

1 Introdução

A escolha racional dos sistemas estruturais em projetos de galpões industriais é um fator de grande importância para o desenvolvimento de soluções padronizadas e competitivas. No mercado brasileiro da construção em aço, um dos segmentos com alta demanda é o de galpões, utilizados tanto para simples armazenagem como para a infraestrutura industrial de uma maneira geral (*GERDAU 2012*). Em galpões industriais a rapidez de execução e o menor volume de material são chave para a determinação do tipo de estrutura, aspectos estes que são cada vez mais exigidos em escritórios de projetos. Esta tendência de redução de peso das estruturas utilizadas com ao aumento da esbeltez dos elementos e uso de aços mais resistentes, produzem estruturas susceptíveis a efeitos de segunda ordem. Neste contexto, a consideração das imperfeições e análises não linear geométrica para a obtenção dos efeitos de segunda ordem em estruturas de galpões deve ser usada sempre que os deslocamentos afetarem de forma significativa os esforços solicitantes. Este tipo de análise pode ser realizada através modelos numéricos refinados, modelos aproximados ou simplificados a partir da amplificação dos resultados obtidos da análise de primeira ordem. Os efeitos de segunda ordem são classificados como globais ou locais também conhecidos como efeitos $P\Delta$ ou $P\delta$ respectivamente. Comparado à análise de primeira ordem, a análise de segunda ordem é mais trabalhosa, e sua aplicação ainda é pouco frequente por parte dos engenheiros.

Para o estudo das estruturas treliçadas consideradas neste trabalho e que vem sendo usadas em grande quantidade com necessidades de cobrir vãos cada vez maiores. São adotados vários tipos de configurações para os pórticos metálicos utilizados como estrutura dos galpões industriais. Avalia-se então a sensibilidade à consideração das imperfeições iniciais e dos efeitos de segunda ordem na análise e dimensionamento deste tipo de sistemas estruturais.

Atualmente, são usados programas computacionais para modelar a estrutura, fornecendo como dados a sua geometria, carregamentos, seções pré-dimensionadas e condições de vinculações, e tipo de análises a efetuar; com o intuito de obter esforços e deslocamentos para verificar a conformidade das seções propostas dos elementos. Isso permite que o projetista dedique mais tempo às análises e otimização das estruturas.

Neste trabalho realiza-se a análise de segunda ordem para os casos das estruturas consideradas usando o programa de análise estrutural *Autodesk Robot Structural Analysis Professional*. Aplica-se também o “Método de Amplificação dos Esforços Solicitantes” (MAES) como forma de verificação dos resultados obtidos pelo programa Robot.

Para facilitar o processo de seleção e pré-dimensionamento do sistema treliçado realiza-se um estudo das tipologias de treliças mais utilizadas, através de modelos paramétricos de galpões de diferentes vãos livres e espaçamento entre pórticos. Para análise e dimensionamento dos modelos utiliza-se também o programa *Autodesk Robot Structural Analysis*, que possui o módulo de dimensionamento integrado *Steel/Aluminum Design*. A validação dos resultados do dimensionamento é feita com base às prescrições da norma ABNT NBR 8800:2008.

1.1. Motivação

A concepção estrutural do projeto de um galpão industrial em estrutura de aço é definida geralmente através da experiência dos projetistas e calculistas da área. O processo de escolha entre as diferentes tipologias não é uma questão amplamente discutida nos projetos de engenharia civil (*Madeira 2009*). Além disso, a consideração na totalidade dos efeitos de segunda ordem para estimar o comportamento não linear geométrico nas estruturas ainda é pouco utilizado, seja por ser essa análise ainda de mais elevada complexidade para ser efetuada em escritórios de cálculo, por a falta de difusão desses métodos ou por dificuldades das análises mais rigorosas que demandam maiores recursos. No entanto, a

disponibilidade de software que incluem esses procedimentos de análises bem como as metodologias de análises simplificadas propostas pelas normas, justificam a consideração desses efeitos.

A atualização da norma ABNT NBR 8800:2008 trouxe modificações significativas para os escritórios de projeto de estruturas metálicas, na nova versão torna-se obrigatória a realização de análise de 2ª ordem para o dimensionamento, o que não era exigido em sua versão anterior ABNT NBR 8800:1986. A nova norma ABNT NBR 8800:2008 propõe o uso do MAES que é um método simplificado para realizar a análise de segunda ordem. Não obstante, esse método gera algumas dúvidas em sua aplicação e é ainda pouco utilizado. A norma permite a utilização de metodologias de análises simplificadas, aproximadas ou avançadas. Por essa razão, há necessidade de serem publicados trabalhos nacionais que abordem os novos conceitos e metodologias mostrando-se a aplicação por meio de exemplos práticos de estruturas correntes.

