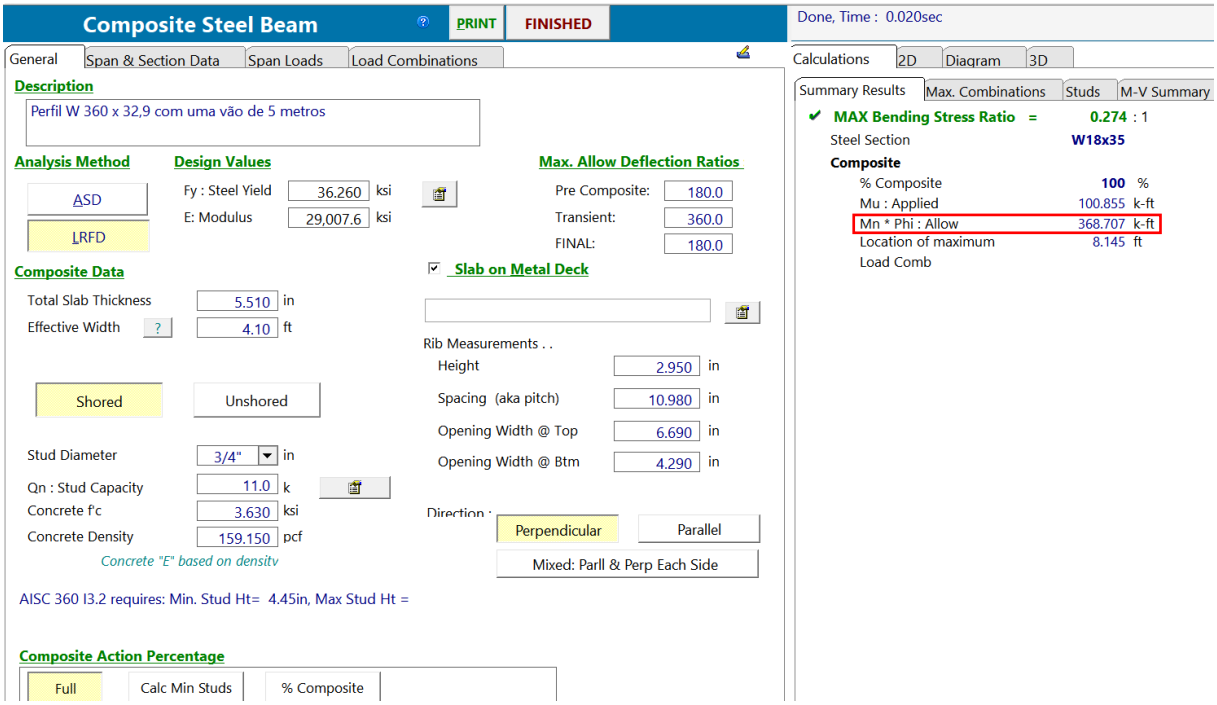
$d_1 := h_F + t_c - \frac{a}{2} \qquad d_2 := 0 \qquad d_3 := \frac{d}{2}$



$M_n := C \cdot (d_1 + d_2) + P_y \cdot (d_3 - d_2) = 555.54 \ kN \cdot m$

$M_n = 409.75 \ kip \cdot ft$

$\phi_b \cdot M_n = 499.99 \ kN \cdot m$ $\qquad$ $\phi_b \cdot M_n = 368.77 \ kip \cdot ft$



VIGA MISTA COM INTERAÇÃO COMPLETA DE ACORDO COM A ANSI/AISC 360-16
VÃO DE 5 m - LNP NA MESA DE AÇO

Aço:

$f_y := 250\ MPa = 36.26\ ksi$

$E := 200000\ MPa = 29007.55\ ksi$

Espaçamento entre vigas:

$L_{ab} := 3\ m$

Perfil W 610x101 - Equivalente W 24x68

Concreto:

$f_{ck} := 25\ MPa = 3.63\ ksi$

Laje:

$h_F := 75\ mm$

$t_c := 65\ mm$

$h_F + t_c = 5.51\ in$

Dados do perfil:

$A_a := 130.3\ cm^2 = 20.2\ in^2$

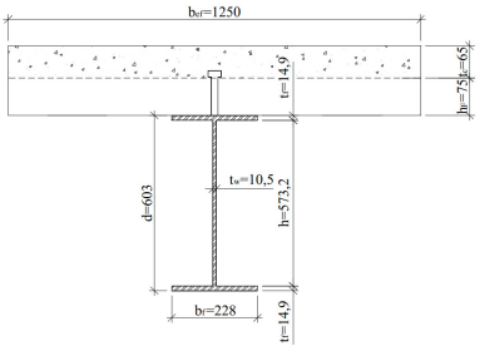
$d := 603\ mm = 23.74\ in$

$t_w := 10.5\ mm = 0.41\ in$

$t_f := 14.9\ mm = 0.59\ in$

$b_f := 228\ mm = 8.98\ in$

$h := d - 2 \cdot t_f = 573.2\ mm$



Vão da viga:

$L_e := 5\ m = 16.4\ ft$

- Classificação da seção

$viga.compacta := \text{if}\left(\frac{h}{t_w} \le 3.6 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}\ ,\ \text{"Viga mista compacta, pode ser utilizada as propriedades plásticas da seção mista"}\ ,\ \text{"Viga mista não compacta, não pode ser utilizada as propriedades plásticas da seção mista"}\right)$

$viga.compacta =$ "Viga mista compacta, pode ser utilizada as propriedades plásticas da seção mista"

- Largura efetiva da laje

$$b := min\left(\frac{1}{4} \cdot L_e\ ,\ L_{ab}\right) = 1250\ mm \qquad b = 4.1\ ft$$

