



FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ – FAACZ
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DIEGO DE SOUSA VALÉRIO
EDUARDO FRIGINI
GUILHERME MORO
RAI DE ALMEIDA

ANÁLISE COMPARATIVA DE PROJETOS ESTRUTURAIS DE PÓRTICO

ARACRUZ-ES
2025

DIEGO DE SOUSA VALÉRIO
EDUARDO FRIGINI
GUILHERME MORO
RAI DE ALMEIDA

ANÁLISE COMPARATIVA DE PROJETOS ESTRUTURAIS DE PÓRTICO

Projeto de Conclusão de Curso elaborado em atendimento às exigências da conclusão do curso de Engenharia Mecânica ministrado na Faculdade de Ciências Humanas de Aracruz para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Guilherme Induzzi Rosalem

ARACRUZ-ES
2025

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Síntese da Comparação Normativa	36
Tabela 2 - Resumo da análise	38
Tabela 3 - Síntese da Análise de Estabilidade.....	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Guindaste de braço montado na parede.	13
Figura 2 - Guindaste de braço montado no piso..	14
Figura 3 - Guindaste de braço articulado.	15
Figura 4 - O princípio básico do método de decomposição regional	21

LISTA DE SÍMBOLOS

- A** – Área da seção transversal (mm^2)
- E** – Módulo de elasticidade (Módulo de Young) (GPa)
- F** – Força (N)
- FS** – Fator de segurança (adimensional)
- G** – Módulo de cisalhamento (GPa)
- I** – Momento de inércia da seção transversal (mm^4)
- K** – Matriz de rigidez
- L** – Comprimento (mm)
- M** – Momento fletor ($\text{kN}\cdot\text{m}$)
- P** – Carga aplicada (kN)
- P_{cr}** – Carga crítica de flambagem (kN)
- g** – Aceleração da gravidade (m/s^2)
- r** – Raio de giração da seção transversal (mm)
- u** – Vetor de deslocamentos (mm)
- δ** – Deflexão ou deslocamento (mm)
- φ** - Coeficiente Dinâmico
- ε** – Deformação específica (adimensional)
- λ** – Índice de esbeltez (adimensional)
- λ_{crit}** – Multiplicador de carga crítica (autovalor) (adimensional)
- ν** – Coeficiente de Poisson (adimensional)
- ρ** – Densidade do material (kg/m^3)
- σ** – Tensão normal (MPa)
- σ_e** – Tensão crítica de Euler (flambagem) (MPa)
- σ_{VM}** – Tensão equivalente de Von Mises (MPa)
- σ_y** – Tensão de escoamento (MPa)
- τ** – Tensão de cisalhamento (MPa)
- ω** – Fator de redução baseado no índice de esbeltez (adimensional)

SUMÁRIO

1. RESUMO	6
2. INTRODUÇÃO	7
2.1. OBJETIVOS	8
2.1.1. Objetivo Geral	8
2.1.2. Objetivos Específicos	8
2.2. JUSTIFICATIVA	8
3. REFERENCIAL TEÓRICO	10
3.1. Vigas e Guindastes de Braço	10
3.1.1. Análise de estabilidade	15
3.2. Análise de Elementos Finitos	16
3.3. Análise de elementos finitos e otimização de guindastes	24
4. METODOLOGIA	32
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO	35
6. CONCLUSÃO	50
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1. RESUMO

Os pórticos, em especial os modelos articulados, desempenham papel essencial na segurança de atividades em altura, pois funcionam como estruturas de apoio e pontos de ancoragem para sistemas de proteção contra quedas. Devem apresentar elevada estabilidade estrutural e resistência mecânica, sendo projetados para suportar esforços significativos, inclusive cargas dinâmicas, o que exige critérios de dimensionamento equivalentes aos aplicados a equipamentos de içamento. Nesse contexto, a análise estrutural torna-se indispensável, destacando-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) como ferramenta fundamental para a avaliação das tensões, deformações e condições de estabilidade, assegurando a conformidade com normas técnicas.

Os guindastes são equipamentos mecânicos destinados à elevação e movimentação de cargas nos setores industrial, portuário e da construção civil. Atualmente, a crescente exigência por desempenho estrutural, redução de peso e confiabilidade operacional tornou imprescindível a aplicação de métodos computacionais avançados, como o MEF, no desenvolvimento e na análise desses equipamentos.

O presente trabalho tem como propósito realizar uma análise comparativa de três estudos acadêmicos voltados ao projeto e à avaliação estrutural de equipamentos de içamento de carga aplicados a diferentes contextos operacionais. Busca-se examinar as metodologias empregadas, as escolhas normativas, as condições de contorno e os critérios de falha adotados, com o objetivo de identificar boas práticas, bem como limitações técnicas que comprometam a aplicabilidade dos resultados. A relevância da pesquisa fundamenta-se na importância estratégica dos equipamentos de elevação de carga, cuja integridade estrutural está diretamente relacionada à segurança das operações, à proteção de vidas e à preservação de bens materiais.

2. INTRODUÇÃO

Guindastes representam uma categoria específica de dispositivos mecânicos essenciais para a movimentação e içamento de cargas em ambientes industriais, de construção civil e de transporte, sendo equipados tipicamente com cabos, correntes e polias. Sua função reside em proporcionar vantagem mecânica para o manejo eficiente de objetos de grande porte, transportando-os horizontal e verticalmente. Paralelamente, os pórticos, especialmente os articulados, constituem estruturas robustas de suporte utilizadas frequentemente em contextos de segurança, como pontos de atracação de trava-quedas. Tais pórticos articulados são concebidos para serem estruturas remanejáveis e estáveis que provêm um ponto de ancoragem seguro e confiável, devendo ser dimensionados com o mesmo rigor de equipamentos de içamento para suportar forças de impacto elevadas, garantindo a segurança operacional e a proteção contra quedas dos trabalhadores em altura (Vieira, 2022).

O desenvolvimento tecnológico desses equipamentos remonta a invenções históricas cruciais, iniciando com o shadouf – um mecanismo de elevação de água da Mesopotâmia pré-histórica. A evolução significativa dos sistemas de elevação ocorreu na Grécia Antiga, onde surgiram os guindastes de construção impulsionados por tração humana ou animal, empregados na elevação de elementos para a construção de estruturas. O Império Romano aprimorou esses dispositivos com a criação de guindastes maiores que utilizavam rodas movidas por tração humana para manipular cargas mais pesadas. Durante a Alta Idade Média, o uso se expandiu para guindastes portuários, vitais no carregamento, descarregamento e construção naval. Originalmente construídos em madeira, esses equipamentos fizeram a transição para o ferro fundido, ferro e aço com a Revolução Industrial, conferindo-lhes a resistência e durabilidade necessárias para as demandas da engenharia moderna (Ceccarelli, 2020).

Na engenharia mecânica, a análise estrutural é indispensável para prever como materiais e componentes se comportam sob tensões operacionais, sendo fundamental para a concepção segura, resistente e confiável de máquinas e estruturas. O avanço na complexidade geométrica e na necessidade de otimização estrutural levou à adoção crescente do Método dos Elementos Finitos (MEF). O MEF é uma poderosa ferramenta numérica que permite a discretização de sistemas

contínuos complexos em elementos menores, facilitando a modelagem de comportamentos não-lineares, carregamentos dinâmicos e formas irregulares. Na simulação de pórticos de segurança, o MEF é crucial para calcular com precisão a distribuição de tensões e deformações, garantindo que a estrutura não exceda seu limite elástico e cumpra os rigorosos critérios de estabilidade e resistência definidos pelas normas técnicas (Arangarajan et al. 2024).

2.1. OBJETIVOS

2.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é realizar uma análise comparativa exaustiva de três estudos acadêmicos distintos, doravante referidos como Estudo A, Estudo B e Estudo C, que abordam o projeto e a análise estrutural de guindastes em cenários de aplicação variados: agrícola, portuário e de manuseio de sucata.

2.1.2. Objetivos Específicos

O objetivo desta análise é dissecar as metodologias empregadas, contrastando as escolhas normativas, as estratégias de discretização da malha, a definição de condições de contorno e a interpretação dos critérios de falha. Serão identificadas as melhores práticas que devem nortear projetos futuros, bem como as omissões críticas e erros conceituais que limitam a validade industrial dos resultados apresentados. A análise permeia desde a fundamentação teórica até a validação pós-processamento, oferecendo uma visão holística do estado da arte no ambiente acadêmico de engenharia aplicada.

2.2. JUSTIFICATIVA

Este estudo se justifica porque a engenharia de equipamentos de elevação de carga, especificamente no nicho de guindastes articulados hidráulicos (comumente denominados "Muncks" no Brasil) e guindastes portuários, representa um segmento crítico da engenharia mecânica. A integridade estrutural destes equipamentos não é apenas uma questão de desempenho operacional, mas um imperativo de segurança

pública e preservação patrimonial. Historicamente, o dimensionamento destas estruturas dependia de cálculos analíticos simplificados, baseados na resistência dos materiais clássica e estática gráfica. No entanto, a complexidade geométrica das seções transversais modernas, a utilização de aços de ultra-alta resistência e a necessidade de otimização de peso para maximizar a carga útil veicular tornaram o Método dos Elementos Finitos (MEF) uma ferramenta indispensável.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Vigas e Guindastes de Braço

As vigas são elementos estruturais que suportam cargas aplicadas transversalmente aos seus eixos longitudinais. As vigas têm uma ação de suporte de carga muito mais complexa do que outros elementos estruturais, como treliças e cabos. Pouco se sabia sobre o mecanismo exato pelo qual as vigas suportam cargas até recentemente, considerando o longo período de tempo em que se descobriu que esses elementos eram utilizados em civilizações antigas e recentes. A transferência de carga por uma viga ocorre principalmente por flexão e cisalhamento. Qualquer elemento estrutural pode ser considerado uma viga se as cargas causarem flexão no elemento. Se uma quantidade substancial de carga axial também estiver presente, o elemento é denominado viga-coluna (Kumar, 2015).

Embora algum grau de efeitos axiais esteja presente em qualquer elemento estrutural, em diversas soluções práticas, o efeito axial pode ser negligenciado e o elemento pode ser tratado como uma viga. Entretanto, a ação estrutural de uma viga é predominantemente de flexão, estando também presentes outros efeitos como cisalhamento, apoio e flambagem (Fatimah, 2011). A indústria atual exige equipamentos versáteis, eficientes e econômicos, que ao mesmo tempo proporcionem maior flexibilidade e economias significativas por meio do aumento da produtividade. Existem diversos equipamentos utilizados na indústria para movimentação de materiais, sendo o guindaste um deles (Chaudhary e Khan, 2015).

Um guindaste é um dispositivo mecânico de elevação equipado com um guincho, cabos de aço e polias que pode ser usado tanto para levantar e abaixar materiais quanto para movê-los horizontalmente. Ele utiliza uma ou mais máquinas simples para criar vantagem mecânica e, assim, mover cargas além da capacidade normal de um ser humano. Os guindastes são comumente empregados na indústria de transportes para o carregamento e descarregamento de mercadorias; na indústria da construção civil para a movimentação de materiais; e na indústria de manufatura para a montagem de equipamentos pesados. Ele atende a uma área maior de piso dentro de suas próprias restrições de deslocamento do que qualquer outro tipo de sistema de içamento permanente (Suratkar et al. 2013).

Um guindaste de braço é um tipo de guindaste que utiliza um braço montado para levantar e mover o material. O braço é montado perpendicularmente ou em um ângulo agudo para cima a partir de um pilar ou parede, podendo girar em torno de seu eixo central através de um arco limitado ou possivelmente um círculo completo (Chaudhary e Khan, 2015). Um guindaste de braço é, na verdade, um monotrilha que é sustentado por seus membros de apoio e pivotado em uma extremidade. A viga horizontal fornece o trilho para o carro de içamento. Os guindastes de braço têm três graus de liberdade. Eles são vertical, radial e rotativo. No entanto, eles não podem alcançar cantos (Bollimpelli e Kumar, 2015).

A capacidade de elevação desses guindastes pode variar de 0,5 tonelada a 200 toneladas e o alcance de alguns metros a 50 metros. Esses guindastes encontram diversas aplicações em áreas portuárias, canteiros de obras e outros trabalhos ao ar livre. Para movimentação de carga geral, as capacidades de elevação geralmente variam de 1,5 tonelada a 5 toneladas, com alcance máximo de 30 metros. Guindastes de braço equipados com sistema de garra geralmente têm capacidade de 3 toneladas, operando de 50 a 100 ciclos por hora. As alturas de elevação podem ser de 30 metros ou mais. Frequentemente, esses guindastes são equipados com dois guinchos de içamento principais que podem ser usados individualmente ou em conjunto para elevar uma carga. Guindastes de braço montados em coluna são comumente usados na indústria de embalagens. O tamanho do guindaste pode ser visualizado a partir da altura do operador. Esses guindastes são usados para içar cargas de até 1 tonelada (Dandavatimath e Sarode, 2017).

Consiste em um pilar fixado na parede ou montado no chão. O pilar suporta uma lança horizontal ou braço que possui um guincho móvel. O guincho é usado para levantar ou abaixar uma carga com a ajuda de um tambor, ou roda de elevação, que possui uma corrente ou cabo enrolado ao seu redor. O tambor é acionado eletricamente ou pneumaticamente e pode ser operado manualmente. O meio de elevação geralmente é uma corrente, embora também possa ser uma corda de fibra ou um cabo de aço. A carga é içada com a ajuda de um gancho de elevação preso ao meio de elevação. O termo "guindaste de lança" engloba todos os guindastes que possuem uma lança giratória fixada a um mastro vertical e que suporta um mecanismo de elevação operado eletricamente ou pneumaticamente. Os guindastes de lança são utilizados não apenas na construção civil, mas também em navios comerciais e militares.

