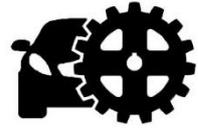




UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO –
Engenharia Mecânica - ITec
Disciplina MEC041 - Trabalho Final de
Graduação II



DESENVOLVIMENTO DE PLANILHA DE CÁLCULO PARA DEFINIÇÃO DE VIGAS METÁLICAS DE FRIGORÍFICOS

Autor 1 – Diego Vitali
125477@upf.br

Autor 2 – Prof. Dr. Márcio Walber / Área de Engenharia
mwalber@upf.br

Comissão Examinadora – Dr. Leandro Dóro Tagliari, Me. Guilherme Reschke do Nascimento

Junho, 2024

RESUMO

Dentro das engenharias cada vez mais é necessário a redução do *lead time* de projetos, e também a redução do número de horas na execução das tarefas, essas reduções refletem em prazos mais curtos e maior lucratividade. Na engenharia de projetos frigoríficos não é diferente, o ramo de alimentos está em constante expansão e o Brasil além de um grande produtor de alimentos também é um grande fabricante de equipamentos para processá-los. A linha de produção de um frigorífico é composta basicamente por equipamentos apoiados no piso e vários transportadores aéreos fixados em estrutura metálica independente, estes transportadores levam o produto suspenso passando por diversas áreas de processo até o setor de expedição. O intuito deste trabalho foi simplificar e antecipar a definição dos perfis de vigas desta estrutura independente que sustentará os transportadores, fornecendo aos projetistas uma planilha dinâmica que antecipe os resultados que serão obtidos pelo calculista em *softwares* específicos. A planilha foi desenvolvida de modo que os projetistas informem duas variáveis conhecidas por eles durante a fase de projeto, que são, a carga do produto transportado e o vão da viga, obtendo-se assim como dado de saída o perfil estrutural adequado. Os resultados principais atingidos com o projeto são a planilha de dimensionamento baseada na normativa ABNT NBR8800:2008, desenvolvida no *software Microsoft Office Excel*, e também uma tabela de resultados de bitolas com base em várias simulações de vão e carregamento.

Palavras chaves: estrutura; abate; suínos.

1 INTRODUÇÃO

A indústria frigorífica no Brasil desempenha um papel de destaque tanto na economia nacional quanto no cenário global. A produção e processamento de carne bovina, suína e de aves são atividades fundamentais para a economia brasileira, contribuindo significativamente para a geração de empregos, a movimentação financeira e as exportações do país.

O Brasil abriga uma impressionante quantidade de frigoríficos distribuídos por todo o território nacional. De acordo com dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) de 2021, registraram-se mais de 400 estabelecimentos frigoríficos no país com certificação do Sistema de Inspeção Federal SIF, sendo plantas de abate e unidades de processamento aptas a exportação (MAPA, 2021). Esse número é uma evidência clara da magnitude do setor frigorífico brasileiro.

O Brasil é uma potência na exportação de carne, liderando o mercado global em várias categorias. Na carne bovina, o país é consistentemente o maior exportador, tendo enviado mais de 2,5 milhões de toneladas no ano de 2019. Na carne de frango, o Brasil também é líder, destacando-se pela qualidade e eficiência, enquanto na carne suína, embora não lidere, possui uma posição de destaque, especialmente na Ásia. O Brasil exporta seus produtos de origem animal para mais de 180 países, essa posição de liderança e destaque nas exportações de carne ilustra a influência global da indústria de carnes brasileira. (ABIEC, 2021; ABPA, 2021).

O faturamento da indústria frigorífica brasileira é impressionante e demonstra sua importância para a economia nacional. Em 2020, o setor registrou um faturamento total de aproximadamente R\$ 286 bilhões, representando um aumento significativo em relação a anos anteriores (ABIEC, 2021). Esse valor reflete não apenas a produção massiva de carne, mas também a capacidade do setor de gerar empregos, movimentar a cadeia de suprimentos e contribuir para o crescimento econômico do país.

A destacada performance produtiva do Brasil reflete sua significativa presença no mercado internacional de carnes, consolidando-se como um dos maiores produtores e exportadores em todas as três categorias. Essa posição de destaque é fortalecida por uma estrutura de custos altamente competitiva em relação aos principais concorrentes globais.

A indústria frigorífica é composta grandes empreendimentos, que por sua vez alteram o contexto socioeconômico de uma região, gerando muitos empregos diretos e indiretos, que vão desde a mão de obra básica de produção até outras diversas áreas como engenharias, manutenção, áreas da saúde, altos cargos gerenciais e administrativos, entre outros. As plantas frigoríficas possuem grandes áreas construídas, com muita tecnologia envolvida, inclusive em plantas mais novas chegam a possuir em sua linha de produção robôs e equipamentos de alta precisão, essas tecnologias aumentam o rendimento de produção, entregando mais produto para comercialização, além de aumentar a qualidade, somando-se ao volume de produção um maior valor do produto final.

Os frigoríficos de forma simplificada são uma “linha de desmontagem”, essa linha é suspensa e mecanizada, onde o produto bruto é tratado, separado, inspecionado e processado, até ficar pronto para a comercialização. Por questões sanitárias e de facilidade de modularizações, essas linhas suspensas são sustentadas por estruturas de aço, geralmente pilares de perfil tubular e vigas laminadas feitas em perfil tipo I (W).

A indústria de equipamentos frigoríficos difere da indústria metálica convencional, a indústria metálica convencional trabalha com perfis de geometrias variáveis para aplicações em estruturas de galpões, lojas, fábricas, o emprego de vários tipos distintos de perfis tem o objetivo de deixar a estrutura mais leve e conseqüentemente utilizar menos matéria prima. Já a indústria de equipamentos frigoríficos tem seu foco principal na fabricação de equipamentos mais tecnológicos que possuem grande valor agregado, e em relação a estrutura metálica, que faz parte de seu portfólio, o foco principal é na padronização dos perfis, ou seja, ter um pequeno menu de perfis e que estes atendam a demanda, essa simplificação de perfis resulta em um processo mais rápido desde a venda, engenharia, fabricação, até a instalação.

O propósito deste trabalho é simplificar o processo da engenharia da indústria de equipamentos frigoríficos no que tange a área de estrutura metálica, dessa forma o objetivo é desenvolver uma planilha para a definição e padronização dos perfis metálicos que serão indicados nos projetos para a sustentação das linhas mecanizadas dos frigoríficos.

1.1 Justificativa e descrição do problema

O objetivo geral deste trabalho consiste no desenvolvimento uma planilha dinâmica simples e intuitiva para os projetistas antecipar a definição do perfil das vigas que serão utilizadas em seus projetos. Desta forma durante a fase de modelamento poderão incluir o perfil correto na maioria das situações, o que permitirá que antecipem a liberação para fabricação de parte da estrutura e também dos transportadores que serão fixados nestas vigas, melhorando o *lead time* do projeto.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste estudo consiste no desenvolvimento uma planilha dinâmica simples e intuitiva para o uso em projetos de sistemas estruturais frigoríficos permitindo o pré-dimensionamento das vigas para aplicação nestes projetos.

Para auxiliar o atendimento do objetivo geral, relacionam-se os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar e definir os dados de entrada da planilha;
- Realizar o cálculo e o dimensionamento das vigas estruturais seguindo as normas de projeto ABNT NBR:8800/2008;
- Desenvolver algoritmo de cálculo;
- Desenvolver uma tabela carga x comprimento informando a bitola (perfil) resultante de cada simulação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresenta-se a revisão bibliográfica, que faz a abordagem sobre os assuntos principais deste estudo, sendo eles os processos de um frigorífico, a evolução do peso dos suínos, a distância mínima entre os suínos que são o produto transportado e conceitos da ABNT NBR 8800/2008 para projetos de estrutura em aço.

2.1 Frigoríficos no Brasil

Os frigoríficos no Brasil têm uma longa história de desenvolvimento e evolução ao longo do tempo. Desde o início da produção de carne em escala industrial, esses estabelecimentos desempenham um papel fundamental na economia do país, gerando empregos e riquezas para a população. A história dos frigoríficos no Brasil começa no final do século XIX, com a instalação da primeira fábrica de conservas de carne bovina em São Paulo (OLIVEIRA, 2007).

Durante o século XX, a indústria frigorífica brasileira emergiu como um substituto para as charqueadas, graças à inovação tecnológica trazida pela refrigeração elétrica (ZUCCHI, 2010). Com o tempo, o transporte de carne refrigerada se tornou mais viável, impulsionando a exportação de carne bovina do Brasil para o mercado global, elevando o país ao posto de líder mundial em exportação de carne (BARCELLOS, 2011). Além disso, a abundância de matéria-prima tem sido um fator crucial para a posição de destaque da indústria no Brasil (BERTON et al., 2019).

Segundo Ferreira e Filho (2019), a indústria frigorífica do Brasil continua a demonstrar sua solidez e importância para a economia nacional. O destaque vai para o número de estabelecimentos que possuem o Sistema de Inspeção Federal (SIF). Os dados fornecidos pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), indicam um total de 431 frigoríficos distribuídos

em diversos estados brasileiros obtiveram a certificação do SIF. Dentre esses estados, os três com maior número de frigoríficos certificados são o Paraná, com 69 estabelecimentos, Minas Gerais, com 57, e São Paulo, com 51. Esses números refletem a importância contínua do setor frigorífico no país

Inaugurado em 2022, o frigorífico Frimesa em Assis Chateaubriand, Paraná, é um marco na indústria de processamento de carne suína na América Latina. Com investimento de 1,3 bilhão de reais é reconhecido como o maior e mais tecnológico de sua categoria, esta instalação ultramoderna é um exemplo de inovação. Sua capacidade de produção 550 suínos por hora com projeção para 1100, juntamente com os avanços tecnológicos incorporados consolidam o papel de destaque da indústria de carne suína (C.VALE, 2022).

Figura 1 - Frigorífico Frimesa maior frigorífico de suínos da América Latina.



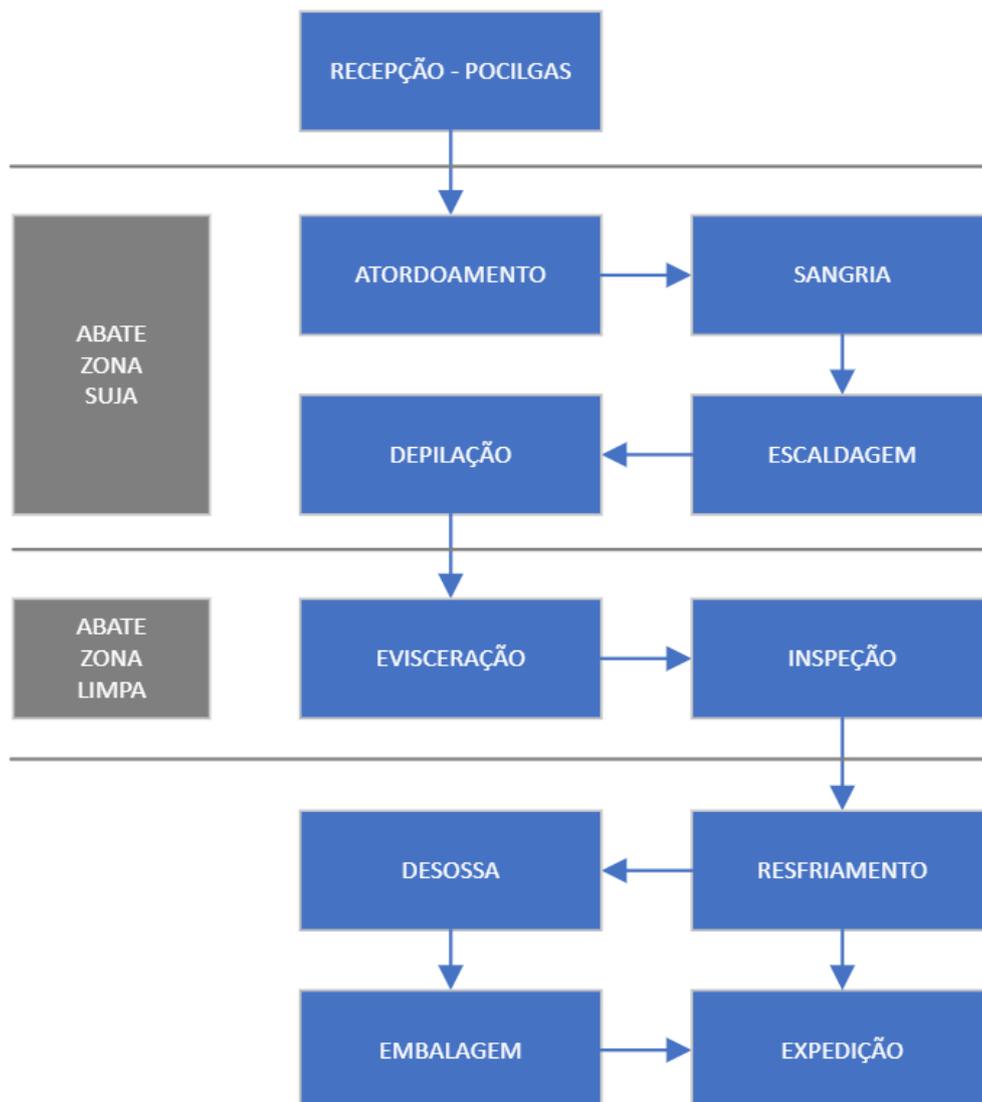
Fonte: C.Vale, 2022

Conforme ressaltado pela Associação Brasileira de Proteína Animal ABPA (2021), a automação de linhas de produção tem sido uma prioridade para muitas empresas do setor, resultando em processos mais ágeis e precisos. A implementação de maquinaria moderna e sistemas de controle de última geração contribui significativamente para otimizar o fluxo de trabalho e reduzir os custos de produção.

2.2 Distância mínima entre carcaças no sistema de transportadores aéreo em frigoríficos

O processo de abate de suínos é um tema de grande importância na indústria frigorífica. De acordo com Cê (2016), o abate de suínos é um processo complexo que envolve várias etapas, desde a insensibilização até o resfriamento final da carcaça. Durante essas etapas, é importante garantir que o animal seja tratado de forma humanitária e que a carne produzida seja segura para o consumo humano.

Figura 2 - Fluxograma do processo de abate de suínos.



Fonte: Adaptado de Gonzalez (2021)

Uma linha de produção em frigoríficos, em seu aspecto geral, representa um sistema mecanizado altamente estruturado que desempenha o papel fundamental de processar carnes e outros produtos de origem animal, desde o momento de chegada dos animais abatidos até a etapa de preparação dos produtos finais, prontos para serem disponibilizados no mercado (HUI, 2012).

Segundo Esper (2021), a automação sendo uma das tecnologias mais amplamente adotadas nos frigoríficos, desempenha um papel fundamental no aprimoramento da eficiência e na redução de custos operacionais. Por meio de equipamentos automatizados, é possível monitorar a velocidade das linhas, a temperatura, umidade e outros fatores que influenciam na qualidade da carne. Além disso, a automação auxilia na redução de mão de obra, minimizando erros humanos e aumentando a segurança no trabalho (DE SOUSA, 2021).

De acordo com Junqueira et al. (2019), a mecanização da trilhagem aérea é um método que tem ganhado destaque na indústria frigorífica. Este método consiste em suspender os suínos por meio de uma correia transportadora aérea para que possam ser insensibilizados, sangrados e posteriormente eviscerados. Ainda de acordo com Junqueira et al. (2019), a trilhagem aérea apresenta benefícios como a redução do tempo de abate, aumento da eficiência e segurança no processo.

Figura 3 - Transportador aéreo sustentado em estrutura metálica em uma desossa de suínos.



Fonte: O Presente Rural (2021)

Segundo Lawrie (2005), um frigorífico de suínos é composto por diversas etapas, que vão desde a chegada do animal vivo até a expedição de carnes congeladas e produtos industrializados. A estrutura metálica é responsável por sustentar a trilhagem aérea que transporta os suínos, no qual o início ocorre na região da sangria e termina no início do processo de desossa, onde as carcaças são removidas da trilhagem aérea para serem cortadas em mesas. Nesse percurso, existem regiões importantes onde a distância entre as carcaças é variável e, conseqüentemente, a carga nessas regiões depositadas na estrutura metálica também são variáveis. As regiões que possuem diferentes distanciamentos entre suínos são divididas em três: Abate, Departamento de Inspeção Final e Câmaras (MAPA, 1995).

A etapa de abate, compreende desde o momento da sangria até a entrada das câmaras de resfriamento. É importante que seja observada a distância adequada entre os suínos durante essa etapa. Esses requisitos incluem a relação entre a capacidade de abate, o tempo e a distância percorrida durante a escaldagem, que determinam a razão de um metro entre as carcaças (MAPA, 1995).

O Departamento de Inspeção Final (DIF) é uma área específica no processo de abate de suínos, destinada para carcaças que apresentaram algum indício de doença na linha de produção (LAWRIE, 2005). Essas carcaças são separadas da linha de produção e colocadas em uma trilhagem aérea específica dentro desta região onde serão reinspeccionadas pelo veterinário (MAPA 1995). Conforme esta Portaria, para a trilhagem aérea do DIF deve ser considerada uma distância de dois metros lineares entre as carcaças, com o objetivo de evitar possíveis contaminações, uma vez que são carcaças suspeitas de possuir doenças (MAPA, 1995).

Na área de câmaras de resfriamento de frigoríficos de suínos, onde as carcaças são resfriadas, é permitido que elas se toquem, uma vez que todas já foram inspecionadas (MAPA, 1995). De acordo com essa portaria, a distância entre as carcaças nesta região deve ser de 0,33m, permitindo-se três carcaças por metro linear de trilho.

Figura 4 - Carcaças de suínos dentro de uma câmara de resfriamento.



Fonte: Biesus (2018)

2.3 Evolução do peso suínos para abate

O aumento no peso médio de abate dos suínos tem impactado diretamente a produtividade da cadeia suinícola brasileira. Com animais mais pesados, é possível produzir mais carne por lote e reduzir o número de animais abatidos, o que resulta em uma maior eficiência produtiva e redução de custos para os produtores (SANTOS FILHO, 2018).

