

PROJETO ESTRUTURAL DE MEZANINO METÁLICO PARA SUPORTE DE EQUIPAMENTOS EM LINHA DE PRODUÇÃO INDUSTRIAL DE CUSCUZ

DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN ENTREPISO METÁLICO PARA SOPORTE DE EQUIPOS EN UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DE CUSCÚS

STRUCTURAL DESIGN OF A STEEL MEZZANINE FOR EQUIPMENT SUPPORT IN AN INDUSTRIAL COUSCOUS PRODUCTION LINE

Presentation: Oral Communication

Fábio Guilherme de Andrade Soares¹; Gustavo Monteiro Batista²; Ian Ribeiro Nascimento³; Alexander Patrick Chaves Sena⁴

DOI: <https://doi.org/10.31692/2596-0857.IXCOINTERPDVGT.0102>

RESUMO

Este artigo apresenta o desenvolvimento do projeto estrutural de um mezanino metálico com dois patamares, destinado ao suporte de equipamentos industriais em uma linha de produção de cuscuz. O estudo compreende desde a concepção inicial até a verificação final da estrutura, fundamentando-se em princípios da Engenharia Mecânica e Estrutural e nos critérios da norma ABNT NBR 8800:2008. A escolha do aço como material principal considerou sua resistência, modularidade, durabilidade e facilidade de montagem. O projeto envolveu o dimensionamento de vigas, colunas, pisos e ligações, com análise de esforços internos como flexão, cisalhamento, compressão axial e flambagem, assegurando o atendimento aos estados limites último e de serviço. A metodologia combinou análise teórica, modelagem estrutural estática linear e verificação normativa, considerando as principais combinações de carga. O projeto demonstrou viabilidade técnica e funcional, ainda que tenha adotado simplificações, como a não consideração de efeitos dinâmicos, térmicos e fundações. As limitações apontadas abrem espaço para estudos futuros, como simulações por elementos finitos, avaliação de comportamento dinâmico e exploração de estruturas modulares. Conclui-se que o projeto não apenas atende aos requisitos estruturais e operacionais, como também integra conhecimentos adquiridos na formação em Engenharia Mecânica, reforçando a importância da aplicação normativa e da visão sistêmica na engenharia industrial.

Palavras-Chave: Mezanino Metálico, Estrutura Industrial, Dimensionamento Estrutural, Engenharia Mecânica, ABNT NBR 8800:2008, Aço Estrutural.

RESUMEN

Este artículo presenta el diseño estructural de un entrepiso metálico de dos niveles destinado al soporte de equipos industriales en una línea de producción de cuscús. El estudio abarca todas las etapas, desde la concepción inicial hasta la verificación final de la estructura, basado en principios de la Ingeniería Mecánica y Estructural, y conforme a la norma brasileña ABNT NBR 8800:2008. Se eligió el acero como material principal por su resistencia, modularidad, durabilidad y facilidad de montaje. El proyecto incluyó el dimensionamiento de vigas, columnas, pisos y uniones, con análisis de esfuerzos internos

1 Engenharia Mecânica, IFPE – Campus Caruaru, fgas@discente.ifpe.edu.br

2 Engenharia Mecânica, IFPE – Campus Caruaru, gustavobatista9778@gmail.com

3 Engenharia Mecânica, IFPE – Campus Caruaru, irn@discente.ifpe.edu.br

4 Doutorado, IFPE – Campus Caruaru, alexander.sena@caruaru.ifpe.edu.br

como flexión, cortante, compresión axial y pandeo, asegurando el cumplimiento de los estados límite último y de servicio. La metodología combinó análisis teórico, modelado estático lineal y verificación normativa, considerando las principales combinaciones de carga. A pesar de que la estructura demostró viabilidad técnica y funcional, el estudio adoptó simplificaciones como la no consideración de efectos dinámicos, térmicos y análisis de cimentaciones. Estas limitaciones abren espacio para estudios futuros, como simulaciones por elementos finitos, evaluaciones del comportamiento dinámico y exploración de estructuras modulares. El proyecto no solo cumple con los requisitos estructurales y operativos, sino que también integra conocimientos académicos adquiridos en Ingeniería Mecánica, reforzando la importancia de la aplicación normativa y del pensamiento sistémico en la ingeniería industrial.

Palabras Clave: Entrepiso Metálico, Estructura Industrial, Dimensionamiento Estructural, Ingeniería Mecánica, ABNT NBR 8800:2008, Acero Estructural.

ABSTRACT

This article presents the structural design of a two-level steel mezzanine intended to support industrial equipment in a couscous production line. The study encompasses all stages, from initial conception to final structural verification, based on principles of Mechanical and Structural Engineering and in accordance with the Brazilian standard ABNT NBR 8800:2008. Steel was selected as the main construction material due to its strength, modularity, durability, and ease of assembly. The project involved the design of beams, columns, floors, and connections, analyzing internal forces such as bending, shear, axial compression, and buckling, ensuring compliance with ultimate and serviceability limit states. The adopted methodology combined theoretical analysis, linear static modeling, and normative verification, considering the main load combinations. Although the structure demonstrated technical and functional viability, the study adopted simplifications, such as disregarding dynamic and thermal effects and foundation analysis. These limitations open opportunities for future studies, including finite element simulations, dynamic behavior assessments, and exploration of modular structures. The project not only meets structural and operational requirements but also integrates academic knowledge acquired in Mechanical Engineering, reinforcing the importance of normative application and systemic thinking in industrial engineering.

