

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

ANA CAROLINA ALBERNAZ RODRIGUES

**ESTUDO DA INSTABILIDADE DAS COLUNAS (MONTANTES) DE
SILOS METÁLICOS CILÍNDRICOS DE CHAPAS ONDULADAS**

São Carlos
2019

ANA CAROLINA ALBERNAZ RODRIGUES

**ESTUDO DA INSTABILIDADE DAS COLUNAS (MONTANTES) DE
SILOS METÁLICOS CILÍNDRICOS DE CHAPAS ONDULADAS**

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil (Estruturas).

Orientador: Prof. Dr. Carlito Calil Junior

São Carlos

2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

R696e RODRIGUES, ANA CAROLINA ALBERNAZ
ESTUDO DA INSTABILIDADE DAS COLUNAS (MONTANTES) DE SILOS METÁLICOS CILÍNDRICOS DE CHAPAS ONDULADAS / ANA CAROLINA ALBERNAZ RODRIGUES; orientador CARLITO CALIL JUNIOR. São Carlos, 2019.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.

1. Silos Metálicos. 2. Instabilidade de silos. 3. Instabilidade de colunas. 4. Flambagem. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Bacharela **ANA CAROLINA ALBERNAZ RODRIGUES**.

Título da dissertação: "Estudo da instabilidade das colunas (montantes) de silos metálicos cilíndricos de chapas onduladas".

Data da defesa: 25/02/2019.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Carilo Call Junior**

(Orientador)

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Andrés Batista Cheung**

(Universidade Federal de Mato Grosso do Sul/UFMS)

APROVADO

Prof. Dr. **José Wallace Barbosa do Nascimento**

(Universidade Federal de Campina Grande/UFCG)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

(Engenharia de Estruturas):

Prof. Titular **Humberto Breves Coda**

Decano da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Humberto Breves Coda**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, pelo dom da vida.

À minha família, em especial meus pais, George e Marta, e meu irmão, George, por serem minha base e me apoiarem nas minhas decisões.

Aos Colegas de Departamento, pelo apoio e convívio diário, em especial à Daniele Paulino, Gabriela Perche, Mariana Rossi, Murilo Bento, Rafael Dupim e Yagho Simões, meus fiéis amigos.

À Universidade Federal de Goiás, pela formação a nível de bacharelado.

Ao Prof. Tit. Carlito Calil Junior, pela orientação, paciência e saber, que foram fundamentais para a condução deste trabalho.

Aos Professores Andrés Cheung, Maximiliano Malite e Rodrigo Paccola, pelas instruções fornecidas durante a execução do trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo suporte financeiro, sabendo que o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

À Kepler Weber Industrial, especialmente ao Eng. Marcelo Jungbeck, pela orientação prática e cooperação com os ensaios experimentais.

Ao Laboratório de Estruturas e ao Laboratório de Materiais, pelo apoio nos ensaios, principalmente aos técnicos Amaury Ignácio, Mauri Guillen e Samuel de Sá, e aos colegas de departamento Lucas Antônio e Mariana Rossi, pelas horas dedicadas à fase experimental da pesquisa.

Ao Departamento de Engenharia de Estruturas e seus colaboradores, pela formação e por viabilizarem este trabalho.

À Escola de Engenharia de São Carlos, por todos os recursos de apoio à pesquisa.

“Só se pode alcançar um grande êxito quando nos mantemos fiéis a nós mesmos.”

(Friedrich Nietzsche)

RESUMO

RODRIGUES, A. C. A. **Estudo da Instabilidade das Colunas (montantes) de Silos Metálicos Cilíndricos de Chapas Onduladas**. 2019. 113p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Muitos colapsos de silos metálicos acontecem devido à instabilidade das colunas (montantes) dos mesmos. Estes trabalham, predominantemente, à compressão e são responsáveis por resistir às forças de atrito existentes entre o produto ensilado e a parede do silo. As normas brasileiras vigentes não possuem orientações específicas para o cálculo da força crítica de flambagem destes perfis na sua utilização em silos metálicos com chapas onduladas. Este trabalho propõe um método para a análise da instabilidade dessas colunas, abordando-o como um problema de estabilidade elástica e desconsiderando a influência da pressão horizontal que o produto ensilado provoca na parede do silo, baseado em estudos teóricos de normas e trabalhos estrangeiros, modelagens numéricas em elementos finitos com o programa computacional ANSYS 19.2 e análise experimental. Com base nestes três estudos, apresenta-se um modelo de cálculo para considerar a influência da chapa ondulada na equação carga crítica de flambagem.

Palavras-chave: Silos metálicos. Instabilidade de silos. Instabilidade de colunas. Flambagem.

ABSTRACT

RODRIGUES, A. C. A. **Instability Analysis of Metal Cylindrical Silos Columns (Stiffeners) with Corrugated Sheets.** 2019. 113p. Dissertation (M. Sc. in Civil Engineering (Structures)) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2019.

A huge amount of metal silos collapses occurs due to the instability of their columns (stiffeners). Those stiffeners work, mostly, in compression and are responsible for resisting the frictional forces between the storage product and the silo wall. The current Brazilian standards do not have specific guidelines for the calculation of the critical buckling load of these profiles in their use in metallic silos with corrugated sheets. This work proposes a method for the analysis of the instability of these columns, approaching as an elastic stability problem and disregarding the influence of the horizontal pressure that the storage product causes in the silo wall, based on theoretical studies of international codes and works, numerical modeling in finite elements with the ANSYS 19.2 software and experimental analysis. Based on these three studies, it is presented a calculation model to consider the influence of the corrugated sheet in the critical buckling load equation.

Keywords: Steel silos. Silos instability. Columns instability. Buckling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – A) Esforços de tração resistidos pelas chapas do silo; B) Esforços de compressão proveniente do cisalhamento dos grãos, que será resistido pelos montantes.	20
Figura 1.2 – Flambagem de um silo metálico cilíndrico de chapas onduladas	25
Figura 2.1 – Estabilidade do equilíbrio: a) Equilíbrio Estável; b) Equilíbrio Instável; c) Equilíbrio Neutro.....	27
Figura 2.2 – Coluna de Euler. a) Geometria e carregamento; b) Trajetória de equilíbrio.....	28
Figura 2.3 – Configurações de equilíbrio da coluna de Euler. a) e c) Equilíbrio estável; b) Equilíbrio instável	29
Figura 2.4 – Instabilidade bifurcacional genérica	30
Figura 2.5 – Instabilidade por <i>snap-through</i>	31
Figura 2.6 – Arco abatido ($h/l \ll 1$) que apresentará instabilidade por <i>snap-through</i> . a) geometria e carregamento; b) trajetória do equilíbrio	31
Figura 2.7 – Modo de flambagem global	32
Figura 2.8 – Modo de flambagem local.....	33
Figura 2.9 – Modo de flambagem distorcional	33
Figura 3.1 – Dimensões da chapa ondulada	37
Figura 3.2 - Análise de coluna como uma viga apoiada em base elástica.....	38
Figura 4.1 – Descontinuidade do Método A e Método B propostos pelo Eurocode 3.....	41
Figura 4.2 – Esquema para a modificação da rigidez das chapas do silo.....	42
Figura 4.3 – Arco em análise para cálculo de K.....	44
Figura 4.4 – Curva dos modelos de falha dos perfis mais usados nos montantes.....	45
Figura 5.1 – Diferença no deslocamento Δu para aplicação de uma carga unitária, para a situação de uma viga reta e uma viga em arco.	48
Figura 5.2 – Curvas da Equação da carga crítica de flambagem para uma barra finita bi-rotulada.	50
Figura 5.3 – Modelo Experimental.....	51
Figura 5.4 – Perfil do montante experimental	52
Figura 5.5 – Chapa de topo para aplicação da carga	53
Figura 5.6 – Perfil de ligação montante-fundação.....	53
Figura 5.7 – Chapa ondulada experimental	54
Figura 5.8 – Esquema do experimento	55

Figura 5.9 – Corpos de Prova para o ensaio de tração	56
Figura 5.10 - Instrumentação de ensaio à tração	57
Figura 5.11 – Material do silo entregue pela fornecedora.	58
Figura 5.12 – Parafuso e porca usados na ligação das chapas e montantes	58
Figura 5.13 – Montagem Silo	59
Figura 5.14 – Silo montado.....	59
Figura 5.15 – Características das ligações: A) Ligação chapa-chapa, B) Cobrejunta, C) Ligação chapa-montante	60
Figura 5.16 – Fixação da célula de carga e içamento do pórtico	61
Figura 5.17 – Centralização do silo no pórtico de reação	61
Figura 5.18 – Instrumentação dos transdutores	62
Figura 5.19 – Posicionamento dos transdutores.....	63
Figura 5.20 – Fixação do montante na laje de reação	64
Figura 5.21 – Ligação do anel de vento - projeto	64
Figura 5.22 – Montagem do anel de vento.....	65
Figura 5.23 – Ligação do anel de vento - Experimental	65
Figura 6.1 – Eixos de Referência para o cálculo do momento de inércia.....	67
Figura 6.2 – Malha refinada do silo	69
Figura 6.3 – Vista superior do silo deformado.....	70
Figura 6.4 – Vista lateral do silo deformado.....	70
Figura 6.5 – Modos de ruptura dos corpos de prova.....	71
Figura 6.6 – Gráfico dos Ensaios de Tração	72
Figura 6.7 – Montantes pares após ensaio	74
Figura 6.8 – Montantes ímpares após ensaio	74
Figura 6.9 - Gráfico dos deslocamentos aferidos pelos transdutores.....	76
Figura B.1 – Geometria do arco.....	89
Figura B.2 – Sistema Principal	89
Figura B.3 – Problema 0	90
Figura B.4 – Problema 1	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 – Resultados experimentais do ensaio de tração.....	72
Tabela 6.2 – Cargas Máxima resistente por montante.....	73
Tabela 6.3 – Deslocamentos aferidos pelos transdutores	75
Tabela 6.4 – Resultados Analítico, Numérico e Experimental	77

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. JUSTIFICATIVA	24
1.2. OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICO.....	25
2. TEORIA DA ESTABILIDADE ESTRUTURAL	27
2.1. ESTABILIDADE DO EQUILÍBRIO	27
2.2. TIPOS DE INSTABILIDADE	28
2.3. MODOS DE INSTABILIDADE.....	32
3. NORMAS INTERNACIONAL E ESTRANGEIRAS RELEVANTES.....	35
3.1. NORMAS ESTADUNIDENSES	35
3.2. NORMAS AUSTRALIANAS	36
3.3. NORMAS EUROPEIAS	36
3.4. NORMAS ARGENTINAS	39
3.5. NORMAS INTERNACIONAIS	40
3.6. NORMAS BRASILEIRAS	40
4. ARTIGOS CIENTÍFICOS E OUTRAS BIBLIOGRAFIAS.....	41
4.1. ARTIGOS CIENTÍFICOS	41
4.2. OUTRAS BIBLIOGRAFIAS	44
5. MATERIAIS E MÉTODOS	47
5.1. MODELO DE CÁLCULO PROPOSTO	47
5.2. ANÁLISE NUMÉRICA.....	50
5.3. ANÁLISE EXPERIMENTAL	51
5.3.1. Ensaio de Caracterização do Material	56
5.3.2. Ensaio dos Montantes.....	57
6. RESULTADOS	67
6.1. RESULTADOS ANALÍTICOS.....	67
6.2. RESULTADOS NUMÉRICOS	68
6.3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	71
6.3.1. Ensaio de Caracterização do Material	71

6.3.2. Ensaio dos Montantes	73
6.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	76
7. CONCLUSÃO	79
REFERÊNCIAS	81
APÊNDICE A	87
APÊNDICE B	89
APÊNDICE C	95
APÊNDICE D	97
ANEXO A.....	105
ANEXO B.....	107

1. INTRODUÇÃO

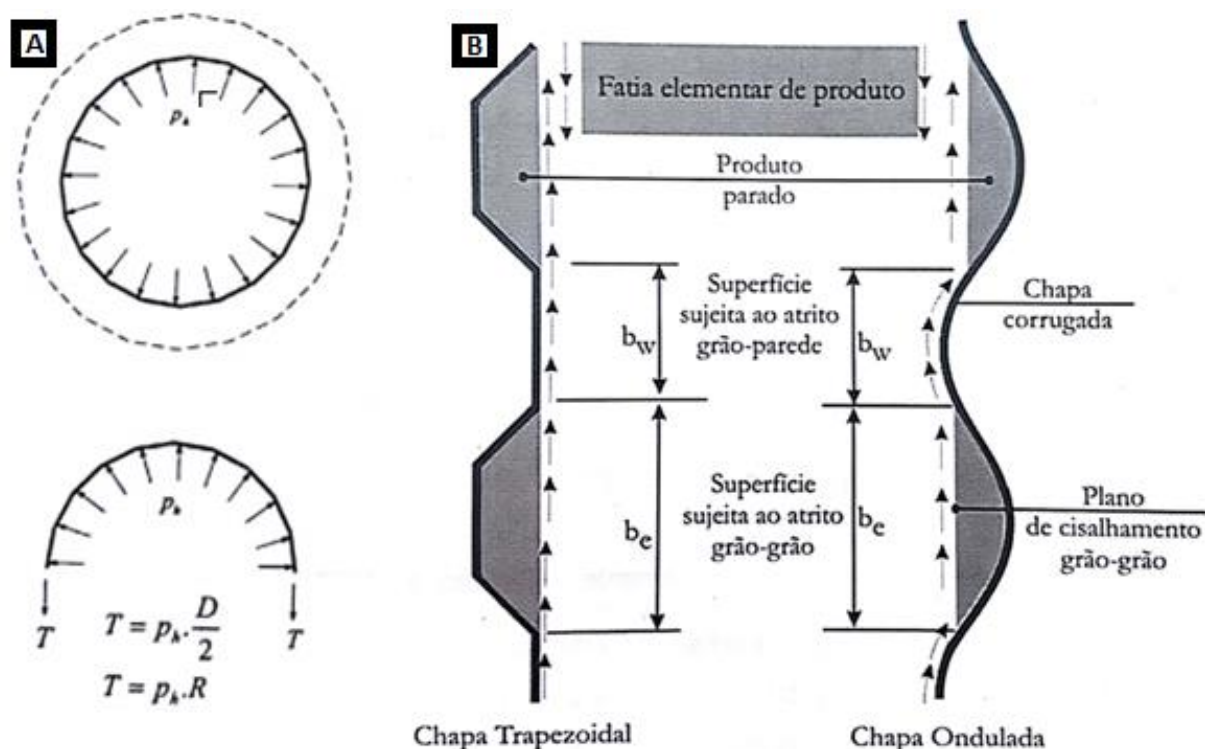
O Brasil com sua vasta extensão territorial e sua enorme capacidade produtora tem a agricultura com uma das suas grandes atividades econômicas. Segundo Gallardo et al. (2010), a recomendação da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) é que um país tenha capacidade estática de armazenagem de 1,2 vezes a sua produção agrícola anual. De acordo com dados da Embrapa, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, o Brasil tem capacidade para armazenar 160 das 230 milhões de toneladas de grãos produzidos na safra 2017/2018. Ou seja, a capacidade de armazenagem do país ainda é inferior à sua produção.

O principal objetivo da armazenagem é manter a qualidade do produto que veio do campo e evitar desperdícios. Segundo Calil e Cheung (2007) a armazenagem de produtos agrícolas em silos apresenta as seguintes vantagens:

- Obtenção de um produto melhor conservado, longe do ataque de insetos e ratos;
- Estocagem racional, segura e principalmente econômica, com armazenamento e comercialização a granel;
- Economia do transporte, uma vez que os preços dos fretes aumentam durante o período da safra;
- Formação de um estoque regulador dos preços de mercado;
- Proteção da indústria contra as flutuações no preço das matérias-primas;
- Eliminação de impurezas e excesso de água pela secagem.

Os silos metálicos são estruturas de armazenamento muito utilizados no país para materiais granulares em diferentes níveis: fazendas, intermediário e final. São, usualmente, finas estruturas em casca bastante eficientes, as quais recebem os esforços provenientes da pressão horizontal e de cisalhamento do produto ensilado, no momento da carga, descarga, e durante o período em que o produto está estocado. As chapas acabam trabalhando em tração, devido à pressão horizontal, e os montantes em compressão, proveniente do cisalhamento do produto ensilado com a parede das chapas, como apresentado na Figura 1.1.

Figura 1.1 – A) Esforços de tração resistidos pelas chapas do silo; B) Esforços de compressão proveniente do cisalhamento dos grãos, que será resistido pelos montantes.



Fonte: Calil e Cheung (2007)

Compreender as características e problemas de um silo é um trabalho multidisciplinar, o qual envolve conhecimentos em diferentes áreas: de engenharia civil (segurança da estrutura), engenharia mecânica (equipamentos de manuseio e transporte), engenharia química (reações durante a armazenagem de produtos), engenharia agrícola, entre outras.

A linha de pesquisa realizada neste trabalho está relacionada com a engenharia de estruturas, cujos estudos já vêm sendo feitos há algum tempo por vários pesquisadores, abordando diversas subáreas, a fim de aprimorar o conhecimento, comprovar as teorias existentes e desenvolver tecnologia própria na área de silos. Até o momento, os seguintes trabalhos de Mestrado, Doutorado e Livre Docência desenvolvidos no Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP) foram:

Calil (1978), em sua dissertação de Mestrado “Estudo dos Silos de Madeira a Nível de Fazendas”, propôs como alternativa para o pequeno produtor a construção de tais

estruturas nas propriedades agrícolas, utilizando madeira tanto como material estrutural quanto de revestimento.

Calil (1982), em sua tese de Doutorado “*Sobrepresiones en las Paredes de los Silos para Almacenamiento de Productos Pulverulentos Cohesivos*”, realizou estudos em modelos reduzidos, determinando os tipos de fluxo de produtos armazenados, a intensidade das pressões de carregamento e descarga para produtos granulares e para produtos pulverulentos.

Fortes Filho (1985), em sua dissertação de Mestrado “Uma Introdução ao Estudo dos Silos”, abordou a problemática dos silos de maneira ampla e suficientemente profunda para as aplicações correntes, apoiando-se em análise de estudos teóricos e experimentais realizados por diversos autores.

Vaz (1987), em sua dissertação de Mestrado "Silos Verticais de Madeira Compensada", apresentou uma proposta de silos de madeira compensada de seção hexagonal para o pequeno produtor.

Couto (1989), em sua dissertação de Mestrado "Contribuição ao Estudo dos Silos de Argamassa Armada para o Armazenamento de Cereais", propôs uma metodologia de dosagem para argamassa armada, verificando sua viabilidade construtiva em dois silos protótipos cilíndricos.

Esteves Junior (1989), em sua dissertação de Mestrado "Silos Metálicos de Chapa Corrugada", apresentou estudo teórico e experimental destas unidades com vistas à caracterização dos materiais e das ligações utilizadas, além de propor uma metodologia de ensaio para a avaliação dos componentes estruturais.

Calil (1990), em sua tese de Livre - Docência "Recomendações de Fluxo e de Cargas para o Projeto de Silos Verticais", realizou o estudo das teorias e práticas que envolvem as várias fases de carregamento e fluxo de produtos armazenados, propondo recomendações para o armazenamento destes produtos em silos.

Silva (1993)¹, em sua tese de Doutorado "Estudo da Variabilidade de Pressões em Silos", estudou as pressões em silos sob o ponto de vista probabilístico, com ênfase na análise da variabilidade das propriedades dos produtos armazenados e na variabilidade das pressões.

¹ Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo sob orientação do Prof. Dr. Carlito Calil Junior.

Milani (1993), em sua tese de Doutorado "Determinação das Propriedades de Produtos Armazenados para Projeto de Pressões e Fluxo em Silos", apresentou uma metodologia de ensaio para a determinação das propriedades de produtos armazenados, com base em estudos teóricos e experimentais utilizando o equipamento de translação "*Jenike Shear Cell*".

Fassoni (1994), em sua dissertação de Mestrado "Sistema Construtivo Modular em Madeira para Silos Horizontais", apresentou proposta de projeto de silo horizontal de madeira utilizando peças maciças e chapas de compensado, com ênfase na pré-fabricação.

Gomes (1994), em sua dissertação de Mestrado "Silos para Armazenamento de Laranjas", propôs o projeto e detalhes construtivos de um silo-protótipo, utilizando madeiras de reflorestamento para o armazenamento de laranjas, tanto em fazendas como em indústrias.

Manfrin (1994), em sua dissertação de Mestrado "Um Estudo dos Silos para Açúcar: Propriedades Físicas do Material Armazenado, Recomendações Construtivas, Normativas e Análise Estrutural", analisou as condições ideais que o açúcar deve apresentar para uma adequada armazenagem, bem como avalia a distribuição dos esforços solicitantes a partir do confronto entre uma análise discreta, que trata a estrutura como um conjunto de pilares e vigas curvas, e de outra contínua, na qual a estrutura da parede é tratada como casca.

Nascimento (1996), em sua tese de Doutorado "Estudo de Silos Prismáticos para Fábricas de Ração", desenvolveu estudo teórico e experimental de painéis metálicos com conformação zigzague horizontal, fornecendo subsídios técnicos para projetos de silos prismáticos metálicos para uso industrial.

Araújo (1997), em sua tese de Doutorado "Estudo Teórico Experimental de Tremonhas Piramidais para Silos Metálicos Elevados", realizou estudos para a determinação dos esforços em tremonhas enrijecidas e não enrijecidas por modelo analítico, numérico e experimental, confrontando os métodos utilizados.

Andrade Júnior (1998), em sua dissertação de Mestrado "Análise Estrutural das Chapas Metálicas de Silos e de Reservatórios Cilíndricos", procurou dispor conceitos claros e distintos do comportamento e dos fenômenos de perda de estabilidade do equilíbrio de reservatórios e silos metálicos, bem como estabelece configurações estruturais que apresentam maiores riscos à perda da estabilidade da estrutura e fornece relações de diâmetro/espessura e de diâmetro/altura em que é possível evitar os problemas advindos da perda de estabilidade do equilíbrio.

Gomes (2000), em sua tese de doutorado “Estudo Teórico e Experimental das Ações em Silos Horizontais”, comparou resultados teóricos com os obtidos por meio de medições diretas das pressões em um modelo-piloto e um silo horizontal em escala real, com a relação entre as pressões horizontais e verticais, K . Com base nos resultados obtidos, propõe um novo método de cálculo fundamentado em um modelo empírico para a determinação das pressões horizontais nessas unidades.

Freitas (2001), em sua tese de doutorado “Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano”, realizou ensaios em um silo-protótipo e um silo-piloto. Com base nos resultados experimentais, propõe modelos empíricos para a determinação das pressões horizontais e verticais no fundo plano do silo para esse tipo de unidade armazenadora.

Andrade Júnior (2002), em sua tese de doutorado “Ação do Vento em Silos Cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro”, realizou estudos teóricos e experimentais em modelos aerodinâmicos e aero elásticos sobre as ações do vento em silos, determinando coeficientes aerodinâmicos no costado e na cobertura.

Palma (2005), em sua dissertação de mestrado “Pressões e Fluxo em Silos Esbeltos ($H/D \geq 1,5$)”, realizou estudos teóricos sobre teorias e normas vigentes sobre as pressões e fluxo em silos esbeltos.

Cheung (2007), em sua tese de doutorado “Modelo Estocástico de Pressões de Produtos Armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de Silos Esbeltos” realizou um tratamento estocástico nas pressões dos silos verticais esbeltos com ênfase na estimativa da confiabilidade de silos verticais cilíndricos.

Nascimento (2008), em sua dissertação de mestrado “A relação entre as Pressões horizontais e verticais em Silos Elevados: o parâmetro K ” determinou experimentalmente a relação entre as pressões horizontais e verticais em um silo piloto vertical, cilíndrico, de fundo plano e realiza um estudo comparativo das principais recomendações propostas pelos especialistas e normas internacionais para o cálculo do K .

Madrona (2008), em sua dissertação de mestrado “Pressões em Silos Esbeltos com descarga excêntrica”, realizou um estudo teórico e numérico da distribuição de pressões e seu aumento para a condição de descarga em silos verticais com descarga excêntrica.