De acordo com o estudo de Mores et al. (2016), a média de peso de abate de suínos no Brasil em 2014 foi de 116,6 kg. Já em um levantamento mais recente feito pelo CEPEA (Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada) em 2021, foi apontado uma média de peso de 130,9 kg vivo para os suínos abatidos no país.

Ainda segundo Mores et al. (2016), a região Sul do Brasil é a que apresenta a maior média de peso de abate, devido à concentração de grandes empresas frigoríficas e tecnologias aplicadas na criação. Enquanto na região Nordeste, por apresentar um número maior de produtores independentes e de menor porte, tem uma média de peso de abate menor.

Mesmo as regiões mais tradicionais têm implantado aumentos no peso do abate dos animais, para melhorar a qualidade das suas operações financeiras na indústria de processamento de suínos abatidos. A tendência nacional de aumento do peso de suínos ao abate pode ser observada na Figura 5.

Figura 5 - Evolução do peso médio de abate de suínos no Brasil.



Fonte: Agroseres Multimix, 2021

Segundo Santos Filho et al. (2018), o peso ótimo de abate de suínos no Brasil, na década de 1990, estava entre 100 kg e 120 kg de peso vivo. Entretanto, com o avanço tecnológico e a aplicação de novas técnicas de produção, como ajustes das exigências nutricionais e o uso de aditivos melhoradores do desempenho e da carcaça, a curva de deposição de carne magra e de gordura foi retardada, o que pode afetar o efeito do peso de abate sobre o desempenho e a qualidade da carcaça (SILVA et al., 2012). Em um estudo mais recente realizado em condições comerciais, Santos Filho et al. (2018) determinaram que o peso ótimo de abate para suínos sob restrição alimentar ocorreu aos 135 kg de peso vivo, evidenciando a redução do efeito negativo do aumento do peso sobre as características de desempenho e carcaça, proporcionado pelo avanço tecnológico em relação a décadas anteriores. Esses resultados demonstram a importância da evolução tecnológica na produção de suínos e na definição do peso ótimo de abate.

Figura 6 - Suínos em fase de terminação para abate.



Fonte: Agroseres Multimix, 2021

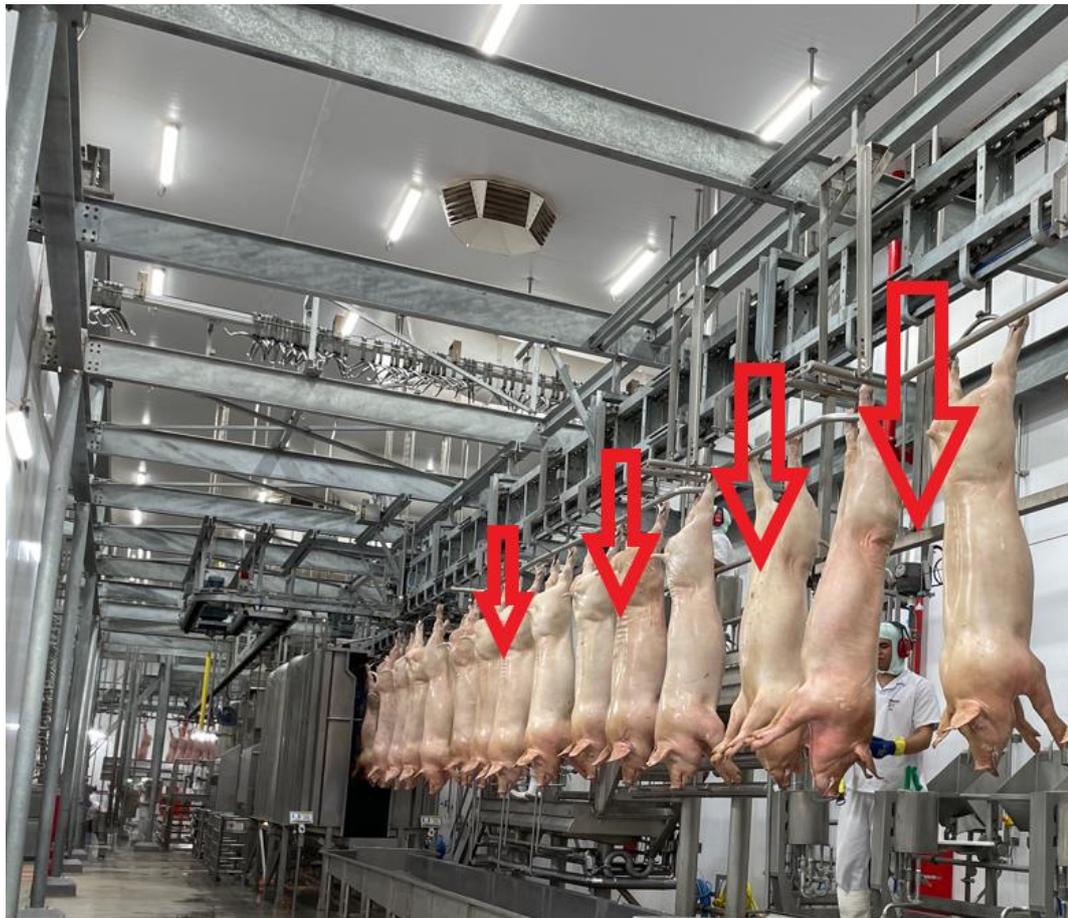
Com os avanços na genética, nutrição e manejo na suinocultura, há uma necessidade de revisão do modelo de abate e processamento na indústria brasileira. O abate de suínos com pesos mais elevados pode resultar em melhores rendimentos econômicos sem prejuízos ao desempenho dos animais, qualidade da carcaça e carne. A evolução genética pode contribuir para o abate de suínos mais jovens e pesados (DUTRA JR. et al, 2001).

2.4 Dimensionamento de vigas metálicas submetidas a flexão simples

A análise e dimensionamento de vigas metálicas submetidas a flexão constituem um componente crucial no âmbito da engenharia estrutural, exercendo um papel central no projeto de uma ampla gama de estruturas, abrangendo desde edifícios e pontes até complexas instalações industriais. Como afirmado por Hibbeler (2013), o projeto de estruturas metálicas requer uma compreensão sólida dos princípios de flexão e da resposta das vigas metálicas às forças aplicadas.

A flexão é um fenômeno intrínseco à resposta de vigas metálicas às forças aplicadas, resultando na sua deformação e curvatura ao longo do comprimento. A precisão no cálculo das cargas, esforços e deformações é um requisito fundamental para assegurar a segurança, estabilidade e eficácia dessas estruturas metálicas.

Figura 7 - Estrutura de sustentação em um frigorífico sujeita a flexão.



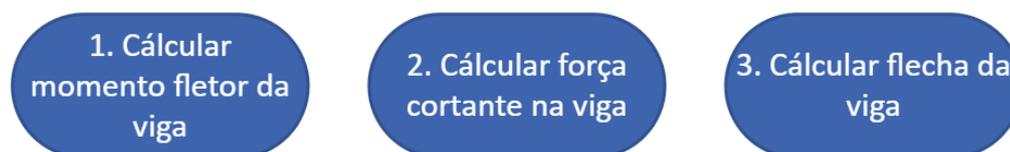
Fonte: Adaptado de C.Vale, 2022

Nesse contexto, é de extrema importância compreender as três etapas-chaves no cálculo de vigas metálicas submetidas à flexão. Conforme mencionado por Timoshenko (1965), o cálculo da força cortante é o ponto de partida para a análise de vigas metálicas, envolvendo a determinação das forças horizontais atuantes na viga. Paralelamente, o cálculo da flecha está relacionado com a análise da deformação vertical da viga sob a ação das cargas, sendo um elemento crítico na preservação da integridade estrutural, como observado pelo autor.

Por fim, o cálculo do momento fletor é essencial para a avaliação da curvatura resultante da aplicação das forças, conforme destacado por Beer (2019). Essas etapas são fundamentais para o correto dimensionamento de vigas metálicas, desempenhando um papel crucial na garantia da capacidade da estrutura em resistir a cargas e condições de serviço com segurança e eficácia" (HIBBELER, 2013). O entendimento do cálculo de vigas submetidas à flexão é vital na formação

de engenheiros estruturais e é essencial para preservar a integridade das estruturas metálicas em todo o mundo.

Figura 8 - Etapas de cálculo para viga biapoiada.



Fonte: Adaptado de ABNT, 2008

Para realizar esse processo de forma adequada, é importante seguir as normas técnicas pertinentes, como a ABNT NBR 8800:2008 - "Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios" (ABNT, 2008). Essa norma estabelece os requisitos para o projeto, fabricação e montagem de estruturas de aço e mistas de aço e concreto.

2.4.1 Cálculo do momento fletor

A análise do momento fletor representa um dos estágios cruciais na engenharia estrutural, envolvendo a aplicação de equações de equilíbrio e fórmulas de flexão que estão intrinsecamente ligadas às características específicas da viga em questão, como seu material, perfil e a natureza e magnitude das cargas que são aplicadas. Como destacado por Beer (2019), essa análise requer uma abordagem metódica e precisa, uma vez que o momento fletor pode ter implicações significativas na segurança e estabilidade da estrutura como um todo.

A compreensão profunda do momento fletor desempenha um papel fundamental no processo de garantir que uma viga seja adequadamente dimensionada para suportar as diversas cargas e condições de serviço a que estará sujeita. Evitar deformações excessivas é de importância primordial, já que essas deformações podem comprometer a integridade da estrutura. É por esse motivo que engenheiros estruturais direcionam uma atenção especial para o cálculo do momento fletor, assegurando que as vigas metálicas desempenhem sua função com segurança e eficácia (BEER, 2019).

Segundo a ABNT NBR 8800:2008, é necessário atender aos requisitos de dimensionamento para perfis submetidos a momento fletor, sendo a resistência ao momento fletor uma das principais considerações. A fórmula para cálculo é a seguinte:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (1)$$

Onde:

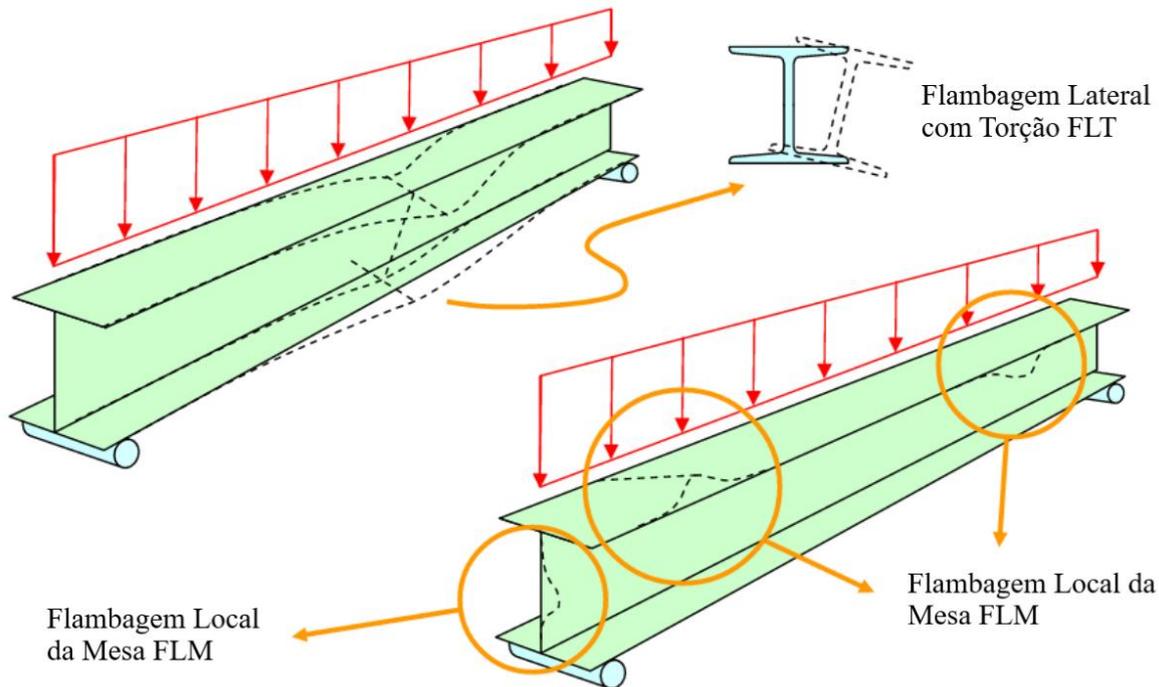
M_{Sd} : Momento fletor solicitante de cálculo;

M_{Rd} : Momento fletor resistente de cálculo.

Conforme a norma NBR 8800:2008, item 5.4.2.1, que define configurações básicas de instabilidade, ou estados limites, que devem ser verificadas em peças fletidas. Com essas configurações listadas a seguir, a norma brasileira tenta abranger as situações possíveis que devem ser atendidas para determinar o M_{Rd} :

- Flambagem Local da Alma – FLA – situação em que a alma de seção se torna instável;
- Flambagem Local da Mesa – FLM – condição em que a mesa comprimida se torna instável;
- Flambagem Lateral com torção – FLT - Instabilidade por flexo-torção, quando há uma combinação dos dois efeitos simultaneamente e a rotação da seção pela instabilidade.

Figura 9 - Flambagens FLA, FLM e FLT.



Fonte: Adaptado de Souza, 2016

De acordo com a NBR 8800:2008, as seções transversais das vigas de aço em alma cheia podem ser classificadas quanto à influência da flambagem local:

- Seção compacta;
- Seção semicompacta;
- Seção esbelta.

Essa classificação é definida pelos parâmetros λ , λ_p e λ_r , com os seguintes critérios:

- $\lambda \leq \lambda_p$: seção compacta;
- $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$: seção semicompacta;
- $\lambda > \lambda_r$: seção esbelta.

Onde:

λ_p : parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação.

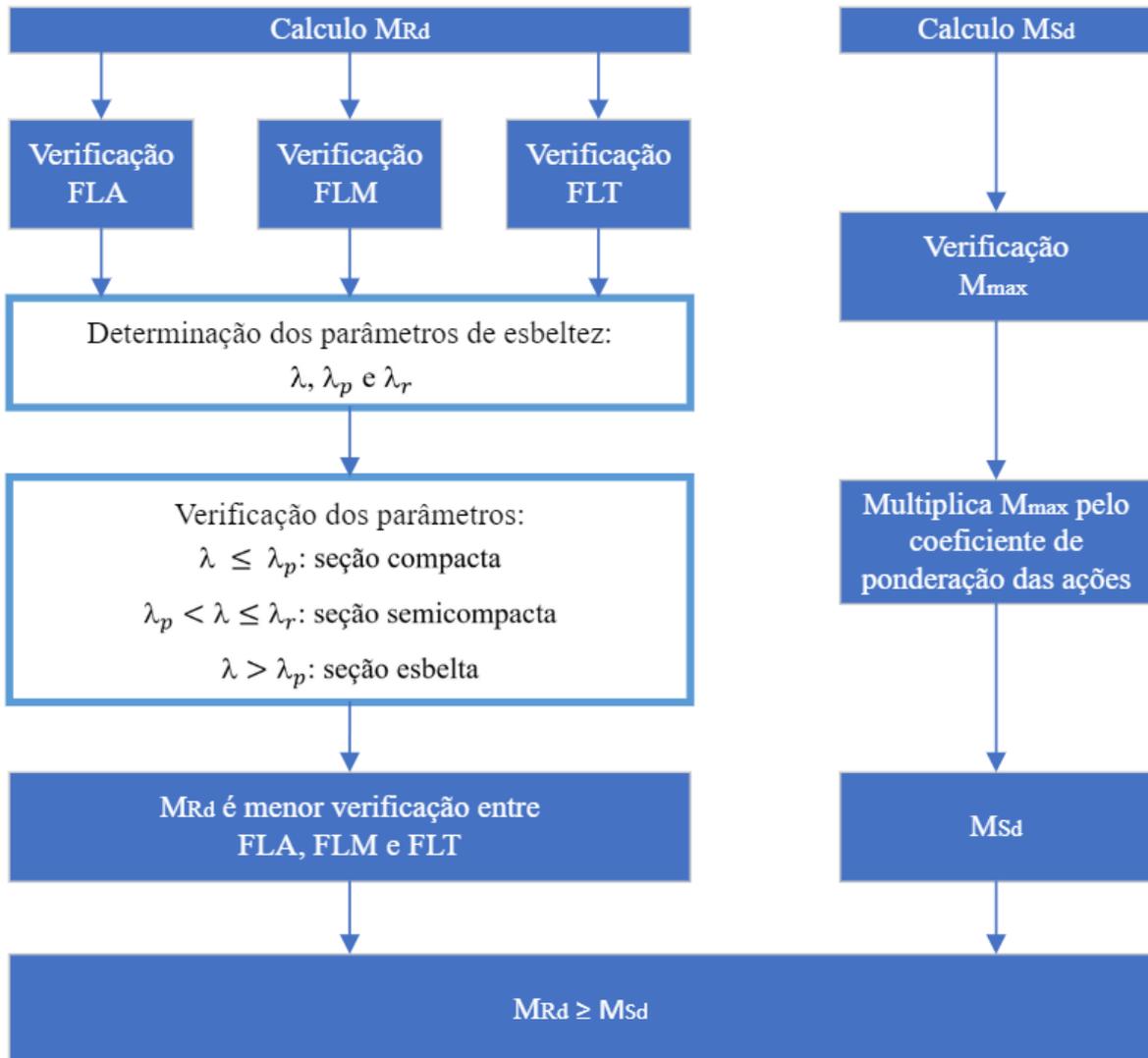
λ_r : parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento.

Os parâmetros referentes ao momento fletor resistente de cálculo, assim como os detalhes de cada expressão, são apresentados com a devida referência à norma ABNT NBR 8800:2008.

2.4.1.1 Fluxograma de cálculo

O dimensionamento pode ser guiado pelo fluxograma apresentado na sequência, com a referida coordenada de localização na norma ABNT NBR 8800:2008. O fluxograma é adequado para perfis I simétricos comprimidos sujeitos à flexão, segundo o eixo x da seção transversal do perfil.

Figura 10 - Fluxograma das etapas de cálculo do momento fletor.

