



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



LUÍZA DE FIGUEIREDO IMPELLIZIERI RIBEIRO

**SEGURANÇA DE ESTRUTURAS DE PERFIS FORMADOS A FRIO PROJETADAS
UTILIZANDO ANÁLISE AVANÇADA: ESTADO LIMITE DE SERVIÇO**

OURO PRETO

2026

Luíza de Figueiredo Impellizieri Ribeiro

**SEGURANÇA DE ESTRUTURAS DE PERFIS FORMADOS A FRIO PROJETADAS
UTILIZANDO ANÁLISE AVANÇADA: ESTADO LIMITE DE SERVIÇO**

Trabalho de conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientador: Dr. Marcilio Sousa da Rocha Freitas

OURO PRETO

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R484s Ribeiro, Luiza de Figueiredo Impellizieri.
Segurança de estruturas de perfis formados a frio projetadas
utilizando análise avançada [manuscrito]: estado limite de serviço. /
Luiza de Figueiredo Impellizieri Ribeiro. - 2026.
82 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Marcílio Freitas.
Coorientadora: Ma. Victor Faria.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Confiabilidade (Engenharia). 2. Estado Limite de Serviço (ELS). 3.
Análise estrutural (Engenharia). 4. First Order Reliability Method (FORM).
I. Freitas, Marcílio. II. Faria, Victor. III. Universidade Federal de Ouro Preto.
IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Luíza de Figueiredo Impellizieri Ribeiro

Segurança de estruturas de perfis formados a frio projetadas utilizando análise avançada: estado limite de serviço

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

Aprovada em 20 de julho de 2026

Membros da banca

Doutor Marcilio Sousa da Rocha Freitas - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Mestre Victor Antônio Moreira de Faria - Coorientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor Flávio Teixeira de Souza - Instituto Federal de Minas Gerais
Doutor Danilo Luiz Santana Mapa - Centro Universitário Santa Rita

Marcilio Sousa da Rocha Freitas, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 20/07/2026



Documento assinado eletronicamente por **Marcilio Sousa da Rocha Freitas, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/07/2026, às 17:33, 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 **1143308** e o código CRC **DA2C131F**.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, à minha família e aos meus amigos, por todo o apoio, incentivo e compreensão durante essa caminhada. Obrigada por estarem sempre ao meu lado, especialmente nos momentos mais difíceis.

Aos professores da Universidade Federal de Ouro Preto, pelos ensinamentos e pela disponibilidade em ajudar ao longo da graduação. Cada aprendizado contribuiu para a minha formação e para a realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro, que tornou possível o desenvolvimento desta pesquisa.

Em especial, ao meu orientador, Prof. Dr. Marcílio Sousa da Rocha Freitas, e ao meu coorientador, Me. Victor Antônio Moreira de Faria, por terem me apresentado à área de perfis formados a frio e de confiabilidade estrutural, despertando meu interesse por esses temas. Obrigada pela orientação, pela paciência, pela confiança e pela dedicação durante todas as etapas deste trabalho.

Por fim, aos professores Danilo Mapa e Flávio Souza, por aceitarem participar da banca e pelas valiosas sugestões, que contribuíram para melhorar este trabalho e certamente serão importantes para as pesquisas que pretendo desenvolver no futuro.

RESUMO

Os perfis de aço formados a frio são amplamente utilizados em estruturas leves, porém, por serem constituídos por chapas finas, são mais sensíveis aos deslocamentos e aos efeitos de segunda ordem. Neste trabalho foi avaliada a confiabilidade estrutural de um galpão metálico e de um rack de armazenagem constituídos por perfis formados a frio, considerando o estado limite de serviço associado aos deslocamentos. As análises estruturais e de confiabilidade foram realizadas por meio de uma rotina de confiabilidade implementada no MATLAB e acoplada ao MASTAN2, utilizando o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM). Para o galpão, foram avaliadas combinações entre ações permanentes, variáveis e de vento segundo os critérios de deslocamento da ABNT NBR 8800:2024 e da ASCE/SEI 7. Para o rack, foram analisados diferentes valores de desaprumo inicial e hipóteses de correlação entre as cargas aplicadas nas prateleiras. Para o galpão, os índices de confiabilidade permaneceram acima do valor alvo nas análises envolvendo a ação variável. Nas análises com vento, observou-se que a confiabilidade variou em função da norma adotada, sendo a ABNT NBR 8800:2024 mais conservadora que a ASCE/SEI 7 para o deslocamento horizontal, enquanto, para o deslocamento vertical, não foi observada uma tendência única de maior conservadorismo entre as normas. Para o rack, o caso analisado de cargas aplicadas nas prateleiras estaticamente independentes apresentou índices de confiabilidade superiores aos obtidos para a situação de correlação completa, sendo o desaprumo inicial, a rigidez das ligações semirrígidas e as cargas aplicadas nas longarinas as variáveis de maior influência. De forma geral, a metodologia mostrou-se adequada para avaliar a influência das ações e das variáveis aleatórias na confiabilidade de estruturas constituídas por perfis formados a frio.

Palavras-chaves: Perfis formados a frio; confiabilidade estrutural; estado limite de serviço; análise avançada; FORM.

ABSTRACT

Cold-formed steel members are widely used in lightweight structures. However, because they are made of thin steel sheets, they are more susceptible to displacements and second-order effects. This study evaluated the structural reliability of a steel portal frame building and a storage rack system constructed with cold-formed steel members, considering the serviceability limit state associated with displacements. The structural and reliability analyses were performed using a reliability routine implemented in MATLAB and coupled with MASTAN2, employing the First-Order Reliability Method (FORM). For the portal frame building, combinations of permanent, live, and wind loads were evaluated according to the displacement criteria of ABNT NBR 8800:2024 and ASCE/SEI 7. For the storage rack, different values of initial out-of-plumb imperfection and assumptions regarding the correlation between the loads applied to the rack levels were analyzed. For the portal frame building, the reliability indices remained above the target value in the analyses involving live loads. In the wind load analyses, the reliability varied according to the design standard adopted, with ABNT NBR 8800:2024 being more conservative than ASCE/SEI 7 for horizontal displacement, while no consistent trend of greater conservatism was observed between the two standards for vertical displacement. For the storage rack, the case considering statistically independent product loads presented higher reliability indices than the case with fully correlated loads, with the initial out-of-plumb imperfection, the stiffness of the semi-rigid connections, and the loads applied to the rack levels being the variables with the greatest influence. Overall, the proposed methodology proved to be suitable for evaluating the influence of loading conditions and random variables on the reliability of structures made of cold-formed steel members.

Keywords: Cold-formed steel members; structural reliability; serviceability limit state; advanced analysis; FORM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Aplicação da estrutura metálica formada a frio na construção civil.....	5
Figura 2.2: Seções transversais comuns de perfis metálicos formados a frio utilizados na construção civil.....	7
Figura 2.3: Exemplo de seção monossimétrica com os centros geométrico (CG) e de cisalhamento (CC) indicados.....	9
Figura 2.4: Distorções comuns em perfis monossimétricos de chapas finas.....	12
Figura 2.5: Exemplos de relações entre duas variáveis aleatórias: (a) correlação linear positiva perfeita; (b) ausência de correlação linear; e (c) relação não linear.	18
Figura 2.6: Probabilidade de falha para o estado limite de serviço.	19
Figura 2.7: Representação esquemática do ponto de projeto e do índice de confiabilidade no FORM.....	21
Figura 3.1: Fluxograma da metodologia de pesquisa adotada.....	23
Figura 3.2: Seção transversal adotada para o galpão.....	24
Figura 3.3: (a) Fotografia da estrutura utilizada nos ensaios experimentais com visualização das três seções transversais; (b) seções transversais adotadas para o rack.	25
Figura 3.4: Modelagem das seções no MSASect, com indicação dos centros geométrico e de cisalhamento da seção transversal (a) do galpão e (b) dos montantes do rack.....	26
Figura 3.5: Configuração estrutural do galpão utilizado por Baigent e Hancock (1982).....	27
Figura 3.6: (a) Configuração estrutural do rack; (b) Fotografia da estrutura utilizada nos ensaios experimentais.....	28
Figura 3.7: Modelo do galpão utilizado nas análises com ação do vento.	31
Figura 3.8: Modelo do galpão utilizado nas análises com ação variável.	32
Figura 3.9: Modelo do rack utilizado nas análises de confiabilidade com nó 60 em destaque e carregamento e desaprumo aplicados.....	34
Figura 4.1: Fatores de importância das variáveis aleatórias para o deslocamento horizontal segundo a ABNT NBR 8800:2024 e a ASCE/SEI 7 para o caso do vento reversível.	39

Figura 4.2: Fatores de importância das variáveis aleatórias para o deslocamento horizontal segundo a ABNT NBR 8800:2024 e a ASCE/SEI 7 para o caso do vento irreversível.	40
Figura 4.3: Fatores de importância das variáveis aleatórias para o deslocamento vertical segundo a ABNT NBR 8800:2024 e a ASCE/SEI 7 para o vento reversível.	44
Figura 4.4: Fatores de importância das variáveis aleatórias para o deslocamento vertical segundo a ABNT NBR 8800:2024 e a ASCE/SEI 7 para o vento irreversível.	45
Figura 4.5: Fatores de importância das variáveis aleatórias para o deslocamento vertical segundo a ABNT NBR 8800:2024 e a ASCE/SEI 7.	48
Figura 4.6: Fatores de importância das variáveis aleatórias para o deslocamento vertical segundo a ABNT NBR 8800:2024 e a ASCE/SEI 7.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias adotadas nas análises de confiabilidade.	29
Tabela 3.2: Limites de deslocamento adotados nas análises de confiabilidade.	30

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1: Índices de confiabilidade β em função da relação W_n/D_n para o deslocamento horizontal limite considerando a ação do vento reversível segundo a ABNT NBR 8800:2024 e a ASCE/SEI 7.....	37
Gráfico 4.2: Índices de confiabilidade β em função da relação W_n/D_n para o deslocamento horizontal limite considerando a ação do vento irreversível segundo a ABNT NBR 8800:2024 e a ASCE/SEI 7.....	38
Gráfico 4.3: Índices de confiabilidade β em função da relação W_n/D_n para o deslocamento vertical limite considerando a ação do vento reversível segundo a ABNT NBR 8800:2024 e a ASCE/SEI 7.	42
Gráfico 4.4: Índices de confiabilidade β em função da relação W_n/D_n para o deslocamento vertical limite considerando a ação do vento irreversível segundo a ABNT NBR 8800:2024 e a ASCE/SEI 7.	42
Gráfico 4.5: Índices de confiabilidade β em função da relação L_n/D_n para o deslocamento vertical limite considerando a ação variável reversível e irreversível.	46
Gráfico 4.6: Índices de confiabilidade β em função do desaprumo para as cargas aplicadas nas prateleiras completamente correlacionadas e não correlacionadas.....	49

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO	2
1.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
2. REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1. PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO	4
2.2. CONFIABILIDADE ESTRUTURAL.....	13
2.2.1. ESTADOS LIMITES	14
2.2.2. ANÁLISE DE CONFIABILIDADE	16
2.2.3. MÉTODO DE CONFIABILIDADE DE PRIMEIRA ORDEM (FORM) ..	20
3. METODOLOGIA.....	23
3.1. MODELAGEM DA SEÇÃO TRANSVERSAL	24
3.2. MODELAGEM DA ESTRUTURA	27
3.3. ANÁLISES DAS ESTRUTURAS	29
3.3.1. GALPÃO	30
3.3.1.1. AÇÃO DO VENTO E PERMANENTE.....	31
3.3.1.2. AÇÃO VARIÁVEL E PERMANENTE.....	32
3.3.2. RACK	33
4. RESULTADOS	36
4.1. GALPÃO	36
4.1.1. AÇÃO DO VENTO E PERMANENTE	36
4.1.1.1. DESLOCAMENTO HORIZONTAL	37
4.1.1.2. DESLOCAMENTO VERTICAL	41
4.1.2. AÇÃO VARIÁVEL E PERMANENTE.....	46
4.2. RACK	49

5. CONCLUSÃO.....	52
--------------------------	-----------

1. INTRODUÇÃO

Os perfis de aço formados a frio são bastante utilizados em estruturas metálicas leves, como galpões, coberturas, terças, longarinas, mezaninos e sistemas de armazenagem (Silva; Pierin; Silva, 2014). Esses elementos são produzidos a partir de chapas finas de aço dobradas em temperatura ambiente, o que permite a fabricação de seções variadas, com baixo peso próprio e facilidade de transporte e montagem (Yu; Laboube; Chen, 2020). Apesar dessas vantagens, esse tipo de perfil exige alguns cuidados na análise estrutural, já que as chapas delgadas podem tornar a estrutura mais sensível a deslocamentos, instabilidades, efeitos de segunda ordem e variações nas propriedades geométricas da seção (Hancock; Murray; Ellifritt, 2001; Yu; Laboube; Chen, 2020).

Além da verificação da segurança em relação à ruptura, também é necessário avaliar se a estrutura apresenta desempenho adequado durante o uso. Essa avaliação está relacionada aos estados limites de serviço, que envolvem deslocamentos, vibrações, danos a elementos não estruturais e perda de funcionalidade (ABNT, 2003; Galambos; Ellingwood, 1986). Em estruturas leves em perfis formados a frio, a verificação de deslocamentos pode ser importante, principalmente quando há ações horizontais, como o vento, ou quando a estrutura apresenta maior deslocabilidade (Galambos; Ellingwood, 1986; Faria; Freitas; Mapa, 2024).

Normalmente as verificações estruturais são feitas considerando valores fixos para ações, propriedades dos materiais e dimensões dos elementos. No entanto, esses valores podem variar em relação aos adotados no projeto (Haldar; Mahadevan, 2000). A análise de confiabilidade permite considerar essas variações de forma probabilística, por meio da definição de variáveis aleatórias, probabilidade de falha e índice de confiabilidade (Haldar; Mahadevan, 2000; Ayyub; Mccuen, 2011). Assim, é possível avaliar não apenas se a estrutura atende a um limite determinado, mas também a influência das incertezas na resposta obtida.

Neste trabalho, é avaliada a confiabilidade estrutural de um pórtico de galpão em perfis formados a frio, com base no modelo apresentado por Baigent e Hancock (1982) e de uma estrutura de rack apresentada por Trouncer e Rasmussen (2016). A análise é voltada ao estado limite de serviço associado aos deslocamentos, considerando limites definidos por critérios normativos. A resposta estrutural é obtida por meio de análise numérica, com apoio do

MASTAN2 acoplado ao MATLAB, e os deslocamentos calculados são comparados aos limites adotados. A partir disso, são avaliadas diferentes combinações de ações, parâmetros de rigidez e de inércia e de incerteza do modelo, buscando observar como essas variáveis influenciam os índices de confiabilidade obtidos.

1.1. OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a confiabilidade estrutural de sistemas constituídos por perfis de aço formados a frio, considerando o estado limite de serviço associado aos deslocamentos laterais. Para isso, serão analisados um galpão metálico submetido a ações permanentes, variáveis e de vento, e um rack de armazenagem industrial, utilizando análise avançada para representar o comportamento global das estruturas.

1.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- estudar os principais conceitos relacionados aos perfis de aço formados a frio, à análise avançada e à confiabilidade estrutural aplicada ao estado limite de serviço;
- definir e modelar os sistemas estruturais analisados, considerando um galpão metálico e um rack de armazenagem industrial constituídos por perfis formados a frio;
- realizar análises estruturais avançadas para avaliar os deslocamentos laterais dos modelos estudados, considerando os efeitos relevantes para o comportamento global das estruturas;
- adaptar a metodologia de análise de confiabilidade para o caso do estado limite de serviço, utilizando como critério a ocorrência de deslocamentos laterais excessivos;

- determinar os índices de confiabilidade associados à probabilidade de ultrapassagem do limite de deslocamento lateral nos modelos analisados;
- avaliar a influência das principais variáveis envolvidas no comportamento das estruturas, como parâmetros associados à rigidez, à ação do vento e às cargas aplicadas no rack de armazenagem;
- discutir os resultados obtidos, buscando contribuir para a avaliação do desempenho em serviço de estruturas de perfis formados a frio analisadas por meio de modelos numéricos avançados.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados os conceitos necessários para o desenvolvimento do trabalho, principalmente aqueles relacionados aos perfis formados a frio, aos estados limites e à confiabilidade estrutural.

2.1. PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO

Os perfis de aço formados a frio são elementos estruturais fabricados a partir do dobramento de chapas finas de aço em temperatura ambiente, sendo utilizados em diferentes sistemas da construção civil. No Brasil, o dimensionamento desses perfis é tratado pela ABNT NBR 14762, enquanto a padronização dos perfis estruturais formados a frio de seção aberta é apresentada pela ABNT NBR 6355 (ABNT, 2010; ABNT, 2012). Esses elementos têm se tornado uma alternativa importante em razão da rapidez de execução, da economia, da leveza e da facilidade de fabricação, transporte e montagem, sendo empregados em galpões de pequeno e médio porte, coberturas, mezaninos, edificações de pequeno porte e sistemas em light steel framing (Silva; Pierin; Silva, 2014). Uma aplicação da estrutura metálica formada a frio na construção civil é apresentada na Figura 2.1.



Figura 2.1: Aplicação da estrutura metálica formada a frio na construção civil.

Fonte: Seixas & Filhos (2022).

A utilização dos perfis formados a frio está associada ao desenvolvimento de soluções estruturais mais leves e industrializadas. Segundo Trouncer (2015), o uso de elementos metálicos de chapas finas vem se desenvolvendo a partir do avanço da produção de aço de baixo carbono e da necessidade de reduzir o peso próprio das estruturas. Inicialmente esses elementos foram empregados em setores como a indústria aeronáutica, ferroviária e automobilística. Em um segundo momento, os processos de fabricação, pesquisas e publicações cresceram, expandindo o uso dos perfis formados a frio para a construção civil (Allen, 2006; Hancock; Murray; Ellifritt, 2001).