Keywords: Steel Mezzanine, Industrial Structure, Structural Design, Mechanical Engineering, ABNT NBR 8800:2008, Structural Steel.

1. INTRODUÇÃO

O milho destaca-se como uma das culturas agrícolas de maior relevância mundial, sendo base de uma cadeia produtiva que abrange desde o consumo direto até a transformação em diversos produtos industrializados. Entre seus derivados mais expressivos, encontram-se o cuscuz, os grits, o amido, a farinha e o óleo, os quais possuem elevada importância econômica e social, sobretudo em países como o Brasil, onde o milho é amplamente utilizado na alimentação humana e animal, além de ser componente essencial na formulação de rações para o setor agropecuário. Conforme argumenta Souza (2018), a cadeia produtiva do milho no Brasil configura-se como estratégica tanto para a segurança alimentar quanto para o fornecimento de matérias-primas à indústria de alimentos e de biocombustíveis.

A obtenção desses produtos envolve uma série de processos industriais interdependentes — como limpeza, moagem, secagem, classificação, armazenamento e embalagem — que requerem infraestrutura adequada para garantir eficiência, qualidade e segurança. Nesse sentido, torna-se indispensável o planejamento físico das instalações, de modo a possibilitar a correta disposição dos equipamentos, otimizar o fluxo produtivo e



maximizar o uso do espaço disponível. Rocha (2015) destaca que a configuração espacial das plantas industriais está diretamente associada ao desempenho produtivo e à redução de perdas operacionais, reforçando a importância de soluções estruturais inteligentes.

Diante dessa necessidade, os mezaninos metálicos apresentam-se como uma alternativa eficiente e funcional para a ampliação vertical das áreas industriais, permitindo maior flexibilidade no layout fabril e contribuindo para a organização e racionalização dos processos. Embora o conceito de plataformas intermediárias remonte às civilizações antigas, como a grega e a romana, foi a partir da Revolução Industrial, com o desenvolvimento do aço como material estrutural, que os mezaninos metálicos passaram a desempenhar papel de destaque na engenharia de edificações industriais. A utilização do aço permitiu a concepção de estruturas mais leves, resistentes e modulares, adequando-se com facilidade às diversas demandas dos ambientes produtivos.

De acordo com Silva (2017), os mezaninos metálicos atendem às exigências de versatilidade e reaproveitamento de espaços, apresentando ainda vantagens como montagem ágil, possibilidade de reconfiguração futura e compatibilidade com diferentes tipos de uso — desde a instalação de equipamentos até áreas administrativas e de armazenamento. Com o avanço das tecnologias da construção civil e a consolidação da indústria 4.0, essas estruturas tornaram-se elementos fundamentais em plantas industriais modernas, incluindo aquelas voltadas ao processamento de milho e seus derivados, onde a eficiência espacial e a continuidade operacional são requisitos indispensáveis.

As estruturas metálicas, especialmente as confeccionadas em aço, possuem características como alta resistência, leveza, rapidez de montagem e elevada reciclabilidade, sendo amplamente recomendadas para aplicações industriais que demandam dinamismo e sustentabilidade (PINHEIRO, 2005; NASCIMENTO, 2020). A utilização desses sistemas estruturais alinha-se, ainda, aos princípios da sustentabilidade industrial contemporânea, que incluem durabilidade, manutenção preditiva e eficiência energética. No contexto específico da Engenharia Mecânica, a análise estrutural de mezaninos metálicos demanda o estudo de esforços atuantes, o dimensionamento adequado dos perfis metálicos e a simulação de cargas estáticas e dinâmicas, garantindo não apenas a segurança dos operadores e a integridade dos equipamentos, mas também a confiabilidade contínua dos processos produtivos (CARVALHO, 2016).

Neste cenário, o presente trabalho propõe o desenvolvimento do projeto estrutural de um mezanino metálico para uma indústria de processamento de milho, com o objetivo de otimizar o espaço disponível para a instalação de equipamentos, melhorar o fluxo produtivo e

assegurar a segurança e a durabilidade da estrutura. Para isso, serão aplicados fundamentos da Engenharia Mecânica voltados à análise estrutural, à seleção criteriosa de materiais e ao dimensionamento conforme as normas técnicas vigentes, buscando atender às exigências funcionais, produtivas e ambientais da indústria contemporânea.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Estrutura de Mezaninos Metálicos: Definição e Aplicações

A aplicação de estruturas metálicas na Engenharia Mecânica é ampla, incluindo suportes, escadas, passarelas e, especialmente, mezaninos. O aço destaca-se como principal material estrutural devido à sua versatilidade e excelentes propriedades mecânicas. Segundo Silva (2021), o aço combina alta resistência com ductilidade e facilidade de conformação, sendo ideal para ambientes industriais. Callister e Rethwisch (2013) afirmam que suas propriedades tornam o aço previsível sob carregamentos mecânicos. Timoshenko (1955) destaca a ductilidade como fator essencial para absorção de energia em condições extremas. Para Beer, Johnston e DeWolf (2011), o comportamento linear-elástico do aço facilita análises computacionais precisas. Zhou et al. (2020) reforçam a importância da análise de fadiga em ciclos repetitivos, aumentando a vida útil estrutural.

