



**FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

RAISSA BARBOSA TAVARES

**ANÁLISE COMPARATIVA DE VIGAS METÁLICAS
SUBMETIDAS À FLEXÃO E CISALHAMENTO**

PUBLICAÇÃO Nº: 13

**GOIANÉSIA / GO
2021**



RAISSA BARBOSA TAVARES

**ANÁLISE COMPARATIVA DE VIGAS METÁLICAS
SUBMETIDAS À FLEXÃO E CISALHAMENTO**

PUBLICAÇÃO Nº: 13

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA FACEG.**

ORIENTADOR: Me. IGOR CEZAR SILVA BRAGA

GOIANÉSIA / GO: 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

TAVARES, RAISSA BARBOSA

Análise comparativas de vigas metálicas submetidas à flexão e cisalhamento 2021 xi, 70P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2021).

TCC – FACEG – FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA

Curso de Engenharia Civil.

1. Aço	2. verificação
3. estrutura	4. condição
I. ENC/UNI	II. Análise comparativas de vigas metálicas submetidas à flexão e cisalhamento.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

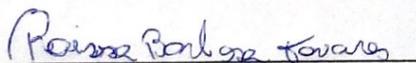
TAVARES, R. B. Análise comparativa de vigas metálicas submetidas à flexão e cisalhamento, Curso de Engenharia Civil, Unievangélica, Goianésia, GO, 70p. 2021.

CESSÃO DE DIREITOS

Raissa Barbosa Tavares

Análise comparativa de vigas metálicas submetidas à flexão e cisalhamento
GRAU: Bacharel em Engenharia Civil ANO: 2021

É concedida à Unievangélica a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



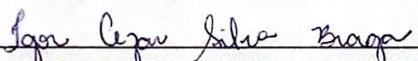
Raissa Barbosa Tavares
Rua 01/Lt 01/ Qd 36 Pq. Das Palmeiras I
76.386-060 - Goianésia/GO – Brasil.

RAISSA BARBOSA TAVARES

**ANÁLISE COMPARATIVA DE VIGAS METÁLICAS
SUBMETIDAS À FLEXÃO E CISALHAMENTO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA FACEG COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL.**

APROVADO POR:



IGOR CEZAR SILVA BRAGA, mestre (FACEG)
(ORIENTADOR)



EDUARDO MARTINS TOLEDO, mestre (FACEG)
(EXAMINADOR INTERNO)



ROBSON DE OLIVEIRA FELIX, mestre (FACEG)
(EXAMINADOR INTERNO)

DATA: GOIANÉSIA/GO, 13 de DEZEMBRO de 2021.

*Dedico este trabalho:
aos meus pais, Rosânia e Odesvaldo;
à minha irmã Renata;*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre me dar discernimento e paciência para prosseguir na caminhada de meus estudos. Agradeço aos meus pais Rosânia e Odesvaldo por sempre me apoiarem, em especial minha mãe, que sempre me aconselhou, orientou para que eu desse o melhor de mim e não desistisse com as dificuldades que eu encontraria nessa jornada.

Agradeço aos meus amigos da faculdade, em especial Thaise e Dyovana que me apoiaram, e que durante esses cinco anos compartilharam conhecimento e companheirismo para atingirmos o grande objetivo final, a graduação em engenharia civil.

Agradeço aos meus amigos de vida que sempre me apoiaram nos momentos de dificuldades, sejam eles pessoais ou acadêmicos, mas em especial agradeço ao Alessandro Souza pelo ombro amigo, pelo cuidado e por sempre acreditar na minha capacidade, por último e não menos importante agradeço à minha querida melhor amiga Eduarda Stefany, onde construímos 12 anos de amizade e nesse período me ajudou a dar o primeiro passo, escolhendo a minha carreira profissional e posteriormente mesmo distante apoiou e abraçou junto a mim todos os meus sonhos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Me. Igor César Silva Braga, por toda paciência por me despertar vontade em obter cada vez mais o conhecimento em estruturas metálicas, agradeço todo o conhecimento partilhado e por acreditar que eu seria capaz.

Agradeço ao Prof. Me. Robson de Oliveira por todo apoio, todo conhecimento partilhado, por toda a disposição e incentivo acadêmico, agradeço por ter sido referência como professor e pessoa dentro da minha graduação.

Agradeço ao Prof. Eduardo Toledo pelo empenho na matéria de TCC, pelas orientações e pelo apoio que sempre ofereceu a mim e a todos os meus colegas.

Por fim, agradeço a todos da coordenação de curso de Engenharia Civil, ao diretor da Universidade Evangélica de Goianésia José Mateus por todo apoio e prontidão que teve comigo.

*“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime,
Pois, o senhor, o seu Deus, estará com você por onde andar”*
Josué 1:9

RESUMO

O aço é um material muito utilizado dentro da construção civil, devido a sua capacidade de resistir à aplicação de cargas elevadas e também de se misturar com outros elementos, um exemplo é a adição de cobre para retardar o processo de corrosão, afim de melhorar suas características, tornando-o ainda mais indicado nos processos construtivos. O crescimento de seu uso é notório e isso acaba acarretando muitas vezes a escassez de matéria prima e consequentemente dificuldade para encontrá-lo no mercado. As vigas metálicas são elementos do sistema estrutural. Então calcular e analisar o seu comportamento diante das forças aplicadas é de suma importância para um dimensionamento correto, resultando em especificações do aço dentro dos esforços solicitantes da estrutura construtiva. Outro fator indispensável é a análise dos diagramas, afim de identificar pontos críticos e observar o comportamento estrutural da viga. Após analisar todos esses pontos descritos acima, é possível identificar cada ponto crítico da seção e se as condições de verificação foram obedecidas. Afim de oferecer uma melhor compreensão das análises que serão apresentadas, as condições de contorno, ou seja, uma viga biapoiada e outra engastada foram classificadas com o codinome de condição 1 e condição 2 respectivamente, para as condições de carregamento pré-estabelecidas com um carregamento distribuído e outro carregamento distribuído com 3 cargas pontuais foram descritas com o codinome de situação A e situação B respectivamente. Então para a condição 1 e 2 e situação A e B foram encontradas condições de não verificação, como descrito nos resultados desta análise comparativa, assim sendo há a necessidade de reforço da estrutura, no caso das vigas foi o reforço na mesa ou na alma através de enrijecedores. Os dados mais satisfatórios foram encontrados para viga VS, na qual, obteve-se 32% para esforço cortante e 54,5% para momento fletor, valores esses maiores que os solicitantes. Tem-se como finalidade dessa análise comparativa conhecer o material aço, entender sobre vantagens e desvantagens, adaptar os esforços solicitantes e resistentes de acordo com a norma para garantir a utilização da viga de forma segura, dando opções para solução de possíveis não conformidades e por fim analisando cada condição de contorno e carregamento obtendo dados suficientes para indicar a melhor opção para as situações pré-estabelecidas.

Palavras chave: Aço; estrutura; condição; verificação.

ABSTRACT

Steel is a material widely used in civil construction, due to its ability to resist the application of high loads and also to mix with other elements, an example is the addition of copper to slow down the corrosion process, in order to improve its characteristics, making it even more suitable in construction processes. The growth in its use is notorious and this often ends up causing a shortage of raw material and, therefore, difficulty in finding it in the market. Steel beams are elements of the structural system. Therefore, calculating and analyzing its behavior in face of the applied forces is of paramount importance for a correct dimensioning, resulting in steel specifications within the loads required by the constructive structure. Another indispensable factor is the analysis of the diagrams, in order to identify critical points and observe the structural behavior of the beam. After analyzing all these points described above, it is possible to identify each critical point in the section and whether the verification conditions were met. In order to provide a better understanding of the one that will be presented, the boundary conditions, that is, a simply supported beam and another embedded beam, were classified with the codename of condition 1 and condition 2 respectively, for the pre-established loading conditions with a distributed load and another distributed load with 3 point loads were described with the codename of situation A and situation B respectively. So for condition 1 and 2 and situation A and B, non-verification conditions were found, as described in the results of this comparative analysis, so there is a need to reinforce the structure, in the case of beams it was the reinforcement in the table or in the web through of stiffeners. The most someones data were found for the VS beam, in which 32% were obtained for shear effort and 54.5% for bending moment, values that were higher than the applicants. The purpose of this comparative analysis is to know the steel material, understand the advantages and disadvantages, adapt the requesting and resistant efforts according to the standard to ensure the use of the beam in a safe way, giving options for solving possible non-conformities and by end analyzing each boundary condition and loading enough data to indicate the best option for the pre-established situations.

Key words: Steel; structure; condition; verification

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Curva Tensão Deformação.	7
Figura 2.2 - Função de Solicitação Predominante da Viga.	7
Figura 2.3 - Vigas em Perfil Metálico.	8
Figura 2.4 - Perfis Metálicos.	8
Figura 2.5 - Comportamento simples da viga sobre as aplicações de carga.	9
Figura 2.6 - Diagramas de Esforços Normais e Cortantes.	9
Figura 2.7 - Comportamento Elástico em Vigas de Aço.	10
Figura 2.8 - Apoio Simples ou Primeiro Gênero.	15
Figura 2.9 - Apoio do Segundo Gênero ou Articulação.	16
Figura 2.10 - Engaste ou Apoio de terceiro Gênero.	16
Figura 2.11 - Carregamento Distribuído sobre a viga.	16
Figura 2.12 - Carregamento distribuído e pontual sobre a viga.	17
Figura 3.17 – Perfil I.	19
Figura 3.18 - Perfil W.	20
Figura 3.19 - Perfil VS.	20
Figura 3.1 - Viga biapoiada.	21
Figura 3.2 - Viga engastada.	21
Figura 3.3 - Carregamento distribuído.	21
Figura 3.4 - Carregamento distribuído e pontual.	22
Figura 4.1 - Chapa de reforço sobreposta a mesa da viga.	26
Figura 3.5 - Viga biapoiada com carregamento distribuído.	34
Figura 3.6 - Diagrama de esforço cortante para Condição 1 e Situação A.	34
Figura 3.7 - Diagrama de momento fletor para Condição 1 e Situação A.	34
Figura 3.8 - Viga engastada com carregamento distribuído.	35
Figura 3.9 - Diagrama de esforço cortante para Condição 2 e Situação A.	35
Figura 3.10 - Diagrama de momento fletor para Condição 2 e Situação.	36
Figura 3.11 - Viga biapoiada com carregamento distribuído e carga pontual.	36
Figura 3.12 - Diagrama de esforço cortante para Condição 1 e Situação B.	37
Figura 3.13 - Diagrama de momento fletor para Condição 1 e Situação B.	37
Figura 3.14 - Viga engastada com carregamento distribuído e carga pontual.	37
Figura 3.15 - Diagrama de esforço cortante para Condição 2 e Situação B.	38
Figura 3.16 - Diagrama de momento fletor para Condição 2 e Situação B.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Materiais Estruturais, Dados Comparativos.....	6
Tabela 3.1 - Propriedades do aço carbono e microligados para uso estrutura e geral	18
Tabela 3.2 - Propriedades do perfil I.	19
Tabela 3.3 - Propriedades do perfil W.....	20
Tabela 3.4 - Propriedades do perfil VS.	21
Tabela 4.1 - Análise esforço cortante para Condição 1 e Situação A.....	23
Tabela 4.2 - Análise de momento fletor para Condição 1 e Situação A.....	23
Tabela 4.3 - Análise de esforço cortante para Condição 1 e Situação B	24
Tabela 4.4 - Análise de momento fletor para Condição 1 e Situação B.....	24
Tabela 4.5 - Análise esforço cortante para Condição 2 e Situação A.....	24
Tabela 4.6 - Análise de momento fletor para Condição 2 e Situação A.....	25
Tabela 4.7 - Análise de esforço cortante para Condição 2 e Situação B.....	25
Tabela 4.8 - Análise de momento fletor para Condição 2 e Situação B.....	25

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1- Constantes físicas do aço.5

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

FACEG – Faculdade Evangélica de Goianésia;

NBR – Norma Brasileira;

ELU – Estado Limite Último;

ELS - Estado Limite de Serviço;

LISTA DE SÍMBOLOS

a – Distância

b – largura

b_t – Largura da mesa

f_{ck} – Resistência característica do concreto a compressão.

f_u – Resistência a ruptura do aço a tração.

f_y – Resistência ao escoamento do aço.

f_w – Resistência a tração do metal da solda.

t_f – Espessura da mesa.

t_w – Espessura da alma.

ϵ - Deformação;

l_i - Comprimento final;

l_0 - Comprimento inicial;

Δl - Variação de comprimento.

$F_{Gi,k}$ - Representa valores característicos das ações permanentes;

$F_{Qi,k}$ - Representa valores característicos das ações variáveis;

$F_{Qj,k}$ - Representa valores característicos variáveis que podem atuar simultaneamente com as permanentes.

$F_{Qi,k}$ - Representa valor característico da ação variável especial.

$\psi_{0j,ef}$ - Diz respeito a valores que representam fatores de combinações efetivas de cada ação variável.

M_{Sd} - Momento fletor solicitante de cálculo;

V_{Sd} - Força solicitante cortante de cálculo;

M_{Rd} - Momento fletor resistente de cálculo;

V_{Rd} - Força resistente cortante de cálculo.

λ - Índice de esbeltez;

λ_p - Parâmetro de esbeltez para seção compactas.

λ_r - Parâmetro de esbeltez para seções semicompactas;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	2
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 Objetivo Geral	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA	4
2.1 AÇO.....	4
2.1.1 Vantagens e desvantagens das estruturas em aço	4
2.1.2 Propriedades do Aço	5
2.1.3 Denominação e classificação dos aços	5
2.2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	6
2.3 CURVA TENSÃO DEFORMAÇÃO E CISALHAMENTO.....	6
2.4 ELEMENTOS ESTRUTURAIS	7
2.4.1 Vigas	8
2.5 ESFORÇOS DE FLEXÃO E CISALHAMENTO EM VIGAS.....	9
2.6 SEGURANÇA E ESTADOS LIMITES.....	10
2.7 COMBINAÇÕES DE AÇÕES.....	11
2.8 CONDIÇÕES PARA DIMENSIONAMENTO	12
2.9 CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTO	15
3 MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1 PARÂMETROS DE ADOTADOS	18
3.1.1 Aço	18
3.1.2 Carregamentos	19
3.1.3 Perfil I	19
3.1.4 Perfil W	20
3.1.5 Perfil VS	20
3.2 SISTEMA ESTRUTURAL	21
3.3 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
5 CONCLUSÕES	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	28
APÊNDICE A	30

APÊNDICE B.....	39
ANEXOS	47

1 INTRODUÇÃO

A liga ferro-carbono é denominada aço, com variação do teor de carbono de 0,008% até 2,11% (CHIAVERINI, 1996). A resistência do aço é acrescida pelo carbono, mas em contrapartida o torna mais frágil quando submetido à compressão. O aço com pouco carbono tem menor resistência à tração, mas como vantagem são mais dúcteis. As resistências de ruptura por tração ou compressão dos aços estruturais são iguais, tendo como variação amplos limites, desde 300 MPa até valores maiores que 1200 MPa (PFEIL, 2009).