Esse avanço levou à necessidade de normas específicas para o dimensionamento dos perfis formados a frio, já que os critérios utilizados para perfis laminados não representavam bem o comportamento dos elementos de paredes finas. Em 1946, foi publicada a primeira especificação do American Iron and Steel Institute (AISI) para o projeto desses elementos, documento que passou por revisões ao longo dos anos para acompanhar os novos estudos e melhorar os critérios de projeto (Allen, 2006; Trouncer, 2015; Yu; Laboube; Chen, 2020). No

Brasil, o dimensionamento dos perfis formados a frio é tratado pela ABNT NBR 14762, que apresenta os requisitos para o projeto dessas estruturas com base no método dos estados limites, enquanto a ABNT NBR 6355 trata da padronização dos perfis de seção aberta, incluindo aspectos como geometria, tolerâncias e formas de designação (ABNT, 2010; ABNT, 2012). Dessa forma, a criação de normas específicas contribuiu para ampliar a aplicação desses perfis em diferentes tipos de estruturas (Silva; Pierin; Silva, 2014).

A fabricação dos perfis formados a frio pode ocorrer por processo contínuo ou descontínuo. No processo contínuo, também chamado de perfilação, a chapa de aço passa por uma sequência de roletes que modificam gradualmente sua geometria até a obtenção da seção transversal final. No processo descontínuo, a conformação é feita por prensa dobradeira, sendo mais comum em produções de menor quantidade ou em situações nas quais se deseja maior flexibilidade geométrica. Nos dois casos, a conformação ocorre com o aço em temperatura ambiente, o que explica a denominação de perfis formados a frio (Silva; Pierin; Silva, 2014; Yu; Laboube; Chen, 2020).

A maleabilidade das chapas finas permite a fabricação de uma grande variedade de seções transversais. Entre os perfis mais comuns estão as cantoneiras, os perfis U simples, U enrijecido, Z, Z enrijecido, cartola, seções compostas por dois perfis e seções fechadas ou semicerradas obtidas pela associação de perfis abertos, conforme mostrado pela Figura 2.2 (Silva; Pierin; Silva, 2014).

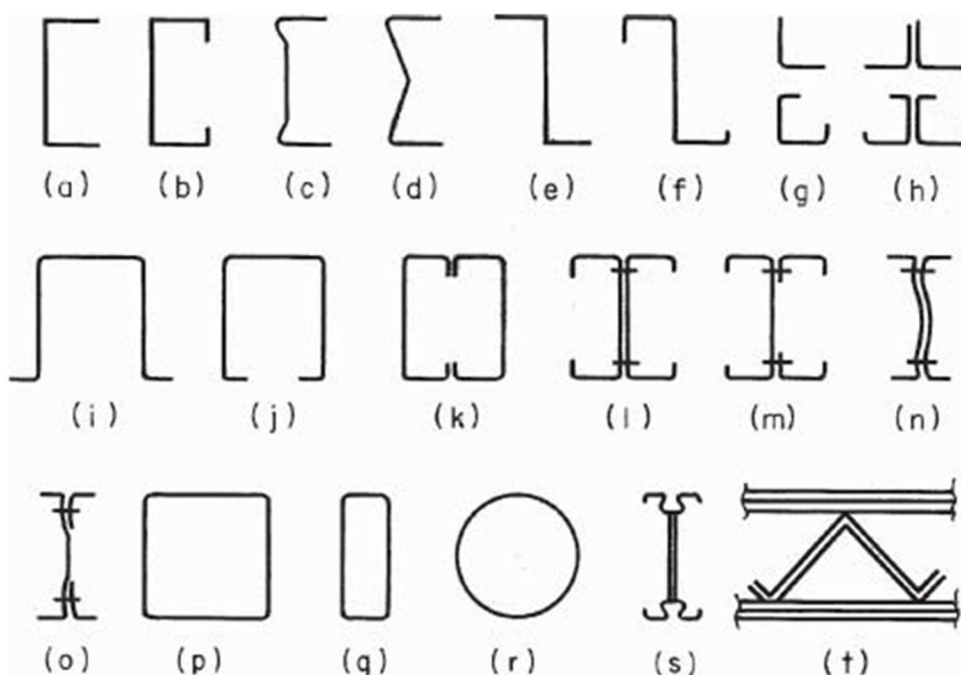


Figura 2.2: Seções transversais comuns de perfis metálicos formados a frio utilizados na construção civil.

Fonte: Winter (1959), apud Yu, LaBoube e Chen (2020).

Essa diversidade permite adaptar a geometria do elemento à função estrutural desejada, melhorando o aproveitamento do material. A escolha da seção depende do tipo de carregamento, das condições de ligação, da função da barra no sistema estrutural e da necessidade de melhorar a estabilidade dos elementos comprimidos. Nesse contexto, os enrijecedores de borda e intermediários são frequentemente utilizados para aumentar a rigidez dos perfis formados a frio e reduzir os efeitos de instabilidade associados às suas chapas delgadas, proporcionando melhor aproveitamento da resistência da seção (Hancock; Murray; Ellifritt, 2001).

O dobramento a frio também influencia as propriedades mecânicas do aço, uma vez que nas regiões curvas da seção, parte do material sofre deformações plásticas, o que pode aumentar sua resistência, esse efeito é conhecido como encruamento (Yu; Laboube; Chen, 2020). Como consequência, pode ocorrer aumento da resistência ao escoamento e da resistência à ruptura do aço nessas regiões, embora se observe no geral redução da ductilidade. A intensidade dessa alteração depende do tipo de aço, do raio de dobramento, da espessura da chapa e do processo

de fabricação utilizado. Sendo assim, as normas recomendam o uso de aços com qualificação estrutural e propriedades adequadas à conformação a frio, de modo a evitar fissuras nas dobras e perda de desempenho estrutural (Silva; Pierin; Silva, 2014).

Além do encruamento, a fabricação dos perfis formados a frio também pode gerar tensões residuais no elemento. Essas tensões permanecem no perfil mesmo sem carregamentos externos e estão relacionadas às deformações impostas durante a conformação e ao histórico de fabricação da chapa. Em perfis formados a frio, elas podem se distribuir de forma não uniforme ao longo da seção transversal, influenciando a resposta estrutural durante o carregamento. Com isso, podem antecipar o início do escoamento em algumas regiões, reduzir a rigidez do elemento e interferir no comportamento quando submetido aos fenômenos de instabilidade (Hancock; Murray; Ellifritt, 2001; Yu; Laboube; Chen, 2020).

As imperfeições geométricas também influenciam o comportamento dos perfis formados a frio. Durante a fabricação, o transporte, a montagem ou o uso da estrutura, podem surgir pequenas variações de retilidade, curvaturas, distorções da seção e desvios dimensionais. Como esses perfis são constituídos por chapas finas, pequenas imperfeições podem ter grande influência no seu comportamento estrutural. Assim, mesmo pequenas variações podem interferir na rigidez, na resistência e no modo de instabilidade predominante (Hancock; Murray; Ellifritt, 2001; Trouncker, 2015; Yu; Laboube; Chen, 2020).

As seções formadas a frio também podem ser classificadas conforme suas características de simetria, podendo ser duplamente simétricas, monossimétricas ou assimétricas (Silva; Pierin; Silva, 2014). Essa característica interfere diretamente na posição do centro de torção, na distribuição de tensões e na possibilidade de ocorrência simultânea de flexão e torção, de modo que um carregamento que provoca flexão também pode induzir rotações da seção transversal. Em seções abertas e monossimétricas, como a apresentada na Figura 2.3, o centro de cisalhamento geralmente não coincide com o centro geométrico da seção, o que pode provocar efeitos de torção mesmo quando o carregamento é aparentemente simples (Baigent; Hancock, 1982).

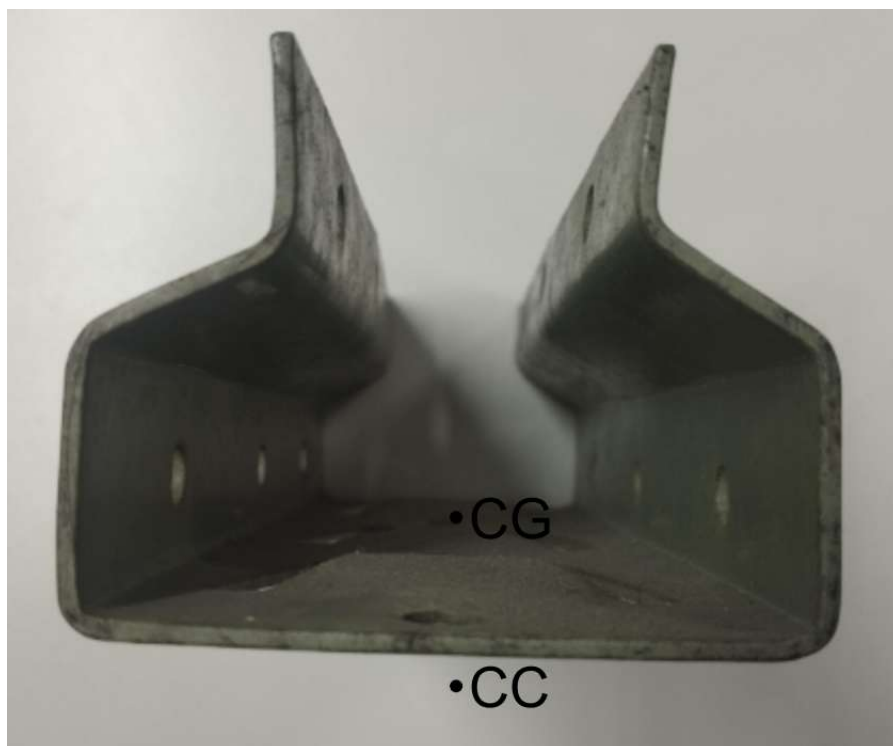


Figura 2.3: Exemplo de seção monossimétrica com os centros geométrico (CG) e de cisalhamento (CC) indicados.

Fonte: Elaborado pela autora.

Nos galpões metálicos, a avaliação estrutural precisa considerar ações permanentes, ações variáveis e ações ambientais, principalmente o vento. A leveza dos perfis formados a frio ajuda a reduzir as cargas gravitacionais e facilita a montagem da estrutura. Por outro lado, essa mesma leveza pode tornar os deslocamentos laterais, os efeitos de segunda ordem e as ações horizontais mais importantes na análise. Por isso, o comportamento global dos pórticos, travamentos e sistemas de contraventamento precisa ser bem avaliado, principalmente quando são usadas seções abertas e delgadas, que possuem menor rigidez à torção (CBCA, 2018; Silva; Pierin; Silva, 2014).

Além dos galpões, os sistemas de armazenagem industrial também são uma aplicação importante dos perfis formados a frio. Os racks porta-paletes são geralmente compostos por montantes, longarinas, travamentos e ligações mecânicas, formando estruturas leves, desmontáveis e versáteis. Além disso, os montantes perfurados permitem o ajuste da posição das longarinas, possibilitando a adaptação da estrutura às diferentes necessidades de

armazenamento. Os perfis formados a frio são amplamente utilizados nesses sistemas por terem uma boa relação resistência/peso. No entanto, as perfurações alteram as propriedades geométricas da seção, reduzem áreas resistentes e podem intensificar problemas de instabilidade, principalmente em elementos comprimidos (Trouncer; Rasmussen, 2016; Gomes; Sarmanho; Souza, 2023).

Trouncer e Rasmussen (2016) investigaram experimentalmente pórticos tridimensionais de racks de armazenagem em aço de espessura ultraleve, sujeitos a instabilidades locais e à flambagem flexo-torcional. Os autores observaram que as deformações da seção transversal podem reduzir a rigidez dos elementos, aumentar os deslocamentos laterais e modificar a distribuição dos esforços internos. Esse comportamento é importante em estruturas deslocáveis, como os racks industriais, porque a perda de rigidez local pode aumentar os efeitos de segunda ordem e influenciar o desempenho da estrutura em serviço (Trouncer; Rasmussen, 2016).

As principais vantagens dos perfis formados a frio estão relacionadas à leveza, à economia de material, à variedade de seções e à facilidade de fabricação e montagem. Segundo Silva, Pierin e Silva (2014), esses elementos contribuem para tornar o processo construtivo mais eficiente, pois podem ser produzidos industrialmente, transportados com maior facilidade e montados com menor necessidade de equipamentos pesados. Além disso, a possibilidade de conformar chapas finas em diferentes geometrias permite adaptar a seção transversal ao tipo de solicitação predominante, utilizando dobras e enrijecedores para melhorar o aproveitamento do material e o desempenho estrutural (Yu; Laboube; Chen, 2020). Entretanto, essas mesmas características também exigem atenção no dimensionamento, principalmente devido à pequena espessura das chapas.

Apesar dessas vantagens, os perfis formados a frio apresentam desafios importantes de análise e dimensionamento. Por serem constituídos por chapas finas, esses elementos possuem elevada relação largura/espessura e, por isso, sua capacidade resistente pode ser bastante influenciada pelos fenômenos de instabilidade, não dependendo apenas da resistência do aço. A instabilidade local ocorre quando uma ou mais placas da seção transversal perdem estabilidade sem alteração significativa da forma global da barra. A instabilidade distorcional envolve mudança na forma da seção transversal, geralmente com deslocamento relativo de mesas, almas e enrijecedores. Já a instabilidade global está relacionada ao deslocamento da

barra como um todo, podendo ocorrer por flexão, torção ou flexo-torção (Silva; Pierin; Silva, 2014; Yu; Laboube; Chen, 2020).

Em estruturas reais, os modos de instabilidade podem ocorrer de forma combinada e serem influenciados por imperfeições geométricas, tensões residuais, condições de contorno, rigidez das ligações e presença de perfurações. Esses fatores podem reduzir a rigidez e a capacidade resistente dos elementos, alterar a distribuição dos esforços internos e aumentar a deslocabilidade global da estrutura. Por isso, o comportamento dos perfis formados a frio tende a ser mais sensível que o de perfis compactos, principalmente pela influência das instabilidades associadas às paredes delgadas e pela necessidade de representar adequadamente esses efeitos na análise estrutural (Hancock; Murray; Ellifritt, 2001; Trouncer, 2015; Trouncer; Rasmussen, 2016; Yu; Laboube; Chen, 2020).

Outro ponto importante é o comportamento à torção e ao empenamento. Em perfis de seção aberta, a rigidez à torção costuma ser reduzida, e a restrição ao empenamento pode gerar tensões adicionais ao longo da barra. Quando o carregamento não é aplicado no centro de torção, podem surgir efeitos de torção que não são adequadamente representados por modelos simples de flexão. Baigent e Hancock (1982) ressaltam que estruturas formadas por membros de paredes finas exigem modelos capazes de considerar torção não uniforme, assimetria da seção transversal, restrições excêntricas e tipos de ligações próprios desses elementos. A Figura 2.4 apresenta alguns exemplos de distorções que podem ocorrer em perfis monossimétricos de chapas finas. Dessa forma, a análise de estruturas com perfis formados a frio deve considerar propriedades específicas, como centro de torção, momento de inércia à torção e rigidez ao empenamento (Silva; Pierin; Silva, 2014).

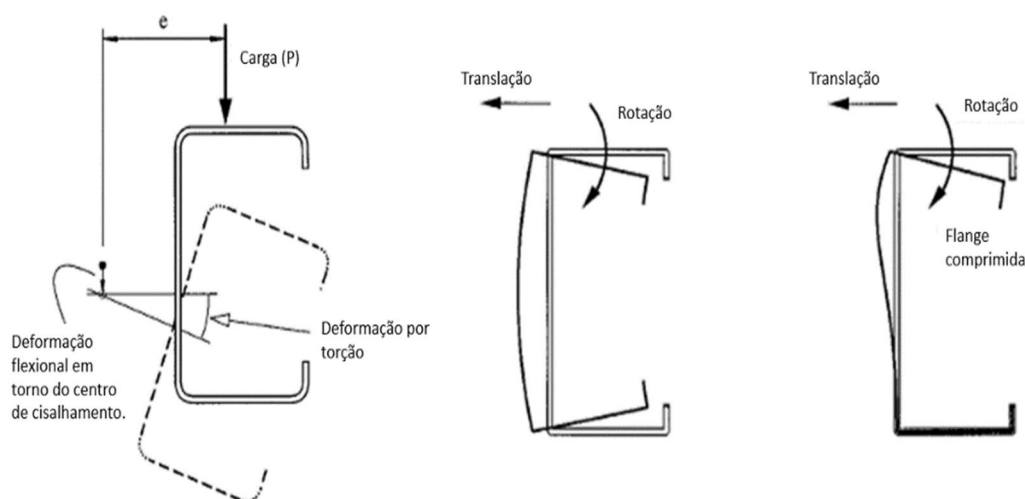


Figura 2.4: Distorções comuns em perfis monossimétricos de chapas finas.

Fonte: Adaptado de Hancock, Murray e Ellifritt (2001).

A análise avançada considera, de forma integrada, efeitos como não linearidades geométricas e de material, imperfeições iniciais e ligações semirrígidas, proporcionando uma representação mais realista do comportamento global das estruturas metálicas (Faria; Freitas; Mapa, 2025). Além disso, em determinadas situações, também permite avaliar a influência de fenômenos de instabilidade local e distorcional. Para os perfis formados a frio, essa abordagem é especialmente importante, pois possibilita a análise da estrutura como um sistema, em vez de limitar a verificação ao comportamento isolado de seus elementos após uma análise simplificada (Baigent; Hancock, 1982; Faria; Freitas; Mapa, 2025).

A análise avançada aparece como uma alternativa para avaliar melhor o comportamento global das estruturas metálicas, principalmente quando existem efeitos que não são bem representados por análises mais simples. Esse tipo de análise permite considerar efeitos de segunda ordem, não linearidades geométricas e de material, imperfeições iniciais, ligações semirrígidas e, em alguns casos, efeitos ligados à instabilidade local e distorcional. No caso dos perfis formados a frio, isso é importante porque permite analisar a estrutura como um sistema, e não apenas verificar cada elemento de forma isolada depois de uma análise simplificada (Baigent; Hancock, 1982; Faria; Freitas; Mapa, 2025).

Embora já existam critérios normativos para o dimensionamento de barras e ligações em perfis formados a frio, o uso da análise avançada em estruturas completas ainda tem

limitações. Essa dificuldade aparece principalmente quando se trata do estado limite de serviço, já que os estudos que utilizam análise numérica geralmente se concentram mais nos estados limites últimos (Faria; Freitas; Mapa, 2025). No Brasil, a ABNT NBR 14762 estabelece critérios para o dimensionamento de perfis formados a frio, enquanto normas como a ANSI MH16.1 e a EN 15512 apresentam requisitos específicos para racks industriais (ABNT, 2010; RMI, 2021; CEN, 2020).