Nascimento (2020) e Carvalho (2016) afirmam que, além das vantagens técnicas, o aço é sustentável, reciclável e adaptável a sistemas modulares. Os mezaninos, instalados entre pavimentos ou em espaços internos, otimizam a área útil das fábricas. Segundo Pinheiro (2005), essas estruturas devem resistir a cargas concentradas, distribuídas e dinâmicas, exigindo dimensionamento técnico rigoroso. Carvalho (2016) adverte que ignorar os efeitos de cargas repetitivas compromete a integridade estrutural, enquanto Cavalcanti et al. (2019) apontam a fadiga como causa frequente de falhas em estruturas metálicas.

Silva (2017) destaca que mezaninos otimizam o uso da área vertical, reorganizando fluxos produtivos sem afetar a área útil já ocupada. Nascimento (2020) complementa que os mezaninos metálicos são eficientes técnica e economicamente, pois reduzem custos com reformas e permitem adaptações futuras. Assim, essas estruturas contribuem para a organização, expansão e sustentabilidade dos ambientes industriais modernos, sendo elementos fundamentais na engenharia voltada à indústria 4.0..

2.2. Comportamento Estrutural do Aço

O aço é um material metálico que apresenta comportamento elástico-linear até o limite de escoamento. Dentro dessa faixa, o material é capaz de sofrer deformações e retornar à sua

forma original sem apresentar deformações permanentes, ou seja, sem manifestar comportamento plástico. A partir do momento em que o limite de escoamento é ultrapassado, o aço entra na fase de deformação plástica, na qual ocorre uma deformação significativa com pouco ou nenhum acréscimo de tensão, até que se atinja a ruptura. Para a definição da Lei de Hooke, é essencial compreender o significado das variáveis envolvidas na Equação (3). A tensão (σ), por exemplo, é definida como a razão entre a força aplicada e a área sobre a qual essa força atua, representando, portanto, a intensidade do esforço normal em um dado ponto do material.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Onde: A = área da seção transversal [m^2] e F = Força aplicada [N].

Já deformação (ε) é a variação relativa do comprimento do material, ou seja, a mudança do comprimento dividido pelo comprimento original (adimensional).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

Onde: ΔL = variação do comprimento [m] e L_0 = comprimento original [m].

Portanto a lei de Hook para a região elástica, estabelece que, para deformações dentro do limite elástico do material, a tensão (σ) é diretamente proporcional à deformação (ε).

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (3)$$

Onde: σ = tensão normal [MPa]; E = Módulo de elasticidade ou módulo de Young [MPa] e ε = deformação unitária [adimensional].

A análise estrutural de vigas submetidas a carregamentos transversais é fundamental para o dimensionamento seguro e eficiente de elementos estruturais. Dentre os tipos de solicitações, a **flexão simples** destaca-se por ser um dos fenômenos mais comuns e estudados na engenharia estrutural. Conforme exposto por Beer, Johnston e DeWolf (2011), a flexão simples caracteriza-se pela ação de um momento fletor em torno de um dos eixos principais da seção transversal da viga, resultando em sua curvatura e na variação das tensões normais ao longo da seção. A teoria clássica da flexão adota como pressuposto que as seções transversais permanecem planas e perpendiculares ao eixo neutro mesmo após a deformação — hipótese esta conhecida como hipótese de Bernoulli-Euler (TIMOSHENKO, 1955). Segundo Hibbeler (2017), a distribuição das tensões normais em uma viga submetida à flexão simples apresenta-se de forma linear, variando da tensão máxima na fibra mais distante do eixo neutro até zero

nesse próprio eixo. Tal distribuição pode ser representada por meio da Equação (4):

$$\sigma = \frac{M * \gamma}{I} \quad (4)$$

Onde: σ = tensão normal [MPa]; M = momento fletor na seção [N.m]; γ = distância da fibra ao eixo neutro [mm] e I = momento de inércia da seção [mm⁴].

A relação entre a o momento fletor e a curvatura da viga é dada pela seguinte equação:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{E * I} \quad (5)$$

Onde: ρ = raio da curvatura [mm]; M = momento fletor na seção [N.m]; E = módulo de elasticidade do material [MPa] e I = momento de inércia da seção [mm⁴].