Martins (2012), em sua tese de mestrado “Estudo teórico e experimental de esforços devidos a cabos de termometria fixados em estruturas de coberturas de silos cilíndricos para armazenamento de grãos”, analisou de maneira teórica e experimental os esforços de cabos

de termometria fixados em estruturas de cobertura de silos cilíndricos verticais com o objetivo de fornecer subsídios para os projetistas e informações para uma futura normalização no dimensionamento de estruturas de cobertura para silos metálicos cilíndricos.

Coelho (2016), em sua tese de mestrado “Software para cálculo de fluxo e pressões em silos cilíndricos metálicos para armazenamento de produtos agrícolas e industriais” apresentou o desenvolvimento e exemplos de aplicação de um software para cálculo de fluxo e pressões em silos cilíndricos metálicos de produtos agrícolas e industriais, com a linguagem Python usando como referência o código europeu.

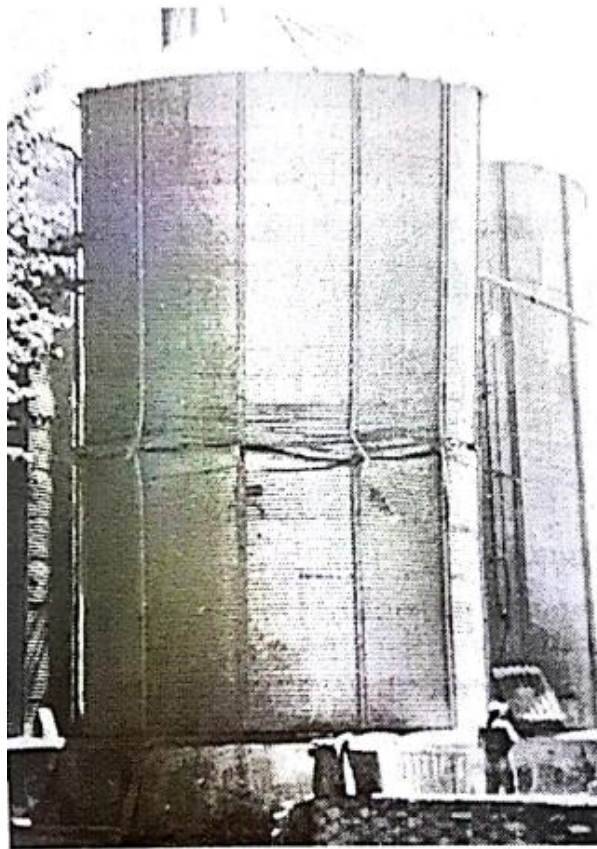
Acqua (2018), em sua tese de mestrado “Estudo teórico e experimental de ligações parafusadas em chapas onduladas de silos cilíndricos metálicos” apresentou o estudo de ligações parafusadas em chapas onduladas de silos cilíndricos metálicos.

Desta forma, o presente trabalho dá continuação às pesquisas já realizadas, somando ao conhecimento já adquirido e contribuindo com propostas que irão agregar nas etapas de projetos, construção e segurança de silos metálicos com chapas onduladas.

1.1. Justificativa

Segundo Calil e Cheung (2007) existem muitas dúvidas a respeito do comprimento de flambagem das colunas que estão trabalhando à compressão em silos metálicos. Na prática de projetos no Brasil, é muito comum admitir o comprimento de flambagem igual ao comprimento entre as chapas e verificar o montante à compressão simples, adotando as orientações da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Porém, muitos colapsos em silos acontecem devido à instabilidade destes montantes, como exemplo a Figura 1.2, o que justifica o estudo deste trabalho, por entender que a análise à flambagem dos montantes de silos metálicos deve ser feita de maneira mais específica e aprofundada. Assim, deve-se considerar todos os elementos que compõe o silo e influenciam no comportamento do montante na previsão do seu desempenho.

Figura 1.2 – Flambagem de um silo metálico cilíndrico de chapas onduladas



Fonte: Ravenet (1992, apud Calil e Cheung, 2007).

1.2. Objetivo Geral e Específico

Esta pesquisa tem como objetivo geral propor um método de análise da instabilidade das colunas de silos metálicos com chapas onduladas, contribuindo com algumas diretrizes que no futuro culminarão em uma formulação mais acertada para sua utilização prática no dimensionamento de projetos no Brasil, sugerindo como deve ser realizado o cálculo da carga crítica à flambagem dessas peças, considerando a influência da rigidez das chapas onduladas no comportamento do montante. Como objetivos específicos: fazer uma breve revisão bibliográfica acerca da teoria da instabilidade para estruturas; comparar as orientações fornecidas por diferentes normas estrangeiras para a análise da resistência à flambagem destas peças; propor um modelo de previsão da carga crítica de flambagem; construir um modelo experimental para a avaliação da carga crítica; modelar um modelo numérico de um silo semelhante ao modelo experimental; avaliar a contribuição dos anéis

de vento na resistência à flambagem das colunas; analisar a influência da cobrejunta nestes perfis no processo de instabilidade; considerar a rigidez e curvatura das chapas no cálculo da resistência à flambagem do perfil e comparar os resultados experimental, numérico e analítico realizados, a fim de validar o modelo proposto.

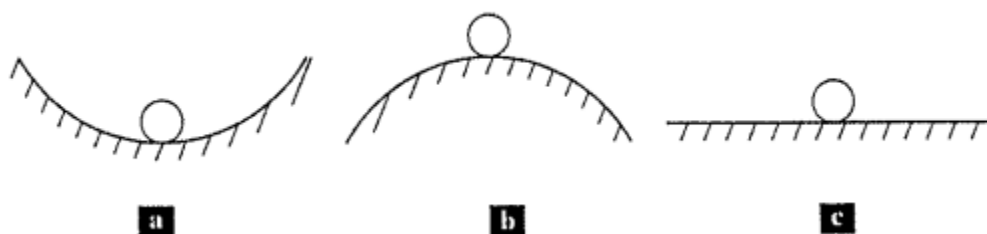
2. TEORIA DA ESTABILIDADE ESTRUTURAL

O estudo da teoria da estabilidade pode ser dividido em alguns conceitos importantes, relevantes para o desenvolvimento da pesquisa, os quais serão apresentados a seguir. Eles são: estabilidade do equilíbrio; tipos de instabilidade; modos de instabilidade.

2.1. Estabilidade do Equilíbrio

De uma forma geral, o estudo de estabilidade em projetos estruturais refere-se a equilíbrio. Desta maneira, admitindo-se uma estrutura submetida a forças externas, sua configuração de equilíbrio está caracterizada pelos deslocamentos em seus pontos. Esta configuração pode ser considerada estável, instável ou neutra, dependendo de seu comportamento após cessar a atuação da perturbação externa. Esta estabilidade do equilíbrio pode ser representada facilmente pela Figura 2.1. Trata-se de uma esfera rígida, submetida à ação do seu peso próprio, que comportará de diferentes maneiras após o fim da atuação de uma perturbação externa. Na superfície côncava tem-se um equilíbrio estável, Figura 2.1a, pois a esfera retornará a sua posição inicial; na superfície convexa encontra-se um equilíbrio instável, Figura 2.1b, pois a esfera se afastará da sua posição inicial; e na superfície horizontal nota-se um equilíbrio neutro, Figura 2.1c, pois a esfera não se deslocará.

Figura 2.1 – Estabilidade do equilíbrio: a) Equilíbrio Estável; b) Equilíbrio Instável; c) Equilíbrio Neutro.



Fonte: Reis e Camotim (2001).

A generalização e aplicação deste conceito de equilíbrio a “sistemas estruturais deformáveis” constitui o principal objetivo da Teoria da Estabilidade Estrutural. Assim,

projetar uma estrutura não é somente verificar a resistência e deformabilidade dos seus elementos, é indispensável considerar também os fenômenos de instabilidade, tanto dos elementos individualmente, quanto da estrutura como um todo. Estes fenômenos são conhecidos como: Fenômenos da Instabilidade Estrutural.

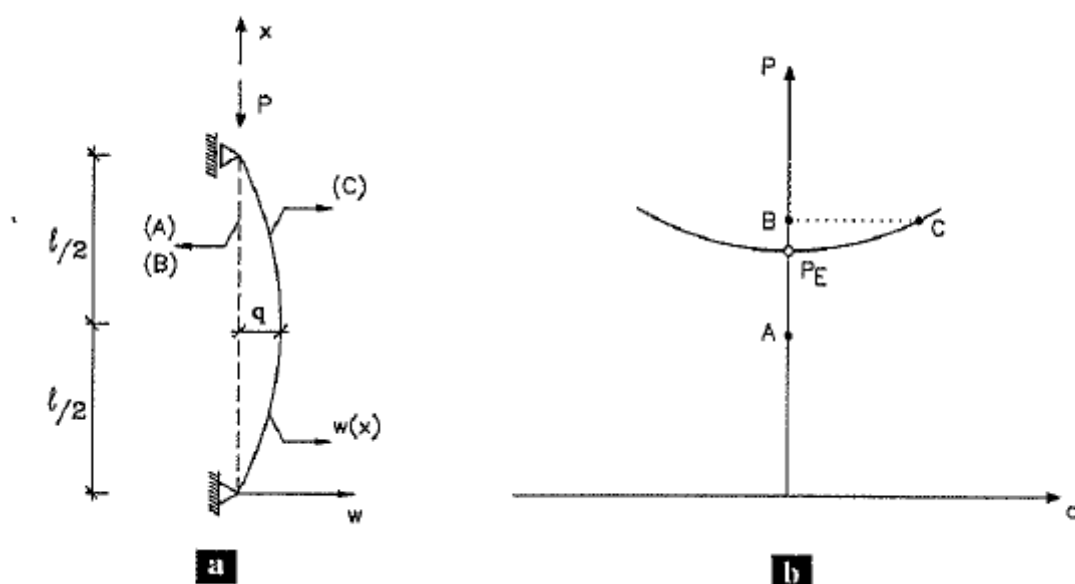
2.2. Tipos de Instabilidade

A instabilidade de uma estrutura evolui ao longo de uma trajetória de equilíbrio, de relação carga versus deslocamento, e corresponde à transição entre o equilíbrio estável e instável. Esta instabilidade pode surgir de dois modos:

- Através da bifurcação de equilíbrio;
- Através da ocorrência de um ponto limite.

Em primeiro lugar, para ilustrar bem o conceito de bifurcação do equilíbrio, usa-se o problema da coluna de Euler: uma coluna elástica, simplesmente apoiada, submetida a uma carga axial P , representado na Figura 2.2a. As trajetórias de equilíbrio desta coluna estão demonstradas na Figura 2.2b, na qual q é o valor do deslocamento transversal no meio da altura da coluna.

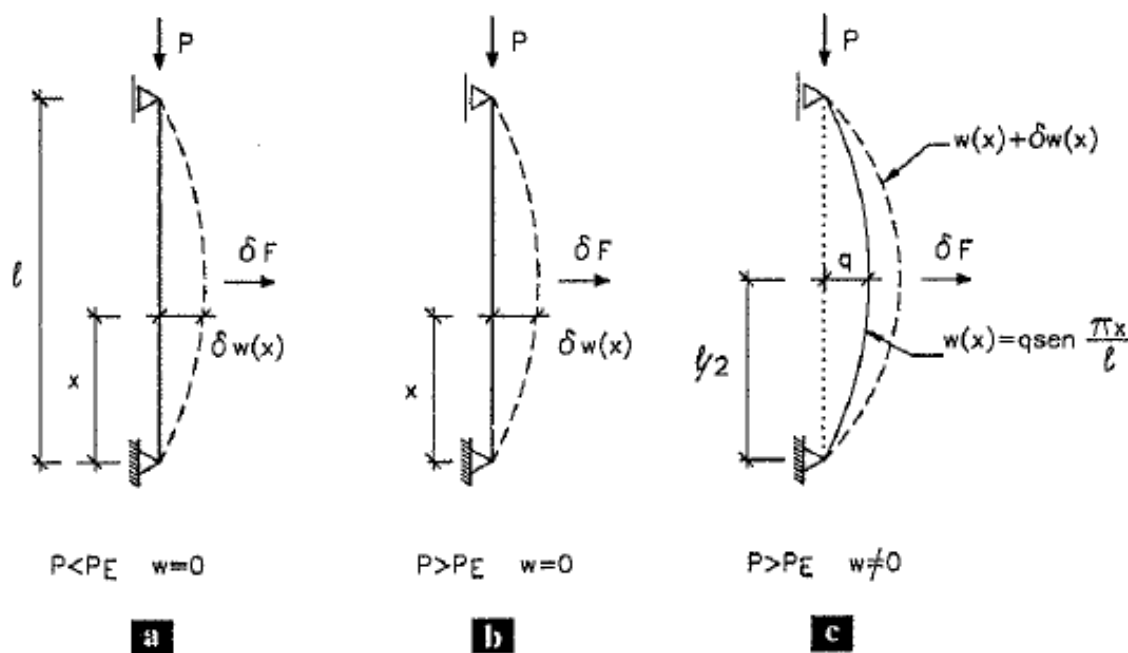
Figura 2.2 – Coluna de Euler. a) Geometria e carregamento; b) Trajetória de equilíbrio



Fonte: Reis e Camotim (2001).

Nota-se que em uma das trajetórias tem-se $q=0$, considerada trajetória fundamental, e na outra tem-se $q \neq 0$, considerada trajetória de pós-flambagem. As duas se intersectam no ponto P_E , ponto onde há a bifurcação do equilíbrio. A situação do ponto A da Figura 2.2b está representada na Figura 2.3a. Neste ponto, $q=0$ e $P < P_E$, então após cessada qualquer perturbação δF aplicada, a coluna regressa à sua configuração inicial, o que define o equilíbrio estável deste trecho. Já no ponto B da Figura 2.2b, temos a ocorrência da situação da Figura 2.3b, onde $q=0$ e $P > P_E$. Neste cenário após cessar a aplicação da perturbação δF , a coluna afasta da configuração inicial atingindo o ponto C da Figura 2.2b. Este comportamento define o equilíbrio instável deste trecho. Por sua vez, estando no ponto C, temos a situação da Figura 2.3c ocorrendo, $q \neq 0$ e $P > P_E$. Se aplicarmos a perturbação δF , verifica-se um equilíbrio estável, já que após finalizada a perturbação a estrutura retorna-se a sua configuração inicial.

Figura 2.3 – Configurações de equilíbrio da coluna de Euler. a) e c) Equilíbrio estável; b) Equilíbrio instável

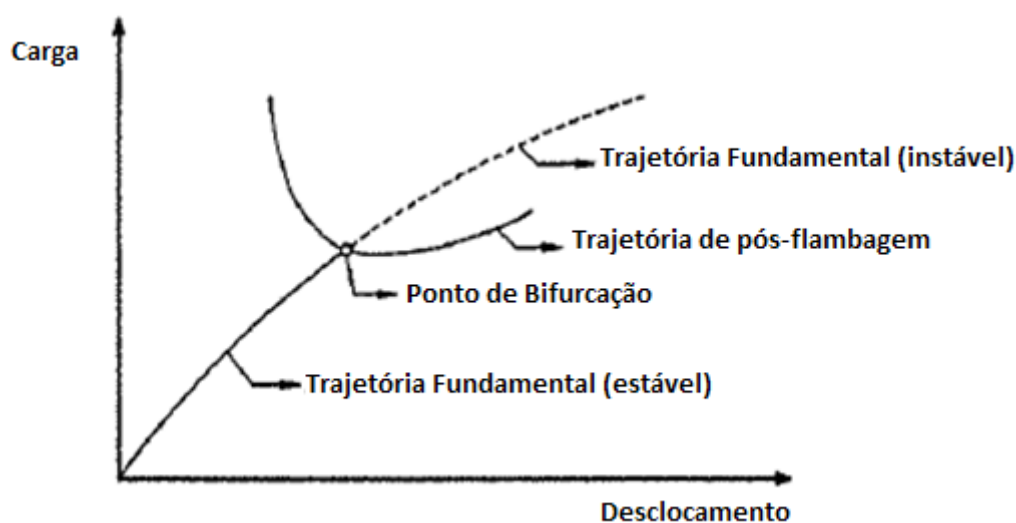


Fonte: Reis e Camotim (2001).

Desta forma, um problema de instabilidade bifurcacional genérico, representado pela Figura 2.4, se caracteriza por:

- 1) Uma trajetória de equilíbrio fundamental, que pode ser linear ou não linear, iniciando na origem do diagrama carga versus deslocamento;
- 2) Uma trajetória de equilíbrio de pós-flambagem que não passa pela origem do diagrama;
- 3) Um ponto de bifurcação do equilíbrio, que se situa na interseção das duas trajetórias descritas anteriormente, no qual a configuração de equilíbrio da trajetória fundamental passa de estável para instável.

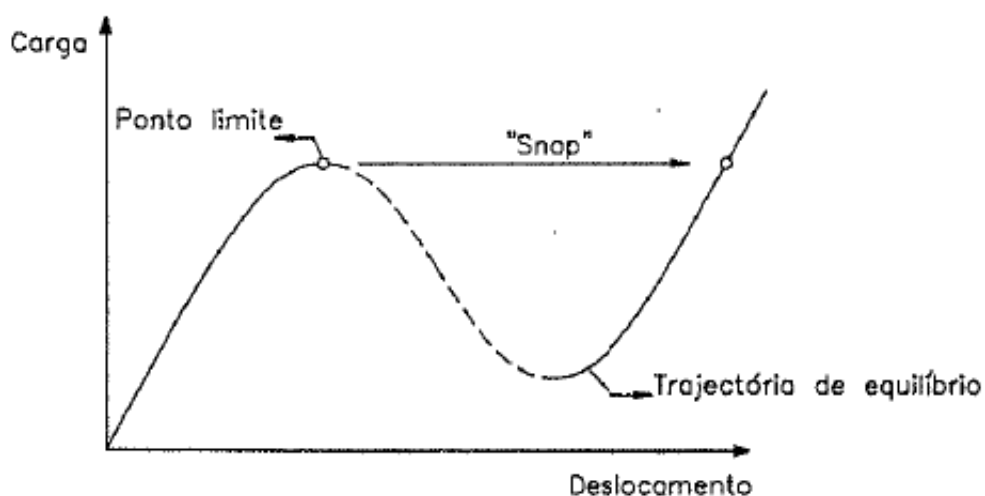
Figura 2.4 – Instabilidade bifurcacional genérica



Fonte: Reis e Camotim (2001) (ADAPTADA).

Em segundo lugar, para ilustrar o caso de ocorrência do ponto limite, também conhecida como instabilidade por *Snap-Through*, tem-se a Figura 2.5, que se caracteriza por:

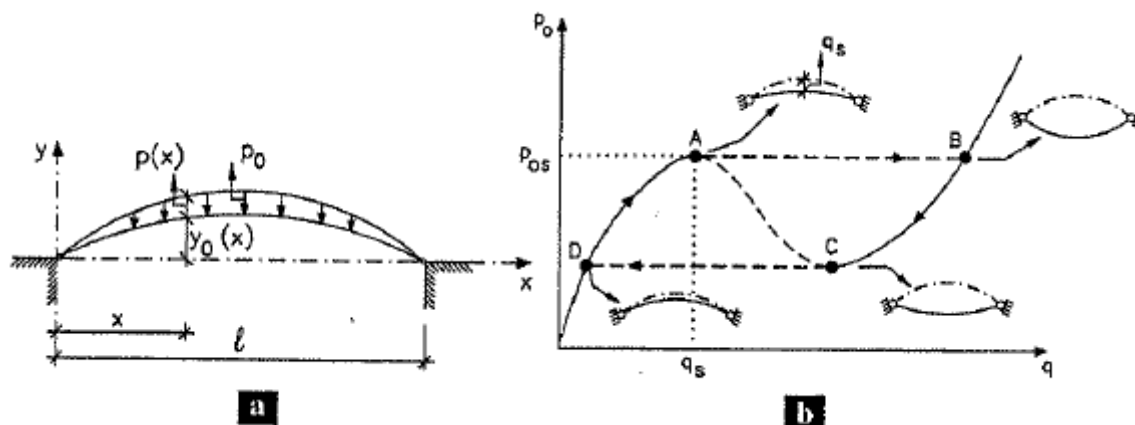
- 1) Uma trajetória de equilíbrio não linear, com início na origem do diagrama carga X deslocamento;
- 2) Um ponto limite, que corresponde ao vértice da trajetória de equilíbrio, no qual o equilíbrio passa de estável para instável;
- 3) Um “*snap*”, fenômeno que ocorre quando a estrutura se encontra no ponto limite e é submetida a um ligeiro aumento de carga. A partir daí, a estrutura passa para uma configuração de equilíbrio afastada e estável, através de uma passagem dinâmica.

Figura 2.5 – Instabilidade por *snap-through*

Fonte: Reis e Camotim (2001).

Um exemplo muito comum para que ocorra este tipo de instabilidade é o caso de arcos abatidos carregados transversalmente, apresentado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Arco abatido ($h/l \ll 1$) que apresentará instabilidade por *snap-through*.
a) geometria e carregamento; b) trajetória do equilíbrio



Fonte: Reis e Camotim (2001).

Neste exemplo, à medida que a carga aumenta, o arco se deforma até atingir o ponto limite A. Se neste ponto houver um pequeno acréscimo de carregamento, haverá uma mudança súbita no sinal da curvatura do arco, e este passa para o ponto B, fenômeno conhecido como "*snap*".

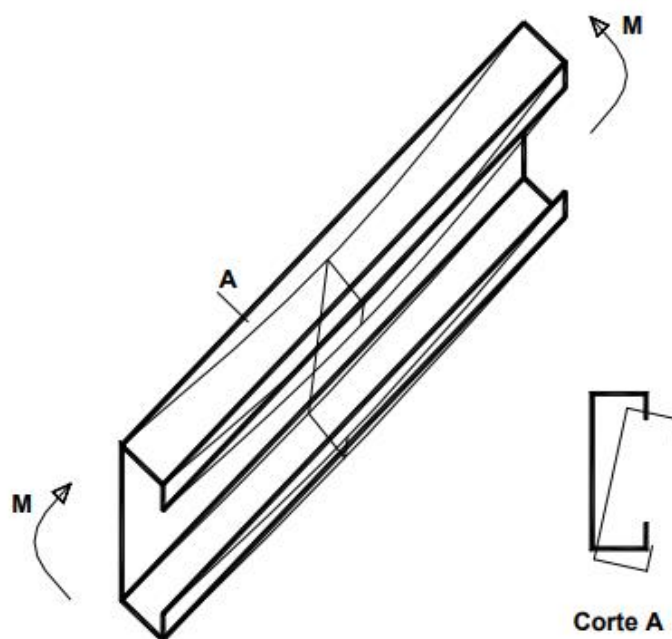
Agora, com os dois tipos de ocorrência de instabilidade apresentados, fica fácil perceber que o trabalho em questão se trata de uma pesquisa que aborda uma instabilidade por bifurcação do equilíbrio. O montante em análise estará sujeito a uma ação de compressão, o que se assemelha ao caso da coluna de Euler. Porém, não é exatamente a mesma situação pois a coluna do silo está fixada ao longo do seu comprimento à chapa ondulada da casca do silo.

2.3. Modos de Instabilidade

Barras comprimidas estão sujeitas a três modos diferentes de instabilidade ou a efeitos simultâneos deles, de acordo com suas características geométricas. Estes modos são: global, local e/ou distorcional.