Nesse contexto, o trabalho desenvolvido envolve a análise de duas estruturas executadas com perfis formados a frio: um galpão metálico e um rack destinado à armazenagem industrial. Nos dois casos, são utilizadas seções transversais abertas e monossimétricas, sendo que uma delas apresenta perfurações, características que tornam importante avaliar o comportamento global da estrutura, principalmente em relação aos deslocamentos, aos efeitos de segunda ordem e à influência da baixa rigidez à torção. Assim, o estudo desses modelos permite discutir a aplicação da análise avançada em estruturas formadas por perfis de paredes finas, mantendo o foco no desempenho em estado limite de serviço.

2.2. CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

A confiabilidade estrutural busca avaliar o nível de segurança de uma estrutura levando em conta que os parâmetros considerados no projeto estão sujeitos a variações e incertezas (Haldar; Mahadevan, 2000). As ações que atuam na estrutura, as propriedades dos materiais, as dimensões dos elementos estruturais e até as simplificações adotadas nos modelos de análise podem não representar exatamente as condições reais encontradas na prática (Ayyub; Mccuen, 2011). Por isso, o comportamento de uma estrutura não pode ser garantido de forma absoluta, já que sempre existe alguma possibilidade de que um estado limite seja atingido ou ultrapassado durante sua vida útil (Haldar; Mahadevan, 2000; Ayyub; Mccuen, 2011).

Na prática, essas incertezas normalmente são consideradas por meio dos coeficientes de segurança adotados em projeto, como os coeficientes de ponderação das ações e os coeficientes aplicados à resistência. No entanto, a análise de confiabilidade permite tratar essas grandezas de forma probabilística, relacionando as variáveis do problema a distribuições de probabilidade,

valores médios e coeficientes de variação (Haldar; Mahadevan, 2000). Dessa maneira, além de simplesmente verificar se os critérios de projeto foram atendidos para um conjunto fixo de valores, também é possível estimar a probabilidade de falha e o índice de confiabilidade associado ao estado limite analisado (Haldar; Mahadevan, 2000).

Em estruturas de perfis formados a frio, a análise de confiabilidade é importante porque o comportamento da estrutura depende de parâmetros como rigidez, dimensões geométricas, imperfeições e características das ligações, que estão sujeitos a incertezas e apresentam variações em relação aos valores considerados na análise estrutural. Além disso, por serem constituídos por chapas finas, esses elementos costumam ser mais sensíveis a deslocamentos e aos efeitos de segunda ordem, fatores que podem afetar o comportamento da estrutura, principalmente em sistemas leves e com maior deslocabilidade (Faria; Freitas; Mapa, 2024).

A análise de confiabilidade também pode ser associada a análises computacionais da estrutura. Nesse caso, cada conjunto de valores das variáveis aleatórias gera uma resposta estrutural, que pode ser deslocamento, esforço interno ou resistência. Quando o interesse está no estado limite de serviço, essa resposta pode ser o deslocamento lateral ou vertical obtido pelo modelo estrutural. De forma semelhante ao procedimento apresentado por Faria, Freitas e Mapa (2024), o presente trabalho utiliza essa lógica por meio de uma rotina de confiabilidade desenvolvida em MATLAB e acoplada ao programa MASTAN2, permitindo que os deslocamentos calculados sejam empregados na avaliação da probabilidade de falha associada ao estado limite de serviço.

2.2.1. ESTADOS LIMITES

A verificação por estados limites é utilizada para avaliar se a estrutura atende aos requisitos de segurança e desempenho considerados no projeto. Um estado limite corresponde a uma situação em que a estrutura passa a não atender de forma satisfatória às condições previstas para seu uso (ABNT, 2025). Essa condição pode estar associada à ruptura, à instabilidade, ao colapso ou a problemas de uso, como deslocamentos excessivos e danos a elementos não estruturais (ABNT, 2025; Haldar; Mahadevan, 2000).

Segundo a ABNT NBR 8681 (2025), os estados limites últimos estão associados a situações de colapso, ruptura, instabilidade ou perda de equilíbrio da estrutura, enquanto os estados limites de serviço estão relacionados às condições de uso da edificação e ao seu desempenho durante a vida útil. Nesses casos, a estrutura pode não estar próxima da ruptura, mas ainda assim apresentar desempenho inadequado. Galambos e Ellingwood (1986) discutem que deslocamentos excessivos podem causar danos em paredes, divisórias, esquadrias e outros elementos não estruturais, além de prejudicar o funcionamento da edificação e causar desconforto aos usuários.

Na verificação do estado limite de serviço, o deslocamento calculado para a estrutura é comparado com um deslocamento máximo admissível definido em norma ou adotado no projeto. Esse limite é adotado para garantir que a estrutura apresente desempenho adequado durante o uso, evitando problemas de funcionamento, aparência ou danos a elementos não estruturais (Galambos; Ellingwood, 1986). Em galpões metálicos e racks de armazenagem, os deslocamentos horizontais podem ser influenciados pela rigidez global da estrutura, pela rigidez das ligações, pela ação do vento e pelos efeitos de segunda ordem (Faria; Freitas; Mapa, 2024). Além disso, por serem estruturas geralmente leves e compostas por elementos esbeltos, pequenas variações nesses parâmetros podem alterar significativamente os deslocamentos da estrutura (Galambos; Ellingwood, 1986; Faria; Freitas; Mapa, 2024).

Os estados limites de serviço também podem ser classificados como reversíveis ou irreversíveis. Em um estado limite reversível, a estrutura retorna à condição anterior quando a ação deixa de atuar, sem dano permanente. Já em um estado limite irreversível, a estrutura pode não voltar completamente à condição original após a ocorrência da ação, podendo haver danos permanentes ou comprometimento de sua funcionalidade. Essa diferença interfere na escolha da combinação de ações e no período de referência usado para definir a solicitação de serviço (Galambos; Ellingwood, 1986).

No presente trabalho, o estado limite de serviço foi avaliado a partir dos deslocamentos de um pórtico de galpão baseado no modelo de Baigent e Hancock (1982), mantendo a seção transversal utilizada nessa referência. A análise considera que a ultrapassagem dos limites normativos de deslocamento representa uma condição de desempenho não desejado em serviço. Os limites adotados para essa avaliação e os nós do modelo utilizados para o monitoramento dos deslocamentos são apresentados na metodologia.

2.2.2. ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

A análise de confiabilidade começa com a definição da função de estado limite ($g(R,S)$), que é utilizada para identificar se a estrutura está em uma condição segura ou se atingiu uma situação de falha para o critério que está sendo verificado. Em outras palavras, essa função pode ser entendida como uma comparação entre a resistência da estrutura (R) e a solicitação atuante (S). Quando a resistência é maior que a solicitação, a estrutura atende ao estado limite analisado, já quando a solicitação supera a resistência, se considera que ocorreu falha para esse estado limite (Ang; Tang, 2007). Essa relação é apresentada pela Equação 2.1.

$$g(R,S) = R - S \quad \text{Equação 2.1}$$

A superfície de falha é definida pela condição em que $g(R,S) = 0$, representando a fronteira entre os domínios de segurança e de falha da estrutura. Assim, a zona segura ocorre quando a função de estado limite apresenta valores positivos, $g(R,S) > 0$, indicando que a resistência é superior às solicitações atuantes. Por outro lado, quando a função de estado limite assume valores negativos, $g(R,S) < 0$, caracteriza-se a zona de falha da estrutura para aquele estado limite, na qual a solicitação atuante é superior à resistência disponível (Ang; Tang, 2007).

O comportamento real de uma estrutura é diferente daquele previsto em projeto, porque tanto as solicitações atuantes quanto a resistência da estrutura estão sujeitas a variações em relação aos valores adotados na análise. Essas variações podem estar relacionadas às propriedades dos materiais, às dimensões dos elementos e das seções, à rigidez das ligações, às ações consideradas e também às simplificações utilizadas nos modelos de cálculo (Haldar; Mahadevan, 2000). Em estruturas de perfis formados a frio, esse aspecto merece ainda mais atenção, já que os elementos são constituídos por chapas delgadas e apresentam maior sensibilidade a deslocamentos, instabilidades e efeitos de segunda ordem.

Além disso, neste trabalho foram utilizadas seções monossimétricas, que possuem comportamento mais sensível aos efeitos de torção do que seções duplamente simétricas, fazendo com que pequenas variações na geometria ou na rigidez possam provocar alterações mais significativas na resposta estrutural (Yu; Laboube; Chen, 2020). Por esse motivo, a função de estado limite pode ser escrita de forma mais geral em função de um conjunto de variáveis aleatórias, conforme apresentado na Equação 2.2.

$$g(X) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad \text{Equação 2.2}$$

Nessa equação, X representa o vetor das variáveis aleatórias consideradas na análise. Para definir essas variáveis, são utilizados alguns parâmetros estatísticos, como a média (μ) e a variância (σ^2), que indica o quanto seus valores podem variar em relação a esse valor médio. A partir desta se obtém o desvio padrão (σ) (Haldar; Mahadevan, 2000). Em análises de confiabilidade, é comum utilizar o coeficiente de variação (CoV) que relaciona o desvio padrão e a média da variável e permite comparar a variabilidade de diferentes grandezas. O coeficiente de variação pode ser calculado pela Equação 2.3.

$$CoV = \frac{\sigma}{\mu} \quad \text{Equação 2.3}$$

Além desses parâmetros, em algumas situações também é necessário considerar a correlação entre as variáveis aleatórias. O coeficiente de correlação indica o grau de dependência linear entre duas variáveis, assumindo valores entre -1 e 1. Quando o coeficiente é igual a 1, as variáveis apresentam relação linear perfeita, enquanto valores iguais a -1 indicam que elas variam em sentidos opostos. Já quando o coeficiente é igual a 0, considera-se que não existe correlação linear entre elas, embora ainda possa existir uma relação não linear (Haldar; Mahadevan, 2000). A Figura 2.5 apresenta diferentes comportamentos relacionados à correlação entre variáveis aleatórias.

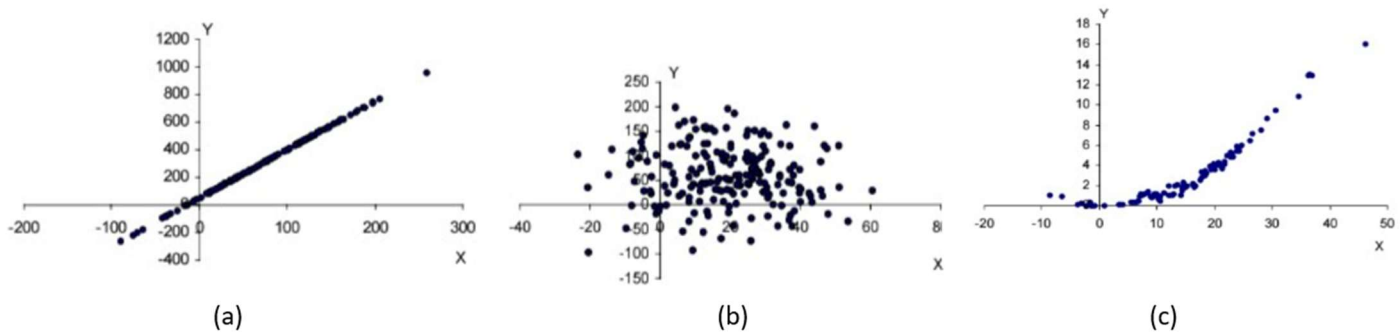


Figura 2.5: Exemplos de relações entre duas variáveis aleatórias: (a) correlação linear positiva perfeita; (b) ausência de correlação; e (c) relação não linear.

Fonte: Adaptado de Lira (2004).

Na análise de confiabilidade, a correlação entre as variáveis aleatórias é considerada por meio da matriz de correlação, que reúne os coeficientes de correlação entre todas as variáveis do problema. Essa matriz é utilizada na transformação das variáveis originais para o espaço normal padrão, etapa em que as variáveis são convertidas em variáveis independentes com distribuição normal padrão. Nesse processo, a dependência existente entre as variáveis é incorporada ao modelo por meio da própria matriz de correlação, garantindo que as relações estatísticas sejam preservadas durante o cálculo do índice de confiabilidade pelo método FORM (Haldar; Mahadevan, 2000).

A probabilidade de falha (P_f) corresponde à probabilidade de a função de estado limite assumir valores menores que zero, indicando que a estrutura não atende ao critério analisado. Essa probabilidade pode ser obtida a partir da função densidade de probabilidade das variáveis aleatórias consideradas na análise, integrando apenas a parcela correspondente aos casos em que $g(X) < 0$ (Ang; Tang, 2007). Matematicamente, a probabilidade de falha pode ser descrita pela Equação 2.4.

$$P_f = \int_{g(X) \leq 0} f_X(x) dx \quad \text{Equação 2.4}$$

O cálculo direto dessa probabilidade pode se tornar difícil quando há muitas variáveis envolvidas (Haldar; Mahadevan, 2000). Em muitos casos, o comportamento da estrutura é avaliado por meio de modelos computacionais, tornando necessária a utilização de métodos aproximados ou de simulação para estimar a probabilidade de falha e o índice de confiabilidade (Haldar; Mahadevan, 2000; Ayyub; Mccuen, 2011).

Para estados limites de serviço associados a deslocamentos, a função de estado limite pode ser escrita pela diferença entre o deslocamento limite (δ_{lim}) e o deslocamento calculado pela análise estrutural em função das variáveis aleatórias (δ_X) conforme apresentado na Equação 2.5 (Haldar; Mahadevan, 2000).

$$g(X) = \delta_{lim} - \delta_X \quad \text{Equação 2.5}$$

A Figura 2.6 apresenta de forma esquemática a região associada à probabilidade de falha para um estado limite de serviço.

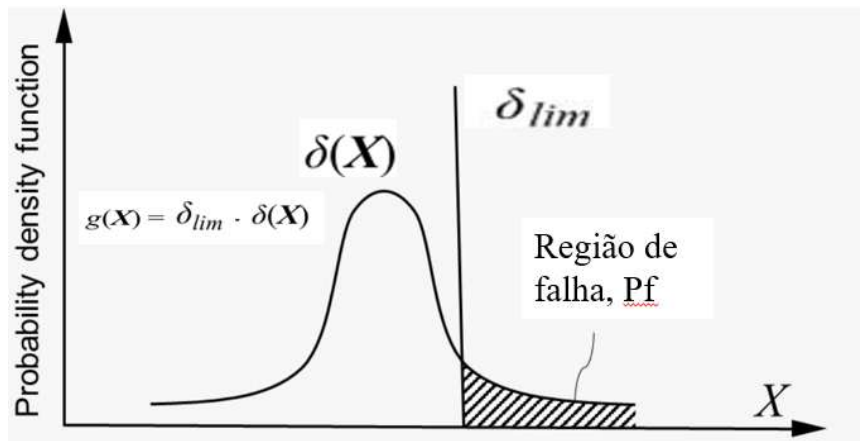


Figura 2.6: Probabilidade de falha para o estado limite de serviço.

Fonte: Adaptado de Faria, Freitas e Mapa (2024).

O índice de confiabilidade (β) é um parâmetro usado para indicar o nível de segurança de uma estrutura em relação à falha. De modo geral, valores mais altos de β correspondem a menores probabilidades de falha para o estado limite considerado (Ang; Tang, 2007). Sendo assim, o índice de confiabilidade pode ser calculado segundo a Equação 2.6.

$$\beta = -\Phi^{-1} . Pf \quad \text{Equação 2.6}$$

onde Φ^{-1} representa a inversa da função de distribuição acumulada normal padrão, já Pf é a probabilidade de falha.

2.2.3. MÉTODO DE CONFIABILIDADE DE PRIMEIRA ORDEM (FORM)

O Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM), do inglês *First Order Reliability Method*, estima o índice de confiabilidade a partir de uma aproximação de primeira ordem da função de estado limite. O método transforma as variáveis aleatórias para um espaço normal padrão e busca o ponto mais provável de falha. Nesse espaço, o ponto localizado sobre a superfície de falha e mais próximo da origem é denominado ponto de projeto. Conforme ilustrado na Figura 2.7, a distância entre esse ponto e a origem corresponde ao índice de confiabilidade (Haldar; Mahadevan, 2000).

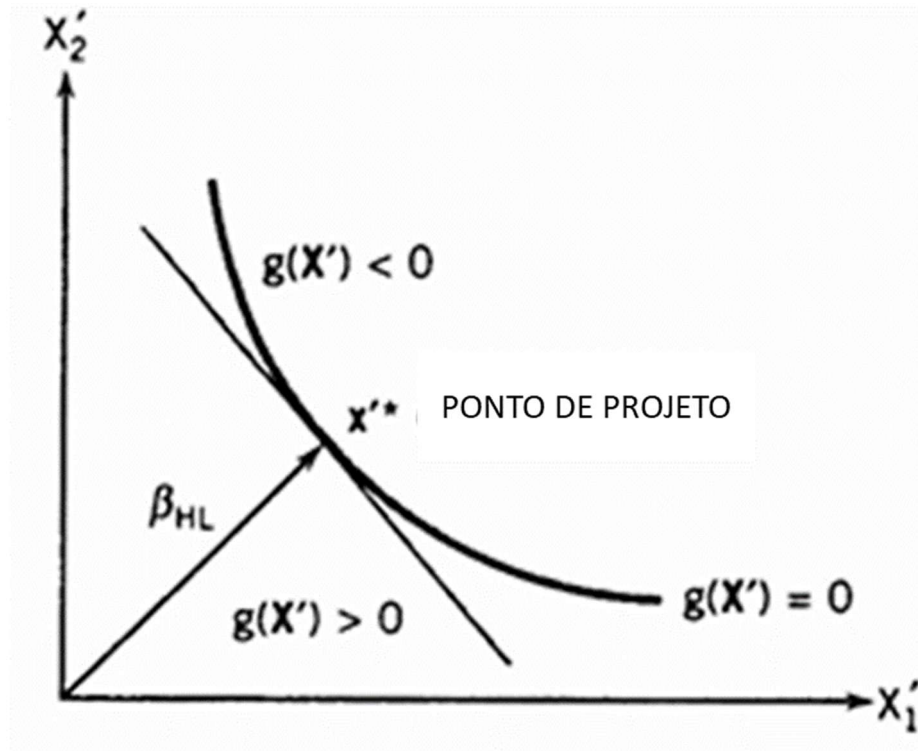


Figura 2.7: Representação esquemática do ponto de projeto e do índice de confiabilidade no FORM.