Essa expressão demonstra a influência direta da rigidez flexional $E * I$ na deformação da viga. A flexão simples é amplamente aplicada no dimensionamento de estruturas metálicas, tais como vigas e perfis utilizados em mezaninos e estruturas industriais. Segundo Callister e Rethwisch (2013), a compreensão do comportamento à flexão permite prever tanto as tensões como as deformações, garantindo que a estrutura atenda aos critérios de segurança e funcionalidade. A deformação máxima na viga para uma carga uniformemente distribuída é obtida pela seguinte equação.

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{5qL^4}{384EI} \quad (6)$$

Onde: q = Carga distribuída [N/m]; L = Vão da viga [m]; E = módulo de elasticidade do material [MPa] e I = momento de inércia da seção [mm⁴].

O esforço axial manifesta-se quando uma força é aplicada ao longo do eixo longitudinal de um corpo, resultando em tração ou compressão. Conforme descrito por Hibbeler (2017), algumas hipóteses simplificadoras são adotadas para viabilizar a análise analítica: o material deve ser considerado homogêneo e isotrópico; a carga axial deve incidir sobre o centroide da seção transversal, de modo a evitar efeitos indesejados de flexão ou torção; e a força deve estar uniformemente distribuída sobre a superfície da seção. Quando submetidos a esse tipo de carregamento, os corpos tendem a se deformar, apresentando alongamento no caso de tração, ou encurtamento no caso de compressão. O esforço axial normal pode ser determinado pela seguinte Equação (7).

$$\sigma_{Axial} = \frac{N}{A} \quad (7)$$

Onde: σ_{Axial} = Tensão normal axial [Pa]; N = Força Normal aplicada (Carga axial) [N] e A = Área da seção transversal [m²].

Essa equação é válida para a região elástica linear, considerando que a distribuição de tensões é uniforme e que não há flambagem ao longo do corpo. A deformação Axial pode ser encontrada pela seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0} = \frac{\sigma_{Axial}}{E} \quad (8)$$

Onde: σ_{Axial} = Tensão normal axial [Pa]; L_0 = Comprimento Original [m]; δ = Deformação Absoluta [m]; ε = Deformação unitária [adimensional] e E = módulo de elasticidade do material [MPa].

A Equação (1.9) descreve a deformação Axial do corpo.

$$\delta = \frac{NL}{AE} \quad (9)$$

A análise dos esforços internos que atuam em elementos estruturais é fundamental para o dimensionamento seguro de componentes mecânicos e civis. Entre esses esforços, o cisalhamento desempenha um papel essencial em vigas submetidas a cargas transversais, especialmente em estruturas como mezaninos metálicos, onde há solicitação significativa de esforços cortantes ao longo da seção transversal da viga. De acordo com Hibbeler (2017), quando uma viga está sujeita a cargas perpendiculares ao seu eixo longitudinal, desenvolvem-se tensões internas de cisalhamento que resistem ao deslizamento relativo entre as camadas do material. Essa resistência é denominada tensão de cisalhamento (τ) e sua distribuição na seção da viga não é uniforme, variando conforme a geometria da seção transversal. A equação fundamental que rege a tensão de cisalhamento em uma viga é expressa por:

$$\tau = \frac{VQ}{Ib} \quad (10)$$

Onde: τ = Tensão de cisalhamento no ponto considerado [Pa]; V = Esforço cortante interno na seção [N]; Q = Primeiro momento de área da parte da seção acima (ou abaixo) do ponto de interesse em relação ao eixo neutro [m³]; I = Momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo neutro [m⁴] e b = Largura da seção no ponto onde se calcula τ [m].

O termo Q é calculado conforme a Equação (11):

$$Q = \int_A y dA \quad (1.11)$$

A distribuição geométrica da área de uma seção influencia diretamente a intensidade das tensões tangenciais, sendo a variável y definida como a distância entre o centroide da área parcial A e o eixo neutro. A correta compreensão dessa distribuição é essencial para garantir a integridade estrutural de vigas submetidas a cargas transversais, especialmente em regiões de conexão ou descontinuidades geométricas. A aplicação adequada da teoria do cisalhamento possibilita um dimensionamento mais seguro e eficiente.

Quanto à torção, esta é caracterizada pela aplicação de um momento torçor ao longo do eixo longitudinal do elemento estrutural, gerando rotação relativa entre seções transversais. Segundo Hibbeler (2017), trata-se de uma solicitação comum em eixos de transmissão, perfis tubulares e estruturas submetidas a carregamentos assimétricos. Em seções circulares, considera-se que não há distorções na seção, o que permite uma análise simplificada. No entanto, vigas com seção retangular tendem a sofrer distorções significativas, resultando em menor rigidez torcional e dificultando a obtenção de distribuições uniformes de tensão.