Então as principais propriedades requeridas para ações estruturais são: boa ductilidade, homogeneidade e soldabilidade, além de elevada relação entre a tensão resistente e a de escoamento. A resistência à corrosão é também importante, sendo obtida apenas com o acréscimo de cobre. A alta resistência de alguns aços estruturais é obtida por processos de conformação ou tratamentos térmicos (PFEIL, 2009).

Outro fator importante são as vantagens do aço, tendo como: alta resistência do material no estado de tração, compressão e flexão, o que permite as estruturas suportarem cargas de alta magnitude. As estruturas em aço, apesar de mais densas são ainda mais leves que as estruturas de concreto armado (BELLEI, 1998).

Desse modo, a análise ELU (Estado limite último) e ELS (Estado limite de serviço) em vigas de perfis metálicos, levando em consideração os esforços de flexão e cisalhamento é de suma importância, para demonstrar a viabilidade de uso e orientar melhores formas e medidas para a sua utilização NBR 8800 (ABNT, 2008).

Partindo para a análise de valores existem alguns fatores que influenciam diretamente no custo das estruturas, tais como: seção do sistema estrutural, projetos dos elementos individuais, conexões, especificações de construção, sistema de proteção a corrosão e fogo dentre outras (BELLEI, 1998).

Assim sendo, para fins de projeto e execução de obras com vigas de perfis metálicos tenha a sua melhor desenvoltura, é necessário entender e dimensionar os perfis mais indicados para determinada estrutura, analisando o seu comportamento e levando em consideração a relação custo benefício para obra. Assim, deve-se basear as análises comparativas dos esforços solicitantes na NBR 8800 (ABNT, 2008).

Através dos dados que foram calculados e relatados nesse estudo, foi possível obter uma melhor análise comparativa de tais esforços solicitantes, demonstrando os pontos críticos, comportamento das estruturas, diferenças entre as aplicações de cargas e comparativo entre as vigas de perfis metálicos, submetidas à flexão e ao cisalhamento.

1.1 JUSTIFICATIVA

A análise de vigas metálicas submetidas à esforços que causem flexão e cisalhamento na estrutura, possibilita obter dados para fundamentar a comparação com outros sistemas construtivos, como o uso da madeira e do concreto armado. Com isso, pode-se definir da melhor forma, medidas e especificações do aço, levando em consideração os dados obtidos nos esforços citados acima com diferentes tipos de contorno e carregamento, gerando economia, agilidade e resistência das vigas em determinadas construções.

Outra característica importante do aço é a sua durabilidade em grandes estruturas, além de que esse sistema construtivo é considerado inovador sendo versátil, adaptável e reciclável. Então projetar em aço leva a um maior controle de custos e agilidade operacional da obra. (CASTRO,2014).

Assim, justifica-se esse processo analítico comparativo como uma ferramenta demonstrativa e detalhista de dimensionamento de vigas em perfis metálicos, com diferentes tipos de carga e condições de contorno, afim de relacionar a verificação do cisalhamento e flexão em vigas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo analisar, através de um estudo comparativo e analítico, o desempenho de vigas metálicas submetidas a flexão e cisalhamento, utilizando diferentes tipos de carregamento e condições de contorno.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Conhecer as propriedades de aço através de pesquisas bibliográficas, analisando o estudo comportamental de vigas desse material, sendo submetidas a flexão e cisalhamento;
- Realizar dimensionamento de vigas metálicas com diferentes características e condições de carregamento e condições de contorno;
- Comparar os resultados obtidos, com os diferentes tipos de carregamento e condições de contorno;
- Concluir, com base nas comparações feitas, o comportamento de cada perfil e soluções para seu uso.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esse projeto tem como divisão organizacional 5 capítulos, onde o primeiro se trata da introdução, falando do aço e o que será abordado posteriormente, justificando a funcionalidade desde, descrevendo também os objetivos a serem alcançados.

O segundo capítulo trata-se de uma revisão bibliográfica, que descreve com referencial de vários autores, sobre o aço, vantagens e desvantagens de seu uso, propriedades e classificação, introduz sobre os elementos estruturais, vigas e seus esforços, combinações de ações, condições para dimensionamento e as condições de contorno e carregamento adotados.

O capítulo 3 descreve o material e métodos. O aço adotado, carregamentos e perfis utilizados nessa análise.

O capítulo 4 refere-se às discussões sobre os cálculos realizados, estabelecendo uma verificação normativa, afim de solucionar os problemas encontrados.

O capítulo 5 que se trata da conclusão deste, finalizando seus objetivos e resultados, estabelecendo um comparativo de toda a análise proposta.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 AÇO

A utilização de aço se data por volta de 1750, sendo seu primeiro emprego industrial na França em 1757. No Brasil, a fabricação do aço teve início em 1812, para ajudar da difusão de seu uso a companhia siderúrgica brasileira, em 1953 criou a FEM (Fábrica de Estruturas Metálicas), que por sua vez gerou mão de obra qualificada para a produção do ciclo completo do aço (BELLEI, 1998).

Na construção civil, as formas mais utilizadas de metais ferrosos são: o aço, ferro fundido e ferro forjado. O aço, sendo o mais importante dentre eles, é uma liga de ferro carbono tendo outros elementos residuais advindos do processo de fabricação, tais como: silício, manganês, fósforo e enxofre, e também existem os que são adicionados para melhorar suas características físicas e mecânicas sendo denominados elementos de liga (PFEIL, 2009).

O aço como elemento estrutural tem várias aplicações, como em treliças, pilares e vigas, esses elementos são submetidos aos esforços de tração, compressão e cisalhamento, tendo a compressão como a sua pior desenvoltura na estrutura, tendo como consequência a instabilidade (FAKURY, SILVA e CALDAS, 2016).

2.1.1 Vantagens e desvantagens das estruturas em aço

Estruturas em aço possuem maior índice de resistência, que se baseiam na relação da resistência e o peso específico, por isso esse material proporciona o uso de seções menores, comparando com outros métodos construtivos, como vigas de concreto armado. Sendo assim esse material se torna bastante indicado para vencer grandes vãos e onde solos são pouco favoráveis para fundação (FAKURY, *et. al.* 2016).

O aço com sua alta resistência em diversos estados de tensões (tração, compressão, flexão e cisalhamento), permite o suporte de grandes cargas nos elementos estruturais, apesar de pequena área de seção (BELLEI, 1998).

Esse material construtivo tem ótimos resultados quando submetidos aos esforços de tração e compressão, mas em análise do comportamento quando aplicado a compressão, o aço demonstra problemas de instabilidade (FAKURY, *et. al.* 2016).

Afim de se obter a sua melhor performance, o aço deve ter algumas características fundamentais, tais como: ductilidade, homogeneidade e soldabilidade. A resistência à corrosão é obtida através de adição de cobre a liga metálica (PFEIL, 2009).

Fatores como: ductilidade, alto grau de confiança, organização no canteiro de obras, facilidade no possível reforço e ampliação da estrutura, reciclagem, reaproveitamento e rapidez

na execução do sistema estrutural, influenciam diretamente para a escolha do seu uso em diversos projetos (FAKURY, *et. al.* 2016).

Então é possível destacar o aço como um ótimo material construtivo, mas é importante se atentar ao seu processo de corrosão e o seu comportamento em caso de incêndios e principalmente à sua composição e aos processos de fabricação para realmente garantir a sua resistividade.

2.1.2 Propriedades do Aço

Santos (2015), descreve o aço como um dos materiais mais importantes dentro da construção civil, pois supre grande parte das solicitações dos sistemas estruturais, dividindo-se em grandes grupos com propriedades mecânicas, tecnológicas, térmicas, elétricas, magnéticas e químicas. Essas características podem ser analisadas através de ensaios, submetendo a peça à esforços de tração e compressão.

As características físicas do aço podem ser adotadas na faixa normal e na temperatura atmosférica. Pfeil (2000) apresenta os valores dessas constantes, conforme pode-se observar no Quadro 2.1.

Quadro 2.1- Constantes físicas do aço.

Constantes Físicas dos Aços	
Módulo de Elasticidade	$E_x = 200 \text{ GPa}$
Coefficiente de <i>Poisson</i>	$\nu = 0,3$
Coef. de Dilatação Térmica	$\beta = 12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Massa Específica	$\rho_d = 7850 \text{ kg/m}$

Fonte: PFEIL (2009).

2.1.3 Denominação e classificação dos aços

De acordo com a composição física, os aços utilizados em estruturas são geralmente classificados em dois grupos: aço-carbono e aço de baixa liga, sendo que tratamentos térmicos podem modificar suas propriedades (PFEIL, 2009).

Segundo FAKURY (2016), como segurança de determinadas indicações, relacionadas principalmente à soldabilidade e ductilidade, a NBR 8800 (ABNT, 2008) indica as seguintes condições para aços estruturais.

- Resistência ao escoamento (f_y) máximo de 450 MPa;
- Relação mínima entre as resistências à ruptura e ao escoamento (f_u/f_y) de 1,18.

2.2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Na construção civil existem materiais que suprem demandas de infraestrutura, analisando principalmente o local onde serão utilizados. Na Tabela 2.1, observa-se os comparativos das principais propriedades de grande maioria dos materiais empregados nas construções. Atualmente, o método mais utilizado é o concreto armado, mas o aço, por ser mais denso, oferece maior resistência aos esforços aplicados (JUNIOR; RETHWISCH. 2018).

Tabela 2.1 - Materiais Estruturais, Dados Comparativos.

Material	Densidade (g/cm ³)	Energia prod. (MJ/m ³)	Resistência (MPa)	Resistência / Densidade
Concreto	2,4	1.920	20	8
Aço (A36)	7,8	234.000	250	32
Madeira conífera	0,6	600	50	83
Madeira Dicotiledônea	0,9	630	75	83

Fonte: Calil Jr. e Dias (1997).

2.3 CURVA TENSÃO DEFORMAÇÃO E CISALHAMENTO

Segundo JUNIOR (2018), na engenharia pode se definir a tensão (σ) como a carga imediata dividida pela área da seção transversal, tendo como fatores $\sigma = \text{Tensão admissível}$; $F = \text{Carga aplicada}$; $A_0 = \text{Área da seção transversal}$. descrita pela Equação 2.1.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

Junior (2018) descreve a deformação na engenharia como a mudança no comprimento na direção da aplicação da força dividida pelo comprimento original, podendo ser calculado pela Equação 2.2 e a Figura 2.1 mostrando o seu comportamento, onde existe uma linha retilínea que refere-se ao estado elástico da peça, onde há aplicação de carga, mas a peça ainda permanece em seu tamanho original após a retirada da carga, o comportamento plástico e demonstrado a partir da curva, onde a peça perde sua capacidade de voltar ao seu tamanho original após a retirada da carga.

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.2)$$

Onde,

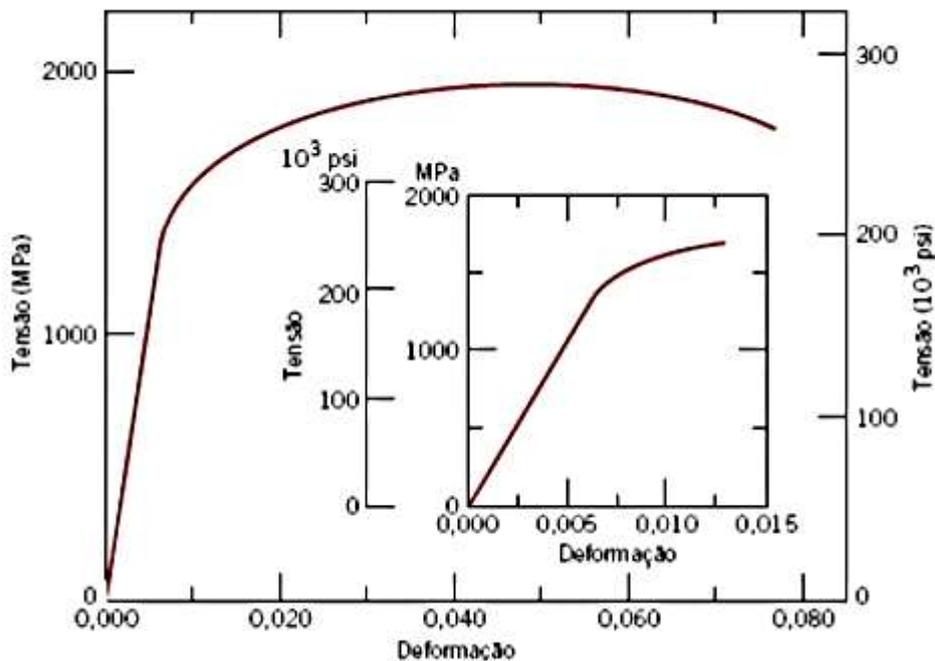
ϵ = Deformação;

l_i = Comprimento final;

l_0 = Comprimento inicial;

Δl = Variação de comprimento.

Figura 2.1 - Curva Tensão Deformação.

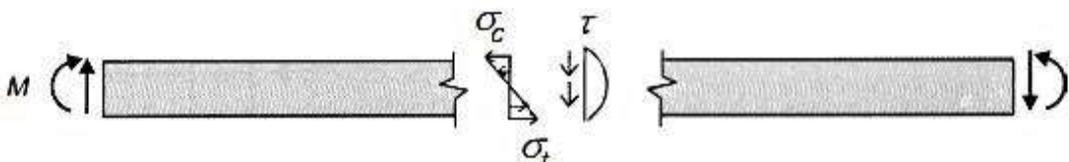


Fonte: JUNIOR, (2018).

2.4 ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Os elementos estruturais podem ser classificados em dois grupos, lineares alongados (hastes ou barras) e elementos bidimensionais (placas ou chapas). Hastes são elementos alongados com dimensões transversais pequenas em relação ao comprimento, dentre as suas classificações inclui-se as vigas, elemento estrutural que cargas transversais que produzem momentos fletores e esforços cortantes, como demonstrado na Figura 2.2 (PFEIL, 2009).

Figura 2.2 - Função de Solicitação Predominante da Viga.



Fonte: PFEIL, (2009).

2.4.1 Vigas

É um dos elementos mais utilizados na construção civil. As vigas podem ter apoios de primeiro, segundo ou terceiro gênero. A Figura 2.3 abaixo mostra a ligação das vigas em perfis I e os pilares da estrutura (SOUZA; RODRIGUES, 2008).

Figura 2.3 - Vigas em Perfil Metálico.