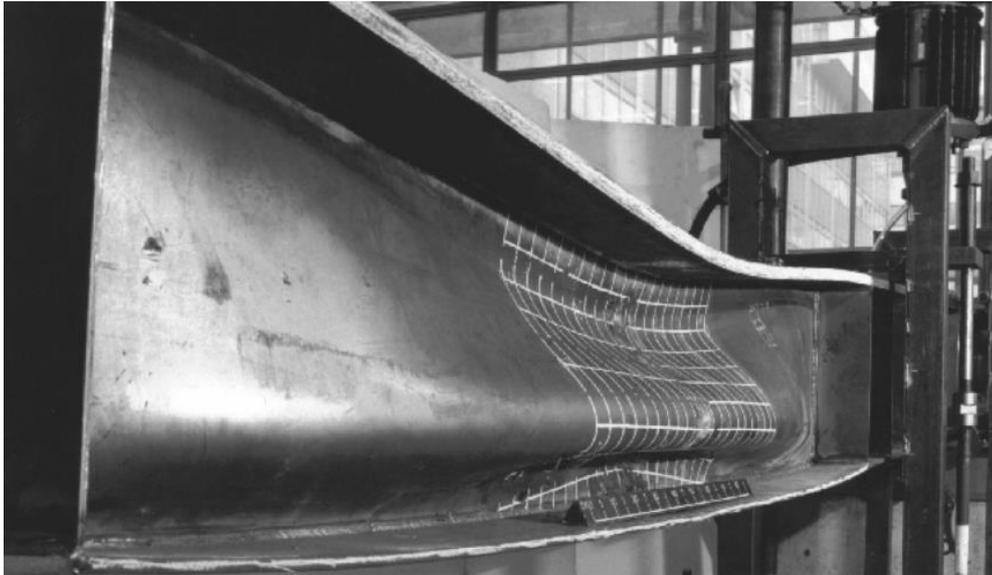


Fonte: Adaptado de Chamberlain 2013

2.4.1.2 Verificação de flambagem local da alma - FLA

Conforme estipulado na ABNT NBR 8800:2008, é crucial verificar a alma de uma barra quando submetida a forças de compressão provenientes de uma carga localizada agindo na mesa comprimida. Essa verificação se torna imperativa caso o deslocamento lateral relativo entre a mesa comprimida e a mesa tracionada não esteja restrito no ponto onde a força é aplicada. Isso se faz necessário para assegurar que a estrutura atenda ao estado-limite último de flambagem lateral, garantindo a segurança e a integridade da mesma.

Figura 11 - Flambagem da alma de uma viga de perfil I.



Fonte: Lima 2004

A seguir estão relacionadas as fórmulas para determinação dos parâmetros de esbeltez e a verificação dos parâmetros.

1. Determinação dos parâmetros de esbeltez λ_{FLA} , λ_p e λ_r :

a) Parâmetro de esbeltez:

$$\lambda_{FLA} = \frac{h}{t_w} \quad (2)$$

Onde:

h : altura da alma, distância entre as faces internas das mesas menos o valor dos raios de concordância entre mesa e alma;

t_w : espessura da alma.

b) Parâmetro de esbeltez correspondente a plastificação:

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (3)$$

Onde:

E : Módulo de elasticidade do aço;

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

c) Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento:

$$\lambda_r = 5,7 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (4)$$

2. Verificação dos parâmetros:

a) Se $\lambda_{FLA} \leq \lambda_p$ (seção compacta), então considerar a seguinte equação para a definição do momento fletor resistente de cálculo:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{al}} \quad (5)$$

Onde:

M_{pl} : Momento fletor de plastificação da seção transversal;

γ_{al} : Coeficiente de ponderação para estado-limites últimos relacionados a escoamento, flambagem e instabilidade.

O coeficiente de ponderação das resistências no estado-limite último para escoamento, flambagem e instabilidade (γ_{al}) é encontrado na tabela 3 da ABNT NBR 8800:2008, que para combinações normais o valor é 1,10.

$$M_{pl} = Z \cdot f_y \quad (6)$$

Onde:

Z : Módulo de resistência plástico;

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

b) Se $\lambda_p < \lambda_{FLA} \leq \lambda_r$ (seção semicompacta), considerar:

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{al}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{al}} \quad (7)$$

C_b é o fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme, conforme itens 5.4.2.3 e 5.4.2.4 da norma ABNT NBR 8800:2008. No entanto, como sugerido por Pfeil (2008), é admissível adotar o fator $C_b=1$ em prol da segurança. Pois na fase elástica, tal consideração não compromete a capacidade de resistência a flexão da estrutura.

M_r é o momento fletor correspondente ao início do escoamento, é determinado pela equação:

$$M_r = f_y \cdot W \quad (8)$$

Onde:

W : Módulo de resistência elástico;

f_y : Resistência ao escoamento do aço.

c) Se $\lambda_{FLA} > \lambda_r$ (seção esbelta), não aplicável à FLA ver o anexo H da NBR 8800:2008.

2.4.1.3 Verificação de flambagem local da mesa – FLM

Segundo a ABNT NBR 8800:2008, o momento fletor resistente de cálculo, para o estado-limite último de flambagem local da mesa comprimida é determinado pelas fórmulas abaixo.

Figura 12 - Flambagem da mesa de uma viga de perfil I.



Fonte: Adaptado de Lima 2004

1. Determinação dos parâmetros de esbeltez λ_{FLM} , λ_p e λ_r :

a) Parâmetro de esbeltez:

$$\lambda_{FLM} = \frac{b}{t} \quad (9)$$

Onde:

b : é a largura da mesa, para mesa de seções I e H, b é a metade da largura total;

t : é a espessura da mesa.

b) Parâmetro de esbeltez correspondente a plastificação:

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (10)$$

c) Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento para perfil laminado:

$$\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{f_y - \sigma_r}} \quad (11)$$

Segundo a NBR 8800:2008, Nota 5 da tabela G.1 do anexo G, o valor de σ_r , tensão residual de compressão nas mesas, deve ser tomada igual a 30% da resistência ao escoamento do aço utilizado

2. Verificação dos parâmetros:

a) Se $\lambda_{FLM} \leq \lambda_p$ (seção compacta), então considerar a equação (5) para a definição do momento fletor resistente de cálculo.

b) Se $\lambda_p < \lambda_{FLM} \leq \lambda_r$ (seção semicomcompacta), então considerar a equação (7).

O momento fletor correspondente ao início do escoamento M_r para FLM e FLT deve ser determinado pela equação:

$$M_r = (f_y - \sigma_r) \cdot W \quad (12)$$

c) Se $\lambda_{FLM} > \lambda_r$ (seção esbelta), considerar:

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{al}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{al}} \quad (13)$$

M_{cr} é o momento fletor de flambagem elástica e para perfis laminados é definido pela equação:

$$M_{cr} = \frac{0,69E}{\lambda^2} W_c \quad (14)$$

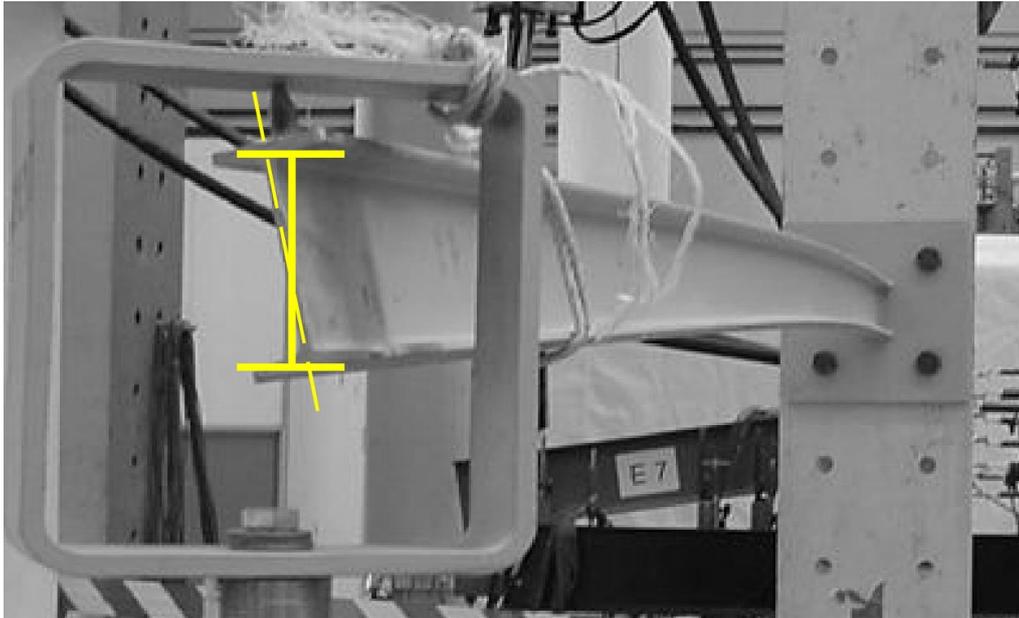
Onde:

W_c : módulo de resistência elástico do lado comprimido da seção, relativo ao eixo de flexão.

2.4.1.4 Verificação de flambagem lateral com torção – FLT

Segundo a ABNT NBR 8800:2008, o momento fletor resistente de cálculo, para o estado-limite último de flambagem lateral com torção é determinado pelas fórmulas abaixo.

Figura 13 - Flambagem lateral com torção de uma viga de perfil I.



Fonte: Lima 2004

1. Determinação dos parâmetros de esbeltez λ_{FLT} , λ_p e λ_r :

a) Parâmetro de esbeltez:

$$\lambda_{FLT} = \frac{L_b}{r_y} \quad (15)$$

Onde:

L_b : distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção (comprimento destravado);

r_y : raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão.

b) Parâmetro de esbeltez correspondente a plastificação:

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (16)$$

c) Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento:

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \times \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (17)$$

Onde:

I_y : momento de inércia da seção em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma;

J : constante de torção da seção transversal;

C_w : constante de empenamento da seção transversal;

β_1 defini-se pela equação:

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r)W_x}{EJ} \quad (18)$$

Para definir a constante C_w para seções I aplica-se a seguinte equação:

$$C_w = \frac{I_y(d - t_f)^2}{4} \quad (19)$$

Onde:

d : altura externa da seção, medida perpendicularmente ao eixo de flexão;

t_f : espessura da mesa.

2. Verificação dos parâmetros:

a) Se $\lambda_{FLT} \leq \lambda_p$ (seção compacta), então considerar a equação (5) para a definição do momento fletor resistente de cálculo.

b) Se $\lambda_p < \lambda_{FLT} \leq \lambda_r$ (seção semicompacta), considerar:

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{al}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{al}} \quad (20)$$

c) Se $\lambda_{FLT} > \lambda_r$ (seção esbelta), considerar:

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{al}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{al}} \quad (21)$$

Para definir M_{cr} considerar:

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \quad (22)$$

Onde:

L_b : comprimento destravado.

Para calcular a constante de empenamento da seção transversal (C_w) considerar:

$$C_w = \frac{I_y(d - t_f)^2}{4} \quad (23)$$

Onde:

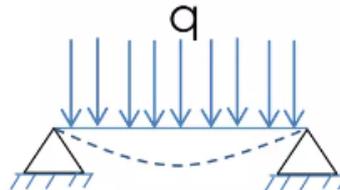
d : altura externa da seção, medida perpendicularmente ao eixo de flexão;

t_f : espessura da mesa.

2.4.1.5 Momento fletor solicitante de projeto - M_{sa}

O momento fletor solicitante de cálculo, muitas vezes referido simplesmente como momento fletor, é uma grandeza essencial na análise estrutural e de engenharia. Trata-se do momento fletor máximo que uma viga, coluna, ou outro elemento estrutural pode experimentar sob uma determinada carga ou combinação de cargas (HIBBELER, 2018).

Figura 14 - Ilustração viga biapoiada com carga uniforme.



Fonte: Adaptado de Hibbeler, 2018

Para calcular o momento fletor máximo em uma viga biapoiada com carga distribuída utiliza-se a seguinte fórmula:

$$M_{max} = \frac{q \cdot L^2}{8} \quad (24)$$

Onde:

q : carga atuante na viga;

L : comprimento da viga.

De acordo com a ABNT NBR 8800:2008, deve ser aplicado coeficiente de ponderação das ações no estado-limite último conforme tabela 1 da mesma normativa, que indica para o agrupamento de ações permanentes e variáveis coeficiente de ponderamento (γ_f) igual a 1,50.

$$M_{Sd} = M_{max} \cdot \gamma_f \quad (25)$$

2.4.2 Cálculo da força cortante

O esforço cortante, também conhecido como força cortante ou força de cisalhamento, representa uma força interna que age tangencialmente sobre a área da seção transversal de um membro estrutural (HIBBELER, 2018). Esse tipo de esforço é diretamente relacionado à resistência do material ao cisalhamento e desempenha um papel fundamental na geração de tensões de cisalhamento e na indução de deformações por cisalhamento. Segundo Beer (2019) para determinar a força cortante em uma viga metálica, os engenheiros empregam princípios de equilíbrio e análise de esforços. O cálculo preciso da força cortante é essencial para garantir que a estrutura seja capaz de resistir às cargas aplicadas, evitando falhas catastróficas. De acordo com a ABNT NBR 8800:2008, para o dimensionamento de vigas submetidas a força cortante, deve ser atendida a seguinte condição:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (26)$$

Onde:

V_{Sd} : é a força cortante solicitante de cálculo;

V_{Rd} : é a força cortante resistente de cálculo.

De acordo com a ABNT NBR 8800:2008 para seções de vigas I, a força cortante resistente de cálculo, V_{Rd} , é dada por:

- para $\lambda \leq \lambda_p$:

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{al}} \quad (27)$$

- para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$:

$$V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V_{pl}}{\gamma_{al}} \quad (28)$$

- para $\lambda > \lambda_r$:

$$V_{Rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \frac{V_{pl}}{\gamma_{al}} \quad (29)$$

Onde:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (30)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_V E}{f_y}} \quad (31)$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_V E}{f_y}} \quad (32)$$

k_V : 5,0 para almas sem enrijecedores transversais;

V_{pl} : é a força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento;

h : é a altura da alma, tomada igual à distância entre as faces internas das mesas nos perfis soldados e igual a esse valor menos os raios de concordância entre mesa e alma nos perfis laminados;

t_w : é a espessura da alma;

γ_{al} : Coeficiente de ponderação para estado-limites últimos relacionados a escoamento, flambagem e instabilidade.

A força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento é dada por:

$$V_{pl} = 0,60A_w f_y \quad (33)$$

Nessa equação, A_w é a área efetiva de cisalhamento, que deve ser tomada igual a:

$$A_w = d t_w \quad (34)$$

Onde:

d : é a altura total da seção transversal;

t_w : é a espessura da alma.

Para o cálculo da força cortante solicitante de cálculo, V_{Sd} , para vigas biapoiadas de carregamento uniforme utilizar:

$$V_{Sd} = \frac{q}{2} \cdot \gamma_f \quad (35)$$

Onde:

q : carga atuante na viga;

γ_f : coeficiente de ponderação = 1,50.

2.4.3 Cálculo da flecha

O cálculo da flecha em vigas constitui uma etapa crucial no desenvolvimento de projetos estruturais, desempenhando um papel fundamental na garantia da segurança e eficiência das estruturas. A flecha representa a deformação vertical da viga sob a ação de cargas aplicadas, e sua análise é de vital importância para assegurar que a estrutura permaneça dentro dos limites aceitáveis de deformação (HIBBELER, 2018). Seguindo a norma da ABNT NBR 8800:2008, que estabelece critérios fundamentais para o projeto de estruturas metálicas, o deslocamento máximo permitido para vigas de cobertura é de $L/250$ e deve ser atendida a seguinte condição:

$$Y_{Sd} \leq Y_{Rd} \quad (36)$$

Onde:

Y_{Sd} : é o deslocamento vertical solicitante de cálculo;

Y_{Rd} : é o deslocamento vertical máximo a ser considerado de acordo com a aplicação.

De acordo com a ABNT NBR 8800:2008 o deslocamento máximo permitido para vigas de cobertura é de $L/250$.

$$Y_{Rd} = \frac{L}{250} \quad (37)$$

Onde:

L : é o vão teórico entre apoios.

Para calcular o deslocamento solicitante de cálculo em uma viga biapoiada com carga uniforme, deve-se utilizar a fórmula abaixo:

$$Y_{Sd} = \frac{5qL^4}{384EI} \quad (38)$$

Onde:

q : é a carga linear da viga;
 L : é o vão teórico entre apoios;
 E : Módulo de elasticidade do aço;
 I_y : momento de inércia da seção em relação ao eixo x do perfil.

2.5 Considerações sobre a revisão bibliográfica

Ao concluir este capítulo, torna-se evidente que os frigoríficos desempenham um papel de extrema relevância na indústria brasileira, representando um setor robusto com numerosos empreendimentos. Com foco inegável na qualidade, essa indústria emerge como um campo promissor para investimentos em novas instalações e na modernização das já existentes.

Como destacado, um frigorífico abrange diversos setores, desde a chegada do animal vivo até a expedição de carnes congeladas. Esses setores apresentam necessidades distintas em relação à movimentação e sustentação de carga, sendo todas essas determinações de manipulação baseadas em normas do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, que estabelece regras específicas a serem rigorosamente seguidas.

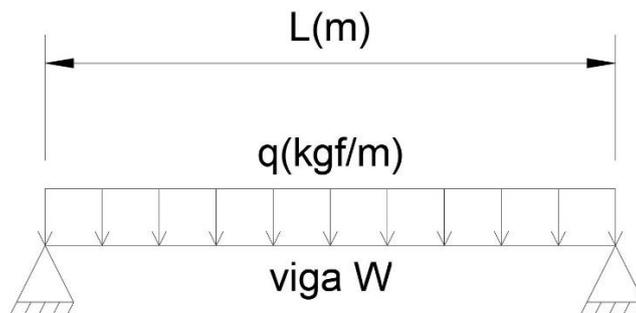
Além disso, abordou-se a evolução do peso de abate de suínos. Observa-se uma clara tendência de aumento de peso ao longo dos anos, impulsionada pela evolução genética, aprimoramento na nutrição e a qualidade do manejo. Esses fatores combinados contribuem para uma evolução gradual do peso ótimo de abate.

Outro ponto relevante é a diversidade de análises necessárias para verificar o cálculo de vigas metálicas. Esses cálculos são essenciais para garantir a capacidade das vigas em suportar as cargas aplicadas. Para que uma viga seja aprovada no cálculo, sua resistência de cálculo deve exceder as solicitações de cálculo, em análises que incluem o momento fletor, força cortante e deslocamento vertical. Essas verificações são fundamentais para assegurar a robustez e confiabilidade estrutural das vigas utilizadas nos frigoríficos.