Fonte: Adaptado de Haldar e Mahadevan (2000).

O FORM também pode ser utilizado em conjunto com programas de análise estrutural, permitindo que a função de estado limite seja definida a partir da resposta obtida pelo modelo numérico. Em estruturas de perfis formados a frio, Faria, Freitas e Mapa (2024) utilizaram uma rotina desenvolvida em MATLAB acoplada ao MASTAN2 para avaliar deslocamentos em estado limite de serviço por meio desse método. Neste trabalho, essa abordagem é adotada como referência para a implementação da análise de confiabilidade, enquanto a descrição do modelo estrutural, dos pontos monitorados e da rotina computacional utilizada é apresentada na metodologia.

Além do índice de confiabilidade, o FORM permite obter fatores de importância das variáveis aleatórias. Esses fatores indicam a contribuição de cada variável no índice de confiabilidade e ajudam a identificar quais parâmetros exercem maior influência sobre o resultado (Haldar; Mahadevan, 2000). Os fatores de importância podem ser obtidos a partir dos cossenos diretores do ponto de projeto, conforme apresentado na Equação 2.7.

$$\alpha_i = \frac{u_i^*}{\beta} \quad \text{Equação 2.7}$$

em que u_i^* corresponde à coordenada da variável i no ponto de projeto no espaço normal padrão e β representa o índice de confiabilidade. Quanto maior o valor de α_i , maior é a influência dessa variável no resultado da análise. No caso de verificações de deslocamento, essa informação permite identificar se a resposta da estrutura é mais sensível às ações aplicadas, como vento e ação variável, ou a parâmetros relacionados à rigidez estrutural, como módulo de elasticidade, propriedades geométricas da seção e rigidez das ligações (Haldar; Mahadevan, 2000).

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho é apresentada de forma resumida no fluxograma da Figura 3.1. Os procedimentos realizados em cada etapa são descritos com maior detalhamento nos tópicos seguintes.

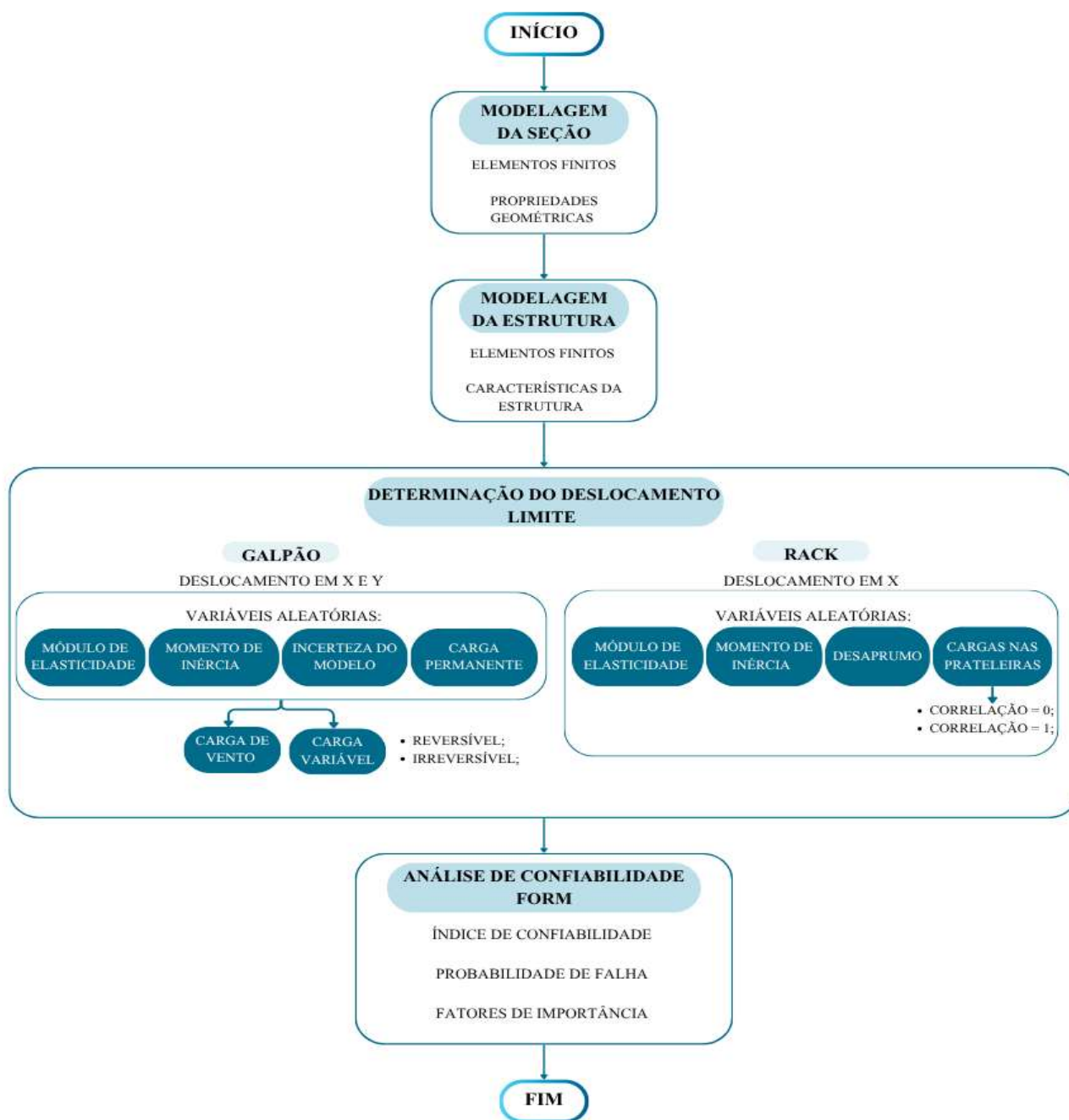


Figura 3.1: Fluxograma da metodologia de pesquisa adotada.

Fonte: Elaborado pela autora.

3.1. MODELAGEM DA SEÇÃO TRANSVERSAL

Inicialmente foram definidas as seções transversais utilizadas nas estruturas analisadas. Para o galpão foi adotada a seção utilizada por Baigent e Hancock (1982), apresentada na Figura 3.2. Para o rack foram adotadas três seções transversais distintas, correspondentes aos montantes, às longarinas e aos contraventamentos, conforme o modelo proposto por Faria, Freitas e Mapa (2024), apresentado na Figura 3.3. Esse modelo foi desenvolvido a partir da estrutura experimental estudada por Trouncer (2015), com adaptações nas propriedades dos elementos para evitar a ocorrência de instabilidades locais durante as análises em estado limite de serviço.

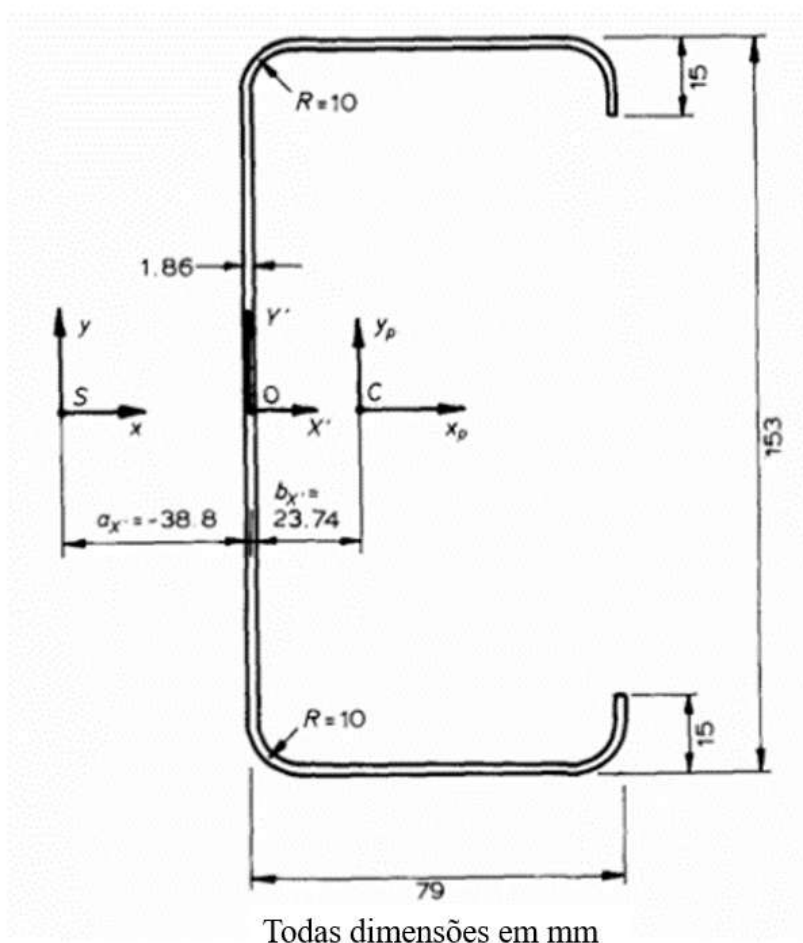
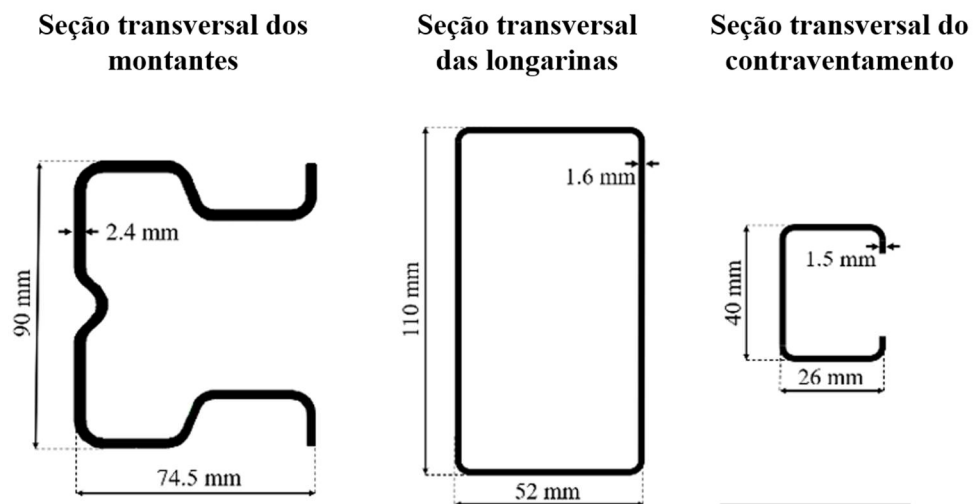


Figura 3.2: Seção transversal adotada para o galpão.

Fonte: Baigent e Hancock (1982).



(a)



(b)

Figura 3.3: (a) Fotografia da estrutura utilizada nos ensaios experimentais com visualização das três seções transversais; (b) seções transversais adotadas para o rack.

Fonte: (a) Trouncer e Rasmussen (2015); (b) adaptado de Faria, Freitas e Mapa (2024).

As geometrias das seções foram discretizadas em elementos finitos por meio de planilhas desenvolvidas no Excel. Em seguida, os dados foram importados para o programa MSASect presente no MASTAN2, o qual determinou as propriedades geométricas necessárias para as análises estruturais. Entre as propriedades obtidas estão a área da seção transversal, os momentos de inércia, a constante de torção, a constante de empenamento, o centro geométrico e o centro de cisalhamento.

No caso do rack, a seção utilizada nos montantes apresenta perfurações ao longo do seu comprimento. Sendo assim, para considerar a influência desses furos nas propriedades geométricas, foi adotada uma redução equivalente da espessura em uma faixa da seção. A Figura 3.4 apresenta a modelagem da seção do galpão e da seção dos montantes no MSASect, respectivamente, incluindo a discretização adotada para os elementos finitos e a localização dos centros geométrico e de cisalhamento utilizados posteriormente nas análises estruturais.

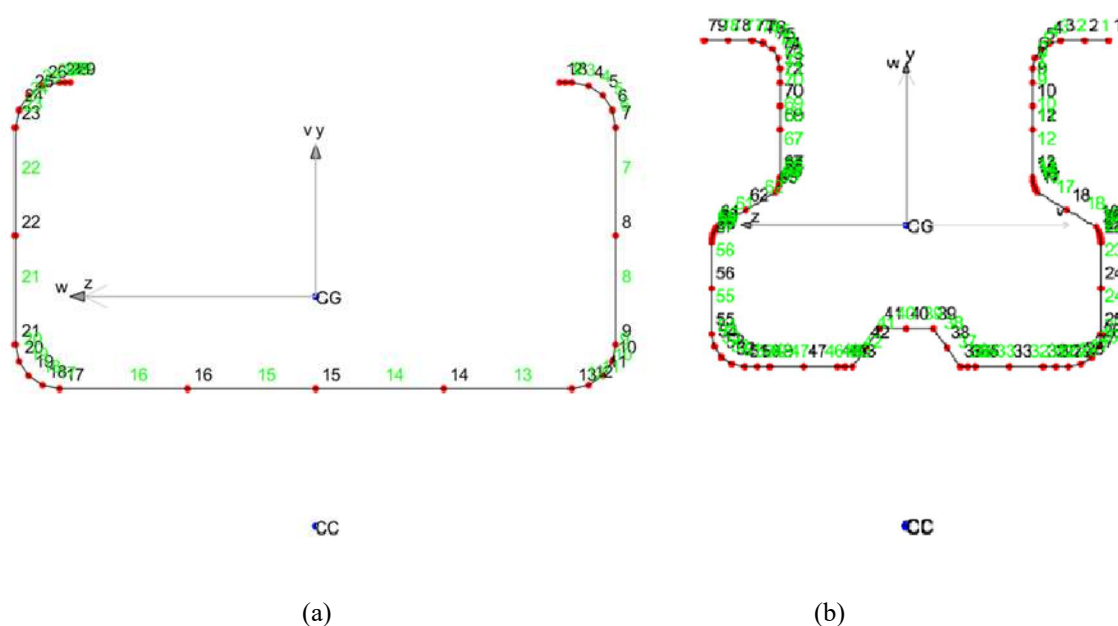


Figura 3.4: Modelagem das seções no MSASect, com indicação dos centros geométrico e de cisalhamento da seção transversal (a) do galpão e (b) dos montantes do rack.

Fonte: Elaborado pela autora.

3.2. MODELAGEM DA ESTRUTURA

Após a obtenção das propriedades geométricas das estruturas, foram construídos os modelos estruturais do galpão e do rack. Inicialmente foram definidas as coordenadas nodais, conectividades dos elementos, propriedades geométricas, condições de contorno, características das ligações e ações por meio do Excel. Depois essas informações foram incorporadas à rotina utilizada no MATLAB e os modelos gerados foram conferidos a partir da visualização no MASTAN2.

Para o galpão foi adotada a estrutura proposta por Baigent e Hancock (1982), apresentada na Figura 3.5. Para o rack foi utilizada a configuração estrutural desenvolvida por Trouncer e Rasmussen (2016), apresentada na Figura 3.6 por meio do esquema estrutural e de uma imagem da estrutura utilizada nos ensaios experimentais.

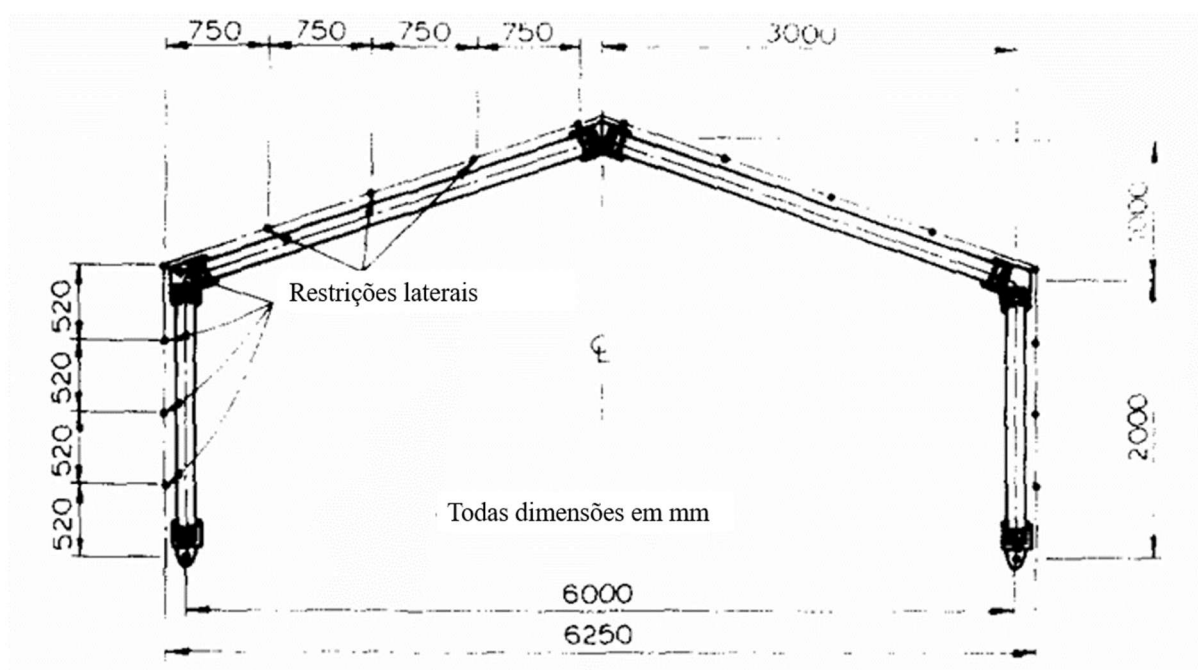
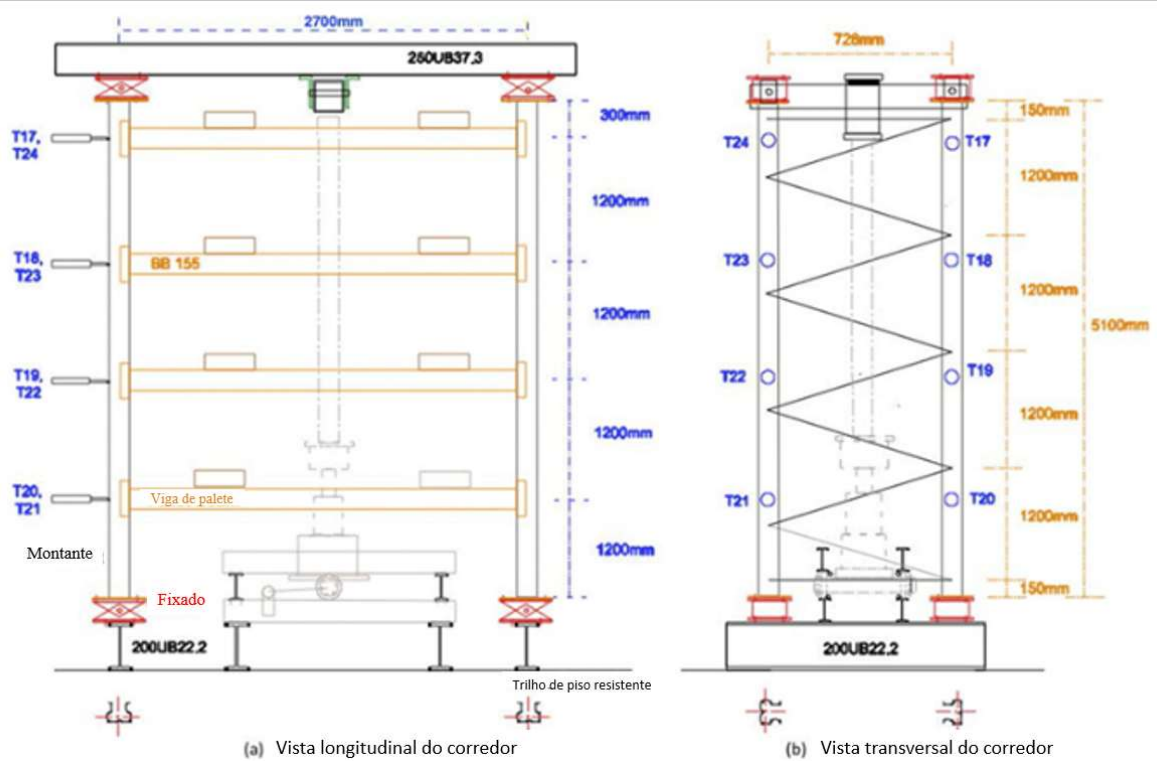


Figura 3.5: Configuração estrutural do galpão utilizado por Baigent e Hancock (1982).