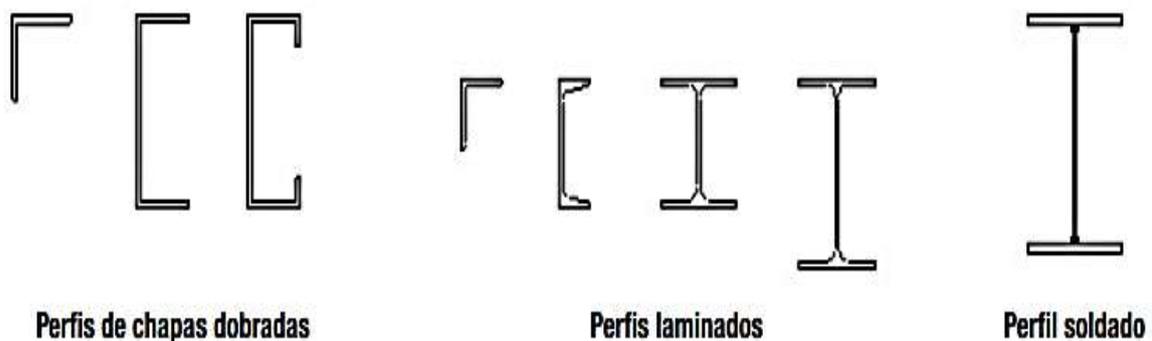
Fonte: TEKLA, (2021).

A Figura 2.4 mostra alguns tipos de perfis, dentre eles está o de chapas dobradas, laminadas e soldadas, para a fabricação de vigas. Os mais utilizados são as chapas laminadas e as soldadas. As chapas de perfis dobráveis metálicos dúcteis, podem ser confeccionados a frio, sendo feitos em prensas, afim de evitar fissuras (PFEIL, 2009).

Os perfis laminados H, I e C são fabricados em grupos, tendo como variação largura e altura, podendo ser designado pelas dimensões externas nominais, conforme NBR 8800 (ABNT, 2008).

Os perfis soldáveis são associados por chapas ou perfis laminados, sendo ligados em geral por solda (PFEIL, 2009).

Figura 2.4 - Perfis Metálicos.

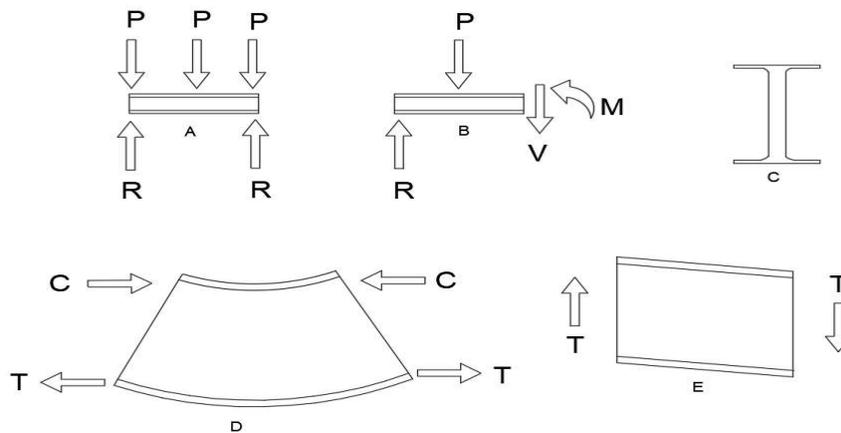


Fonte: MET@LICA, (2021).

2.5 ESFORÇOS DE FLEXÃO E CISCALHAMENTO EM VIGAS

A Figura 2.5 mostra diretamente os esforços que uma viga pode vir a sofrer. A Figura 2.5A se trata da seção transversal, juntamente com as cargas aplicadas e as forças resultantes devido a tais esforços; a Figura 2.5B mostra a reação e o sentido do momento aplicado à viga; Figura 2.5C corresponde a seção transversal da peça; a Figura 2.5D mostra o comportamento da viga á flexão e correspondendo ao comportamento por cisalhamento da peça, tem-se a Figura 2.5E.

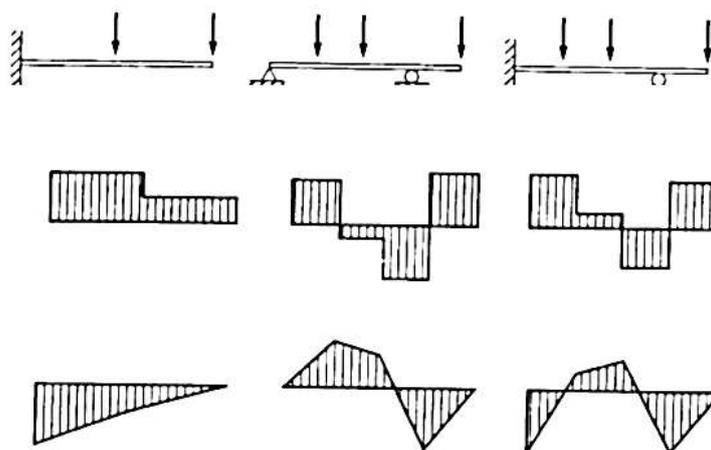
Figura 2.5 - Comportamento simples da viga sobre as aplicações de carga.



Fonte: GALAMBOS ADAPTADO, (1996).

A Figura 2.6 apresenta na primeira linha os carregamentos e condições de contorno, na segunda linha e demonstrado os diagramas de esforços cortantes e na terceira linha os diagramas de momento fletor de 3 vigas isostáticas com condições de contorno diferentes, sob a ação de cargas externas pontuais e concentradas transversalmente (SORIANO,2014).

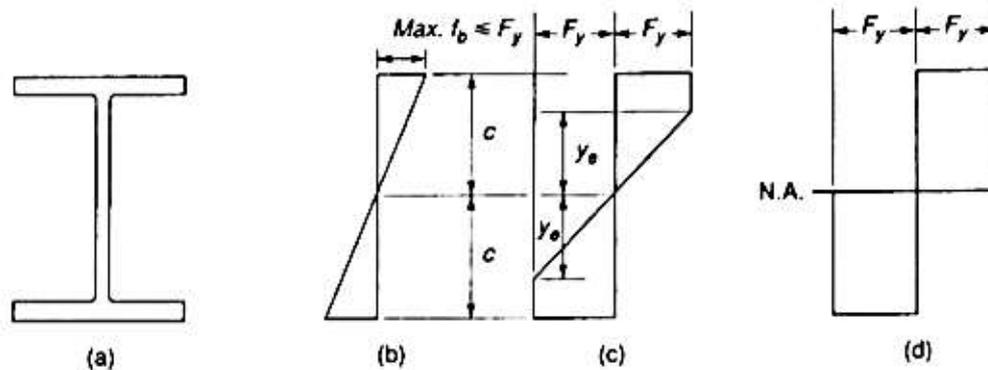
Figura 2.6 - Diagramas de Esforços Normais e Cortantes.



Fonte: GALAMBOS, (1996).

A Figura 2.7 mostra o comportamento de um perfil de seção I, como ele se porta elasticamente e também o seu momento fletor máximo resultante em y em relação a linha neutra, sendo analisado em vigas de Aço.

Figura 2.7 - Comportamento Elástico em Vigas de Aço.



Fonte: GALAMBOS, (1996).

2.6 SEGURANÇA E ESTADOS LIMITES

Pfeil (2009), relata os objetivos de projeto estrutural como garantia de segurança para evitar o colapso da estrutura e também gerar o seu melhor desempenho dentro da construção, para isso utiliza-se como parâmetro o Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS), para obedecer a seus respectivos limites.

A NBR 8800 (ABNT, 2008) sugere a verificação de segurança através de comparativos dos esforços atuantes (R_d) e os esforços resistentes (S_d), em que para estar de acordo com a norma os esforços resistentes da seção devem ser maiores ou iguais aos solicitantes, como descrito na Equação 2.3:

$$R_d \geq S_d \quad (2.3)$$

A Equação 2.4 que define condições usuais dos estados limites de serviço é dada por;

$$S_{serv} \leq S_{lim} \quad (2.4)$$

Ao analisar os estados limites, deve-se atentar aos tipos de classificações que influenciam diretamente, pois todos eles devem ser levados em consideração no modo de cálculo e estudo da estrutura (vigas). A NBR 8681 (ABNT, 2004) orienta a análise sobre ações permanentes e excepcionais.

Dentro das análises realizadas na NBR 8800 (ABNT, 2008), é importante se atentar às ações permanentes diretas que se tratam do peso próprio da estrutura e dos elementos que a compõe, existem também as ações permanentes indiretas, que são as deformações do concreto e deslocamentos de apoio e por fim ações variáveis que advém da vida útil do elemento estrutural, como seu uso e possíveis sobrecargas.

Outro grande fator a se considerar é a ponderação que no caso de estados limites de serviço utiliza-se 1,10 e para o cálculo de ações permanentes existe uma tabela disposta na NBR 8800 (ABNT, 2008) com cada fator de acordo com as combinações. A mesma se encontra no ANEXO 1 e ANEXO 2 deste trabalho.

2.7 COMBINAÇÕES DE AÇÕES

Um carregamento é identificado pelas suas ações, que podem ou não ser desprezadas, essas ações podem ser feitas de formas mais desfavoráveis para a estrutura. Dentro das análises de combinações, existem as combinações últimas, conforme NBR 8800 (ABNT, 2008), sendo definidas pela Equação 2.5.

$$F_d = \sum(\gamma_{gi}F_{Gi,k}) + \gamma_{qi}F_{Qi,k} + \sum(\gamma_{qj}\psi_{0j}F_{Qj,k}) \quad (2.5)$$

Onde,

$F_{Gi,k}$ representa valores característicos das ações permanentes;

$F_{Qi,k}$ representa valores característicos das ações variáveis;

$F_{Qj,k}$ representa valores característicos variáveis que podem atuar simultaneamente com as permanentes.

As combinações referentes a ações variáveis da natureza são denominadas de combinações últimas especiais onde pode ser expressada pela Equação 2.6.

$$F_d = \sum(\gamma_{gi}F_{Gi,k}) + \gamma_{qi}F_{Qi,k} + \sum(\gamma_{qj}\psi_{0j,ef}F_{Qj,k}) \quad (2.6)$$

Onde,

$F_{Qi,k}$ representa valor característico da ação variável especial;

$\psi_{0j,ef}$ diz respeito a valores que representam fatores de combinações efetivas de cada ação variável.

2.8 CONDIÇÕES PARA DIMENSIONAMENTO

Para o dimensionamento de barras que estão submetidas à momento fletor e esforço cortante deve se adequar às seguintes condições, expressas pelas Equações (2.7) e (2.8).

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (2.7)$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (2.8)$$

Onde,

M_{Sd} Momento fletor solicitante de cálculo;

V_{Sd} Força solicitante cortante de cálculo;

M_{Rd} Momento fletor resistente de cálculo;

V_{Rd} Força resistente cortante de cálculo.

Para o cálculo da força cortante resistente em seções I, H e U é obtido pelas Equações (2.9), (2.10) e (2.11):

As seções compactas possuem uma robustez que possibilitam desenvolver uma melhor distribuição de tensões plásticas, tendo grandes rotações, analisando antes do início da flambagem local da seção.

Para $\lambda \leq \lambda_p$ têm-se;

Onde,

λ = Índice de esbeltez;

λ_p = Parâmetro de esbeltez para seção compactas.

O cortante resistente é dado pela Equação 2.9:

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (2.9)$$

Para as seções semicompactas analisa-se os elementos comprimidos que podem atingir o escoamento, mas não completando plastificação da seção, antes que ocorra flambagem local na mesma.

Para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ têm-se;

Onde,

λ_p = Parâmetro de esbeltez para seções compactas;

λ_r = Parâmetro de esbeltez para seções semicompactas;

O cortante resistente é dado pela Equação 2.10 abaixo:

$$V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (2.10)$$

Seções esbeltas são descritas quando a ruína da seção ocorre antes de ser alcançada a plastificação de qualquer de seus elementos constituintes.

Para $\lambda > \lambda_r$ têm-se;

O cortante resistente é dado pela Equação 2.11 abaixo:

$$V_{Rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\gamma} \right)^2 \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (2.11)$$

Para cálculo da força cortante correspondente a plastificação da alma e dada pela Equação 2.12;

$$V_{pl} = 0,60 A_w f_y \quad (2.12)$$

Calculando com essas condições, a Área efetiva (A_w) é dada pela Equação 2.13;

$$A_w = d t_w \quad (2.13)$$

Onde,

d é a altura total da seção;

t_w é a espessura da alma.

Para barras submetidas a momento fletor, utiliza-se a condição de verificação descrita pela Equação 2.7. Existem 3 formas de Flambagem, que são Flambagem Local da Alma (FLA), Flambagem Local da Mesa (FLM) e Flambagem Lateral (FLT).

Análises de momento fletor para FLA e FLM são:

Para seção compacta;

$$\lambda \leq \lambda_p \text{ têm-se}$$

$$M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (2.14)$$

Para seção semicompactas:

$$\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \text{ têm-se;}$$

$$M_{rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \quad (2.15)$$

Para seção esbelta que é aplicada apenas a FLM;

$$\lambda > \lambda_r \text{ têm-se;}$$

$$M_{rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \quad (2.16)$$

Para cálculo de momento fletor para FLT segue-se as mesmas formulações do FLA e FLM com mudança apenas para seções semicompactas, com Equação 2.17.

$$\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \text{ têm-se;}$$

$$M_{rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \quad (2.17)$$

Caso as condições de verificação não sejam atendidas, faz-se necessário o reforço estrutural com uso de enrijecedores transversais, obedecendo as seguintes orientações;

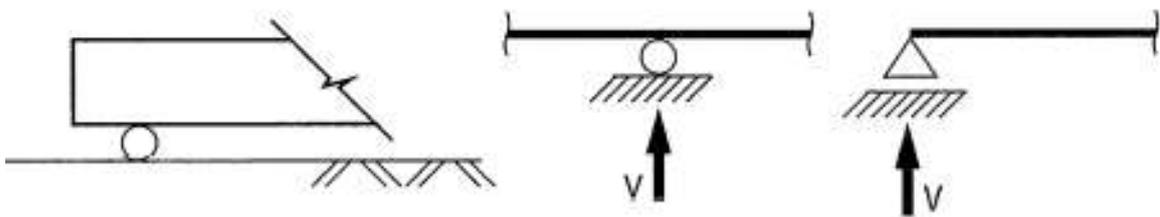
- Quando fizer uso de enrijecedores transversais devem ser soldados à alma e às mesas do perfil, os pontos mais próximos a solda devem ficar entre a alma e a mesa $4t_w$ e $6t_w$;
- A relação entre a largura e a espessura onde ficam os enrijecedores não pode ultrapassar $0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$;
- Chapas utilizadas no reforço da alma, são colocadas em paralelo com a alma soldadas nas duas mesas sendo colocada 150 mm além da seção de aplicação das forças localizadas.