Estudos de pesquisa consideráveis foram realizados sobre tensões estruturais e equivalentes, a fim de garantir a segurança sob carregamento estático e o comportamento dinâmico de guindastes. A análise de elementos finitos é uma técnica poderosa, originalmente desenvolvida para a solução numérica de problemas complexos em mecânica estrutural, e permanece como um método de escolha para sistemas complexos. O princípio básico desse método numérico é dividindo toda a grande estrutura em pequenos elementos com formas simples. As variáveis desconhecidas de um elemento são os valores de deslocamento para cada ponto nodal (Gerdemeli et al. 2010).

Os guindastes podem ser classificados com base na capacidade de carga, na altura em que a carga é elevada e na frequência de elevação das cargas. Por exemplo, a Crane Manufacturers Association of America (CMAA) classificou os guindastes da seguinte forma (Arvind Kumar, 2015).

1. Classe A1 (serviço de reserva)
2. Classe A2 (uso pouco frequente)
3. Classe B (serviço leve)
4. Classe C (serviço moderado)
5. Classe D (resistente)
6. Classe E (serviço de ciclo de trabalho)
7. Classe F (siderúrgica)

Existem centenas de tipos de guindastes de braço disponíveis, dependendo do fabricante. Mas, para os fins deste estudo, vamos analisar três tipos comuns de guindastes de braço, que diferem entre si para atender às necessidades da sua operação. Além disso, cada tipo de braço possui seu próprio conjunto de subcaracterísticas e pode ser modificado para uma finalidade específica. Isso facilita e torna eficiente a personalização do sistema perfeito para sua aplicação. Analisaremos três guindastes de braço comuns (Arvind Kumar, 2015).

1. braço articulado montado na parede
2. braço articulado montado no chão
3. Lança articulada

Os três tipos de guindaste podem ser divididos em categorias de instalação específicas e personalizados para atender às suas necessidades.

Guindaste de braço montado na parede, Figura 1 proporciona rotação de 270° para uma área de cobertura circular. Com capacidades de até 5 toneladas, esses sistemas não são leves. No entanto, não são tão robustos quanto um sistema autoportante. Os guindastes de braço montados na parede não requerem espaço no chão. Existem dois tipos principais de guindastes de braço montados na parede: cantilever e com tirantes. O projeto cantilever oferece a maior folga acima e abaixo da lança. Também transmite menos força direta às colunas do edifício, facilitando a instalação em praticamente qualquer parede ou coluna. O guindaste de braço montado na parede com tirantes é extremamente econômico. Não inclui estrutura de suporte sob a lança, permitindo que o carro de elevação percorra facilmente todo o comprimento da lança (Arvind Kumar, 2015).

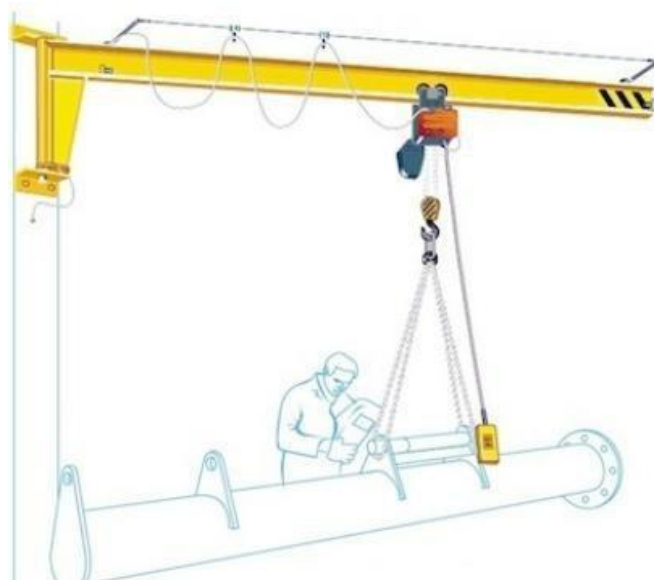


Figura 1 - Guindaste de braço montado na parede. Fonte: (Arvind Kumar, 2015).

Guindaste de braço montado no piso, Figura 2. Existem muitos tipos de guindastes de braço na categoria de montados no piso e cada um serve a um propósito específico. Por exemplo, um guindaste de braço autoportante (também conhecido como *autônomo*) é montado em uma fundação, o que significa que pode ser instalado em praticamente qualquer lugar, interno ou externo. Os sistemas autoportantes oferecem capacidades maiores, vãos mais longos e rotação de 360° e 270° para cobrir uma grande área circular dentro de sua instalação. Esses sistemas são robustos e resistentes em comparação com outros tipos montados no piso, mas

também são mais caros e exigem uma fundação especial para a montagem adequada (Arvind Kumar, 2015).

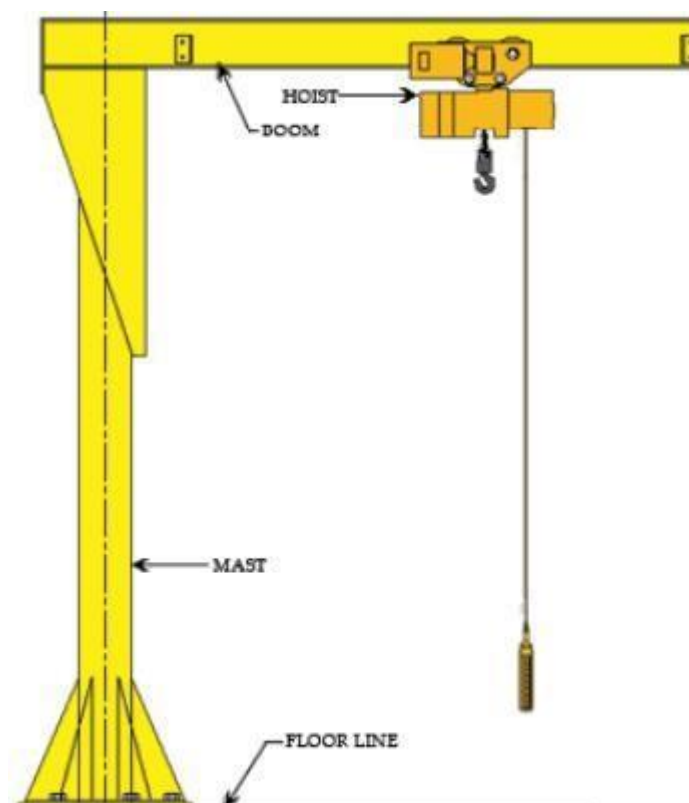


Figura 2 - Guindaste de braço montado no piso. Fonte: (Arvind Kumar, 2015).

Isso ajuda a eliminar o custo de uma fundação especial, que é necessária para o sistema autoportante. Os guindastes de lança tipo mastro têm um custo menor e podem ser totalmente em balanço ou com balanço rebaixado, dependendo da estrutura suspensa de suas instalações. O guindaste de lança tipo mastro com balanço rebaixado é quase idêntico ao sistema totalmente em balanço, exceto pelo fato de possuir conexões de placa lateral que permitem abaixar a lança a uma altura específica no mastro. Isso é extremamente útil para instalações que exigem espaço livre adicional acima devido a obstruções localizadas abaixo do topo do mastro. Os guindastes de lança montados no piso são uma excelente opção, sejam eles autoportantes ou montados em mastro, dependendo das necessidades de sua aplicação (Arvind Kumar, 2015).

Guindaste de braço articulado, Figura 3. Essas soluções versáteis para movimentação de materiais são capazes de içar e mover cargas em torno de cantos e colunas, alcançar o interior de máquinas e atender praticamente qualquer ponto entre o ponto de ancoragem do pivô e o alcance máximo da lança. Oferecem múltiplas opções de instalação, incluindo montagem no piso, na parede, no teto e até mesmo

em pontes. Os guindastes de braço articulado são projetados com um braço interno e um braço externo, permitindo que se articulem em torno de várias partes de uma instalação, dentro e fora de máquinas e sobre e sob praticamente qualquer outra obstrução. O braço interno proporciona 270° de rotação, enquanto o braço externo proporciona 360° de rotação.

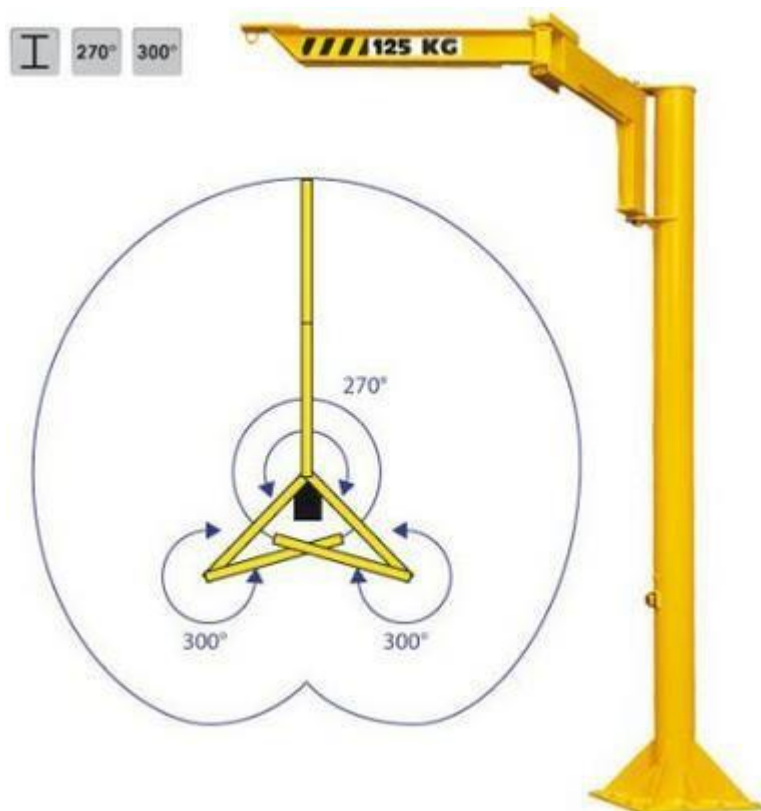


Figura 3 - Guindaste de braço articulado. Fonte: Arvind Kumar, 2015

Com múltiplos tipos de instalação e excelente flexibilidade de elevação e amplitude de movimento, estes sistemas são uma ótima opção para quase qualquer tipo de aplicação (Arvind Kumar, 2015).

3.1.1. Análise de estabilidade

A análise de estabilidade de um guindaste de braço é necessária para evitar acidentes que podem ser causados em caso de falha da viga do guindaste. A partir de estudos e investigações, observa-se que o guindaste de braço requer manutenção corretiva na maioria das vezes ao ano devido aos motivos apresentados a seguir (Chaudhary e Khan, 2015):

- O deslocamento lateral da viga em balanço tipo I em relação ao eixo de montagem restringe o movimento do carrinho.
- A flexão na extremidade livre prendeu o carrinho na posição de inclinação.
- A curvatura causou danos à viga.

Flambagem lateral por torção:

- Quando uma carga aplicada causa deslocamento lateral e torção em um elemento, ocorre flambagem por torção lateral.
- A flambagem lateral por torção pode ocorrer em uma viga sem restrições ou sem suporte lateral.
- Uma viga é considerada não restringida quando sua flange de compressão está livre para se deslocar lateralmente e girar.

A flambagem lateral é um aspecto importante do projeto de elementos fletidos de vigas I de paredes finas. Quando uma viga I esbelta é submetida à flexão em torno de seu eixo forte com contraventamento lateral insuficiente, pode ocorrer flexão fora do plano à medida que a carga aplicada se aproxima de seu valor crítico. Nesse valor crítico, ocorre a flambagem lateral (Brettelle, 2005).

A flambagem lateral por torção é efetiva em vigas lateralmente irrestritas que são carregadas de forma a sofrerem flexão em torno de seu eixo principal. Calcular a menor carga que causa flambagem lateral por torção na viga, conhecida como carga crítica de flambagem lateral por torção, é um problema complexo. Especialmente para seções submetidas a maiores momentos de empenamento durante a torção, como as seções I, o desenvolvimento de uma solução analítica não é viável. Muitos estudos foram conduzidos em busca dessa solução. O uso de almas onduladas é um método promissor para alcançar rigidez fora do plano e resistência ao cisalhamento adequadas sem a necessidade de reforços. Portanto, restrições laterais adicionais devem ser implementadas para controlar a flambagem lateral utilizando almas onduladas (Divahar e Joanna, 2014).

3.2. Análise de Elementos Finitos

A análise de elementos finitos (AEF) foi proposta inicialmente no início da década de 1940 para a resolução de problemas de torção, sendo utilizada até a década de 1960, quando o termo "método dos elementos finitos" foi introduzido por Clough nos Estados Unidos. No final da década de 1960 e início da década de 1970, a AEF foi desenvolvida e consolidada, passando a ser amplamente utilizada em diversos setores industriais como uma excelente ferramenta computacional e um método de solução relativamente preciso. O método dos elementos finitos, como meio de análise computacional, tem sido amplamente utilizado em análises computacionais de engenharia (Yao et al. 2021).

Desde a sua introdução, após décadas de desenvolvimento, o campo de aplicação do método de análise de elementos finitos expandiu-se continuamente, e seu escopo de aplicação foi estendido de problemas estruturais de barras para mecânica da elasticidade e mecânica elastoplástica, e de problemas de mecânica dos sólidos para mecânica dos fluidos e termodinâmica. A ideia básica do método dos elementos finitos é discretizar uma estrutura que, de outra forma, seria contínua (incluindo sistemas de barras, meios contínuos, etc.) em várias unidades interconectadas por um número finito de nós, sendo o meio contínuo considerado como uma combinação de unidades interconectadas apenas nas posições dos nós (Yao et al. 2021).