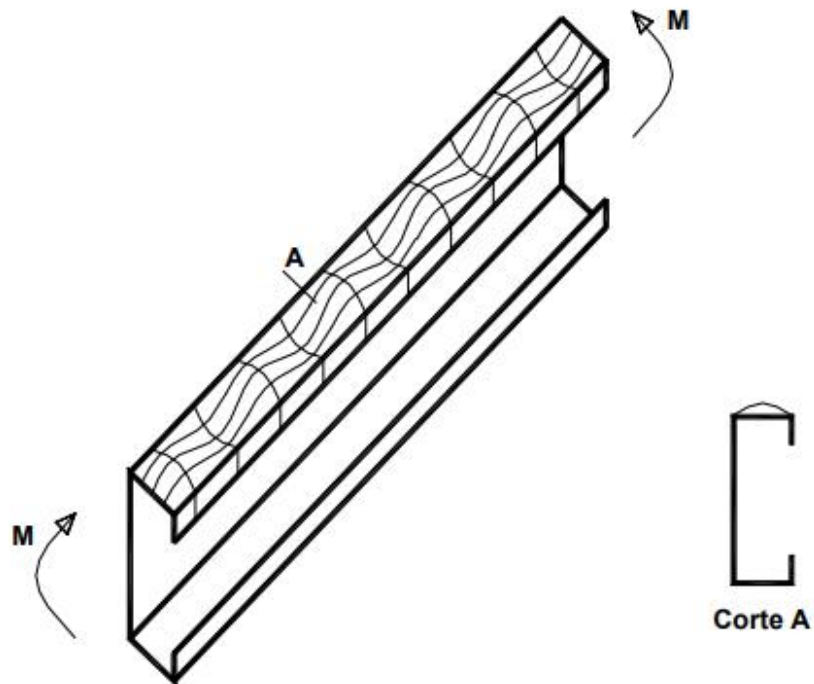
O modo global está associado à configuração deformada do eixo da barra. O modo local, por sua vez, está associado à instabilidade dos elementos que compõem o perfil, também conhecido como instabilidade de chapa. Já o modo distorcional está ligado à mudança de forma da seção transversal do perfil. Os três modos estão representados nas Figura 2.7, Figura 2.8 e Figura 2.9

Figura 2.7 – Modo de flambagem global



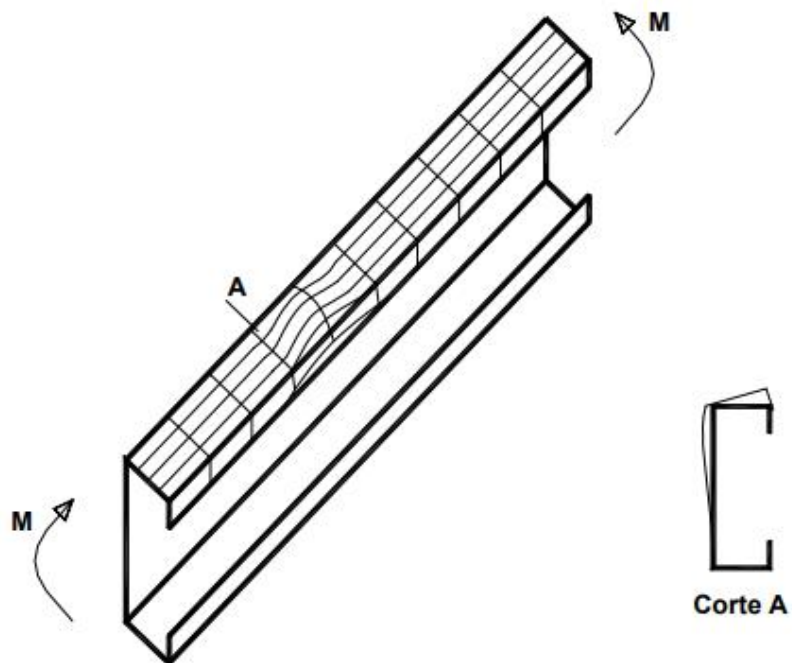
Fonte: Javaroni (1999).

Figura 2.8 – Modo de flambagem local



Fonte: Javaroni (1999).

Figura 2.9 – Modo de flambagem distorcional



Fonte: Javaroni (1999).

Na Figura 2.7 tem-se a representação de uma flambagem global, no qual há torção do perfil que está acompanhado a um deslocamento lateral.

Na Figura 2.8 aparece uma flambagem local na qual, as arestas do perfil permanecem nas mesmas posições e os ângulos entre os elementos que compõem o perfil continuam inalterados. No entanto, os elementos apresentam deslocamentos perpendiculares ao seu plano. Este tipo de flambagem é predominante em perfis de comprimento destravado pequeno se comparado às dimensões do perfil.

Na Figura 2.9, por sua vez, o perfil atingiu uma flambagem distorcional, no qual ocorre um giro do conjunto mesa-enrijecedor. Assim, os ângulos entre elementos são alterados, por consequência, há translação na aresta de união da mesa com o enrijecedor.

3. NORMAS INTERNACIONAL E ESTRANGEIRAS RELEVANTES

Parte do estudo teórico deste trabalho está pautado em analisar e comparar a forma como as normas estrangeiras abordam o dimensionamento das colunas de silos metálicos com relação à instabilidade, já que a norma brasileira carece desta especificidade.

Os institutos mundiais e suas respectivas normas específicas para silos que foram levados em consideração na pesquisa são:

- *American Concrete Institute ACI 313-97 “Standard practice for design and construction of concrete silos and stacking tubes for storing granular materials”;*
- *American Society of Agricultural Engineers ANSI/ASAE EP433 DEC1988 (R2011) “Loads exerted by free-flowing grain on bins”;*
- *Australian Standard AS 3774-1996 “Loads on bulk solids containers”;*
- *European Standard EN 1991-4:2006 “Eurocode 1 – Actions on structures – Part 4: Silos and Tanks”;*
- *European Standard EN 1993-4-1:2007 “Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 4-1: Silos”;*
- *Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM 1977 “Silos aéreos metálicos para almacenamiento de granos cilíndricos y desarmables”*
- *International Standard ISO 11697:1995 “Bases for design of structures - Loads due to bulk materials”.*

3.1. Normas Estadunidenses

As normas ACI 313-97 e a ANSI/ASAE EP433 DEC1988 não possuem nenhuma abordagem sobre o dimensionamento das colunas dos silos metálicos cilíndricos quanto à instabilidade. Contudo a bibliografia estadunidense é bem vasta e, portanto, possui alguns livros que abordam esta temática e será apresentada no item 4.2.

3.2. Normas Australianas

A norma australiana que faz referência a silos é a AS 3774-1996, porém ela está enfocada no cálculo das cargas atuantes no silo e suas combinações, não fazendo alusão ao tema em questão.

3.3. Normas Europeias

As normas europeias que fazem abordagens específicas sobre silos são duas: EN 1991-4:2006, que trata do cálculo das ações atuantes no silo; e a EN 1993-4-1:2007, que define como dimensionar os elementos estruturais metálicos dos silos. Nesta última, também conhecido como *Eurocode 3*, no item 5.3.4, é abordado o tema de chapas onduladas horizontalmente, e em seu subitem 5.3.4.3, alude-se sobre o dimensionamento à instabilidade destas chapas submetidas à compressão axial. Dois métodos de cálculo são previstos para o caso em que essas chapas são enrijecidas por montantes de acordo com a distância entre os mesmos (d_s): Método A, onde esta distância é menor do que $d_{s,max}$, Equação (3.1); e Método B, onde a distância entre colunas é maior do que o $d_{s,max}$.

$$d_{s,max} = k_{dx} \left(\frac{r^2 D_y}{C_y} \right)^{0,25} \quad (3.1)$$

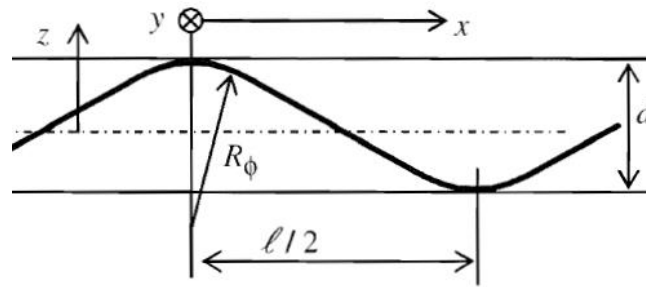
onde k_{dx} é uma constante de valor recomendável 7,4; r o raio do silo; D_y a rigidez a flexão por unidade de comprimento paralela à corrugação e C_y é a rigidez a tração por unidade de comprimento paralela à corrugação. Os últimos dois são dados pelas Equações (3.2) e (3.3).

$$D_y = 0,13Et d^2 \quad (3.2)$$

$$C_y = Et \left(1 + \frac{\pi^2 d^2}{4l^2} \right) \quad (3.3)$$

onde E é o módulo de elasticidade; t a espessura da chapa; d a altura da onda da corrugação e l o comprimento da onda, como apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Dimensões da chapa ondulada



Fonte: *Eurocode 3 – Part 4-1: Silos* (2007)

O Método A considera o silo como uma casca ortotrópica, e define a carga crítica como o menor valor entre a Equação (3.4) e (3.5), onde $N_{x,Rcr}$ é a carga crítica por unidade de comprimento de casca, dada pela Equação (3.6).

$$N_{x,Rd} = \frac{\alpha_x N_{x,Rcr}}{\gamma_{m1}} \quad (3.4)$$

$$N_{x,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{ds \gamma_{m0}} \quad (3.5)$$

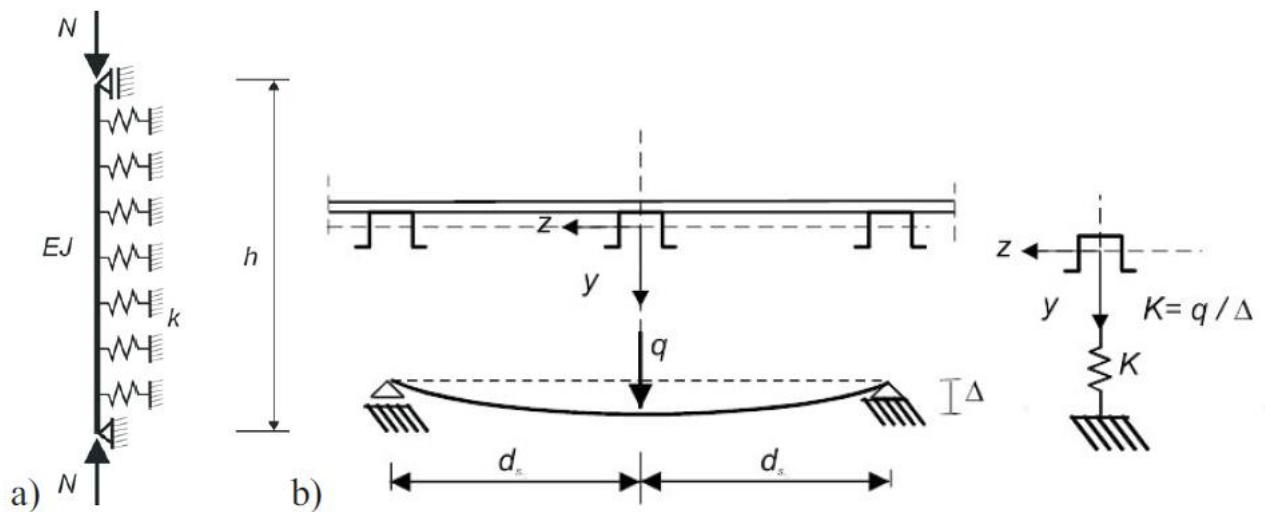
$$N_{x,Rcr} = \frac{1}{j^2 \omega^2} \left(A_1 + \frac{A_2}{A_3} \right) \quad (3.6)$$

sendo o termo j o número crítico de ondas ao longo da circunferência do silo; ω , A_1 , A_2 e A_3 termos cujas equações estão descritas no ANEXO A, todos calculados a partir das dimensões da chapa, do montante e dos anéis de vento do silo; α_x o fator de redução de flambagem elástica, recomendado 0,8; γ_{m1} e γ_{m0} os coeficientes de ponderação das resistências, 1,1 e 1, respectivamente; f_y a resistência ao escoamento do material do montante e A_{eff} a área efetiva do perfil do montante.

Nas observações presentes no Método A, vale ressaltar o NOTE 2, do item 5.3.4.3.3.. Neste item faz-se uma referência aos limites em que a flambagem deve ser analisada. Define-se que o limite inferior ao qual a flambagem deve ocorrer é o ponto onde há mudança de espessura das chapas ou há mudança na seção transversal do montante. Assim, a resistência à flambagem em cada uma deve ser analisada separadamente.

Já o Método B analisa as colunas como os únicos elementos que suportam as cargas axiais de compressão. Neste método, pode-se assumir que a rigidez das chapas não influencia na resistência à flambagem normal à parede do silo, assim o montante terá que resistir à uma compressão simples, ou que há influência da resistência da chapa, abordando os montantes como se fossem uma viga apoiada em uma base elástica, onde a rigidez K é definida pela rigidez que a chapa impõe nas colunas, cujo esquema está apresentado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Análise de coluna como uma viga apoiada em base elástica



Fonte: Rejowski e Iwicki (2016)

Desta forma, a carga crítica de flambagem para este método é definido pelo menor valor entre as Equações (3.7) e (3.8), no qual I_y é a momento de inércia do montante no sentido de fletir para fora da parede do silo.

$$N_{b,Rd} = \frac{2\sqrt{EI_y * K}}{\gamma_{m1}} \quad (3.7)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{m1}} \quad (3.8)$$

onde K é calculada pela Equação (3.9), e o k_s recomendado é 6.

$$K = k_s \frac{D_y}{d_s^3} \quad (3.9)$$

A dedução da origem desta formulação e a justificativa da recomendação do $k_s=6$ está apresentada no APÊNDICE A.

Neste método também há uma alusão ao comprimento efetivo de flambagem. O item 5.3.4.3.4 (2) especifica que o comprimento efetivo da coluna que deve ser usado para determinar o fator de redução para a relevante curva de flambagem para determinada seção transversal, é a distância entre os anéis de vento.

Com relação à instabilidade distorcional e local, a norma europeia de silos sugere que sejam seguidas as equações da *EN 1993-1-3:2006 “Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting”* que por sua vez também indica que seja usada a *EN 1993-1-5:2006 “Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-5: General rules - Plated structural elements”*. Desta maneira, a Equação (3.10) determina a tensão elástica crítica para a instabilidade distorcional e a Equação (3.11) para a instabilidade local, ambas desconsiderando o efeito das chapas do silo como suporte das colunas.

$$\sigma_{cr,dist} = \frac{2\sqrt{K_w EI}}{A_s} \quad (3.10)$$

$$\sigma_{cr,loc} = K_\sigma \frac{\pi^2 E t^2}{12(1 - \nu^2) b^2} \quad (3.11)$$

onde, K_w é a rigidez ao giro da mesa do perfil do montante, definida no item 5.5.3.1 da *EN 1993-1-3:2006*; K_σ é o coeficiente de flambagem de acordo com a teoria de casca ortotrópica, definida no Anexo A da *EN 1993-1-5:2006*; t é a espessura da chapa; ν o coeficiente de Poisson e b é o comprimento da chapa.

3.4. Normas Argentinas

A IRAM 1977 uma das primeiras e principais normas referências para os estudos de silos metálicos de chapas corrugadas no Brasil, também não contempla nenhuma informação sobre o dimensionamento dos montantes dos silos.

3.5. Normas Internacionais

A ISO 11697:1995 por ser a única norma internacional, é a maior referência para os brasileiros quando as normas brasileiras carecem de informação. Contudo, está enfocada no cálculo das cargas atuantes no silo, seus tipos de fluxo e pressões, não levando em consideração o dimensionamento em estudo.

3.6. Normas Brasileiras

No Brasil, a ABNT não possui nenhuma norma específica para o dimensionamento de silos. Contudo, algumas bibliografias sugerem como esta deve ser feita baseado nas normas vigentes. Desta maneira, a NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio, é a norma que indica qual a carga crítica de um montante submetido à compressão centrada. Esta carga depende do comprimento de flambagem para ser calculado, a qual é adotada pelos projetistas no Brasil, segundo Calil e Cheung (2007), como o comprimento entre chapas. Esta decisão não é tecnicamente embasada, ela vem sendo usada por tradição e recebe questionamentos devido a falhas de silos devido à instabilidade dos montantes.

4. ARTIGOS CIENTÍFICOS E OUTRAS BIBLIOGRAFIAS

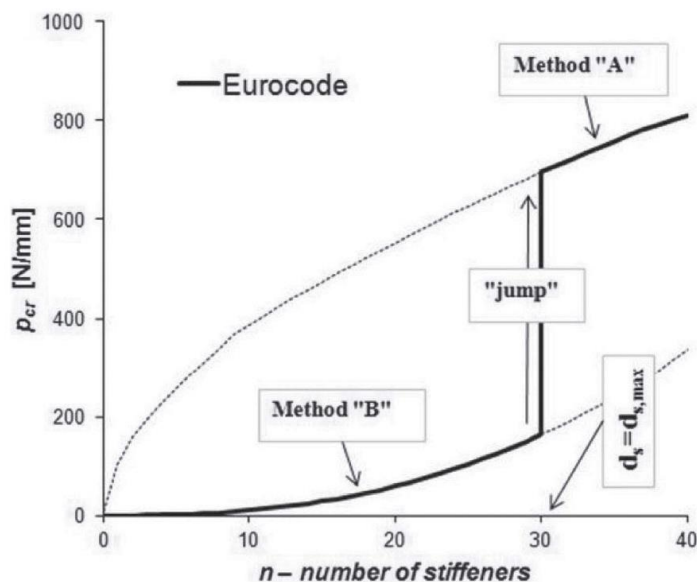
Alguns artigos científicos e outras bibliografias que abordam esse tema também serão apresentados, por possuírem um estudo mais recente e aprofundado do problema.

4.1. Artigos Científicos

Artigos publicados na *Engineering Failure Analysis (ELSEVIER)* e na *Thin-Walled Structures (ELSEVIER)* se mostraram interessantes na abordagem de estudo.

Recentemente, trabalhos numéricos e experimentais vêm sendo executados na Europa criticando a abordagem utilizadas pelo *Eurocode 3* na análise da instabilidade das colunas de silos metálicos. Estas críticas se devem à descontinuidade na utilização do Método A e Método B em relação ao cálculo da carga crítica à flambagem, como apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Descontinuidade do Método A e Método B propostos pelo Eurocode 3

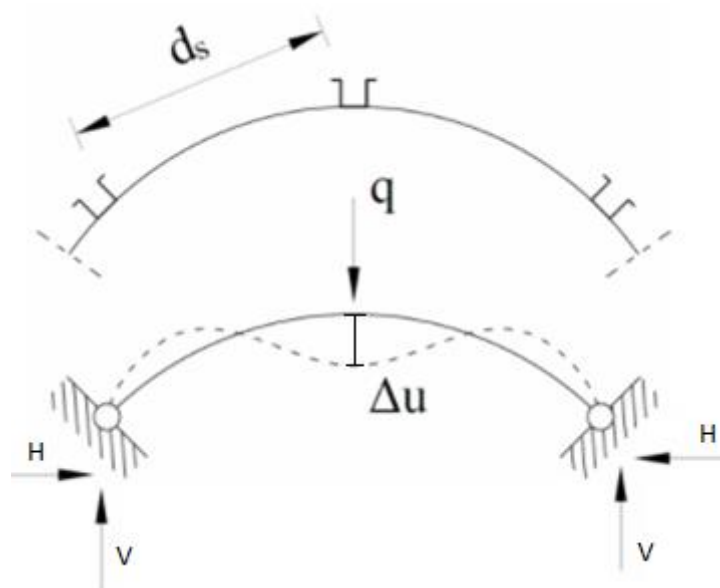


Fonte: Rejowski e Iwicki (2016)

Pesquisas realizadas por Iwicki, Rejowski e Tejchman (2015), Hotala et al. (2016), Rejowski e Iwicki (2016) observaram que o Método B como é proposto no *Eurocode 3* é extremamente conservativo. Desta forma, suas pesquisas acabam por propor: usar a teoria

de casca ortotrópica para o dimensionamento dos montantes independente da distância entre eles; ou modificar o Método A, alterando-se o cálculo da rigidez K da mola da base elástica e passando a considerar a influência da curvatura das chapas do silo na sua formulação, a qual é desprezada nas orientações do *Eurocode 3*, como apresentado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Esquema para a modificação da rigidez das chapas do silo



Fonte: Rejowski e Iwicki (2016)

Iwicki, Rejowski e Tejchman (2015) após realizarem análises numéricas no software ABAQUS, levando em consideração a não linearidade geométrica e física do material, propuseram o uso do Método A para qualquer distância entre os montantes, ou seja, a análise da instabilidade dos montantes sempre seria baseada na teoria de casca ortotrópica, cujos resultados foram mais aproximados aos encontrados nas análises numéricas do que usando o Método B como proposto no *Eurocode 3*.

Rejowski e Iwicki (2016) apresentaram uma nova formulação para a equação do K da base elástica do Método B, Equações (4.1) a (4.7), como uma segunda solução para a descontinuidade do gráfico da Figura 4.1. Os resultados encontrados ainda possuíam um erro de cerca de 20% comparado com as análises numéricas por elementos finitos.

$$\begin{aligned}
K &= \frac{8D_y}{R^3(2A_1 - 16X + 24A_1X^2f^2 + 16B_1X)} \\
&+ \frac{8D_y}{R^2(-4L + 3B_1L + 16Xf - 16LX^2 - 32A_1X^2f)} \\
&+ \frac{8D_y}{R^2(8A_1LX - 16B_1Xf + 4B_1LX^2)} \\
&+ \frac{8D_y}{R(A_1L^2 - 2L^2 + 16LX^2f - 8A_1LXf)}
\end{aligned} \tag{4.1}$$

onde

$$X = \frac{C_2 + C_3}{C_1} \tag{4.2}$$

$$\begin{aligned}
C_1 &= 4Lf + R^2 \text{sen}(2A_1) + 6A_1R^2 + 4A_1f^2 \\
&\quad - 4LR - 8A_1Rf
\end{aligned} \tag{4.3}$$

$$C_2 = \frac{R^2 \cos(2A_1)}{2} + f(2R \cos(A_1) - 2R + A_1L) \tag{4.4}$$

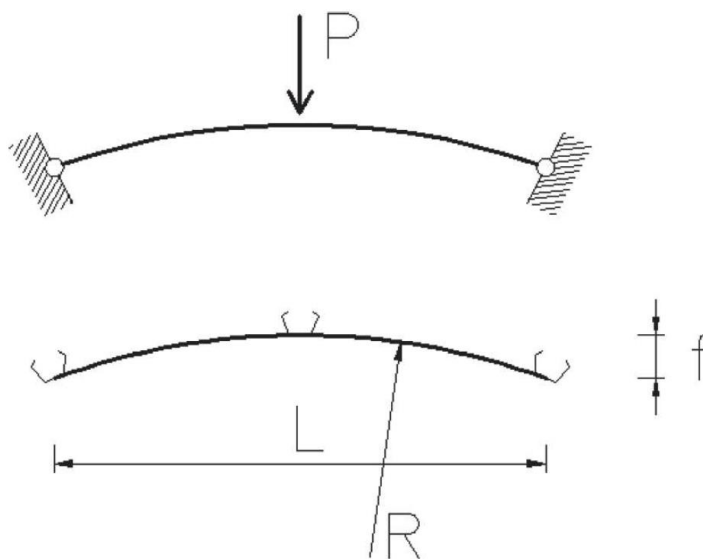
$$C_3 = \frac{3R^2}{2} - 2R^2 \cos(A_1) - A_1LR + LR \text{sen}(A_1) \tag{4.5}$$

$$A_1 = \arcsen\left(\frac{L}{2R}\right) \tag{4.6}$$

$$B_1 = \sqrt{1 - \frac{L^2}{4R^2}} \tag{4.7}$$

onde L é o comprimento de arco, R o raio do arco e f a altura do arco, como apresentado na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Arco em análise para cálculo de K

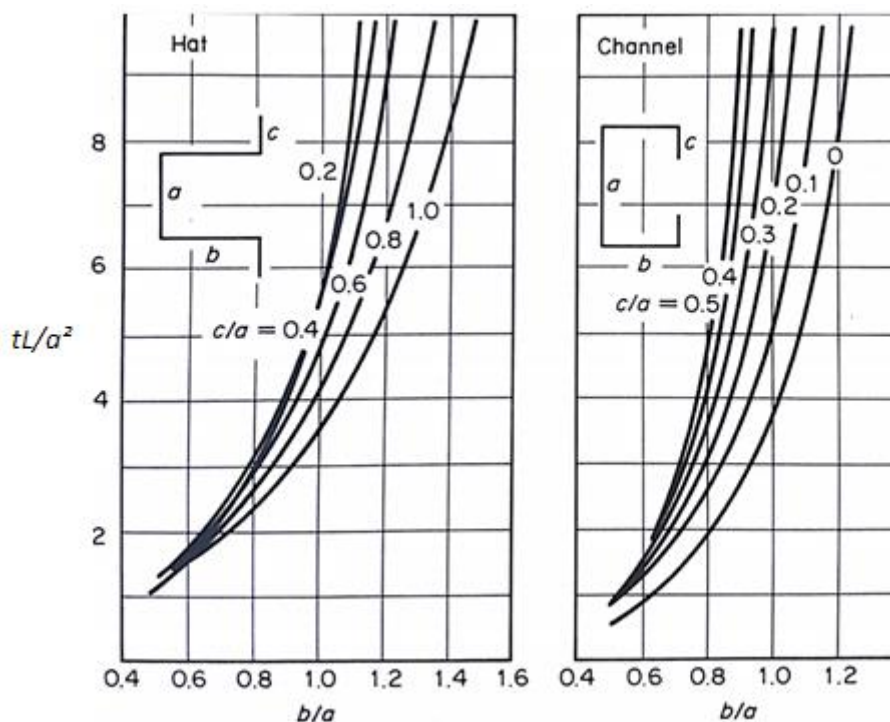


Fonte: Rejowski e Iwicki (2016)

4.2. Outras Bibliografias

Dentre a bibliografia estadunidense, tem-se como referência Gaylord, Jr. e Gaylord (1984). Muitos de suas atribuições já foram atualizadas e revisadas por normas mais recentes, porém, vale ressaltar algumas de suas contribuições. Seus estudos indicam que montantes longos submetidos à compressão falham normalmente pelo modo global e sua forma depende da seção transversal da mesma. Montantes de silos possuem, em geral, seção com somente um eixo de simetria. Logo, eles devem sofrer instabilidade por flexão com relação ao eixo principal perpendicular ao eixo de simetria ou por flexo-torção com relação ao outro eixo principal. A Figura 4.4 representa a curva dos modos de falha dos perfis mais usados nos montantes, cartola (*hat*) e C (*channel*). À esquerda da curva, o modo de falha seria uma flambagem por flexão simples, e à direita por flexo-torção. Os autores sugerem que caso o perfil proposto flambe por flexo-torção, é melhor redimensioná-lo do que verificar mais a fundo o seu modo de falha.