2.9 CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTO

Os movimentos de uma estrutura que podem ser restringidos se dão por meio de apoios e vínculos, sendo classificados em função do número de graus de liberdade. Na análise dos apoios e seus deslocamentos impedidos, surgem forças relativas ou reações de apoio (ALMEIDA, 2009).

- Apoio Simples (do primeiro gênero ou "charriot");
 - Impede a translação em uma das direções;
 - Permite a translação na direção perpendicular à impedida;
 - Permite a rotação (em torno de Z).

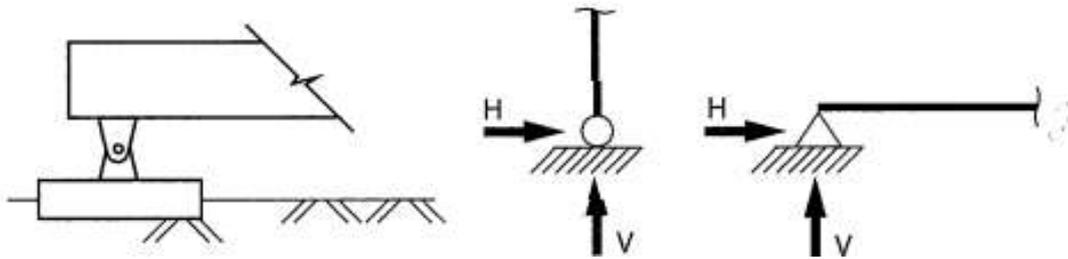
Figura 2.8 - Apoio Simples ou Primeiro Gênero



Fonte: ALMEIDA, (2009).

- Rótula (apoio do segundo gênero ou articulação).
 - Impede as translações nas duas direções (X e Y);
 - Permite a rotação (em torno de Z).

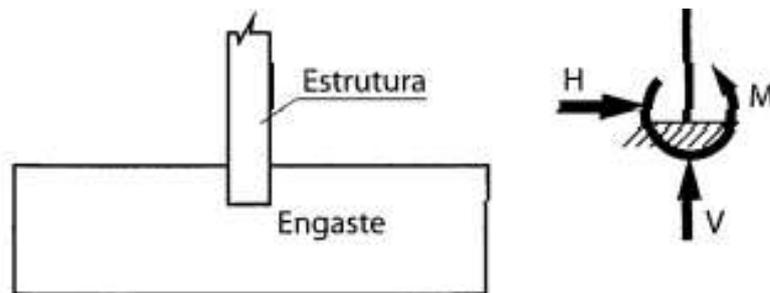
Figura 2.9 - Apoio do Segundo Gênero ou Articulação



Fonte: ALMEIDA, (2009).

- Engaste (ou apoio do terceiro gênero)
 - Impede as translações nas duas direções (X e Y);
 - Impede a rotação (em torno de Z).

Figura 2.10 - Engaste ou Apoio de terceiro Gênero

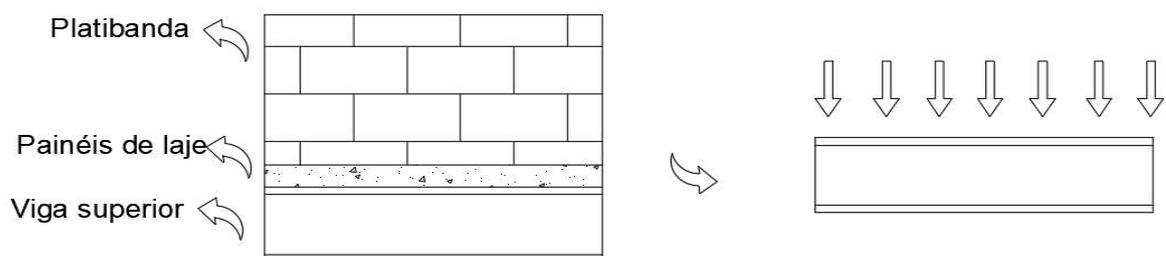


Fonte: ALMEIDA, (2009).

Os esforços atuantes em determinada estrutura são denominados de externos ativos e reativos. Alguns exemplos que podem ser citados como externos ativos é o peso de objetos e pessoas, vento e até mesmo o peso próprio da estrutura, já os esforços reativos são os carregamentos que necessitam de uma estrutura de suporte (NETO, 1996).

Os carregamentos sobre as vigas podem variar de acordo com o projeto e distribuição das cargas. A Figura 2.11 mostra a distribuição de carregamento contínuo sobre uma viga, podendo ser ocasionado por uma platibanda.

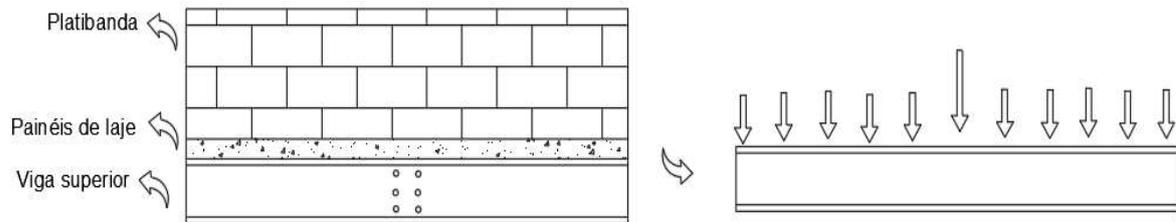
Figura 2.11 - Carregamento Distribuído sobre a viga



Fonte: PRÓPRIA, (2021).

Outro exemplo de carregamento é a mesclagem de cargas distribuídas com cargas pontuais, que podem ser representadas pela Figura 2.12, onde se trata de uma viga parafusada em outra viga, que tem a função de ajudar na distribuição de cargas da estrutura.

Figura 2.12 - Carregamento distribuído e pontual sobre a viga.



Fonte: PRÓPRIA, (2021).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 PARÂMETROS DE ADOTADOS

A análise comparativa desse trabalho parte de critérios de verificação para o dimensionamento, tendo como base pesquisas bibliográficas e normativas, tendo como fator principal fornecer conhecimento através dessas pesquisas realizadas, analisando os resultados obtidos em vigas quando submetidas a flexão e cisalhamento.

O embasamento normativo utilizado para fundamentar essa análise comparativa foi a NBR 8800 (ABNT, 2008), onde se encontra todo o direcionamento para projetos em estruturas de aço. Tendo em vista que, faz-se necessário para uma melhor orientação e determinação de possíveis perfis, levando em consideração diferentes tipos de condições de contorno e carregamento, que são pré-estabelecidos pelo projeto.

A partir da demonstração teórica já realizada neste trabalho, foi feita uma comparação das análises de esforços de flexão e cisalhamento com diferentes tipos de carregamento e condições de contorno para cada perfil adotado, possibilitando assim obter conhecimento suficiente para determinar qual a melhor opção para os casos.

3.1.1 Aço

A Tabela 3.1, apresentada pela NBR 7007 (ABNT, 2011), descreve sobre os requisitos que as barras e perfis estruturais devem atender para serem empregados como estruturas de aço, mostrando algumas propriedades que dentre tais está o MR-250 que foi adotado nessa análise comparativa, onde observa-se a resistência ao escoamento de 250 MPa e a resistência a ruptura com intervalo de 400 à 560 MPa.

Tabela 3.1 - Propriedades do aço carbono e microligados para uso estrutura e geral

Denominação	f_y (MPa)	f_u (MPa)
MR 250	250	400-560
AR 350	350	450
AR 350 COR	350	485
AR 415	415	520

Fonte: NBR 7007, (2011).

Outras propriedades importantes a serem citadas são: o módulo de elasticidade do aço 200 GPa e o coeficiente de *Poisson* que corresponde 0.3, que estão descritas no Quadro 2.1 deste trabalho.

3.1.2 Carregamentos

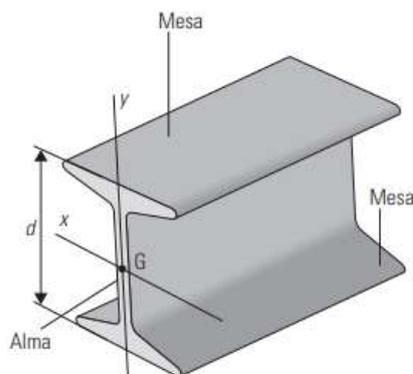
As cargas adotadas se baseiam em um exemplo de cálculo dado por FAKURY, *et. al.* 2016. Tal exemplo tem a seguinte descrição: *Um piso que faz parte de um edifício industrial, tendo as vigas V1, V2, V3 todas birotuladas, sobrepostas por uma laje maciça sem revestimento com 10 cm de espessura. Existe uma sobrecarga de 6 kN/m², existe também uma carga devido à um equipamento móvel com carga igual a 14 kN/m².* Sabe-se que os perfis utilizados para a obtenção das cargas foram: Perfil I 254 x 52,1, Perfil W 360 x 51 e Perfil VS 450 x 51.

Com os dados relacionados acima, obteve-se os seguintes resultados; para carga distribuída encontrou-se 58,40 kN/m e tomando as reações verticais das vigas como cargas que seriam apoiadas em outra viga, encontrou-se como carga pontual 116,8 kN, aplicado a cada metro das vigas analisadas.

3.1.3 Perfil I

A Figura 3.17 traz a representação da seção de um perfil I.

Figura 3.1 – Perfil I



Fonte: (FAKURY, *et. al.* 2016).

A Tabela 3.2 traz as propriedades do perfil I 254 x 52,1 kg/m, adotado para o trabalho.

Tabela 3.2 -Propriedades do perfil I.

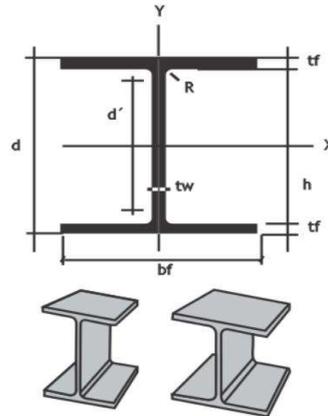
		PERFIL I													
Perfil X massa	Massa	Alt h/mm	ho, mm	to mm	b mm	Área (cm ²)	h/BTf mm	Lx (cm ⁴)	Wx (cm ³)	Ix (cm ⁴)	Ly (cm ⁴)	Wy (cm ³)	Iy (cm ⁴)	Zx (cm)	Zy (cm)
I 254 X 52,1	52,1	254	229	15,1	125,6	66,4	1,62	6120	482	9,6	348	55,4	2,29	580	102

Fonte: PFEIL, 2009.

3.1.4 Perfil W

A Figura 3.18 traz a representação da seção de um perfil W.

Figura 3.2 - Perfil W



Fonte: SOLFER, 2021.

A Tabela 3.3 traz as propriedades do perfil W 360 x 51 kg/m, adotado para o trabalho.

Tabela 3.3 - Propriedades do perfil W.

PERFIL W																
		Alt	Área	Alma		Mesa			Eixo X-X				Eixo Y-Y			
Perfil	X massa	h	A	To	Ho	Tf	Bf	Lx	Wx	Ix	Zx	Ly	Wy	Iy	Zy	
		mm	(cm ²)	mm	mm	mm	mm	(cm ⁴)	(cm ³)	(cm)	(cm)	(cm ⁴)	(cm ³)	(cm)	(cm)	
W 360	X 51	51	355	64,8	7,2	332	11,6	171	14222	801,2	14,81	899,5	968	113,3	3,87	174,7

Fonte: PFEIL, 2009.

3.1.5 Perfil VS

A Figura 3.19 traz a representação da seção de um perfil VS.

Figura 3.3 - Perfil VS



Fonte: (FAKURY, *et. al.* 2016).

A Tabela 3.4 traz as propriedades do perfil VS 450 x 51 kg/m, adotado para o trabalho.

Tabela 3.4 - Propriedades do perfil VS.

PERFIL VS PARA VIGAS														
Perfil X massa	Massa	Alt	Área	Alma		Mesa		Eixo X-X			Eixo Y-Y			
		h	A	To	Ho	Tf	Bf	Lx	Wx	Ix	Zx	Ly	Wy	Iy
		mm	(cm ²)	mm	mm	mm	mm	(cm ⁴)	(cm ³)	(cm)	(cm)	(cm ⁴)	(cm ³)	(cm)
VS 450 X 51	51,1	450	65,2	6,3	431	9,5	200	22640	1006	18,64	1130	1268	1 27	4,41

Fonte: PFEIL, 2009.

3.2 SISTEMA ESTRUTURAL

Para fundamentar essa análise comparativa foi utilizado duas condições de contorno, sendo elas uma viga biapoiada (Figura 3.1) e outra viga engasta livre (Figura 3.2).

- Condição 1;

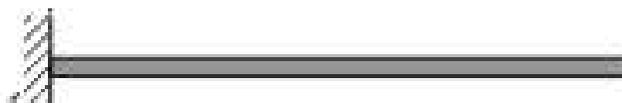
Figura 3.4 - Viga biapoiada



Fonte: (FAKURY, *et. al.* 2016).

- Condição 2;

Figura 3.5 – Viga engastada

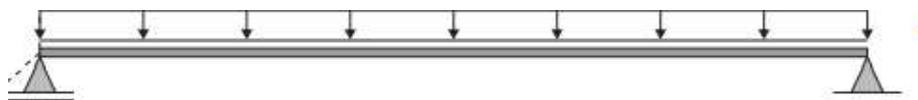


Fonte: (FAKURY, *et. al.* 2016).

Para gerar os esforços atuantes nessas vigas foram utilizadas duas situações de carregamento, sendo carregamento distribuído (Figura 3.3) e carregamento distribuído e pontual (Figura 3.4).

- Situação A

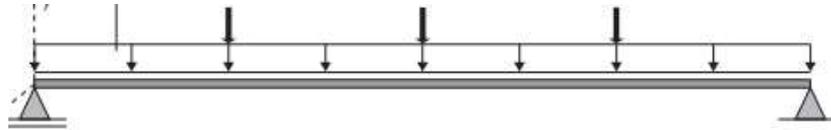
Figura 3.6 - Carregamento distribuído



Fonte: (FAKURY, *et. al.* 2016).

➤ Situação B

Figura 3.7 – Carregamento distribuído e pontual.



Fonte: (FAKURY, *et. al.* 2016).

3.3 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE

Para a análise deste estudo, verificou-se 3 perfis que se adequassem ao planejado para o mesmo, posteriormente obteve-se as cargas através das combinações de ações, descritas no tópico 2.6.1 deste trabalho. Dentro do processo de combinações utilizou-se fatores de majoração que podem ser encontrados em ANEXO deste. Finalizado todo o processo de cálculo analisando as cargas obtidas juntamente com seus respectivos diagramas verificando-se as flechas, de modo que, todo esse processo pode ser encontrado no APÊNDICE A deste.

Como próxima etapa têm-se a obtenção dos esforços resistentes e momentos fletores. Utilizando as cargas encontradas no APÊNDICE A e características de cada perfil, tendo como auxílio o programa FTOOL, obteve-se os diagramas com todos os esforços e momentos fletores solicitantes.