Como método de análise numérica, o método dos elementos finitos obtém um conjunto de equações algébricas lineares cuja incógnita é o deslocamento nodal. Em seguida, esse conjunto de equações é resolvido para obter as variáveis desejadas, e os valores nodais obtidos e a função de interpolação definida podem ser usados para determinar as funções de campo na célula e até mesmo em todo o conjunto. De modo geral, a análise de elementos finitos baseada no método de deslocamento geralmente requer primeiro a discretização estrutural, seguida da análise de unidades e, finalmente, da análise global (Howard, 2014). Especificamente, ela pode ser dividida nas seguintes quatro etapas:

Discretização estrutural: A discretização estrutural é a primeira e mais importante etapa da análise de elementos finitos. Na discretização estrutural, se o número de células for muito grande, aumentará consideravelmente o tempo de computação e o custo de hardware. Se o número de células for muito pequeno, os resultados da análise diferirão muito da situação real. Portanto, para garantir a precisão dos resultados e a alta eficiência do cálculo, é necessário escolher o

tamanho, o número e o arranjo de células adequados. Este processo de discretização estrutural determina diretamente a correção dos resultados da análise, o que é particularmente importante (Howard, 2014).

Determinação do padrão de deslocamento da unidade: Após a estrutura geral ser discretizada em um corpo unitário, este corpo unitário torna-se o objeto de análise, sendo necessário selecionar a função apropriada para expressar a deformação por tensão-deformação e o deslocamento da unidade. Geralmente, escolhe-se uma função polinomial, pois ela é fácil de listar e calcular. De forma geral, a expressão da função de deslocamento de qualquer ponto na unidade é:

$$f = \{N\}\delta e \quad (1)$$

Onde f é o vetor de deslocamento em qualquer ponto da célula, $\{N\}$ é a matriz de função de forma e δe é a matriz de coluna de deslocamento nos nós da célula.

Análise das características da unidade: De acordo com os princípios básicos da mecânica elástica, sob a ação de uma força, existe uma força mútua entre as partes dentro do objeto, chamada força interna, e a mudança na posição dos pontos dentro do objeto é chamada de deslocamento. O estudo das mudanças de deslocamento no objeto pode ser decomposto em duas categorias: deslocamento rígido do objeto e deslocamento relativo entre os pontos de massa dentro do objeto. De acordo com as equações básicas da mecânica elástica, a deformação em qualquer ponto dentro da célula pode ser derivada do deslocamento dos nós:

$$d = \{B\}\delta e \quad (2)$$

Onde, d é a deformação em qualquer ponto da célula e $\{B\}$ é a matriz geométrica da deformação da célula.

Com base nas equações físicas, pode-se deduzir que a variação do deslocamento nos nós do corpo unitário em função da matriz de tensão unitária é:

$$\varepsilon = \{F\}\{B\}\delta e \quad (3)$$

Onde, $\{F\}$ é a matriz de elasticidade associada ao material do objeto analisado.

Na análise de problemas estáticos, o princípio do trabalho virtual é frequentemente utilizado. Na estrutura de um número finito de unidades obtida após a discretização, para analisar a relação entre o deslocamento dos nós do corpo unitário e a carga aplicada ao corpo unitário, é necessário considerar o deslocamento virtual, ou seja, o deslocamento infinitesimal adicional possível do elastômero para atender às restrições e às condições de continuidade. Para um sistema em equilíbrio estático, todas as cargas externas, após o deslocamento virtual, realizam trabalho. O trabalho realizado por todas as cargas externas, através do deslocamento virtual, é denominado trabalho virtual (Franchino-Vias, 2021). Com base nisso, a relação funcional entre a carga aplicada na unidade e os nós da unidade pode ser obtida como:

$$P_e = \{N_e\} \delta e \quad (4)$$

Onde, $\{N_e\}$ é a matriz de rigidez do corpo unitário.

Esta matriz pode ser expressa como:

$$\{N_e\} = \int B^T F B dv \quad (5)$$

Estabelecendo equações de equilíbrio para toda a estrutura.

Na situação real, o objeto de análise é uma estrutura contínua e as tensões são transferidas através da fronteira comum. No entanto, após a discretização da estrutura, o objeto de análise torna-se um número finito de unidades conectadas por nós, e as tensões são transmitidas através dos nós. Portanto, a força que atua na fronteira comum é igualada aos nós, e a força nodal equivalente substitui a força que atua no corpo unitário, ou seja, a força nodal equivalente. Após a equivalência, a equação de equilíbrio global pode ser obtida a partir das equações de cada nó unitário (Matsumoto, 2015) escritas na forma matricial como:

$$P = N \delta \quad (6)$$

Onde P, N e δ são as tensões globais nos nós unitários da estrutura, a matriz de rigidez global e os deslocamentos globais dos nós unitários da estrutura, respectivamente.

A análise estrutural representa uma mudança no método moderno de projeto estrutural, passando da especificação e do projeto empírico para o projeto analítico. O projetista pode visualizar as características de tensão, deformação e dinâmica de todo o projeto após a aplicação de cargas, a partir da análise de simulação na fase de

projeto, avaliar a qualidade do projeto e encontrar a melhor solução, o que representa um salto qualitativo na qualidade do projeto estrutural. Para analisar e simular a estrutura por métodos numéricos, como a análise de elementos finitos, é necessário compreender as características da análise estrutural, pois somente assim se podem obter resultados de análise corretos e realistas. A estrutura não é formada de uma só vez, mas gradualmente durante o processo de construção, e deve ser analisada em etapas, de acordo com o processo construtivo real. Devido à complexidade dos materiais e forças estruturais, fissuração do concreto e anisotropia, a não linearidade geométrica e a não linearidade do material da estrutura devem ser consideradas na análise de elementos finitos para se obter resultados de análise corretos. Devido à ampla aplicação da tecnologia de protensão, o efeito da protensão deve ser considerado ao analisar a estrutura com protensão (Nguyen e Vo-Minh, 2022).

Atualmente, o método dos elementos finitos (MEF) tornou-se uma importante ferramenta analítica para a resolução de problemas complexos de engenharia. Como parte fundamental da MEF, a análise estrutural tem sido amplamente utilizada em diversos setores da economia nacional, como aviação, aeroespacial, automotivo, naval, engenharia civil e energia. Com a expansão do tamanho dos modelos e a melhoria da precisão das soluções, a demanda por computação massivamente paralela na análise estrutural por MEF aumenta a cada dia, e os requisitos se tornam cada vez mais exigentes. A parte mais demorada da análise estrutural por elementos finitos é a solução do sistema de equações lineares. Portanto, a paralelização da solução de equações lineares é de grande importância (Nguyen e Vo-Minh, 2022).

Para reduzir o tempo de análise de elementos finitos (FEA) para análise estrutural, o método de decomposição de regiões pode lidar eficazmente com o problema de solução computacional da FEA (Jing-Fu, 2017). Como mostrado na Figura 4, o princípio básico da decomposição de regiões é:

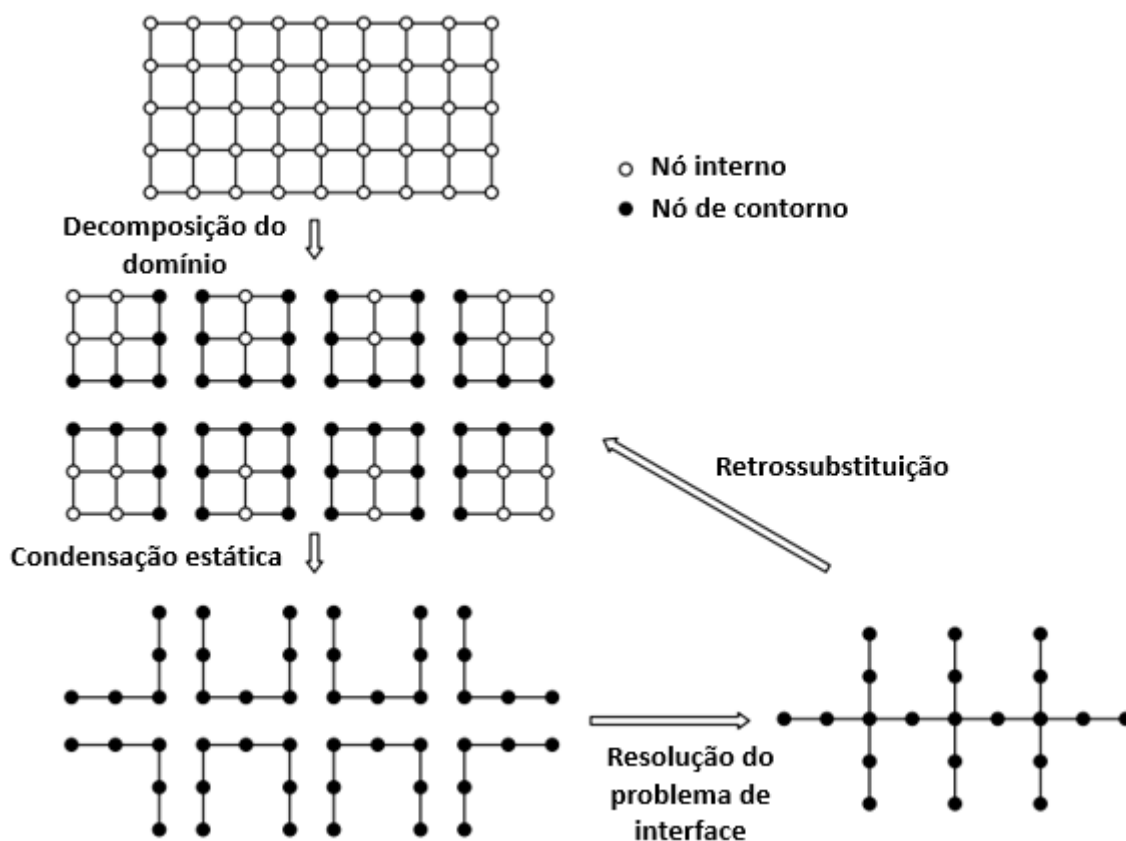


Figura 4 - O princípio básico do método de decomposição regional. Fonte: Jing-Fu, 2017

Decomposição de regiões: A malha de elementos finitos estruturais é dividida em várias sub-regiões, e cada sub-região é atribuída a um processador para processamento separado. Dentro de cada sub-região, os nós são divididos em nós internos e nós de contorno. Os nós exclusivos de cada sub-região são chamados de nós internos, e os nós compartilhados por pelo menos duas sub-regiões são chamados de nós de contorno. Os graus de liberdade correspondentes aos nós internos e de contorno são chamados de graus de liberdade internos e de contorno, respectivamente.

Redução de subdomínio: Primeiramente, de acordo com o princípio de numeração dos graus de liberdade internos primeiro e depois dos graus de liberdade de fronteira, as equações de equilíbrio do sistema de cada sub-região são formadas independentemente ao mesmo tempo:

$$\begin{bmatrix} K_{II} & K_{IB} \\ K_{BI} & K_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_I \\ x_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_I \\ P_B \end{bmatrix} \quad (7)$$

Onde K representa a matriz de componentes da matriz de rigidez, o subscrito I representa os graus de liberdade internos e o subscrito B representa os graus de liberdade da fronteira.

Como pode ser observado na equação acima, a equação de equilíbrio de cada sub-região contém incógnitas tanto de graus de liberdade internos quanto de fronteira. Para reduzir o tamanho da solução do sistema, é necessário eliminar as incógnitas de graus de liberdade internos e transferir sua contribuição para a solução geral do sistema para as incógnitas de graus de liberdade de fronteira. O processo de eliminação das incógnitas de graus de liberdade internos em cada sub-região é chamado de aglomeração. A equação da interface de cada sub-região obtida por condensação é:

$$\tilde{K}x_B = \tilde{P} \quad (8)$$

Onde $\tilde{K}$ é a matriz de rigidez à retração e $\tilde{P}$ é o vetor de carga de retração. $\tilde{K}$ é calculado como:

$$\tilde{K} = K_{BB} - K_{BI}(K_{II})^{-1}K_{IB} \quad (9)$$

$\tilde{P}$ é calculado como:

$$\tilde{P} = P_B - K_{BI}(K_{II})^{-1}P_I \quad (10)$$

Após a eliminação dos graus de liberdade internos por condensação, obtêm-se as equações de interface de cada sub-região. Para obter os valores de deslocamento de fronteira de cada sub-região, as equações de interface de todas as sub-regiões devem ser resolvidas conjuntamente. Ao resolver pelo método iterativo, não é necessário combinar as equações de interface globais do sistema. A matriz de rigidez de contração e o vetor de carga externa de contração de cada sub-região permanecem armazenados na memória local da máquina nodal correspondente de forma distribuída durante a solução, e os resultados intermediários do cálculo também são armazenados de forma distribuída na forma de produtos matriz-vetor. Após a obtenção dos deslocamentos de fronteira, os deslocamentos internos de cada sub-região podem ser resolvidos independentemente por retroalimentação, de acordo com a seguinte equação:

$$x_I = (K_{II})^{-1}(P_I - K_{IB}x_B) \quad (10)$$

As duas condensações são, em última análise, utilizadas para obter as equações de interface para cada sub-região de primeiro nível. As equações de equilíbrio do sistema para cada sub-região de segundo nível são formuladas inicialmente e, em seguida, seus graus de liberdade internos são eliminados por condensação. Posteriormente, as equações de equilíbrio do sistema para cada sub-região de nível 1 são formuladas com base nessas equações, e os graus de liberdade internos também são eliminados por condensação. Dessa forma, as equações de interface para cada nível de sub-região são obtidas considerando apenas os graus de liberdade da fronteira. No sistema de coordenadas retangulares tridimensional, a equação de equilíbrio de qualquer ponto no elastômero ao longo dos eixos coordenados x, y, z é:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \bar{f}_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \bar{f}_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \bar{f}_z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Onde $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ é a tensão positiva na direção x y z, $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{yx}, \tau_{yy}, \tau_{xz}$, é a tensão de cisalhamento no plano correspondente, $\bar{f}_x, \bar{f}_y, \bar{f}_z$ é a componente da força volumétrica por unidade de volume na direção x y z , e a equação de equilíbrio é escrita na forma matricial como

$$L\sigma + \bar{f} = 0 \quad (12)$$

Onde L é o operador diferencial, σ é o vetor de tensão e $\bar{f}$ é o vetor de força volumétrica.