Em virtude dessas limitações, vigas retangulares não são recomendadas para resistir a torques elevados, sendo preferível o uso de perfis tubulares, que oferecem maior rigidez e desempenho estrutural. Apesar da relevância da torção em diversas aplicações, este trabalho não abordará sua análise, uma vez que a estrutura estudada está predominantemente submetida a esforços de flexão, cisalhamento e compressão axial. Além disso, os efeitos torcionais são desprezíveis ou devidamente absorvidos por elementos mais apropriados, como conexões rígidas e perfis tubulares.

2.3. Estabilidade Estrutural: Flambagem

A estabilidade estrutural constitui um aspecto fundamental nas engenharias mecânica e civil, especialmente no que se refere ao dimensionamento e à análise de elementos submetidos a esforços de compressão. De acordo com Hibbeler (2017), a estabilidade é definida como a capacidade de uma estrutura conservar seu estado de equilíbrio sob a ação de cargas aplicadas, sem apresentar deformações excessivas que comprometam sua funcionalidade ou provoquem colapso. Dentre os fenômenos associados à instabilidade estrutural, destaca-se a flambagem, caracterizada pelo deslocamento lateral repentino de elementos comprimidos, como colunas e barras esbeltas. Esse comportamento manifesta-se quando a carga axial atinge um valor crítico — denominado carga crítica de flambagem —, superando a capacidade da estrutura de manter sua configuração retilínea. A partir desse ponto, ocorre uma deformação lateral significativa, que pode conduzir à falha estrutural mesmo antes do atingimento da tensão de escoamento do material.

Segundo Hibbeler, o comportamento da flambagem pode ser representado pela fórmula de Euler, a qual relaciona a carga crítica às propriedades geométricas da seção transversal, às condições de contorno da coluna e às características mecânicas do material.:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (12)$$

Onde: P_{cr} = módulo de Elasticidade Carga crítica de flambagem [N]; E = Módulo de elasticidade [Pa]; I = Momento de inércia [m⁴]; L = Comprimento da coluna [m] e K = Fator de comprimento efetivo [adimensional].

O fator K ajusta o comprimento efetivo da coluna, refletindo os tipos de restrição nas extremidades, que podem variar entre engastadas, articuladas ou livres. Assim, a flambagem é diretamente influenciada não apenas pelas propriedades do material e pela geometria da seção, mas também pelas condições de apoio da estrutura. Engastado-engastado: $K = 0,5$. Articulad-articulado: $K = 1,0$. Engastado-livre: $K = 2,0$.

Além disso, o conceito de esbeltez, definido pelo índice $\lambda = \frac{L_{ef}}{r}$, onde $L_{ef} = KL$ e $r = \sqrt{\frac{I}{A}}$ é o raio de giração, é fundamental para a avaliação da susceptibilidade de uma coluna à flambagem. Quanto maior o índice de esbeltez, maior a probabilidade de ocorrência de flambagem. A análise da flambagem é fundamental para o dimensionamento seguro de colunas, pois sua ocorrência pode provocar falhas estruturais prematuras. Em elementos de baixa esbeltez, a falha tende a ocorrer por compressão direta, sem flambagem. Assim, a aplicação adequada da fórmula de Euler, aliada à consideração das condições reais de apoio, é indispensável na prática da engenharia.

2.4. Dimensionamento Normativo Segundo a NBR 8800:2008

O dimensionamento de estruturas metálicas no Brasil segue a ABNT NBR 8800:2008, que utiliza o método dos estados limites para garantir segurança, funcionalidade e durabilidade. Esse método considera dois grupos principais: o Estado Limite Último (ELU), relacionado à ruptura ou instabilidade estrutural, e o Estado Limite de Serviço (ELS), que trata do desempenho em uso, como deformações e vibrações excessivas. A verificação de segurança é expressa pela seguinte relação:

$$\sum \gamma_f * F_d \leq R_d \quad (13)$$

Onde: γ_f = Coeficiente de segurança aplicado às ações (cargas) [adimensional]; F_d = Valores de cálculo das ações solicitantes [N] ou [N.m] ou [MPa] e R_d = Resistência de cálculo do

elemento estrutural [N] ou [N.m] ou [MPa].

As seções transversais de perfis metálicos são classificadas conforme sua capacidade de resistir à flambagem local e redistribuir tensões. Seções compactas permitem redistribuição plástica completa; as semi-compactas atingem o escoamento no ponto mais solicitado sem instabilidade local; as esbeltas sofrem flambagem local antes do escoamento; e as muito esbeltas são inadequadas para aplicações estruturais resistentes. Para o dimensionamento à flexão, a resistência ao momento fletor é dada por:

$$M_d = \frac{M_r}{\gamma_m} \quad (14)$$

Onde: M_d = Momento resistente de cálculo [kN.m]; M_r = Momento resistente da seção (elástico ou plástico, conforme classificação) [kN.m] e γ_m = Coeficiente parcial de segurança do material [adimensional].

A NBR 8800 estabelece critérios específicos para verificação de elementos submetidos a diferentes tipos de esforços, conforme segue (Tração simples):

$$N_d \leq \frac{A_e * f_y}{\gamma_m} \quad (15)$$

Onde: A_e = Área efetiva da seção [m²]; f_y = Tensão de escoamento do aço [MPa] e γ_m = Coeficiente parcial de segurança do material [adimensional].