Posterior a isso, utilizou-se dos conceitos descritos no tópico 2.6.2 deste trabalho para assim fundamentar a obtenção dos esforços cortantes e momentos fletores resistentes. Então, após todos esses procedimentos obteve-se condições para uma verificação normativa dos casos encontrados.

Então para os esforços cortantes que não atingiram a condição de verificação, faz-se necessário o uso de enrijecedores em sua alma, para assim aumentar o valor de área da mesma. O item 5.7.9 da norma faz um detalhamento de como deve ser feita essa adição de enrijecedores, distanciamento da mesa e distanciamento entre si, mas em suma, para o cálculo dos mesmos, foi através do k_v que determinará o valor de “a”, que se define como distância entre os enrijecedores e posteriormente os novos valores resistentes.

Por fim, para os casos de momentos fletores que não atingiram os valores de verificação, o item 5.4.4 da norma detalha como resolver a problemática, descrevendo que, para tal, faz-se necessário o reforço da mesa da seção, com chapa parafusada ou soldada, tendo tamanho inferior ao da mesa, afim de garantir a resistência da mesa e conseqüentemente atingir as solicitações através do aumento de sua área e inércia.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise comparativa deste trabalho consiste na exemplificação da NBR 8800, que por sua vez estabelece parâmetros para dimensionamento de vigas sujeitas a esforços cortantes e momentos fletores.

Os resultados obtidos para os carregamentos e condições de contorno aqui analisados foram verificados através das condições no item 2.6.2, no qual toda a resolução para a obtenção das cargas encontra-se no APÊNDICE A e toda a análise de esforços cortantes e momentos fletores resistentes e solicitantes encontram-se no APÊNDICE B.

Portanto, faz-se um comparativo entre tais esforços, podendo concluir que a condição 1 juntamente com a situação A foi totalmente satisfeita dentro das verificações, tanto para o esforço cortante quanto para o momento fletor, devido aos esforços resistentes da estrutura serem maiores que os solicitantes, independentemente do perfil analisado, como pode-se observar nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 - Análise esforço cortante para Condição 1 e Situação A

Esforço Cortante (kN)					
Perfil I		Perfil W		Perfil VS	
V_{sd}	116,8	V_{sd}	116,8	V_{sd}	116,8
V_{rd}	258,62	V_{rd}	167,89	V_{rd}	167,42

Fonte: PRÓPRIA, (2021).

Tabela 4.2 - Análise de momento fletor para Condição 1 e Situação A

Momento Fletor (kN.m)					
Perfil I		Perfil W		Perfil VS	
M_{sd}	116,8	M_{sd}	116,8	M_{sd}	116,8
M_{rd}	131,82	M_{rd}	204,43	M_{rd}	256,82

Fonte: PRÓPRIA, (2021).

Posteriormente a essa análise, realizou-se também a verificação da condição 1 (viga biapoiada) e situação B (carregamento distribuído e carga pontual), aumentando assim as cargas na viga, mas os resultados obtidos não foram satisfatórios, como descrito nas Tabelas 4.3 e 4.4.

Tabela 4.3 - Análise de esforço cortante para Condição 1 e Situação B

Esforço Cortante (kN)					
Perfil I		Perfil W		Perfil VS	
V_{sd}	292	V_{sd}	292	V_{sd}	292
V_{rd}	258,62	V_{rd}	167,89	V_{rd}	167,42

Fonte: PRÓPRIA, (2021).

Tabela 4.4 - Análise de momento fletor para Condição 1 e Situação B.

Momento Fletor (kN.m)					
Perfil I		Perfil W		Perfil VS	
M_{sd}	350,4	M_{sd}	350,4	M_{sd}	350,4
M_{rd}	131,82	M_{rd}	204,43	M_{rd}	256,82

Fonte: PRÓPRIA, (2021).

Então, após a obtenção desses dados, fez-se necessário uma verificação da norma, para solucionar as condições de verificação que não foram satisfeitas pois os esforços solicitantes foram maiores que os resistentes, sendo assim, em caso de esforço cortante não satisfeito faz-se necessário o uso de enrijecedores transversais que são obtidos através da determinação do K_v e do “a” que se refere a distância entre os enrijecedores na viga.

Para o momento fletor que não atingiu a condição de satisfação, ou seja, esforços resistentes maiores que os solicitantes, de acordo com a norma, faz-se um reforço da mesa da viga, com chapas que podem ser parafusadas ou soldadas com tamanho inferior que a própria mesa que aumentará sua área de aço e também sua inércia tornando a peça mais resistente, como descrito no item 5.7.9 da NBR 8800 (ABNT, 2008)

Analisando a condição 2 e situação A, os resultados obtidos se encontram nas Tabelas 4.5 e 4.6.

Tabela 4.5 - Análise esforço cortante para Condição 2 e Situação A

Esforço Cortante (kN)					
Perfil I		Perfil W		Perfil VS	
V_{sd}	233,6	V_{sd}	233,6	V_{sd}	233,6
V_{rd}	258,62	V_{rd}	167,89	V_{rd}	167,42

Fonte: PRÓPRIA, (2021).

Tabela 4.6 - Análise de momento fletor para Condição 2 e Situação A.

Momento Fletor (kN.m)					
Perfil I		Perfil W		Perfil VS	
M_{sd}	467,2	M_{sd}	467,1	M_{sd}	467,1
M_{rd}	131,82	M_{rd}	204,43	M_{rd}	256,82

Fonte: PRÓPRIA, (2021).

Então, apenas o perfil I em esforço cortante passou na verificação de satisfação, devido ao esforço cortante resistente ter permanecido maior que o seu solicitante.

Agora, para a condição 2 e situação B, foi possível chegar aos seguintes resultados relatados nas Tabelas 4.7 e 4.8.

Tabela 4.7 - Análise de esforço cortante para Condição 2 e Situação B.

Esforço Cortante (kN)					
Perfil I		Perfil W		Perfil VS	
V_{sd}	584	V_{sd}	584	V_{sd}	584
V_{rd}	258,62	V_{rd}	167,89	V_{rd}	167,42

Fonte: PRÓPRIA, (2021).

Tabela 4.8 - Análise de momento fletor para Condição 2 e Situação B

Momento Fletor (kN.m)					
Perfil I		Perfil W		Perfil VS	
M_{sd}	1168	M_{sd}	1167,9	M_{sd}	1167,9
M_{rd}	131,82	M_{rd}	204,43	M_{rd}	256,82

Fonte: PRÓPRIA, (2021).

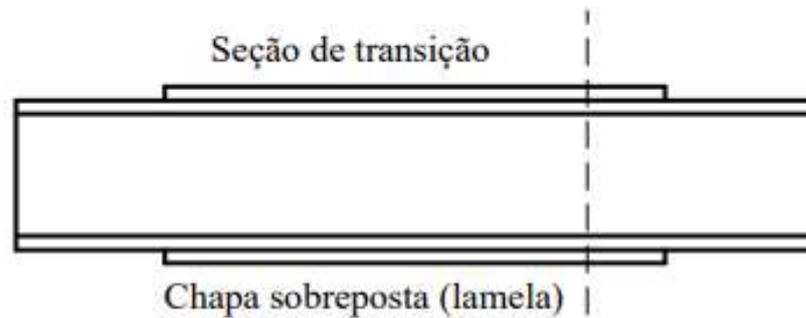
Portanto, com todos os dados descritos acima para as situações que não atingiram a condição de verificação, ou seja, resistência maior ou igual que a solicitação se faz necessário uma verificação normativa para assim obter caminhos para a validação da verificação dos perfis.

Para os esforços cortantes que não atingiram a condição de verificação, o item 5.7.9 da norma orienta o uso de enrijecedores transversais, para assim aumentar o valor da área de sua

alma, descreve também o passo-a-passo para a determinação de tais, que será através do k_v e do “a” que se traduz na distância entre os enrijecedores na alma da seção.

Por fim, para os casos de momentos fletores que não atingiram os valores de verificação, o item 5.4.4 diz respeito ao reforço da mesa da seção como descrito na Figura 4.1, com chapa parafusada ou soldada, tendo tamanho inferior ao da mesa, afim de garantir a resistência, consequentemente as solicitações.

Figura 4.1 – Chapa de reforço sobreposta a mesa da viga.



Fonte: NBR 8800, (2008).

Por fim, para estabelecer um parâmetro comparativo, afim de possibilitar a análise entre os perfis, encontrou-se a porcentagem entre os esforços solicitantes e resistentes de cada perfil identificando o que obteve melhor desempenho entre tais como pode-se observar nas conclusões finais deste trabalho.

5 CONCLUSÕES

Conclui-se que o uso do aço na construção civil é de suma importância e está em fase de crescimento, pois, satisfaz grande parte das solicitações estruturais, sem mencionar suas inúmeras vantagens perante a sistemas convencionais de construção, por isso faz-se necessário estudos como este.

Então, estabelecendo um comparativo entre as seções que foram verificadas positivamente, somente a condição 1 com a situação A dos perfis I, W e VS vão ser comparadas, pois não há a necessidade de reforço estrutural.

O perfil I, tem 54,8% a mais de resistência a esforço cortante e para o momento fletor 11,4% a mais que o momento solicitado.

O perfil W tem em porcentagem para esforço cortante 30,4 a mais que o solicitante estrutural, em análise do momento fletor, tem em porcentagem 42,9 a mais que solicitado.

Analisando o último perfil, que se trata do VS em esforço cortante tem-se 32% a mais que o solicitado, já o momento fletor encontrou-se 54,5% a mais que a sua solicitação.

As condições que não atingiram a verificação, há a necessidade de uma análise e aplicação normativa, como descrito no tópico 3.5 deste ou até mesmo substituição de perfil.

Então, em uma análise geral das porcentagens, o perfil mais completo e que é mais capaz de atender as suas solicitações se resume no perfil VS, pois o mesmo é um perfil específico para uso em vigas, logo justifica sua melhor performance.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, M. Estruturas Isostáticas. RJ. Rio de Janeiro: Oficina textos, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7007: Aço-carbono e aço microligado para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural. RJ. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projetos de Estrutura de aço e de estrutura mista de aço e concreto de edifícios. RJ Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. RJ. Rio de Janeiro, 2004.
- BELLEI, I. Edifícios Industriais em Aço. 2.ª ed. SP. São Paulo: Pini. 1998.
- CASTRO, E. M. L. Os sistemas de cobertura e fechamento que formam a moderna arquitetura em aço. 2007.
- CHIAVERJNI, V. Aço e Ferros Fundidos. 7ª ed. SP. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1996.
- DIAS, L. A. M. Edificações de Aço no Brasil. SP. São Paulo: Ziguarte, 1993
- FAKURY, H. Dimensionamento de Elementos Estruturais de Aço e Mistos Aço Concreto. MG. Minas Gerais: Person Education, 2017.
- GALAMBOS, V. Basic Steel Design With LEFD. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- HANTERA PROJEKTERING, TILLVERKNING OCH RESNING AV STÅLKONSTRUKTIONER. Tekla, 2021. Disponível em: < <https://www.tekla.com/se> >. Acesso em: 02, novembro, 2021.
- JUNIOR, W. D. C; RETHWISCH, D. G. Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução. 9ª Edição. RJ. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- PFEIL, W; PFEIL, M. Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático. 8ª ed. RJ. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- SANTOS, G. Tecnologia dos Materiais Metálicos - Propriedades, Estruturas e Processos de Obtenção. 1ª Edição. SP. São Paulo: Érica, 2015.
- SORIANO, H. L. Estática das Estruturas. 4ª ed. RJ. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2014.

NETO, H. L. Introdução à Mecânica das Estruturas. Capítulos 1 a 5. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações.

VIGA W E VIGA H. Soufer, 2021. Disponível em: < <https://www.soufer.com.br/viga-w-h> >.
Acesso em: 02, novembro, 2021.

APÊNDICE A

A.1 RESULTADOS PARA O PERFIL I.

Tabela A.1- Propriedades do perfil I

PERFIL I															
Perfil X massa	Massa	Alt h/mm	ho, mm	to mm	b mm	Área (cm ²)	h/BTf mm	Lx (cm ⁴)	Wx (cm ³)	Ix (cm ⁴)	Ly (cm ⁴)	Wy (cm ³)	Iy (cm ⁴)	Zx (cm)	Zy (cm)
I 254 X 52,1	52,1	254	229	15,1	125,6	66,4	1,62	6120	482	9,6	348	55,4	2,29	580	102

A.1.1- Cálculo do momento fletor máximo advindos do peso próprio da viga da laje de concreto armado, sobrecarga e equipamento, respectivamente. Os dados sobre o perfil como: massa, área e inércia foram retiradas da Tabela A.1

$$q_{pvk} = \mathbf{0,521 \text{ kN/m}}$$

$$q_{plk} = 25 \times 10 \times 10^{-2} = \mathbf{5 \text{ kN/m}}$$

$$q_{psk} = 6 \times 2 = \mathbf{12 \text{ kN/m}}$$

$$q_{pek} = 14 \times 2 = \mathbf{28 \text{ kN/m}}$$

A.1.2- Cálculo da carga máxima distribuída na viga;

Sobrecarga como ação principal;

$$q_d = 1,25 (0,521) + 1,35(5) + 1,5(12) + 1,5 \times 0,5(28) = \mathbf{46,40 \text{ kN/m}}$$

Equipamento como ação principal;

$$q_d = 1,25 (0,521) + 1,35(5) + 1,5(28) + 1,5 \times 0,5(12) = \mathbf{58,40 \text{ kN/m}}$$

Portanto, adota-se o maior valor 58,40 KN/m. Assim, o momento fletor solicitante de cálculo na seção central da viga é;

$$M_{sd} = \frac{58,40 \times 4^2}{8} = \mathbf{116,8 \text{ kN.m}}$$

A.1.3- Verificação das flexas;

Será obtido pela carga permanente, sobrecarga e equipamento, sendo obtida pela fórmula do $\delta_{m\acute{a}x}$;

$$\delta_{pp} = \frac{5 (q_{pk} + q_{lk}) L^4}{384 E I_x} = \frac{5(0,521+5) 10^{-2} \times 400^4}{384 \times 20000 \times 9,6} = \mathbf{0,096 \text{ cm}}$$

$$\delta_{sb} = \frac{5 (q_{sk})L^4}{384 E I_X} = \frac{5 (12) 10^{-2} \times 400^4}{384 \times 20000 \times 9,6} = \mathbf{0,203 \text{ cm}}$$

$$\delta_e = \frac{5 (q_{ek})L^4}{384 E I_X} = \frac{5 (28) 10^{-2} \times 400^4}{384 \times 20000 \times 9,6} = \mathbf{0,486 \text{ cm}}$$

O valor da flecha total será;

$$\delta_s = 0,096 + 0,4 (0,203) + 0,3 (0,486) = \mathbf{0,323 \text{ cm}}$$

$$\delta_e = 0,096 + 0,4 (0,486) + 0,3 (0,203) = \mathbf{0,351 \text{ cm}}$$

Então, a flecha máxima será;

$$\delta_{m\acute{a}x} = 0,351 < \delta_p = \frac{L}{350} = \frac{400}{350} = \mathbf{1,14 \text{ cm}}$$

Assim, a flecha está dentro dos limites aceitáveis.

