



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



RODRIGO BARROSO HELENO

ESTUDO DE COLUNAS DE SISTEMA DE ARMAZENAGEM DO TIPO *DRIVE-IN*

OURO PRETO

Abril de 2025

ESTUDO DE COLUNAS DE SISTEMA DE ARMAZENAGEM DO TIPO *DRIVE-IN*

Rodrigo Barroso Heleno

Trabalho Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 14/04/2025

Área de concentração: Estruturas Metálicas

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Arlene Maria Cunha Sarmanho – UFOP

OURO PRETO

Abril de 2025



FOLHA DE APROVAÇÃO

Rodrigo Barroso Heleno

Estudo de Colunas de Sistema de Armazenagem do Tipo *Drive-In*

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil

Aprovada em 14 de abril de 2025

Membros da banca

Profa. D.Sc - Arlene Maria Cunha Sarmanho - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. D.Sc - Luiz Henrique de Almeida Neiva - Membro - (Universidade Federal da Bahia)
Engenheiro. D.Sc - Guilherme Cassio Elias - Membro - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Profa. D.Sc - Arlene Maria Cunha Sarmanho, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 25/04/2025



Documento assinado eletronicamente por **Arlene Maria Cunha Sarmanho, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/04/2025, às 20:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0901506** e o código CRC **54062C85**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Nilma e Francisco, pela base sólida, amor incondicional e apoio. Sem vocês, nada seria possível.

À minha orientadora, Arlene, pelos anos de IC, pelas orientações valiosas e pelos conhecimentos transmitidos que foram muito além dos perfis formados a frio.

Aos amigos que estiveram ao meu lado durante a graduação, em especial Delano, Augusto Joaquim e Adjany, por cada troca de ideia, desabafo, risada e parceria.

À Raquel, por ter participado da minha formação profissional e pessoal, por ter acreditado em mim mesmo quando eu não acreditava.

Aos colegas do LABEST pela troca de conhecimento e companheirismo.

Sou grato também à UFOP, por oferecer um ambiente acadêmico de excelência e oportunidades. À CAPES e ao CNPq, pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa científica, que tornaram este trabalho possível.

RESUMO

Os sistemas de armazenagem do tipo *drive-in* são amplamente utilizados em armazenagem industrial pela sua eficiência na ocupação do espaço disponível e são indicados para estoques de alta densidade e baixa seletividade. Esse tipo de sistema é composto por conjuntos de colunas e vigas de sustentação que formam túneis de armazenagem, nos quais as empilhadeiras adentram para depositar ou retirar paletes. A complexidade dessas estruturas, aliada à variação de carregamentos e à interação entre os elementos, demanda estudos aprofundados para garantir sua segurança e desempenho. Nesse contexto, a análise por métodos numéricos, como o Método dos Elementos Finitos (FEM), tem se mostrado uma ferramenta eficaz para compreender melhor os esforços atuantes e otimizar o dimensionamento desses sistemas. Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento estrutural de colunas em sistemas de armazenagem do tipo *drive-in*, com foco nos efeitos da flexocompressão. Para isso, foi desenvolvido um modelo numérico utilizando o software ANSYS, a fim de simular as condições reais de carregamento de um projeto de estrutura *drive-in* e extrair os esforços solicitantes nas colunas. Paralelamente, foi aplicada uma versão adaptada do Método da Resistência Direta (MRD), proposta por estudos anteriores, com o intuito de avaliar a resistência das colunas com base nos resultados obtidos na análise numérica. A comparação entre os valores calculados e os limites normativos permitiu avaliar a segurança estrutural dos elementos analisados. Os resultados indicaram que as colunas operam em regime estável, com valores de β_r inferiores aos limites de β_n , validando a eficácia do MRD adaptado como ferramenta complementar à análise por elementos finitos.

Palavras-chaves: Perfis Formados a Frio, *Drive-In*, Estruturas Metálicas, Método da Resistência Direta.

ABSTRACT

Drive-in storage systems are widely used in industrial warehousing due to their efficiency in utilizing available space, and are recommended for high-density, low-selectivity inventories. This type of system is composed of sets of support columns and beams that form storage tunnels, into which forklifts enter to place or retrieve pallets. The structural complexity of these systems, combined with the variation in loading conditions and the interaction between elements, requires in-depth studies to ensure their safety and performance. In this context, analysis through numerical methods, such as the Finite Element Method (FEM), has proven to be an effective tool for better understanding the acting forces and optimizing the design of these systems. This work aims to analyze the structural behavior of columns in drive-in storage systems, with a focus on the effects of flexural compression. For this purpose, a numerical model was developed using ANSYS software to simulate the actual loading conditions of a drive-in rack structure and to extract the internal forces acting on the columns. In parallel, an adapted version of the Direct Strength Method (DSM), proposed by previous studies, was applied to assess the resistance of the columns based on the results obtained from the numerical analysis. The comparison between the calculated values and normative limits allowed for the evaluation of the structural safety of the analyzed elements. The results indicated that the columns operate in a stable regime, with β_r values lower than the β_n limits, validating the effectiveness of the adapted DSM as a complementary tool to finite element analysis.

Keywords: Cold Formed Profiles, Drive-In, Steel Structures, Direct Strength Method.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. Perfis Formados a Frio.....	8
1.2. <i>Drive-in</i>	9
1.3. Flambagem.....	13
1.4. Métodos dos elementos finitos	14
1.5. Método da Resistência Direta	16
1.6. Objetivo	17
1.6.1. Objetivos específicos	17
1.7. Justificativa	17
1.8. Revisão da literatura	17
1.9. Metodologia	19
2. ANÁLISE NUMÉRICA	20
2.1. Geometria	20
2.2. Definição dos Elementos	22
2.3. Condições de Contorno	23
2.4. Aplicação do Carregamento	23
3. MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA	24
3.1. Equação	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
4.1. Análise numérica	29
4.2. MRD adaptado	30
5. Conclusão	32
REFERENCIAS	33

1. INTRODUÇÃO

1.1. PERFIS FORMADOS A FRIO

As estruturas fabricadas com Perfis Formado a Frio (PFF) possuem diversas tipologias e são comumente empregadas em sistemas de armazenagem industrial. Os PFF são produzidos a partir de chapas metálicas por meio de conformação a frio, processo no qual envolve a aplicação de forças mecânicas nas chapas a temperatura ambiente, e possibilitam grande variabilidade de formas de seções transversal. Entretanto, devido às elevadas proporções de largura-espessura, as seções que utilizam PFF apresentam elevada esbelteza, sendo mais susceptíveis a fenômenos de instabilidade. No Brasil, a ABNT NBR 14762:2010 - Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio é a norma que estabelece os procedimentos para o dimensionamento de estruturas de aço de perfil formados a frio. Na Figura 1 é apresentada um exemplo de uma estrutura de armazenagem industrial.

Figura 1 – Armazenagem Industrial



Fonte: Águia, 2025

Além da NBR 14762, recentemente foi introduzida a norma ABNT NBR 17150:2024 - Sistemas de armazenagem — Estrutura de armazenagem estática tipo porta-paletes, que estabelece os requisitos para projeto, fabricação e instalação de estruturas de armazenagem metálicas do tipo porta-paletes. Embora a norma tenha como foco principal os sistemas porta-paletes seletivos, seus princípios são aplicáveis a outras configurações estruturais, como é o caso do *drive-in*,

servindo como referência normativa para a análise de sistemas de armazenagem que exigem desempenho semelhante em termos de capacidade de carga e segurança operacional.

Os perfis formados a frio se subdividem em diferentes configurações, como porta-paletes, *push-back*, *flow rack* e *drive-in*. Cada sistema possui características construtivas e operacionais próprias, sendo selecionado conforme a finalidade de cada armazenamento. Neste contexto, o presente trabalho tem como foco o estudo do sistema *drive-in*, amplamente utilizado em operações com grande volume de carga e baixa rotatividade, por permitir o armazenamento em profundidade com o mínimo de corredores de acesso. Essa configuração, embora eficiente em termos de aproveitamento de espaço, impõe desafios estruturais específicos, especialmente relacionados à estabilidade das colunas sob carregamento não centrado, o que justifica a análise aprofundada proposta neste estudo.