Fonte: Adaptado de Baigent e Hancock (1982).



(a)



(b)

Figura 3.6: (a) Configuração estrutural do rack; (b) Fotografia da estrutura utilizada nos ensaios experimentais.

Fonte: Adaptado de Trouncer e Rasmussen (2016).

3.3. ANÁLISES DAS ESTRUTURAS

As análises de confiabilidade realizadas para o galpão e para o rack consideraram diferentes variáveis aleatórias, definidas de acordo com a estrutura analisada e com a combinação de ações avaliada. A Tabela 3.1 apresenta as variáveis adotadas, os respectivos períodos de referência, valores médios, coeficientes de variação, distribuições de probabilidade e as referências utilizadas para definição desses parâmetros. Os limites de deslocamento empregados nas análises são apresentados na Tabela 3.2, de acordo com os critérios estabelecidos pelas normas adotadas para o galpão e para o rack.

Variável aleatória	Período de referência	Média	Coeficiente de variação	Distribuição de probabilidade	Referências
Momento de inércia, I	-	I_n	0.05	Normal	(Faria; Freitas; Mapa, 2025)
Módulo de elasticidade, E	-	E_n	0.06	Lognormal	(Faria; Freitas; Mapa, 2025)
Incerteza do modelo, θ	-	1	0.05	Lognormal	(Faria; Freitas; Mapa, 2025)
Ação permanente, D	-	D_n	0.10	Normal	(Faria; Freitas; Mapa, 2025)
Desaprumo, $\Delta_{h,0}$	-	0	H/980	Normal	(Cardoso; Rasmussen; Zhang, 2019)
Rigidez da ligação semirrígida, K	-	K_n	0.16	Lognormal	(Cardoso; Rasmussen; Zhang, 2019)
Ação nas prateleiras, P	1 ano	$0.65P_n$	0.32	Gumbel	(Faria; Freitas; Mapa, 2025)
Ação variável, L (EUA)	1 ano	$0.15L_n$	0.20	Gamma	(Faria; Freitas, 2026)
Ação variável, L (EUA)	10 anos	$0.19L_n$	0.13	Gumbel	(Faria; Freitas, 2026)
Ação do vento, W (EUA)	1 ano	$0.28W_n$	0.53	Gumbel	(Faria; Freitas, 2026)
Ação do vento, W (EUA)	10 anos	$0.51W_n$	0.44	Gumbel	(Faria; Freitas, 2026)
Ação do vento, W (BR)	1 ano	$0.39W_n$	0.37	Gumbel	(Faria; Freitas, 2026)
Ação do vento, W (BR)	10 anos	$0.59W_n$	0.33	Gumbel	(Faria; Freitas, 2026)

Tabela 3.1: Parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias adotadas nas análises de confiabilidade.

Fonte: Elaborado pela autora.

Estrutura	Deslocamento horizontal limite	Deslocamento vertical limite	Referência
Galpão (BR)	H/300	L/250	NBR 14762:2010
Galpão (EUA)	H/400	L/240	ASCE/SEI 7
Rack	H/240	-	ANSI/RMI MH16.1

Tabela 3.2: Limites de deslocamento adotados nas análises de confiabilidade.

Fonte: Elaborado pela autora.

As análises de confiabilidade foram realizadas por meio do Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM). Em todas as simulações foi adotada tolerância de convergência igual a 1×10^{-3} . Para o cálculo dos gradientes pelo Método das Diferenças Finitas também foi utilizada perturbação relativa igual a 1×10^{-3} para o galpão e igual a 5×10^{-3} para o rack.

3.3.1. GALPÃO

Para o galpão foram consideradas como variáveis aleatórias a incerteza de modelo (θ), o módulo de elasticidade (E), o maior momento de inércia, a ação permanente (D) e a ação correspondente a cada combinação de ação analisada. Os parâmetros estatísticos adotados para essas variáveis são apresentados na Tabela 3.1. O valor nominal da ação permanente foi variado entre 0,25 kN/m e 0,50 kN/m, com incrementos de 0,05 kN/m. Para cada valor de ação permanente foi determinado, por meio da rotina utilizada, o valor da ação do vento ou da ação variável necessário para que a estrutura atingisse o deslocamento limite e, em seguida, foi realizada a análise de confiabilidade pelo FORM.

Foram analisadas duas combinações de carregamento: ação do vento e ação permanente e ação variável e ação permanente. Para a combinação entre vento e ação permanente foram realizadas análises segundo a ABNT NBR 8800:2024 e a ASCE/SEI 7, considerando os casos reversível e irreversível para os deslocamentos horizontal e vertical. O deslocamento horizontal foi monitorado no nó 29 e o deslocamento vertical no nó 20. Para a norma brasileira foram

adotados deslocamentos limites de 6,67 mm na direção horizontal e 24 mm na direção vertical, enquanto para a norma americana foram adotados os valores de 5,00 mm e 25 mm, respectivamente. Para a combinação entre ação variável e ação permanente foram considerados apenas os critérios da ASCE/SEI 7, também para os casos reversível e irreversível, porém avaliando somente o deslocamento vertical de 25 mm. Os limites de deslocamento adotados em cada situação são apresentados na Tabela 3.2.

3.3.1.1. AÇÃO DO VENTO E PERMANENTE

Inicialmente foram realizadas análises considerando a combinação entre ação permanente e ação do vento para os casos reversível e irreversível. A Figura 3.7 apresenta o modelo do galpão utilizado nessas análises, incluindo os elementos estruturais, as ações aplicadas, as condições de apoio, as ligações e os nós monitorados.

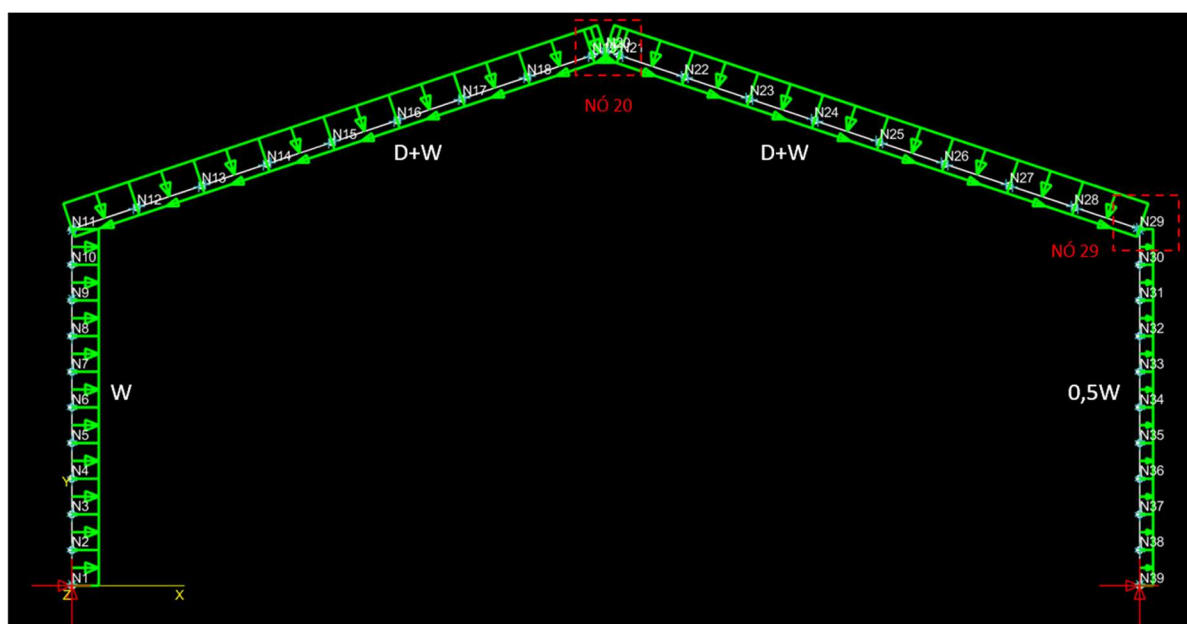


Figura 3.7: Modelo do galpão utilizado nas análises com ação do vento.

Fonte: Elaborado pela autora.

3Foram utilizadas as estatísticas correspondentes ao período de referência de um ano para os casos reversíveis e de dez anos para os casos irreversíveis. Nas análises realizadas segundo a ABNT NBR 8800:2024, foi aplicado o fator de combinação 0,3 à ação do vento nos casos reversíveis, não sendo utilizado nas análises irreversíveis. Já para as análises segundo a ASCE/SEI 7, foi adotado o fator de combinação 0,7 para a ação do vento em ambos os casos.

Para cada valor de ação permanente foi determinado, o valor da ação do vento necessário para que a estrutura atingisse os deslocamentos limites horizontal e vertical. Em seguida, foi realizada a análise de confiabilidade pelo FORM, obtendo-se o índice de confiabilidade, a probabilidade de falha e os fatores de importância das variáveis aleatórias.

3.3.1.2. AÇÃO VARIÁVEL E PERMANENTE

Também foram realizadas análises considerando a combinação entre ação variável e ação permanente. A Figura 3.8 apresenta o modelo do galpão utilizado nessas análises, indicando as ações aplicadas, as condições de apoio, as ligações e os nós monitorados.

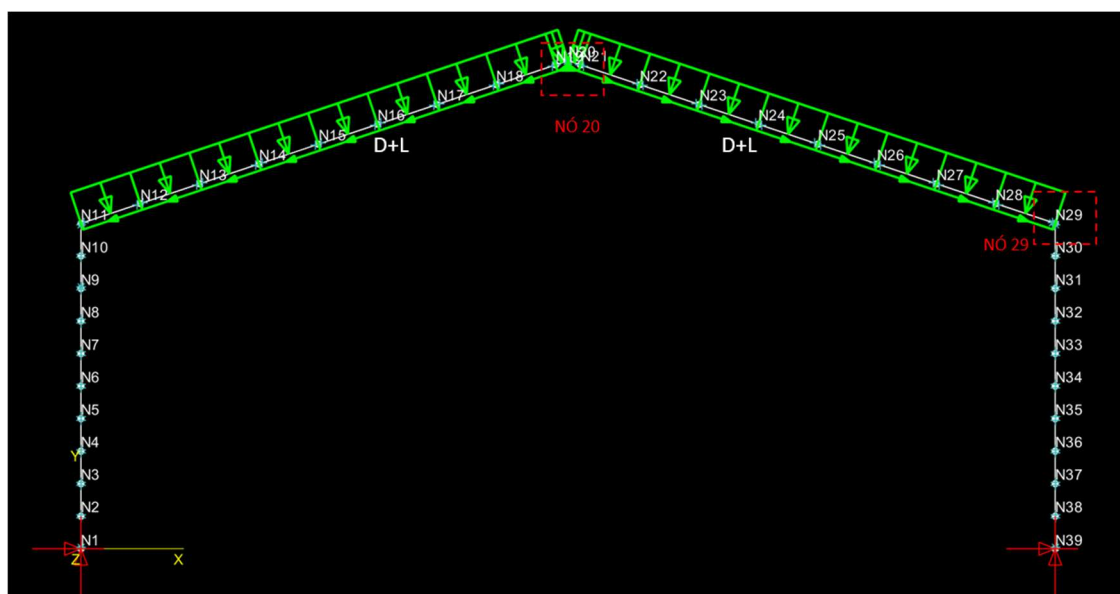


Figura 3.8: Modelo do galpão utilizado nas análises com ação variável.

Fonte: Elaborado pela autora.

Foram utilizadas as estatísticas correspondentes ao período de referência de um ano para o caso reversível e de dez anos para o caso irreversível, conforme apresentado na Tabela 3.1. Diferentemente das análises com ação do vento, não foram aplicados fatores de combinação à ação variável. Para cada valor de ação permanente foi determinado, o valor da ação variável necessário para que a estrutura atingisse o deslocamento vertical limite determinado pela norma americana. Em seguida, foi realizada a análise de confiabilidade pelo FORM, obtendo o índice de confiabilidade, a probabilidade de falha e os fatores de importância das variáveis aleatórias.

3.3.2. RACK

Para o rack foram consideradas como variáveis aleatórias a incerteza do modelo (θ), o módulo de elasticidade (E), a rigidez da ligação semirrígida das longarinas e os contraventamentos com a coluna (K), o maior momento de inércia da seção dos montantes e das longarinas, o desaprumo inicial da estrutura e as quatro cargas aplicadas nas prateleiras. Para o módulo de elasticidade e o momento de inércia foram adotadas as mesmas propriedades estatísticas utilizadas nas análises do galpão. Já o desaprumo inicial, a rigidez das ligações e as cargas aplicadas nas prateleiras foram considerados para um período de referência de um ano, utilizando os parâmetros estatísticos apresentados na Tabela 3.1.

A Figura 3.9 apresenta o modelo do rack utilizado nas análises, incluindo a discretização em elementos finitos, os carregamentos aplicados nas quatro prateleiras, as condições de apoio, o desaprumo inicial considerado e o nó 60, utilizado para o monitoramento do deslocamento horizontal. Além disso, é possível observar as ligações semirrígidas entre as longarinas e os contraventamentos com a coluna.

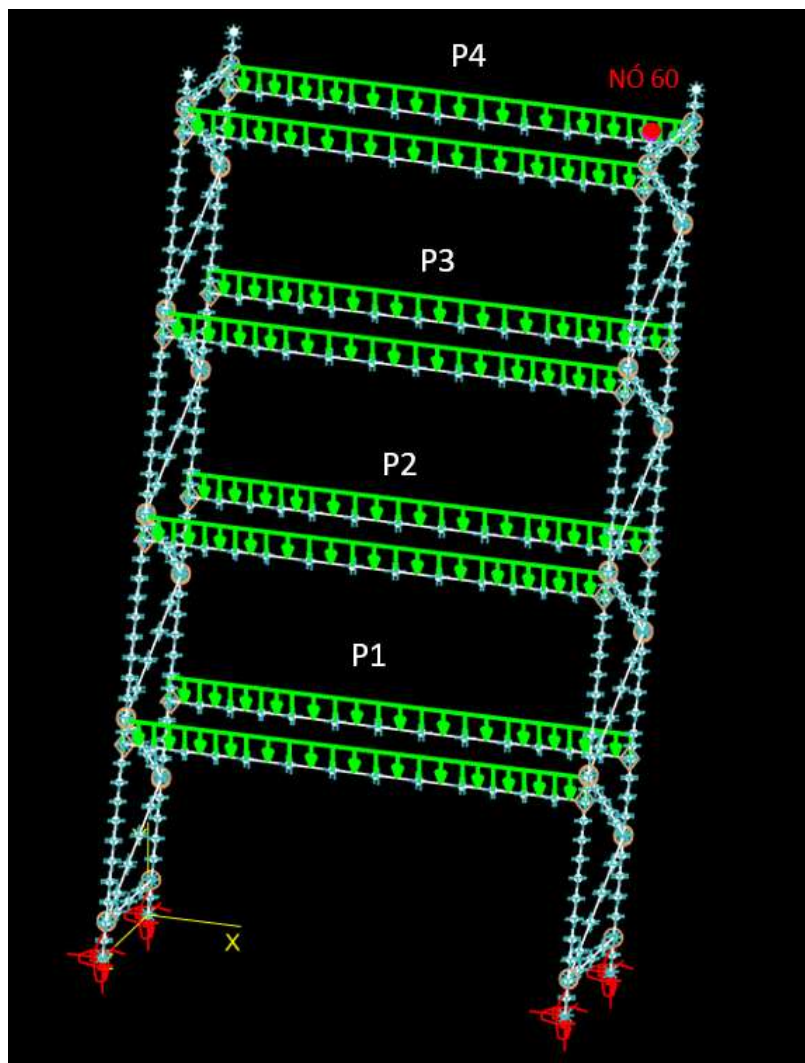


Figura 3.9: Modelo do rack utilizado nas análises de confiabilidade com nó 60 em destaque e carregamento e desaprumo aplicados.

Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com a ABNT NBR 17150:2024, o deslocamento horizontal foi monitorado no nó 60 adotando como deslocamento limite o valor de 21,67 mm, conforme apresentado na Tabela 3.1. O desaprumo inicial foi variado entre 2 mm e 10 mm, com incrementos de 2 mm. Para cada valor de desaprumo considerado, foi determinado, o valor da carga nominal aplicada nas prateleiras necessário para que o deslocamento horizontal final do nó 60, resultante da combinação entre o desaprumo inicial e os deslocamentos provocados pelas cargas fosse igual ao deslocamento limite.