A. 2- RESULTADOS PARA O PERFIL W.

Tabela A.2- Propriedades do perfil W

PERFIL W															
Perfil X massa	Massa	Alt	Área	Alma		Mesa		Eixo X-X				Eixo Y-Y			
		h	A	To	Ho	Tf	Bf	Lx	Wx	Ix	Zx	Ly	Wy	Iy	Zy
		mm	(cm ²)	mm	mm	mm	mm	(cm ⁴)	(cm ³)	(cm)	(cm)	(cm ⁴)	(cm ³)	(cm)	(cm)
W 360 X 51	51	355	64,8	7,2	332	11,6	171	14222	801,2	14,81	899,5	968	113,3	3,87	174,7

Fonte: PFEIL, 2009.

A.2.1- Cálculo do momento fletor máximo advindos do peso próprio da viga da laje de concreto armado, sobrecarga e equipamento, respectivamente. Os dados sobre o perfil como: massa, área e inércia foram retiradas da Tabela A.2.

$$q_{pvk} = \mathbf{0,51 \text{ kN/m}}$$

$$q_{plk} = 25 \times 10 \times 10^{-2} = \mathbf{5 \text{ kN/m}}$$

$$q_{psk} = 6 \times 2 = \mathbf{12 \text{ kN/m}}$$

$$q_{pek} = 14 \times 2 = \mathbf{28 \text{ kN/m}}$$

A.2.2- Cálculo da carga máxima distribuída na viga;

Sobrecarga como ação principal;

$$q_d = 1,25 (0,51) + 1,35(5) + 1,5(12) + 1,5 \times 0,5(28) = \mathbf{46,39 \text{ kN/m}}$$

Equipamento como ação principal;

$$q_d = 1,25 (0,51) + 1,35(5) + 1,5(28) + 1,5 \times 0,5(12) = \mathbf{58,39 \text{ kN/m}}$$

Portanto, adota-se o maior valor 58,39 kN/m. Assim, o momento fletor solicitante de cálculo na seção central da viga é;

$$M_{sd} = \frac{58,39 \times 4^2}{8} = \mathbf{116,78 \text{ kN.m}}$$

A.2.3 -Verificação das flexas;

Será obtido pela carga permanente, sobrecarga e equipamento, sendo obtida pela fórmula do $\delta_{m\acute{a}x}$;

$$\delta_{pp} = \frac{5 (q_{pk} + q_{lk}) L^4}{384 E I_x} = \frac{5 (0,51 + 5) 10^{-2} \times 400^4}{384 \times 20000 \times 14,81} = \mathbf{0,062 \text{ cm}}$$

$$\delta_{sb} = \frac{5 (q_{sk}) L^4}{384 E I_x} = \frac{5 (12) 10^{-2} \times 400^4}{384 \times 20000 \times 14,81} = \mathbf{0,183 \text{ cm}}$$

$$\delta_e = \frac{5 (q_{ek}) L^4}{384 E I_x} = \frac{5 (28) 10^{-2} \times 400^4}{384 \times 20000 \times 14,81} = \mathbf{0,315 \text{ cm}}$$

O valor da flecha total será;

$$\delta_s = 0,062 + 0,4 (0,183) + 0,3 (0,315) = \mathbf{0,23 \text{ cm}}$$

$$\delta_e = 0,062 + 0,4 (0,315) + 0,3 (0,183) = \mathbf{0,24 \text{ cm}}$$

Então, a flecha máxima será;

$$\delta_{m\acute{a}x} = 0,24 < \delta_p = \frac{L}{350} = \frac{400}{350} = \mathbf{1,14 \text{ cm}}$$

Assim, a flecha está dentro dos limites aceitáveis.

A.3 - RESULTADOS PARA O PERFIL VS.

Tabela A.3 - Propriedades do perfil VS

PERFIL VS PARA VIGAS														
Perfil X massa	Massa	Alt	Área	Alma		Mesa		Eixo X-X				Eixo Y-Y		
		h	A	To	Ho	Tf	Bf	Lx	Wx	Ix	Zx	Ly	Wy	Iy
		mm	(cm ²)	mm	mm	mm	mm	(cm ⁴)	(cm ³)	(cm)	(cm)	(cm ⁴)	(cm ³)	(cm)
VS 450 X 51	51,1	450	65,2	6,3	431	9,5	200	22640	1006	18,64	1130	1268	127	4,41

Fonte: PFEIL, 2009.

A 3.1 - Cálculo do momento fletor máximo advindos do peso próprio da viga da laje de concreto armado, sobrecarga e equipamento, respectivamente. Os dados sobre o perfil como: massa, área e inércia foram retiradas da Tabela A.3.

$$q_{pvk} = 0,511 \text{ kN/m}$$

$$q_{plk} = 25 \times 10 \times 10^{-2} = \mathbf{5 \text{ kN/m}}$$

$$q_{psk} = 6 \times 2 = 12 \text{ kN/m}$$

$$q_{pek} = 14 \times 2 = 28 \text{ kN/m}$$

A.3.2 - Cálculo da carga máxima distribuída na viga;

Sobrecarga como ação principal;

$$q_d = 1,25 (0,511) + 1,35(5) + 1,5(12) + 1,5 \times 0,5(28) = 46,39 \text{ kN/m}$$

Equipamento como ação principal;

$$q_d = 1,25 (0,511) + 1,35(5) + 1,5(28) + 1,5 \times 0,5(12) = 58,39 \text{ kN/m}$$

Portanto, adota-se o maior valor 58,39 KN/m. Assim, o momento fletor solicitante de cálculo na seção central da viga é;

$$M_{sd} = \frac{58,39 \times 4^2}{8} = 116,78 \text{ kN.m}$$

A.3.3 - Verificação das flexas;

Será obtido pela carga permanente, sobrecarga e equipamento, sendo obtida pela fórmula do $\delta_{m\acute{a}x}$;

$$\delta_{pp} = \frac{5 (q_{pk} + q_{lk}) L^4}{384 E I_X} = \frac{5 (0,511 + 5) 10^{-2} \times 400^4}{384 \times 20000 \times 18,64} = 0,0493 \text{ cm}$$

$$\delta_{sb} = \frac{5 (q_{sk}) L^4}{384 E I_X} = \frac{5 (12) 10^{-2} \times 400^4}{384 \times 20000 \times 18,64} = 0,107 \text{ cm}$$

$$\delta_e = \frac{5 (q_{ek}) L^4}{384 E I_X} = \frac{5 (28) 10^{-2} \times 400^4}{384 \times 20000 \times 18,64} = 0,250 \text{ cm}$$

O valor da flecha total será;

$$\delta_s = 0,0493 + 0,4 (0,107) + 0,3 (0,250) = 0,167 \text{ cm}$$

$$\delta_e = 0,0493 + 0,4 (0,250) + 0,3 (0,107) = 0,181 \text{ cm}$$

Então, a flecha máxima será;

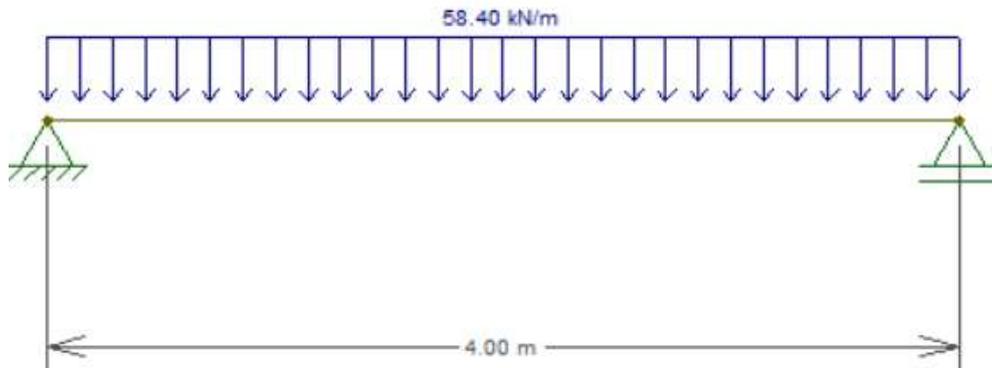
$$\delta_{m\acute{a}x} = 0,181 < \delta_p = \frac{L}{350} = \frac{400}{350} = 1,14 \text{ cm}$$

Assim, a flecha está dentro dos limites aceitáveis.

Após todo o processo analítico com o auxílio do programa ftool com as cargas obtidas gerou-se os seguintes diagramas.

O esquema da Condição 1 e Situação A é dada pela Figura 3.5, que apresenta uma viga em condições de apoio descrita como biapojada, e situação de carga definida como carregamento distribuído uniformemente.

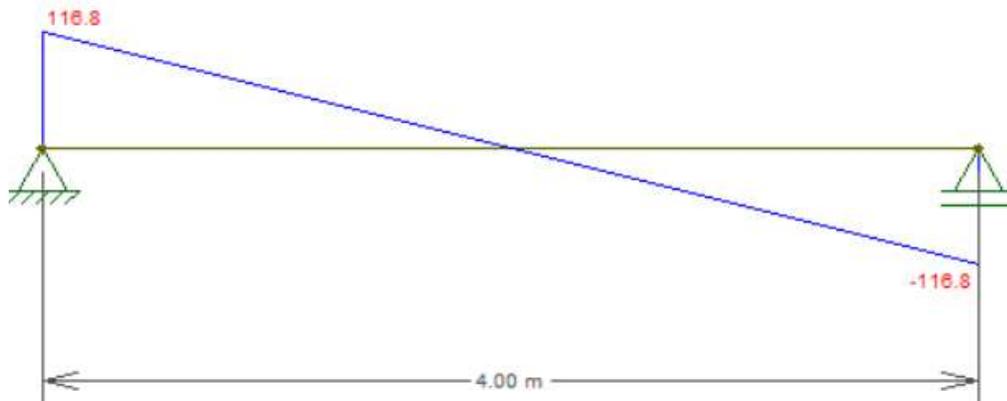
Figura 0.1 - Viga biapojada com carregamento distribuído



Fonte: PRÓPRIA, (2021).

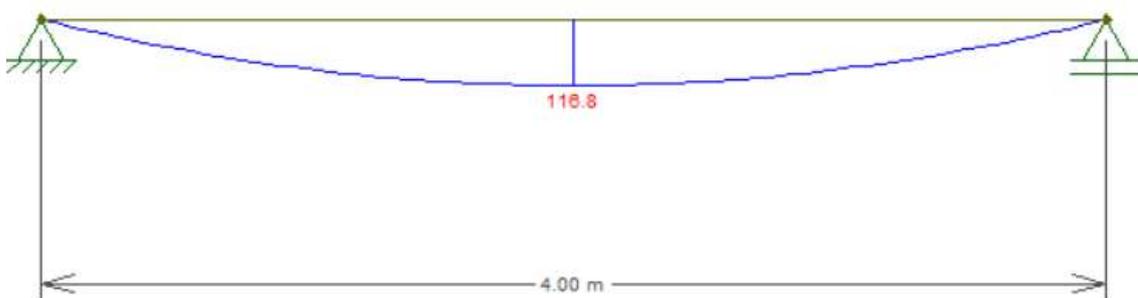
Os diagramas de esforços solicitantes para o esquema contido na Figura 3.5 são dados pelas Figuras 3.6 e 3.7, onde representam o diagrama de esforço cortante e de momento fletor, respectivamente.

Figura 0.2 - Diagrama de esforço cortante para Condição 1 e Situação A



Fonte: PRÓPRIA, (2021).

Figura 0.3 - Diagrama de momento fletor para Condição 1 e Situação A

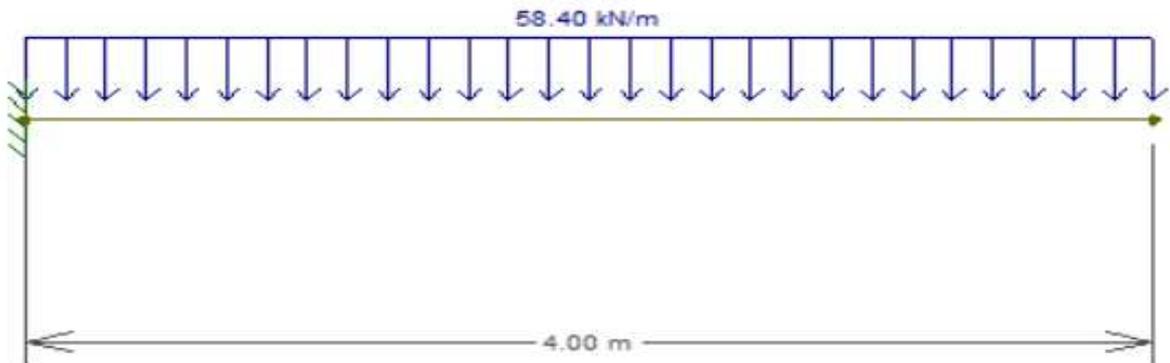


Fonte: PRÓPRIA, (2021).

Assim, a situação apresentada acima, obteve valor de esforço cortante solicitante $V_{sd} = 116,8 \text{ kN}$ e valor de momento fletor solicitante de $M_{sd} = 116,8 \text{ kN/m}$.

O esquema da Condição 2 e Situação A é dada pela Figura 3.8, que apresenta uma viga em condições de apoio descrita como monoengastada, e situação de carga definida como carregamento distribuído uniformemente.

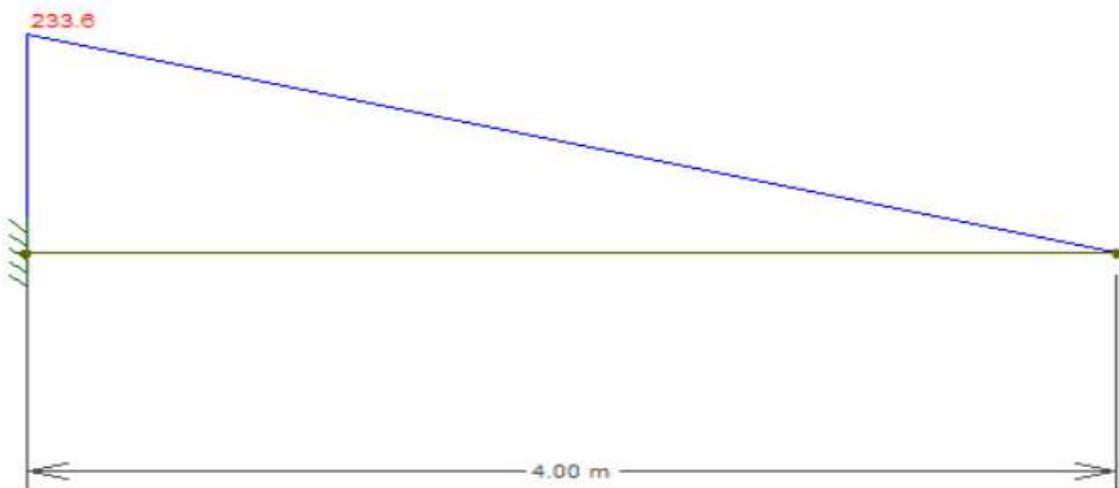
Figura 0.4 - Viga engastada com carregamento distribuído.