$$L = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}$$

$$\sigma = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx}]^T$$

$$\bar{f} = [\bar{f}_x \quad \bar{f}_y \quad \bar{f}_z]^T$$
(13)

Sejam u, v, w os deslocamentos do elastômero nas direções x, y, z no sistema de coordenadas tridimensional em ângulo reto, respectivamente, então a forma matricial das equações geométricas pode ser escrita como:

$$\varepsilon = L^T X \quad (14)$$

Onde X é o vetor de deslocamento e ε é o vetor de deformação.

$$X = [u \ v \ w]^T \quad (15)$$

$$\varepsilon = [\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \gamma_{xy} \gamma_{yz} \gamma_{zx}]^T \quad (16)$$

3.3. Análise de elementos finitos e otimização de guindastes

As indústrias de construção modernas exigem equipamentos econômicos e altamente eficientes para o manuseio e transporte de materiais de um local para outro. Se projetados adequadamente, esses equipamentos economizam tempo e dinheiro consideráveis, aumentando assim a produtividade. Um guindaste de braço giratório é amplamente utilizado nessas indústrias para içar e movimentar materiais. Eles também são usados no setor de transportes para carga e descarga de mercadorias. Uma das principais vantagens de um guindaste de braço giratório é que ele possui três graus de liberdade, ou seja, vertical, radial e rotativo. A capacidade de elevação

desses guindastes pode variar de 0,5 toneladas a 200 toneladas (Fatima; Keong; Hashim, 2017).

Em resumo, o guindaste de braço giratório inclui todos os guindastes que possuem uma lança giratória [4] e que são fixados a um mastro vertical. Esses guindastes são classificados de acordo com sua capacidade de carga. A Crane Manufacturers Association of America (CMAA) classificou os guindastes em várias classes, de A a F, de acordo com seu ciclo de trabalho pretendido. Além disso, cada guindaste de braço giratório também pode ser personalizado e modificado para atender a propósitos específicos. Para áreas de cobertura circular, os guindastes de braço montados na parede permitem rotação de 270° e não requerem espaço no piso para operação. A força transmitida às colunas dos edifícios por esses guindastes é baixa. Como resultado, esses guindastes podem ser usados e instalados praticamente em qualquer parede ou coluna (Arvind Kumar, 2015).

Os guindastes de braço montados no piso oferecem alta capacidade e maior vão, com rotação de 360° e 270° cobrindo a área. No entanto, esses guindastes requerem fundações especiais para uma montagem adequada. Os guindastes de braço articulados possuem um braço interno que permite rotação de 270° e um braço externo que permite rotação de 360°, auxiliando na movimentação de cargas em torno de cantos e, conseqüentemente, permitindo o alcance de qualquer ponto. Os guindastes de braço requerem manutenção durante a maior parte do ano, especialmente no caso de vigas em balanço do tipo I. Devido à flambagem lateral por torção, as vigas desses guindastes podem ser danificadas. A carga aplicada causa deslocamento lateral e torção dos elementos da viga. A flambagem lateral por torção é um aspecto importante do projeto de elementos flexionados com vigas em I com paredes. Nesses casos, a carga se aproxima de seu valor crítico. A flexão fora do plano pode ocorrer devido ao contraventamento lateral insuficiente. A flambagem lateral-torsional é um modo de falha comum para vigas sem restrição lateral (Arvind Kumar, 2015).

A menor carga crítica que causa flambagem lateral-torsional é um problema difícil de resolver. Em vigas sem restrição lateral, o uso de almas onduladas aumenta a rigidez fora do plano e a resistência à flambagem por cisalhamento. Portanto, estudos ainda estão em andamento para auxiliar no controle da flambagem lateral-torsional utilizando almas onduladas. Essas análises de estabilidade de guindastes de braço são essenciais para evitar acidentes que podem resultar na falha da viga de um

guindaste de braço. Embora a literatura disponível sobre a aplicação de almas corrugadas seja muito limitada, essas corrugações permitem o uso de chapas finas sem reforços para o projeto de guindastes utilizados em construções de edifícios e pontes. Há uma redução considerável no peso da viga e no custo, pois elimina-se a necessidade de espessuras maiores e reforços. Neste artigo, uma alma com corrugação trapezoidal é utilizada para analisar a flambagem lateral-torsional da viga de um guindaste de braço (Ozbasaran, 2014).

Um estudo comparativo apresenta o desenvolvimento de modelos de elementos finitos (MEF) de uma alma plana e comparando os resultados obtidos com uma alma corrugada. Embora a análise de guindastes de braço tenha sido conduzida por muitos pesquisadores recentemente, ainda existe uma lacuna onde análises de elementos finitos aprofundadas não foram realizadas. Fatimah et al. (2013) utilizaram um modelo de elementos finitos 3D usando o LUSAS 14.3. Eles analisaram vigas de aço com alma triangular quanto ao comportamento de flambagem por cisalhamento na espessura da corrugação da alma. Dhanusha e Reddy (2016) utilizaram o software CERO para modelar um guindaste de braço articulado montado no piso. Eles compararam os resultados obtidos para as tensões desenvolvidas em dois tipos diferentes de chapas de aço. Um estudo comparativo entre projeto manual e análise por elementos finitos (FEM) foi conduzido por Gerdemeli et al. (2012). Eles concluíram que a análise por elementos finitos fornece valores mais aceitáveis com menores margens de erro.

Rajmane e Jadhav (2015), em seu trabalho de pesquisa, analisaram um guindaste de braço articulado montado em coluna utilizando software de elementos finitos. Seu estudo focou-se principalmente no cálculo das tensões de Von Mises. Eles variaram a espessura da alma para aumentar as tensões de Von Mises. Fatimah et al. (2013) estudaram o comportamento de flambagem lateral-torsional de uma viga de aço com alma trapezoidal. Eles utilizaram a análise de flambagem por autovalores para determinar a carga crítica de flambagem e descobriram que uma maior espessura de ondulação desenvolve maior resistência à flambagem lateral-torsional devido ao aumento do momento de inércia. Amreeta e Singh (2015) estudaram a análise de tensões de uma viga de guindaste de braço montado em parede simples. Eles realizaram análises de elementos finitos em diferentes seções da viga. Eles descobriram que a seção I apresenta menores tensões e deformações quando comparada à seção retangular. Chaudhary e Khan (2015) também realizaram análises

computacionais para determinar a capacidade de cisalhamento e a flambagem lateral por torção da viga em balanço de um guindaste de braço. Eles propuseram diferentes vigas em balanço com diferentes formatos de alma. Seu estudo principal focou no comprimento de preenchimento da chapa ondulada.

Moon et al. (2009) estudaram a análise de elementos finitos (FEA) de vigas I sob flexão uniforme. Eles propuseram um método aproximado para localizar o centro de cisalhamento e a constante de envolvimento de vigas I com alma corrugada. Compararam seus resultados com almas planas e descobriram que as constantes de envolvimento de vigas I com alma corrugada são maiores do que as de almas planas. Khetre et al. (2014) projetaram a lança de um guindaste giratório no SolidWorks e analisaram as tensões e deslocamentos usando o software COSMOS. Compararam seus resultados usando análise de tensão estática. Kiranalli e Patil (2015) discutiram as tensões de torção de vigas de aço em balanço com alma cônica. Usaram o software ANSYS para realizar a análise de elementos finitos de uma viga em balanço de 200×100 mm com vão de 5 m, sujeita a uma carga viva de 500 kg. Concluíram que as almas planas são mais suscetíveis à flambagem lateral por torção quando comparadas às almas planas. Eles também propuseram uma relação de conicidade adequada de 3:2.

Wan e Mahendran (2015) estudaram o comportamento de uma viga de canal com flange oca quando submetida a uma carga excêntrica no meio do vão. Eles realizaram testes experimentais e compararam seus resultados usando software de análise de elementos finitos (FEA). Para investigar os efeitos da localização e da excentricidade da carga aplicada, modelos de elementos finitos de vigas de aço leve foram validados. Eles utilizaram um dispositivo de teste especial para simular diferentes excentricidades de carregamento e condições de contorno. Stefano et al. (2016) estudaram o efeito da tensão de cisalhamento e das deformações de uma viga em balanço cônica simétrica usando modelagem matemática e equações constitutivas. Lee et al. (2004) estudaram a flambagem lateral por torção de uma viga composta usando um modelo de elementos finitos unidimensional; eles descobriram que a carga transversal em uma viga afeta a capacidade de flambagem lateral por torção devido à orientação das fibras e que a carga máxima de flambagem ocorre em um ângulo de fibra de 45° .

Trahair (2014) também realizou análises de elementos finitos em membros de seção transversal I cônica e mono-simétrica usando métodos numéricos. Ele também

desenvolveu um programa em MATLAB que utilizou posteriormente para analisar vigas em balanço cônicas e vigas embutidas sob diversas condições de carregamento e de contorno. A flambagem lateral por torção de vigas I não prismáticas foi estudada por Gupta et al. (1996) usando um programa de elementos finitos. O estudo deles se concentrou principalmente no efeito do aumento do número de vãos nas cargas de flambagem de vigas não prismáticas. Eles descobriram que há um aumento na carga de flambagem de vigas com um vão para vigas com dois vãos. No entanto, além de dois vãos, a mudança na capacidade de flambagem foi mínima.

A análise e otimização de guindastes de lança por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) têm sido um foco central em diversas pesquisas, consolidando a ferramenta como essencial para o desenvolvimento de projetos mais seguros e eficientes. Nesse contexto, Gerdemeli, Kurt e Tasdemir (2012) validaram a abordagem ao comparar os resultados de um projeto analítico com os obtidos pelo MEF, concluindo que o método computacional é não apenas consistente, mas também mais prático e eficiente. A mesma preocupação com a validação do modelo foi demonstrada por Kiranalli e Patil (2015), que primeiro verificaram um modelo 2D simples contra soluções analíticas antes de proceder com uma análise 3D mais complexa.

Uma vez estabelecida a eficácia do MEF, os pesquisadores se concentraram na otimização de materiais e geometrias. No campo da seleção de materiais, Dhanoosha e Reddy (2016), ao analisarem um guindaste de braço oscilante, demonstraram que o aço ASME A36 apresenta valores de deformação e tensão inferiores aos do aço estrutural convencional, apontando para uma escolha de material superior. Da mesma forma, Amreeta e Singh (2015) investigaram diferentes seções transversais para uma viga, concluindo que uma viga de perfil "I" (especificamente a MB150) era a mais adequada para a aplicação estudada, mostrando-se superior a seções retangulares e garantindo que as tensões permanecessem dentro dos limites normativos.

A otimização da geometria da alma da viga surge como um tema proeminente, com vários estudos explorando perfis não convencionais para aumentar a resistência estrutural. Dandavatimath e Sarode (2017) iniciaram essa linha de investigação ao propor novos perfis de alma que, segundo suas análises, resultaram em um aumento direto da capacidade de carga e da resistência à flexão da viga. Aprofundando essa ideia, diferentes geometrias foram exploradas. De'nan et al. (2013), por exemplo,

focaram em almas com perfil triangular, descobrindo que a espessura da alma e da ondulação tem um impacto significativo no aumento da capacidade de resistência à flambagem por cisalhamento.

O perfil trapezoidal, no entanto, recebeu atenção especial. Denan, Osman e Saad (2010) realizaram estudos experimentais e numéricos que comprovaram que vigas com alma trapezoidal ondulada possuem maior resistência à flambagem lateral por torção em comparação com vigas de alma plana. Essa conclusão foi corroborada por Chaudhary e Khan (2015), que também descobriram que a seção trapezoidal oferece melhor resistência à flexão e identificaram parâmetros geométricos ótimos, como maior espessura e largura da alma, que maximizam essa resistência. Reforçando essa tendência, a revisão de literatura de Kapadni e Ganiger (2015) propõe um projeto de viga cônica com alma trapezoidal como uma alternativa superior para reduzir falhas por torção e flambagem, problemas comuns em pontes rolantes.

Além do formato do perfil, a variação de parâmetros dimensionais como espessura e altura da alma também foi exaustivamente investigada. Rajmane e Jadhav (2015) e Kiranalli e Patil (2015) conduziram estudos sobre esses efeitos. Enquanto Kiranalli e Patil (2015) observaram que o aumento da espessura e da altura da alma leva a uma diminuição constante da deformação, Rajmane e Jadhav (2015) encontraram uma relação mais complexa, onde o aumento da altura da alma inicialmente reduz a deflexão e a tensão, mas pode levar a um aumento posterior desses valores, indicando a existência de um ponto ótimo de dimensionamento.