Compressão simples, com consideração à flambagem global:

$$N_d \leq X * \frac{A * f_y}{\gamma_m} \quad (16)$$

Onde: A = Área bruta da seção transversal [m²] e X = Fator de redução por flambagem, obtido em função da esbeltez adimensional $\bar{\lambda}$:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} \quad (17)$$

A flexo-compressão ocorre quando há combinação de esforços normais e fletores, sendo verificada por equações de interação conforme o capítulo 9 da NBR 8800:2008. A norma também trata do dimensionamento de ligações metálicas, como as parafusadas, que devem resistir a esforços de cisalhamento, tração e arrancamento:

$$V_d = \frac{V_r}{\gamma_m} \text{ onde } V_r = A_b * f_v \quad (18)$$

Onde: V_d = Força de cisalhamento de cálculo [N]; A_b = Área resistente do parafuso [m²] e f_v = Tensão admissível ao cisalhamento [MPa]

Já nas ligações soldadas, são verificadas as tensões atuantes nas linhas de solda em relação à resistência do eletrodo e à geometria do cordão.

Em mezaninos metálicos, o atendimento à NBR 8800 é fundamental, especialmente no dimensionamento de vigas, colunas, conexões e lajes colaborantes. Devem-se considerar as ações permanentes, variáveis e eventuais cargas concentradas. Além da resistência, é necessário respeitar os limites de deformação, como a flecha admissível para vigas sob carga distribuída.

$$\delta_{max} \leq \frac{L}{300} \quad (19)$$

Sendo L o vão da viga e δ_{max} a flecha máxima admissível.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A estrutura em estudo consiste em um mezanino metálico com dois níveis intermediários, projetado para instalação em ambiente industrial. Sua implantação ocorre em uma área com dimensões de 4,48 metros de largura por 6,04 metros de profundidade, resultando em uma área útil aproximada de 27,06 m² por patamar.

O primeiro nível está posicionado a 1,32 metros de altura em relação ao piso térreo, enquanto o segundo patamar encontra-se a 4,25 metros do solo, configurando um desnível vertical de 2,93 metros entre os dois níveis. Dessa forma, a estrutura aproveita eficientemente o espaço vertical disponível, possibilitando a instalação escalonada de equipamentos industriais em dois níveis distintos.

3.1. Cargas Atuantes

A estrutura será submetida a cargas concentradas decorrentes da instalação de equipamentos industriais pesados. As cargas estão distribuídas da seguinte forma:

3.1.1. Primeiro Patamar

Dois equipamentos de 10.000 kg cada.

3.1.2. Segundo Patamar

Dois equipamentos de 6.000 kg cada, totalizando uma carga concentrada de 12.000 kg. Esses equipamentos estarão posicionados de maneira simétrica sobre o segundo nível, distribuindo as ações diretamente sobre as vigas principais e secundárias.

3.1.3. Cargas Permanentes e Cargas Acidentais

Além das cargas concentradas dos equipamentos, devem ser consideradas:

Cargas permanentes: Peso próprio da estrutura metálica (perfis, chapas, fixações, etc.), calculado conforme os perfis escolhidos para vigas, pilares e conexões. Estima-se uma carga distribuída adicional de aproximadamente $0,5 \text{ kN/m}^2$ referente à estrutura e pisos metálicos.

Cargas acidentais: Considerando a possibilidade de circulação de operadores ou manutenção de equipamentos, adota-se uma carga acidental de $2,0 \text{ kN/m}^2$, conforme prescrito pela NBR 8800 (Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios).

Cargas de vento: Como a estrutura será instalada em ambiente interno, as ações eólicas não incidem diretamente sobre o mezanino.

Ações térmicas: Consideradas desprezíveis para o escopo deste estudo, devido à constância térmica no interior da instalação industrial.

Cargas de impacto: Apesar do peso dos equipamentos, não há movimentações bruscas que configurem ações de impacto, sendo todas as cargas consideradas estáticas.

3.2. Materiais e Perfis Adotados

Para a construção do mezanino, foram selecionados perfis metálicos laminados a quente do tipo Perfil I (W) e Perfil U (UAP), conforme a NBR 8800, em aço ASTM A36, com resistência à tração de 250 MPa. As conexões serão predominantemente parafusadas, utilizando parafusos ASTM A325 com arruelas e porcas travantes.

- Pilares: Perfis W 310 x 32,6;
- Vigas principais: Perfis W 250 x 33,7;
- Vigas secundárias: Perfis U 200 x 30;
- Plataforma de piso: Chapas metálicas galvanizadas tipo piso xadrez com espessura de 4,75 mm (3/16”).

Esses elementos foram selecionados com base em critérios de resistência, rigidez e facilidade de montagem, respeitando os coeficientes de segurança estabelecidos em norma.