3 DESENVOLVIMENTO DA PLANILHA DE CÁLCULO

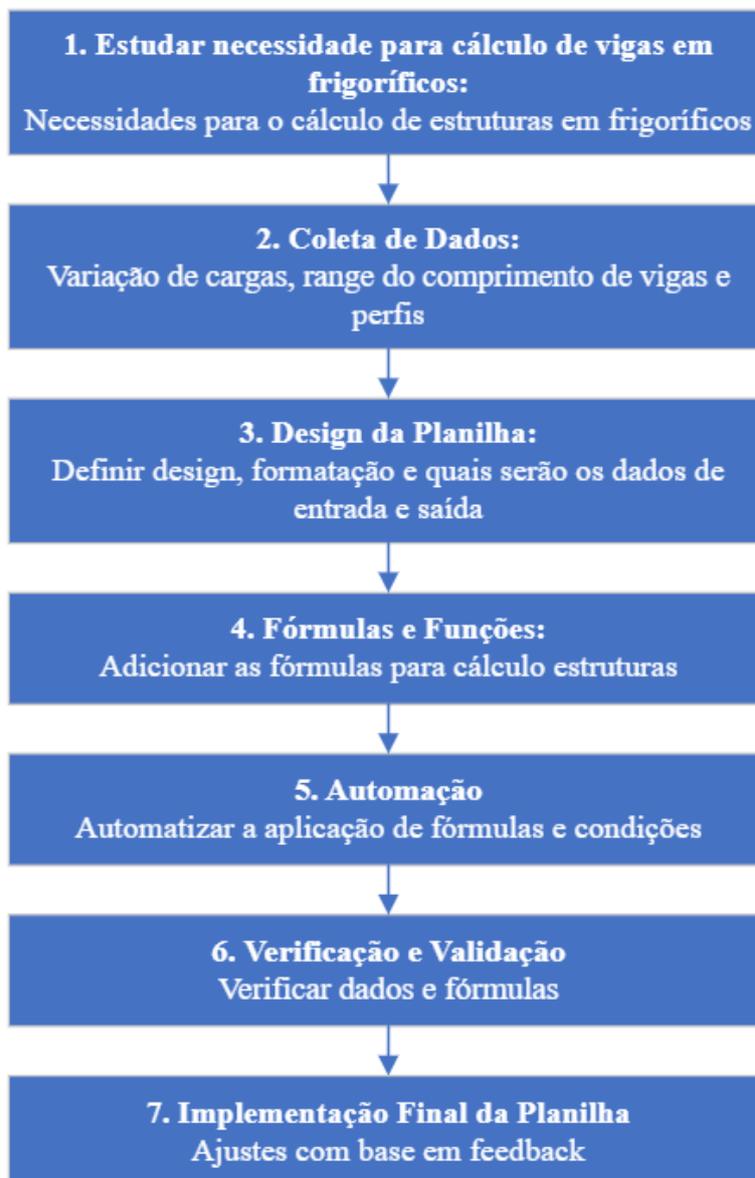
Para o desenvolvimento da planilha de cálculo para vigas biapoiadas de carga linear conforme diagrama de corpo livre indicado na Figura 15, buscou-se fazer a divisão em 7 etapas. A Figura 16 mostra o fluxograma para o desenvolvimento da planilha. Este fluxograma delinea as etapas essenciais no processo de criação, abrangendo desde a definição dos objetivos até a implementação final da planilha. Cada fase é projetada para garantir a precisão dos cálculos, a automação eficiente e a adaptação da planilha às nuances específicas de projetos em frigoríficos.

Figura 15 - Diagrama de corpo livre base para planilha de cálculo



Fonte: Autor

Figura 16 – Fluxograma para desenvolvimento da planilha.



Fonte: Autor

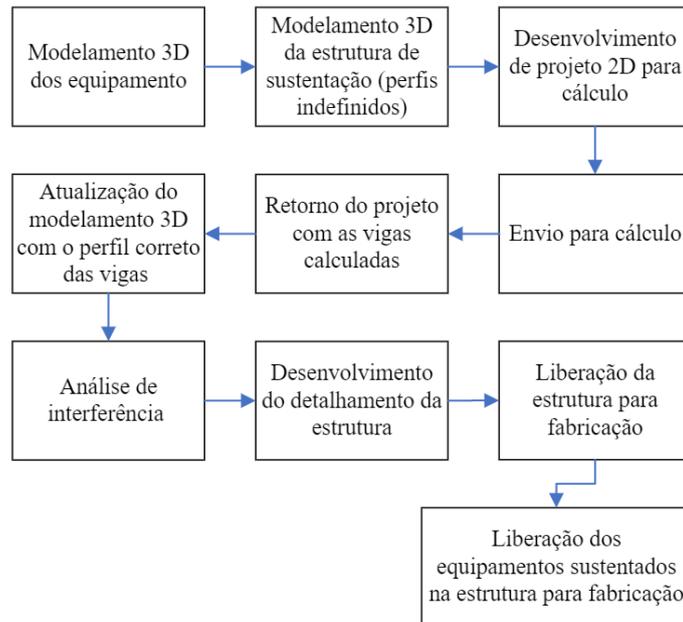
3.1 Estudo da necessidade para cálculo de vigas em frigoríficos

Os frigoríficos desempenham um papel crucial na cadeia de produção alimentícia, sendo responsáveis pelo armazenamento, processamento e distribuição de produtos perecíveis. Em meio a essa complexa infraestrutura, o cálculo estrutural emerge como um elemento vital para assegurar não apenas a integridade física das edificações, mas também a eficiência operacional e, por conseguinte, a qualidade dos produtos armazenados.

À medida que os projetos evoluem, a demanda por uma redução no *lead time* para execução torna-se cada vez mais presente. Essa pressão é impulsionada pela necessidade de atender às expectativas dos clientes, cumprir as demandas de produção de fábrica e, ao mesmo tempo, otimizar a eficiência ao diminuir as horas dedicadas ao projeto. Essa abordagem estratégica resulta em maior lucratividade e eficácia global nos processos de construção e operação.

O fluxo do projeto de estruturas dentro da engenharia de frigorífico é extenso. O exemplo apresentado na Figura 17 ilustra um fluxograma típico para o projeto de estruturas, delineando as diversas etapas necessárias para garantir a qualidade.

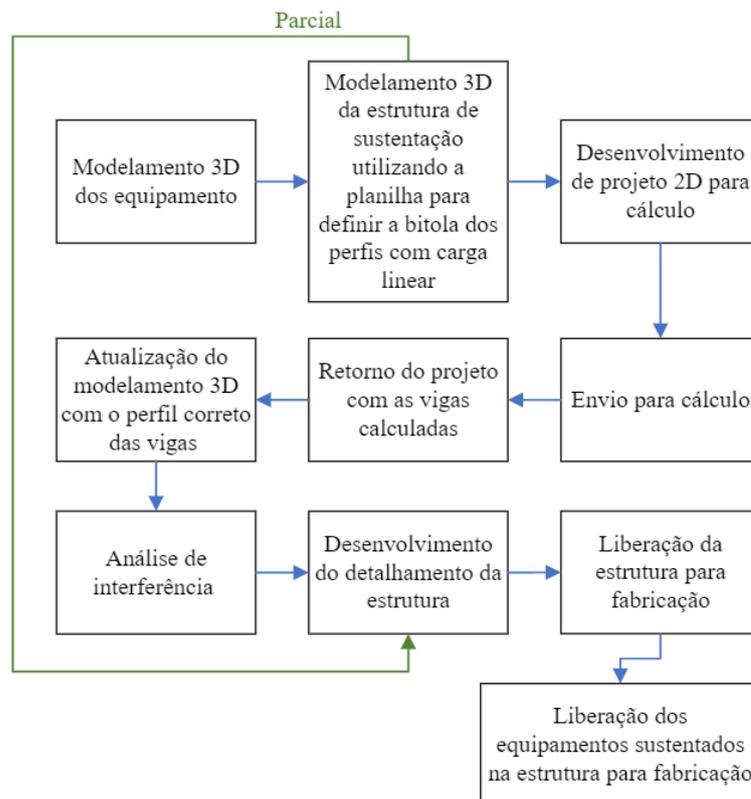
Figura 17 - Fluxograma de projeto de estruturas.



Fonte: Autor

O propósito da planilha de cálculo é facilitar a utilização pelos projetistas durante o processo de modelagem 3D. Isso implica na definição, nesta fase inicial, das partes da estrutura cujos perfis estão submetidos a um carregamento uniforme, e então, estes não serão alterados. Essa abordagem possibilita a liberação parcial da estrutura para a fabricação, incluindo os transportadores que serão fixados nessas vigas. O fluxograma abaixo ilustra como a aplicação da planilha tem como objetivo que haja uma parcial das vigas que avancem várias etapas dando vazão ao projeto.

Figura 18 - Proposta de fluxograma pós planilha.



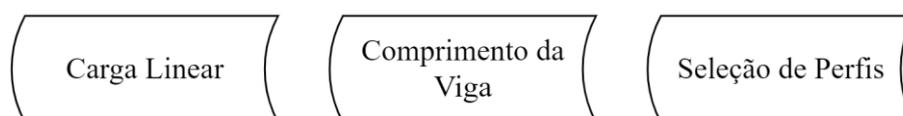
Fonte: Autor

Na planilha serão informadas duas variáveis conhecidas pelos projetistas, carga do produto transportado e vão da viga, obtendo como dado de saída o perfil estrutural adequado. Desta forma os ajustes de projeto durante o cálculo final serão menores, o que permitirá que os projetistas antecipem a liberação para fabricação de parte da estrutura e dos transportadores que serão sustentados nesta, melhorando o *lead time* do projeto.

3.2 Coleta de dados

Nesse tópico serão abordados os dados fundamentais que serão a base para os cálculos a serem executados. Esses dados serão categorizados em três variáveis essenciais que alimentarão integralmente o sistema de cálculo. Estas variáveis compreendem a carga linear, o comprimento da viga e a seleção de perfis laminados.

Figura 19 - Variáveis a serem consideradas na planilha.



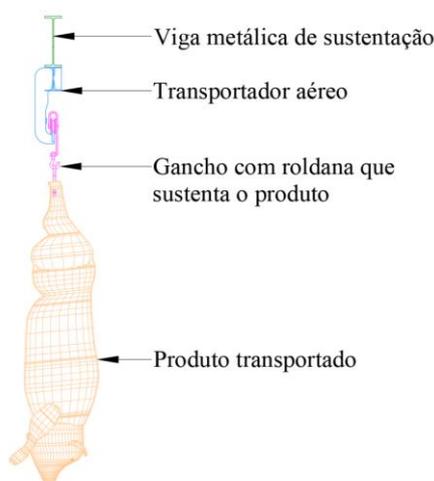
Fonte: Autor

A precisão e relevância desses dados são cruciais para garantir a eficácia dos cálculos a serem realizados no sistema. A carga linear, representando a força aplicada sobre a viga, é um fator determinante para a capacidade estrutural. O comprimento da viga, por sua vez, influencia diretamente a distribuição das cargas e, conseqüentemente, a resposta da estrutura. A escolha cuidadosa dos perfis laminados, considerando suas propriedades físicas e capacidade de carga, desempenha um papel vital na adequação da estrutura às demandas específicas do projeto. Ao compreender a interrelação dessas variáveis, é possível realizar cálculos precisos e otimizar o desempenho estrutural, atendendo aos padrões de segurança e eficiência exigidos.

3.2.1 Cargas

Na análise da carga linear, é imprescindível considerar os componentes que constituem o carregamento. Estes incluem o produto transportado, o transportador aéreo, o conjunto de gancho e roldana responsáveis por sustentar o produto no transportador, além da própria viga metálica que suporta integralmente esse conjunto. A compreensão minuciosa de cada elemento desta carga linear é essencial para uma avaliação precisa e eficaz da capacidade de carga da estrutura como um todo.

Figura 20 - Ilustração de um sistema de transporte de frigorífico de suínos.

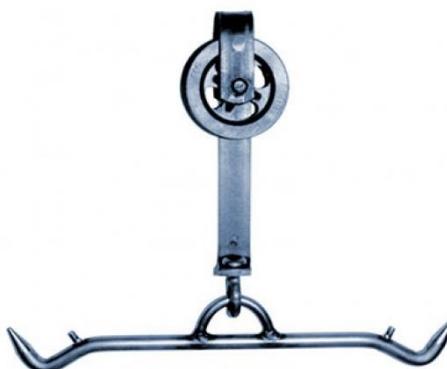


Fonte: Autor

A carga que exercerá a maior influência nos cálculos é representada pelo peso do produto transportado, sendo, no caso de um frigorífico de suínos, o próprio animal. Segundo Santos Filho et al. (2018), destaca-se que o peso ótimo para o abate de suínos sob restrição alimentar ocorre em torno de 135 kg de peso vivo. Uma análise do gráfico apresentado na Figura 5 revela uma evolução gradual, indicando uma tendência para o aumento do peso médio. De acordo com Dutra Jr. et al. (2001), a evolução genética desempenha um papel significativo, podendo contribuir para o abate de suínos mais jovens e mais pesados. Esses insights destacam a importância de considerar não apenas o peso médio atual, mas também as tendências e fatores genéticos que possam impactar a carga ao longo do tempo.

Já o conjunto conhecido como carretilha com balancim, composto por gancho e roldana, exibe uma variação de peso relativamente reduzida em relação à carga total. No mercado, é possível encontrar conjuntos que variam entre 2,5 e 5 kg por unidade.

Figura 21 - Carretilha com balancim.



Fonte: Nardimac (2023)

Para o transportador aéreo há uma variedade grande destes presentes no mercado, o transportador pode ser mecanizado ou não, quando mecanizado é composto por um perfil de chapa dobrada, barra chata para o rolamento da carretilha e a corrente que faz a carretilha rolar sobre a barra, quando não é mecanizado é composto por um perfil I laminado e barra chata. A carga linear varia de acordo com o modelo do transportador essa variação gira entorno de 20 a 50 kgf/m.

Portanto, para a consideração de cargas adotou-se considerar os seguintes parâmetros:

- Carga do produto (suíno): 135 kgf/unidade;
- Carga do conjunto carretilha + balancim: 5 kgf/unidade;
- Carga do transportador aéreo: 50 kgf/metro.

Para a definição de quantas unidades de produto haverá por metro linear deve-se seguir a Portaria 711 (MAPA, 1995).

- Abate: 1 suíno/metro;
- Departamento de Inspeção Federal DIF: 2 suínos/metro;
- Câmaras de resfriamento: 3 suínos por metro.

Portando a consideração de carga (q) por setor do frigorífico ficou da seguinte forma:

Tabela 1 - Definição de cargas por setor frigorífico

Tabela de cargas lineares por setor frigorífico	
Setor	Carga por metro
Abate	190 kgf/m
DIF	330 kgf/m
Câmaras de resfriamento	470 kgf/m

Fonte: Autor

Dessa forma temos definidos as cargas que é a primeira variável da planilha de cálculo.

3.2.2 Comprimento da viga

Nesse tópico há dois importantes fatores que devem ser analisados, que são a disponibilidade no mercado de comprimento de perfis W, e as limitações dimensionais para galvanização.

3.2.2.1 Comprimento de perfis disponíveis no mercado

Com uma demanda crescente nos setores civil, industrial e estrutural, os Perfis Vigas "W" laminados I e H, com comprimento padrão de 12 metros, conquistam uma posição significativa no mercado. Este tipo de perfil se destaca pela sua capacidade de oferecer economia, agilidade, resistência, robustez e estética, atendendo às diversas necessidades desses segmentos em constante evolução (AÇOMINAS, 2023).

O material tornou-se cada vez mais popular em construções a seco, sendo empregado em elementos que vão desde peças para maquinários e fundações até estacas, prédios, residências modernas e galpões industriais. Sua versatilidade e desempenho contribuem para a eficiência e durabilidade das estruturas construídas.

Além das vigas padrão de 12 metros, o mercado também oferece opções com comprimento reduzido, como vigas de 6 metros, proporcionando flexibilidade na escolha de acordo com as exigências específicas de cada projeto. Essa diversidade de opções ressalta a adaptabilidade desses perfis às diversas aplicações e demandas do mercado da construção.

3.2.2.2 Dimensões máximas para galvanização

As dimensões máximas de um perfil para galvanização podem variar dependendo do processo de galvanização utilizado e das instalações específicas da empresa prestadora desse serviço. A galvanização é um processo de revestimento de metais com zinco para protegê-los da corrosão, e as dimensões dos perfis podem influenciar a eficácia desse processo.

Figura 22 - Etapas do processo de galvanização a fogo.



Fonte: Beretta (2023)

Em geral, as dimensões máximas de um perfil para galvanização dependem de fatores como o tamanho do tanque de imersão disponível na instalação de galvanização, em geral há no mercado tanques para peças grandes que variam de 12 a 13 metros de comprimento.

Dessa forma para a variável comprimento de viga, adotaremos como comprimento máximo 12 metros em função dos perfis comercializados e do processo de galvanização.

3.2.3 Seleção de perfis

O perfil W, também conhecido como *wide flange shapes*, consiste em aços estruturais que seguem normas tanto nacionais quanto estrangeiras para sua produção, sendo a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) uma das referências. Esses perfis são fabricados com aço ASTM-A-572gr50, uma escolha de alta resistência que se revela essencial para sua aplicação em diversas áreas da construção civil.

Versáteis, os perfis W, assim como outros da mesma categoria, como os perfis "I", "U" e "H", são empregados em construções de pequeno, médio e grande porte, mesmo sendo mais leve que os perfis tradicionais. Sua aplicação varia desde edifícios de múltiplos andares até a construção de galpões, casas e outras estruturas.

Os perfis W possuem várias informações tabeladas o que também facilita para a execução dos cálculos.