1.2. *DRIVE-IN*

O sistema *drive-in* é um tipo de sistema de armazenamento industrial caracterizado pelo armazenamento de alta densidade, ou seja, é projetado para otimizar o uso do espaço. Neste sistema, as estruturas são estantes espaçadas de modo que permita a trânsito de empilhadeiras nos corredores internos ao longo da profundidade da estrutura para armazenar os pallets com os produtos. Sua aplicação é comum em indústrias e operações logísticas que precisam maximizar a capacidade de armazenamento em áreas reduzidas. A Figura 2 ilustra uma estrutura *drive-in* e como ela é carregada pela empilhadeira.

Figura 2 - *Drive-in*

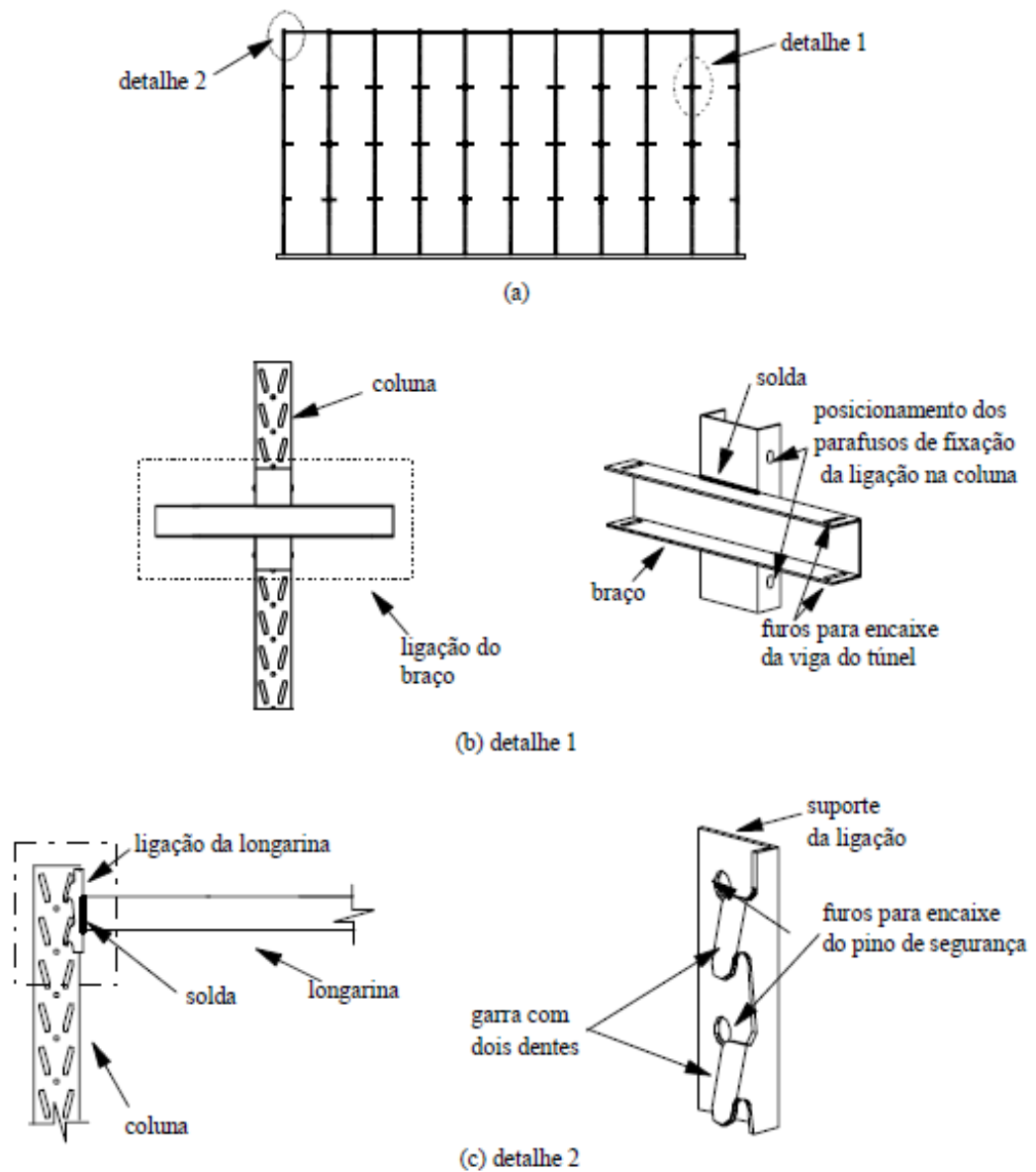


Fonte: Método, 2025

O sistema *drive-in* é composto por colunas, vigas, contraventamentos, distanciadores e ligações. Os carregamentos das colunas são transmitidos pelas vigas curtas em balanço (chamadas de braços), que por sua vez estão ligadas às vigas de túnel no sentido transversal. Devido à posição do carregamento e a variedade de cargas dos *pallets*, as colunas são comumente submetidas à compressão combinada com flexão, ou seja, flexocompressão. Esse tipo de carregamento combinado, portanto, torna o perfil mais suscetível à perda da estabilidade, segundo Neiva (2017). Além disso, outro fator que contribui para a instabilidade do sistema é a ausência as longarinas transversais para que haja trânsito interno das empilhadeiras. A Figura 3 e a Figura 4 exemplificam a configuração e o posicionamento dos componentes de um *drive-in*.

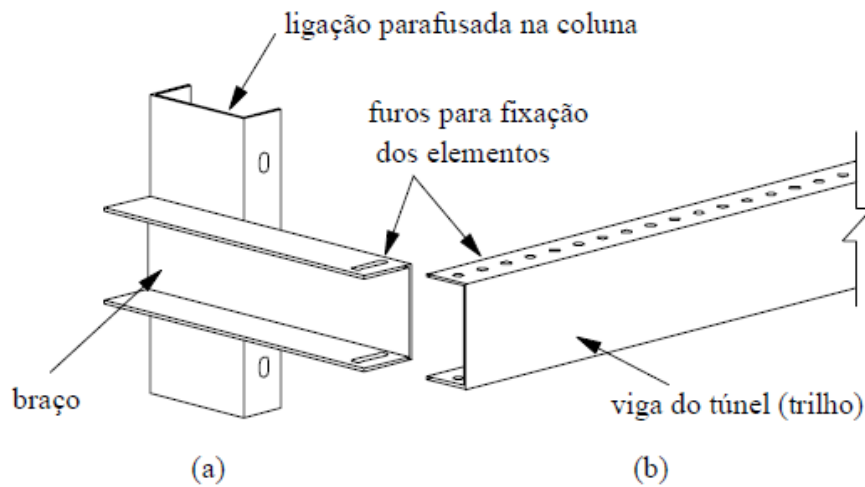
Figura 3 - Elementos componentes do sistema *drive-in*

(a) vista frontal com o posicionamento de uma ligação do braço e da longarina; (b) detalhe da ligação da coluna e dos elementos componentes da ligação do braço; (c) detalhe da ligação da coluna e dos elementos



Fonte: Águia, 1999

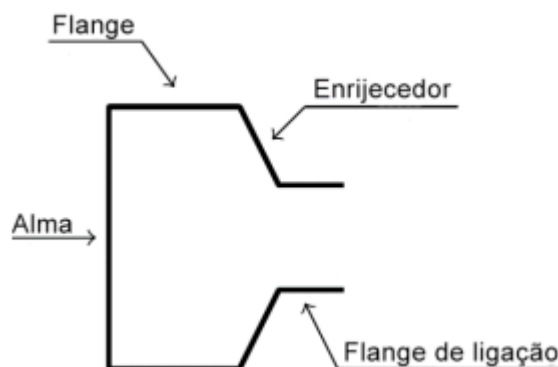
Figura 4 - Configuração do braço e da viga do túnel; (a) Braço; (b) Viga do túnel.