Foram avaliadas duas situações para a correlação entre as cargas aplicadas nas prateleiras. Na primeira, foi adotada correlação igual a 0, considerando as quatro cargas estatisticamente independentes. Na segunda, foi adotada correlação igual a 1, considerando as quatro cargas totalmente dependentes entre si. Esses dois casos representam as situações extremas de independência total e dependência total entre as variáveis, sendo adotados para avaliar os limites da influência da correlação sobre os resultados de confiabilidade. Para cada uma dessas situações foi realizada a análise de confiabilidade pelo FORM pela rotina de confiabilidade desenvolvida no MATLAB.

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados das análises de confiabilidade realizadas para o galpão e para o rack, considerando os índices de confiabilidade calculados pelo FORM e os fatores de importância das variáveis aleatórias.

4.1. GALPÃO

Os resultados das análises de confiabilidade do galpão são apresentados para as combinações entre a ação do vento e a carga permanente e entre a ação variável e a carga permanente. Para cada situação, são apresentados os índices de confiabilidade obtidos por meio do método FORM, bem como os fatores de importância das variáveis aleatórias.

Como referência para a avaliação dos resultados, foi adotado o índice de confiabilidade alvo $\beta_0 = 1,64$, correspondente a uma probabilidade anual de falha $P_f = 5\%$, conforme recomendado pela ASCE/SEI 7. Como o índice de confiabilidade alvo é definido para um período de referência de um ano, os índices de confiabilidade dos casos irreversíveis foram convertidos para esse período antes da comparação com o valor alvo. Dessa forma, valores de β superiores a β_0 indicam que a estrutura atende ao nível de confiabilidade de referência para o estado limite avaliado, enquanto valores inferiores correspondem a probabilidades de falha superiores a 5%, indicando que esse nível de confiabilidade não é atendido.

4.1.1. AÇÃO DO VENTO E PERMANENTE

Os resultados das análises de confiabilidade para a combinação entre a ação do vento e a ação permanente são apresentados a seguir, considerando os deslocamentos horizontal e vertical do galpão.

4.1.1.1. DESLOCAMENTO HORIZONTAL

Foram analisados dois casos para avaliar o comportamento da estrutura em relação ao deslocamento horizontal limite estabelecido pelas normas brasileira e americana, considerando a ação conjunta da carga permanente e do vento. No primeiro caso, foi considerada a ação reversível do vento e, no segundo, a ação irreversível. Os índices de confiabilidade obtidos para cada situação são apresentados nos Gráficos 4.1 e 4.2.

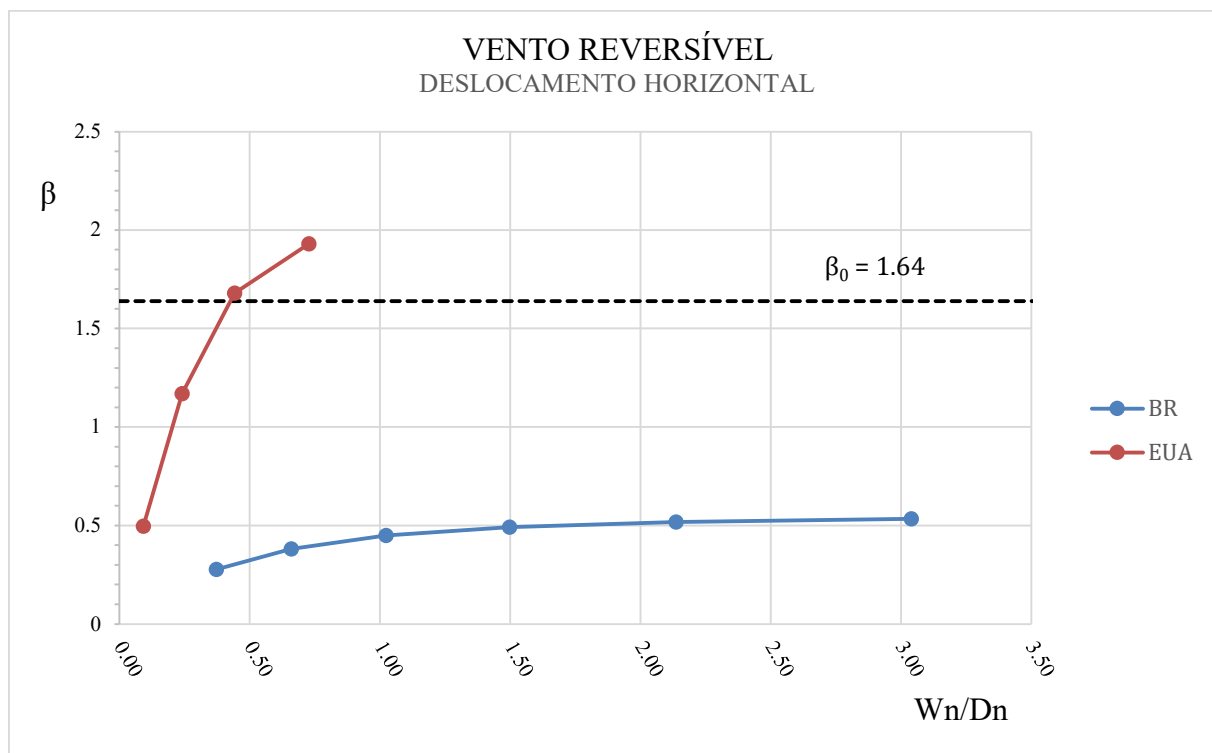


Figura 4.1: Índices de confiabilidade β em função da relação W_n/D_n para o deslocamento horizontal limite considerando a ação do vento reversível segundo a ABNT NBR 8800:2024 e a ASCE/SEI 7.

Fonte: Elaborado pela autora.

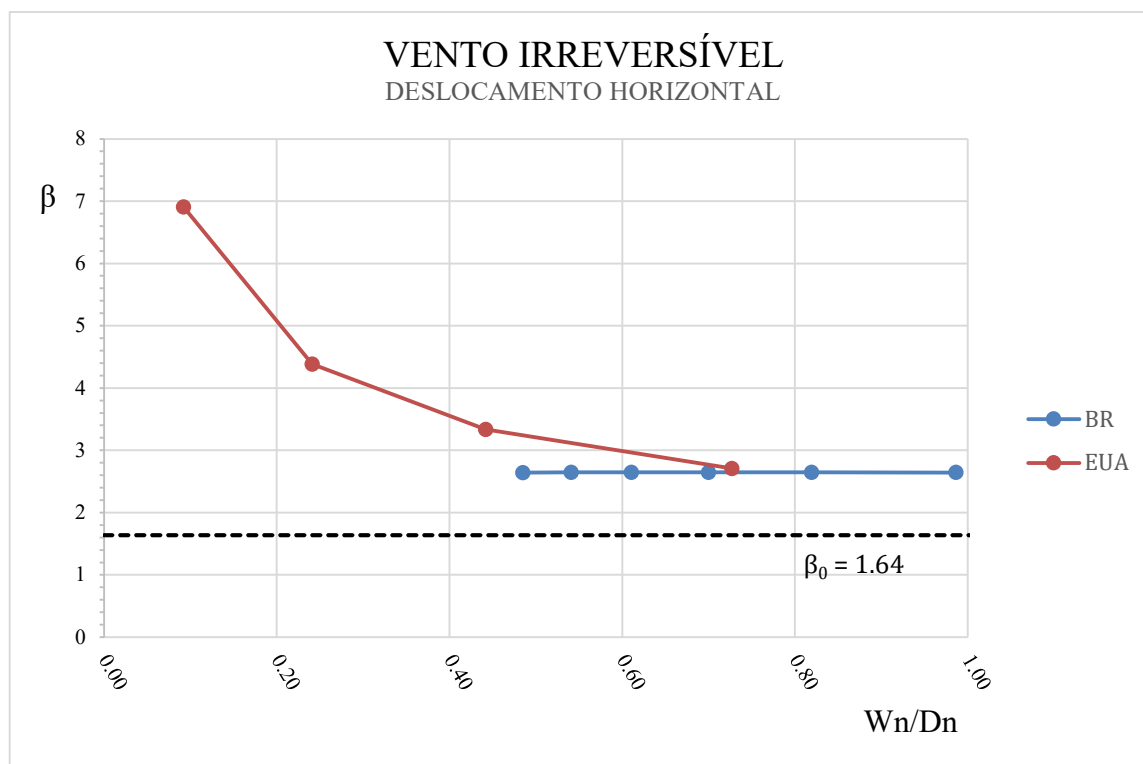


Figura 4.2: Índices de confiabilidade β em função da relação W_n/D_n para o deslocamento horizontal limite considerando a ação do vento irreversível segundo a ABNT NBR 8800:2024 e a ASCE/SEI 7.

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos gráficos foi possível observar que, para ambos os casos analisados, os índices de confiabilidade obtidos pela ASCE/SEI 7 foram consideravelmente superiores aos obtidos pela ABNT NBR 8800:2024, apresentando maior variação com a alteração da relação W_n/D_n . No caso da ação de vento irreversível, foi observado um decréscimo dos índices de confiabilidade com o aumento da relação W_n/D_n , enquanto para a ação de vento reversível ocorreu um aumento desses índices. Já os resultados obtidos pela ABNT NBR 8800:2024 apresentaram aumento do índice de confiabilidade com o aumento da relação W_n/D_n tanto para o vento reversível quanto para o irreversível, porém com uma variação bastante sutil.

Em comparação com o índice de confiabilidade alvo (β_0), se verifica no caso reversível que todos os valores obtidos pela norma brasileira se mantiveram abaixo desse limite, indicando uma probabilidade anual de falha superior a 5%. Já para a ASCE/SEI 7, apenas os índices de confiabilidade relacionados às maiores relações de W_n/D_n permaneceram superiores ao β_0 analisado. Já para a ação de vento irreversível, verificou-se que todos os índices de

confiabilidade calculados para ambas as normas foram superiores ao índice de confiabilidade alvo analisado. **COMO EXPLICAR A INCLINAÇÃO E OS VALORES MUITO MAIORES DA AMERICANA?**

Nota-se também que nos dois gráficos, a curva correspondente aos valores analisados segundo a ASCE/SEI 7 apresenta menor número de pontos quando comparado à ABNT NBR 8800:2024. Isso ocorre porque para as ações permanentes de 0,45 kN/m e 0,50 kN/m, somente a ação da carga permanente já era suficiente para produzir deslocamentos superiores ao limite horizontal estabelecido pela norma americana. Dessa forma, não foi possível determinar um valor de ação do vento que levasse a estrutura ao deslocamento limite, por conta disso, essas combinações não foram incluídas na análise.

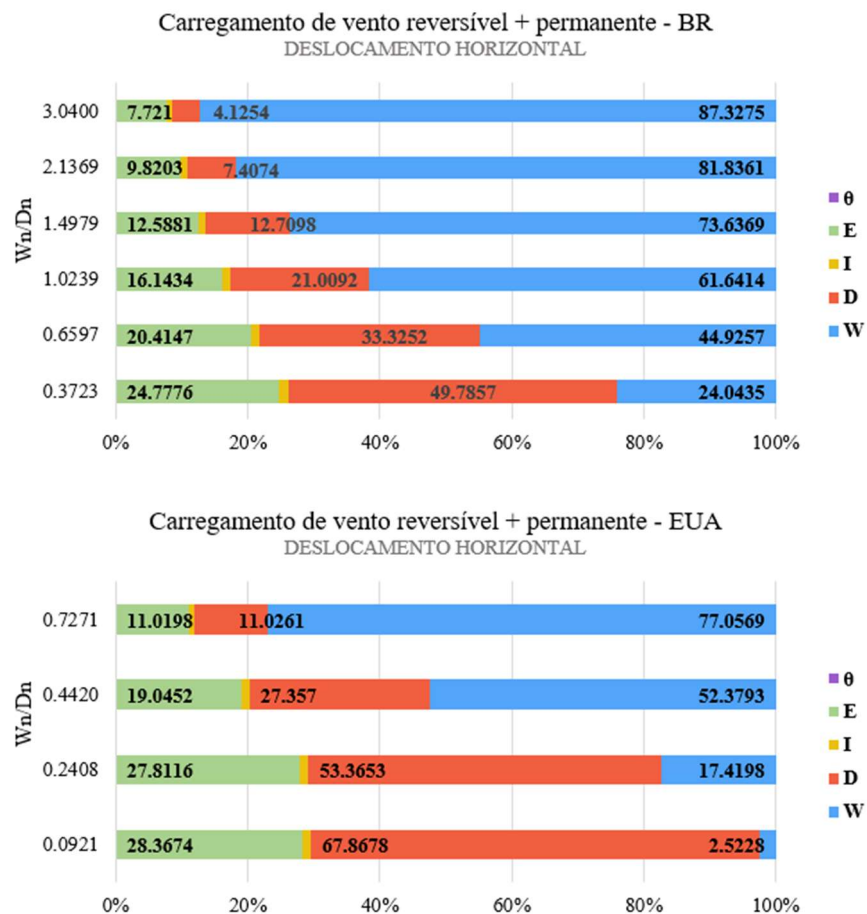


Figura 4.1: Fatores de importância das variáveis aleatórias para o deslocamento horizontal segundo a ABNT NBR 8800:2024 e a ASCE/SEI 7 para o caso do vento reversível.

Fonte: Elaborado pela autora.

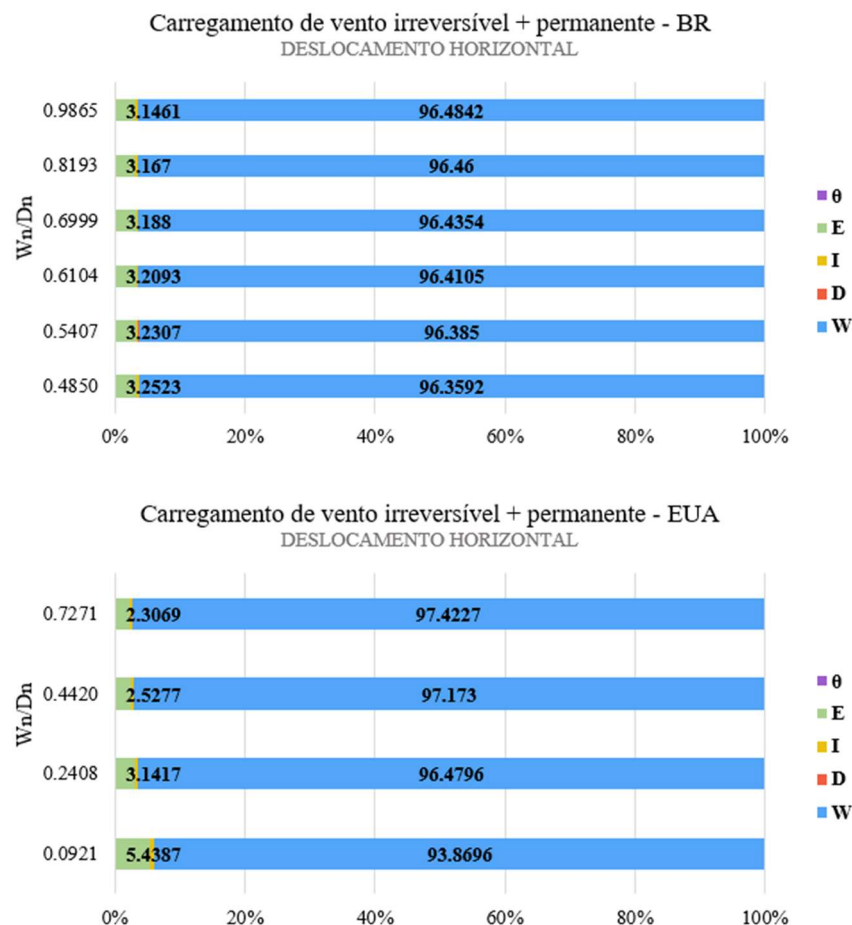


Figura 4.2: Fatores de importância das variáveis aleatórias para o deslocamento horizontal segundo a ABNT NBR 8800:2024 e a ASCE/SEI 7 para o caso do vento irreversível.

Fonte: Elaborado pela autora.

Os fatores de importância obtidos nas análises são apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2. Observa-se que, nos casos reversíveis, a importância da ação do vento aumenta à medida que a relação W_n/D_n aumenta. Em contrapartida, a importância da ação permanente e do módulo de elasticidade diminui. Para todos os casos analisados, o momento de inércia e a incerteza de modelo apresentaram uma influência pouco significativa na resposta da estrutura.

Nos casos irreversíveis, observa-se comportamento diferente. A importância da ação do vento permanece praticamente constante durante toda a análise, mantendo-se próxima de 96% para ambas as normas. Assim, a contribuição das demais variáveis para a função de estado

limite é menor, fazendo com que os índices de confiabilidade sejam influenciados principalmente pelas propriedades estatísticas da ação do vento.

De maneira geral, identifica-se que as análises realizadas utilizando os parâmetros da ABNT NBR 8800:2024 resultaram em menores índices de confiabilidade quando comparadas às realizadas segundo a ASCE/SEI 7, principalmente no caso reversível por conta da redução causada pelo fator de combinação de 0,3 sugerido pela norma. Dessa forma, para as condições avaliadas neste trabalho, a ABNT NBR 8800:2024 apresentou comportamento mais conservador que a ASCE/SEI 7 para o estado limite de deslocamento horizontal, mesmo adotando um limite de deslocamento horizontal superior ao especificado pela norma americana.

4.1.1.2. DESLOCAMENTO VERTICAL

Também foram realizadas análises para avaliar o comportamento da estrutura em relação ao deslocamento vertical limite estabelecido pelas normas brasileira e americana, considerando a combinação entre a ação permanente e a ação do vento para os casos reversível e irreversível. Os índices de confiabilidade resultantes do estudo são apresentados nos Gráfico 4.3 e 4.4.