Tabela 2 - Tabela de perfis W

BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b _f mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm ²	EIXO X - X				EIXO Y - Y				r _t cm	I _t cm ⁴	ESBELTEZ	
				t _w mm	t _f mm				I _x cm ⁴	W _x cm ³	r _x cm	Z _x cm ³	I _y cm ⁴	W _y cm ³	r _y cm	Z _y cm ³			MESA-λ _t b _f /2t _f	ALMA-λ _w d'/t _w
W 150 x 13,0	13,0	148	100	4,3	4,9	138	118	16,6	635	85,8	6,18	96,4	82	16,4	2,22	25,5	2,60	1,72	10,20	27,49
W 150 x 18,0	18,0	153	102	5,8	7,1	139	119	23,4	939	122,8	6,34	139,4	126	24,7	2,32	38,5	2,69	4,34	7,18	20,48
W 150 x 22,5 (H)	22,5	152	152	5,8	6,6	139	119	29,0	1229	161,7	6,51	179,6	387	50,9	3,65	77,9	4,10	4,75	11,52	20,48
W 150 x 24,0	24,0	160	102	6,6	10,3	139	115	31,5	1384	173,0	6,63	197,6	183	35,9	2,41	55,8	2,73	11,08	4,95	17,48
W 150 x 29,8 (H)	29,8	157	153	6,6	9,3	138	118	38,5	1739	221,5	6,72	247,5	556	72,6	3,80	110,8	4,18	10,95	8,23	17,94
W 150 x 37,1 (H)	37,1	162	154	8,1	11,6	139	119	47,8	2244	277,0	6,85	313,5	707	91,8	3,84	140,4	4,22	20,58	6,64	14,67
W 200 x 15,0	15,0	200	100	4,3	5,2	190	170	19,4	1305	130,5	8,20	147,9	87	17,4	2,12	27,3	2,55	2,05	9,62	39,44

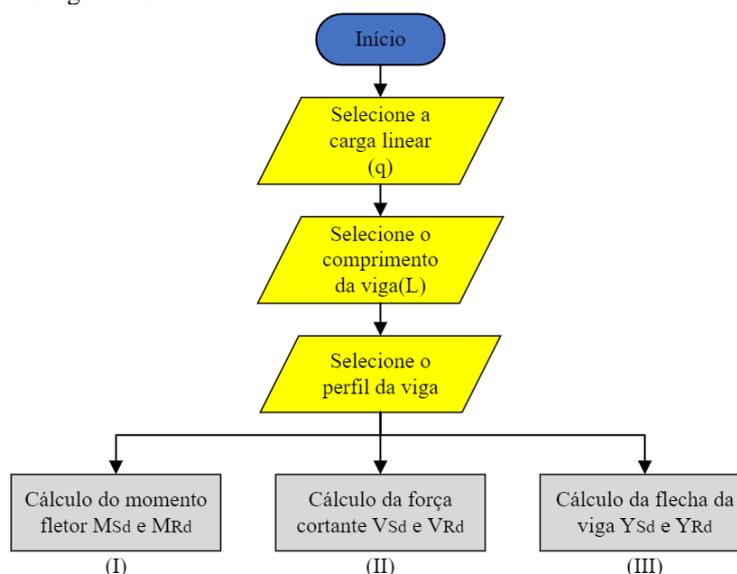
Fonte: Adaptado de Gerdau

3.3 Algoritmo de cálculo

Com base nos conceitos explorados nos capítulos anteriores, foi possível desenvolver um algoritmo que é a base para a elaboração da planilha de cálculos. A seguir, são apresentadas as etapas do algoritmo desenvolvido.

A primeira parte consiste na seleção do carregamento, do comprimento da viga e o perfil da viga. Como base nas escolhas serão realizados os cálculos solicitante e resistente de cálculo para o momento fletor, a força cortante e o deslocamento da viga.

Figura 23 - Parte inicial do algoritmo.

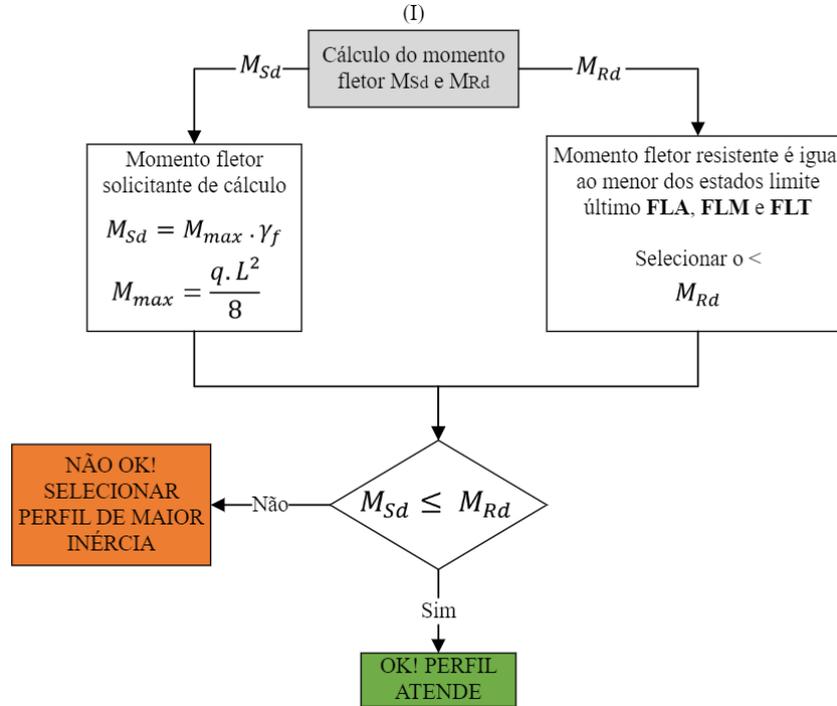


Fonte: Autor

No processo de determinação do momento fletor, realiza-se o cálculo tanto do momento fletor solicitante quanto do momento fletor resistente para cada estado limite último (ELU). Esses estados limites incluem a flambagem local da alma (FLA), a flambagem local da mesa (FLM) e a

flambagem lateral com torção (FLT). Após a obtenção dos valores do momento fletor resistente de cálculo para cada estado limite último (FLA, FLM e FLT), é possível identificar e selecionar o menor valor resistente de cálculo para ser comparado com a solicitação em questão.

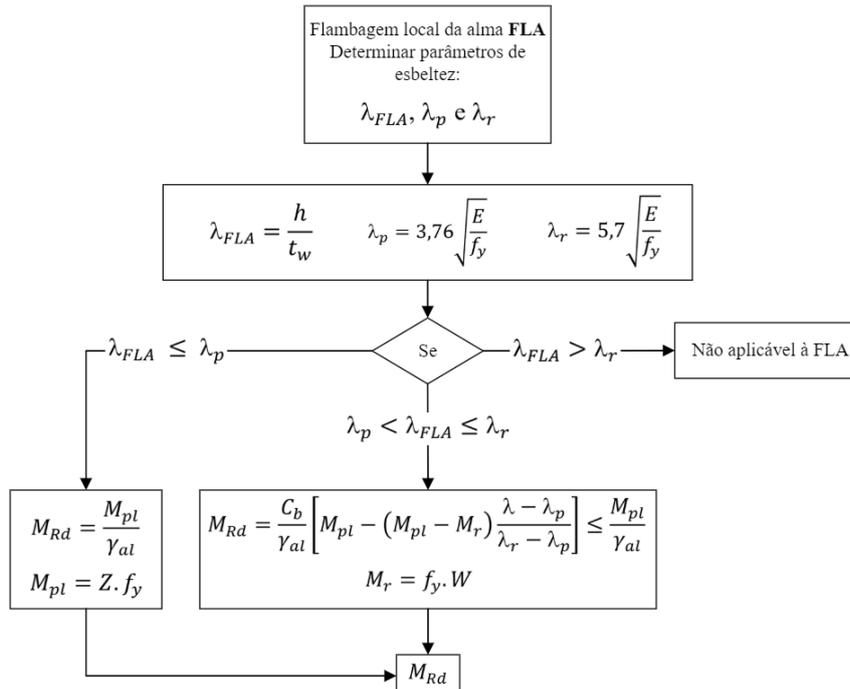
Figura 24 – Algoritmo parte I, cálculo do momento fletor.



Fonte: Autor

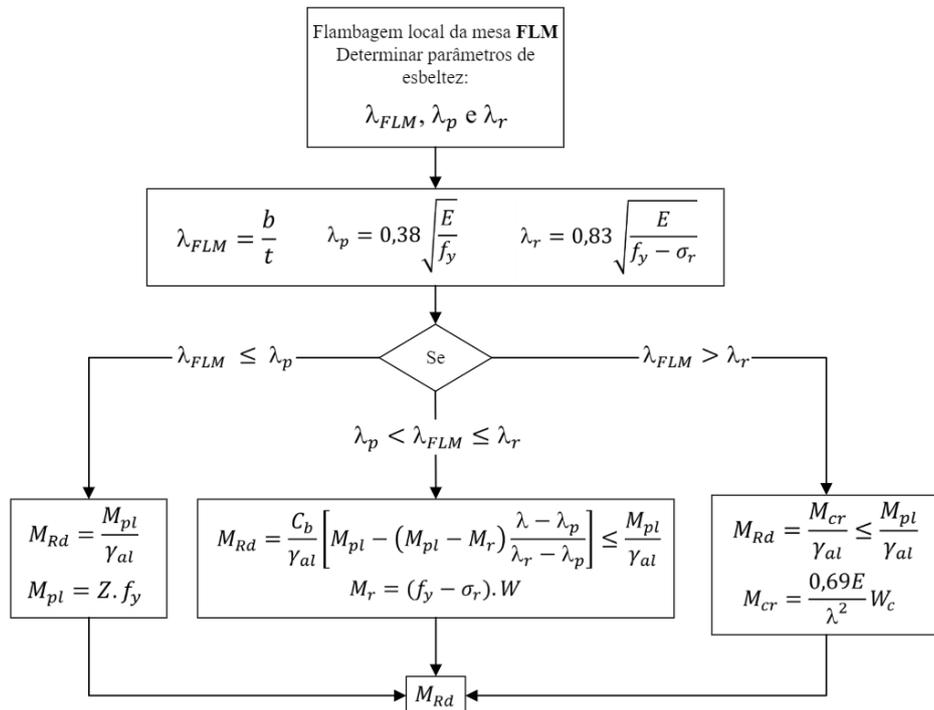
A seguir apresenta-se o resultado do algoritmo para o cálculo da flambagem local da alma (FLA - Figura 25), da flambagem local da mesa (FLM - Figura 26) e da flambagem lateral com torção (FLT - Figura 27).

Figura 25 - Algoritmo, cálculo da flambagem local da alma FLA.



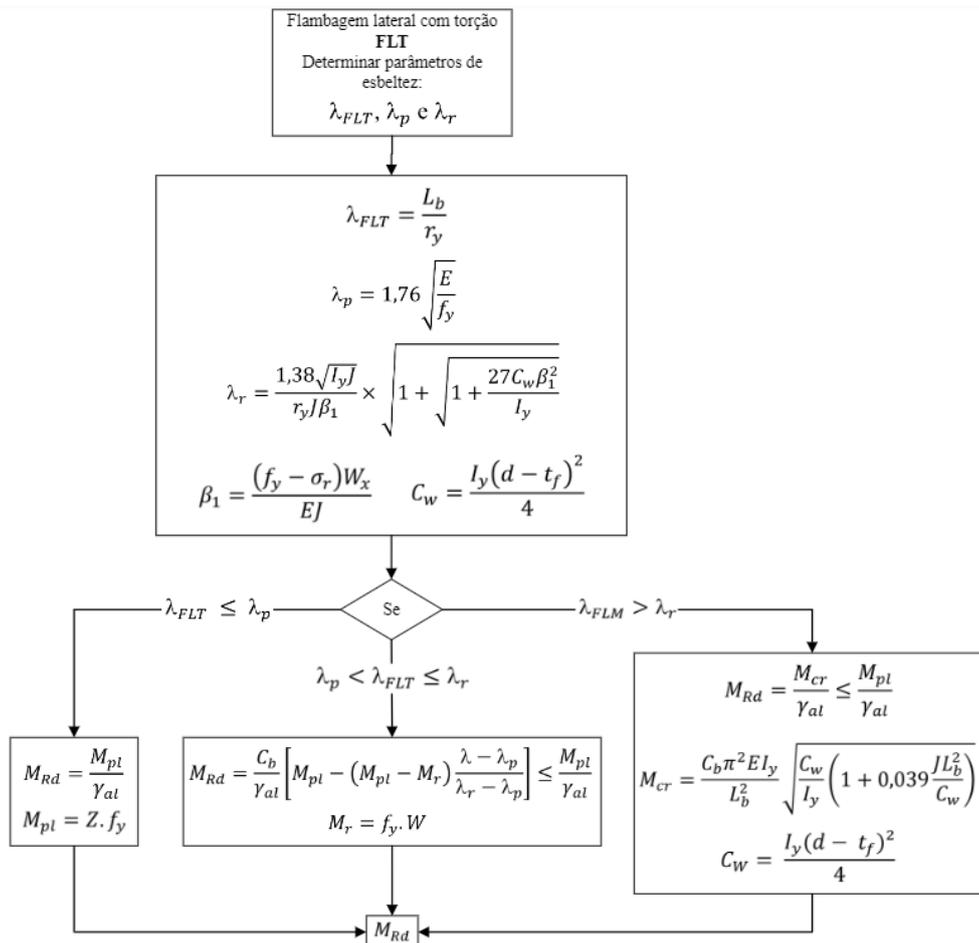
Fonte: Autor

Figura 26 - Algoritmo, cálculo da flambagem local da mesa FLM.



Fonte: Autor

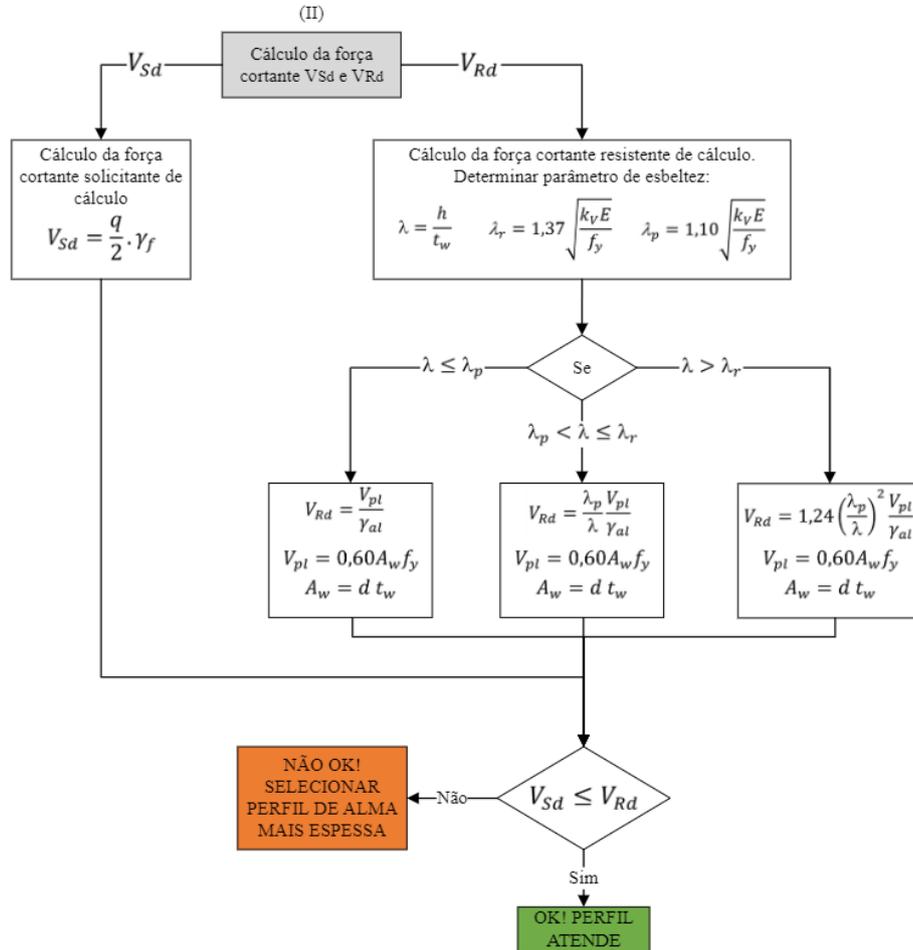
Figura 27 - Algoritmo, cálculo da flambagem lateral com torção FLT.



Fonte: Autor

A parte II do algoritmo abrange o cálculo da força cortante. Assim como no caso do momento fletor, realiza-se o cálculo e a comparação entre a sollicitação e a resistência para verificar a adequação da viga.

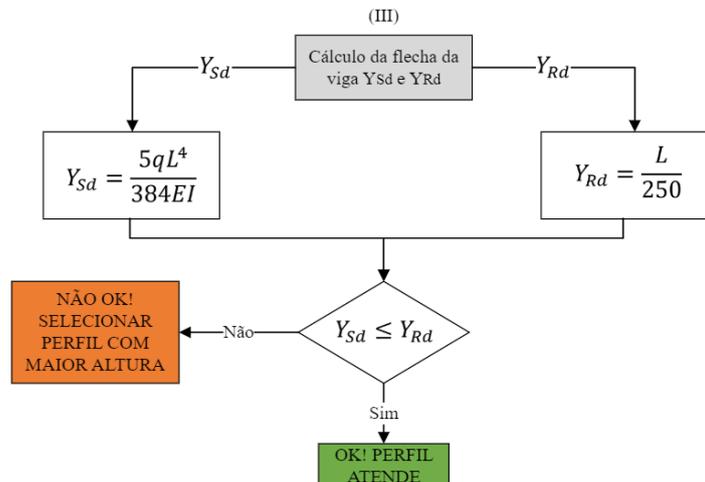
Figura 28 - Algoritmo parte II, cálculo da força cortante.



Fonte: Autor

E, por fim, apresenta-se a parte III do algoritmo onde é verificado a sollicitação e a resistência da viga em relação ao deslocamento.