Pesquisando a bibliografia e estudos existentes nesta linha de pesquisa, observa-se que os trabalhos realizados para edificações industriais não abordam a análise dos efeitos de segunda ordem para sistemas estruturais treliçados. Limitando-se este tipo de análises para edificações com configuração de pórticos simples de alma cheia e edificações de múltiplos andares em geral.

Nesse sentido este trabalho pretende ajudar a preencher essa lacuna através de um estudo para avaliar edificações com sistemas estruturais treliçados que possam permitir a não consideração de análise de segunda ordem. Essa necessidade foi exposta no trabalho de *Chamberlain Pravia e Duarte Stumpf (2009)*. Além disso pretende-se ajudar a difundir a aplicação desses métodos de análises nas estruturas correntes, uma vez que foi percebida a dificuldade de incorporar a nova metodologia proposta nos projetos.

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é estudar as estruturas treliçadas usadas em galpões de industriais considerando as imperfeições iniciais e os efeitos de segunda ordem na análise global elástica, por meio da modelagem das diversas

tipologias em situações concretas de projeto. Estabelecem-se como objetivos específicos:

- Avaliar e validar várias técnicas de modelagem dos galpões considerados.
- Avaliar a aplicação dos métodos de análises de segunda ordem nas diferentes tipologias dos pórticos treliçados considerados.
- Comparar o método simplificado de análise de segunda ordem MAES proposto pela ABNT NBR 8800:2008 com a metodologia avançada efetuada usando um programa de análises para cada tipologia.
- Analisar a influência dos efeitos de segunda ordem em comparação à análise de primeira ordem para estes tipos de sistemas treliçados.
- Avaliar a sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais.
- Oferecer recomendações práticas sobre as tipologias e sistematizar o projeto de galpões de usos gerais com pórticos treliçados.
- Realizar um estudo paramétrico de dimensionamento dos modelos para analisar as considerações anteriores e avaliar o desempenho através da obtenção dos gráficos de consumo aproximado de aço e de deslocamentos máximos em função das tipologias e dimensões dos galpões.
- Simplificar o processo de pré-dimensionamento através da produção de tabelas e ábacos para os elementos de treliças e colunas para perfis usuais.

1.3. Organização da Dissertação

A dissertação é dividida em 6 capítulos, incluindo este capítulo 1 introdutório.

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão das considerações gerais sobre projetos e cálculo de edifícios indústrias, trabalhos relacionados, descrição das diferentes tipologias de pórticos treliçados, sistemas e requisitos estruturais.

No capítulo 3 são apresentados os diferentes tipos de modelagem estudados, incluindo a justificativa da escolha da análise com modelos em 2D (duas dimensões) ao invés de modelos em 3D (três dimensões) dos galpões. Refere-se a definição dos tipos de análise estruturais a realizar, as considerações dos efeitos não lineares na análise e os métodos para consideração das imperfeições iniciais. Especificam-se as prescrições de análise estrutural e dimensionamento da norma ABNT NBR 8800:2008 e as verificações correspondentes. Apresentam-se também os diferentes métodos de análise de estabilidade permitidos, o Método de Amplificação dos Esforços Solicitante (MAES). A descrição do programa de cálculo utilizado *Autodesk Robot Structural Analysis Professional* e a implementação para as análises de segunda ordem para o dimensionamento.

No capítulo 4 detalham-se os estudos paramétricos realizados, os parâmetros estudados, os modelos considerados, as características das edificações, os tipos de materiais e as seções utilizadas. Apresenta-se o estudo comparativo entre a aplicação do método simplificado MAES para análises de segunda ordem e da análise avançada do software de cálculo *Autodesk Robot Structural Analysis Professional* por representação de exemplos das diferentes tipologias estruturais consideradas. Explica-se o módulo de dimensionamento *Steel/Aluminum Design* que foi testado e adaptado à ABNT NBR 8800:2008. Os resultados obtidos foram validados através de uma comparação com os resultados obtidos usando as formulações e verificações prescritas da ABNT NBR 8800:2008 para os elementos de treliça e elementos de colunas.

No capítulo 5 são apresentados às análises dos resultados obtidos para os casos estudados, a comparação das análises de segunda ordem e a análise de primeira ordem nos sistemas treliçados e a determinação da influência dos efeitos de segunda ordem. É apresentada também a avaliação da sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais. O capítulo conclui com a apresentação dos gráficos de consumo aproximado de aço e de deslocamentos máximos para as diferentes tipologias, junto com os ábacos de pré-dimensionamento.

Finalizando no capítulo 6, relatam-se as conclusões principais obtidos ao longo da dissertação.