Fonte: PRÓPRIA, (2021).

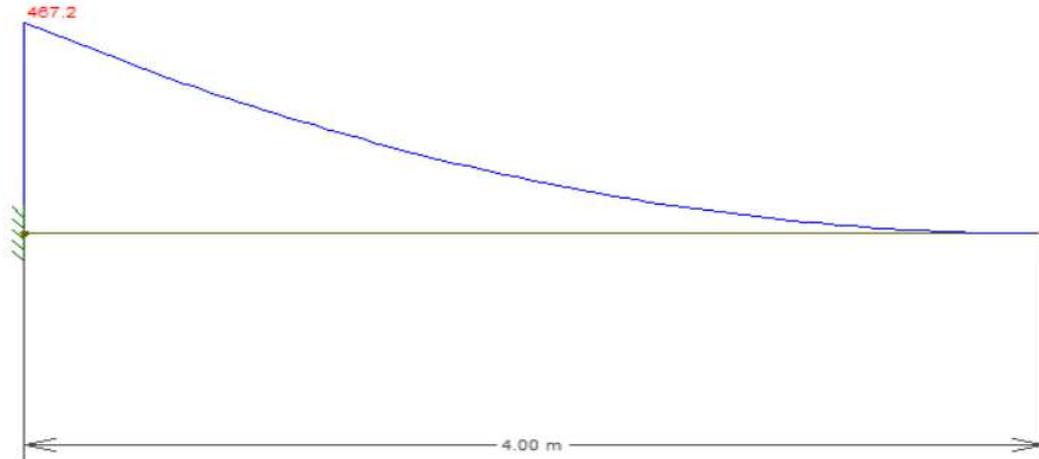
Os diagramas de esforços solicitantes para o esquema contido na Figura 3.8 são dados pelas Figuras 3.9 e 3.10, onde representam o diagrama de esforço cortante e de momento fletor, respectivamente.

Figura 0.5 - Diagrama de esforço cortante para Condição 2 e Situação A.



PRÓPRIA, (2021).

Figura 0.6 - Diagrama de momento fletor para Condição 2 e Situação

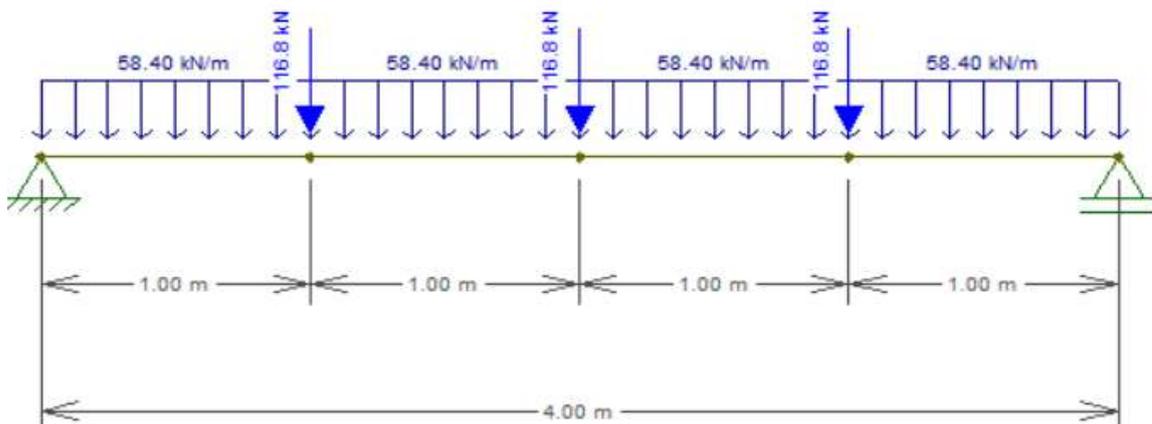


PRÓPRIA, (2021).

Então, a situação apresentada acima, obteve valor de esforço cortante solicitante $V_{sd} = 233,6 \text{ kN}$ e valor de momento fletor solicitante de $M_{sd} = 467,2 \text{ kN/m}$.

O esquema da Condição 1 e Situação B é dada pela Figura 3.11, que apresenta uma viga em condições de apoio descrita como biapoiada, e situação de carga definida como carregamento distribuído uniformemente, juntamente com três cargas pontuais de mesmo valor posicionadas a cada 1m de distância entre si.

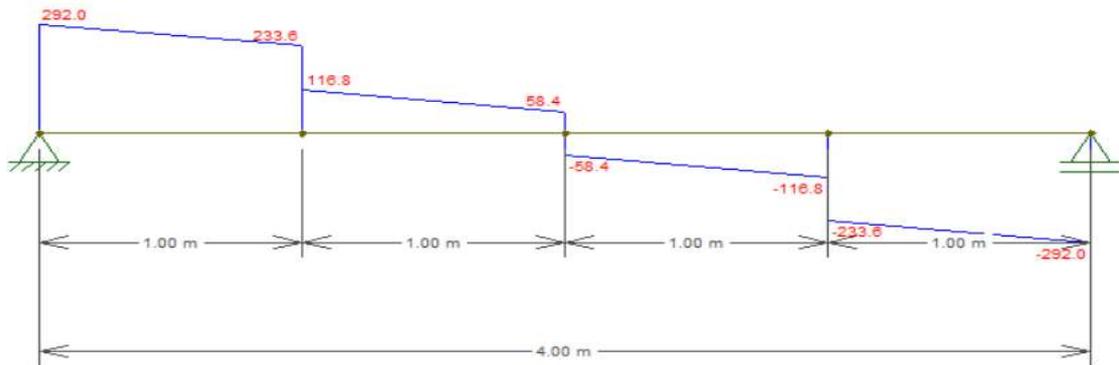
Figura 0.7 - Viga biapoiada com carregamento distribuído e carga pontual



Fonte: PRÓPRIA, (2021).

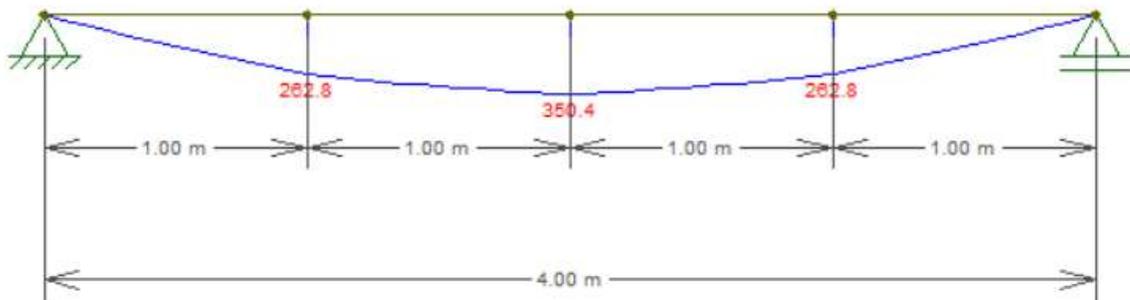
Os diagramas de esforços solicitantes para o esquema contido na Figura 3.11 são dados pelas Figuras 3.12 e 3.13, onde representam o diagrama de esforço cortante e de momento fletor, respectivamente.

Figura 0.8 - Diagrama de esforço cortante para Condição 1 e Situação B.



Fonte: PRÓPRIA, (2021).

Figura 0.9 - Diagrama de momento fletor para Condição 1 e Situação B

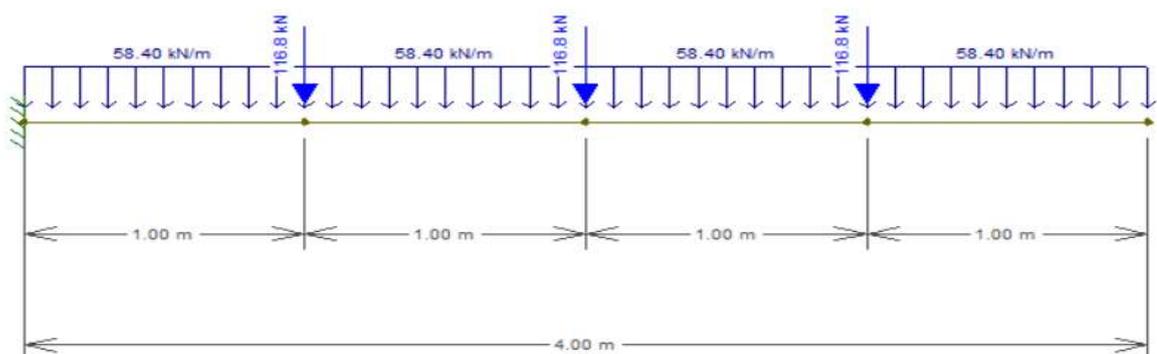


Fonte: PRÓPRIA, (2021).

Assim, a situação apresentada acima, obteve valor de esforço cortante solicitante $V_{sd} = 292 \text{ kN}$ e valor de momento fletor solicitante de $M_{sd} = 350,4 \text{ kN/m}$.

O esquema da Condição 2 e Situação B é dada pela Figura 3.14, que apresenta uma viga em condições de apoio descrita como monoengastada, e situação de carga definida como carregamento distribuído uniformemente, juntamente com três cargas pontuais de mesmo valor posicionadas a cada 1m de distância entre si.

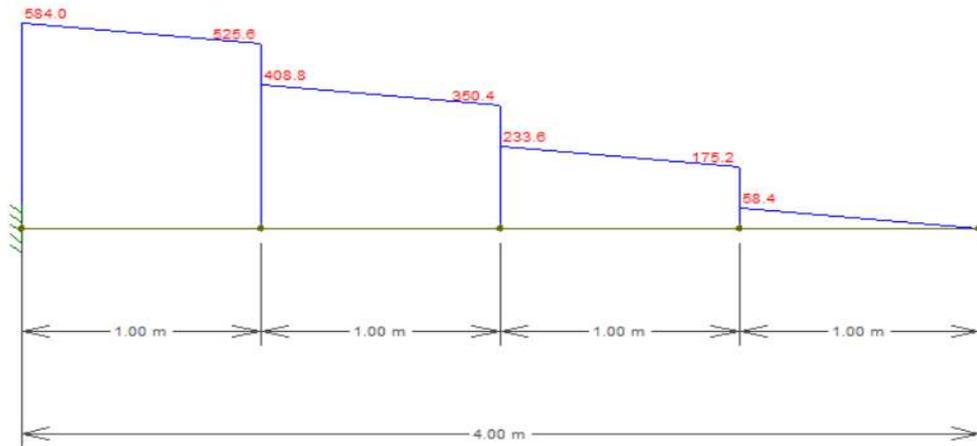
Figura 0.10 - Viga engastada com carregamento distribuído e carga pontual



Fonte: PRÓPRIA, (2021).

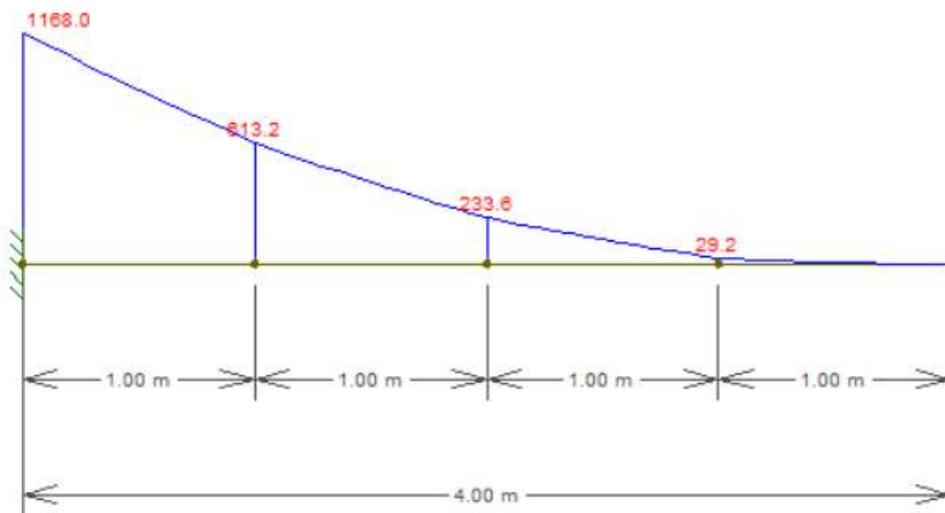
Os diagramas de esforços solicitantes para o esquema contido na Figura 3.14 são dados pelas Figuras 3.15 e 3.16, onde representam o diagrama de esforço cortante e de momento fletor, respectivamente.

Figura 0.11 - Diagrama de esforço cortante para Condição 2 e Situação B.



Fonte: PRÓPRIA, (2021).

Figura 0.12 - Diagrama de momento fletor para Condição 2 e Situação B.



Fonte: PRÓPRIA, (2021).

Portanto, a situação apresentada acima, obteve valor de esforço cortante solicitante $V_{sd} = 584 \text{ kN}$ e valor de momento fletor solicitante de $M_{sd} = 1168 \text{ kN/m}$.

APÊNDICE B

B.1 - PERFIL I

B.1.1 - Classificação da condição 1 com a situação A, o esforço cortante.

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{254}{15,1} = \mathbf{16,82}$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v \times E}{f_y}} = 1,10 \sqrt{\frac{5 \times 200 \times 10^3}{250^6}} = \mathbf{69,57}$$

Assim a seção é classificada como compacta como descrito no item 2.6.2.

B.1.2 – Cálculo cortante plástico.

$$v_{pl} = 0,60 \times A_w \times f_y = 0,60 \times 1896,56 \times 250 = \mathbf{284,48 \text{ kN}}$$

B.1.3 - Cálculo cortante resistente.

$$v_{rd} = \frac{v_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{284,48}{1,10} = \mathbf{258,62 \text{ kN}}$$

B.1.4- Classificação da viga biapoçada a momento fletor com carregamento distribuído.

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{254}{15,1} = \mathbf{16,82}$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 3,76 \sqrt{\frac{200 \times 10^3}{250 \times 10^6}} = \mathbf{106,35}$$

Assim, a seção é classificada como compacta como descrito no item 2.6.2.