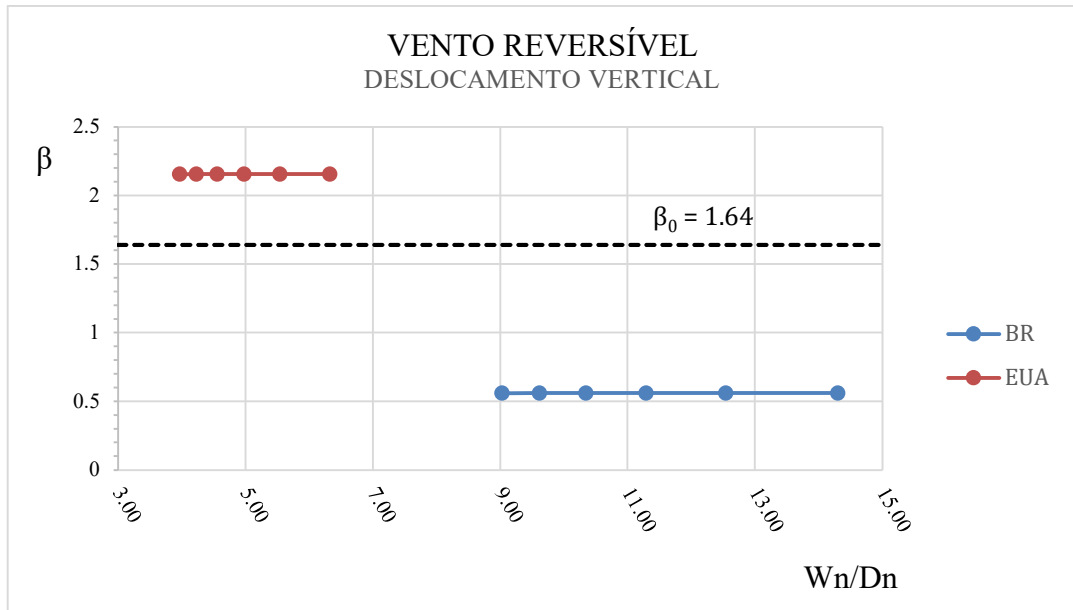


Gráfico 4.3: Índices de confiabilidade β em função da relação W_n/D_n para o deslocamento vertical limite considerando a ação do vento reversível segundo a ABNT NBR 8800:2024 e a ASCE/SEI 7.

Fonte: Elaborado pela autora.

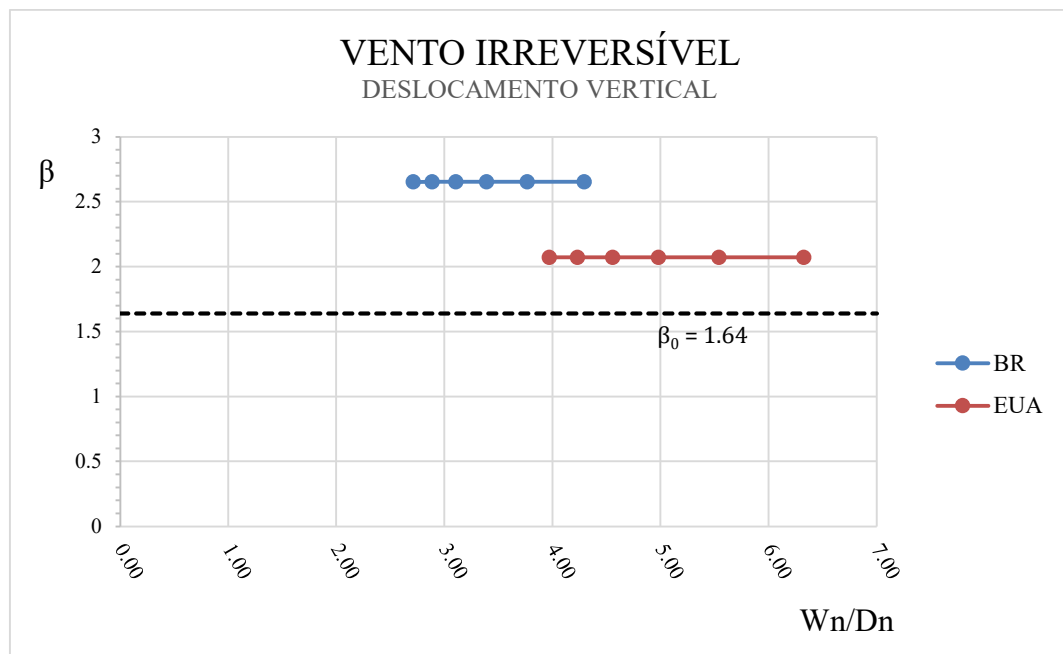


Gráfico 4.4: Índices de confiabilidade β em função da relação W_n/D_n para o deslocamento vertical limite considerando a ação do vento irreversível segundo a ABNT NBR 8800:2024 e a ASCE/SEI 7.

Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que os índices de confiabilidade permanecem praticamente constantes para ambas as normas ao longo de toda a faixa de relações W_n/D_n analisada. Comparando os resultados com o índice de confiabilidade alvo $\beta_0 = 1,64$ para o caso da ação do vento reversível, verifica-se que todos os valores alcançados segundo a ASCE/SEI 7 permanecem acima desse limite, enquanto os resultados obtidos segundo a ABNT NBR 8800:2024 permanecem abaixo durante toda a análise. No caso irreversível, se nota que os valores de β permanecem praticamente constantes e superiores a β_0 , tanto para a ABNT NBR 8800:2024, quanto para a ASCE/SEI 7, indicando que a probabilidade anual de falha permanece superior a 5% durante toda a faixa analisada. Além disso, é possível perceber uma constância entre os valores de índice de confiabilidade obtidos para a norma americana nos casos reversível e irreversível.

Comparando os dois casos, o aumento dos valores do índice de confiabilidade obtidos para a ação do vento reversível e irreversível regida pela norma brasileira. Essa diferença pode ser explicada pelo fator de combinação adotado pela NBR 8800:2024 no caso do vento reversível de 0,3 que causa uma diminuição no valor do β quando comparado com o vento irreversível que, segundo a norma, não possui esse fator aplicado.

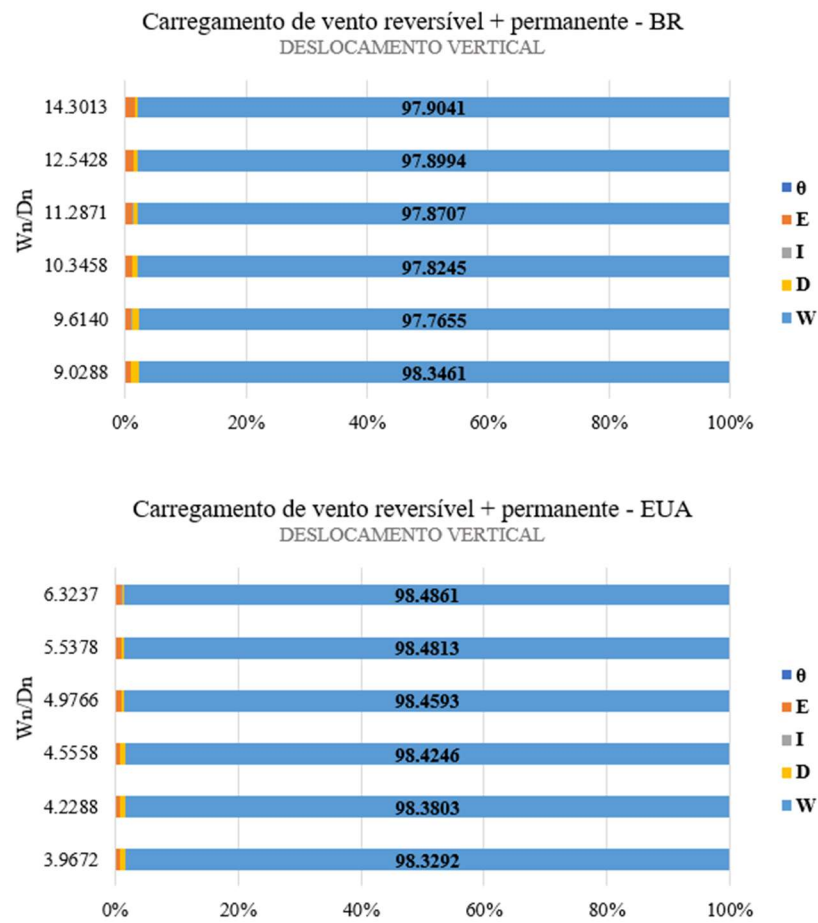


Figura 4.3: Fatores de importância das variáveis aleatórias para o deslocamento vertical segundo a ABNT NBR 8800:2024 e a ASCE/SEI 7 para o vento reversível.

Fonte: Elaborado pela autora.

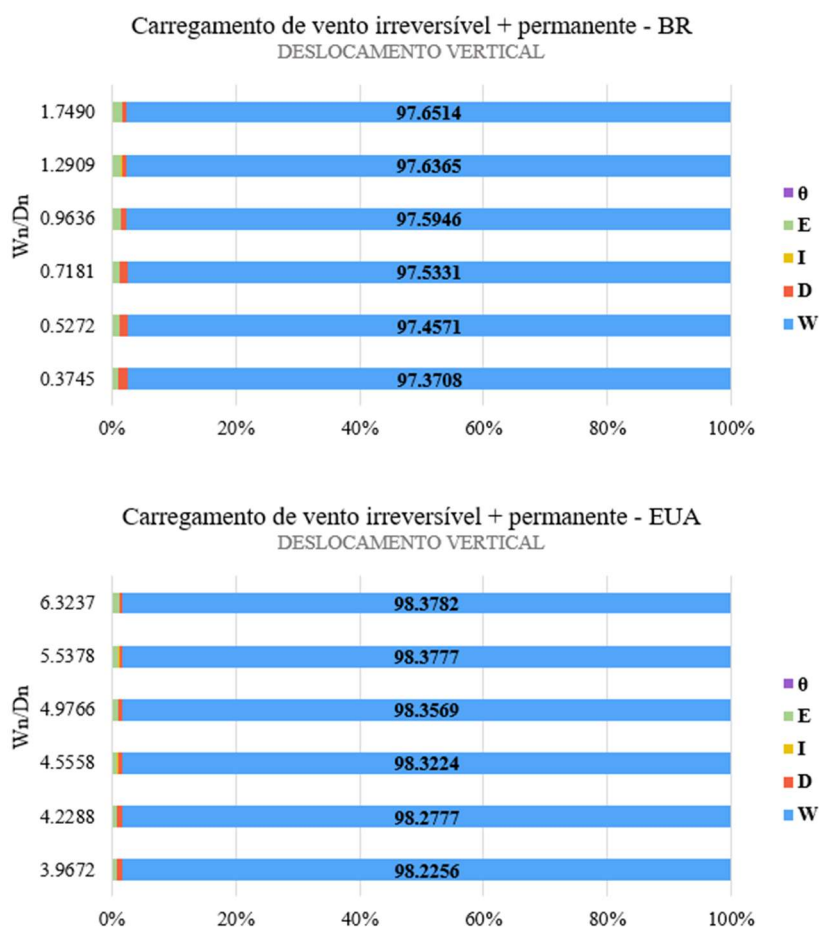


Figura 4.4: Fatores de importância das variáveis aleatórias para o deslocamento vertical segundo a ABNT NBR 8800:2024 e a ASCE/SEI 7 para o vento irreversível.

Fonte: Elaborado pela autora.

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam os fatores de importância das variáveis aleatórias para o deslocamento vertical. Diferentemente do observado para o deslocamento horizontal, a ação do vento permanece como a variável predominante durante toda a análise, tanto para os casos reversíveis quanto para os irreversíveis. Em ambas as normas, sua importância permanece próxima de 98%, enquanto a carga permanente, o módulo de elasticidade, o momento de inércia e a incerteza de modelo apresentam influência pouco significativa na resposta da estrutura.

De maneira geral, verifica-se que as duas normas apresentaram comportamentos distintos para o deslocamento vertical. No caso reversível, a ASCE/SEI 7 resultou em índices de confiabilidade superiores aos calculados pela ABNT NBR 8800:2024. Já no caso

irreversível, ocorreu o comportamento oposto, com a ABNT NBR 8800:2024 apresentando índices de confiabilidade superiores aos da norma americana. Dessa forma, diferentemente do observado para o deslocamento horizontal, não foi possível identificar uma tendência única de maior conservadorismo entre as normas para o estado limite de deslocamento vertical.

4.1.2. AÇÃO VARIÁVEL E PERMANENTE

São apresentados os resultados das análises de confiabilidade para a combinação entre a ação variável e a ação permanente no galpão, considerando os casos reversível e irreversível para o deslocamento vertical. Os índices de confiabilidade obtidos segundo a ASCE/SEI 7 são apresentados para ambas as situações analisadas no Gráfico 4.5.

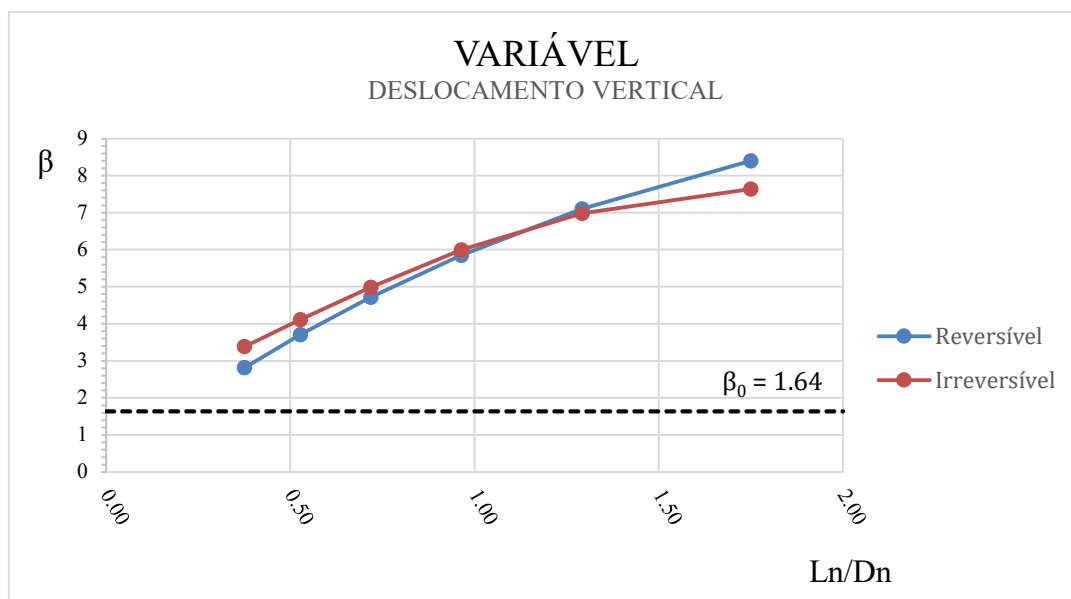


Gráfico 4.5: Índices de confiabilidade β em função da relação $\ln/D_n$ para o deslocamento vertical limite considerando a ação variável reversível e irreversível.

Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que, para os dois casos analisados, os índices de confiabilidade aumentam com o crescimento da relação L_n/D_n . Comparando os resultados com o índice de confiabilidade alvo $\beta_0 = 1,64$, verifica-se que todos os valores obtidos permaneceram acima desse limite, indicando probabilidade anual de falha inferior a 5%. Comparando os casos reversível e irreversível, observa-se que os índices de confiabilidade obtidos para o caso irreversível são ligeiramente superiores aos do caso reversível ao longo de praticamente toda a faixa analisada, sendo inferior somente para a maior relação de L_n/D_n .

Observa-se ainda que as curvas apresentam comportamento praticamente linear. Isso ocorre porque a ação variável e a carga permanente atuam na mesma direção, produzindo efeitos semelhantes sobre a resposta estrutural. Assim, para que seja atingido o deslocamento vertical limite, o aumento de uma dessas ações é acompanhado por uma redução proporcional da outra, mantendo praticamente o mesmo efeito na estrutura. Dessa forma, a relação L_n/D_n varia de maneira aproximadamente linear, o que também se reflete no comportamento dos índices de confiabilidade.

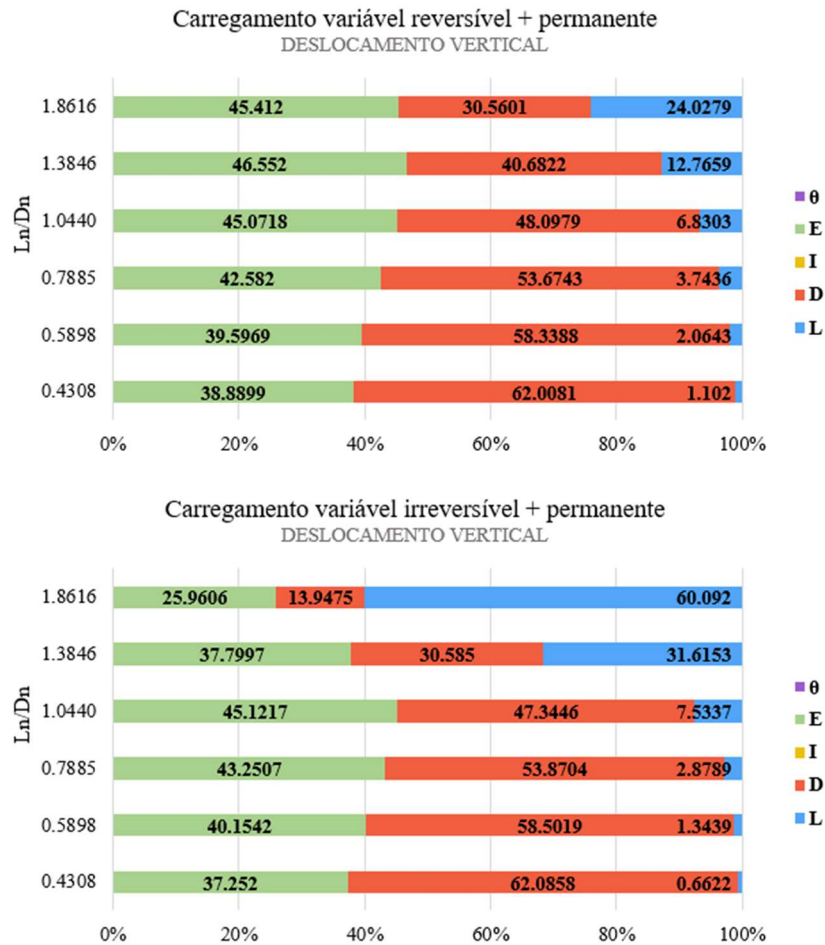


Figura 4.5: Fatores de importância das variáveis aleatórias para o deslocamento vertical segundo a ABNT NBR 8800:2024 e a ASCE/SEI 7.