Fonte: Águia, 1999

Os perfis formados a frio podem ser fabricados em diversas seções transversais. Contudo, a seção geralmente empregadas em colunas de sistemas de armazenagem é a tipo *rack* ou garrafa. Ademais, a forma dessa seção transversal, bem como as perfurações que ocorrem ao longo dos perfis, resultam na facilidade de montagem do sistema com relação a fixação dos elementos de contraventamentos e das longarinas. A Figura 5 – Seção *rack* mostra a geometria dessa seção, bem como a nomenclatura dos elementos que a compõe.

Figura 5 – Seção *rack*



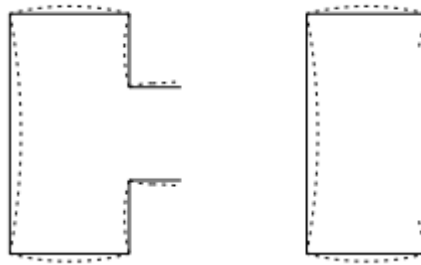
Fonte: Neiva (2017)

1.3. FLAMBAGEM

A flambagem é um fenômeno caracterizado pela perda de estabilidade que ocorre em elementos estruturais sob compressão e pode ser identificada como local, distorcional e global.

A flambagem local de placa é caracterizada pela perda de estabilidade na qual as paredes que constituem a seção transversal mudam de forma com deslocamentos laterais senoidais, entretanto, há ausência de deslocamentos nos ângulos entre as paredes (Figura 6 - Flambagem local em seções tipo rack e U enrijecido).

Figura 6 - Flambagem local em seções tipo rack e U enrijecido



Fonte: Faria (2016)

Já a perda de estabilidade por flambagem distorcional ocorre quando as alterações na seção transversal acontecem com deslocamentos de pelo menos um dos vértices, como mostra a Figura 7 – Flambagem distorcional

Figura 7 – Flambagem distorcional

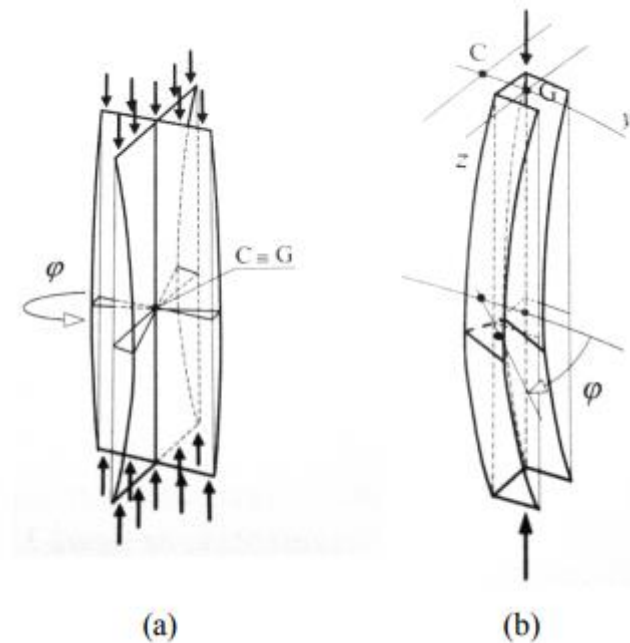


Fonte: ABNT NBR 14762:2010

A flambagem global das colunas caracteriza-se pela perda de estabilidade ocasionada pelos deslocamentos laterais excessivos ao longo do comprimento da estrutura. Além disso, esse tipo de flambagem pode ser por flexão em torno de um dos eixos da seção transversal, ou por

flexo-torção. A Figura 8 - Flambagem global: (a) por torção e (b): por flexo-torção. representa flambagem por flexão (a) e por flexo-torção (b).

Figura 8 - Flambagem global: (a) por torção e (b): por flexo-torção.



Fonte: Silva et al (2016)

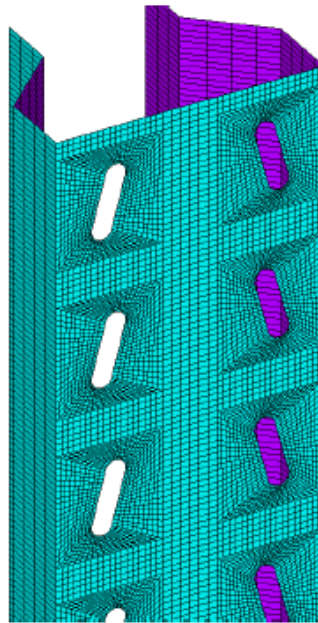
Além disso, é importante ressaltar que os modos de flambagem ocorrem de forma isolada ou simultaneamente entre si, a depender do comprimento, da forma da seção transversal e da solicitação no elemento. Nos sistemas de armazenagem industrial, particularmente aqueles compostos por estruturas metálicas com perfis formados a frio, o risco de flambagem representa uma das principais preocupações no dimensionamento estrutural. Essa instabilidade ocorre devido à elevada esbeltez das colunas, ou seja, altas proporções largura-espessura, característica comum em sistemas como os drive-in e os porta-paletes. A norma ABNT NBR 17150-1:2024 enfatiza a necessidade de considerar os efeitos da flambagem global e local na análise dessas estruturas, especialmente em situações onde o carregamento é predominantemente axial.

1.4. MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS

A análise de estabilidade de perfis formados a frio são fundamentais para prever o comportamento de perfis esbeltos sujeitos à flambagem. O método dos elementos finitos (MEF), em inglês, *Finite Element Method (FEM)*, é um dos métodos numéricos mais utilizados na análise de problemas, sendo uma ferramenta numérica essencial na engenharia estrutural. De forma geral,

o MEF subdivide uma estrutura contínua em um número finito de elementos, interligados por nós, que formam uma malha, e transformando um problema complexo em um sistema de equações mais simples. A Figura 9 apresenta um perfil subdividido em elementos finitos.

Figura 9 - Elementos Finitos



Fonte: Heleno, 2023

Os elementos finitos são submetidos aos carregamentos e condições de contorno, respeitando as equações de compatibilidade de forma que o problema contínuo se torne discreto e a resolução das equações que o governam sejam aproximadas. O sistema de equações resultante é então resolvido numericamente para obter deslocamentos, tensões e forças internas. Por fim, os resultados passam por um pós-processamento, permitindo a interpretação de respostas como deformações e instabilidades estruturais.

O software ANSYS é amplamente utilizado para avaliar a resistência e a segurança de elementos estruturais sujeitos a carregamento, especialmente no estudo da flambagem, permitindo simulações utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). A análise numérica linear, que será abordada neste estudo, fornece previsões sobre o comportamento de estruturas metálicas sem considerar imperfeições geométricas e as não linearidades do material.

1.5. MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

O Método da Resistência Direta (MRD) é uma abordagem utilizada no dimensionamento de estruturas metálicas que considera os efeitos dos modos de instabilidade diretamente na resistência dos elementos estruturais sob ação das cargas aplicadas. Para validação e definição das formulações o MRD utiliza modelos baseados em ensaios experimentais e simulações numéricas para determinar essa influência dos modos de estabilidade na capacidade resistente dos elementos. Assim, o método parte do princípio de que a capacidade resistente de uma estrutura pode ser estimada considerando a determinação dos modos elásticos (local, distorcional e global) e dos esforços que provocam o escoamento da seção.

De acordo com Neiva (2022), algumas das principais vantagens do MRD são:

- Não há necessidade de cálculo de larguras ou propriedades efetivas;
- Não são necessários métodos iterativos;
- Método de dimensionamento que considera a flambagem distorcional;
- Considera a interação entre os elementos que compõe a seção transversal;
- Inclui os estados limites de instabilidade possíveis em um elemento.

O MRD, nesse sentido, utiliza curvas de resistências ajustadas experimentalmente, e calcula as capacidades resistentes dos elementos, considerando a força (ou momento fletor) de flambagem elástica da seção transversal. No anexo C da NBR 14762:2010, o MRD é utilizado para o dimensionamento de barras submetidas à compressão centrada e à flexão simples, entretanto essa norma não considera uma formulação para verificação de vigas-colunas que são submetidas à esforços de compressão e flexão ao mesmo tempo.