Figura 4.4 – Curva dos modelos de falha dos perfis mais usados nos montantes



Fonte: Gaylord, Jr. e Gaylord (1984)

Rotter (2001), em seu livro de dimensionamento de silos metálicos circulares, tem-se o trabalho de silos sem montantes, ou seja, uma casca isotrópica. Contudo, na seção em que avalia a resistência à flambagem ele pontua que este estudo deve ser feito dividindo a parede do silo em segmentos. Os elementos que delimitariam esses segmentos são anéis de vento ou a alteração da espessura das chapas. Assim, a análise da carga crítica de flambagem deve ser feita em cada uma dessas porções. Por mais que seja uma análise diferente da estudada neste presente trabalho, funciona como um indício para comprimentos de flambagem caso a formulação necessite deste número.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida por meio do estudo da instabilidade das colunas de silos metálicos de chapas onduladas através de: estudos teóricos, usando códigos normativos nacionais e estrangeiros, bem como artigos científicos da área de estudo; análise numérica, em elementos finitos com o programa ANSYS e análise de resultados experimentais, que foram realizados nos laboratórios de estruturas da EESC-SET.

A etapa do estudo teórico já foi apresentada nos capítulos anteriores, 2, 3 e 4. Como resultado do estudo teórico tem-se o modelo de cálculo proposto que será apresentado a seguir, assim como o modelo numérico e o experimental.

5.1. Modelo de Cálculo Proposto

Após analisar toda a bibliografia disponível em nível mundial, ainda se nota que nenhuma norma apresenta um modelo efetivo que apresente resultados com bom grau de aproximação para a definição de uma equação para o cálculo da carga crítica de flambagem dos montantes de um silo de chapas onduladas metálicas.

Contudo, os métodos que mais se assemelham ao modelo real são os apresentados pelo *Eurocode 3*, que considera o silo como uma casca ortotrópica ou considera o montante como uma viga apoiada em uma base elástica. A primeira consideração é utilizada para quando a distância entre os montantes, ds , seja menor que ds, max , Equação (3.1). Como em uma situação usual, a distribuição dos montantes ao longo da circunferência do silo é feita na medida que são posicionados dois montantes por chapa, então, a distância entre os montantes normalmente varia entre 1,40m e 1,50m. Para a situação de uma chapa usual, de espessura 0,95mm, altura de onda 12mm e comprimento de onda de 101,6mm, o ds utilizado será sempre maior do que o ds, max para silos de diâmetros até 19m. Como silos de até 19m de diâmetro abrange uma grande parte dos silos comumente utilizados, este trabalho preferiu se guiar pela teoria do Método B do *Eurocode 3*, ou seja, considerar o montante do silo como uma viga apoiada em base elástica.

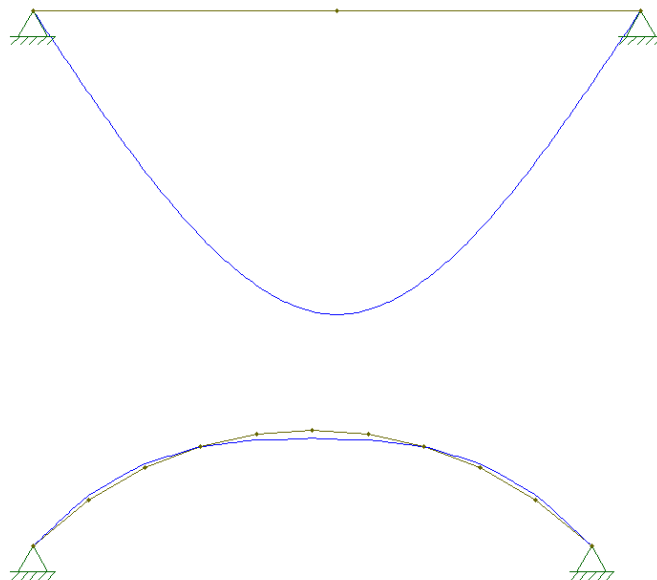
Porém, como foi apresentado no Capítulo 4, este modelo é muito conservador se usado exatamente como apresentado no código. Baseado nas ideias de modificação do K, apresentados por Rejowski e Iwicki (2016), surgiu uma nova proposta de equação.

Neste trabalho, a análise da rigidez K da chapa é feita aplicando uma carga centrada, q , no meio de um arco bi apoiado de comprimento $2ds$ e calculando-se o deslocamento vertical central, Δu , como demonstrado esquematicamente na Figura 4.2. O valor de K é obtido a partir da Equação (5.1).

$$K = \frac{q}{\Delta u} \quad (5.1)$$

Adotando a carga como unitária, verificou-se a diferença do deslocamento Δu para a situação da carga aplicada em um arco, com as dimensões do silo estudado por Rejowski e Iwicki (2016), e uma carga unitária aplicada em uma viga linear, como proposto no *Eurocode 3*, Figura 3.2. Usou-se como rigidez à flexão a formulação de D_y , Equação (3.2), para considerar a rigidez da chapa corrugada. A diferença nos deslocamentos, apresentada na Figura 5.1, foi cerca de 40 vezes maior quando não se considera a curvatura na chapa, o que me resulta em um K muito menor, na mesma proporção.

Figura 5.1 – Diferença no deslocamento Δu para aplicação de uma carga unitária, para a situação de uma viga reta e uma viga em arco.



Fonte: o autor

Desta maneira, a rigidez K , considerando-se a curvatura da chapa leva a uma situação mais real, tornando o modelo menos conservador.

A priori, procurava-se usar a formulação fornecida por Rejowski e Iwicki (2016), descrita nas Equações de (4.1) a (4.7), contudo, a tentativa de reprodução dos cálculos descritos no artigo não levaram a resultados iguais, o que levou a descartar esta possibilidade.

Assim, baseado no método dos esforços para estruturas hiperestáticas e na equação da linha elástica, o modelo da Figura 4.2 foi resolvido analiticamente e chegou-se aos valores das Equações (5.2) a (5.4), onde n é o número de montantes no silo, H a reação horizontal nos apoios e K a rigidez da mola em kN/mm^2 , para R , raio do silo, usado em mm. O memorial de cálculo utilizado está apresentado no APÊNDICE B.

$$\theta \text{ (em graus)} = \frac{360^\circ}{n} \quad (5.2)$$

$$H = \frac{-1 + 4 \cos(\theta) - 3 \cos(2\theta) - 2\theta \text{sen}(2\theta)}{8\theta + 4\theta \cos(2\theta) - 6\text{sen}(2\theta)} \quad (5.3)$$

$$K = \frac{-4D_y}{R^3(-4H - 2\theta + 2H\theta^2 \cos(\theta) + \theta^2 \text{sen}(\theta) + 4H \cos(\theta) + 2\text{sen}(\theta))} \quad (5.4)$$

Em seguida, para o cálculo da carga crítica do montante, o método B propunha usar o menor valor entre as Equações (3.7) e (3.8). A segunda é a carga máxima para que não ocorra o esmagamento do perfil, logo, ela se mantém. A primeira, por sua vez, faz alusão ao processo de instabilidade, sendo a carga do ponto de bifurcação do equilíbrio.

$$N_{b,Rd} = \frac{2\sqrt{EI_y * K}}{\gamma_{m1}} \quad (3.7)$$

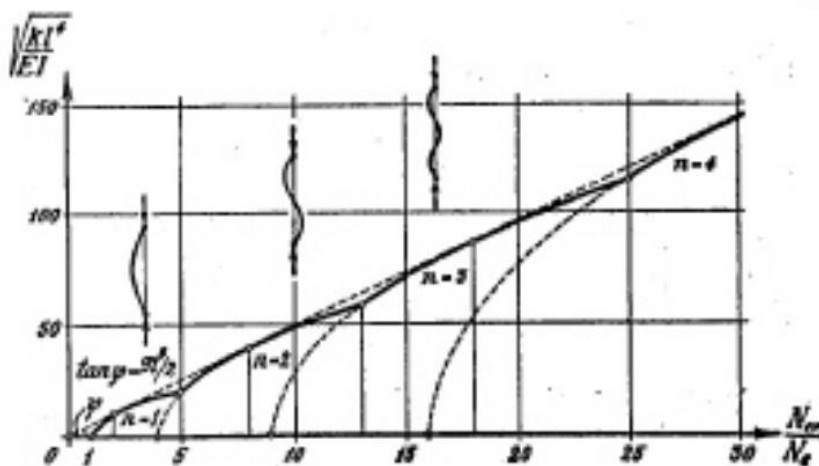
$$N_{b,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{m1}} \quad (3.8)$$

A Equação (3.7) tem sua dedução descrita por Hetenyi (1967). Sua composição se deu baseada em um estudo de flambagem de barras com extremidades rotuladas e comprimento finito, l . A Equação (5.5) define a carga crítica de flambagem deduzida por ele.

$$N_{cr} = n^2 \frac{\pi^2 EI}{l^2} + \frac{1}{n^2} \frac{kl^2}{\pi^2} \quad (5.5)$$

Para sucessivos números n , equivalentes ao número de meia ondas ocorrido na instabilidade da barra, a Equação (5.5) fornece uma família de curvas, apresentadas na Figura 5.2 pelas linhas tracejadas, representando a relação entre as dimensões da barra e a rigidez da base elástica versus a carga crítica de flambagem.

Figura 5.2 – Curvas da Equação da carga crítica de flambagem para uma barra finita bi-rotulada.



Fonte: Hetenyi (1967)

Segundo Hetenyi (1967), as cargas críticas calculadas pela Equação (5.5) vão diferir muito pouco dos valores produzidos pela Equação (3.7), representados pela curva cheia na Figura 5.2, que é a carga crítica de flambagem para uma barra de comprimento infinito. Assim, o uso da Equação (3.7) para o cálculo da carga crítica de flambagem dos montantes de um silo de dimensões finitas, faz-se coerente, mesmo a equação não contemplando o comprimento do mesmo. Desta forma, ela se manterá no modelo de cálculo proposto neste trabalho.

5.2. Análise Numérica

Foi realizado uma análise numérica utilizando o software ANSYS 19.2. A mesma geometria do silo ensaiado experimentalmente foi modelada em elementos finitos, a fim de

se ter um modelo numérico para servir de comparação com os resultados que foram encontrados experimentalmente.

A casca do silo foi modelada em elementos do tipo SHELL63 e os montantes em BEAM4. Para introduzir as características da casca ondulada usou-se para a mesma um material linear ortotrópico, e para os montantes linear isotrópico.

A cobrejunta e o anel de vento não foram usados nesta modelagem.

Mais detalhes da modelagem e dos resultados encontrados serão apresentados no Capítulo 6, item 6.2.

5.3. Análise Experimental

A análise experimental correspondeu ao ensaio de um silo de 3637,8mm de diâmetro, 8 montantes e altura de 2743,2 mm (3 anéis). A escolha do modelo do ensaio foi baseada nos experimentos realizados por Hotala et al. (2016), cuja imagem está apresentada na Figura 5.3.

Figura 5.3 – Modelo Experimental



Fonte: Hotala et al. (2016)

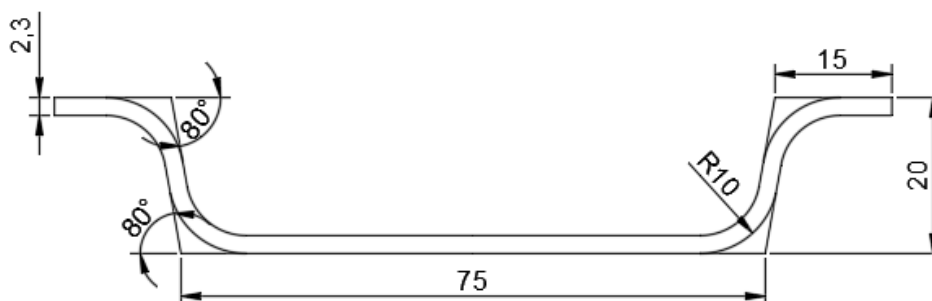
Seus experimentos foram feitos comprimindo-se centralmente os 8 montantes de um silo de 3,8m de diâmetro e 2,635m de altura. Alguns montantes utilizavam perfis

inteiros e outros possuíam uma cobrejunta no meio da altura, a fim de verificar a maneira como a ligação trabalha quando o perfil está submetido à compressão. Contudo, esta pesquisa não obteve resultados muito esclarecedores, pois os montantes durante os ensaios acabaram sofrendo colapso por esmagamento da seção transversal, e não por instabilidade.

Desta maneira, decidiu-se realizar um ensaio semelhante ao exemplificado na Figura 5.3, acrescentando algumas modificações, para se adequar às exigências do laboratório e alcançar o colapso pretendido. A indústria Kepler Weber forneceu o material necessário para a realização dos experimentos.

O perfil do montante teve suas dimensões definidas a fim de induzir o colapso por instabilidade, já que os perfis usualmente utilizados pela indústria sofreriam esmagamento da seção transversal antes da instabilidade, para essas dimensões do silo. Então, o perfil do montante utilizado está representado pela Figura 5.4, e possui área de $292,5 \text{ mm}^2$; espessura de $2,30 \text{ mm}$ e momento de inércia perpendicular ao eixo de simetria do perfil de 28980 mm^4 , considerando o eixo de referência de análise passando pelo ponto de ligação entre montante e chapa.

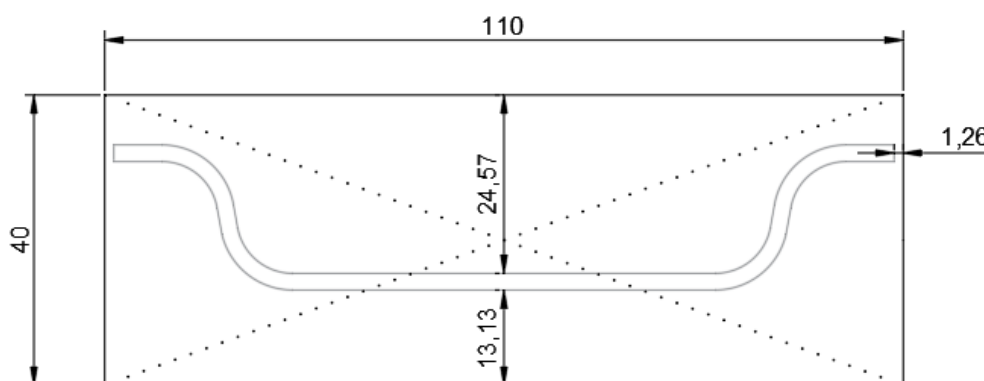
Figura 5.4 – Perfil do montante experimental



Fonte: o autor

Para facilitar a aplicação do carregamento no ensaio, a indústria forneceu uma chapa de topo soldada de espessura 10 mm em um dos lados do montante, onde o centro da mesma coincidia com o centro de gravidade do perfil, como apresentado na Figura 5.5.

Figura 5.5 – Chapa de topo para aplicação da carga



Fonte: o autor

Com relação à base do montante, foi soldado um perfil de base, equivalente aos comumente usados pela indústria, que na prática serve para ligar o montante à fundação. Este tipo de ligação está representada na Figura 5.6.

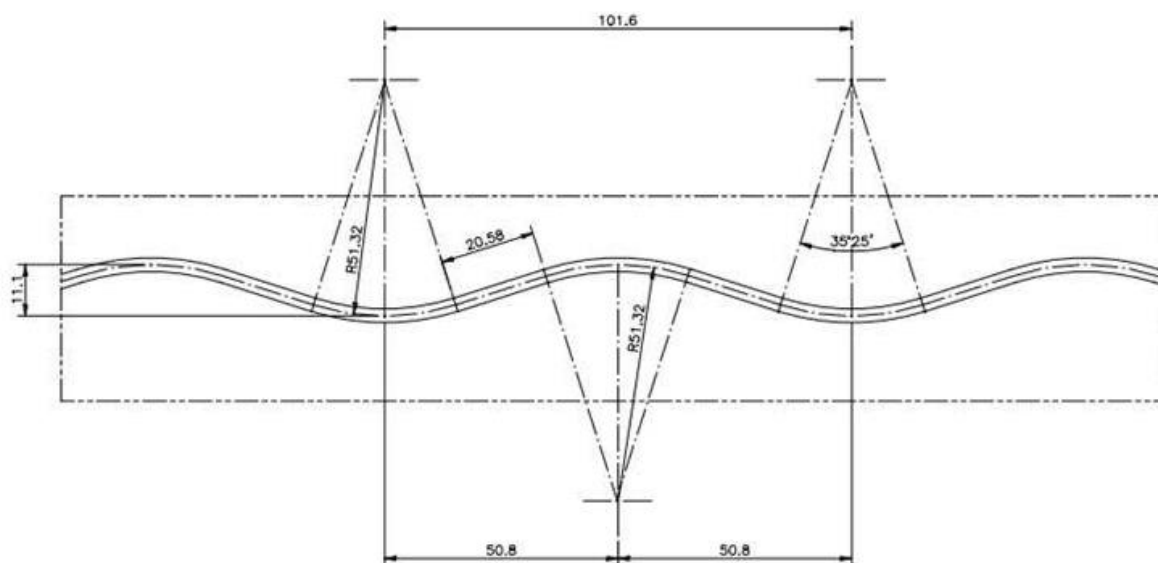
Figura 5.6 – Perfil de ligação montante-fundação



Fonte: o autor

Com relação à chapa utilizada para compor as paredes do silo, foram utilizadas chapas onduladas de espessura 0,95mm, cujas características geométricas estão apresentadas na Figura 5.7.

Figura 5.7 – Chapa ondulada experimental



Fonte: o autor

Além disto, para poder avaliar a ligação e a influência da cobrejunta entre os perfis e a interferência dos anéis de vento na instabilidade dos montantes, quatro montantes possuíam cobrejunta na metade da altura do silo. Além disso, decidiu-se por experimentar quatro montantes, dois com cobrejunta e dois sem, com a presença de um anel de vento na metade da altura do silo. Assim, foram realizados ensaios em dois montantes de cada situação, a saber:

- 2 montantes sem cobrejunta no perfil e sem anel de vento
- 2 montantes com cobrejunta no perfil e com anel de vento
- 2 montantes sem cobrejunta no perfil e sem anel de vento
- 2 montantes com cobrejunta no perfil e com anel de vento

Para verificar o módulo de elasticidade do material e tensão de escoamento, ensaios de tração também foram realizados com amostras retiradas da mesma bobina as quais os perfis foram conformados.

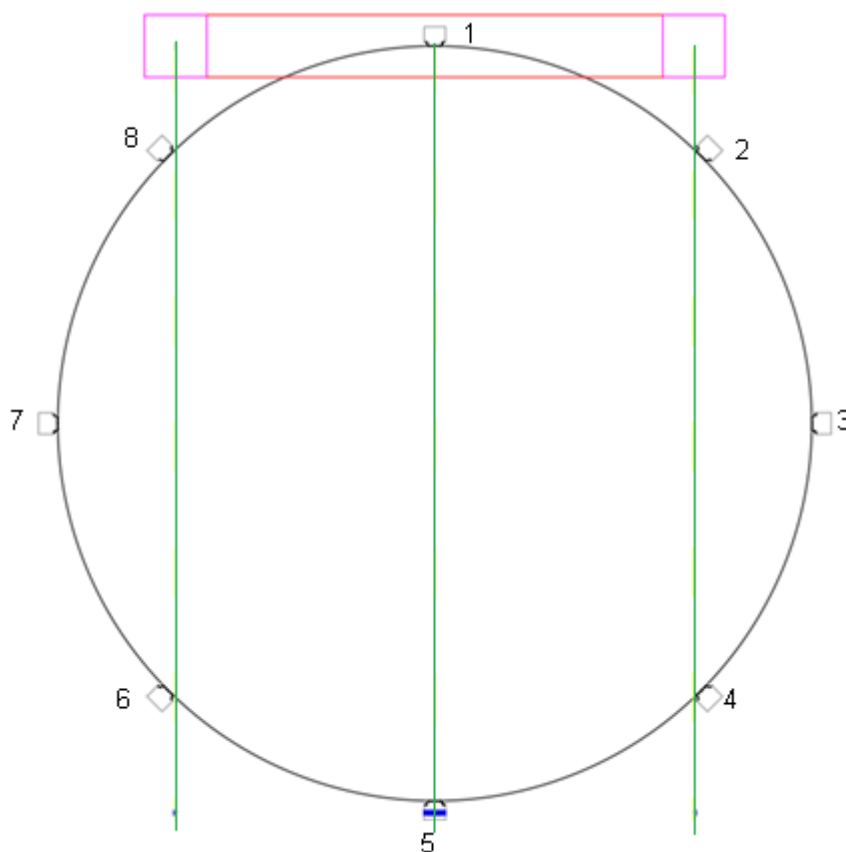
Todos os projetos produzidos pela indústria e usados na fabricação dos materiais utilizados nos ensaios estão anexados no ANEXO B, assim como o certificado do aço utilizado para a fabricação dos mesmos.

O procedimento experimental ocorreu ensaiando, separadamente, cada perfil, com aplicação de carga usando um cilindro hidráulico. Para isso, foi utilizado um pórtico de reação de 2,5m de comprimento, de eixo a eixo, em vermelho na Figura 5.8, que estava

fixado nas canaletas da laje de reação do laboratório. O montante posicionado do lado oposto ao montante que seria ensaiado, estava fixado na laje de reação a partir de uma estrutura de contenção, para evitar o tombamento do silo durante o ensaio, em azul na Figura 5.8. Além disso, foram utilizados transdutores para determinar o deslocamento transversal ao eixo do perfil, no sentido da possível instabilidade global.

A cada ensaio finalizado, houve a necessidade de girar o silo em 45°, já que o pórtico de aplicação de carga estava fixo. Assim, fazia-se o destravamento da contenção do silo, e o mesmo era girado e colocado no novo posicionamento. A contenção, então, era travada novamente, na posição do montante oposto ao que seria futuramente ensaiado e, após nova instrumentação, um novo ensaio era iniciado.