3.3. Critérios de Dimensionamento

O dimensionamento da estrutura foi realizado segundo os seguintes critérios:

- Verificação dos estados limites últimos (ELU) e estados limites de serviço (ELS);

- Análise de esforços internos (momentos fletores, esforços cortantes e normais) obtida por modelo de pórtico espacial com articulações nas bases;
- Consideração de flambagem local e global dos elementos comprimidos;
- Aplicação dos fatores de ponderação e combinações de carga segundo a ABNT NBR 8681 (Ações e Segurança nas Estruturas).

3.4. Modelo de Cálculo e Software Utilizado

Para a análise estrutural do mezanino metálico com dois patamares, foi adotado o modelo computacional tridimensional com comportamento linear elástico. O modelo considera a estrutura como um sistema hiperestático formado por vigas e pilares articulados nas fundações, permitindo a avaliação precisa das reações de apoio, esforços internos e deslocamentos verticais nos patamares.

As ligações entre vigas e pilares foram assumidas como semi-rígidas para efeitos de modelagem, proporcionando maior realismo na simulação do comportamento estrutural. As cargas concentradas dos equipamentos foram inseridas nos pontos exatos de apoio, e as cargas distribuídas (peso próprio, piso e carga accidental) foram aplicadas nas vigas secundárias de forma contínua ao longo do vão.

O software utilizado para as análises foi o TQS Structural Engineering Software, reconhecido por sua precisão no dimensionamento de estruturas metálicas e compatível com as normas brasileiras, em especial a ABNT NBR 8800:2008. O TQS permite a geração de modelos gráficos tridimensionais e oferece recursos para análise estática linear, verificação de estados limites, dimensionamento de perfis metálicos e detalhamento das conexões.

Durante o processo de modelagem, adotaram-se os seguintes parâmetros:

- Módulo de elasticidade do aço: $E = 200 \text{ Gpa}$;
- Densidade do aço: $\rho = 78,5 \text{ kN/m}^3$;
- Coeficiente de segurança para carregamentos: conforme combinações da NBR 8681;
- Coeficientes de redução para flambagem conforme prescrições da NBR 8800.

A modelagem computacional também permitiu identificar pontos críticos de esforço nos perfis e nas conexões, orientando a escolha de seções mais adequadas para atender às condições de resistência e estabilidade.

A análise estrutural realizada por meio do software TQS forneceu os seguintes resultados principais:

- Reações de apoio: As cargas verticais resultantes nos pilares variaram entre

100 kN e 180 kN, sendo mais elevadas nos apoios sob os equipamentos de 10.000 kg. Esses valores foram utilizados para o dimensionamento das fundações e placas de base.

- Momentos fletores máximos: Os maiores momentos fletores ocorreram nas vigas principais do primeiro patamar, com valores próximos de 45 kN·m, exigindo perfis com inércia adequada e verificação de flexão composta.
- Esforços cortantes: Os maiores esforços cortantes foram registrados nas ligações entre vigas principais e secundárias, com valores da ordem de 22 kN, o que exigiu verificação adicional nas chapas de alma e reforços.
- Deslocamentos verticais: Os deslocamentos máximos verificados nos patamares foram inferiores a 6 mm, dentro do limite admissível estabelecido pela NBR 8800 (L/300), garantindo conforto e segurança no uso da estrutura.
- Verificações de flambagem: As verificações de estabilidade global e local indicaram a necessidade de reforço em apenas uma coluna central do segundo patamar, que recebeu contraventamento adicional no plano longitudinal para aumentar o raio de giração efetivo.
- Tensão nos elementos estruturais: Todas as seções metálicas adotadas apresentaram tensões de trabalho abaixo do limite de escoamento do aço ASTM A36 (250 MPa), assegurando a integridade dos elementos frente às solicitações de serviço.

Esses resultados validam a segurança e funcionalidade da estrutura projetada, permitindo a execução do mezanino com confiabilidade técnica e atendendo aos critérios normativos vigentes. A próxima etapa envolverá o detalhamento executivo da estrutura e das conexões, seguido da compatibilização com os demais projetos complementares da instalação industrial.

3.5. Verificação de Deformações e Deslocamentos

A verificação das deformações e deslocamentos verticais dos elementos estruturais foi realizada com base nos critérios de desempenho estabelecidos pela ABNT NBR 8800:2008, que define os limites admissíveis de deslocamento para estruturas metálicas em função do vão dos elementos e do tipo de uso da estrutura.

A análise computacional apontou que os deslocamentos máximos ocorreram nas vigas principais do primeiro patamar, diretamente sob os equipamentos de 10.000 kg, com valores em torno de 5,7 mm. Já no segundo patamar, os maiores deslocamentos foram observados em

vigas secundárias, com valores máximos de 4,2 mm.

Considerando que o vão médio das vigas é de aproximadamente 4,5 metros, o limite admissível de deslocamento vertical segundo a norma é de $L/300$, ou seja, 15 mm. Todos os valores obtidos ficaram significativamente abaixo desse limite, garantindo o conforto operacional, a segurança estrutural e a integridade dos equipamentos instalados.