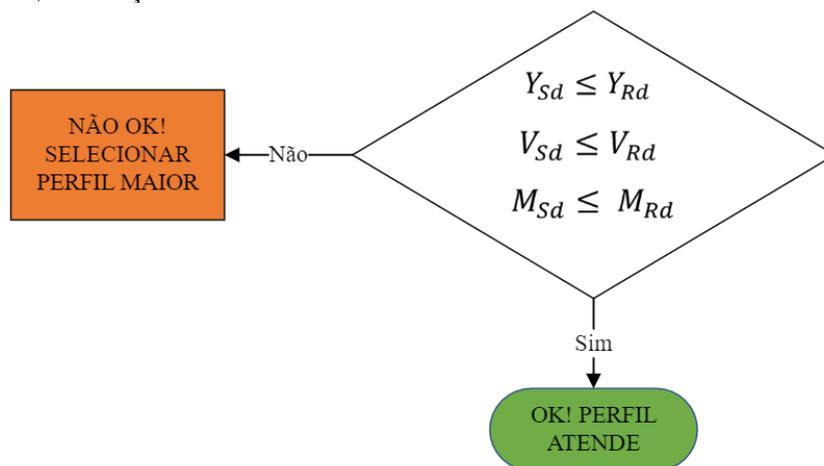
Figura 29 - Algoritmo parte III, cálculo do deslocamento.



Fonte: Autor

Após a realização de todos os cálculos para as solicitações e resistências, procede-se à comparação dos resultados das três partes. Para que o perfil selecionado seja aprovado em todas as fases, a solicitação de cálculo deve ser menor ou igual à resistência de cálculo em cada uma delas.

Figura 30 - Algoritmo, verificação final.



Fonte: Autor

O algoritmo criado viabiliza a criação da planilha de cálculos que incorporará toda a lógica necessária para execução dos procedimentos de cálculo.

3.4 Automação para planilha de cálculo

Após o desenvolvimento do algoritmo de cálculo, iniciou-se a criação da planilha de cálculo. O objetivo da planilha é, com base em três dados de entrada (carga linear, comprimento da viga e perfil da viga), executar rotinas automatizadas para calcular as Solicitações de Cálculo (Sd) e as Resistências de Cálculo (Rd), apresentando os resultados de forma automática e instantânea.

3.4.1 Automação para cálculos do Momento Fletor

Na rotina do cálculo do momento fletor, a automação permite calcular tanto a força solicitante de cálculo quanto a resistente de cálculo. Utilizando o algoritmo desenvolvido, a planilha processa os dados de entrada fornecidos pelo projetista para determinar os momentos fletores máximos ao longo do elemento estrutural. Este cálculo é crucial para avaliar a resistência da estrutura às forças aplicadas. Os tópicos desenvolvidos a seguir abordarão os cálculos inseridos para a realização dos cálculos dos momentos fletores solicitante e resistente de cálculo.

3.4.1.1 Momento fletor solicitante de cálculo MSd

Para a realização do cálculo do momento fletor solicitante de cálculo primeiramente define-se o Momento Máximo (Mmax), com base nos dados de entrada da carga linear e do comprimento da viga. O momento solicitante de cálculo é definido multiplicando o Mmax pelo coeficiente de ponderamento de agrupamento de ações permanentes e variáveis, conforme equação (24) contida na revisão bibliográfica. A Figura 31 mostra a etapa final do cálculo MSd, as setas em azul mostram as células precedentes das quais são coletados os dados do Mmax, calculado de acordo com equação (23) e do coeficiente de ponderamento para execução da fórmula do MSd que aparece na parte superior da figura. A divisão por mil é uma correção de unidade, assim o resultado final é obtido em kilonewton metro (KNm).

Os resultados contidos na Figura 31 são decorrentes da seleção de um perfil W 150x13,0 utilizado em linha de Abate (190 kgf/m), e com vão de 7 metros.

Figura 31 - Tela momento fletor solicitante de cálculo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
51		Cálculo MSd								
52		Mmax	124337,5	kgf*cm						
53		Coeficiente de ponderamento				1,5				
54		MSd	18,65	KNm						

Fonte: Autor

3.4.1.2 Momento fletor resistente de cálculo

Para a definição do momento fletor resistente de cálculo é necessário rodar as rotinas de cálculo para FLA, FLM e FLT, tais rotinas de cálculo são baseadas nas características do perfil escolhido para verificação.

Dentro de cada rotina de cálculo são determinados e verificados os parâmetros de esbeltez λ , λ_p e λ_r , e aplicadas as condições de cálculo de acordo com a esbeltez da seção do perfil:

$\lambda \leq \lambda_p$: seção compacta;

$\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$: seção semicomcompacta;

$\lambda > \lambda_r$: seção esbelta.

A Figura 32 apresenta os cálculos de cada momento fletor para cada análise de instabilidade FLA, FLM e FLT. As setas em azul representam as células precedentes que contêm os dados para o cálculo de cada MRd.

Para cada análise de instabilidade, inicia-se determinando os parâmetros de esbeltez λ , λ_p e λ_r , para FLA são executadas as equações (2), (3) e (4) contidas no capítulo de revisão, para FLM são executadas as equações (9), (10) e (11), e para FLT são executadas as equações (15), (16) e (17).

Na sequência para cada instabilidade é definido o momento fletor correspondente ao início do escoamento (M_r), lincando ao capítulo de revisão usa-se as equações (8) para FLA, e a equação (12) para FLM e FLT. Seguindo pelo cálculo do momento fletor de plastificação da seção transversal (M_{pl}) que para ambas as análises é utilizada a equação (6) do capítulo de revisão.

Ainda para FLM e FLT é calculado o momento fletor para flambagem elástica para perfis laminados (M_{cr}). Para FLM utilizou-se a equação (14) e para FLT a equação (22) do capítulo de revisão.

Figura 32 - Tela das rotinas de cálculo FLA, FLM e FLT.

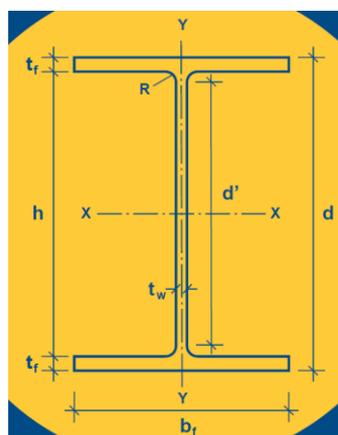
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	V
57	Cálculo MRd											
58	Flambagem lateral da alma FLA											
59	λ		32,09									
60	λ_p		92,77									
61	λ_r		140,63									
62	M_r		29,60 kNm									
63	M_{pl}		33,26 kNm									
64	C_b		1,00									
65	Coefficiente de ponderação ELU										1,1	
66	MRd		30,23 kNm									
67	Flambagem local da mesa FLM											
69	λ		10,20									
70	λ_p		9,38									
71	λ_r		24,48									
72	M_r		20,72 kNm									
73	M_{pl}		33,26 kNm									
74	M_{cr}		119,40 kNm									
75	Coefficiente de ponderação ELU										1,1	
76	MRd		29,61 kNm									
77	Flambagem lateral com torção FLT											
79	λ		315,32									
80	λ_p		43,42									
81	λ_r		136,98									
82	β_1		0,06									
83	C_b		1									
84	M_r		20,72 kNm									
85	M_{pl}		33,26 kNm									
86	M_{cr}		7,37 kNm									
87	Coefficiente de ponderação ELU										1,1	
88	MRd		6,70 kNm									

Fonte: Autor

Para a realização dos cálculos, foram inseridas automações para procurar os valores das características dimensionais e das propriedades geométricas de acordo com o perfil escolhido. A base de dados foi transcrita da tabela de perfis W da Gerdau para a planilha de cálculo.

A Figura 33 apresenta as cotas dimensionais que podem ser encontradas na tabela de bitolas de perfis W da Gerdau. Com base nas dimensões do perfil e nas propriedades mecânicas para o aço ASTM A 572 Grau 50, foram determinados todos os parâmetros de entrada para os cálculos de definições das resistências de cálculo.

Figura 33 - Cotas dimensionais dos perfis estruturais.



Fonte: Adaptado de Gerdau

A tabela de perfis Gerdau além de fornecer as informações dimensionais dos perfis também fornece outras importantes informações para cada bitola de perfil, tais informações auxiliam na execução dos cálculos, como pode-se observar na Figura 34 as informações fornecidas ao selecionar o perfil W 150 x 13,0.

Figura 34 - Tela que apresenta as características do perfil selecionado.

Perfil selecionado: W 150 x 13,0

Características Perfil Selecionado:

kg/m	13	Zx (cm ³)	96,4
d (mm)	148	Iy (cm ⁴)	82
bf (mm)	100	Wy (cm ³)	16,4
tw (mm)	4,3	ry (cm)	2,22
tf (mm)	4,9	Zy (cm ³)	25,5
h (mm)	138	rt (cm)	2,6
d' (mm)	118	It (cm ⁴)	1,72
Área (cm ²)	16,6	bf/2tf	10,2
Ix (cm ⁴)	635	d'/tw	27,49
Wx (cm ³)	85,8	Cw (cm ⁶)	4181
rx (cm)	6,18		

Tipo de aço: ASTM A572 GR50 34,5 kN/cm² fy

E (elasticidade): 21000 kN/cm²

Bitola	kg/m	d (mm)	bf (mm)	tw (mm)	tf (mm)	h (mm)	d' (mm)	Área (cm ²)
Perfis - Padrão								
W 150 x 13,0	13,00	148	100	4,3	4,9	138	118	16,6
W 150 x 18,0	18,00	153	102	5,8	7,1	139	119	23,0
W 150 x 22,5	22,50	152	152	5,8	6,6	139	119	29,0
W 150 x 24,0	24,00	160	102	6,6	10,3	139	115	31,0
W 150 x 20,0	20,00	157	152	6,6	9,2	139	119	28,0

Fonte: Autor

Por fim, para a definição do momento fletor resistente de cálculo (MRd) de acordo com a ABNT NBR8800:2008 deve-se considerar o menor valor calculado dentre as três rotinas de cálculo (FLA, FLM e FLT), pois representa a consideração de maior instabilidade no perfil selecionado.

A Figura 35 apresenta a tela de resultado para FLA, FLM e FLT, os dados abaixo são o resultado da escolha de um perfil W 150X13,0, com 6 metros entre apoios. O momento fletor resistente de cálculo para essa configuração, decorre da verificação da flambagem lateral com torção FLT que é o menor valor dentre as três verificações.

Figura 35 - Tela de definição MRd

Resumo MRd

FLA	30,23
FLM	29,61
FLT	6,70
MRd	6,70 KNm

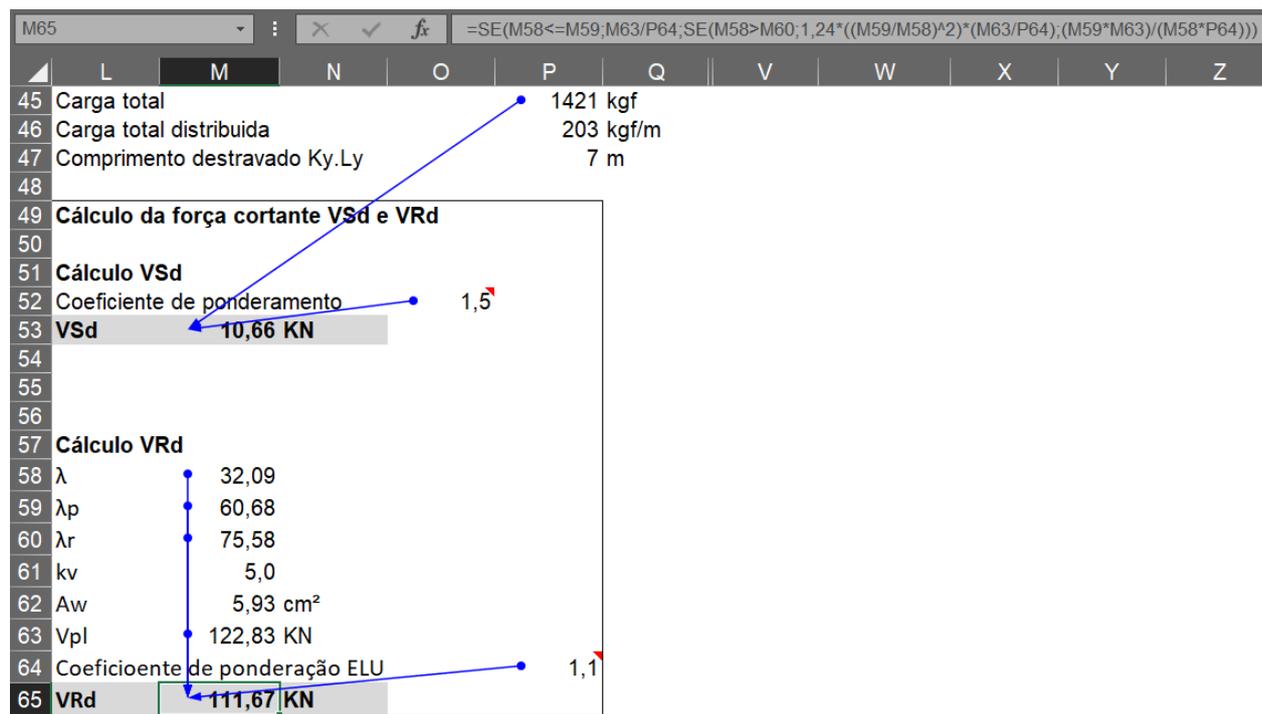
Fonte: Autor

3.4.2 Automação para cálculos da força cortante

Para o Cálculo da Força Cortante, a automação segue um procedimento similar, calculando a Força Solicitante de Cálculo e a Resistente de Cálculo. A partir dos dados de entrada, o algoritmo analisa as forças cortantes ao longo do comprimento do elemento estrutural, determinando os pontos críticos onde as forças são máximas. Esses cálculos são essenciais para garantir que a estrutura possa resistir às forças transversais que atuam sobre ela.

A Figura 36 mostra a tela da planilha que contém os cálculos para a força cortante. Os resultados são decorrentes da seleção de um perfil W 150x13,0 utilizado em linha de Abate (190 kgf/m), e com vão de 7 metros.

Figura 36 – Tela de cálculo da força cortante.



Fonte: Autor

As setas em azul mostram os dados utilizados de células precedentes. Para o cálculo da força cortante solicitante de cálculo (VSd) é utilizado a equação (35) da revisão bibliográfica.

Para o cálculo da força cortante resistente (VRd) com base nas características do perfil selecionado são determinados e verificados os parâmetros de esbeltez λ , λ_p e λ_r conforme equações (30), (31) e (32) respectivamente. Também é definido a área efetiva de cisalhamento (A_w) conforme equação (34), e define-se a força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento, conforme equação (33).

Com base nesses dados é possível calcular o VRd, que possui as condições de cálculo de acordo com a esbeltez da seção do perfil, equações (27), (28) e (29).

3.4.3 Automação para cálculos da flecha

Na rotina do Cálculo da Flecha, a automação calcula a deflexão máxima do elemento estrutural, comparando a Flecha Solicitante de Cálculo (YSd) com a Flecha Resistente de Cálculo (YRd). Este cálculo verifica se a deflexão do elemento está dentro dos limites aceitáveis, garantindo que a estrutura mantenha sua integridade e funcionalidade sob carga.

A Figura 37 mostra a tela da planilha que consta os cálculos da flecha. Os resultados são decorrentes da seleção de um perfil W 150x13,0 utilizado em linha de Abate (190 kgf/m), e com vão de 7 metros.

Figura 37 - Tela de cálculo da flecha.

	R	S	T	U	V	W	X
46		Carga total distribuida			203 kgf/m		
47		Comprimento da viga			7 m		
48							
49		Cálculo da flecha YsD e YRd					
50							
51		Cálculo YsD					
52		YsD	4,76		cm		
53							
54		Cálculo YRd					
55		YRd	2,8		cm		

Fonte: Autor

Para o cálculo da flecha solicitante, toma-se os dados do comprimento da viga (entre apoios), a carga linear, o módulo de elasticidade do aço e o momento de inércia em relação ao eixo x do perfil selecionado, equação (38) do capítulo de revisão.

Para o cálculo da flecha resistente, adota-se o indicado na ABNT NBR 8800:2008 que indica que o deslocamento máximo deve ser o comprimento da viga (entre apoios) dividido por 250 (L/250), equação (37) do capítulo de revisão.

3.5 Design da planilha

O desenvolvimento de uma planilha Excel para cálculo estrutural destinada ao uso em engenharia requiriu um design focado em informações relevantes, clareza e funcionalidade. A proposta foi criar uma interface limpa e direta, que permitisse ao projetista inserir dados de forma intuitiva e obter resultados precisos e imediatos.

Quanto a estrutura da planilha, esta foi dividida em três seções:

- Dados de entrada;
- Resultados dos cálculos;
- Verificações e mensagens de validação.

3.5.1 Tela para dados de entrada

Para facilitar o uso, os campos destinados à inserção de dados de entrada foram claramente destacados e identificados, permitindo ao projetista identificar facilmente onde adicionar ou editar informações. Estes campos foram dispostos de forma ordenada e lógica, seguindo o fluxo de um cálculo estrutural típico.

A Figura 38 mostra a tela principal da planilha onde serão inseridos os dados de entrada que servirão para a execução das rotinas de cálculo, para facilitar o entendimento sobre a utilização da tela, foram destacados em cor amarela os campos que devem ser preenchidos pelo usuário.

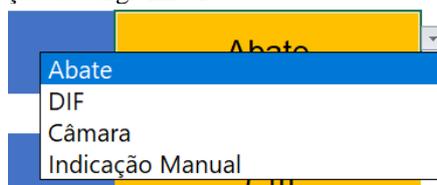
Figura 38 - Campos para inserção dos dados de entrada para cálculo.

Selecione a carga linear (q)	Clicar para fazer seleção
Selecione o comprimento da viga (L)	Clicar para fazer seleção
Selecione o perfil da viga	Clicar para fazer seleção
*Preencher as células	

Fonte: Autor

Na primeira linha consta os dados para a seleção da carga linear, na célula amarela à direita consta o texto “Clicar para fazer seleção”, que ao clicar nesta célula aparecerá uma lista suspensa conforme a mostra a Figura 39, a lista contém os dados de carregamento linear por área do frigorífico de acordo com o definido na Tabela 1 do capítulo 3.2.1 Cargas.

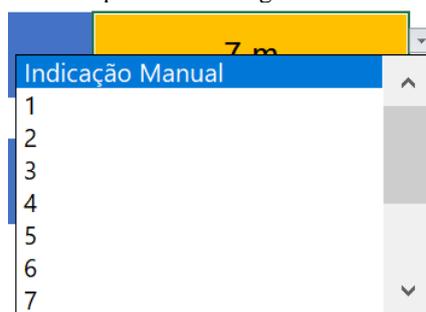
Figura 39 - Lista suspensa para a seleção da carga linear.