Figura 5.8 – Esquema do experimento



Fonte: o autor

Finalizado os projetos e planejamento dos ensaios, passou-se para a fase de instrumentação, etapa de suma importância, pois os resultados encontrados são reflexos

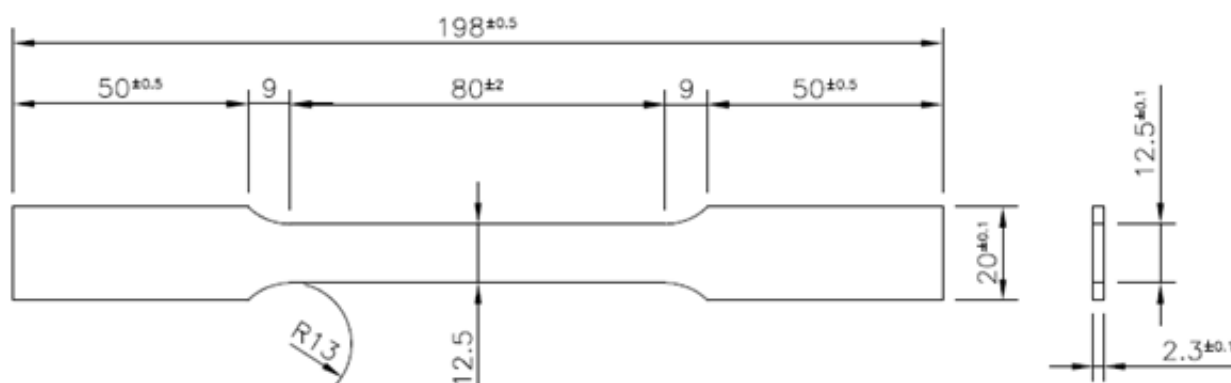
diretos desta fase preparatória. Assim, a seguir, serão apresentados como os ensaios deste trabalho foram preparados e instrumentados.

5.3.1. Ensaios de Caracterização do Material

Foram realizados ensaios de caracterização em quatro corpos de prova (CP) à tração, a fim de aferir as propriedades do material: módulo de elasticidade, tensão de escoamento e tensão última.

Estes ensaios foram realizados nas instalações do Departamento de Engenharia de Materiais da EESC-USP, usando os corpos de prova de geometria apresentados na Figura 5.9. Estes corpos de prova foram retirados da bobina de aço usada na fabricação dos montantes.

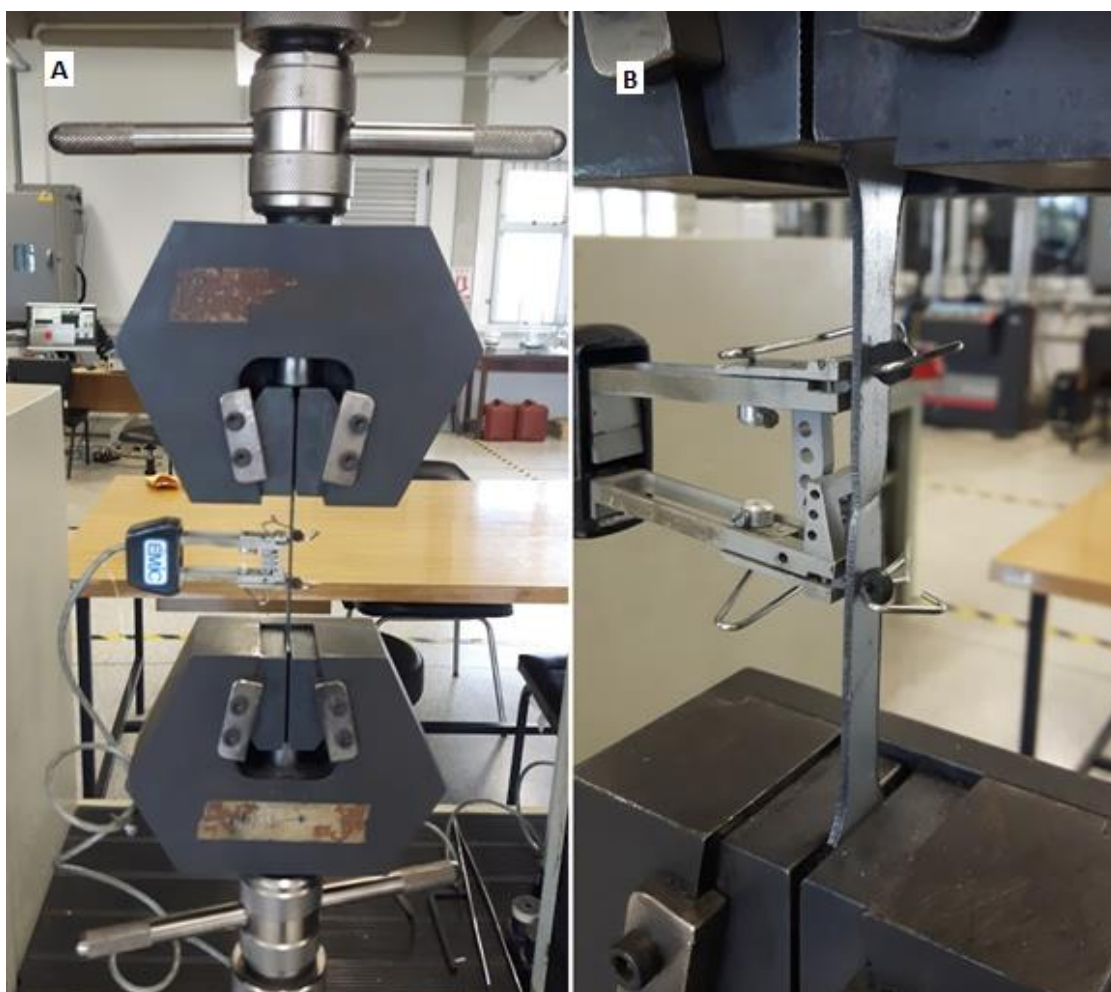
Figura 5.9 – Corpos de Prova para o ensaio de tração



Fonte: Projeto Kepler Weber – Código: 3100036342 (ANEXO B)

As extremidades do corpo de prova foram presas às prensas da máquina de ensaio, apresentada na Figura 5.10A, e a porção intermediária, de menor largura, onde ocorreu a falha por tração, foi instrumentada com um extensômetro de 25mm de comprimento inicial, conforme Figura 5.10B. Um sistema de aquisição automática de dados gravou os dados da força aplicada pela máquina e da deformação medida pelo extensômetro ao longo do ensaio.

Figura 5.10 - Instrumentação de ensaio à tração



Fonte: o autor

Os dados gravados pelo sistema de aquisição, bem como os resultados das propriedades mecânicas do material serão apresentados no Capítulo 6.

5.3.2. Ensaio dos Montantes

Para que o ensaio dos montantes pudesse ser efetuado, foi necessário inicialmente a montagem do silo, e do pórtico de reação. Estas montagens e os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas da EESC-USP.

O corpo do silo era composto por 12 chapas onduladas, de 0,95mm de espessura, e 8 montantes, sendo 4 com cobrejunta e 4 sem cobrejunta, com espessura de 2,3mm e características geométricas apresentadas na Figura 5.4. O material foi fornecido pela indústria Kepler Weber e entregue pela transportadora conforme Figura 5.11.

Figura 5.11 – Material do silo entregue pela fornecedora.



Fonte: o autor

As ligações chapa-chapa e chapa-montante foram feitas usando parafusos sextavados M10x25, classe de resistência 8.8, e com porcas sextavadas M10, classe 8, conforme Figura 5.12. O aço utilizado tanto para chapas quanto para montantes foi o ASTM A653 G60, certificado do aço apresentado no ANEXO B. A montagem do silo foi realizada com o auxílio da ponte rolante do laboratório para o içamento das chapas, como apresentado na Figura 5.13, e de uma parafusadeira elétrica para apertar as ligações.

Figura 5.12 – Parafuso e porca usados na ligação das chapas e montantes



Fonte: o autor

Figura 5.13 – Montagem Silo



Fonte: o autor

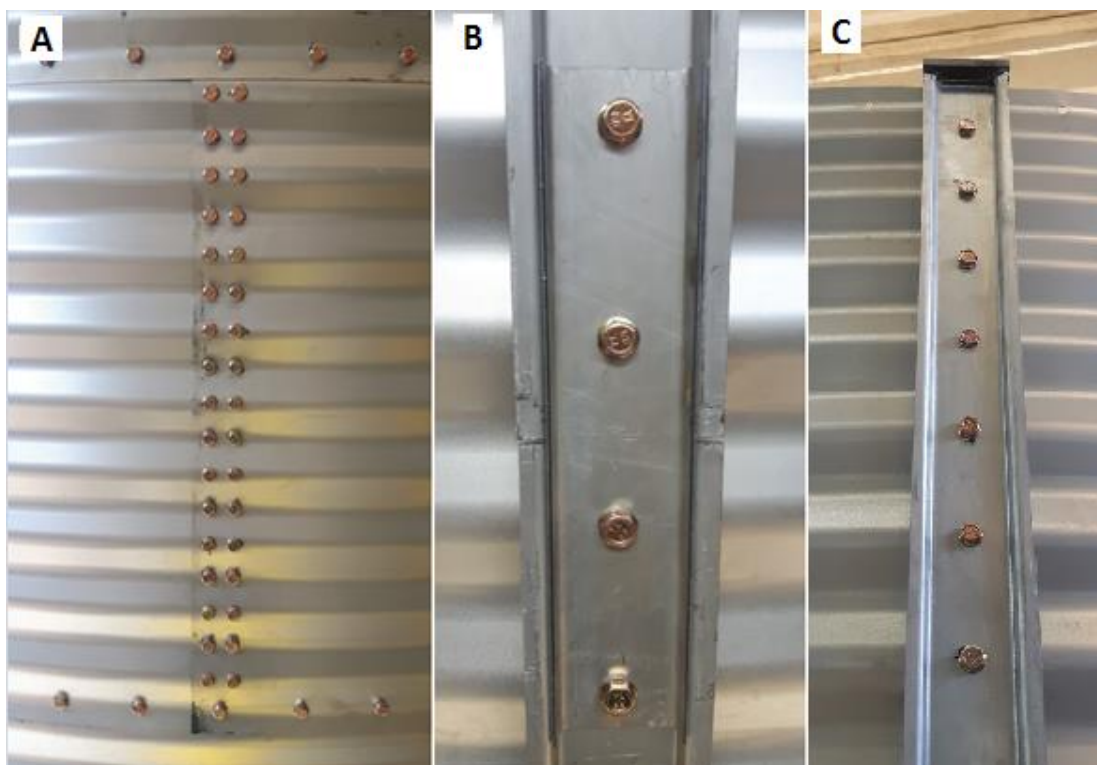
Após finalizada a montagem do silo, chegou-se à configuração da Figura 5.14, e as ligações chapa-chapa, chapa-montante e cobrejunta, estão explicitadas na Figura 5.15.

Figura 5.14 – Silo montado



Fonte: o autor

Figura 5.15 – Características das ligações: A) Ligação chapa-chapa, B) Cobrejunta, C) Ligação chapa-montante



Fonte: o autor

Após a montagem do silo, partiu-se para a montagem do sistema de aplicação de carga. Inicialmente, acoplou-se a célula de carga, marca ELK, capacidade 500kN, no pórtico de reação, para que o mesmo pudesse ser içado e fixado nas canaletas da laje de reação. Na Figura 5.16 tem-se o registro de ambos processos.

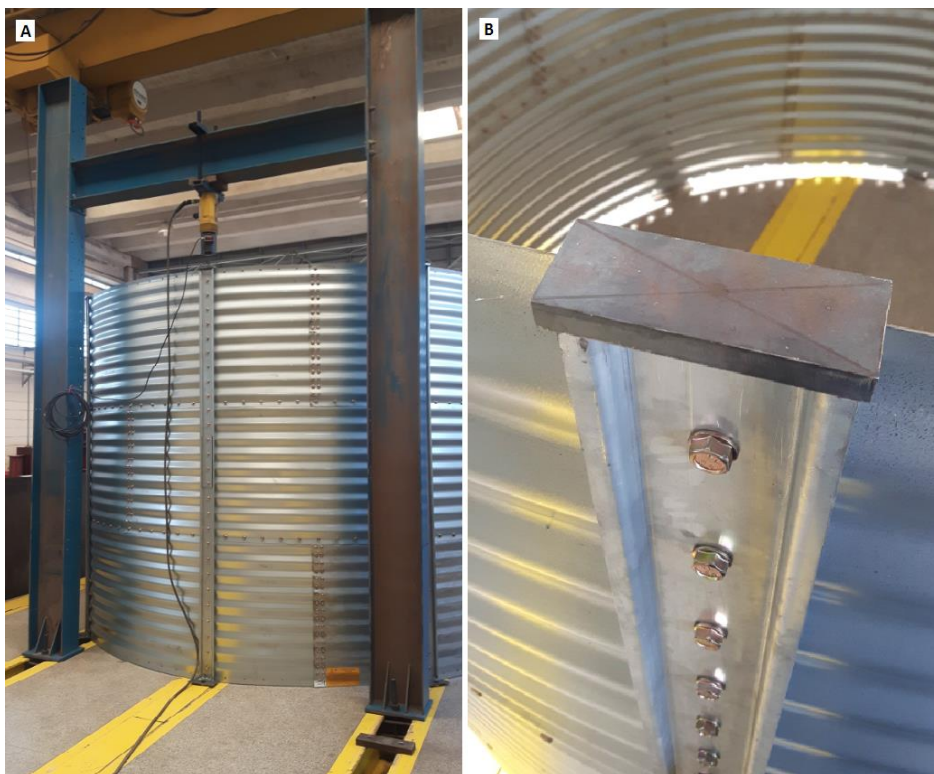
Após fixado o pórtico nas canaletas da laje de reação, centrou-se o silo de acordo onde estava estacionado o pórtico, como mostra a Figura 5.17A . Desta forma, o pistão de aplicação de carga da célula de carga ficou centrado na chapa de topo existente em cima do montante, Figura 5.17B, garantindo, assim, que a carga pudesse ser aplicada no centro de gravidade do perfil do montante.

Figura 5.16 – Fixação da célula de carga e içamento do pórtico



Fonte: o autor

Figura 5.17 – Centralização do silo no pórtico de reação



Fonte: o autor

O próximo passo foi instrumentar o silo. Com o intuito de acompanhar os deslocamentos transversais que seriam provocados durante o procedimento de ensaio, usou-se três transdutores de deslocamento resistivos, marca KYOWA, deslocamento máximo de 100mm. Estes transdutores foram fixados em uma coluna metálica, que por sua vez estava fixado na laje de reação, Figura 5.18A. Utilizou-se um arame metálico, preso, por um lado, no cursor do transdutor e, do outro lado, no eixo do montante, para que essa medida de deslocamento pudesse ser medida com maior precisão. A fixação do arame no eixo do montante foi feita utilizando-se cola quente para pregar um aparato metálico, cujo gancho segurava a ponta do arame. A Figura 5.18B registra este sistema.

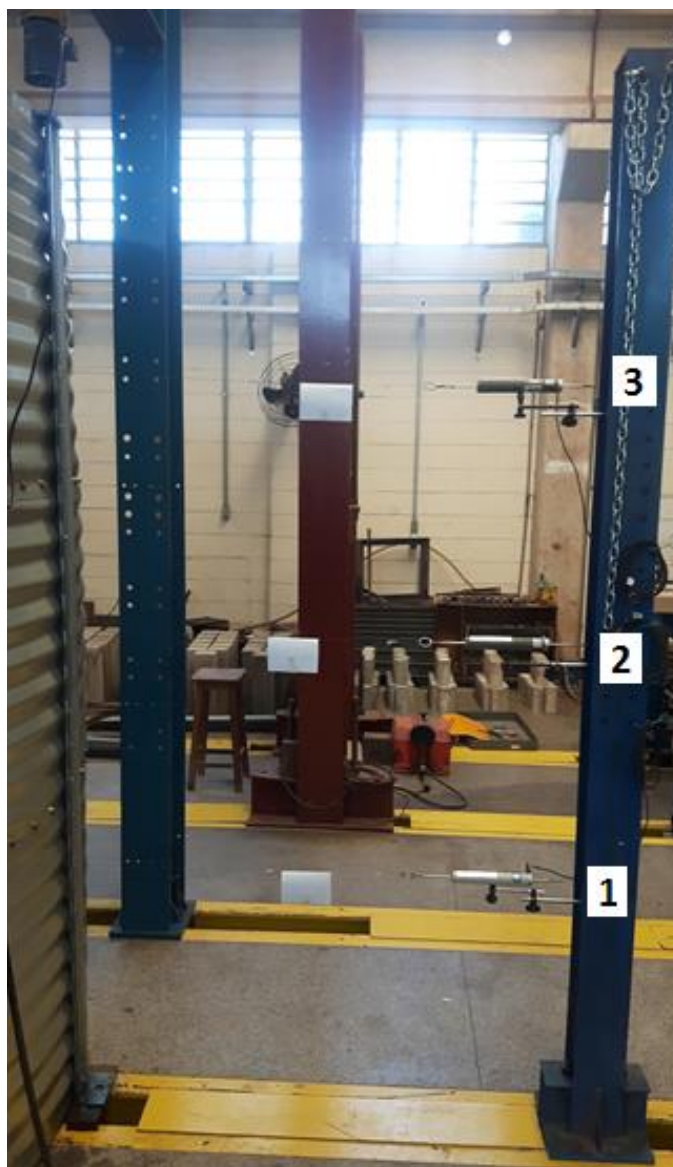
Figura 5.18 – Instrumentação dos transdutores



Fonte: o autor

Na Figura 5.19 pode-se observar o resultado da instrumentação dos três transdutores, os quais foram enumerados de baixo para cima e posicionados com relação à base do montante a 75cm, 140cm e 210cm, respectivamente.

Figura 5.19 – Posicionamento dos transdutores



Fonte: o autor

Para a condução dos ensaios houve a necessidade de fixar na laje de reação o montante posicionado do lado oposto ao montante que seria ensaiado, como havíamos previsto na Figura 5.8. Esta fixação se materializou com o uso de chapas metálicas que permitiam a fixação da chapa de base na laje de reação, Figura 5.20. A cada ensaio esta travamento foi desfeito, girava-se o silo, e novamente era refeito, para que se pudesse realizar uma nova aplicação de carga.

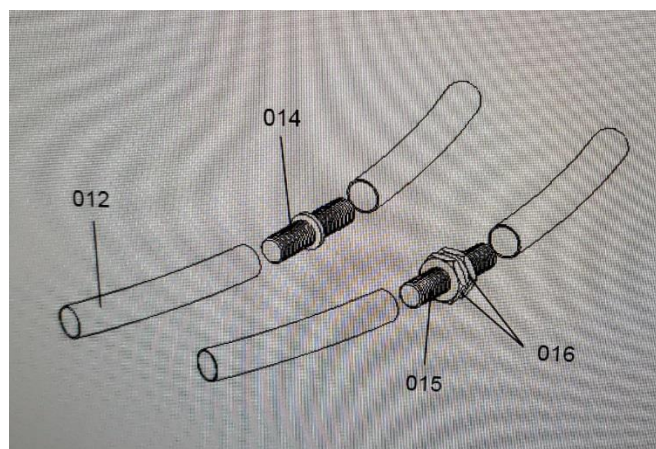
Figura 5.20 – Fixação do montante na laje de reação



Fonte: o autor

Em metade dos ensaios, buscava-se analisar a influência do anel de vento no comportamento do montante à flambagem. Assim, nesta fase, acoplou-se o anel de vento na metade do corpo do silo. Este anel foi fornecido pela indústria em duas partes, as quais foram conectadas segundo orientação de projeto, Figura 5.21. Com o auxílio de peças metálicas que foram parafusadas no corpo do montante, como vemos na Figura 5.22., pode-se acoplar o anel. Vale ressaltar que a maneira como essas partes do anel são ligadas não impede, teoricamente, o deslocamento do silo no sentido radial para fora do mesmo, apenas para dentro. Na Figura 5.23 apresenta como essa ligação foi realizada.

Figura 5.21 – Ligação do anel de vento - projeto



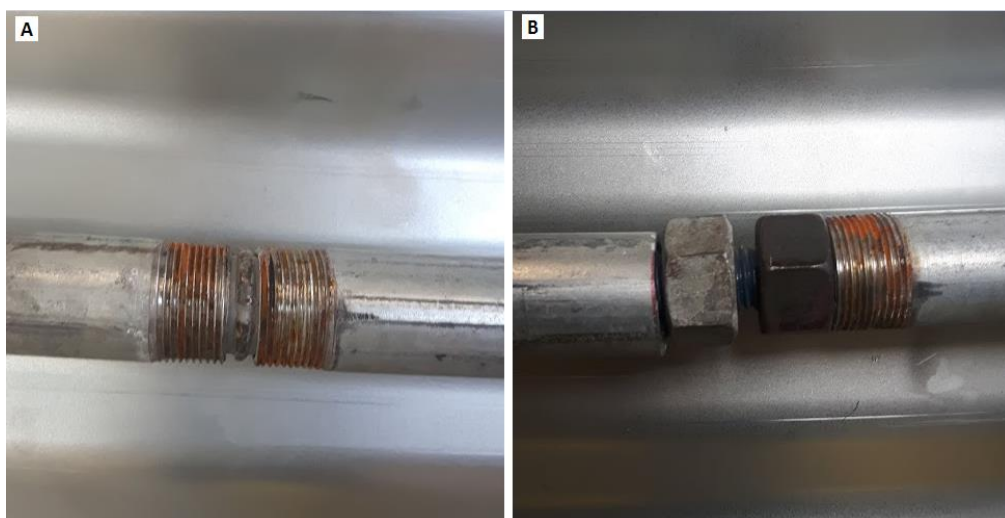
Fonte: Kepler Weber

Figura 5.22 – Montagem do anel de vento



Fonte: o autor

Figura 5.23 – Ligação do anel de vento - Experimental



Fonte: o autor

6. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos pelo modelo de cálculo proposto, pela análise numérica, e pelos experimentos realizados em laboratório.

6.1. Resultados Analíticos

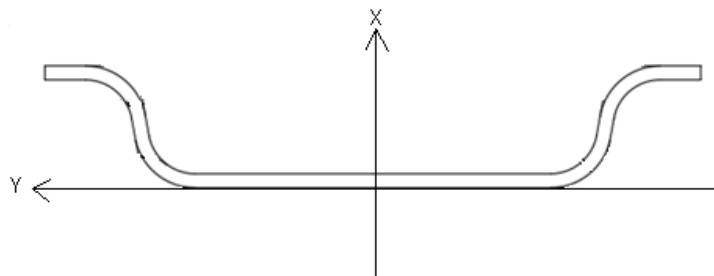
A partir do modelo de cálculo proposto no Capítulo 5, item 5.1, e usando como dados de entrada os mesmos valores utilizados no silo experimental e numérico, pôde-se verificar a quais valores as equações analíticas propostas chegaram para a carga crítica de flambagem.

Da Equação (5.4), do valor K , referente à resistência que a chapa ondulada exerce no montante, obteve-se o valor de, aproximadamente, $0,309 \text{ N/mm}^2$, com D_y seguindo a equação (3.2), considerando $E = 191,5 \text{ GPa}$, valor encontrado experimentalmente, $t = 0,95 \text{ mm}$ e $d = 12,05 \text{ mm}$.

$$D_y = 0,13Et d^2 = 0,13 \cdot 191,5 \cdot 0,95 \cdot 12,5^2 = 3434,08 \text{ kNmm} \quad (6.1)$$

Em seguida, utilizou-se o valor de K , citado acima, na Equação (3.7), encontrando uma carga de flambagem $N_{b,Rd} = 82,77 \text{ kN}$. Adotou-se o coeficiente de segurança $\gamma_{m1} = 1$, e o valor de $I_y = 28980 \text{ mm}^4$ foi calculado adotando-se os eixos de referência da Figura 6.1.

Figura 6.1 – Eixos de Referência para o cálculo do momento de inércia



Fonte: o autor

É importante verificar também a Equação (3.8), pois a carga crítica de flambagem não pode ser maior do que a resistência à compressão do perfil. Logo $N_{b,Rd} = 109,55 \text{ kN}$, para esta equação, considerando a área do perfil, descontando-se o furo do parafuso, $\gamma_{m1} = 1$ e $f_y = 410 \text{ MPa}$.

Logo, como a carga crítica é definida pelo menor valor entre as Equações (3.7) e (3.8), analiticamente, o valor encontrado através do modelo de cálculo proposto é 82,77 kN, resultado da Equação (3.7).

6.2. Resultados Numéricos

A análise numérica foi realizada modelando, em elementos finitos, um silo de 3637mm de diâmetro, 8 montantes e altura de 2743mm, equivalente ao que foi ensaiado experimentalmente.