Além dos deslocamentos verticais, foram verificadas também as deformações angulares nas ligações e os efeitos de rotação nos apoios. As deformações angulares permaneceram dentro dos limites considerados aceitáveis para estruturas metálicas parafusadas, não comprometendo o alinhamento dos equipamentos industriais nem a estabilidade da estrutura.

Não foram observados efeitos significativos de torção ou flambagem lateral nas vigas principais, graças à presença de contraventamentos e à configuração simétrica da carga. A presença de contraventamentos horizontais e verticais contribuiu de forma eficaz para o controle das deformações laterais, assegurando o comportamento rígido e estável do sistema estrutural.

4. CONCLUSÃO

O estudo de caso desenvolvido demonstrou a viabilidade técnica do projeto estrutural de um mezanino metálico com dois patamares, destinado à sustentação de equipamentos industriais em uma linha de produção de cuscuz. A estrutura foi dimensionada conforme rigorosos critérios normativos vigentes, com base na ABNT NBR 8800:2008, e submetida a análises detalhadas por meio de ferramentas computacionais especializadas.

Os resultados da modelagem estrutural evidenciaram que os perfis metálicos selecionados atendem satisfatoriamente às solicitações de cargas concentradas e distribuídas, mantendo os esforços internos dentro dos limites admissíveis de tensão e deslocamento. As verificações de estabilidade global e local confirmaram a segurança e funcionalidade da estrutura, garantindo sua integridade e a continuidade do processo produtivo sem riscos de falha prematura.

A escolha do aço estrutural laminado a quente, associada ao uso de conexões parafusadas e ao sistema de contraventamento, proporcionou uma solução racional, com facilidade de montagem e manutenção. A definição precisa das cargas atuantes e a seleção adequada dos perfis possibilitaram um sistema estrutural eficiente e economicamente competitivo, alinhado às necessidades operacionais da planta industrial.

Adicionalmente, o projeto demonstrou a eficiência na otimização do espaço vertical, por

meio da configuração escalonada dos dois patamares, respeitando os limites normativos para deslocamentos e deformações, o que assegura o conforto operacional e a durabilidade da estrutura. A modelagem computacional possibilitou a identificação de pontos críticos, permitindo reforços localizados que elevaram a segurança global do mezanino.

Embora o estudo tenha adotado simplificações, como a análise estática linear e a desconsideração de efeitos térmicos e dinâmicos complexos, os resultados obtidos indicam um elevado grau de confiabilidade para a aplicação prática do projeto em ambientes industriais semelhantes. Recomenda-se, entretanto, que projetos executivos futuros considerem essas variáveis para maior precisão e segurança.

A metodologia adotada, que integra conceitos teóricos clássicos de resistência dos materiais, análise estrutural e normativas técnicas, pode ser replicada em projetos similares, contribuindo para o desenvolvimento de soluções estruturais otimizadas e adaptáveis às demandas do setor industrial.

Por fim, o presente estudo reforça a importância da engenharia estrutural aplicada para a otimização de espaços e garantia da segurança em instalações industriais, destacando o papel do engenheiro como agente de soluções técnicas eficazes, economicamente viáveis e alinhadas às normas vigentes, promovendo impactos positivos na produtividade e segurança operacional.

REFERÊNCIAS

- BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R.; DEWOLF, J. T. Mecânica dos materiais. 6. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Materials science and engineering: an introduction. 9. ed. New York: Wiley, 2013.
- CARVALHO, A. J. Análise estrutural de mezaninos metálicos: dimensionamento e segurança em ambientes industriais. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- CAVALCANTI, L. S. et al. Avaliação da estabilidade de estruturas metálicas industriais: um estudo aplicado. Revista Brasileira de Engenharia, v. 25, n. 1, p. 77–91, 2019.
- HIBBELER, R. C. Mecânica dos materiais. 9. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2017.
- NASCIMENTO, R. P. Estruturas metálicas na era da indústria 4.0: desafios e oportunidades. Revista Engenharia e Sustentabilidade, v. 8, n. 2, 2020.
- PINHEIRO, A. C. F. B. Estruturas metálicas: cálculo, detalhes, exercícios e projetos. São Paulo: Blucher, 2005.
- ROCHA, T. A. Layout industrial e eficiência produtiva: um estudo de caso na indústria de

alimentos. 2015. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2015.

SILVA, R. L. da. Análise do comportamento mecânico do aço estrutural sob carregamentos cíclicos. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Estrutural) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

SILVA, V. G. Estudo sobre a aplicabilidade de mezaninos metálicos na indústria de transformação. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2017.

SOUZA, D. M. A cadeia produtiva do milho no Brasil: uma análise da produção, comercialização e agregação de valor. 2018. Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

TIMOSHENKO, S. P. Strength of materials. 3. ed. New York: Van Nostrand, 1955.

ZHOU, L. et al. Fatigue performance evaluation of structural steels under variable amplitude loading. *Engineering Structures*, [S.l.], v. 206, p. 110186, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110186>.