Neiva (2022) propôs uma adaptação do MRD para verificação da flexocompressão em colunas submetidas a compressão com excentricidade, que são o caso das estruturas de sistemas de armazenagem tipo *drive-in* estudadas neste trabalho. A equação foi desenvolvida com base em dados numéricos experimentais reais e considera a interação entre esforço axial e momento fletor e, além do mais, incorpora os modos de flambagem de forma acoplada.

A compreensão do comportamento em flexocompressão (compressão combinado com flexão) é essencial para o desenvolvimento deste trabalho, uma vez que as colunas dos sistemas de armazenagem do tipo *drive-in* estão submetidas simultaneamente a esforços axiais de

compressão, provenientes do peso das cargas armazenadas, e a momentos fletores, resultantes da excentricidade deste carregamento. Essa combinação de esforços gera um estado de tensão mais complexo, exigindo uma análise que leve em conta os efeitos interativos entre flexão e compressão. Heleno (2023) estudou esses efeitos realizando análises lineares e não-lineares de colunas submetidas à flexocompressão e constatou que sua resistência diminui de acordo com o aumento da excentricidade de carregamento.

1.6. OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo avaliar o efeito da excentricidade em estruturas do tipo *drive-in*, realizando um estudo numérico a fim de determinar os esforços solicitantes utilizando o software ANSYS e compará-los com o Método de Resistência Direta adaptado para vigas-colunas.

1.6.1. Objetivos específicos

Como objetivos específicos, o estudo visa:

- Analisar um projeto *drive-in* através de análise linear de software de elementos finitos (ANSYS);
- Verificar um sistema de armazenagem *drive-in* através das adaptações do Método de Resistência Direta (MRD) considerando os elementos flexo-comprimidos;

1.7. JUSTIFICATIVA

Os perfis formados a frio, sobretudo as estruturas do tipo *drive-in*, têm apresentado uma crescente utilização nos sistemas de armazenamento industrial devido às suas características de economia e versatilidade. Entretanto, considerando o tipo de carregamento, a geometria, e as ligações entre braço e coluna, a estrutura é normalmente submetida à flexão, além de compressão, potencializando fenômenos de instabilidade. Faz-se necessário, portanto, estudar melhor como este tipo de estrutura se comporta quando aplicada ao carregamento excêntrico, uma vez que atualmente não há muitos estudos publicados sobre o tema.

1.8. REVISÃO DA LITERATURA

Neiva (2022) utilizou um algoritmo genético para otimizar a seção de colunas de perfis formados a frio para aumento de resistência axial centrada. Foi estudado a influência da excentricidade na seção otimizada para colunas perfuradas e não perfuradas. Ensaios

experimentais na prensa hidráulica foram realizados e em que se determinou as cargas suportadas e os deslocamentos dos perfis. Além disso, foi proposta uma formulação para verificação da capacidade resistente de colunas perfuradas submetidas a carregamento com excentricidade em torno do eixo de maior inércia considerando a interação entre os modos de flambagem distorcional e global.

Neiva (2017) analisou a influência das perfurações na estabilidade de perfis formados a frio sob carregamentos excêntricos e centrados. Através do Método dos Elementos Finitos, realizou análises lineares e não-lineares das colunas por meio do software ANSYS. Percebeu-se que a excentricidade tem efeito considerável na carga final, reduzindo seu valor. Além disso, observou-se que os furos verticais também influenciam na capacidade de carga do perfil. Ao final é propôs uma formulação para avaliação da capacidade resistente para o modo local e distorcional utilizando o Método da Resistência Direta.

Faria (2016) realizou um estudo numérico e experimental de perfis formados a frio com seção do tipo rack com perfurações ao longo do seu comprimento. O estudo teve por objetivo a avaliação dos modos de instabilidade local e distorcional, considerando a influência dos furos no comportamento estrutural do perfil. Realizou-se estudos numéricos e experimentais que quando confrontados apresentaram uniformidade, validando o modelo numérico realizado.

Bonada et al (2016) analisou a influência do momento fletor e da compressão axial na capacidade de carga de colunas tipo *rack* sujeitas ao carregamento excêntrico. Essa associação foi analisada através do Método de Elementos Finitos (MEF). Além disso, os resultados obtidos foram validados por testes experimentais reproduzidos. A carga última também foi calculada de acordo com padrões europeus e a fim de validar os resultados numéricos.

Souza (2013) analisou a influência das perfurações na ocorrência dos modos de flambagem em perfis formados a frio do tipo rack. O carregamento nas colunas foi de forma centrada e a construção do modelo numérico se deu pela Teoria Generalizada de Vigas (GBT) e pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Também foi feito análises experimentais a fim de se ter uma comparação e os resultados demonstraram uma dispersão máxima de 5%.

Bonada et al (2011) estudam três metodologias para a determinação das imperfeições iniciais das colunas sem perfurações a fim de realizar as análises não lineares. Duas dessas metodologias utilizam o Método dos Elementos Finitos (MEF), enquanto o terceiro método é

uma combinação do Método do Elemento Finito com a teoria generalizada de vigas (GBT). Além disso, são apresentadas as condições de contorno para a modelagem das colunas no software ANSYS e, por fim, os resultados são comparados com os testes experimentais a fim de validar o modelo numérico.

Freitas et al (2010) apresenta um estudo geral de estruturas do tipo Drive-In, avaliando a influência de todos os seus componentes na estabilidade geral da estrutura. Além de modelos de elementos finitos para avaliar a estabilidade global da estrutura, foi realizado um teste em escala real do sistema Drive-In. Os resultados experimentais e numéricos mostram que as conexões e as placas de base têm a influência mais significativa no comportamento do sistema. Além disso, uma equação que prevê a resistência da placa de base é proposta.

Souza (2005) realizou um estudo teórico-experimental de sistemas *drive-in* analisando seu comportamento global e avaliando a interação entre os diversos componentes do sistema. Os resultados experimentais foram comparados com resultados numéricos que consideram como parâmetros a rigidez das ligações entre coluna e braços e a influência da base da estrutura.

Campos (2003) estudou o comportamento dos sistemas de armazenagem industrial do tipo Drive-In utilizando as prescrições da norma do RMI. Avaliou experimentalmente a rigidez da ligação coluna-placa de base através do Método dos Elementos Finitos e estudou o tipo de análise que melhor representa o comportamento da estrutura: linear ou não linear, bidimensional ou tridimensional. Por fim, avaliou a perda de influência do plano de contraventamento dos fundos nas colunas frontais.

Oliveira (2000) realizou um estudo teórico-experimental de colunas e ligações em estruturas do tipo *drive-in* utilizando como objeto de pesquisa um modelo fabricado por uma empresa brasileira. O estudo teve como base as prescrições do RMI de 1997 para resistência da coluna e para determinação da rigidez das ligações.

1.9. METODOLOGIA

Este trabalho visa atestar se os esforços solicitantes obtidos por meio de análise numérica em uma estrutura de armazenagem do tipo *drive-in* atende à verificação de resistência de elementos flexo-comprimidos determinados por meio da equação adaptada do Método de Resistência Direta (MRD), conforme proposto por Neiva (2022).

Na primeira etapa do trabalho, foi desenvolvido um modelo bidimensional de um projeto real de estrutura *drive-in* utilizando o software ANSYS, com as colunas representadas por elementos do tipo BEAM188, considerando suas propriedades geométricas, como da seção bruta (A_g), materiais e condições de contorno. As ligações semi-rígidas entre braços e colunas foram simuladas com elementos de mola rotacional (COMBIN14), com rigidez determinada conforme estudos realizados por Oliveira (2000). Foram aplicadas cargas verticais nos braços da estrutura para simular o peso dos paletes, e uma carga horizontal para representar a falta de prumo da estrutura. A análise linear permitiu a obtenção dos esforços solicitantes nas colunas, mais precisamente a força axial e os momentos fletores máximos.

Em seguida, com base na formulação para verificação da capacidade resistente, proposta por Neiva (2022), foram calculadas as tensões das colunas submetidas à flexocompressão, considerando os modos de flambagem distorcional e global simultaneamente. Além disso, para o cálculo da verificação, foram consideradas dois tipos de seção transversal distintos: A_g (Área da seção transversal sem considerar as perfurações dos perfis metálicos) e $A_{g,net}$ (Área da seção considerando os furos). Essa distinção é feita com o intuito de avaliar a influência das perfurações na capacidade resistente da estrutura.