A análise estrutural de componentes de engenharia, como vigas de guindastes, frequentemente combina métodos analíticos e computacionais para validar a integridade dos projetos. Nesse sentido, Khetre, Bankar e Meshram (2014) exemplificam a abordagem fundamental ao projetar uma lança de perfil I, onde os cálculos analíticos de tensão e deslocamento foram corroborados por simulações em software de elementos finitos (COSMOS), demonstrando a concordância e a confiabilidade de ambos os métodos para análises estáticas.

Avançando para modos de falha mais complexos, como a flambagem, a literatura se aprofunda na otimização de geometrias não convencionais. Moon et al. (2009), por exemplo, focaram na flambagem lateral-torsional de vigas I com almas onduladas. Eles não apenas utilizaram análises teóricas e de elementos finitos para estudar o fenômeno, mas também desenvolveram métodos aproximados e validados para calcular parâmetros críticos como a constante de empenamento. O estudo

revelou uma característica importante: vigas com almas onduladas possuem uma constante de empenamento superior à das vigas de alma plana, o que impacta diretamente sua resistência à flambagem, embora apresentem um módulo de cisalhamento inferior.

Seguindo uma linha de investigação similar sobre geometrias variáveis, Patil e Shelke (2016) analisaram o comportamento de vigas em balanço com alma cônica (seção variável). Por meio da análise de elementos finitos (FEA), eles investigaram como o afilamento da alma influencia as tensões de torção, a flexão e, crucialmente, a flambagem lateral por torção. Ao comparar os resultados com uma viga de alma plana de mesmas dimensões, o estudo destacou os efeitos benéficos do afilamento na distribuição de tensões e na resistência à instabilidade. Juntos, esses trabalhos ilustram uma clara progressão na engenharia estrutural: partindo da validação de projetos simples, avança-se para a exploração de geometrias complexas, como almas onduladas e cônicas, utilizando a análise de elementos finitos como ferramenta indispensável para compreender e otimizar a resistência a fenômenos críticos como a flambagem e a torção.

A análise estrutural de vigas submetidas a condições complexas de carregamento e geometria tem se beneficiado enormemente da sinergia entre investigações experimentais, analíticas e computacionais. A validação de modelos numéricos através de testes físicos é um passo fundamental, como demonstrado por Wan e Mahendran (2015), que investigaram o comportamento combinado de flexão e torção em vigas de aço leve. Ao obter boa concordância entre os resultados experimentais e a análise de elementos finitos (AEF), eles não apenas validaram seus modelos, mas também os utilizaram para conduzir estudos paramétricos que revelaram a sensível relação entre a excentricidade da carga e a capacidade de momento da viga.

Aprofundando a análise em geometrias não prismáticas, Stefano et al. (2016) focaram nos efeitos do afilamento sobre as tensões de cisalhamento em vigas cônicas. Utilizando soluções analíticas clássicas como ponto de partida, eles derivaram expressões que mostram como, diferentemente das vigas prismáticas, a tensão de cisalhamento em vigas cônicas é influenciada também pela flexão e extensão. A robustez de suas conclusões teóricas foi, mais uma vez, confirmada por meio de um modelo de elementos finitos, evidenciando a importância da validação cruzada entre métodos.

Do ponto de vista prático e experimental, a otimização geométrica para evitar modos de falha específicos é um objetivo central. O trabalho de Divahar e Joanna (2015) ilustra isso ao analisar perfis de aço conformados a frio com alma trapezoidal. Seus ensaios comprovaram que a introdução de ondulações na alma não apenas elimina a flambagem por cisalhamento — uma falha crítica em vigas de alma lisa — como também pode aumentar a capacidade de carga em até 25%, demonstrando um ganho de eficiência estrutural direto e mensurável.

4. METODOLOGIA

Este capítulo descreve os procedimentos adotados para a realização da análise comparativa entre os projetos de guindastes selecionados. A abordagem metodológica fundamenta-se na revisão bibliográfica sistemática e na análise crítica de estudos de caso, visando identificar as divergências e convergências nas soluções de engenharia aplicadas a diferentes cenários de carga e operação.

3.1. Classificação da Pesquisa

Quanto à sua natureza, esta pesquisa classifica-se como aplicada, pois objetiva gerar conhecimentos práticos sobre o dimensionamento e a análise estrutural de equipamentos de movimentação de carga. Quanto aos objetivos, a pesquisa é descritiva e exploratória, uma vez que descreve detalhadamente as características técnicas de três projetos distintos e explora as relações entre a aplicação (agrícola, portuária, sucata) e as decisões de projeto (materiais, normas, fatores de segurança). Quanto aos procedimentos técnicos, trata-se de um estudo comparativo multicaso, baseado em fontes secundárias (documentos técnicos e acadêmicos).

3.2. Definição do Corpus de Análise

O objeto de estudo é composto por três trabalhos acadêmicos recentes, selecionados com base na diversidade de aplicação e na complexidade estrutural. Os documentos, referenciados doravante como Estudo A, Estudo B e Estudo C, são descritos a seguir:

- **Estudo A (Cenário Agrícola):** Referente ao trabalho de Grespan (2023), intitulado *"Projeto Estrutural de Guindauto para Uso Agrícola Conforme Norma ABNT NBR 14768"*. Este estudo representa o cenário de cargas médias e dinâmicas moderadas, focado na movimentação de *Big-Bags*.
- **Estudo B (Cenário Portuário/Offshore):** Referente ao trabalho de Silva e Silva (2023), intitulado *"Dimensionamento de Guindaste para Movimentação de Cargas em Zona Portuária"*. Representa o cenário de cargas extremas (45 toneladas) e alta responsabilidade técnica (Árvores de Natal Molhadas - ANM).
- **Estudo C (Cenário de Reciclagem/Sucata):** Referente ao trabalho de Sousa Silva (2024), intitulado *"Projeto Sobre Análise de Tensão Estrutural de um"*

Guindaste Hidráulico Articulado". Representa o cenário de ciclos de trabalho intensos e uso de materiais avançados (aços especiais).

3.3. Parâmetros de Comparação (Matriz Analítica)

Para garantir a isonomia e a coerência da análise, foram definidos cinco eixos temáticos de comparação técnica. A extração de dados de cada estudo obedecerá aos seguintes critérios:

Análise das normas técnicas adotadas em cada estudo (ex: NBR 14768, NBR 8400, DIN 15018 ou normas internacionais como EN 13001). Será verificado se a escolha da norma é adequada à criticidade da operação.

Comparação dos aços utilizados, avaliando a relação entre *Tensão de Escoamento* σ_{esc} e custo/peso.

- **Indicador:** Uso de aços estruturais comuns (ex: ASTM A36, SAE 1020) *versus* aços de alta resistência (ex: STREX, DOMEX).

Avaliação de como cada autor definiu as cargas atuantes.

- Consideração de cargas estáticas (peso próprio, carga nominal).
- Consideração de cargas dinâmicas (coeficientes de majoração, impacto, vento).
- Modelagem das restrições (engastes, apoios, pinos) no software de elementos finitos.

Análise crítica da simulação computacional realizada nos estudos:

- **Tipo de Elemento:** Sólido, Casca (*Shell*) ou Viga (*Beam*).
- **Refino da Malha:** Verificação de convergência citada pelos autores.
- **Critérios de Falha:** Utilização do critério de Von Mises σ_{vm} para materiais dúcteis.

Comparação dos Fatores de Segurança (FS) obtidos *versus* os FS exigidos por norma.

$$FS = \frac{\sigma_{esc}}{\sigma_{max}}$$

Será analisado se o superdimensionamento ou subdimensionamento está presente em relação à aplicação proposta.

3.4. Procedimentos Metodológicos

A execução do trabalho seguirá o fluxo estruturado em quatro etapas distintas:

1. **Leitura Exploratória e Fichamento:** Leitura integral dos Estudos A, B e C para identificação das variáveis-chave e resumo técnico das propostas.
2. **Tabulação de Dados:** Preenchimento de uma matriz comparativa (Quadro Resumo) contendo os dados técnicos extraídos (dimensões, cargas, tensões máximas encontradas, deformações).
3. **Análise Cruzada:** Confronto dos dados. Por exemplo: *Comparar por que o Estudo C utilizou aços especiais enquanto o Estudo A utilizou aço comum, correlacionando isso com a redução de peso estrutural.*
4. **Síntese Conclusiva:** Elaboração do parecer técnico sobre a eficiência de cada projeto frente ao seu cenário de operação.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO

A seleção da norma regente transcende uma mera formalidade burocrática; ela estabelece a "constituição física" do projeto, definindo as margens de segurança, a economicidade e a vida útil do equipamento. Na comparação entre os estudos, verifica-se uma dicotomia metodológica entre a aplicação de normas de produto específicas (modernas) e normas de cálculo generalistas (conservadoras).

O Estudo A demonstra maior rigor técnico ao adotar a ABNT NBR 14768 (2021). Diferente de normas genéricas, este regulamento é desenhado especificamente para a cinemática de guindastes articulados sobre veículos.

Análise de Impacto: A classificação como HC1 (*Hoisting Class*) e HD1 (*Hoisting Drive*) permite um refinamento dos coeficientes dinâmicos ϕ . Ao contrário de normas gerais que penalizam a estrutura com coeficientes de segurança globais elevados, a NBR 14768 considera o comportamento do sistema hidráulico e a flexibilidade das lanças, permitindo um projeto mais otimizado e leve sem comprometer a segurança. A norma reconhece que a "elasticidade" do óleo e do aço atua como amortecedor, algo ignorado por normas de estruturas rígidas.

Os Estudos B e C fundamentam-se na ABNT NBR 8400, uma norma historicamente associada a equipamentos de translação linear e estruturas treliçadas rígidas (como pontes rolantes). O uso desta norma para guindastes de lança impõe, analiticamente, uma abordagem mais conservadora.

Estudo B (Cenário Portuário): Para a movimentação de cargas massivas (45 toneladas), a escolha da NBR 8400 é defensável, mas introduz distorções. Ao classificar o equipamento no Grupo 4, o estudo assume um regime de trabalho moderado.

Crítica: Embora a carga seja alta, a classificação sugere ciclos de operação lentos e controlados (típicos de instalação de ANM). O majorador de carga resultante tende a superdimensionar as seções transversais da base, tratando o guindaste quase como uma estrutura civil fixa, ignorando potenciais otimizações que normas mais modernas (como a EN 13001) permitiriam.

Estudo C (Cenário de Sucata): Este é o cenário mais crítico sob a ótica da fadiga. A classificação no Grupo 6 (Classe D e Estado de Carga 3) reflete corretamente a agressividade da operação com sucata (ciclos rápidos, choques e picos de tensão).

Crítica: O coeficiente de majoração ($M_x = 1.35$ ou similar, dependendo da interpretação dos coeficientes de gama) impõe uma penalidade severa à estrutura. Isso explica, analiticamente, a necessidade do uso de aços especiais citados no estudo. Se fosse utilizado aço comum sob o Grupo 6 da NBR 8400, o peso próprio da estrutura seria inviável. Portanto, a escolha normativa neste caso forçou a alteração da especificação do material para manter a integridade estrutural.

Tabela 1 - Síntese da Comparação Normativa

Característica	Estudo a (NBR 14768)	Estudos b e c (NBR 8400)
Foco da norma	Específica (Produto)	Generalista (Cálculo)
Abordagem dinâmica	Refinada (considera hidráulica)	Simplificada (coeficientes globais)
Consequência no projeto	Estruturas mais leves e otimizadas	Estruturas mais robustas e pesadas
Adequação ao uso	Alta (Alinhamento perfeito)	Média (Adaptação de conceitos de pontes rolantes)

Na engenharia de guindastes, a carga nominal (o peso do objeto) é apenas uma parte da equação. Quando uma carga é içada rapidamente do solo, a inércia resiste ao movimento, criando um pico de tensão nos cabos e na lança que excede largamente as 10 toneladas estáticas. Os coeficientes dinâmicos são multiplicadores escalares que incorporam as leis de Newton diretamente no valor da carga de entrada da simulação. Matematicamente, eles representam a razão entre a força dinâmica máxima e a força estática:

$$\phi = \frac{F_{dinamica}}{F_{estatica}} \approx 1 + \frac{a}{g}$$

Onde:

- a = Aceleração máxima imposta à carga durante o içamento ou frenagem.
- g = Aceleração da gravidade.

No contexto da modelagem computacional (MEF), isso cria uma "Carga Virtual". Se o projeto prevê içar 1.000 kgf e o coeficiente calculado é $\phi = 1.3$, o engenheiro deve aplicar no software uma força de 1.300 kgf. A estrutura "sente" que está levantando mais peso do que a realidade física, garantindo que ela suporte os "trancos" e oscilações da operação.

Análise Comparativa dos Coeficientes nos Estudos

A divergência nas normas resulta em "Cargas Virtuais" drasticamente diferentes para os três estudos:

1. A Aplicabilidade da NBR 14768 (Estudo A - Agrícola)

A NBR 14768 utiliza o coeficiente ϕ_2 , que é sensível à velocidade de içamento. Para guindastes veiculares, a norma entende que a flexibilidade do sistema hidráulico atua como um amortecedor natural.

A fórmula geral segue a lógica:

$$\phi_2 = 1 + \beta \cdot v_{\text{içamento}}$$

- **Interpretação:** Se o guindaste agrícola opera lentamente (baixa velocidade v), o valor de ϕ_2 fica próximo de 1,1 ou 1,15. Isso permite ao projetista (Grespan, 2023) desenhar uma estrutura mais leve, pois a norma não penaliza o aço com uma carga virtual excessiva desnecessariamente.