- Momento resistente

$\gamma_c := 1.0$

$$f_{cd} := \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 25\ MPa$$

$C_{cd} := 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot t_c = 1726.56\ kN$

$\gamma_a := 1.0$

$$f_{yd} := \frac{f_y}{\gamma_a} = 250\ MPa$$

$T_{ad} := A_a \cdot f_{yd} = 3257.5\ kN$

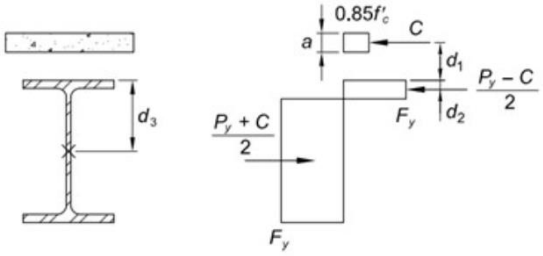
$LNP.check := \text{if}\ (C_{cd} \ge T_{ad}\ ,\ \text{"A linha neutra plástica se encontra na laje de concreto"}\ ,\ \text{"A linha neutra plástica se encontra no perfil de aço"})$

$LNP.check =$ "A linha neutra plástica se encontra no perfil de aço"

$LNP.check := \text{if}\ (C_{cd} \ge T_{ad} - 2 \cdot b_f \cdot t_f \cdot f_{yd}\ ,\ \text{"A linha neutra plástica está na mesa superior do perfil de aço"}\ ,\ \text{"A linha neutra plástica está na alma do perfil de aço"})$

$LNP.check =$ "A linha neutra plástica está na mesa superior do perfil de aço"

Portanto,



$C := C_{cd} \qquad P_y := T_{ad} \qquad \phi_b := 0.90$

$C_{ad} := \frac{P_y - C}{2} = 765.47\ kN$

$T_{ad} := \frac{P_y + C}{2} = 2492.03\ kN$

$A_{fs} := b_f \cdot t_f \qquad y_p := \frac{C_{ad}}{A_{fs} \cdot f_{yd}} \cdot t_f = 13.43\ mm \qquad d_1 := t_c + h_F - \frac{t_c}{2} \qquad d_2 := \frac{y_p}{2} \qquad d_3 := \frac{d}{2}$

$M_n := C \cdot (d_1 + d_2) + P_y \cdot (d_3 - d_2) = 1157.46\ kN \cdot m \qquad M_n = 853.7\ kip \cdot ft$

$\phi_b \cdot M_n = 1041.72\ kN \cdot m \qquad \phi_b \cdot M_n = 768.33\ kip \cdot ft$

Ou então,

$C_{cd} := 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot t_c = 1726.56\ kN \qquad T_{ad} := A_a \cdot f_{yd} = 3257.5\ kN$

$M_n := T_{ad} \cdot \frac{d}{2} + C_{cd} \cdot \frac{t_c + 2\ h_F}{2} - \frac{(T_{ad} - C_{cd})^2}{A_{fs} \cdot f_{yd}} \cdot \frac{t_f}{4} = 1157.46\ kN \cdot m$

$M_n = 853.7\ kip \cdot ft$

$\phi_b \cdot M_n = 1041.72\ kN \cdot m \qquad \phi_b \cdot M_n = 768.33\ kip \cdot ft$

Ou ainda,

$C_{ad} := \frac{1}{2} \cdot (A_a \cdot f_{yd} - C_{cd}) = 765.47\ kN \qquad T_{ad} := C_{cd} + C_{ad} = 2492.03\ kN$

$A_{fs} := b_f \cdot t_f = 33.97\ cm^2 \qquad A_{fs} \cdot f_{yd} = 849.3\ kN$

$LNP.check := \text{if}\ (C_{ad} \le A_{fs} \cdot f_{yd}\ ,\ \text{“A linha neutra plástica está na mesa superior do perfil de aço”}\ ,\ \text{“A linha neutra plástica está na alma do perfil de aço”})$

$LNP.check =$ “A linha neutra plástica está na mesa superior do perfil de aço”

$t_{fs} := t_f \qquad h_w := h \qquad A_w := h_w \cdot t_w = 60.19\ cm^2$

$y_p := \frac{C_{ad}}{A_{fs} \cdot f_{yd}} \cdot t_{fs} = 13.43\ mm$

$A_w = 60.19\ cm^2$ $A_{fi} := A_{fs} = 33.97\ cm^2$ $A_{fs.t} := b_f \cdot (t_f - y_p) = 3.35\ cm^2$

$$y_t := \frac{A_{fi} \cdot \frac{t_f}{2} + A_w \cdot \frac{d}{2} + A_{fs.t} \cdot \left(t_f + h + \frac{t_f - y_p}{2}\right)}{A_{fi} + A_w + A_{fs.t}} = 208.94\ mm \qquad y_c := \frac{y_p}{2} = 6.71\ mm$$

$$M_n := C_{ad} \cdot (d - y_t - y_c) + C_{cd} \cdot \left(\frac{t_c}{2} + h_F + d - y_t\right) = 1162.48\ kN \cdot m$$

$M_n = 857.4\ kip \cdot ft$

$\phi_b \cdot M_n = 1046.24\ kN \cdot m$ $\phi_b \cdot M_n = 771.66\ kip \cdot ft$

$$q_d := \frac{8 \cdot (\phi_b \cdot M_n)}{L_e^{\,2}} = 34139.62\ \frac{kgf}{m} \qquad \frac{q_d}{b} = 27311.69\ \frac{kgf}{m^2}$$