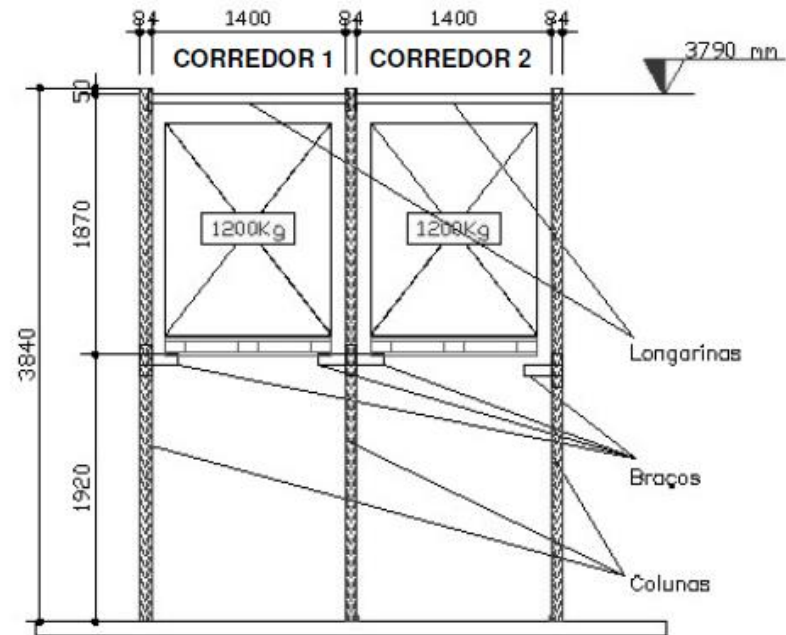
2. ANÁLISE NUMÉRICA

Para a realização da análise numérica, utilizou-se o software ANSYS para modelar uma estrutura *drive-in* bidimensional simulando o carregamento de projeto proposto por Souza (2005). Foi realizado uma análise linear para se determinar a carga máxima dos perfis estudados, sem considerar as imperfeições geométricas do perfil e as não linearidades do material. Entretanto, a rigidez das ligações entre braços e colunas, que são ligações semi-rígidas, foram consideradas conforme estudos de Oliveira (2000).

2.1. GEOMETRIA

O modelo ensaiado no software ANSYS procurou simular uma situação real de carregamento em estruturas *drive-in*. A Figura 10 - Projeto de *drive-in* mostra projeto foi concebido pela Águia Sistema de Armazenagem (2004) e estudado por Souza (2005).

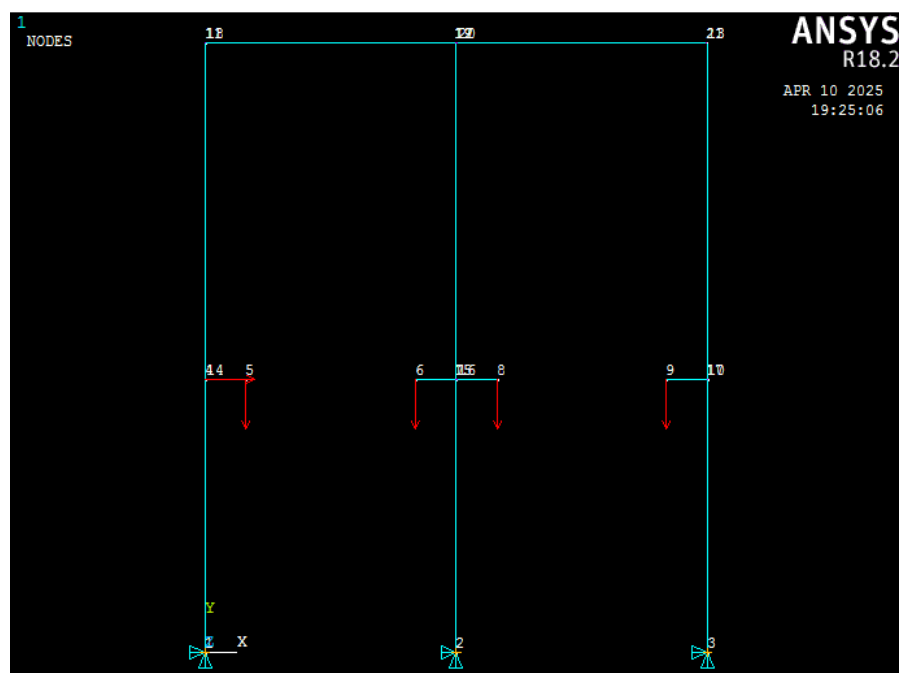
Figura 10 - Projeto de *drive-in*



Fonte: Souza, 2005

A modelagem foi em elementos de barra para a estrutura no plano bidimensional, como mostrado na Figura 11 – Estrutura *drive-in* modelada no ANSYS, nela é possível notar os elementos de barras em azul, a aplicação do carregamento que são as setas vermelhas e as restrições de deslocamentos nas bases das colunas representadas pelos triângulos azuis.

Figura 11 – Estrutura *drive-in* modelada no ANSYS

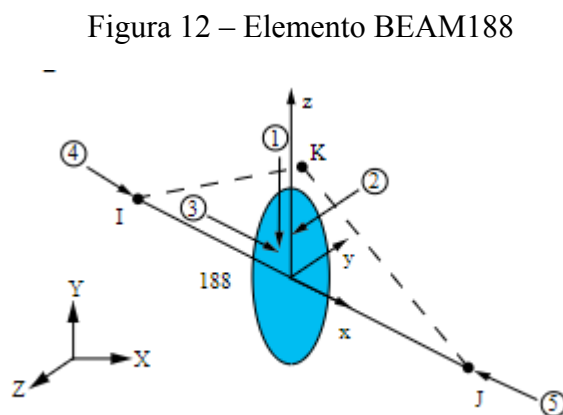


2.2. DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS

Dos elementos empregados para modelagem, foram escolhidos àqueles que representem o comportamento da estrutura e ao mesmo tempo proporcione eficiência computacional. Desse modo, seguiu-se as seguintes indicações de Teixeira (2005) e Campos (2003) para modelagem das colunas, braços e contraventamentos:

2.2.1. Elemento BEAM188

O elemento BEAM188 foi escolhido para simular o comportamento das colunas e dos braços. Ele é um elemento tridimensional que reproduz esforços de tração, compressão, torção e flexão. Possui seis graus de liberdade por nó e permite liberação de restrições na extremidade. Na Figura 12 é apresentado a configuração deste elemento.

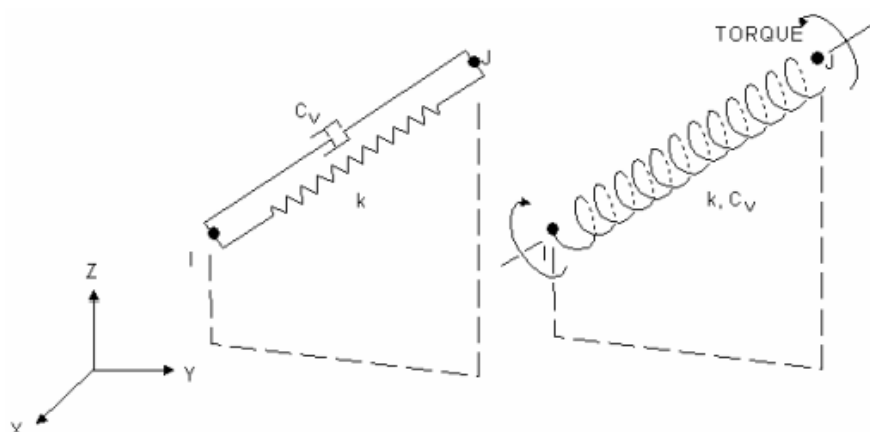


Fonte: MM, 2025

2.2.2. Elemento COMBIN14

Elemento de mola com aplicações torcionais e axiais, é utilizado para representar as ligações entre coluna e braço, uma vez que esta ligação é semi-rígida. Estudos experimentais realizados por Oliveira (2000) determinaram valores adequados de entrada para a rigidez desse elemento, sendo 73,862 kNm/rad para ligações entre braços e colunas. Na Figura 13 – Elemento COMBIN14a seguir, é apresentada a representação deste elemento.