Fonte: Elaborado pela autora.

Os fatores de importância correspondentes à combinação entre ação variável e carga permanente são apresentados na Figura 4.5. Observa-se que, tanto para o caso reversível quanto para o irreversível, a importância da ação variável aumenta com o crescimento da relação Ln/Dn . A importância da carga permanente apresentou valor máximo para valores intermediários da relação entre as ações variável e permanente com redução nos valores extremos, enquanto o módulo de elasticidade apresenta redução da sua influência com o aumento da relação de Ln/Dn . O momento de inércia e a incerteza de modelo permaneceram com influência pouco significativa durante toda a análise.

4.2. RACK

Os resultados das análises de confiabilidade realizadas para o rack considerando as cargas aplicadas nas prateleiras totalmente dependente e totalmente independente segundo as diretrizes da ASCE/SEI 7 são apresentadas no Gráfico 4.6.

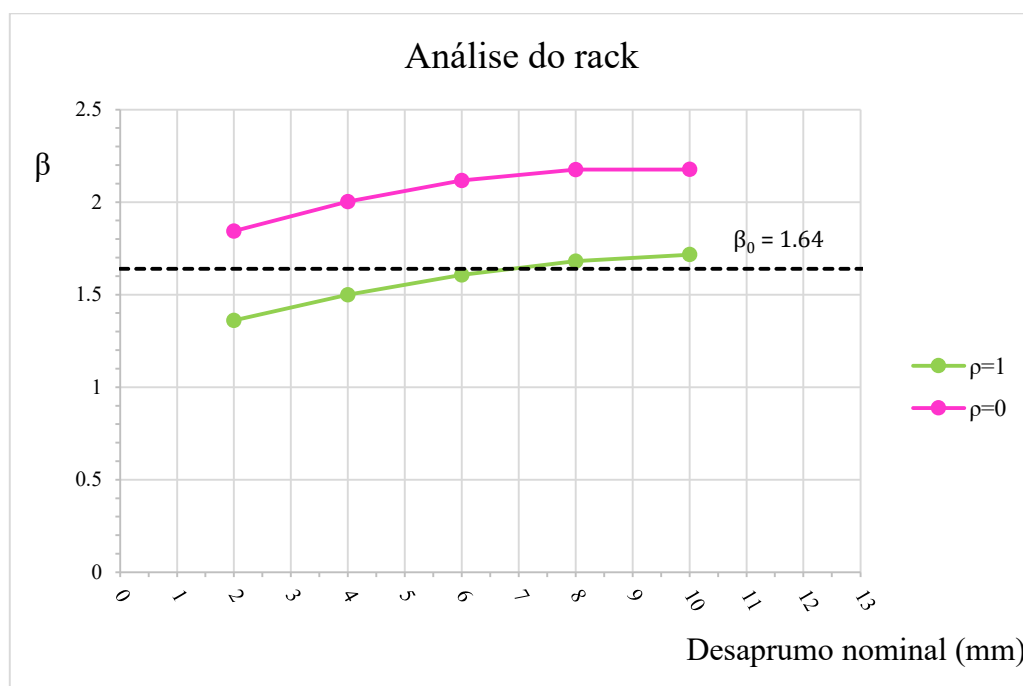


Gráfico 4.6: Índices de confiabilidade β em função do desaprumo para as cargas aplicadas nas prateleiras completamente correlacionadas e não correlacionadas.

Fonte: Elaborado pela autora.

Nota-se, a partir do gráfico apresentado, que a confiabilidade da estrutura para o caso em que as cargas aplicadas nas prateleiras são independentes é superior à obtida quando essas cargas apresentam 100% de correlação. Além disso, observa-se que os índices de confiabilidade aumentam com o aumento do desaprumo inicial. Isso ocorre porque maiores desaprumos intensificam os efeitos de segunda ordem, fazendo com que a estrutura atinja o deslocamento limite com cargas menores. Como essas cargas são utilizadas na análise de confiabilidade,

obtêm-se índices de confiabilidade mais elevados para maiores valores de desaprumo. Comparando os resultados com o índice de confiabilidade alvo ($\beta_0 = 1,64$), verifica-se que, para $\rho = 0$, todos os desaprumos analisados apresentaram índices superiores ao recomendado. Para $\rho = 1$, essa condição foi atendida apenas para os desaprumos de 8 e 10 mm.

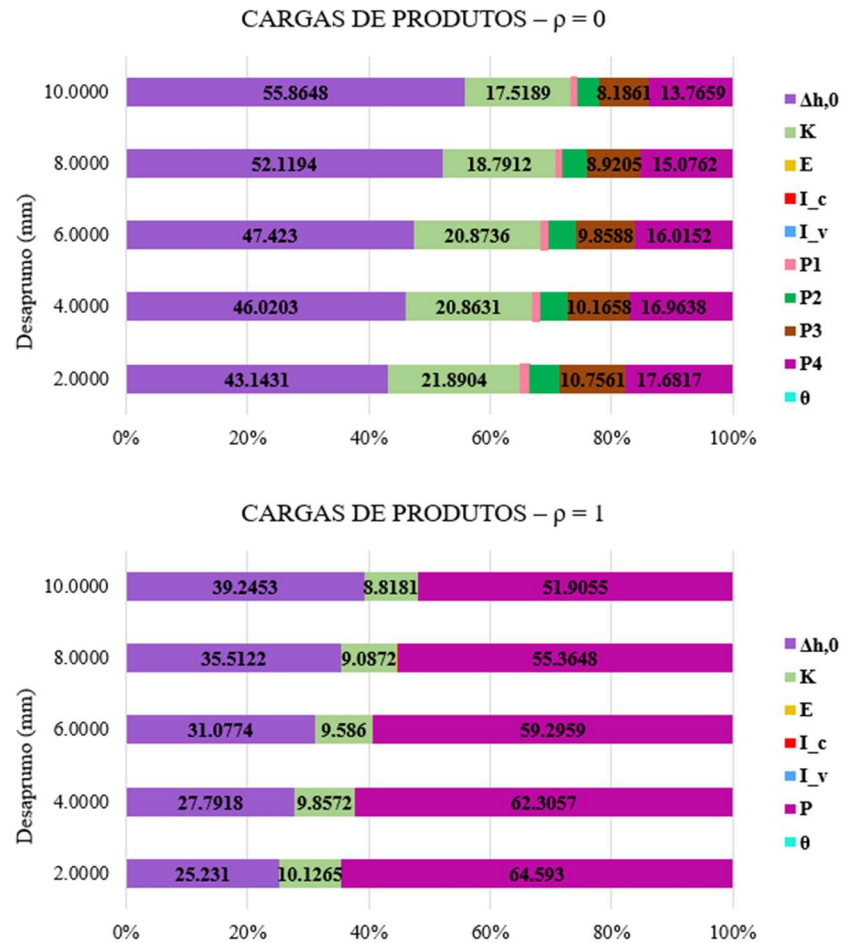


Figura 4.6: Fatores de importância das variáveis aleatórias para o deslocamento vertical segundo a ABNT NBR 8800:2024 e a ASCE/SEI 7.

Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação aos fatores de importância das variáveis aleatórias apresentados na Figura 4.6, observa-se que em ambos os casos, a influência do desaprumo aumenta à medida que seu valor cresce. Para a situação sem correlação entre as cargas aplicadas nas prateleiras, também se

destaca a influência da rigidez das ligações semirrígidas e das cargas P3 e P4, aplicadas nas longarinas mais altas da estrutura, comportamento que pode ser explicado pelos efeitos de segunda ordem. As cargas P1 e P2, aplicadas nas longarinas mais próximas da base, também influenciam o índice de confiabilidade, porém com participação menor em comparação às demais variáveis. Já o módulo de elasticidade, os momentos de inércia da viga e da coluna e a incerteza do modelo apresentaram influência pouco significativa nos resultados.

Para a situação com correlação completa entre as cargas aplicadas nas prateleiras, verifica-se que, à medida que o desaprumo aumenta, a importância das cargas aplicadas nas longarinas diminui, embora elas permaneçam relevantes em todas as análises. A rigidez das ligações semirrígidas presentes na união das longarinas e os contraventamentos com as colunas manteve importância praticamente constante, com valor em torno de 9,8%. Assim como no caso de $\rho = 0$, o módulo de elasticidade, os momentos de inércia das colunas e das longarinas e a incerteza do modelo não apresentaram influência significativa no índice de confiabilidade. Dessa forma, para análises semelhantes, essas variáveis podem ser consideradas determinísticas, reduzindo o custo computacional das análises de confiabilidade sem comprometer de forma relevante os resultados.

5. CONCLUSÃO

Para o galpão metálico, verificou-se que a confiabilidade da estrutura depende da combinação de ações considerada e dos parâmetros estatísticos adotados para as variáveis aleatórias. Nas análises envolvendo a ação do vento, observou-se que, para o deslocamento horizontal, a ABNT NBR 8800:2024 apresentou índices de confiabilidade inferiores aos obtidos pela ASCE/SEI 7, caracterizando um comportamento mais conservador para as condições analisadas. Foi observado que, para a ação de vento reversível, apenas os casos com maiores relações W_n/D_n da norma americana apresentaram índices de confiabilidade superiores ao valor alvo adotado neste trabalho, enquanto todos os demais permaneceram abaixo desse limite. Para a ação de vento irreversível, todos os índices de confiabilidade obtidos foram superiores ao valor alvo.

Para esses casos foram analisados menos pontos, uma vez que para as ações permanentes de 0,45 kN/m e 0,50 kN/m, somente a ação da carga permanente já foi suficiente para produzir deslocamentos superiores ao limite horizontal estabelecido pela norma americana. Dessa forma, não foi possível determinar um valor de ação do vento que levasse a estrutura ao deslocamento limite, por conta disso, essas combinações não foram incluídas na análise.

Foi observada uma variação proporcional entre o aumento da importância da ação do vento reversível e o aumento da relação W_n/D_n , acompanhada da diminuição gradual da importância da carga permanente. O módulo de elasticidade apresentou participação complementar, completando a importância total das variáveis, sem apresentar uma tendência própria de aumento ou redução. Já para o vento irreversível, verificou-se que, em toda a faixa analisada, tanto para a norma brasileira quanto para a americana, a ação do vento apresentou influência predominante, com importância de aproximadamente 96%.

Para o deslocamento vertical, a norma brasileira apresentou índices de confiabilidade inferiores no caso reversível e superiores no caso irreversível. Na análise com vento reversível, os valores obtidos a partir da ABNT NBR 8800:2024 permaneceram abaixo do índice de confiabilidade alvo em toda a faixa analisada, enquanto a ASCE/SEI 7 apresentou valores superiores. Para o vento irreversível, ambas as normas apresentaram índices acima do valor alvo. Em relação aos fatores de importância, observou-se um comportamento praticamente

constante em todas as análises, com predominância da ação do vento, cuja contribuição foi de aproximadamente 98%.

Nas análises envolvendo a ação variável e a carga permanente para o deslocamento vertical limite, todos os índices de confiabilidade permaneceram acima do valor alvo adotado, indicando atendimento ao nível de confiabilidade estabelecido para o estado limite de serviço, e apresentando valores próximos para os casos de ação variável reversível e irreversível. Também foi observado o aumento da importância da ação variável com o crescimento da relação entre a ação variável e a carga permanente, acompanhado pela redução da influência da carga permanente. Além disso, verificou-se participação significativa do módulo de elasticidade nessas análises.

Em todas as análises realizadas para o galpão metálico, observou-se pouca influência da incerteza do modelo e do momento de inércia da seção transversal sobre os índices de confiabilidade. Dessa forma, para as condições avaliadas neste trabalho, essas variáveis podem ser consideradas determinísticas em análises futuras, reduzindo o número de variáveis aleatórias sem comprometer significativamente os resultados de confiabilidade.

Para o rack, verificou-se que a confiabilidade da estrutura foi influenciada pelo desaprumo inicial e pelas análises de correlação entre as cargas aplicadas nas longarinas. Para o caso de cargas estatisticamente independentes, o estudo resultou em índices de confiabilidade superiores aos obtidos para a situação em que as cargas tinham correlação completa. Além disso, observou-se que os índices de confiabilidade aumentaram com o crescimento do desaprumo inicial. Em relação ao índice de confiabilidade alvo ($\beta_0 = 1,64$), verificou-se que, para as cargas independentes, todos os desaprumos analisados atenderam ao critério adotado, enquanto, para as cargas totalmente correlacionadas, apenas os desaprumos de 8 mm e 10 mm apresentaram índices superiores ao valor de referência.

Em relação aos fatores de importância, observou-se que a influência do desaprumo aumentou à medida que seu valor foi elevado. No caso das cargas independentes, também se destacaram a rigidez das ligações semirrígidas e as cargas aplicadas nas longarinas superiores (P3 e P4), enquanto as cargas nas longarinas inferiores apresentaram menor participação. Para a situação de correlação completa, as cargas aplicadas nas longarinas permaneceram entre as variáveis mais importantes, enquanto a influência da rigidez das ligações se manteve praticamente constante ao longo das análises. Assim como observado para o galpão metálico,

o módulo de elasticidade, os momentos de inércia das colunas e das longarinas e a incerteza do modelo apresentaram influência pouco significativa nos índices de confiabilidade.

Considerando os resultados obtidos para as estruturas analisadas, verificou-se que a metodologia adotada foi capaz de avaliar a influência das diferentes ações e das variáveis aleatórias nos índices de confiabilidade. Para o galpão metálico, as análises possibilitaram comparar os resultados obtidos a partir das recomendações da ABNT NBR 8800:2024 e da ASCE/SEI 7 para as combinações da ação permanente com as ações variável e de vento, considerando os casos reversível e irreversível, além de identificar as variáveis com maior influência na confiabilidade em cada situação analisada. Para o rack, as análises permitiram avaliar a influência do desaprumo inicial e da correlação entre as cargas aplicadas nas prateleiras, bem como identificar as variáveis com maior influência em cada situação analisada.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 8681: ações e segurança nas estruturas: procedimento.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2025.

ABNT. **NBR 14762: dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010.

ABNT. **NBR 6355: perfis estruturais de aço formados a frio: padronização.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.

ABNT. **NBR 8800: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024.

ABNT. **NBR 17150-1: sistemas de armazenagem: estrutura de armazenagem estática tipo porta-paletes: parte 1: requisitos para projeto estrutural.** Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ALLEN, D. History of cold formed steel. **Structure Magazine**, p. 28-32, nov. 2006.

ANG, A. H-S.; TANG, W. H. **Probability concepts in engineering: emphasis on applications to civil and environmental engineering.** 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

ASCE. **Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures: ASCE/SEI 7-22.** Reston: American Society of Civil Engineers, 2022.

AYYUB, B. M.; MCCUEN, R. H. **Probability, statistics, and reliability for engineers and scientists.** 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.

BAIGENT, A. H.; HANCOCK, G. J. Structural analysis of assemblages of thin-walled members. **Engineering Structures**, v. 4, n. 3, p. 207-216, 1982.

CARDOSO, F. S.; RASMUSSEN, K. J. R.; ZHANG, H. *System reliability-based criteria for the design of steel storage rack frames by advanced analysis: Part I – Statistical characterisation of system strength.* **Thin-Walled Structures**, v. 141, p. 713–724, 2019. DOI: 10.1016/j.tws.2019.03.006.

CBCA. **Manual de construção em aço: galpões para usos gerais**. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2018.

CEN. **EN 15512: steel static storage systems: adjustable pallet racking systems: principles for structural design**. Brussels: European Committee for Standardization, 2020.

FARIA, V. A. M.; FREITAS, M. S. R.; MAPA, D. L. S. System reliability analysis of cold-formed steel structures for serviceability limit states. In: **IBERO-LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 45., 2024, Maceió**. Proceedings [...]. Maceió: ABMEC, 2024.

FARIA, V. A. M.; FREITAS, M. S. R.; MAPA, D. L. S. Reliability of cold-formed steel frames for serviceability limit states using second order elastic analysis. In: **IBERO-LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 46., 2025, Vitória**. Proceedings [...]. Vitória: ABMEC, 2025.

FARIA, V. A. M.; FREITAS, M. S. R. *Variable loads acting in industrial warehouses: a review of load models and statistical parameters*. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UNCERTAINTY QUANTIFICATION AND STOCHASTIC MODELLING (UNCERTAINTIES), 7., 2026, Brasília**. *Proceedings [...]*. Brasília: ABCM, 2026.

GALAMBOS, T. V.; ELLINGWOOD, B. Serviceability limit states: deflection. **Journal of Structural Engineering**, v. 112, n. 1, p. 67-84, 1986.

GOMES, D. M.; SARMANHO, A. M. C.; SOUZA, F. T. de. Análise numérica de pilares formados a frio do tipo rack com perfurações de bordas enrijecidas. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 19, n. 1, p. 78-91, 2023. DOI: 10.5216/reec.V19i1.74342.

HALDAR, A.; MAHADEVAN, S. **Probability, reliability, and statistical methods in engineering design**. New York: John Wiley & Sons, 2000.

HANCOCK, G. J.; MURRAY, T. M.; ELLIFRITT, D. S. **Cold-formed steel structures to the AISI specification**. New York: Marcel Dekker, 2001.

LIRA, S. A.; **Análise de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações**. 2004. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

RMI. **ANSI MH16.1: design, testing, and utilization of industrial steel storage racks**. Charlotte: Rack Manufacturers Institute, 2021.

SEIXAS & FILHOS. **O que é a estrutura de aço moldada a frio e como posso usá-la?** 17 fev. 2022. Disponível em: <https://seixasefilhos.com/o-que-e-a-estrutura-de-aco-moldada-a-frio-e-como-posso-usa-la/>. Acesso em: 2 jun. 2026.

SILVA, E. L.; PIERIN, I.; SILVA, V. P. **Estruturas compostas por perfis formados a frio: dimensionamento pelo método das larguras efetivas e aplicação conforme ABNT NBR 14762:2010 e ABNT NBR 6355:2012**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil; Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2014.

TROUNCER, A. N. **Steel storage racks with locally unstable members**. 2015. Thesis (PhD) - The University of Sydney, Sydney, 2015.

TROUNCER, A. N.; RASMUSSEN, K. J. R. Ultra-light gauge steel storage rack frames. Part 1: experimental investigations. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 124, p. 57-76, 2016.

YU, W. W.; LABOUBE, R. A.; CHEN, H. **Cold-formed steel design**. 5. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020.