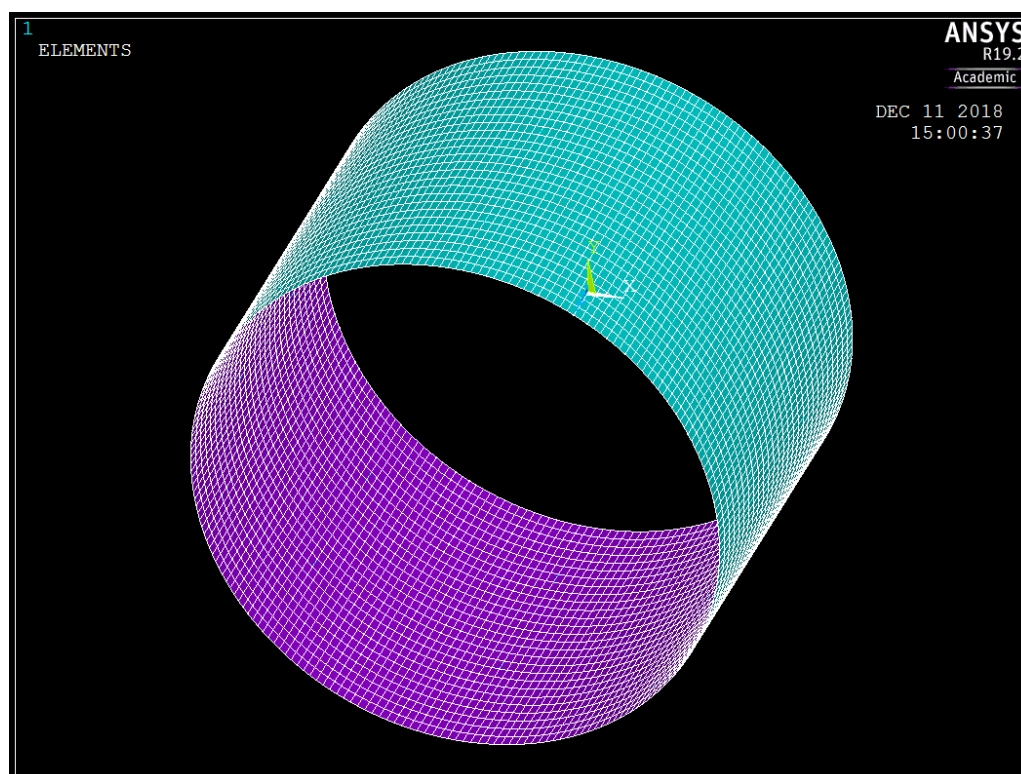
Foram usados dois tipos de elementos: SHELL63, para a casca, e BEAM4, para os montantes.

Também foram utilizados dois tipos de materiais: linear ortotrópico, para a casca, e linear isotrópico, para os montantes. O uso do material ortotrópico se justifica pelas características da chapa ondulada. Como dados de entrada, foram inseridas as propriedades ortotrópicas da casca, cujos cálculos foram feitos baseados no *Eurocode 3*, item 4.4(6), que contempla as propriedades ortotrópicas equivalentes de chapas onduladas. Desta forma, os dados de entrada foram: $E_x = 222,96 \text{ kN/mm}^2$, $E_y = 52707,35 \text{ kN/mm}^2$ e $G_{xy} = 83,56 \text{ kN/mm}^2$, cujos cálculos estão apresentados no APÊNDICE C. Já as propriedades do perfil dos montantes foram isotrópicas, $E = 191,5 \text{ kN/mm}^2$, valor encontrado experimentalmente, e as características geométricas da seção transversal foram inseridas através de uma seção genérica, com área e momentos de inércia definidos e equivalentes ao da seção ensaiada experimentalmente.

Para definir o grau de refinamento necessário para a malha, usou-se como critério comparativo a energia de deformação. Foram feitos vários modelos, com grau de refinamento das malhas diferentes, para se comparar a energia de deformação quando realizado uma análise linear elástica no silo. Quando a diferença chegou a ordem de 10^{-4} , chegou-se num grau de refinamento suficiente. Portanto, para o estudo deste trabalho, a casca foi refinada em 5832 elementos SHELL63 e os montantes em 216 elementos BEAM4, Figura 6.2.

O silo foi vinculado de um dos lados impedindo deslocamentos em x, y e z, a fim de simular o lado da base do silo, que no modelo experimental estava travado na laje de reação. Do outro lado, impediu-se os deslocamentos somente em x e y, simulando o lado do topo do silo, no qual foi aplicada a carga e, o próprio atuador de carga do cilindro hidráulico, por estar fixado na laje, através do pórtico de reação, impedia o deslocamento do topo do montante.

Figura 6.2 – Malha refinada do silo

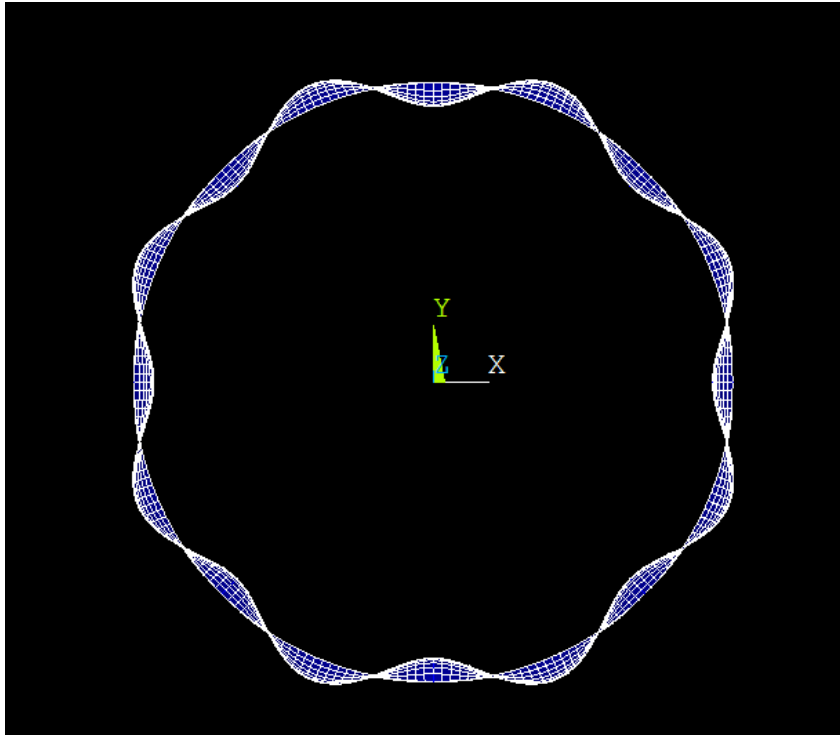


Fonte: o autor

Foram aplicadas oito cargas pontuais, cada qual no topo de cada montante, no sentido de comprimir os mesmos. O valor de cada carga aplicada foi de 150 kN.

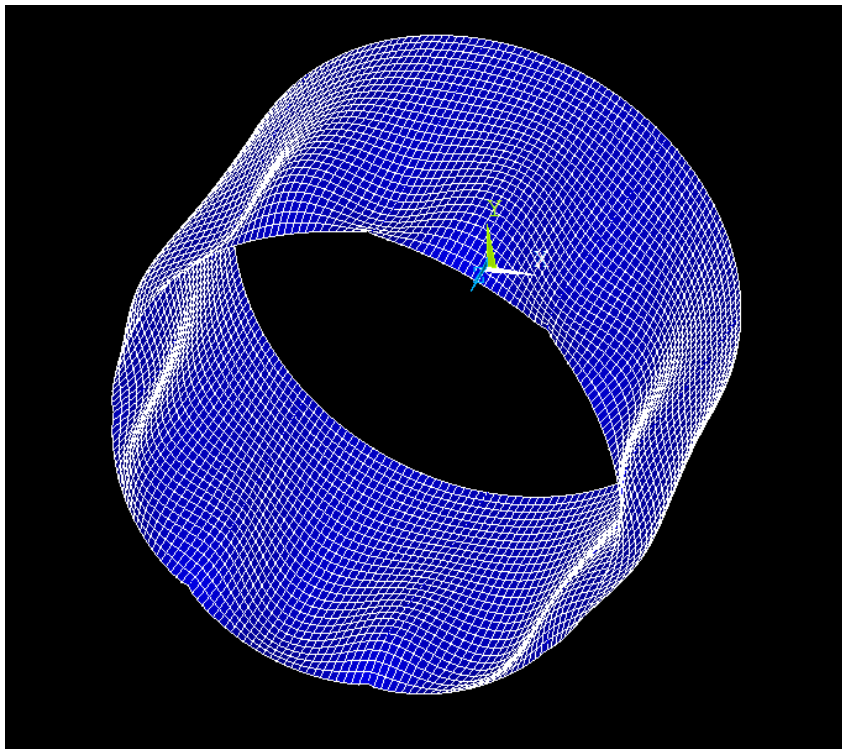
A análise da carga crítica de flambagem no programa ANSYS foi desenvolvida aplicando-se uma pré-tensão, resultante de uma análise linear elástica estática. Em seguida, foi realizada a *eigen buckling* análise, na qual tem-se o estudo da instabilidade, propriamente dito. O fator de carga resultante destas duas análises combinadas foi de 0,5096, o que aponta como carga na qual ocorre a bifurcação do equilíbrio o valor de, aproximadamente, 76,48 kN. Na Figura 6.3 tem-se a vista superior e na Figura 6.4 a vista lateral do silo deformado.

Figura 6.3 – Vista superior do silo deformado



Fonte: o autor

Figura 6.4 – Vista lateral do silo deformado



Fonte: o autor

6.3. Resultados Experimentais

6.3.1. Ensaio de Caracterização do Material

Para os ensaios de caracterização mecânica do aço temos como resultado dos ensaios de tração: o módulo de elasticidade, tensão de escoamento e tensão última.

Após realizados os ensaios, descritos no item 5.3.1, temos a imagem dos corpos de prova antes e após serem ensaiados na Figura 6.5. A tensão de escoamento do aço foi obtida pelo patamar de escoamento no gráfico de tensão versus deformação do ensaio, e a tensão de ruptura foi determinada pelo máximo valor suportado pelo corpo de prova. O módulo de elasticidade, por sua vez, foi calculado através da inclinação da reta tangente à curva que contempla os valores da faixa de comportamento elástico do gráfico.

Figura 6.5 – Modos de ruptura dos corpos de prova



Fonte: o autor

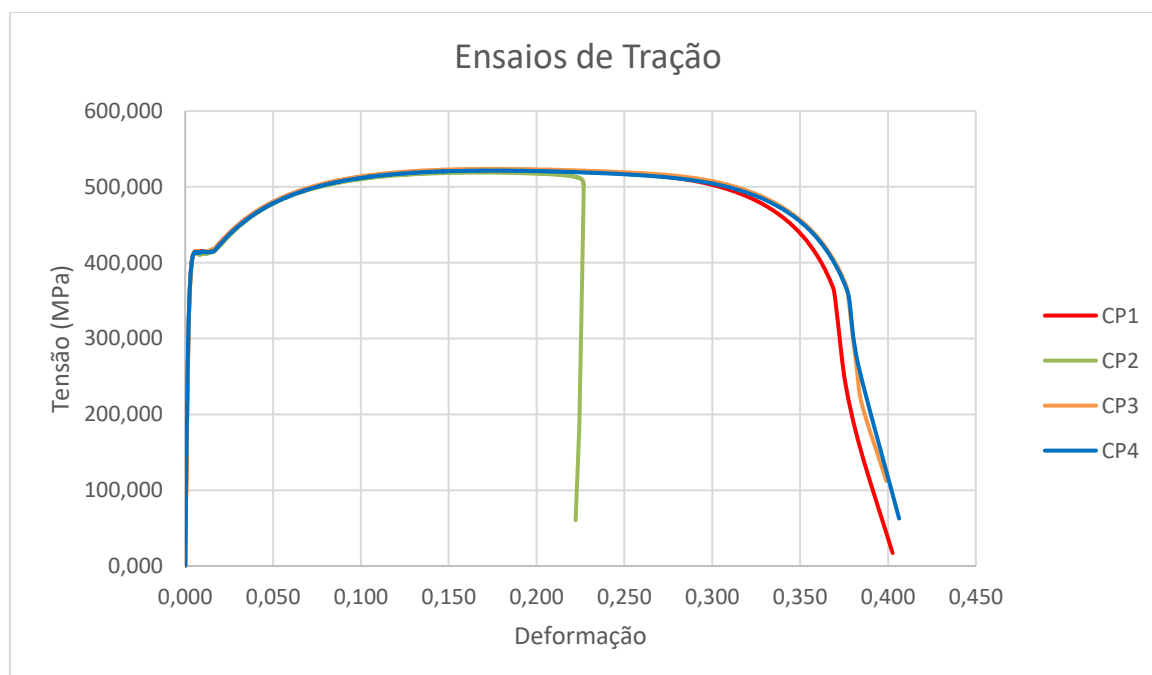
A Tabela 6.1 contempla os valores dos resultados dos ensaios de tração dos quatro corpos de prova, bem como a média dos resultados, e na Figura 6.6 temos o gráfico tensão versus deformação de todos os ensaios.

Tabela 6.1– Resultados experimentais do ensaio de tração

	CP1	CP2	CP3	CP4	MÉDIA
E (GPa)	189	183	186	208	191,5
σ_y (MPa)	415	413	415	414	414
σ_u (MPa)	523	519	524	522	522

Fonte: o autor

Figura 6.6 – Gráfico dos Ensaio de Tração



Fonte: o autor

Vale comentar o comportamento da curva CP2 da Figura 6.6, pois sua deformação máxima foi menor do que comparada com a dos outros corpos de prova. Na realidade, não é que sua deformação foi menor, é que a área de ruptura não ficou na porção intermediária do *clipgage* do extensômetro, o que pode ser comprovado com o posicionamento de sua ruptura na Figura 6.5. Assim, a medida de deformação máxima não pode ser aferida com precisão, o que não compromete o valor de tensões encontrados.

6.3.2. Ensaio dos Montantes

Com o ensaio dos montantes procurava-se obter a carga que provocaria a instabilidade dos mesmos em cada ensaio, bem como o modo como houve a instabilidade, e a progressão dos deslocamentos registrados nos transdutores.

Dos oito montantes ensaiados, decidiu-se usar como amostra na análise dos resultados somente sete, pois o primeiro ensaio apresentou problemas na fixação do pórtico de reação, o que desencadeou uma movimentação do pórtico, invalidando o modelo proposto, excluindo-se, assim, seus resultados. Nos sete ensaios subsequentes, o colapso do montante se deu por um processo de instabilidade, como esperado. Um sistema de aquisição de dados registrou todos os valores de carga aplicada, e deslocamentos transversais produzidos, apresentados no APÊNDICE D. Na Tabela 6.2, tem-se os valores das cargas máximas resistentes por cada montante, bem como a média dos valores, o desvio padrão da amostra e o coeficiente de variação da mesma. A numeração dos montantes se deu da seguinte forma:

- 2 e 4 - montantes sem cobrejunta e sem anel de vento
- 3 - montante com cobrejunta e sem anel de vento
- 6 e 8 - montantes sem cobrejunta e com anel de vento
- 5 e 7 - montantes com cobrejunta e com anel de vento

Tabela 6.2 – Cargas Máxima resistente por montante

CARGA POR MONTANTE (kN)							MÉDIA (kN)	DESV. PADRÃO (kN)	CV (%)
2	4	3	6	8	5	7			
67,17	75,82	76,96	74,4	63,75	89,03	77,76	74,98	8,14	10,85

Fonte: o autor

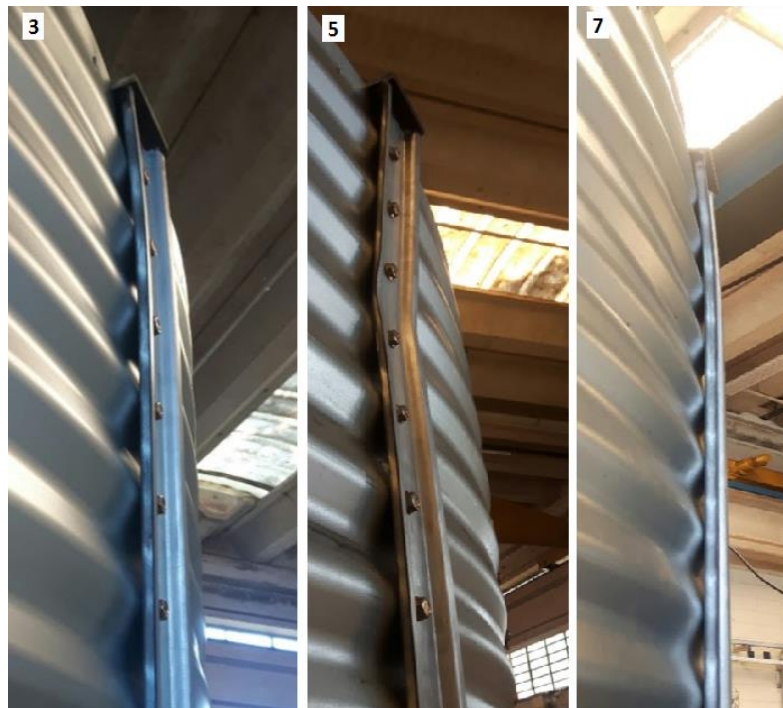
Analisando os resultados apresentados na Tabela 6.2, nota-se que não houve uma relação entre as cargas encontradas e a presença da cobrejunta e do anel de vento. Todas as cargas tiveram valores, relativamente, próximos, com coeficiente de variação em torno de 10%. A média dos valores sem a cobrejunta foi ligeiramente menor do que daqueles montantes com cobrejunta. Contudo, notou-se uma relação direta da presença da cobrejunta com o local onde ocorreu a instabilidade. Para que essa relação possa ser melhor avaliada, nas Figura 6.7 e Figura 6.8 temos a imagem dos montantes após ensaio.

Figura 6.7 – Montantes pares após ensaio



Fonte: o autor

Figura 6.8 – Montantes ímpares após ensaio



Fonte: o autor

A própria escolha da divisão de apresentação do local onde ocorreu a instabilidade já reflete a relação da presença da cobrejunta com a posição da flambagem. Os montantes

pares não possuíam cobrejunta, e colapsaram próximos à base. Já os ímpares, tinham cobrejunta, e colapsaram próximos ao topo. Esse padrão se repetiu em todos os ensaios. Uma possível explicação para este fenômeno é que a cobrejunta possui grandes dimensões comparado com o comprimento total do montante, já que foi usada uma cobrejunta que é aplicada na prática em silos de dimensões muito maiores.

A análise dos deslocamentos aferidos pelos transdutores, por sua vez, não apresentou uma relação com a presença da cobrejunta e do anel de vento. Na Tabela 6.3 têm-se os valores dos deslocamentos dos transdutores no momento da carga máxima, sendo o sinal negativo referente ao deslocamento no sentido radial do silo para dentro, e na Figura 6.9 o gráfico para representa-los.

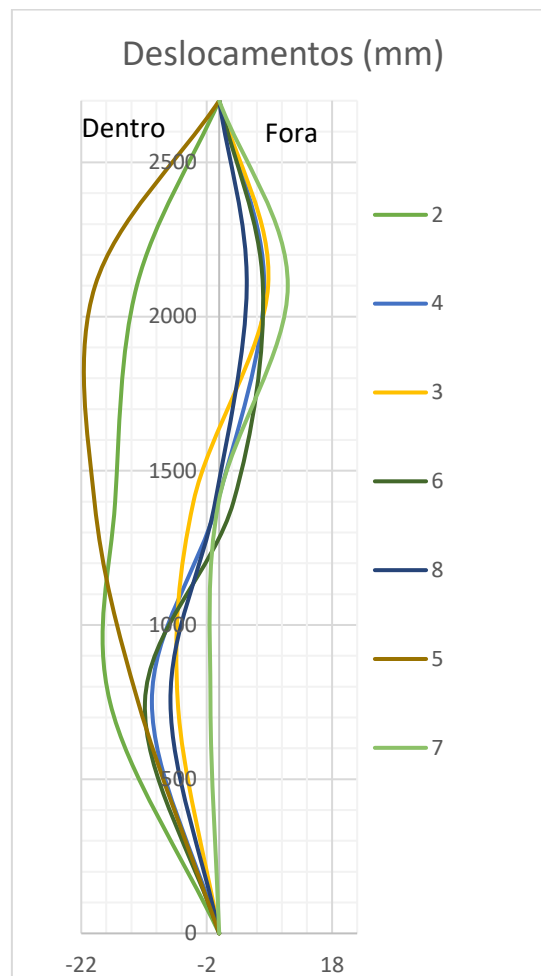
Tabela 6.3 – Deslocamentos aferidos pelos transdutores

	DESLOCAMENTOS (mm)		
	embaixo	meio	em cima
2	-17,42	-16,60	-13,14
4	-10,73	-0,24	7,18
3	-6,61	-4,10	7,80
6	-11,84	2,28	6,96
8	-7,77	-0,63	4,39
5	-12,93	-19,89	-19,79
7	-1,39	-0,09	10,93

Fonte: o autor

Pode-se notar, contudo, através destes deslocamentos da Figura 6.9, o número de meia ondas apresentados no processo de instabilidade presenciado ao longo do comprimento nos montantes, pois em cinco dos sete montantes: 4, 3, 6, 8 e 7, o número de meia ondas foi dois. Nos outros dois: 2 e 5, entretanto, houve somente a presença de uma meia onda. Porém, mesmo com comportamento diferentes, as cargas foram consideravelmente próximas, independentemente do número de ondas apresentadas ao longo do montante durante a aplicação de força.

Figura 6.9 - Gráfico dos deslocamentos aferidos pelos transdutores



Fonte: o autor

É interessante ressaltar que, no montante número 5, o primeiro montante ensaiado com a presença do anel de vento, houve deslocamento do transdutor posicionado na mesma altura do anel de vento no sentido radial para dentro, de cerca de 2cm. Ou seja, neste ensaio, houve uma espécie de acomodação do silo para se configurar novamente com a presença do anel, pois é natural que a cada ensaio houvesse uma certa deformação da configuração circular do silo.

6.4. Discussão dos Resultados

De uma maneira geral, o trabalho permite comparar três resultados: analítico, numérico e experimental. Estes resultados, numericamente, são apresentados na Tabela 6.4

Tabela 6.4 – Resultados Analítico, Numérico e Experimental

Analítico	Numérico	Experimental
82,77 kN	76,48 kN	74,98 kN

Fonte: o autor

A maior diferença entre os valores encontrados foi entre o resultado analítico e o experimental, com uma diferença de 10,39%, com relação ao resultado experimental, o que demonstra uma certa consistência na teoria apresentada e na maneira como o modelo de cálculo proposto, no Capítulo 5, foi sugerido, mesmo o resultado analítico sendo menos conservador do que o resultado experimental. Parte deste erro pode ser atribuído à não abordagem da não linearidade geométrica, tanto no estudo analítico e no numérico, que estão, sem dúvidas, presentes no modelo experimental. Mesmo assim, o modelo de cálculo proposto no Capítulo 5 se mostra muito mais apurado do que o modelo sugerido pelo Método B do *Eurocode 3*, que obtinha um valor de 12,48 kN, um erro de 83,35% com relação ao resultado experimental.

Como resultados, também é importante ressaltar que a presença do anel de vento não teve influência no comportamento dos ensaios.

Em se tratando da presença da cobrejunta, ela não afetou, de maneira geral, as cargas resistidas pelos montantes nos experimentos. Ela influenciou, contudo, a posição onde ocorreu a instabilidade, sendo: com cobrejunta, no topo do montante, sem cobrejunta, na base do montante.

Como última observação, vale comparar o resultado do modelo de cálculo proposto neste trabalho e o resultado produzido pela Equação (6.2), de flambagem elástica de barras prismáticas, sem considerar a presença da rigidez das chapas.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2}{l_{eff}^2} EI \quad (6.2)$$

Como resultado da Equação (6.2), encontra-se o valor 4,18 kN, sendo o I o momento de inércia calculado adotando o eixo passando pelo centro de gravidade da seção transversal do perfil. Para que a Equação (6.2) produza o mesmo resultado experimental médio, o l_{eff} deveria ser 64,8cm, ou seja, aproximadamente um quarto do comprimento total do montante, valor menor do que o comprimento da chapa usado em projetos

brasileiros. Assim, usando o $l_{eff} = 91,4 \text{ cm}$ produziria um resultado conservador para os resultados deste trabalho.