2. O Critério da NBR 8400 (Estudos B e C)

Já a norma NBR 8400 utiliza coeficientes (frequentemente denotados como ϕ) baseados em classes discretas de funcionamento, focando no choque mecânico.

- **No Estudo B (Portuário):** Ao classificar como Grupo 4, aplica-se um coeficiente que considera o impacto de colocar e retirar cargas pesadas em navios, onde o mar pode causar movimentos relativos. O coeficiente aqui age como uma proteção contra a "batida" da carga no convés.
- **No Estudo C (Sucata):** Este é o cenário crítico. Operações com garra (sucata) envolvem soltar a carga abruptamente ou arrancar material preso. A norma impõe um coeficiente elevado (ex: $\phi = 1.4$ ou superior).
 - **Consequência Matemática:** Para uma carga de sucata de 5 toneladas, o software calcula as tensões como se fossem 7 toneladas.
 - **Impacto no Projeto:** Isso força o autor (Sousa Silva, 2024) a aumentar a espessura das chapas ou, como observado, migrar para aços de alta resistência (limite de escoamento > 700 MPa) para que a estrutura suporte essa "Carga Virtual" sem deformação plástica permanente.

Enquanto o Estudo A beneficia-se de uma operação controlada e hidráulica com coeficientes menores, o Estudo C enfrenta desafios impostos pela física da operação

agressiva de sucata, o que exige o superdimensionamento matemático da estrutura para resistir às condições físicas reais. A precisão da simulação depende da transposição correta das condições físicas para vetores de força no software. A Tabela 2 sintetiza as abordagens adotadas.

Tabela 2 - Resumo da análise

Parâmetro	Estudo A (Agrícola)	Estudo B (Portuário)	Estudo C (Sucateiro)
Norma Base	NBR 14768	NBR 8400	NBR 8400
Carga Nominal	1.000 kg (Big-Bag)	45.000 kg (ANM)	1.125 kg (Média Sucata)
Fator Dinâmico (ϕ)	$\phi_2 = 1.135$ (Içamento)	$\phi = 1.15$ ($v < 0.25$ m/s)	$\phi = 1.3$ ($v > 1$ m/s)
	$\phi_5 = 1.1$ (Giro)		
Carga de Peso Próprio	$\phi_1 = 1.1$ (ou 1.22 comb.)	Incluso em S_G	Majorado ($S_G \times M_x$)
Cargas de Vento	Desprezadas (Comb. A1)	Calculadas ($P_a = 250$ N/m ²)	Não detalhadas na análise final
Verificação de Estabilidade	Tombamento em declive 4°	Tombamento Longitudinal/Lateral	Não detalhado

A análise comparativa revela que a precisão do dimensionamento não depende apenas da escolha da norma, mas da fidelidade com que o modelo matemático representa os fenômenos físicos reais. Abaixo, discutem-se três dimensões críticas onde as decisões de modelagem divergem significativamente.

Há uma discrepância metodológica entre a determinação analítica e a estimativa heurística da velocidade de içamento.

A Abordagem Determinística (Estudo A): O Estudo A demonstra maior rigor ao vincular a estrutura à mecânica dos fluidos. Ao calcular a velocidade vertical ($v = 0.5$ m/s) baseada na vazão e na geometria do cilindro (Classe HD1), o autor obtém um fator $\phi_2 = 1.135$. Isso indica uma otimização refinada: a estrutura é projetada exatamente para a potência hidráulica disponível, evitando desperdício de material.

O Estudo B introduz uma variável frequentemente negligenciada, mas vital para equipamentos de grande porte: o Momento Fletor Lateral induzido pelo vento. O "Efeito Vela": Para um guindaste de 45 toneladas, a área lateral da lança atua como

uma vela. Em zonas portuárias, caracterizadas por baixa rugosidade do terreno e ventos de alta velocidade, a pressão dinâmica ($q = 250 \text{ N/m}^2$) gera uma carga distribuída horizontal.

Consequência Estrutural: A inclusão do coeficiente de arrasto ($C = 1.4$ para perfis caixa) demonstra que o autor considerou o estado de tensão biaxial. A lança não sofre apenas flexão vertical (pelo peso da carga), mas também flexão lateral. Ignorar isso em guindastes de grande alcance (longo braço de alavanca) poderia levar à falha por instabilidade lateral ou flambagem local da chapa lateral comprimida, mesmo que a carga nominal estivesse dentro do limite.

A falha catastrófica em guindastes raramente ocorre sob carga vertical pura e centrada; ela ocorre frequentemente devido à torção combinada com flexão. A "Melhor Prática" do Estudo A: O autor reconhece explicitamente as condições de contorno do ambiente agrícola. Ao introduzir forças inerciais de giro ($\phi_5 = 1.1$) e, crucialmente, uma inclinação de base de 4° , o modelo simula a pior condição realística. A inclinação decompõe o vetor gravidade, criando uma componente de força horizontal que gera torção na lança.

A Lacuna Crítica do Estudo C: A omissão desses fatores no Estudo C é preocupante. Pátios de sucata são terrenos irregulares. Operar um guindaste de sucata sem considerar o desnivelamento ou a força centrífuga do giro rápido (comum na alta produtividade da reciclagem) significa que o modelo ignorou tensões de cisalhamento torsionais. Isso sugere que o Fator de Segurança calculado para o Estudo C pode ser, na prática, menor do que o apresentado, pois a capacidade da seção transversal de resistir à torção não foi verificada sob cargas combinadas.

Ao realizar uma análise comparativa de tensões e critérios de falha (Von Mises), a validação estrutural nos três estudos fundamentou-se na Teoria da Energia de Distorção (Von Mises), critério padrão para materiais dúcteis. A tensão equivalente de Von Mises (σ_{esc}) permite comparar o estado complexo de tensões tridimensionais com a propriedade unidimensional do material obtida em ensaios de tração: a Tensão de Escoamento (σ_{esc}).

A análise cruzada dos resultados revela uma divergência fundamental na filosofia de dimensionamento entre o Estudo A e o Estudo C, governada pela relação entre a geometria da seção e a solicitação mecânica. Para compreender a disparidade

nos níveis de tensão, deve-se recorrer à equação fundamental da tensão normal por flexão em vigas:

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I}$$

Onde:

- M é o **Momento Fletor** (Força x Braço de Alavanca).
- c é a distância da linha neutra à fibra mais externa.
- I é o **Momento de Inércia de Área** da seção transversal (a resistência geométrica à flexão).

No projeto agrícola (Grespan, 2023), observa-se que as tensões de Von Mises máximas permaneceram em patamares baixos (inferiores a 250 MPa). O autor optou por combater o Momento Fletor (M) através do aumento da Inércia (I). Isso implica o uso de seções transversais mais robustas ou chapas mais espessas. Ao manter a tensão atuante baixa, o projeto viabilizou o uso de aços estruturais comuns (como ASTM A572 Gr. 50 ou similar), que possuem $\sigma_{esc} \approx 345$ MPa. Embora isso resulte em um equipamento proporcionalmente mais pesado, reduz drasticamente o custo de fabricação e a complexidade da soldagem, alinhando-se à realidade de manutenção no campo agrícola.

Em contraste, o guindaste de sucata (Sousa Silva, 2024) apresentou tensões operacionais extremamente elevadas, demandando materiais com $\sigma_{esc} > 700$ MPa (Aços da classe STREX/DOEX). Esta decisão não é arbitrária, mas uma imposição física decorrente de dois fatores:

1. **O "Braço de Momento" Crítico:** Guindastes de sucata exigem longo alcance horizontal para cobrir o pátio. Isso maximiza o valor de M na equação.
2. **Restrição de Inércia (I):** Para que um guindaste de longo alcance seja ágil, a lança não pode ser excessivamente pesada. Se o autor aumentasse a espessura das chapas (aumentando I) para reduzir a tensão, o peso próprio da lança consumiria grande parte da capacidade de carga, tornando o equipamento ineficiente.

No paradoxo do dimensionamento, para viabilizar a operação, o Estudo C foi forçado a aceitar uma geometria de menor inércia relativa (paredes mais finas em relação ao tamanho da seção). Isso resulta, matematicamente, em uma tensão de trabalho σ_{vm} muito maior.

$$I \downarrow \Rightarrow \sigma_{vm} \uparrow$$

Para que a estrutura não falhe plasticamente sob essa alta tensão, a única saída de engenharia foi elevar o limite do material. O uso de aço de 700 MPa oferece um Fator de Segurança (FS) aceitável mesmo sob tensões que causariam o colapso imediato da estrutura do Estudo A.

O "superdimensionamento" de tensões no Estudo C é, na verdade, uma estratégia de otimização de peso, trocando massa física (aço comum) por tecnologia de materiais (limite de escoamento). Em análise de estabilidade estrutural e operacional, a integridade de um guindaste não é garantida apenas pela resistência do material (tensão $\sigma < \sigma_{esc}$), mas fundamentalmente pela estabilidade da forma. A análise comparativa revela abordagens distintas para dois modos de falha críticos: a instabilidade elástica dos componentes (flambagem local/global) e a perda de equilíbrio do sistema (tombamento).

Na flambagem, existe um risco oculto em paredes finas, pois guindastes são, por definição, colunas esbeltas submetidas à flexo-compressão. A carga crítica de flambagem (P_{cr}) é governada pela rigidez geométrica ($E * I$) e pelo comprimento, independentemente da resistência do material.

1. A Validação Numérica no Estudo A (Análise de Autovalores)

O Estudo A adota uma verificação computacional robusta: a Análise de Flambagem Linear (Eigenvalue Buckling).

- **Interpretação dos Resultados:** Os multiplicadores de carga crítica encontrados ($\lambda_{crit} = 123$ para a lança e 101 para a coluna) indicam que a estrutura precisaria ser submetida a uma carga 100 vezes superior à nominal para flambar globalmente.
- **Diagnóstico de Projeto:** Estes valores excessivamente altos sugerem que o dimensionamento da espessura das paredes foi ditado por restrições construtivas (soldabilidade, disponibilidade de chapa) ou critérios de tensão local, e não por estabilidade. Embora seguro, indica um potencial superdimensionamento quanto à flambagem global.
- **Ressalva Técnica:** A análise linear assume uma geometria perfeita. Na prática, imperfeições iniciais (amassados, desalinhamentos de solda) reduzem drasticamente a carga crítica real. Contudo, com um fator de segurança >100 , as imperfeições são irrelevantes neste caso específico.

Em uma verificação cruzada no estudo B (método analítico), ele demonstra excelência metodológica ao não confiar cegamente no software. A aplicação da ABNT NBR 8400 para o cálculo manual da flambagem introduz o coeficiente de flambagem (ω) baseado no índice de esbeltez (λ):

$$\lambda = \frac{L_{eff}}{r}$$

Onde r é o raio de giração da seção. Essa validação analítica contribui para mitigar o risco de erros de configuração nas condições de contorno do software (ex: definir incorretamente um engaste que deveria ser um apoio simples).

O ponto crítico do estudo C, onde existe uma omissão de alto risco, a ausência de análise de estabilidade no Estudo C é a falha metodológica mais grave entre os três trabalhos, agravada pela escolha do material.

- **O Paradoxo do Aço de Alta Resistência:** Ao utilizar aço de 700 MPa, o autor reduz a espessura das chapas para diminuir o peso.
- **A Física da Falha:** A resistência à flambagem local de uma chapa é proporcional ao cubo da espessura (t^3).

$$P_{cr} \propto E \cdot t^3$$

Reduzir a espessura pela metade reduz a resistência à flambagem em 8 vezes. O Estudo C criou uma estrutura de "casca de ovo": extremamente resistente à tração, mas potencialmente instável sob compressão. Focar apenas em Von Mises ignora que a chapa pode colapsar geometricamente (criar ondas/rugas) muito antes de atingir os 700 MPa de tensão.

Ao analisar a estabilidade global ao tombamento, diferente de estruturas civis fixas, um guindaste veicular é um sistema de corpo rígido apoiado em base finita (sapatas/pneus). O momento de tombamento (M_t) deve ser contraposto pelo momento estabilizador (M_e).

Na abordagem sistêmica do estudo B (de 45 toneladas) ele trata corretamente o guindaste como parte de um sistema "Caminhão + Equipamento". A análise detalhada da Estabilidade Longitudinal e Lateral é mandatória para esta magnitude de carga. Assim, o cálculo das reações nas patolas (estabilizadores) define se o solo suportará a pressão ou se o caminhão afundará, levando ao tombamento catastrófico. O dimensionamento dos contrapesos demonstra visão holística do projeto.

Já a prática normativa do estudo A, ele segue o roteiro seguro da norma, aplicando a combinação de carga de teste. Assim, a verificação da pressão no solo

(limite de 4 MPa para solo agrícola compactado) mostra a preocupação com a interface operacional. O guindaste não falha, e o caminhão não tomba, desde que o solo não ceda.

Novamente, o Estudo C limita-se à resistência intrínseca da lança. Não há evidência de que o caminhão ou a base suportem o momento gerado pela carga de sucata no alcance máximo. Em operações de sucata, onde a carga é "arrancada" da pilha, o efeito dinâmico de ricochete gera momentos de tombamento transientes que podem facilmente virar o veículo se não houver um estudo de estabilidade rigoroso.

Tabela 3 - Síntese da Análise de Estabilidade

CRITÉRIO	ESTUDO A (AGRÍCOLA)	ESTUDO B (PORTUÁRIO)	ESTUDO C (SUCATA)
FLAMBAGEM	Conservadora: Altos fatores de segurança via MEF (Autovalores).	Robusta: Verificação analítica normativa (λ , ω).	Crítica: Omissa. Alto risco devido às paredes finas.
TOMBAMENTO	Adequada: Foco na pressão das sapatas no solo.	Completa: Análise de equilíbrio de corpo rígido e contrapesos.	Ausente: Foco exclusivo na tensão do material.