B.1.5 - Cálculo momento plástico.

$$M_{pl} = Z_X \times f_y = 580 \times 250 = \mathbf{145000 \text{ kN/m}}$$

B.1.6 - Cálculo momento resistente para FLA

$$M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{145000}{1,10} = \mathbf{131,82 \text{ kN/m}}$$

B.1.7 – Classificação e cálculo momento resistente para FLM.

$$\lambda = \frac{b_f}{2 \cdot t} = \frac{125,66}{2 \cdot 15,1} = \mathbf{4,16}$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{200 \times 10^3}{250 \times 10^6}} = \mathbf{10,37}$$

$$\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \sqrt{\frac{200 \times 10^3}{0,7 \cdot 250 \times 10^6}} = \mathbf{28,06}$$

Assim, a seção é classificada como compacta como descrito no item 2.6.2.

$$M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{14500}{1,10} \mathbf{131,82 \text{ kN/m}}$$

B.1.8 – Classificação e cálculo momento resistente para FLT.

$$\lambda = \frac{L_0}{r_y} = \frac{229}{25,4} = 9,02$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{200 \times 10^3}{250 \times 10^6}} = \mathbf{49,78}$$

Assim, a seção é classificada como compacta como descrito no item 2.6.2.

$$M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{Z_x \cdot f_y}{1,10} = \frac{580 \cdot 250}{1,10} \mathbf{131,82 \text{ kN/m}}$$

B.2 - PERFIL W

B.2.1 - Classificação da condição 1 e situação A, o esforço cortante.

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{355}{7,2} = \mathbf{49,31}$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = \sqrt{\frac{5 \times 200 \times 10^3}{250^6}} = \mathbf{69,57}$$

Assim, a seção é classificada como compacta como descrito no item 2.6.2.

B.2.2 – Cálculo cortante plástico.

$$v_{pl} = 0,60 \times A_w \times f_y = 0,60 \times 171 \times 7,2 \times 250 = \mathbf{184,68 \text{ kN}}$$

B.2.3 - Cálculo cortante resistente.

$$v_{rd} = \frac{v_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{184,68}{1,10} = \mathbf{167,89 \text{ kN}}$$

B.2.4- Classificação da viga biapoçada a momento fletor com carregamento distribuído.

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{355}{7,2} = \mathbf{49,31}$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 3,76 \sqrt{\frac{200 \times 10^3}{250 \times 10^6}} = \mathbf{106,35}$$

Assim, a seção é classificada como compacta como descrito no item 2.6.2.

B.2.5 - Cálculo momento plástico.

$$M_{pl} = Z_x \times f_y = 899,5 \times 250 = \mathbf{224.88 \text{ kN/m}}$$

B.2.6 - Cálculo momento resistente.

$$M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{\mathbf{224.88}}{1,10} = \mathbf{204,43 \text{ kN/m}}$$

B.2.7 – Classificação e cálculo momento resistente para FLM.

$$\lambda = \frac{b_f}{2 \cdot t} = \frac{171}{2 \cdot 11,6} = \mathbf{7,37}$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{200 \times 10^3}{250 \times 10^6}} = \mathbf{10,37}$$

$$\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \sqrt{\frac{200 \times 10^3}{0,7 \cdot 250 \times 10^6}} = \mathbf{28,06}$$

Assim, a seção é classificada como compacta como descrito no item 2.6.2.

$$M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{224,88}{1,10} = \mathbf{204,44 \text{ kN/m}}$$

B.2.8 – Classificação e cálculo momento resistente para FLT.

$$\lambda = \frac{L_0}{r_y} = \frac{332}{7,2} = \mathbf{46,11}$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{200 \times 10^3}{250 \times 10^6}} = \mathbf{49,78}$$

Assim, a seção é classificada como compacta como descrito no item 2.6.2.

$$M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{Z_x \cdot f_y}{1,10} = \frac{899,5 \cdot 250}{1,10} = \mathbf{204,43 \text{ kN/m}}$$

B.3 - PERFIL VS

B.3.1 - Classificação da condição 1 e situação A, o esforço cortante.

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{431}{6,3} = \mathbf{68,41}$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v x E}{f_y}} = 1,10 \sqrt{\frac{5 x 200 x 10^3}{250^6}} = \mathbf{69,57}$$

$$\lambda_r = 1,57 \sqrt{\frac{5 x 200 x 10^3}{250^6}} = \mathbf{99,29}$$

Assim, a seção é classificada como compacta como descrito no item 2.6.2.

B.3.2 – Cálculo cortante plástico.

$$v_{pl} = 0,60 x A_w x f_y = 0,60 x 200 x 6,3 x 250 = \mathbf{189,0 \text{ kN}}$$

B.3.3 - Cálculo cortante resistente.

$$v_{rd} = \frac{v_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{189}{1,10} = \mathbf{171,82 \text{ kN}}$$

B.3.4- Classificação da viga biapoçada a momento fletor com carregamento distribuído.

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{431}{6,3} = \mathbf{68,41}$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 3,76 \sqrt{\frac{200 x 10^3}{250 x 10^6}} = \mathbf{106,35}$$

Assim, a seção é classificada como compacta como descrito no item 2.6.2.

B.3.5 - Cálculo momento plástico.

$$M_{pl} = Z_x x f_y = 1130 x 250 = \mathbf{282,5 \text{ kN/m}}$$

B.3.6 - Cálculo momento resistente.

$$M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{282,5}{1,10} = \mathbf{256,82 \text{ kN/m}}$$

B.3.7 – Classificação e cálculo momento resistente para FLM.

$$\lambda = \frac{b_f}{2 \cdot t} = \frac{200}{2 \cdot 9,5} = \mathbf{10,53}$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{200 \times 10^3}{250 \times 10^6}} = \mathbf{10,75}$$

Assim, a seção é classificada como compacta como descrito no item 2.6.2.

$$M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{282,5}{1,10} = \mathbf{256,82 \text{ kN/m}}$$

B.3.8 – Classificação e cálculo momento resistente para FLT.

$$\lambda = \frac{b_f}{t_f} = \frac{200}{9,5} = \mathbf{21,05}$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{200 \times 10^3}{250 \times 10^6}} = \mathbf{49,78}$$

Assim, a seção é classificada como compacta como descrito no item 2.6.2.

$$M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{Z_x \cdot f_y}{1,10} = \frac{1130 \cdot 250}{1,10} = \mathbf{256,82 \text{ kN/m}}$$

B.4 - PERFIL I

B.4.1 - Classificação condição 1 situação B a esforço cortante.

Para analisar essa condição de carregamento, adota-se a mesma classificação do item B.1, ou seja, uma viga compacta.

$$V_{rd} \geq V_{sd} \quad \text{Condição de satisfação}$$

$$258,64 \geq 292 \quad \text{Condição insatisfeita}$$

Uma solução para chegar à condição de satisfação seria encontrar uma nova A_w .

$$V_{sd} = V_{rd}$$

$$292 = \frac{0,60 \times A_w \times f_y}{1,1} = 21,4$$

Para satisfação da estrutura a A_w precisaria de ser $21,4 \text{ m}^2$.

Para o momento tendo a condição insatisfeita

$$M_{rd} \geq M_{sd}$$

$$131,82 \geq 350,4$$

B.5 - PERFIL W

B.5.1 - Classificação da condição 1 situação B a esforço cortante.

Analisando também essa condição de carregamento, adota-se a mesma classificação do item B.2, ou seja, uma viga compacta.

$$V_{rd} \geq V_{sd} \quad \text{Condição de satisfação}$$

$$167,89 \geq 292 \quad \text{Condição insatisfeita}$$

Uma solução para chegar à condição de satisfação seria encontrar uma nova A_w .

$$V_{sd} = V_{rd}$$

$$292 = \frac{0,60 \times A_w \times f_y}{1,1} = 21,4$$

Para satisfação da estrutura a A_w precisaria de ser $21,4 \text{ m}^2$

B.6 - PERFIL VS

B.6.1 - Classificação da condição A e situação B a esforço cortante.

Como observado essa condição de carregamento, adota-se a mesma classificação do item B.3, ou seja, uma viga semcompacta.

$$V_{rd} \geq V_{sd} \quad \text{Condição de satisfação}$$

$$167,42 \geq 292 \quad \text{Condição insatisfeita}$$

$$V_{sd} = V_{rd}$$

$$292 = \frac{0,60 \times A_w \times f_y}{1,1} = 21,4$$

Para satisfação da estrutura a A_w precisaria de ser $21,4 \text{ m}^2$

B.7 - PERFIL I

B.7.1 - Classificação da condição 1 situação A, o esforço cortante.

A classificação da viga foi descrita no item B.1, tomando como verdadeira tal classificação tem-se como satisfeito a condição de verificação a esforço cortante.

$$V_{rd} \geq V_{sd} \quad \text{Condição de satisfação}$$

$$258,64 \geq 233,6 \quad \text{Condição satisfeita}$$

B.8 - PERFIL W

B.8.1 - Classificação da condição B e situação A, o esforço cortante.

Analisando também essa condição de carregamento e contorno, adota-se a mesma classificação do item B.2, ou seja, uma viga compacta.

$$V_{rd} \geq V_{sd} \quad \text{Condição de satisfação}$$

$$167,89 \geq 233,6 \quad \text{Condição insatisfeita}$$

$$V_{sd} = V_{rd}$$

$$233,6 = \frac{0,60 \times A_w \times f_y}{1,1} = 17,1$$

Para satisfação da estrutura a A_w precisaria de ser $17,1 \text{ m}^2$

B.9 - PERFIL VS

B.9.1 - Classificação engastada a esforço cortante com carregamento distribuído.

Como observado essa condição de carregamento e contorno, adota-se a mesma classificação do item B.3, ou seja, uma viga semicompacta.

$$V_{rd} \geq V_{sd} \quad \text{Condição de satisfação}$$

$$167,42 \geq 233,6 \quad \text{Condição insatisfeita}$$

$$V_{sd} = V_{rd}$$

$$233,6 = \frac{0,60 \times A_w \times f_y}{1,1} = 17,1$$

Para satisfação da estrutura a A_w precisaria de ser $17,1 \text{ m}^2$

B.10 - PERFIL I

B.10.1 - Classificação da condição B com a situação B esforço cortante.

A classificação da viga foi descrita no item B.1, tomando como verdadeira tal classificação tem-se como insatisfeita a condição de verificação a esforço cortante.

$$V_{rd} \geq V_{sd} \quad \text{Condição de satisfação}$$

$$258,62 \geq 584 \quad \text{Condição insatisfeita}$$

$$V_{sd} = V_{rd}$$

$$584 = \frac{0,60 \times A_w \times f_y}{1,1} = 42,8$$

Para satisfação da estrutura a A_w precisaria de ser $42,8 \text{ m}^2$.

B.11 - PERFIL W

B.11.1 - Classificação da condição B e situação B esforço cortante.

Analisando também essa condição de carregamento e contorno, adota-se a mesma classificação do item B.2, ou seja, uma viga compacta.

$$V_{rd} \geq V_{sd} \quad \text{Condição de satisfação}$$

$$167,89 \geq 584 \quad \text{Condição insatisfeita}$$

$$V_{sd} = V_{rd}$$

$$584 = \frac{0,60 \times A_w \times f_y}{1,1} = 42,8$$

Para satisfação da estrutura a A_w precisaria de ser $42,8 \text{ m}^2$.

B.11 - PERFIL VS

B.9.1 – Classificação da condição B e situação B a esforço cortante.

Como observado essa condição de carregamento e contorno, adota-se a mesma classificação do item B.3, ou seja, uma viga semicompacta.

$$V_{rd} \geq V_{sd} \quad \text{Condição de satisfação}$$

$$167,42 \geq 233,6 \quad \text{Condição insatisfeita}$$

$$V_{sd} = V_{rd}$$

$$233,6 = \frac{0,60 \times A_w \times f_y}{1,1} = 17,1$$

Para satisfação da estrutura a A_w precisaria de ser $17,1 \text{ m}^2$

ANEXOS

ANEXO 1- Ações Permanentes

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

Fonte: ABNT, 2008.

Notas

a

Entre os parênteses estão os valores dos coeficientes para ações permanentes favoráveis a segurança.

b

A temperatura citada não inclui a de equipamentos, mas deve ser considerado as ações decorrentes do uso e ocupação da edificação.

c

As combinações normais tem ações permanentes diretas não sendo favoráveis para segurança pode todas serem agrupadas com coeficiente 1,35 quando ações decorrentes do uso forem maiores que 5 kN/m^2 ou 1,40 quando não ocorrer isso. Combinações especiais ou de construção, os coeficientes passam a ser 1,25 e 1,30.

e

Ações truncadas são ações variáveis de distribuição, e valor dessa ação não possa ser maior que o limite correspondente.

ANEXO 2- Valores dos fatores de combinação e redução.

Ações		γ_{f2}^a		
		Ψ_0	Ψ_{1d}	Ψ_{2e}
Ações variáveis causadas pelo uso e ocupação	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^b	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ^c	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas (ver B.5.1)	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
	Vigas de rolamento de pontes rolantes	1,0	0,8	0,5
	Pilares e outros elementos ou subestruturas que suportam vigas de rolamento de pontes rolantes	0,7	0,6	0,4

Fonte: ABNT, 2008.

Notas

- ^a Valores reduzidos em função de combinações de ações: tais como o vento, sobrecarga de cobertura, carga acidental de piso e carga de equipamentos
- ^b Edificações residenciais de acesso restrito.
- ^c Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público.
- ^d Para estado-limite de fadiga (ver Anexo K), usar Ψ_1 igual a 1,0.
- ^e Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para Ψ_2 o valor zero.

ANEXO 3- Momento fletor resistente de cálculo de vigas de alma não-esbelta.

Fonte: ABNT, 2008.

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

Notas

$$1) \lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta^2}{I_y}}}$$

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

Onde,

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W}{E J}$$

$$C_w = \frac{I_y (d - t_f)^2}{4}, \text{ para seção I}$$

5) A tensão residual de compressão nas mesas, σ_r , deve ser tomada igual a 30% da resistência ao escoamento do aço utilizado.

6) Para perfis laminados:

$$M_{cr} = \frac{0,90 E k_c}{\lambda^2} W_c, \quad \lambda_y = 0,83 \sqrt{\frac{E}{\frac{(f_y - \sigma_r)}{k_c}}}$$

Para perfis soldados;

$$M_{cr} = \frac{0,90 E k_c}{\lambda^2} W_c, \quad \lambda_y = 0,95 \sqrt{\frac{E}{\frac{(f_y - \sigma_r)}{k_c}}}$$

com k_c conforme F2.

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}}, \text{ sendo } 0,35 \leq k_c \leq 0,76$$

8) b/t é a relação entre largura e espessura aplicável à mesa do perfil; no caso de seções I e H com um eixo de simetria, b/t refere-se à mesa comprimida (para mesas de seções I e H, b é a metade da largura total, para mesas de seções U, a largura total, para seções tubulares regulares, a largura da parte plana e para perfis caixão, a distância livre entre almas).