Figura 13 – Elemento COMBIN14



Fonte: Souza, 2005

2.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO

A escolha correta das condições de contorno é essencial para garantir uma análise assertiva, o sistema *drive-in* é uma estrutura formada por colunas verticais e braços horizontais, onde a interação entre os elementos influencia diretamente a distribuição de forças e deslocamentos. Desse modo, as condições de contorno procuraram simular a situação real desse tipo de estrutura.

As bases das três colunas foram consideradas como engastadas, por ser uma análise bidimensional, foi necessário a então a restrição dos deslocamentos em X e em Y além da restrição de rotação em torno do eixo Z. Na Figura 131 – Estrutura *drive-in* modelada no ANSYS, apresentada anteriormente, é possível ver essa restrição na base das colunas.

Além disso, as ligações dos braços com as colunas e das colunas com os elementos de contraventamentos não são rígidas e nem rotuladas, são, portanto, semi-rígidas. Desse modo, inseriu-se a rigidez no valor de valor 73,86 kNm/rad nos nós conforme estudos de Oliveira (2000) e de Souza (2005).

2.4. APLICAÇÃO DO CARREGAMENTO

Para a realização do modelo numérico, foi necessária a aplicação de cargas verticais e horizontais, o carregamento na estrutura modelada está indicado pelas setas vermelhas na Figura 10. A determinação do valor vertical de carregamento na estrutura foi calculada a partir do projeto feito mostrado na Figura 9. Desse modo, os paletes, que têm uma massa estimada de 1200 kg, são apoiados nas vigas de túnel de profundidade de 1 m, que por sua vez são apoiados

em 4 braços. Portanto, cada palete exerce uma força de aproximadamente 3 kN em cada braço do *drive-in*, considerando a aceleração da gravidade $g = 10 \text{ m/s}^2$.

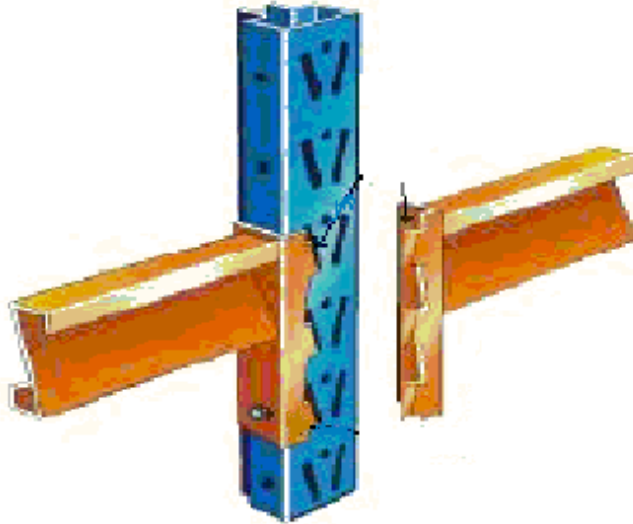
Além disso, a aplicação de carga horizontal é necessária para simular efeitos como impactos, e a falta de prumo da estrutura. O valor aplicado neste ensaio foi de 1,5 % do carregamento total até o nível desse carregamento, conforme recomendação do *Rack Manufacturers Institute* (RMI) de 1997. Após a aplicação do carregamento determinou-se os esforços solicitantes em que as colunas são submetidas para esta configuração.

3. MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

Nesta etapa, utiliza-se o Método de Resistência Direta (MRD) adaptado por Neiva (2022) como ferramenta analítica para a verificação dos resistências das colunas do sistema de armazenagem do tipo *drive-in*. O MRD, conforme proposto originalmente pelo *American Iron and Steel Institute* (AISI), e descrito no anexo C da norma NBR 14762, é um método que permite prever a resistência última de elementos de esbeltez elevada submetidos à flexão ou compressão. Além disso, estudos de Torabian *et al.* (2016) e Torabian e Schafer (2018), propuseram uma modificação ao MRD para determinar a capacidade resistente de vigas-colunas. Neiva (2022) reformulou a equação da resistência de vigas-colunas considerando a interação da flexão juntamente com a compressão, observadas nos sistemas *drive-in*. Essa formulação é essencial para a comparação com os resultados obtidos via análise numérica por elementos finitos, possibilitando avaliar a precisão e aplicabilidade do modelo adaptado à realidade do projeto estrutural do sistema estudado.

É importante entender que a Equação que será apresentada posteriormente proposta por Neiva (2022) utiliza parâmetros da análise estrutural para a determinação da estabilidade da estrutura. Além disso, a equação foi desenvolvida considerando a excentricidade de carga em torno do eixo de maior inércia da coluna. Em estruturas do tipo *drive-in*, esta excentricidade é aplicada por meio das ligações semi-rígidas nas colunas, promovidas pelas garras exemplificadas na Figura 14.

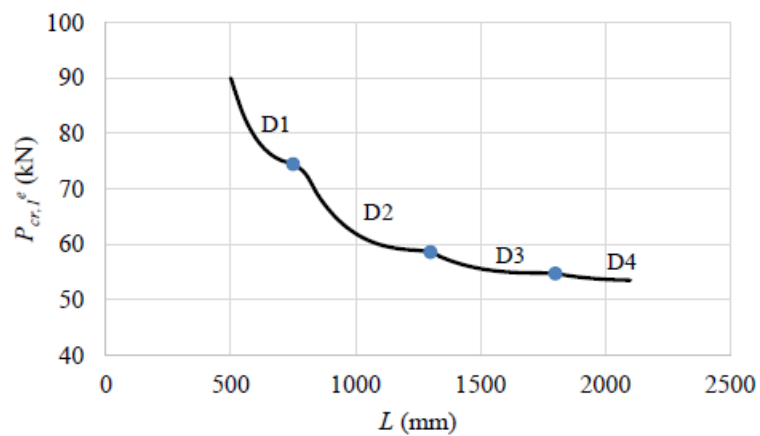
Figura 14 – Ligação na coluna



Fonte: Altamira, 2002

As curvas de assinatura de flambagem representam graficamente os modos críticos de flambagem de um elemento estrutural em função do comprimento efetivo das colunas e são determinadas a partir de ensaios numéricos de estabilidade. A Figura 15 a seguir é uma curva de assinatura de flambagem, determinada por Neiva (2022), que relaciona P_{cr,l^e} e L , para o modelo de coluna de seção *rack* (Figura 5) de alma 90 mm e excentricidade de 30 mm.

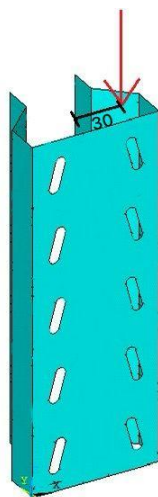
Figura 15 – Curva de assinatura de flambagem



Fonte: Neiva, 2022

Como pode-se ver na curva acima, foram apresentados quatro modos de instabilidade distorcional nos flanges comprimidos (D1 a D4), em que o valor da primeira força crítica excêntrica de flambagem, $P_{cr,1^e}$, para colunas de 1920 mm e submetidas à excentricidade de 30 mm, é 55 kN. A Figura 16 abaixo representa a posição desse carregamento na coluna.