Fonte: Autor

Na segunda linha consta a seleção do comprimento da viga em metros, onde também há uma lista com opções de comprimentos conforme Figura 40, a variação de comprimento tem como comprimento máximo 12 metros, de acordo com o definido no capítulo 3.2.2.2 Dimensões máxima para galvanização.

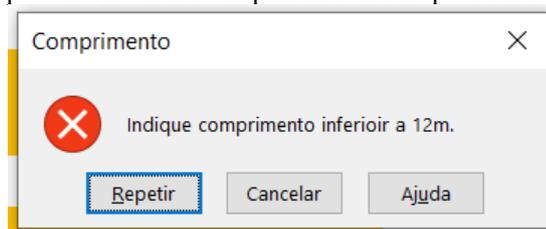
Figura 40 - Lista suspensa para seleção do comprimento da viga.



Fonte: Autor

Caso o usuário tente selecionar um perfil com comprimento maior que 12 metros, aparecera na tela uma mensagem orientativa como mostrado na Figura 41.

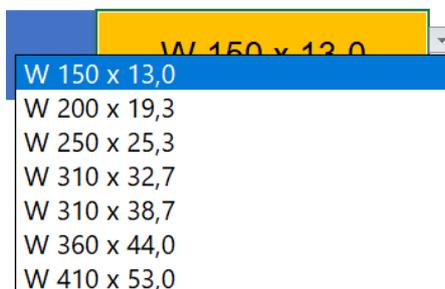
Figura 41 - Mensagem orientativa para ao selecionar comprimento maior que 12 metros.



Fonte: Autor

Na terceira linha da tela inicial consta a seleção do perfil da viga para verificação conforme mostra a Figura 42. Os perfis contidos na lista são os da tabela de perfis Gerdau, conforme definido no capítulo 3.2.3 Seleção de perfis.

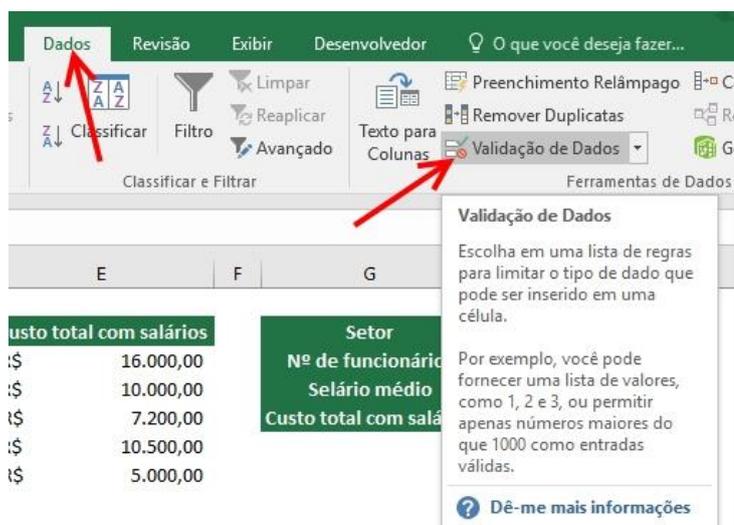
Figura 42 - Lista suspensa para a seleção da bitola do perfil da viga.



Fonte: Autor

Uma característica importante dos campos de entrada foi a inclusão de listas suspensas, o menu para criação destas listas é apresentado na Figura 43. Estas listas permitiram a seleção rápida e eficiente de opções predefinidas, minimizando erros de digitação e acelerando o processo de inserção de dados. Além disso, cada lista suspensa inclui uma opção para inserção manual, oferecendo ao usuário a flexibilidade de inserir valores específicos para situações particulares que requeiram cálculos mais detalhados.

Figura 43 - Menu para criação de listas suspensas com dados definidos.



Fonte: Autor

As listas suspensas são criadas pelo menu Dados →Validação de dados, onde se pode criar e limitar as opções de dados que podem ser selecionadas em uma determinada célula.

3.5.2 Tela para resultados dos cálculos

Logo abaixo das células que contém as informações de entrada, foram inseridas as células que contém os resultados dos cálculos, conforme pode ser observado na Figura 44. Esta seção foi projetada para fornecer uma visualização clara e imediata dos resultados obtidos a partir dos dados inseridos. Os resultados foram apresentados de maneira organizada, permitindo ao projetista verificar rapidamente as saídas geradas pela planilha.

Figura 44 - Tela onde é apresentado os resultados de cálculo.

	Solicitante de cálculo Sd	Resistente de cálculo Rd
Momento Fletor	19,23 KNm	12,28 KNm
Força cortante	10,99 KN	207,38 KN
Flecha	1,85 cm	2,80 cm

Fonte: Autor

Nesta tela são apresentados os resultados finais dos cálculos Solicitantes de Cálculo (Sd) e Resistentes de Cálculo (Rd) das três etapas de cálculo para a viga biapoçada, Momento Fletor, Força Cortante e Flecha da viga.

Todos os quadrantes estão em cor cinza, pois nesta tela o projetista não terá nenhuma ação, é apenas uma tela de visualização dos resultados de cálculo com base nos dados de entrada inseridos.

3.5.3 Tela para verificações e mensagem de validação

A última seção da planilha foi dedicada às verificações automáticas. A planilha realiza três verificações distintas para garantir que os resultados atendam aos critérios de segurança e conformidade estrutural. Essas verificações são essenciais para assegurar que as entradas fornecidas produzam resultados válidos e confiáveis.

Conforme a Figura 45, caso em qualquer uma das verificações a Resistência de Cálculo (Rd) não atenda a Solicitação (Sd), então uma mensagem de alerta é exibida, indicando a necessidade de revisar os dados de entrada. Para chamar mais atenção, o campo correspondente à verificação não atendida muda de cor para vermelho. Esta funcionalidade visual permite ao projetista identificar imediatamente qual esforço não está atendendo as solicitações de cálculo, agilizando o processo de correção.

Figura 45 - Tela onde é apresentada a verificação de cada etapa de cálculo.

	Sd/Rd	Verificação
Momento Fletor	157%	Não OK! Selecionar perfil de maior inércia ou adicionar travamento.
Força cortante	5%	Perfil OK!
Flecha	66%	Perfil OK!

Fonte: Autor

Por outro lado, se em todas as verificações a R_d for maior ou igual a S_d , então uma mensagem "OK" é exibida, e os campos de verificação mudam para a cor verde. Esta indicação clara e positiva confirmava que os dados de entrada são válidos e que os resultados do cálculo estão de acordo com os requisitos estruturais da ABNT NBR 8800:2008.

3.5.4 Validação

Para assegurar a confiabilidade da planilha desenvolvida, foram realizados cálculos manuais com o objetivo de comparar os resultados obtidos por meio da interface da planilha. Esta comparação visa validar a precisão e a consistência dos dados gerados, garantindo que a planilha seja uma ferramenta eficaz e confiável para o pré-dimensionamento de vigas W.

3.5.4.1 Dimensionamento manual

Neste tópico, serão apresentados os resultados detalhados dos cálculos realizados para um exemplo específico de viga. O objetivo é verificar a confiabilidade da planilha desenvolvida, demonstrando a precisão e a consistência dos resultados gerados pela ferramenta em comparação com os cálculos manuais. Este detalhamento permitirá uma análise minuciosa da eficácia da planilha no pré-dimensionamento de vigas W. Para esse exemplo foi considerado uma viga para utilização em um abate de frigorífico (190 kgf/m), comprimento da viga de 5m, e o perfil laminado W150 x 13,0 de aço ASTM A572 Gr 50.

Primeiramente, foram calculados os carregamentos distribuídos atuantes na viga:

$$Q_{abate} = \frac{190 \times 9,81}{1000} = 1,86 \text{ kN/m} \quad (39)$$

$$PP = \frac{13 \times 9,81}{1000} = 0,13 \text{ kN/m} \quad (40)$$

Com base no carregamento distribuído conhecido, calculam-se as combinações de ações nos estados limites, com o objetivo de determinar os efeitos mais desfavoráveis a que a estrutura estará sujeita. Assim, as combinações de ações para o Estado Limite Último (ELU) e o Estado Limite de Serviço (ELS) são, respectivamente:

$$S_d = 1,86 \times 1,5 + 0,13 \times 1,25 = 2,95 \text{ kN/m} \quad (41)$$

$$S_d = 1,86 \times 1 + 0,13 \times 1 = 1,99 \text{ kN/m} \quad (42)$$

A combinação de ações para o ELU permitiu calcular o momento solicitante de projeto da viga, utilizando a equação (24) de momento máximo para vigas biapoiasadas.

$$M_{Sd} = \frac{2,95 \times 5^2}{8} = 9,22 \text{ kN.m} \quad (43)$$

Para a verificação do perfil W150 x 13,0 quanto ao momento fletor, considera-se os seguintes aspectos: flambagem local da alma (FLA), flambagem local da mesa (FLM) e flambagem lateral com torção (FLT). A flambagem local da alma (FLA) é calculada conforme as equações (2), (3) e (4) e são apresentadas a seguir:

$$\lambda_{FLA} = \frac{118}{4,3} = 27,44 \quad (44)$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{21000}{34,5}} = 92,77 \quad (45)$$

$$\lambda_r = 5,7 \sqrt{\frac{21000}{34,5}} = 147,17 \quad (46)$$

Como $\lambda_{FLA} \leq \lambda_p$ se refere a uma seção compacta, calcula-se o momento resistente utilizando as equações (5) e (7) expressas abaixo:

$$M_{pl} = \frac{96,4 \times 34,5}{100} = 33,26 \text{ kN.m} \quad (47)$$

$$M_{Rd} = \frac{33,26}{1,1} = 30,24 \text{ kN.m} \quad (48)$$

Comparando o resultado do momento resistente da flambagem local da alma (FLA), $M_{Rd} = 30,24 \text{ kN.m}$, com o momento solicitante $M_{Sd} = 9,22 \text{ kN.m}$, nota-se que o perfil é adequado, pois o momento solicitante é menor que o momento resistente.

Após o cálculo da flambagem local da alma (FLA), realiza-se os cálculos da flambagem local da mesa (FLM) de acordo com as equações (9), (10) e (11), os cálculos são apresentados abaixo:

$$\lambda_{FLM} = \frac{100}{4,9 \times 2} = 10,20 \quad (49)$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{21000}{34,5}} = 9,37 \quad (50)$$

$$\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{21000}{34,5 \times 0,7}} = 24,48 \quad (51)$$

Sendo $\lambda_p \leq \lambda_{FLM} \leq \lambda_r$, o tipo da seção da mesa é semicompacta e para calcular o momento resistente da mesa, utiliza-se as equações (7) e (12), os cálculos são apresentados abaixo:

$$M_r = \frac{(34,5 \times 0,7) \times 85,8}{100} = 20,72 \text{ kN.m} \quad (52)$$

$$M_{Rd} = \frac{1}{1,1} \left[33,26 - (33,26 - 20,72) \frac{10,20 - 9,37}{24,48 - 9,37} \right] = 29,61 \text{ kN.m} \quad (53)$$

Comparando o momento resistente da mesa $M_{Rd} = 29,61 \text{ kN.m}$, com o momento solicitante $M_{Sd} = 9,22 \text{ kN.m}$, fica evidente que o perfil atende, pois o momento solicitante é menor que o resistente.

Após o cálculo da flambagem local da mesa (FLM), realiza-se os cálculos da flambagem lateral com torção (FLT) de acordo com as equações (15), (16) e (17), os cálculos são apresentados abaixo:

$$\lambda_{FLT} = \frac{500}{2,22} = 225,23 \quad (54)$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{21000}{34,5}} = 43,42 \quad (55)$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{82 \times 1,72}}{2,22 \times 1,72 \times 0,06} \times \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \times 4181 \times 0,06^2}{82}}} = 132,69 \quad (56)$$

Sendo $\lambda_{FLT} > \lambda_r$, o tipo de seção é esbelta e para calcular o momento resistente do perfil, utiliza-se as equações (21) e (22), os cálculos são apresentados abaixo:

$$M_{cr} = \left[\frac{1\pi^2 21000 \times 82}{500^2} \sqrt{\frac{4181}{82} \left(1 + 0,039 \frac{1,72 \times 500^2}{4181} \right)} \right] / 100 \quad (57)$$

$$= 10,87 \text{ kN.m}$$

$$M_{Rd} = \frac{10,87}{1,1} = 9,88 \text{ kN.m} \quad (58)$$

Comparando o momento resistente de flexotorção $M_{Rd} = 9,88 \text{ kN.m}$, com o momento solicitante $M_{Sd} = 9,22 \text{ kN.m}$, pode-se afirmar que o perfil resistirá as solicitações pois o momento fletor solicitante é menor que o resistente.

Após os cálculos de momento solicitante e resistente, efetua-se os cálculos das forças de cisalhamento ou força cortante, para o cálculo da força cortante solicitante de cálculo para vigas biapoiadas de carregamento uniforme utiliza-se a equação (35), o cálculo é apresentado abaixo:

$$V_{Sd} = \frac{1,99 \times 5}{2} \cdot 1,5 = 7,38 \text{ kN} \quad (59)$$

Para a verificação do perfil W150 x 13,0 quanto a força cortante resistente de cálculo utiliza-se as equações (30), (31) e (32), os cálculos são apresentados abaixo:

$$\lambda = \frac{138}{4,3} = 32,09 \quad (60)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{5 \times 21000}{34,5}} = 60,68 \quad (61)$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{5 \times 21000}{34,5}} = 75,58 \quad (62)$$

Sendo $\lambda \leq \lambda_p$, refere-se a uma seção compacta, calcula-se a força cortante resistente utilizando as equações (27), (33) e (34)

$$A_w = \frac{138 \times 4,3}{100} = 5,93 \text{ cm}^2 \quad (63)$$

$$V_{pl} = 0,60 \times 5,93 \times 34,5 = 122,75 \text{ kN} \quad (64)$$

$$V_{Rd} = \frac{122,75}{1,1} = 111,59 \text{ kN} \quad (65)$$

Comparando a força cortante resistente do perfil $V_{Rd} = 111,59 \text{ kN}$, com a força cortante solicitante $V_{Sd} = 7,38 \text{ kN}$, fica evidente que o perfil atende, pois, a força cortante solicitante é menos que a força resistente.

Após os cálculos de cisalhamento, efetua-se os cálculos referentes ao deslocamento vertical de serviço, por meio das combinações de ações do ELS, dado pelas equações (37) e (38), os cálculos são apresentados abaixo:

$$Y_{Sd} = \frac{5 \times \left(\frac{1,99}{100}\right) \times 500^4}{384 \times 21000 \times 635} = 1,21 \text{ cm} \quad (66)$$

$$Y_{Rd} = \frac{500}{250} = 2 \text{ cm} \quad (67)$$

Comparando os resultados dos deslocamentos de serviço solicitante $Y_{Sd} = 1,21 \text{ cm}$, com o deslocamento limite $Y_{Rd} = 2 \text{ cm}$, observa-se que o deslocamento de serviço é menor que o deslocamento limite, o perfil atende.

3.5.4.2 Comparação de resultados

Para comprovar a confiabilidade da interface, foram realizados cálculos manuais e na planilha em uma simulação de viga W150 x 13,0 com 5 metros de comprimento aplicada em uma linha de abate, a Tabela 3 apresenta os resultados. O objetivo era comparar os resultados dos cálculos manuais com aqueles gerados automaticamente pela interface.

Tabela 3 - Comparação de cálculos Planilha x Manual

Cálculos	Planilha	Manual
MSd (kN.m)	9,52	9,22
MRd FLA (kN.m)	30,23	30,24
MRd FLM (kN.m)	29,61	29,61
MRd FLT (kN.m)	9,88	9,88
VSd (kN)	7,61	7,38
VRd (kN)	111,67	111,59
YSd (cm)	1,24	1,21
YRd (cm)	2,00	2,00

Fonte: Autor

Comparando os resultados apresentados na Tabela 3, é possível analisar as diferenças entre os resultados obtidos com a planilha e os calculados manualmente. As variações são devidas à precisão dos cálculos, pois a planilha utiliza mais casas decimais do que os cálculos manuais, que consideram apenas duas. Dessa forma, foi comprovada a confiabilidade da planilha, uma vez que as diferenças numéricas foram mínimas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento da planilha para pré-dimensionamento de vigas. Aqui é apresentado a planilha em sua forma final, e com base no feedback dos projetistas que testaram a planilha produziu-se uma tabela para plotar com os resultados de cálculo para uma série de comprimentos e faixas de cargas lineares, onde no cruzamento de cada relação é indicado o perfil mais leve que atende as solicitações de cálculo.

4.1 Interface planilha de pré-dimensionamento de vigas

Com base nos capítulos apresentados, foi possível entender o fluxo do processo de abate de suínos em frigoríficos e determinar o distanciamento entre carcaças nos setores do abate. Outro importante ponto avaliado para a predefinição das cargas foi analisar a evolução do peso dos animais e selecionar o peso mais adequado em prol da segurança da análise. Portanto, com as referências de distanciamento entre animais, juntamente com o peso dos animais, produziu-se uma lista pré-definida de carga linear para cada setor do frigorífico. Essa lista foi aplicada dentro da planilha de pré-dimensionamento como uma informação de entrada, permitindo ao projetista escolher o setor frigorífico que está modelando e, com base na sua escolha, a planilha busca o valor do carregamento de forma automática. Ainda nos dados de entrada foram criadas mais duas listas pré-definidas, a lista de comprimentos de vigas, limitada ao comprimento máximo de 12 metros devido às opções de perfis disponíveis no mercado e ao processo de galvanização, e também foi criada a lista de seleção de perfis com base nas características geométricas e mecânicas da tabela de perfis W Gerdau.

Os algoritmos de cálculo foram codificados para operar de forma integrada com a interface da planilha, permitindo que os cálculos sejam realizados automaticamente após a inserção dos dados de entrada pelo projetista.

- **Entrada de Dados:** O projetista insere os parâmetros necessários (carga linear, comprimento da viga e perfil da viga) nas células destacadas.