7. CONCLUSÃO

Desta forma, as Equações (7.1) a (7.5), compõem o modelo de cálculo proposto como resultado deste trabalho, para o cálculo da carga crítica de flambagem de montantes de silos metálicos cilíndricos de chapas onduladas, abordando-o como um problema de estabilidade elástica e desconsiderando a influência da pressão horizontal que o produto ensilado provoca na parede do silo, sendo a carga definida pelo menor valor entre as Equações (7.4) e (7.5).

$$\theta \text{ (em graus)} = \frac{360^\circ}{n} \quad (7.1)$$

$$H = \frac{-1 + 4 \cos(\theta) - 3 \cos(2\theta) - 2\theta \text{sen}(2\theta)}{8\theta + 4\theta \cos(2\theta) - 6\text{sen}(2\theta)} \quad (7.2)$$

$$K = \frac{-4D_y}{R^3(-4H - 2\theta + 2H\theta^2 \cos(\theta) + \theta^2 \text{sen}(\theta) + 4H \cos(\theta) + 2\text{sen}(\theta))} \quad (7.3)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{2\sqrt{EI_y * K}}{\gamma_{m1}} \quad (7.4)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{m1}} \quad (7.5)$$

onde n é o número de montante existentes no silo; E é o módulo de elasticidade do material de fabricação do montante; I_y é o momento de inércia do perfil do montante com eixo de referência posicionado na posição de ancoragem silo-chapa, sendo y o eixo perpendicular ao eixo de simetria do perfil do montante; γ_{m1} o coeficiente de ponderação das resistências; f_y a resistência ao escoamento do material de fabricação do montante e A_{eff} a área efetiva do perfil do montante.

O trabalho, contudo, apresenta algumas limitações, pois além de não abordar a não linearidade geométrica, debate somente a influência da rigidez da chapa ondulada na carga de flambagem do montante, e desconsidera a presença da pressão horizontal exercida pelo material ensilado nas chapas, e conseqüentemente, nos montantes. Esta abordagem fica como sugestão para ser trabalhada em pesquisas futuras, pois é um fator muito importante a ser considerado, pois com a presença desta pressão horizontal, a tendência é que o sentido da flambagem dos montantes ocorra somente para fora do silo, e antecipe este processo.

REFERÊNCIAS

ACQUA, T. G. D. **Estudo teórico e experimental de ligações parafusadas em chapa corrugada ondulada de silos cilíndricos metálicos**. 2018. 113p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2018.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 313-97**: Standard practice for design and construction of concrete silos and stacking tubes for storing granular materials.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **AISC 360-2016**: Specification for Structural Steel Buildings.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **AISI S100-2016**: North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ANSI/ASAE EP433 DEC1988 (R2011)**: Loads exerted by free-flowing grain on bins.

ANDRADE Jr, L. J. **Análise Estrutural das Chapas Metálicas de Silos e de Reservatórios Cilíndricos**. 1998. 208p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.

_____. **Ação do Vento em Silos Cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro**. 2002. 151p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

ARAÚJO, E.C. **Estudo Teórico e Experimental de Tremonhas Piramidais para Silos Metálicos Elevados**. 1997. 317p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas de perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3774-1996**: Loads on bulk solids containers.

CALIL Jr.,C.; CHEUNG. A.B.. (2007). **Silos: pressões. fluxos. recomendações para o projeto e exemplos de cálculo.** São Carlos: EESC.

CALIL Jr., C. **Estudo de Silos de Madeira a Nível de Fazendas.** 1978. 198p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1978.

_____. **Sobrepresiones en las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos.** 1982. 184p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica de Barcelona, Espanha. Publicação do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, USP. 1982.

_____. **Recomendações de Fluxo e de Cargas para o Projeto de Silos Verticais.** 1990. 198p. Tese de Livre Docência - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.

Armazenagem de grãos no Brasil terá destaque no Congresso Brasileiro de Soja. Disponível em <https://www.embrapa.br/soja/busca-de-noticias/-/noticia/34614688/armazenagem-de-graos-no-brasil-tera-destaque-no-congresso-brasileiro-de-soja>. Acesso em 24 de fevereiro de 2019.

CHEUNG, A. B. **Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos.** 2007. 252p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007

COELHO, L.C. **Software para cálculo de fluxo e pressões em silos cilíndricos metálicos para armazenamento de produtos agrícolas e industriais.** 2016. 105p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

COUTO, L.G. **Contribuição ao Estudo dos Silos de Argamassa Armada para Armazenamento de Cereais.** 1989. 147p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

ESTEVES Jr., P. **Silos Metálicos de Chapa Corrugada.** 1989. 118p. . Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

EUROPEAN STANDARDS. **EN 1991-4(2006):** Eurocode 1: Actions on structures - Part 4: Silos and Tanks.

EUROPEAN STANDARDS. **EN 1993-1-3(2006)**: Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting.

EUROPEAN STANDARDS. **EN 1993-1-5(2006)**: Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-5: General rules - Plated structural elements.

EUROPEAN STANDARDS. **EN 1993-4-1(2007)**: Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 4-1: Silos.

INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **IRAM 1977**: Silos aéreos metálicos para almacenamiento de granos cilíndricos y desarmables.

FASSONI, D. P. **Sistema Construtivo Modular em Madeira para Silos Horizontais**. 1994. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

FORTES FILHO, J. **Uma introdução ao estudo de silos**. 1985. 427p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1985.

FREITAS, E.G. **Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano**. 2001. 175p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

GAYLORD, JR., E. H.; GAYLORD, C. N.(1984). **Design of Steel Bins for Storage of Bulk Solids**. William J. Hall, editor.

GOMES, F. C. **Silos para armazenamento de laranjas**. 1994. 170p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

_____. **Estudo teórico e experimental das ações em silos horizontais**. 2000. 205p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

HETENYI, M. **Beams on Elastic Foundation**. Michigan: The University of Michigan Press, 1967.

HOTALA, E. et al. **Experimental investigations on the resistance of vertical stiffeners of steel silos shells made of corrugated sheets.** Boca Raton: Crc Press-Taylor & Francis Group, 2016. 499-506 ISBN 978-1-315-62319-1; 978-1-138-02946-0

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 11697:1995:** Bases for design of structures - Loads due to bulk materials.

IWICKI, P.; WOJCIK, M.; TEJCHMAN, J. Failure of cylindrical steel silos composed of corrugated sheets and columns and repair methods using a sensitivity analysis. **Engineering Failure Analysis**, v. 18, n. 8, p. 2064-2083, Dec 2011. ISSN 1350-6307. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000297566700013 >.

IWICKI, P.; REJOWSKI, K.; TEJCHMAN, J. **Stability of cylindrical steel silos composed of corrugated sheets and columns based on FE analyses versus Eurocode 3 approach.** *Engineering Failure Analysis*, v. 57, p. 444-469, Nov 2015. ISSN 1350-6307.

JAVARONI, C.E. **Perfis de aço formados a frio submetidos à flexão: análise teórico-experimental.** 1999. 9-11p. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

MADRONA, F. S. **Pressões em Silos Esbeltos com descarga excêntrica.** 2008. 119p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MANFRIN, I.M.S. **Um estudo dos silos para açúcar: Propriedades físicas do material armazenado, recomendações construtivas, normativas e análise estrutural.** 1994, 82p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

MARTINS, G.C.A. **Estudo teórico e experimental de esforços devidos a cabos de termometria fixados em estruturas de coberturas de silos cilíndricos para armazenamento de grãos.** 2012, 80p. Tese (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MILANI, A.P. **Determinação das propriedades de produtos armazenados para o projeto de pressões e fluxo em silos.** 1993. 272p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

NASCIMENTO, F.C. **A relação entre as pressões horizontais e verticais em silos elevados: o parâmetro K.** 2008. 119p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008

NASCIMENTO, J. W. **Estudo de silos metálicos prismáticos para fábricas de ração**. 1996, 152p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

PALMA, G. **Pressões e fluxo em silos esbeltos ($H/D \geq 1.5$)**. 2005. 109p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

RAVENET apud CALIL Jr.,C.; CHEUNG. A.B.. (2007). **Silos: pressões. fluxos. recomendações para o projeto e exemplos de cálculo**. São Carlos: EESC.

REIS, A.; CAMOTIM, D. (2001). **Estabilidade estrutural**. Portugal: McGraw-Hill.470p

REJOWSKI, K.; IWICKI, P. **Buckling Analysis of Cold Formed Steel Column**. Mechanics and Mechanical Engineering. Vol. 20. No 2 (2016) 109-120.

REJOWSKI, K.; IWICKI, P. **Simplified stability analysis of steel cylindrical silos with corrugated walls and vertical columns**. Boca Raton: Crc Press-Taylor & Francis Group, 2016. 525-532 ISBN 978-1-315-62319-1; 978-1-138-02946-0.

ROTTER, J. M. **Guide for the Economic Design of Circular Metal Silos**. London EC4P 4EE: Spon Press, 2001.

SILVA, M. C. A. T. **Estudo da Variabilidade pressões em silos**. 1993, 192p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

VAZ, J. **Silos verticais de madeira compensada**. 1987. 346p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987.

APÊNDICE A

A dedução da Equação (3.9) é baseada na formulação da equação da linha elástica de uma viga bi apoiada, de carga pontual, unitária, centrada, ou seja, o mesmo esquema da Figura 3.2.

Desta forma o valor de K será dado pela divisão da carga, P, pela flecha central da viga, Δu , descrito pela Equação (A.1).

$$\Delta u = \frac{PL^3}{48EI} \quad (\text{A.1})$$

Para o estudo em questão, considerando que a viga representa a chapa corrugada, o EI será substituído por D_y , que é a rigidez à flexão de uma chapa ondulada. O valor de L é equivalente a $2d_s$, ou seja, duas vezes a distância entre os montantes. Desta forma o Δu para o estudo em questão poderia ser escrito pela Equação (A.2).

$$\Delta u = \frac{8Pd_s^3}{48D_y} \quad (\text{A.2})$$

Fazendo as devidas simplificações, a equação de K pode ser descrita pela Equação (A.3).

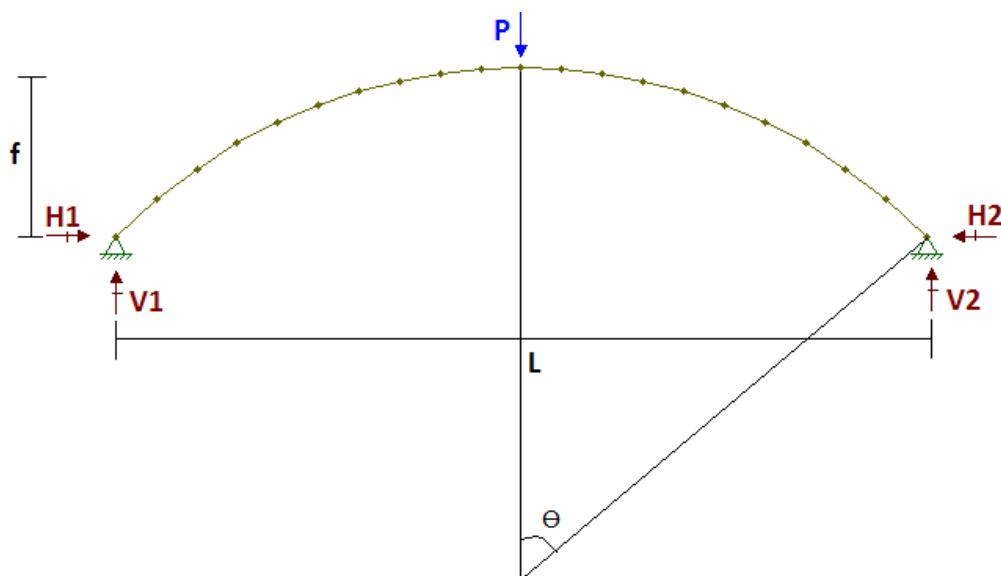
$$K = \frac{P}{8Pd_s^3/48D_y} = \frac{6D_y}{d_s^3} \quad (\text{A.3})$$

Fazendo comparação da Equação (A.3) com a Equação (3.9) do *Eurocode 3*, entende-se a origem da recomendação do $k_s = 6$.

APÊNDICE B

Com o intuito de deduzir a flecha do centro de um arco bi apoiado, usamos o método dos esforços para encontrar as reações da viga cuja geometria está apresentada na Figura B.1, e mais à frente a equação de linha elástica para chegar ao objetivo.

Figura B.1 – Geometria do arco

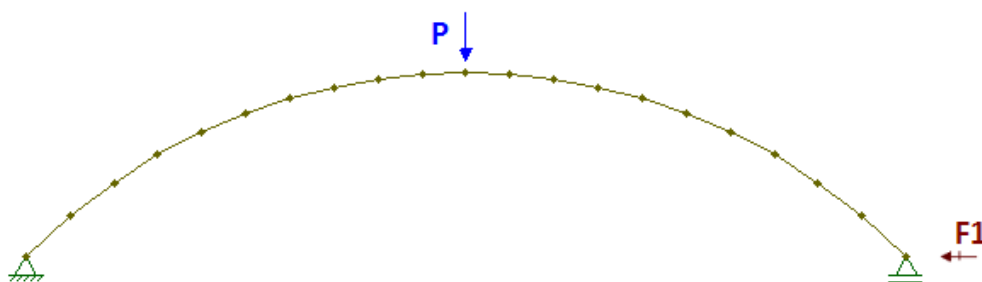


Fonte: o autor.

MÉTODO DOS ESFORÇOS

A estrutura apresenta um grau de hiperestaticidade, o que implica escolher um vínculo para ser retirado a fim de montar o sistema principal, Figura B.2. O vínculo eleito foi o que impede o deslocamento horizontal no apoio à direita, apoio 2.

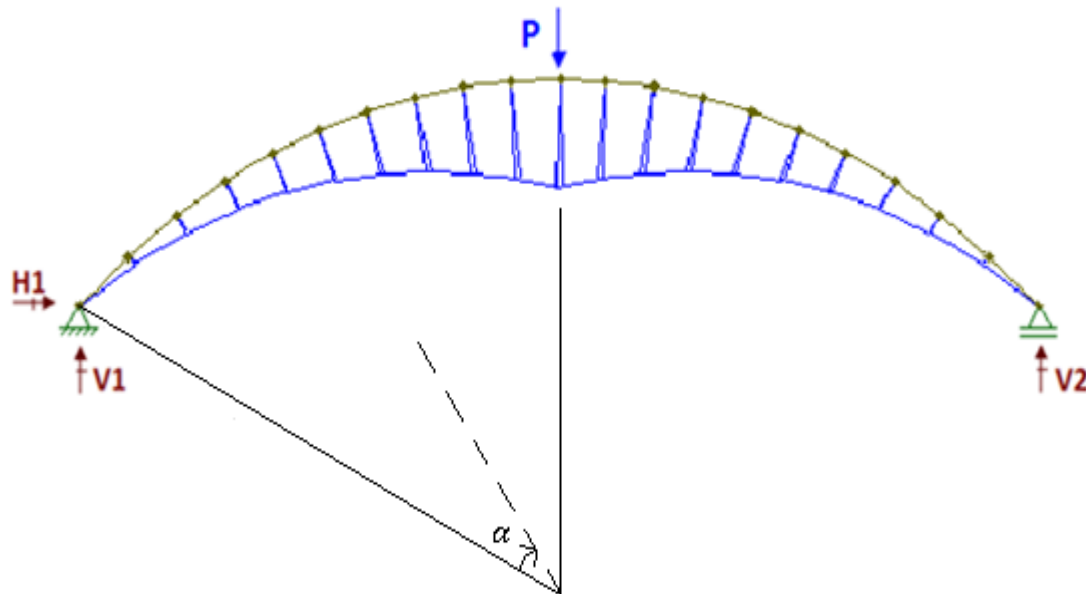
Figura B.2 – Sistema Principal



Fonte: o autor.

- Problema 0 – Apenas aplicação da Força P (Figura B.3)

Figura B.3 – Problema 0



Fonte: o autor.

Pelos princípios da isostática: somatório de forças na vertical e horizontal iguais a zero, e momento no apoio igual a zero, temos as equações (B.1) e (B.2). A equação do momento, M_0 , do trecho entre o apoio 1, da esquerda, e o centro do arco é dada pela Equação (B.3).

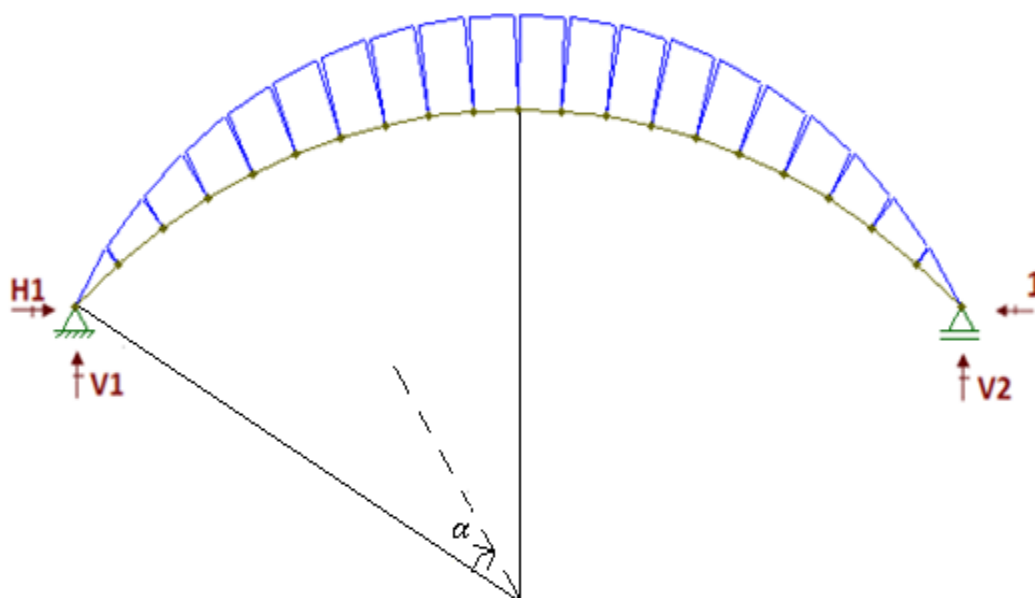
$$H1 = 0 \quad (B.1)$$

$$V1 = V2 = P/2 \quad (B.2)$$

$$M_0 = VR(\text{sen } \theta - \text{sen}(\theta - \alpha)) \quad (B.3)$$

- Problema 1 – Apenas aplicação da Força $F_1 = 1$ (Figura B.4)

Figura B.4 – Problema 1



Fonte: o autor.

Pelos princípios da isostática: somatório de forças na vertical e horizontal iguais a zero, e momento no apoio igual a zero, temos as equações (B.4) e (B.5). A equação do momento, M_1 , do trecho entre o apoio 1, da esquerda, e o centro do arco é dada pela Equação (B.6).

$$H_1 = 1 \quad (\text{B.4})$$

$$V_1 = V_2 = 0 \quad (\text{B.5})$$

$$M_1 = -R(\cos(\theta - \alpha) - \cos\theta) \quad (\text{B.6})$$

- Cálculo de H_2

O Cálculo da Reação H_2 é dada pela Equação (B.7), onde $\beta = \theta - \alpha$.

$$H_2 = -\frac{\int_{\text{arco}} M_0 M_1 d\beta}{\int_{\text{arco}} M_1 M_1 d\beta} \quad (\text{B.7})$$

- Cálculo das integrais – Equação (B.8) e (B.9)

$$\begin{aligned}
 \int_{\text{arco}} M_0 M_1 d\beta &= 2 \int_0^\theta M_0 M_1 d\beta \\
 &= 2 \int_0^\theta \frac{PR}{2} (\text{sen}\theta - \text{sen}\beta)(-R)(\text{cos}\beta - \text{cos}\theta) d\beta \\
 &= -PR^2 \int_0^\theta (\text{sen}\theta - \text{sen}\beta)(\text{cos}\beta - \text{cos}\theta) d\beta \\
 &= -PR^2 \left(-\frac{1}{4} + \text{sen}\theta^2 - \text{cos}\theta^2 - \theta \text{sen}\theta \text{cos}\theta + \frac{\text{cos}2\theta}{4} \right. \\
 &\quad \left. + \text{cos}\theta \right)
 \end{aligned} \tag{B.8}$$

$$\begin{aligned}
 \int_{\text{arco}} M_1 M_1 d\beta &= 2 \int_0^\theta M_1 M_1 d\beta = 2 \int_0^\theta R^2 (\text{cos}\beta - \text{cos}\theta)^2 d\beta \\
 &= 2R^2 \int_0^\theta (\text{cos}^2 \beta + \text{cos}^2 \theta - 2\text{cos}\theta \text{cos}\beta) d\beta \\
 &= 2R^2 \left(\frac{\theta}{2} + \frac{\text{sen}2\theta}{4} \theta \text{cos}^2 \theta - 2\text{sen}\theta \text{cos}\theta \right)
 \end{aligned} \tag{B.9}$$

Portanto o valor de H2 pode ser descrito pela Equação (B.10).

$$H2 = \frac{P (3\text{sen}^2\theta - 4\theta \text{sen}\theta \text{cos}\theta - 3\text{cos}^2\theta + 4\text{cos}\theta - 1)}{4 (\theta + 2\theta \text{cos}^2 \theta - 3\text{sen}\theta \text{cos}\theta)} \tag{B.10}$$

Sabendo que P=1 e fazendo as devidas abreviações, a equação (B.10) iguala-se à Equação (5.3). Assim, H1=H2=Equação (5.3), e V1=V2=P/2.

EQUAÇÃO DA LINHA ELÁSTICA

Agora que já foram encontradas as reações da Figura B.1, pode-se escrever a equação que rege o momento deste arco, Equação (B.11).

$$M = \frac{PR}{2} (\text{sen}\theta - \text{sen}\beta) - HR(\text{cos}\beta - \text{cos}\theta) \tag{B.11}$$

A partir da Equação da linha elástica, Equação (B.12), proveniente da teoria da mecânica dos materiais, sabe-se que integrando duas vezes a mesma, e considerando as devidas condições de contorno, chega-se à equação da linha elástica para esta estrutura.

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (\text{B.12})$$

Lembrando que para o estudo em questão usamos a rigidez EI como D_y , devido a rigidez a flexão da chapa ondulada, e usando como condições de contorno: $v(0) = 0$ e $v(2\theta) = 0$, deduz-se que $v(\theta)$ é descrita pela Equação (B.13).

$$v(\theta) = - \frac{R^3(-4H - 2P\theta + 2H\theta^2 \cos(\theta) + P\theta^2 \sin(\theta) + 4H\cos(\theta) + 2P\sin(\theta))}{4D_y} \quad (\text{B.13})$$

Sabendo que o valor de $K = P/v(\theta)$, e que $P=1$, define-se a Equação (5.4) de K .

APÊNDICE C

As propriedades ortotrópicas equivalentes da chapa ondulada foram calculadas baseado nas Equações (C.1), (C.2) e (C.3), das rigidezes à flexão de uma chapa ondulada fornecida pelo *Eurocode 3*, item 4.4.

$$D_x = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \frac{1}{\left(1 + \frac{\pi^2 d^2}{4l^2}\right)} \quad (\text{C.1})$$

$$D_y = 0,13Et d^2 \quad (\text{C.2})$$

$$D_{xy} = \frac{Gt^3}{12} \left(1 + \frac{\pi^2 d^2}{4l^2}\right) \quad (\text{C.3})$$

onde E é o módulo de elasticidade; G é o módulo de elasticidade transversal; t a espessura da chapa; d a altura da onda da corrugação; l o comprimento da onda e ν o coeficiente de Poisson, adotado 0,3.

As equações (C.1), (C.2) e (C.3) foram igualadas respectivamente, à $E_x I_x$, $E_y I_y$ e $G_{xy} I_{xy}$, onde I_x , I_y e I_{xy} foram calculados para uma chapa sem ondulação, lisa, com a mesma espessura t , geometria usada na chapa do modelo numérico. Assim, encontrou-se o valor equivalente de E_x , E_y e G_{xy} , às quais foram usadas como dados de entrada do material ortotrópico da chapa no programa ANSYS 19.2.

Desta maneira, a chapa lisa, de espessura t lançada no modelo numérico, ao possuir propriedades ortotrópicas equivalentes E_x , E_y e G_{xy} , se comportava como a chapa ondulada usada no modelo experimental.