A transição da geometria contínua (CAD) para o modelo matemático discretizado é a etapa onde a abstração da engenharia é mais crítica. A fidelidade dos resultados depende intrinsecamente da capacidade do elemento finito escolhido de representar o comportamento físico (flexão, cisalhamento, membrana) da estrutura real. A análise comparativa revela discrepâncias metodológicas severas governadas por limitações de software.

No estudo A existe a eficiência da redução dimensional (shell elements), porque ele adota a "Melhor Prática" da indústria para estruturas de paredes finas ao utilizar Elementos de Casca (*Shell*).

- **Fundamentação Teórica:** A geometria de uma lança de guindaste satisfaz a condição $L \gg t \wedge b \gg t$ (onde L é o comprimento, b a largura e t a espessura). Matematicamente, o uso de elementos de casca reduz o problema de 3D para 2D, mas mantém os Graus de Liberdade (DOFs) rotacionais nos nós.
- **Vantagem Computacional:** Elementos como o QUAD4 (linear) ou QUAD8 (quadrático) capturam o gradiente de tensão de flexão linearmente através da espessura sem a necessidade de múltiplos elementos empilhados. Isso permite uma malha refinada na superfície, garantindo a convergência da matriz de

rigidez sem explodir o custo computacional. A validação da malha via métricas de distorção (*Jacobian Ratio*) citada pelo autor confirma o rigor técnico.

Nos estudos B e C existe um dilema da versão "student" e o erro de discretização, porque ambos os estudos B e C foram restringidos pelo limite de nós (tipicamente 32k ou 100k) das versões educacionais de software (Ansys/SolidWorks Simulation). Isso forçou compromissos perigosos na discretização de estruturas massivas. O Fenômeno do Shear Locking (Estudo B):

Ao utilizar malhas automáticas em geometrias complexas, o software tende a gerar Tetraedros Lineares (elementos sólidos de 4 nós). Em uma análise crítica, Tetraedros de primeira ordem possuem funções de forma lineares, o que resulta em deformação constante dentro do elemento. Eles são incapazes de representar a curvatura pura de uma viga sob flexão; em vez disso, eles se deformam por cisalhamento. Este comportamento espúrio, conhecido como Shear Locking (Travamento por Cisalhamento), torna a estrutura artificialmente mais rígida.

$$u_{calculado} < u_{real} \Rightarrow \sigma_{calculado} < \sigma_{real}$$

A menos que a malha seja extremamente fina (o que a versão Student impede), o Estudo B provavelmente subestimou as deflexões e tensões máximas.

O Problema do Gradiente na Espessura (Estudo C):

O Estudo C tentou mitigar o tamanho do modelo usando sub-modelagem (analisando peças separadas). Contudo, a insistência em usar elementos sólidos (provavelmente Hexaédricos ou Tetraédricos) em chapas finas (6 a 10 mm) introduz um erro clássico de discretização.

A Regra dos Três Elementos: Para capturar o perfil de tensão de flexão (tração na face superior, compressão na inferior e zero na linha neutra), a literatura recomenda no mínimo 2 a 3 elementos de segunda ordem ao longo da espessura (t). Inviabilidade Numérica: Em uma lança de 13 metros, colocar 3 elementos na espessura de 10 mm geraria milhões de nós, excedendo o limite do software. O autor provavelmente utilizou apenas um elemento ao longo da espessura. Isso faz com que o software calcule uma "tensão média" do elemento, falhando em capturar o pico de tensão na superfície externa da chapa. Consequentemente, mesmo com o uso de aços especiais, as tensões reportadas no Estudo C podem estar inferiores à realidade devido à incapacidade da malha de resolver o gradiente.

Na etapa de modelagem de condições de contorno e conexões, a precisão de uma análise por Elementos Finitos (MEF) é limitada pela qualidade das condições de contorno impostas. A representação matemática de componentes físicos como cilindros hidráulicos e pinos constitui um ponto crítico de divergência metodológica utilizadas nos estudos, com impactos diretos na rigidez global do sistema e na veracidade dos resultados de tensão.

Na análise da rigidez dos atuadores hidráulicos, o comportamento estrutural de um guindaste é um acoplamento entre a elasticidade do aço e a compressibilidade do fluido hidráulico. O estudo C apresenta uma simplificação rígida, pois ao modelar os cilindros como "barras rígidas" indeformáveis ($E \rightarrow \infty$), o Estudo C comete um erro de super-rigidez. Na realidade, o óleo possui um Módulo de Bulk $\beta \approx 1.5 \text{ GPa}$ e a haste sofre flambagem/flexão. Assumir rigidez infinita altera o caminho de carga preferencial. O modelo atrai cargas excessivas para o cilindro (o caminho "mais duro"), aliviando artificialmente os momentos fletores secundários na estrutura da lança. Isso resulta em um dimensionamento da estrutura metálica potencialmente subestimado, pois a "ajuda" que o cilindro dá para sustentar a carga é exagerada no modelo matemático.

Já o estudo B apresenta uma abordagem híbrida, pois o uso de "Vigas Virtuais" aproxima-se mais da realidade por permitir a definição de propriedades de seção transversal (área e inércia), introduzindo uma flexibilidade axial que simula, ainda que linearmente, a complacência do atuador.

Sobre a linearização de contatos (O Problema do "Bonded"), todos os estudos recorreram, em maior ou menor grau, à condição de contato do tipo *Bonded* (Colado) para simular a interação entre pinos e olhais. Esta é uma linearização severa de um problema intrinsecamente não-linear (Contato Hertziano). Assim, o erro do torque fantasma, apresenta uma conexão pino-olhal real permite rotação livre (liberação de momento). O contato *Bonded* funde os nós da malha do pino com os do olhal, transmitindo torque através da junta. Isso enrijece a estrutura globalmente, reduzindo as deflexões calculadas e mascarando o comportamento de mecanismo articulado.

Já sobre o mascaramento de falha por esmagamento, o contato colado distribui a força radial uniformemente por toda a circunferência do furo (360°). Na física real, devido à folga e à deformação, o contato ocorre em um arco restrito (tipicamente $< 90^\circ$ na direção da carga), gerando picos de tensão de contato (Pressão de Hertz) muito superiores à tensão média. Nesse sentido, o estudo B reconhece essa limitação,

mas a aceita por restrições computacionais. O Estudo C, mesmo com essa simplificação que "suaviza" as tensões, detectou pontos críticos nos suportes, o que indica que o design original estava, de fato, muito subdimensionado, pois falhou mesmo no cenário "otimista" do software.

Na etapa de verificação e validação (V&V), sobre o estudo de convergência destaca-se que a ausência de independência de malha é o "pecado capital" em simulações numéricas. Sem provar que o resultado independe do tamanho do elemento, os valores de tensão apresentados são matematicamente arbitrários. Nesse sentido, o estudo A destaca-se como o único a realizar um Estudo de Convergência de Malha formal. O autor demonstra maturidade técnica ao distinguir "Concentração de Tensão" (física) de "Singularidade de Tensão" (artefato numérico). Ao refinar a malha e observar que a tensão em cantos vivos (Pontos P1 a P5) tende ao infinito (não converge), ele diagnostica corretamente que aquele valor não deve ser usado para dimensionamento direto, optando por ler a tensão a uma distância segura da singularidade (princípio de Saint-Venant).

Contudo, existe uma incerteza epistêmica nos estudos B e C, pois eles estão limitados pelo teto de nós da licença educacional, não puderam realizar a convergência. No Estudo C existe uma citação de elementos de 20mm. Para um guindaste de 13 metros, isso parece razoável globalmente, mas para um furo de pino de 40mm, isso significa ter apenas 4 a 6 elementos na circunferência. Isso transforma um círculo em um hexágono grosseiro no modelo matemático, introduzindo erros geométricos que invalidam a precisão local das tensões nos pontos de conexão, justamente onde as falhas por fadiga se iniciam.

Na análise crítica dos campos de tensão e tratamento de singularidades, a interpretação dos contornos de tensão (mapas de cores) transcende a simples leitura de valores máximos; exige o discernimento analítico entre artefatos numéricos (singularidades) e concentradores de tensão físicos. A teoria da elasticidade prevê tensão infinita em cantos vivos reentrantes ($r \rightarrow 0$), mas o material real plastifica e redistribui a carga. O tratamento dado a este fenômeno variou significativamente entre os autores.

Sobre o Princípio de Saint-Venant e a filtragem de dados, o Estudo A demonstra rigor metodológico ao aplicá-lo. Ao identificar nós onde a tensão diverge tendendo ao infinito, o autor descarta corretamente esses valores locais como não físicos. Assim, a validação da estrutura baseia-se na tensão nominal a uma distância característica

da descontinuidade. Essa abordagem evita o "falso positivo" de falha, impedindo que o projeto seja superdimensionado para compensar um erro matemático do Método dos Elementos Finitos (MEF).

O MEF é utilizado como ferramenta iterativa de design (estudos B e C), pois diferente das singularidades, as concentrações de tensão reais exigem alteração geométrica. No estudo C (Iteração por Reforço): Ao detectar um pico de tensão de 1.693 MPa na conexão do cilindro, o autor diagnosticou corretamente uma deficiência de área resistente, e não um erro numérico. A resposta de engenharia — aumentar o diâmetro do pino e adicionar chapas de reforço — reduziu a tensão para níveis aceitáveis. Isso exemplifica o uso do software não apenas como verificador, mas como guia de otimização topológica manual. Já no estudo B (Remoção de Feature): Diante de concentrações em recortes geométricos, a decisão foi remover a característica causadora. É uma solução de "Design for Stress" mais robusta do que simplesmente aumentar a espessura.

No campo da ciência dos materiais e a dicotomia rigidez-resistência, a seleção do aço define não apenas o limite de falha (σ_{esc}), mas dita o comportamento elástico global da estrutura. A comparação entre os estudos revela um *trade-off* clássico entre peso, custo e deformabilidade.

Na comparação do aço comum vs. HSLA, o estudo A (ASTM A36) escolheu um aço dúctil de baixo carbono ($\sigma_{esc} \approx 250$ MPa) é tecnicamente coerente com a aplicação agrícola. Prioriza-se a soldabilidade e a facilidade de reparo em campo em detrimento do peso. Já o estudo B (HSLA 500), o uso do aço NBR 6656-LNE 500 representa o ponto de equilíbrio ótimo. Para erguer 45 toneladas, um aço comum tornaria a estrutura tão pesada que consumiria sua própria capacidade de carga. O aço *High-Strength Low-Alloy* oferece o dobro da resistência do A36 com penalidade mínima de custo. Nesse sentido, o estudo C escolheu um Aço de Ultra-Alta Resistência, avançando para a fronteira tecnológica ao empregar o aço Strenx 700 ($\sigma_{esc} \geq 700$ MPa). Contudo, essa escolha introduz um risco latente frequentemente ignorado em análises lineares: o desacoplamento entre Resistência e Rigidez.

Nesse campo, o Módulo de Elasticidade (E) do aço é uma constante física (≈ 200 GPa), independente do tratamento térmico. O Strenx 700 é 3 vezes mais resistente que o A36, mas não é mais rígido.

- A Lei de Hooke: $\sigma = E \times \epsilon$.

Para aproveitar a alta resistência do Strenx, o projeto permite tensões de trabalho (σ_{adm}) elevadas (ex: 566 MPa). Como E é constante, triplicar a tensão implica triplicar a deformação específica ϵ e, conseqüentemente, a deflexão total δ da lança.

O Efeito P-Delta (P - Δ):

A deflexão de 177mm citada no Estudo C, embora "segura" elasticamente, é preocupante geometricamente.

$$M_{total} = M_{primario} + P \times \delta$$

Em grandes deformações, a carga vertical P deslocada gera um momento fletor secundário $P \times \delta$ que se soma ao momento original. Uma análise linear simples (First-Order Analysis), como a realizada no estudo, ignora esse efeito de segunda ordem. Em guindastes de longo alcance feitos de aço nobre e paredes finas, o Efeito P-Delta pode reduzir o fator de segurança real significativamente, algo que o Estudo C falhou em discutir.

Para finalizar o estudo comparativo, é necessário realizar um diagnóstico de lacunas críticas e riscos de projeto.

Apesar dos méritos individuais, a consolidação das análises aponta falhas metodológicas sistêmicas que, em um ambiente industrial certificado (ISO/CE), impediriam a aprovação imediata destes projetos. As omissões listadas abaixo representam riscos latentes à segurança operacional.

Nenhum dos três estudos realizou uma avaliação de vida em fadiga, o que constitui a omissão mais grave para equipamentos de movimentação de carga. Guindastes são estruturas submetidas a espectros de carregamento cíclico (içamento/descarga). A própria NBR 8400 classifica o cenário do Estudo C como Classe D. Existe um perigo do aço de alta resistência (Estudo C), pois o Estudo C confia apenas no Limite de Escoamento (σ_e) do aço Strenx 700.

Embora o metal base tenha $\sigma_e \approx 700$ MPa, a resistência à fadiga de uma junta soldada não aumenta proporcionalmente à resistência estática do aço. Devido a microfissuras intrínsecas e à alteração microestrutural na Zona Termicamente Afetada (ZTA), uma solda em aço Strenx tem vida em fadiga similar a uma solda em aço comum (A36).

Nesse caso, ao permitir tensões de trabalho altas (baseadas na estática), o projeto fatalmente falhará por fadiga nas conexões soldadas muito antes do previsto.