- **Execução dos Algoritmos:** Ao acionar o cálculo, o algoritmo processa os dados e executa as três rotinas de cálculo (Cálculo do Momento Fletor, Cálculo da Força Cortante e Cálculo da Flecha).
- **Exibição dos Resultados:** Os resultados são exibidos automaticamente nas células destinadas, oferecendo uma visualização imediata das saídas geradas pela planilha.
- **Validação dos Resultados:** A planilha verifica se os resultados atendem aos critérios de segurança, sinalizando em verde (OK) ou vermelho (revisão necessária), conforme a conformidade dos dados de entrada com as normas estruturais.

A Figura 46 apresenta a interface da planilha de pré-dimensionamento de vigas W, a tela é composta de dois segmentos, o primeiro é os dados de entrada, são campos onde os projetistas farão a inserção de dados de acordo com o projeto. No segundo segmento há as verificações das rotinas de cálculo, nessas células o projetista não fará nenhuma inserção ou edição, é uma tela para análise dos dados, e caso alguma verificação não atenda, então os dados de entrada devem ser revistos.

Figura 46 - Interface da planilha para pré-dimensionamento de vigas.

PLANILHA PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE VIGAS

DADOS DE ENTRADA

Selecione a carga linear (q)
Abate
190 kgf/m

Selecione o comprimento da viga (L)
7 m

Selecione o perfil da viga
W 200 x 19,3

*Preencher as células

VERIFICAÇÕES

	Solicitante de cálculo Sd	Resistente de cálculo Rd	Sd/Rd	Verificação
Momento Fletor	19,23 KNm	12,28 KNm	157%	Não OK! Selecionar perfil de maior inércia ou adicionar travamento.
Força cortante	10,99 KN	207,38 KN	5%	Perfil OK!
Flecha	1,85 cm	2,80 cm	66%	Perfil OK!

Fonte: Autor

A automação da planilha Excel para cálculos estruturais transformou-a em uma solução veloz e confiável para o pré-dimensionamento das vigas. Com as rotinas automatizadas de cálculo, os projetistas agora podem realizar cálculos complexos de forma rápida e precisa, garantindo a segurança e assertividade no modelamento das estruturas. A combinação de uma interface de design intuitivo com o algoritmo faz desta planilha um recurso importante para a engenharia de projetos de frigoríficos, auxiliando na definição do perfil a ser adotado antes da execução do cálculo final, dessa forma o projetista pode realizar a análise de interferência no momento do modelamento da estrutura, e conseqüentemente liberar para a fabricação parte dos transportadores aéreos que são fixados nestas vigas.

4.2 Tabela de resultados

Com a disponibilização da planilha para o pré-dimensionamento das vigas, os projetistas sugeriram o desenvolvimento de uma tabela de resultado para realizar o modelamento de forma ainda mais rápida, a ideia foi aplicar a planilha realizando várias simulações de comprimentos de vigas com diferentes cargas e tabelar os resultados dos perfis mais leves que atendem a todas as solicitações de cálculo, como pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 4 - Resultados da planilha de pré-dimensionamento selecionando o perfil mais leve Gerdau.

Seleção geral de perfis Gerdau						
	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m
50 kgf/m	W 150 x 13,0					
100 kgf/m	W 150 x 13,0					
200 kgf/m	W 150 x 13,0	W 150 x 18,0	W 150 x 18,0			
300 kgf/m	W 150 x 13,0	W 150 x 18,0	W 150 x 22,5			
400 kgf/m	W 150 x 13,0	W 150 x 22,5	W 200 x 26,6			
500 kgf/m	W 150 x 13,0	W 150 x 13,0	W 150 x 13,0	W 150 x 18,0	W 150 x 22,5	W 200 x 26,6
600 kgf/m	W 150 x 13,0	W 150 x 13,0	W 150 x 13,0	W 150 x 18,0	W 150 x 22,5	W 200 x 31,3
	7 m	8 m	9 m	10 m	11 m	12 m
50 kgf/m	W 150 x 13,0	W 150 x 18,0	W 150 x 22,5	W 150 x 22,5	W 200 x 26,6	W 200 x 31,3
100 kgf/m	W 150 x 18,0	W 150 x 22,5	W 200 x 26,6	W 200 x 31,3	W 200 x 35,9	W 360 x 44,0
200 kgf/m	W 150 x 22,5	W 200 x 31,3	W 200 x 35,9	W 360 x 44,0	W 360 x 51,0	W 360 x 64,0
300 kgf/m	W 200 x 31,3	W 200 x 35,9	W 360 x 44,0	W 360 x 57,8	W 360 x 64,0	W 360 x 64,0
400 kgf/m	W 200 x 31,3	W 310 x 38,7	W 360 x 51,0	W 360 x 64,0	W 360 x 64,0	W 360 x 79,0
500 kgf/m	W 200 x 35,9	W 360 x 44,0	W 360 x 57,8	W 360 x 64,0	W 360 x 72,0	W 460 x 97,0
600 kgf/m	W 200 x 35,9	W 360 x 51,0	W 360 x 64,0	W 360 x 72,0	W 360 x 79,0	W 530 x 101,0

Fonte: Autor

Após a confecção da Tabela 3, constatou-se que muitos dos perfis indicados não são comuns na utilização como vigas de sustentação, como por exemplo os perfis H, que são perfis comumente utilizados para a fabricação de colunas metálicas por conta de suas características dimensionais.

Outro ponto importante é que a lista de seleção de perfis constante na planilha de pré-dimensionamento que foi desenvolvida, pode ser utilizada de forma personalizada, podendo por exemplo conter apenas determinados perfis que possua o estoque de uma empresa. Por exemplo para o caso da Tabela 4 foi indicado pelos projetistas de uma empresa x editar a lista suspensa da planilha para conter apenas os perfis existentes em estoque da determinada empresa, que possuía os seguintes perfis: W 150x13,0, W 200 x 19,3, W 250 x 25,3, W 310 x 32,7, W 310 x 38,7, W 360 x 44,0 e W 410 x 53,0. Dessa forma a tabela ficou com os seguintes resultados:

Tabela 5 - Resultados da planilha de pré-dimensionamento selecionando os perfis mais leves em estoque.

Seleção específica de perfis em estoque						
	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m
50 kgf/m	W 150 x 13,0					
100 kgf/m	W 150 x 13,0					
200 kgf/m	W 150 x 13,0	W 200 x 19,3	W 250 x 25,3			
300 kgf/m	W 150 x 13,0	W 200 x 19,3	W 250 x 25,3			
400 kgf/m	W 150 x 13,0	W 250 x 25,3	W 310 x 32,7			
500 kgf/m	W 150 x 13,0	W 150 x 13,0	W 150 x 13,0	W 200 x 19,3	W 250 x 25,3	W 310 x 38,7
600 kgf/m	W 150 x 13,0	W 150 x 13,0	W 150 x 13,0	W 200 x 19,3	W 310 x 32,7	W 310 x 38,7

Fonte: Autor

Tabela 5 - Resultados da planilha de pré-dimensionamento selecionando os perfis mais leves em estoque.

	7 m	8 m	9 m	10 m	11 m	12 m
50 kgf/m	W 150 x 13,0	W 200 x 19,3	W 250 x 25,3	W 310 x 32,7	W 310 x 38,7	W 310 x 38,7
100 kgf/m	W 200 x 19,3	W 250 x 25,3	W 310 x 32,7	W 310 x 38,7	W 310 x 38,7	W 360 x 44,0
200 kgf/m	W 310 x 32,7	W 310 x 38,7	W 310 x 38,7	W 360 x 44,0	W 410 x 53,0	-
300 kgf/m	W 310 x 38,7	W 310 x 38,7	W 360 x 44,0	W 410 x 53,0	-	-
400 kgf/m	W 310 x 38,7	W 310 x 38,7	W 410 x 53,0	-	-	-
500 kgf/m	W 310 x 38,7	W 360 x 44,0	-	-	-	-
600 kgf/m	W 310 x 38,7	W 410 x 53,0	-	-	-	-

Fonte: Autor

Fica como oportunidade de análise em trabalhos futuros a realização de um estudo de caso quanto ao ganho de *leadtime* com a aplicação da planilha de pré-dimensionamento e também a possibilidade de diminuir o vão destravado da viga em análise, visando a utilização de um perfil mais leve que atenda as solicitações de cálculo, a diminuição do vão destravado implicará principalmente no aumento de resistência de cálculo do momento fletor da flambagem lateral com torção FLT.

5 CONCLUSÕES

O objetivo primordial deste projeto consistiu no desenvolvimento de uma planilha dedicada ao cálculo de vigas biapoiadas em frigoríficos, caracterizadas por carregamento linear. As metas estabelecidas incluíram a análise dos dados de entrada, a criação de algoritmo de cálculo, o desenvolvimento da planilha com interface amigável e intuitiva, interface esta que é o elo de ligação entre o algoritmo e o projetista.

A primeira etapa envolveu uma análise profunda das características dos frigoríficos, considerando fontes como livros e artigos. Foram examinadas as normas pertinentes, tanto aquelas aplicáveis aos frigoríficos quanto as relacionadas às variáveis do produto transportado, essenciais para definir o carregamento. Paralelamente, foram estudadas as normativas específicas para o cálculo estrutural das vigas, considerando as características necessárias para sua aplicação.

A partir da compreensão das exigências de carregamento, da aplicação das vigas para suporte de transportadores em frigoríficos e das normativas para o cálculo estrutural, foi possível conceber o algoritmo contendo as rotinas de cálculo de acordo com a ABNT NBR 8800:2008, tal algoritmo serviu como base para o desenvolvimento da planilha de pré-dimensionamento de vigas.

A planilha de pré-dimensionamento não apenas permite a inserção automática dos parâmetros de entrada, como carga linear, comprimento da viga e perfil da viga, mas também processa esses dados em tempo real, exibindo resultados imediatos e sinalizando a conformidade dos mesmos com os critérios de segurança estabelecidos. A inclusão de listas pré-definidas para carga linear em diferentes setores, comprimentos de vigas e seleção de perfis auxilia os projetistas no fornecimento dos dados de entrada.

Outro objetivo importante atingido que veio em conformidade com o solicitado pelos projetistas foi a realização de simulações de vários cenários com carregamento e comprimentos de vigas, sendo assim possível desenvolver uma tabela de “carga x comprimento” informando a bitola da viga W resultante de cada simulação, em uma segunda rodada de simulação se restringiu a indicação de vigas W para uma opção personalizada do que é necessário para a engenharia específica.

Como sugestão para futuros trabalhos, recomenda-se a realização de um estudo de caso para avaliar o ganho de lead time com a aplicação da planilha de pré-dimensionamento e explorar a possibilidade de diminuir o vão destravado das vigas, o que poderia permitir o uso de perfis mais

leves que atendam às solicitações de cálculo. A diminuição do vão destravado pode aumentar a resistência de cálculo do momento fletor da flambagem lateral com torção (FLT), contribuindo ainda mais para a eficiência e segurança dos projetos estruturais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÇOMINAS. Página web: **Perfis vigas “w”**, 2023. Disponível em <<https://www.acominas.com.br/vigas-w#:~:text=Com%20sua%20demanda%20cada%20vez,%2C%20resist%C3%Aancia%2C%20robustez%20e%20beleza.>>. Acesso em: Nov. 2023.

AGROCERES MULTIMIX. Rentabilidade da Suinocultura. **Portal de Notícias: Suino.com**, 2021. Disponível em: <<https://suino.com.br/rentabilidade-da-suinocultura-aumento-de-matrizes-ou-do-peso-ao-abate/>>. Acesso em: Ago. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNE (ABIEC). **Relatório Anual da ABIEC** - Edição 2021. Disponível em <<https://www.abiec.com.br/>>. Acesso em Set. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios** (ABNT NBR 8800:2008). Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL (ABPA). Investimento em tecnologia na avicultura e suinocultura ultrapassa R\$ 2 bilhões nos últimos anos. **Revista Digital**, 2021. Disponível em: <<https://abpa-br.com.br/2021/04/09/investimento-em-tecnologia-na-avicultura-e-suinocultura-ultrapassa-r-2-bilhoes-nos-ultimos-anos/>>. Acesso em: Set. 2023.

BARCELLOS, J. O. J. Technological innovation and entrepreneurship in animal production. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 2011. p. 189-200.

BEER, Ferdinand. **Mecânica vetorial para engenheiros, v. 1** : estática, com unidades no sistema internacional. Porto Alegre AMGH 2019.

BERETTA. Página web: **Como funciona o processo de galvanização a fogo**, 2023. Acesso em <<https://beretta.com.br/a-galvanizacao/>>. Acesso em: Nov. 2023.

BERTON, L. R. et al. **Avaliação do sistema agroindustrial da carne bovina no Brasil**. Gestão & Produção, v. 26, n. 1, 2019.

BIESUS, L. L. **Embrapa Suínos e Aves**. Multimídia: Banco de Imagens, 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-imagens/-/midia/4383001/carcacas-de-suinos>>. Acesso em: Out. 2023.

C.VALE Cooperativa Agroindustrial. **Revista C.Vale**, n. 84. Dez. 2022. Disponível em <<https://www.cvale.com.br/site/imprensa/revista-cvale>>. Acesso Out. 2023.

CÊ, E. R. **Influência das Etapas do Processo de Abate de Suínos na Prevalência de Patógenos e Níveis de Microrganismos Indicadores de Qualidade e Higiene**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, p. 81. 2016.

CEPEA. **Boletim do Suíno**, Ano XXIII, n. 5, 2021. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/boi/pdf/BOI_SUINO_CEPEA_mai_21.pdf>. Acesso em: Ago. 2023.

CHAMBERLAIN PRAVIA, Zacarias M. et al. **Projeto e cálculo de estruturas de aço**: edifício industrial detalhado. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. xiii, 235 p.

DE SOUSA, T. T. et al. Development of Intelligent Robotic Process Automation: A Utility Case Study in Brazil. **Institute of Electrical and Electronics Engineers**, v. 9, p. 71222-71235, 2021.

DUTRA JR, W. M. et al. **Influência do peso vivo na avaliação de carcaça suína**. Revista Brasileira de Zootecnia, v. 30, p. 1162-1169, 2001.

ESPER, I. M. et al. Robotisation and intelligent systems in abattoirs. **Trends in Food Science & Technology**, v. 208, p. 214-222, 2021.

FERREIRA, M. D. P.; FILHO, J. E. R. V. **Inserção no Mercado Internacional e a Produção de Carnes no Brasil**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Rio de Janeiro. 2019. (ISSN 1415-4765).

GERDAU. Página web: Catálogos e Manuais. Tabela de bitolas de perfis, 2023. Disponível em <<https://mais.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais?type=catalogos-e-manuais&cat=segmentos&s=perfis+W>>. Acesso em: Nov. 2023.

GONZALEZ, J. A. et al. **Fluxograma de abade e linhas de inspeção de suínos**. Livro eletrônico Mérida Publishers, 2021. Disponível em: <https://meridapublishers.com/fas/fas.pdf>. Acesso em: Out. 2023.

HIBBELER, R. C. **Análise das estruturas**. 8. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 10. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2018.

HUI, Y. H. **Handbook of Meat and Meat Processing**. New York: CRC Press. 2. Ed, 2012. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/profile/Abdelkader-Bouaziz/post/Can-we-increase-the-oxidative-stability-of-meat-and-meat-products-and-if-possible-how-is-it-done/attachment/5eb934f8f155db0001faf18d/AS%3A889966779457543%401589196023464/download/Handbook+of+Meat+and+Meat+Processing+%28nd+Est%29.pdf>>. Acesso em Out. 2023.

JUNQUEIRA, F.B. et al. Avaliação de risco de acidentes na trilhagem aérea em frigoríficos. **Revista Brasileira de Saúde e Segurança no Trabalho**, v. 14, n. 1, p. 83-98, 2019.

LAWRIE, R. A. **Ciência da carne**. 6ª. ed. Porto Alegre: Artmed, 2005.

LIMA, L. R. et al. **Trabalho de Pesquisa: Uma ferramenta gráfica para o ensino e projeto de estruturas de aço** na faculdade de engenharia da UERJ. Rio de Janeiro, 2004.

MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Defesa Agropecuária. **Portaria Nº 711**, de 20 de setembro de 1995. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-animal/empresario/arquivos/Portaria7111995alteradaportarian13042018.pdf/view>. Acesso em Set. 2023.

MORES, N. et al. **Tendências de peso vivo ao abate de suínos no Brasil: uma análise dos últimos vinte anos**. Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia, v. 68, n. 5, p. 1223-1228, 2016.

NARDIMAQ. Página web: Carretilha com Balancim, 2023. Disponível em <<https://www.nardimaq.com.br/produto/71/carretilha-com-balancim>>. Acesso em: Nov. 2023.

O PRESENTE RURAL. Alta demanda por carne de porco impulsiona crescimento da Saudali. **O Jornal do Agronegócio**, Marechal Cândido Rondon, Nov. 2021. Disponível em: <<https://opresenterural.com.br/alta-demanda-por-carne-de-porco-impulsiona-crescimento-da-saudali/>>. Acesso em: Out. 2023.

OLIVEIRA, A. P. **História da Carne e do Gado no Brasil**. Senac, 2007.

PFEIL, Walter. **Estruturas de aço: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008**. 8. Rio de Janeiro: LTC, 2008. Recurso online ISBN 978-85-216-2818-7.

SANTOS FILHO, J. I. et al. **Questões Técnicas do Peso de Abate em Suínos**. Embrapa, 105 p. Brasília, 2018.

SILVA, J. V. C. et al. **Relação entre o peso de abate e o desempenho e a qualidade da carcaça de suínos**. Revista Brasileira de Zootecnia, v. 41, n. 9, p. 2057-2064, 2012.

SOUZA, Daniel G. **Estudo da flambagem local da mesa de perfis i com alma senoidal via análise não-linear pelo MEF**. Dissertação em Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/PASA-7RQHJB/1/201.pdf>>. Acesso em maio 2024.

TIMOSHENKO, Stephen P.; YOUNG, D. H. **Theory of structures**. 2.ed. Singapore: McGraw Hill, 1965. 629 p.

ZUCCHI, J. D. **Modelo locacional dinâmico para a cadeia agroindustrial da carne bovina brasileira**. Universidade de São Paulo. Piracicaba, p. 201. 2010.