Figura 16 – Posição do carregamento



Fonte: Heleno, 2023 (adaptado)

3.1.1. Equação

A Equação 1 seguir foi apresentada por Neiva (2022) a fim de verificar a capacidade resistente de elementos estruturais submetidos à esforços de flexocompressão considerando a interação dos modos de flambagem distorcional e global:

$$\beta_{nDG} = \begin{cases} \beta_y & \text{se } \lambda \leq \lambda_{lim} \\ \left[1 - A \left(\frac{\beta_{cr,1}}{\beta_y} \right)^B \right] \left(\frac{\beta_{cr,1}}{\beta_y} \right)^C \beta_y & \text{se } \lambda > \lambda_{lim} \end{cases} \quad \text{Eq. 1}$$

$$A = \begin{cases} 0,43 & R_{e\backslash bw} < 0,20 \\ -0,045 R_{e\backslash bw} + 0,44 & 0,20 \leq R_{e\backslash bw} \leq 0,90 \\ 0,40 & R_{e\backslash bw} > 0,90 \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} 0,10 & R_{e\backslash bw} < 0,20 \\ -0,0765 R_{e\backslash bw} + 0,08 & 0,20 \leq R_{e\backslash bw} \leq 0,90 \\ 0,15 & R_{e\backslash bw} > 0,90 \end{cases}$$

$$C = \begin{cases} 0,48 & R_{e\backslash bw} < 0,20 \\ -0,1035 R_{e\backslash bw} + 0,50 & 0,20 \leq R_{e\backslash bw} \leq 0,90 \\ 0,41 & R_{e\backslash bw} > 0,90 \end{cases}$$

$$\lambda_{lim} = \begin{cases} 0,490 & R_{e\backslash bw} < 0,20 \\ -0,1301 R_{e\backslash bw} + 0,5215 & 0,20 \leq R_{e\backslash bw} \leq 0,90 \\ 0,403 & R_{e\backslash bw} > 0,90 \end{cases}$$

O parâmetro $R_{e\backslash bw}$ é a excentricidade em milímetros dividido pela metade da alma, $b_w = 90$ mm. β_{nDG} é a capacidade resistente das colunas considerando a interação dos modos de flambagem distorcional-global e β_y é o limite de escoamento determinado a partir da magnitude do carregamento aplicado, β_r , e o parâmetro α_y , dados pelas equações 2, 3 e 4:

$$\sigma_{r-m\acute{a}x} = |\sigma_r(y_{c1}, y_{c2})|_{m\acute{a}x} = f_y \quad \text{Eq. 2}$$

$$\alpha_y = \frac{f_y}{\sigma_{r-m\acute{a}x}} \quad \text{Eq. 3}$$

$$\beta_y = \alpha_y \beta_r \quad \text{Eq. 4}$$

A magnitude do carregamento aplicado, β_r , é determinada a partir da análise estrutural, utilizando os resultados de momento (M) e força atuante (P), conforme equação 5:

$$\beta_r = \sqrt{\left(\frac{M}{M_y} \right)^2 + \left(\frac{P}{P_y} \right)^2} \quad \text{Eq. 5}$$

$\beta_{cr,1}$ é dado pela relação entre $P_{cr,1}^e$ e P_y^e , conforme mostrado nas equações 6 e 7

$$\beta_{cr,1} = \frac{P_{cr,1}^e}{P_y^e} \quad \text{Eq. 6}$$

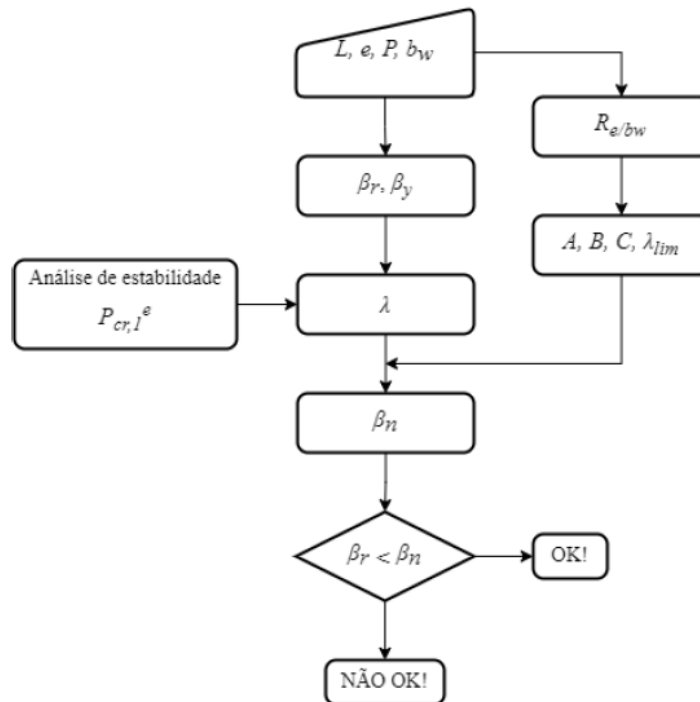
$$f_y = \frac{P_y^e}{A_g} + \frac{P_y^e e}{W} \quad \text{Eq. 7}$$

E a Equação 8 calcula a variável de esbeltez, λ , dado por:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\beta_y}{\beta_{cr,1}}} \quad \text{Eq. 8}$$

Após a realização do processo de cálculo, é possível atestar se as colunas resistem aos carregamentos solicitados desde que atendam a relação $\beta_r \leq \beta_y$. O fluxograma da Figura 17 a seguir exemplifica esse processo de cálculo

Figura 17 – Fluxograma da formulação



Fonte: Neiva, 2022

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

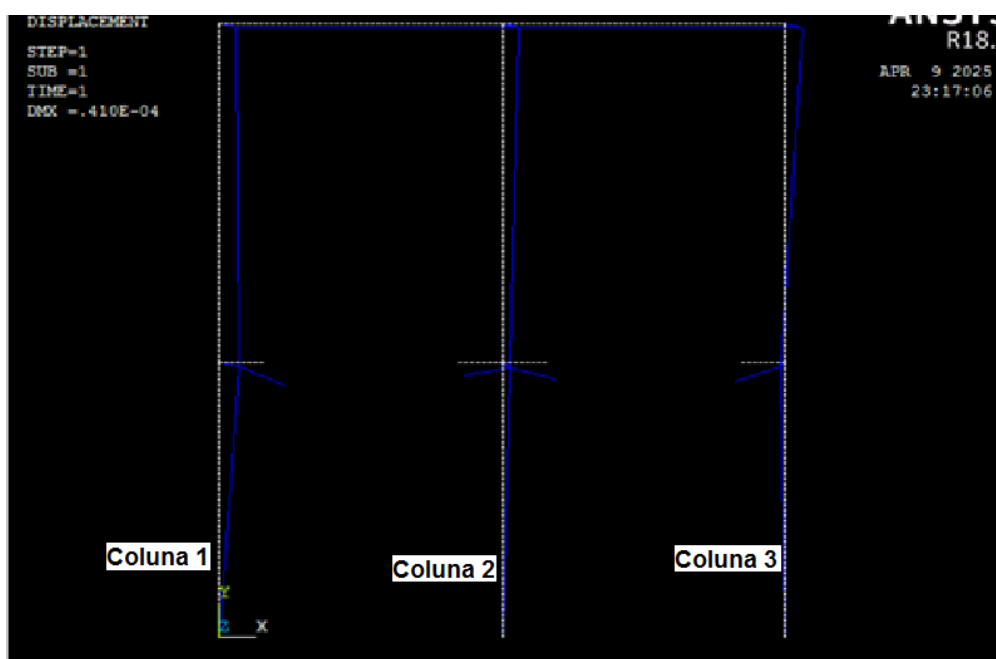
Neste capítulo, são apresentados os resultados e as discussões do sistema de armazenagem do tipo *drive-in* em elementos finitos via software ANSYS. Esta etapa tem como objetivo identificar os esforços solicitantes e os deslocamentos que ocorrem nas colunas do sistema

quando submetidas às ações previstas em projeto. São discutidos os resultados obtidos, com destaque para as tensões atuantes, deslocamentos e comparações com os valores estimados analiticamente pelo Método de Resistência Direta (MRD) adaptado.

4.1. ANÁLISE NUMÉRICA

Na análise numérica realizada no ANSYS, foi possível obter a configuração deformada do sistema estrutural após a aplicação das cargas verticais nos braços do sistema *drive-in*. A Figura 18 mostra a deformada do conjunto sob carregamento.