Uma análise profissional exigiria a aplicação do Método S-N (Tensão-Vida) ou diretrizes da norma FKM/Eurocode 3 para pés de solda.

Já a simplificação da física para modelos lineares mascara comportamentos de colapso. O Estudo C reportou tensões iniciais de 1.693 MPa, nível em que a Lei de Hooke ($\sigma=E\varepsilon$) se torna inválida, pois o material ultrapassa o limite elástico e entra no regime plástico. Uma análise linear extrapola a tensão infinitamente, enquanto uma análise não linear revelaria o escoamento local, a redistribuição de tensões — ou a formação de uma rótula plástica levando ao colapso do mecanismo.

1. Não-Linearidade Geométrica (P-Delta): Em guindastes de longo alcance, a deformação da estrutura altera as equações de equilíbrio.

$$M_{\text{real}} = P \times (L + \delta)$$

Ignorar a deflexão δ (que chegou a 177mm no Estudo C) no cálculo do momento fletor é uma abordagem não-conservadora. O "Momento de Segunda Ordem" pode consumir a margem de segurança restante do projeto, levando à instabilidade.

Como característica de trabalhos acadêmicos teóricos, a ausência de validação experimental (prototipagem e extensometria/*strain gauges*) impede a calibração dos modelos numéricos.

- Risco Oculto: Erros de modelagem, como a rigidez excessiva conferida por contatos do tipo *Bonded* ou condições de contorno de engaste perfeito, permanecem indetectáveis.
- Mitigação: Neste contexto, a "Melhor Prática" observada foi a do Estudo B, que realizou validações cruzadas analíticas (cálculos manuais da NBR) para confirmar a ordem de grandeza dos resultados do software, reduzindo a incerteza.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho atingiu seu objetivo principal ao realizar uma análise comparativa exaustiva entre metodologias de projeto para guindastes em cenários agrícola (Estudo A), portuário (Estudo B) e de reciclagem (Estudo C). A investigação revelou que a segurança e a eficiência de um equipamento de elevação de carga não dependem isoladamente da resistência dos materiais empregados, mas da coerência entre a norma adotada, a fidelidade da modelagem numérica e a compreensão dos modos de falha dominantes.

A comparação evidenciou três filosofias de engenharia distintas, cada uma com méritos e limitações específicas:

- **Consistência Metodológica (Estudo A):** O projeto agrícola destacou-se como o modelo de referência em boas práticas de simulação. Ao utilizar elementos de casca (*shell*), realizar estudos de convergência de malha e aplicar o Princípio de Saint-Venant para tratar singularidades, o estudo minimizou a incerteza epistêmica inerente ao Método dos Elementos Finitos. A aderência à norma específica de produto (NBR 14768) permitiu um dimensionamento otimizado para a hidráulica móvel.
- **Visão Sistêmica (Estudo B):** O projeto portuário demonstrou a maior maturidade de engenharia de sistemas. Foi o único a tratar o guindaste não como uma peça isolada, mas como parte de um conjunto "Veículo + Equipamento", validando criteriosamente a estabilidade ao tombamento e as reações no solo. A prática de validação cruzada (cálculo analítico *versus* numérico) conferiu alta confiabilidade aos resultados.
- **Desafio Tecnológico e Risco (Estudo C):** O projeto de sucata representou a fronteira tecnológica ao empregar aços de ultra-alta resistência (Strenx 700). No entanto, identificou-se que o avanço no material não foi acompanhado pelo refinamento da análise. A redução de espessura das chapas, permitida pela alta resistência do aço, aumentou a vulnerabilidade à flambagem local e a grandes deflexões (não-linearidade geométrica), fenômenos que foram insuficientemente explorados pelo autor.

A conclusão central desta análise é a identificação do "Paradoxo da Rigidez" em guindastes modernos. Observou-se que a migração de aços comuns (Estudo A)

para aços especiais (Estudo C) resolve o problema da falha estática (escoamento), mas agrava os problemas de instabilidade elástica e fadiga.

Conclui-se que o Estudo B (Portuário) apresentou o projeto mais equilibrado e seguro para implementação imediata, pois suas margens de segurança cobrem tanto a resistência do material quanto a estabilidade global. O Estudo C, embora inovador, requeria ciclos adicionais de análise (especialmente de flambagem e fadiga) para ser considerado seguro, visto que sua "leveza" estrutural reduziu as margens para erros de operação comuns em pátios de sucata.

Identificaram-se lacunas críticas que não foram plenamente abordadas pelos estudos originais nem pelo escopo deste trabalho comparativo. Sugere-se, para pesquisas futuras:

1. Análise de Fadiga (Método ϵ -N ou Mecânica da Fratura): Investigar a vida útil das juntas soldadas, especialmente em aços de alta resistência (Strenx), onde a zona termicamente afetada (ZTA) é o ponto crítico de falha, independentemente do limite de escoamento do metal base.
2. Simulação Não-Linear Geométrica (P-Delta): Avaliar o impacto das grandes deformações no momento fletor final de lanças telescópicas longas, quantificando a redução do fator de segurança real.
3. Otimização Topológica: Aplicar algoritmos de otimização para redistribuir material nas zonas de concentração de tensão identificadas (como nos suportes de cilindro do Estudo C), em vez de apenas alterar espessuras uniformemente.

Em suma, este trabalho reforça que o software de Elementos Finitos é uma ferramenta de verificação, e não de criação. A segurança do projeto reside na capacidade do engenheiro de interpretar os resultados à luz da Mecânica dos Sólidos e das Normas Técnicas, discernindo entre o que é matematicamente possível e o que é fisicamente seguro.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMREETA, R. K.; SINGH, V. Design and stress analysis of single girder jib crane. **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 4, n. 9, p. 932–936, 2015.

ARANGARAJAN, M. et al. Análise estrutural e métodos de elementos finitos: modelagem e simulação em engenharia mecânica. **Journal of Advanced Zoology**, v. 45, S1, p. 2884, 2024. DOI: 10.17762/jaz.v45iS1.2884.

ARVIND KUMAR, V. C. **Design and analysis of beam for deformation of floor mounted jib crane**. 2015. Dissertação (M.Tech Thesis) – Gujarat Technical University, Índia, 2015.

BOLLIMPELLI, K. S.; KUMAR, V. R. Design and Analysis of Column Mounted JIB Crane. **International Journal of Research in Aeronautical and Mechanical Engineering**, v. 3, n. 1, p. 32–52, 2015.

BRETTLE, M. Lateral Torsional Buckling and slenderness. **New Steel Construction**, Technical Paper, p. 30–34, 2005.

CECCARELLI, M. Design and Reconstruction of an Ancient Roman Crane. **Advances in Historical Studies**, v. 9, p. 261–283, 2020. DOI: 10.4236/ahs.2020.95021.

CHAUDHARY, A. S.; KHAN, S. N. Design and analysis of varying cross sectional cantilever beam with trapezoidal web for Jib crane. **International Engineering Research Journal**, Special Issue 2, p. 4475–4480, 2015.

DANDAVATIMATH, C. C.; SARODE, H. D. Finite element analysis and Optimization of Jib Crane Boom. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, v. 6, n. 7, p. 14287–14294, 2017.

DHANUSHA, M.; REDDY, V. G. Detail design and analysis of a free standing I beam jib crane. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 3, n. 12, p. 193–203, 2016.

DIVAHAR, R.; JOANNA, P. S. Lateral Buckling Of Cold Formed Steel Beam with Trapezoidal Corrugated Web. **International Journal Of Civil Engineering And Technology**, v. 5, n. 3, p. 217–225, 2014.

FATIMA, D.; KEONG, C. K.; HASHIM, N. S. The effects of the depth of web on the bending behaviour of triangular web profile steel beam section. **AIP Conference Proceedings**, v. 1892, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.5005653>. Acesso em: 6 dez. 2025.

FATIMAH DE'NAN; HASHIM, N. S. The effect of web corrugation angle on bending performance of triangular web profile steel beam section. **International Journal of Environmental Protection**, v. 1, n. 5, p. 53–56, 2011.

FATIMAH DE'NAN; OSMAN, M. H.; SAAD, S. The Study of Lateral Torsional Buckling Behaviour of Beam With Trapezoid Web Steel Section By Experimental And Finite Element Analysis. **International Journal of Recent Research and Applied Studies**, v. 2, n. 3, p. 232–240, 2010.

FATIMAH, D. et al. Effect of Triangular Web Profile on the Shear Behaviour of Steel I-Beam. **Iranica Journal of Energy & Environment**, v. 4, n. 3, p. 219–222, 2013.

FRANCHINO-VIAS, S. A.; MANTIAN, M. N.; MAZZITELLI, F. D. **Quantum vacuum fluctuations and the principle of virtual work in inhomogeneous backgrounds**. 2021.

GERDEMELI, I.; KURT, S.; ALKAN, H. O. Main Girder Beam Design and Finite Element Analysis of 2x160 Ton Gantry Crane. *In*: INTERNATIONAL RESEARCH/EXPERT CONFERENCE TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF MACHINERY AND ASSOCIATED TECHNOLOGY, 14., 2010, Mediterranean Cruise. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2010. p. 565–568.

GERDEMELI, I.; KURT, S.; TASDEMIR, B. Design and analysis with finite element method of jib crane. **Mechanical Engineering**, Istanbul Technical University, v. 2, n. 1, p. 565–568, 2012.

GRESPLAN, Vinicius Gabriel. **Projeto Estrutural de Guindauto para Uso Agrícola Conforme Norma ABNT NBR 14768**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2023.

GUPTA, P.; WANG, S. T.; BLANDFORD, G. E. Lateral torsional buckling of non-prismatic I beams. **Journal of Structural Engineering**, v. 122, n. 7, p. 748–755, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:7\(748](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:7(748). Acesso em: 6 dez. 2025.

HOWARD, D. Structural Acoustics and Vibration: Mechanical Models, Variational Formulations and Discretization. *In*: SOIZE, Christian. **Structural Acoustics and Vibration**. Oxford: Elsevier Ltd, 2014. v. 54, p. 365–436.

JING-FU, M. A. Research on regional decomposition of electricity consumption of Liaoning Province based on Gini coefficient method. **Energy Conservation**, 2017.

KAPADNI, K. R.; GANIGER, S. G. Review paper on design and structural analysis of simply supported gantry crane beam for eccentric loading. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 2, n. 8, p. 1622–1626, 2015.

KHETRE, N. S.; BANKAR, P. S.; MESHARAM, A. M. Design and static analysis of I section boom for rotary jib crane. **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 3, n. 8, p. 1071–1074, 2014.

KIRANALLI, S. S.; PATIL, N. U. Jib crane analysis using finite element method. **International Journal of Scientific Research and Development**, v. 3, n. 4, p. 185–189, 2015.

LEE, J.; KIM, S. E.; HONG, K. Lateral buckling of I section composite beams. **Engineering Structures**, v. 24, n. 7, p. 955–964, 2004. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00016-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00016-0). Acesso em: 6 dez. 2025.

MATSUMOTO, T. K. **Determination of a Simplified High-Order Vortex Equation for Radial Equilibrium with CFD Verification**. 2015.

MOON, J. et al. Lateral torsional buckling of I girder with corrugated webs under uniform bending. **Thin-Walled Structures**, v. 47, n. 1, p. 21–30, 2009.

NGUYEN, H. C.; VO-MINH, T. The use of the node-based smoothed finite element method to estimate static and seismic bearing capacities. **Computers & Mathematics with Applications**, 2022.

OZBASARAN, H. A parametric study on lateral torsional buckling of European IPN and IPE cantilevers. **International Journal of Civil, Architectural, Structural and Construction Engineering**, v. 8, n. 7, p. 783–788, 2014.

PATIL, T.; SHELKE, N. L. Structural Analysis of a cantilever Beam with tapered web section through FEA. **Journal of Steel Structures and Construction**, v. 2, n. 2, p. 1–6, 2016.

RAJMANE, S. M.; JADHAV, A. Finite element analysis of jib crane. **International Journal of Innovative Research in Technology**, v. 2, n. 6, p. 404–407, 2015.

SILVA, Luiz Fernando Kropf de Camargo e; SILVA, Pedro Antônio Ferreira Moreira da. **Dimensionamento de Guindaste para Movimentação de Cargas em Zona Portuária**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2023.

SILVA, Carlos Renato Sousa. **Projeto Sobre Análise de Tensão Estrutural de Um Guindaste Hidráulico Articulado**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

STEFANO, B. et al. Shear stresses in tapered beams. *In*: ITALIAN CONFERENCE ON COMPUTATIONAL MECHANICS, 21., 2016, Lucca. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2016. p. 83–84.

SURATKAR, A.; SHUKLA, V.; ZAKIUDDIN, K. S. Design Optimization of Overhead EOT Crane Box Girder Using Finite Element Analysis. **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 2, n. 7, p. 720–724, 2013.

TRAHAIR, N. Bending and buckling of tapered steel beam structures. **Engineering Structures**, v. 59, n. 1, p. 229–237, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.10.031>. Acesso em: 6 dez. 2025.

VIEIRA, Ryana Silva dos Santos. **Projeto de um Sistema de Elevação de Cargas tipo Mini Guindaste**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2022.

WAN, H. X.; MAHENDRAN, M. Bending and torsion of hollow flange channel beams. **Engineering Structures**, v. 84, n. 1, p. 300–312, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.11.010>. Acesso em: 6 dez. 2025.

YAO, C. H.; WANG, Z. Y.; ZHAO, Y. M. A leap-frog finite element method for wave propagation of Maxwell-Schroedinger equations with nonlocal effect in metamaterials. **Computers & Mathematics with Applications**, 2021.