Figura 18 – Estrutura Deformada



Os deslocamentos verticais dos braços ligados às colunas estão apresentados na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 – Deslocamentos dos braços

Deslocamentos dos Braços (mm)		
Coluna 1		0.032175
Coluna 2	Direito	0.023627
	Esquerdo	0.023627
Coluna 3		0.023627

Pode-se notar que os braços do sistema *drive-in*, que funcionam como elementos de transferência de carga entre as paletes e as colunas, apresentam deslocamentos pequenos. Isso

indica que o carregamento de 3kN em cada braço é pequeno, ou seja, a estrutura suportaria paletes mais pesados.

Outro resultado importante de ser observado na análise numérica são as forças de compressão e os momentos fletores em que as colunas foram submetidas, conforme mostrado na Tabela 2:

Tabela 2 – Compressão e Flexão nas colunas

	Esforço Normal (kN)	Momento Fletor (kNm)
Coluna 1	3,411	0,244
Coluna 2	5,171	0,011
Coluna 3	3,416	0,286

As colunas do sistema apresentaram esforços normais predominantemente de compressão, com magnitudes coerentes à aplicação das cargas verticais simuladas. Observou-se ainda a presença de momentos fletores nas regiões das ligações com os braços, evidenciando um comportamento de flexocompressão, resultante da rigidez parcial das conexões modeladas. Esses momentos indicam que, além da carga axial, as colunas também estão sujeitas a flexão, o que pode intensificar os efeitos de flambagem e serão considerados na avaliação de resistência do MRD adaptado para flexocompressão.

4.2. MRD ADAPTADO

Por fim, foi realizado a aplicação do Método da Resistência Direta (MRD) adaptado com o objetivo de avaliar a resistência das colunas do sistema *drive-in*. Para isso, foram utilizados os resultados de esforços normais e momentos fletores obtidos por meio da análise numérica realizada no software ANSYS. Esses valores, foram inseridos nas equações do MRD adaptado, contribuindo para a validação do comportamento estrutural previsto.

Dessa forma, considerando a seção *rack* da Figura 5, e o aço de tensão de escoamento de 300 MPa, calculou-se as equações descritas no capítulo anterior. A Tabela 3 a seguir mostra os valores de β_r , calculados a partir do resultado numérico, e de β_{nDG} para as três colunas da estrutura.

Tabela 3 – β_r e β_{nDG}

	β_r	β_{nDG}	Relação β_r/β_{nDG} (%)
Coluna 1	0.0962	0.5219	18%
Coluna 2	0.0433	0.5715	8%
Coluna 3	0.1114	0.5299	21%

A partir da aplicação do Método da Resistência Direta (MRD) adaptado, utilizando os esforços internos extraídos da análise numérica realizada no ANSYS, foi possível avaliar a segurança das colunas do sistema *drive-in* frente à flambagem. Os resultados demonstraram que o parâmetro de resistência, β_r , calculado com base nos esforços normais e momentos fletores obtidos numericamente, apresentou-se inferior ao valor limite β_{nDG} , estabelecido pela equação normativa adaptada. Essa relação indica que as colunas analisadas operam dentro de uma faixa segura, sem exceder a capacidade resistente prevista pelo método. Dessa forma, pode-se concluir que, sob as condições de carregamento simuladas, as colunas do sistema apresentam desempenho estrutural satisfatório frente aos efeitos de flexocompressão e instabilidade. Além disso, o valor de β_r representa cerca de 20 % do valor de β_{nDG} para as colunas 1 e 3, e 8% para a coluna 2, o que significa que a estrutura está superdimensionada para o carregamento exigido.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar o comportamento estrutural de sistemas de armazenagem do tipo *drive-in*, com ênfase na avaliação da estabilidade das colunas submetidas à flexocompressão. Foi realizada uma modelagem numérica no software ANSYS de um projeto real e, posteriormente, a avaliação da estabilidade desse sistema através da adaptação da equação de verificação de colunas submetidas à flexocompressão proposta por Neiva (2022). A análise numérica linear demonstrou que, nas condições de contorno propostas, as colunas apresentaram desempenho satisfatório, mantendo os deslocamentos e tensões em baixos níveis devido ao carregamento baixo do projeto. A utilização do MRD adaptado mostrou-se eficiente na verificação da capacidade resistente dos elementos estruturais, oferecendo uma alternativa prática e fundamentada para análises complementares ao modelo numérico. Neste caso, percebeu-se que a estrutura está superdimensionada para o carregamento exigido. Por fim, os resultados obtidos reforçam a importância de integrar métodos analíticos e numéricos para uma compreensão mais completa do comportamento de estruturas esbeltas em sistemas de armazenagem, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais seguras e otimizadas no campo da engenharia estrutural.

REFERENCIAS

ABNT NBR 14762 – **Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio**, (2010).

ABNT NBR 17150 - **Sistemas de armazenagem — Estrutura de armazenagem estática tipo porta-paletes**, (2024).

ÁGUIA (1999). Projeto de Sistemas de Armazenagem Industrial tipo *Drive-in*.

ÁGUIA (2004). Águia Sistemas de Armazenagem Industrial do Tipo “Drive-in”.

ÁGUIA, DRIVE-IN | DRIVE THROUGH. Disponível em: < <https://aguiasistemas.com.br/br/solucoes/estruturas/drive-in-drive-through/> >. Acesso em 20/03/2025.

AISI. **Cold Formed Steel Desing Manual**. American Iron and Steel Institute, Washington DC, 1996.

ANSYS, Ansys program version 17.0. **Finite Element Software**. S.1. Ansys Incorporation, 2016.

ALTAMIRA. **Altamira Indústria Metalúrgica**. Disponível em: < <http://www.altamira.com.br> >, 2002.

CAMPOS, S. R. **Estudo Teórico-Experimental de sistemas de armazenagem industrial tipo Drive-in**. Dissertação de Mestrado. PROPEC - UFOP, (2003).

FREITAS, A. M. S.; SOUZA, F. T.; FREITAS, M. S. R. Analysis and behavior of steel storage drive-in racks. **Thin-Walled Structures**, v. 48, n. 2, p. 110–117, 2010.

GODLEY, M.H. R. **Prateleiras de armazenamento em projeto de membros de aço formados a frio**, Chapter 11, Ed Rhodes. Elsevier Aplied Science, Amsterdam. p.361-399, (1991).

HELENO, R. B. **Comparação de diferentes modelos constitutivos na análise numérica de colunas perfuradas**. [Relatório de Iniciação Científica] – UFOP, 2023.

OLIVEIRA, A. M. **Análise Teórico-Experimental de Sistemas Estruturais de Armazenamento (Rack's)**. Dissertação de mestrado, UFOP, (2000).

MÉTODO, Como funciona o sistema drive-IN. Disponível em: < <https://metodo.ind.br/como-funciona-o-sistema-drive-in/>>. Acesso em 08/04/2025.

MM, BEAM188. Disponível em: < https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_BEAM188.html >. Acesso em: 02/04/2025.

NEIVA, L. H. A. **Análise da influência da variação de perfurações no comportamento e capacidade de carga de perfis formados a frio de seção tipo rack**. Dissertação de Mestrado, PROPEC – UFOP, (2017).

NEIVA, L. H. A. **Análise da variação de perfurações e da influência da excentricidade de carga em elementos de sistemas de armazenagem industrial**. Tese de Doutorado, PROPEC - UFOP, (2022).

SOUZA, F. T. **Análise teórico-experimental da estabilidade de colunas perfuradas em perfis de aço formados a frio de seções tipo rack**. Tese de Doutorado. PROPEC – UFOP, (2013).

SOUZA, F. T. **Análise Teórico-Experimental de Sistemas Aporticados com Elementos Perfurados em Perfis Formados a Frio – Racks**. Dissertação de mestrado. UFOP, (2005).

TORABIAN, S.; ZHENG, B.; SHIFFERAW, Y.; SCHAFER, B. W. **Direct Strength Prediction of Cold-Formed Steel Beam-Columns**. Rep. RP16-3, American Iron and Steel Institute. Ithaca, NY, USA, 2016: [s.n.].

TORABIAN, S.; SCHAFER, B. W. **Development and Experimental Validation of the Direct Strength Method for Cold-Formed Steel Beam-Columns**. Journal of Structural Engineering, v. 144, n. 10, p. 04018175, Oct. 2018.