APÊNDICE D

MONTANTES SEM COBREJUNTA E SEM ANEL DE VENTO									
MONTANTE 2					MONTANTE 4				
Tempo (s)	Transdutores (mm)			Força (kN)	Tempo (s)	Transdutores (mm)			Força (kN)
	1	2	3			1	2	3	
24	-1,53	-2,01	-2,04	10,70	103,00	1,13	6,34	9,48	14,97
25	-1,55	-2,09	-2,06	11,21	104,00	1,03	6,29	9,49	15,43
26	-1,76	-2,32	-2,28	13,15	105,00	1,01	6,26	9,49	15,94
27	-1,76	-2,30	-2,31	13,15	106,00	0,94	6,24	9,48	17,13
28	-2,01	-2,62	-2,53	15,20	107,00	0,88	6,17	9,46	17,65
29	-2,06	-2,73	-2,62	15,65	108,00	0,82	6,21	9,48	18,33
30	-2,20	-2,81	-2,73	16,79	109,00	0,78	6,14	9,49	19,41
31	-2,35	-3,05	-2,88	18,22	110,00	0,71	6,07	9,48	19,98
32	-2,37	-3,05	-2,88	18,27	111,00	0,69	6,05	9,46	20,09
33	-2,46	-3,26	-3,06	19,58	112,00	0,61	6,04	9,49	21,69
34	-2,66	-3,41	-3,19	20,83	113,00	0,48	5,98	9,48	22,54
35	-2,66	-3,41	-3,19	20,89	114,00	0,48	5,92	9,44	22,60
36	-2,83	-3,52	-3,26	21,92	115,00	0,42	5,92	9,46	23,74
37	-2,94	-3,77	-3,48	23,28	116,00	0,31	5,88	9,46	24,99
38	-3,04	-3,81	-3,54	23,57	117,00	0,27	5,80	9,44	24,88
39	-3,08	-3,88	-3,63	24,19	118,00	0,23	5,80	9,40	26,01
40	-3,25	-4,08	-3,77	25,56	119,00	0,13	5,73	9,40	27,49
41	-3,38	-4,22	-3,92	26,64	120,00	0,10	5,69	9,38	27,32
42	-3,40	-4,25	-3,90	26,53	121,00	0,00	5,68	9,38	29,09
43	-3,57	-4,48	-4,08	28,01	122,00	-0,13	5,59	9,38	30,17
44	-3,76	-4,65	-4,26	29,32	123,00	-0,13	5,57	9,33	30,17
45	-3,76	-4,66	-4,25	29,26	124,00	-0,25	5,52	9,29	31,93
46	-3,76	-4,65	-4,26	29,20	125,00	-0,36	5,45	9,29	32,73
47	-3,76	-4,66	-4,25	29,20	126,00	-0,38	5,42	9,31	32,96
48	-3,82	-4,72	-4,30	29,60	127,00	-0,57	5,40	9,29	34,72
49	-4,03	-5,01	-4,54	31,42	128,00	-0,61	5,35	9,26	35,18
50	-4,18	-5,14	-4,67	32,28	129,00	-0,67	5,33	9,24	35,41
51	-4,26	-5,23	-4,74	32,67	130,00	-0,73	5,28	9,22	36,94
52	-4,58	-5,62	-5,08	34,95	131,00	-0,86	5,23	9,24	37,74
53	-4,76	-5,81	-5,21	35,58	132,00	-0,94	5,18	9,18	37,74
54	-4,76	-5,80	-5,21	35,52	133,00	-1,07	5,13	9,18	40,13
55	-5,00	-6,12	-5,47	37,17	134,00	-1,15	5,04	9,20	40,30
56	-5,33	-6,46	-5,76	38,71	135,00	-1,24	5,02	9,17	41,21
57	-5,39	-6,48	-5,79	38,71	136,00	-1,41	4,96	9,13	42,81
58	-5,65	-6,79	-6,05	40,24	137,00	-1,47	4,87	9,13	42,92
59	-6,04	-7,22	-6,41	41,78	138,00	-1,57	4,87	9,09	43,77

60	-6,21	-7,37	-6,54	42,18	139,00	-1,76	4,77	9,11	45,31
61	-6,23	-7,41	-6,58	42,18	140,00	-1,83	4,68	9,11	45,77
62	-6,49	-7,70	-6,80	43,43	141,00	-1,89	4,66	9,06	46,16
63	-6,78	-7,94	-7,00	44,63	142,00	-2,10	4,61	9,06	47,99
64	-6,99	-8,13	-7,13	45,71	143,00	-2,24	4,48	9,06	48,55
65	-7,01	-8,21	-7,18	45,48	144,00	-2,27	4,44	9,00	48,61
66	-7,12	-8,28	-7,20	45,99	145,00	-2,39	4,41	9,02	50,21
67	-7,41	-8,52	-7,38	47,30	146,00	-2,58	4,34	9,04	51,29
68	-7,72	-8,76	-7,54	48,67	147,00	-2,62	4,27	8,98	51,06
69	-7,85	-8,87	-7,60	49,07	148,00	-2,75	4,24	9,04	52,54
70	-7,91	-8,88	-7,64	49,18	149,00	-3,00	4,17	9,00	54,08
71	-8,31	-9,31	-7,91	51,12	150,00	-3,06	4,06	8,98	53,96
72	-8,63	-9,55	-8,04	52,08	151,00	-3,17	4,01	8,97	55,16
73	-8,80	-9,71	-8,15	52,60	152,00	-3,44	3,93	9,00	57,04
74	-8,98	-9,83	-8,24	53,11	153,00	-3,50	3,84	8,97	57,04
75	-9,32	-10,22	-8,44	54,47	154,00	-3,65	3,79	8,95	57,55
76	-9,63	-10,43	-8,64	55,33	155,00	-3,78	3,74	8,95	58,80
77	-9,72	-10,51	-8,69	55,39	156,00	-3,99	3,65	8,93	59,65
78	-10,05	-10,77	-8,93	56,30	157,00	-4,07	3,57	8,86	59,48
79	-10,33	-11,01	-8,97	57,38	158,00	-4,26	3,48	8,84	60,96
80	-10,66	-11,25	-9,22	58,00	159,00	-4,51	3,36	8,86	62,50
81	-10,70	-11,30	-9,22	57,83	160,00	-4,64	3,24	8,77	62,22
82	-11,00	-11,61	-9,46	58,80	161,00	-4,76	3,12	8,73	62,79
83	-11,38	-11,90	-9,68	59,83	162,00	-5,02	3,04	8,69	64,38
84	-11,75	-12,24	-9,89	60,45	163,00	-5,25	2,88	8,69	65,01
85	-11,80	-12,26	-9,95	60,28	164,00	-5,42	2,81	8,60	65,52
86	-12,20	-12,57	-10,15	61,53	165,00	-5,92	2,59	8,64	67,91
87	-12,66	-12,95	-10,41	62,44	166,00	-6,15	2,38	8,46	67,62
88	-13,01	-13,24	-10,61	63,07	167,00	-6,49	2,20	8,38	69,22
89	-13,04	-13,25	-10,64	62,67	168,00	-7,16	1,77	8,15	70,07
90	-13,50	-13,58	-10,86	63,92	169,00	-7,53	1,41	7,89	69,79
91	-14,08	-14,06	-11,21	65,06	170,00	-8,00	1,20	7,82	71,49
92	-14,36	-14,28	-11,43	65,06	171,00	-8,48	0,98	7,71	72,23
93	-14,44	-14,30	-11,44	64,78	172,00	-8,71	0,77	7,56	72,12
94	-14,86	-14,64	-11,66	65,92	173,00	-9,26	0,55	7,53	73,71
95	-15,87	-15,45	-12,30	66,54	174,00	-9,84	0,21	7,33	74,23
96	-16,23	-15,74	-12,52	66,43	175,00	-10,12	0,00	7,18	74,11
97	-17,42	-16,60	-13,14	67,17	176,00	-10,73	-0,24	7,18	75,82
98	-21,68	-19,20	-14,89	59,94	177,00	-41,02	-25,24	-10,62	31,71
99	-25,34	-17,40	-9,26	17,65	178,00	-40,83	-24,88	-10,30	30,51

MONTANTE 3				
Tempo (s)	Transdutores (mm)			Força (kN)
	1	2	3	
47,00	-3,32	-5,80	-1,71	20,09
48,00	-3,40	-5,86	-1,71	21,23
49,00	-3,42	-5,92	-1,71	21,40
50,00	-3,48	-5,92	-1,70	22,03
51,00	-3,57	-6,00	-1,71	23,96
52,00	-3,63	-6,02	-1,73	23,91
53,00	-3,63	-6,05	-1,71	24,25
54,00	-3,69	-6,07	-1,71	25,39
55,00	-3,74	-6,12	-1,70	26,18
56,00	-3,74	-6,12	-1,71	26,13
57,00	-3,80	-6,16	-1,62	27,32
58,00	-3,88	-6,17	-1,55	28,58
59,00	-3,90	-6,21	-1,53	28,40
60,00	-3,93	-6,19	-1,49	29,43
61,00	-4,01	-6,21	-1,44	30,74
62,00	-4,07	-6,22	-1,40	30,97
63,00	-4,05	-6,24	-1,40	31,48
64,00	-4,11	-6,22	-1,24	33,24
65,00	-4,16	-6,22	-1,18	33,76
66,00	-4,18	-6,26	-1,20	34,21
67,00	-4,26	-6,26	-1,02	36,09
68,00	-4,34	-6,28	-0,97	36,54
69,00	-4,34	-6,22	-1,00	36,43
70,00	-4,37	-6,26	-0,91	37,74
71,00	-4,49	-6,26	-0,80	39,33
72,00	-4,49	-6,26	-0,75	39,22
73,00	-4,53	-6,26	-0,67	40,24
74,00	-4,58	-6,22	-0,60	41,33
75,00	-4,57	-6,28	-0,51	41,78
76,00	-4,60	-6,24	-0,49	42,24
77,00	-4,70	-6,24	-0,29	44,17
78,00	-4,68	-6,28	-0,26	44,29
79,00	-4,78	-6,24	-0,18	45,48
80,00	-4,97	-6,36	-0,09	46,90
81,00	-5,00	-6,36	-0,09	46,68
82,00	-5,04	-6,36	-0,07	48,27
83,00	-5,04	-6,33	0,02	49,41
84,00	-5,10	-6,33	0,06	49,29
85,00	-5,14	-6,34	0,18	50,89
86,00	-5,18	-6,36	0,31	52,08

87,00	-5,21	-6,36	0,29	52,03
88,00	-5,27	-6,33	0,42	53,28
89,00	-5,39	-6,33	0,58	54,53
90,00	-5,35	-6,36	0,62	54,70
91,00	-5,42	-6,33	0,62	54,99
92,00	-5,50	-6,33	0,82	56,75
93,00	-5,56	-6,36	0,93	57,55
94,00	-5,54	-6,33	0,91	57,49
95,00	-5,60	-6,34	1,09	58,57
96,00	-5,69	-6,33	1,22	59,48
97,00	-5,71	-6,33	1,31	60,22
98,00	-5,75	-6,34	1,35	60,39
99,00	-5,86	-6,33	1,59	62,10
100,00	-5,92	-6,34	1,73	63,01
101,00	-5,92	-6,31	1,75	62,73
102,00	-6,00	-6,34	1,86	63,64
103,00	-6,05	-6,34	2,04	64,72
104,00	-6,13	-6,29	2,22	65,57
105,00	-6,11	-6,29	2,22	65,46
106,00	-6,17	-6,28	2,33	66,03
107,00	-6,23	-6,22	2,52	67,05
108,00	-6,32	-6,19	2,68	67,96
109,00	-6,32	-6,17	2,77	67,96
110,00	-6,36	-6,17	2,79	68,02
111,00	-6,42	-6,12	3,03	69,33
112,00	-6,47	-6,07	3,26	70,18
113,00	-6,47	-6,04	3,35	70,13
114,00	-6,53	-6,04	3,44	70,47
115,00	-6,63	-5,93	3,70	71,72
116,00	-6,63	-5,86	3,88	72,18
117,00	-6,63	-5,88	3,95	71,95
118,00	-6,76	-5,76	4,30	73,60
119,00	-6,78	-5,62	4,68	74,00
120,00	-6,78	-5,61	4,74	73,83
121,00	-6,78	-5,40	5,19	75,25
122,00	-6,80	-5,23	5,65	75,65
123,00	-6,80	-5,18	5,70	75,25
124,00	-6,80	-4,85	6,36	76,45
125,00	-6,72	-4,56	6,96	76,56
126,00	-6,65	-4,46	7,09	76,16
127,00	-6,61	-4,10	7,80	76,96
128,00	-6,32	-3,64	8,55	76,50
129,00	-6,19	-3,48	8,75	75,76

MONTANTES SEM COBREJUNTA E COM ANEL DE VENTO									
MONTANTE 6					MONTANTE 8				
Tempo (s)	Transdutores (mm)			Força (kN)	Tempo (s)	Transdutores (mm)			Força (kN)
	1	2	3			1	2	3	
42,00	0,71	3,98	5,58	10,70	30,00	-0,02	0,81	1,46	10,42
43,00	0,73	4,03	5,59	11,04	31,00	-0,02	0,89	1,51	11,33
44,00	0,73	4,15	5,81	12,24	32,00	-0,04	0,86	1,57	11,33
45,00	0,69	4,20	5,83	12,35	33,00	-0,10	0,91	1,62	12,35
46,00	0,73	4,27	5,90	13,09	34,00	-0,08	0,94	1,71	13,21
47,00	0,69	4,34	6,03	14,00	35,00	-0,08	0,94	1,75	13,38
48,00	0,67	4,34	6,09	14,06	36,00	-0,13	1,01	1,82	14,46
49,00	0,61	4,56	6,23	15,43	37,00	-0,13	1,05	1,93	15,54
50,00	0,61	4,56	6,32	15,94	38,00	-0,17	1,06	1,93	15,82
51,00	0,57	4,56	6,38	16,22	39,00	-0,21	1,15	2,15	17,87
52,00	0,55	4,73	6,49	17,42	40,00	-0,17	1,13	2,13	17,99
53,00	0,54	4,73	6,63	17,93	41,00	-0,23	1,24	2,31	20,04
54,00	0,48	4,75	6,61	18,22	42,00	-0,25	1,24	2,33	20,21
55,00	0,33	4,73	6,67	19,52	43,00	-0,27	1,27	2,42	21,35
56,00	0,04	4,75	6,65	19,98	44,00	-0,34	1,37	2,59	22,71
57,00	-0,08	4,70	6,69	20,38	45,00	-0,36	1,36	2,57	22,83
58,00	-0,21	4,72	6,69	21,80	46,00	-0,42	1,48	2,81	25,05
59,00	-0,71	4,30	6,67	22,03	47,00	-0,38	1,48	2,86	25,27
60,00	-3,72	-0,45	0,47	20,09	48,00	-0,44	1,51	2,95	26,24
61,00	-3,72	-0,51	0,57	20,21	49,00	-0,44	1,60	3,08	27,89
62,00	-3,71	-0,57	0,58	20,21	50,00	-0,50	1,61	3,10	27,78
63,00	-3,78	-0,51	0,58	21,18	51,00	-0,55	1,65	3,28	29,71
64,00	-3,80	-0,51	0,58	22,54	52,00	-0,57	1,70	3,41	30,34
65,00	-3,82	-0,45	0,58	22,60	53,00	-0,61	1,70	3,39	30,97
66,00	-3,82	-0,41	0,66	23,57	54,00	-0,63	1,85	3,59	32,73
67,00	-3,90	-0,34	0,75	24,70	55,00	-0,65	1,80	3,64	32,79
68,00	-3,92	-0,33	0,84	24,99	56,00	-0,71	1,85	3,77	34,04
69,00	-3,93	-0,34	0,84	25,73	57,00	-0,78	1,92	3,92	35,52
70,00	-4,01	-0,19	1,06	27,66	58,00	-0,80	1,92	3,95	35,41
71,00	-4,05	-0,12	1,09	28,01	59,00	-0,86	1,96	4,03	36,54
72,00	-4,11	-0,05	1,20	29,14	60,00	-0,92	2,01	4,21	37,80
175,00	-4,28	0,03	1,35	31,36	61,00	-0,94	1,99	4,21	37,68
176,00	-4,28	0,09	1,40	31,88	62,00	-1,01	2,04	4,34	39,16
177,00	-4,37	0,21	1,55	33,41	63,00	-1,07	2,11	4,50	40,30
178,00	-4,39	0,31	1,71	34,61	64,00	-1,09	2,13	4,52	40,30
179,00	-4,37	0,31	1,75	34,72	65,00	-1,18	2,20	4,68	42,29
180,00	-4,43	0,51	2,00	37,06	66,00	-1,24	2,21	4,77	42,92
181,00	-4,47	0,58	2,06	37,51	67,00	-1,26	2,18	4,81	43,03

182,00	-4,51	0,72	2,22	38,88	68,00	-1,38	2,26	5,01	45,08
183,00	-4,55	0,84	2,44	40,59	69,00	-1,43	2,30	5,07	45,48
184,00	-4,55	0,89	2,48	40,87	70,00	-1,47	2,26	5,08	45,88
185,00	-4,66	1,06	2,73	43,09	71,00	-1,59	2,35	5,27	47,59
186,00	-4,68	1,13	2,81	43,55	72,00	-1,60	2,38	5,34	48,04
187,00	-4,72	1,22	2,92	44,80	73,00	-1,64	2,38	5,39	48,73
188,00	-4,76	1,37	3,19	46,45	74,00	-1,81	2,44	5,61	50,55
189,00	-4,81	1,39	3,17	46,33	75,00	-1,83	2,45	5,65	50,55
190,00	-4,85	1,53	3,34	48,10	76,00	-1,91	2,44	5,69	51,74
191,00	-4,89	1,61	3,54	49,18	77,00	-2,08	2,44	5,81	53,28
192,00	-4,93	1,72	3,63	49,64	78,00	-2,18	2,40	5,83	53,17
193,00	-4,97	1,75	3,70	50,43	79,00	-2,31	2,45	5,87	54,42
194,00	-5,08	1,94	3,97	52,25	80,00	-2,48	2,49	5,92	55,61
195,00	-5,10	1,96	4,01	52,25	81,00	-2,62	2,40	5,96	55,56
196,00	-5,14	2,09	4,21	53,79	82,00	-2,85	2,38	5,94	57,32
197,00	-5,25	2,20	4,32	54,65	83,00	-3,04	2,25	6,00	57,95
198,00	-5,23	2,20	4,32	54,59	84,00	-3,19	2,20	5,98	58,06
199,00	-5,41	2,40	4,61	57,15	85,00	-3,42	2,13	5,98	59,77
200,00	-5,44	2,45	4,72	57,43	86,00	-3,63	2,04	5,98	60,11
201,00	-5,54	2,50	4,77	58,12	87,00	-3,80	1,89	6,00	60,22
202,00	-5,63	2,62	5,03	59,71	88,00	-4,55	1,51	5,98	61,87
203,00	-5,69	2,68	5,10	59,83	89,00	-5,23	0,98	5,61	62,10
204,00	-5,77	2,73	5,27	60,79	90,00	-5,67	0,74	5,45	62,84
205,00	-5,92	2,90	5,43	62,33	91,00	-7,77	-0,63	4,39	63,75
206,00	-5,98	2,88	5,52	62,50	92,00	-9,68	-2,09	3,08	62,61
207,00	-6,11	3,02	5,63	63,70	93,00	-33,58	-22,57	-13,70	33,76
208,00	-6,30	3,12	5,89	65,06	94,00	-33,50	-22,43	-13,47	32,90
209,00	-6,28	3,10	5,94	65,12	95,00	-33,46	-22,39	-13,38	32,45
210,00	-6,42	3,19	6,00	65,57	96,00	-33,48	-22,39	-13,32	32,33
211,00	-6,61	3,33	6,25	67,17	97,00	-33,48	-22,38	-13,27	32,16
212,00	-6,72	3,33	6,31	67,45	98,00	-33,59	-22,15	-12,85	32,56
213,00	-6,80	3,33	6,36	67,91	99,00	-33,54	-21,74	-12,21	31,31
214,00	-7,11	3,50	6,63	69,44	100,00	-33,59	-21,38	-11,55	30,97
215,00	-7,30	3,52	6,67	69,79	101,00	-33,44	-21,02	-10,97	29,60
216,00	-7,39	3,48	6,71	70,01	102,00	-33,46	-20,92	-10,88	29,32
217,00	-8,10	3,52	6,83	71,84	103,00	-33,44	-20,90	-10,81	29,09
218,00	-8,35	3,48	6,85	72,12	104,00	-33,38	-20,90	-10,79	29,03
219,00	-8,44	3,50	6,89	72,06	105,00	-33,37	-20,87	-10,77	28,80
220,00	-8,90	3,50	7,20	73,60	106,00	-33,35	-20,85	-10,75	28,92
221,00	-9,44	3,46	7,25	73,83	107,00	-33,35	-20,83	-10,75	28,86
222,00	-9,57	3,46	7,23	73,77	108,00	-33,35	-20,85	-10,73	28,75
223,00	-11,84	2,28	6,96	74,40	109,00	-33,37	-20,80	-10,71	28,69
224,00	-13,71	1,70	6,76	72,35	110,00	-33,37	-20,82	-10,66	28,69
225,00	-29,81	-7,22	2,64	32,73	111,00	-33,35	-20,83	-10,68	28,69

MONTANTES COM COBREJUNTA E COM ANEL DE VENTO									
MONTANTE 5				MONTANTE 7					
Tempo (s)	Transdutores (mm)			Força (kN)	Tempo (s)	Transdutores (mm)			Força (kN)
	1	2	3			1	2	3	
91,00	-3,95	-6,72	-3,04	36,77	72,00	-1,49	-2,66	3,68	28,46
92,00	-3,99	-6,77	-3,08	37,57	73,00	-1,49	-2,66	3,74	29,60
93,00	-4,03	-6,88	-3,17	38,59	74,00	-1,49	-2,59	3,85	31,19
94,00	-4,05	-6,86	-3,17	38,48	75,00	-1,51	-2,56	3,88	31,65
95,00	-4,09	-6,94	-3,24	38,54	76,00	-1,51	-2,59	3,92	32,56
96,00	-4,13	-7,03	-3,28	39,62	77,00	-1,51	-2,50	4,03	34,15
97,00	-4,20	-7,10	-3,35	40,36	78,00	-1,51	-2,47	4,08	34,38
98,00	-4,20	-7,10	-3,34	40,19	79,00	-1,51	-2,49	4,12	35,06
99,00	-4,20	-7,13	-3,39	40,30	80,00	-1,51	-2,44	4,23	36,89
100,00	-4,24	-7,15	-3,44	41,38	81,00	-1,53	-2,42	4,32	37,51
101,00	-4,28	-7,18	-3,48	41,44	82,00	-1,53	-2,40	4,34	37,40
102,00	-4,24	-7,22	-3,44	41,44	83,00	-1,53	-2,35	4,39	39,28
103,00	-4,24	-7,22	-3,48	41,38	84,00	-1,55	-2,33	4,54	40,64
104,00	-4,30	-7,22	-3,46	41,27	85,00	-1,55	-2,30	4,57	40,81
105,00	-4,28	-7,22	-3,48	41,27	86,00	-1,55	-2,30	4,65	41,50
106,00	-4,28	-7,24	-3,46	41,10	87,00	-1,53	-2,25	4,74	43,26
107,00	-4,24	-7,20	-3,44	41,15	88,00	-1,55	-2,21	4,81	44,06
108,00	-4,26	-7,22	-3,46	41,04	89,00	-1,51	-2,20	4,83	43,94
109,00	-4,26	-7,22	-3,48	41,10	90,00	-1,51	-2,14	4,92	45,54
110,00	-4,24	-7,22	-3,46	41,10	91,00	-1,55	-2,09	5,05	47,02
111,00	-4,28	-7,20	-3,48	41,04	92,00	-1,53	-2,09	5,10	47,25
112,00	-4,30	-7,27	-3,50	41,78	93,00	-1,55	-2,09	5,14	47,25
113,00	-4,30	-7,29	-3,48	41,95	94,00	-1,57	-2,08	5,23	49,07
114,00	-4,30	-7,27	-3,46	41,95	95,00	-1,55	-2,01	5,36	50,49
115,00	-4,32	-7,25	-3,50	41,95	96,00	-1,55	-1,97	5,39	50,43
116,00	-4,32	-7,27	-3,52	41,72	97,00	-1,57	-1,97	5,49	51,69
117,00	-4,28	-7,27	-3,52	41,84	98,00	-1,55	-1,90	5,65	53,45
118,00	-4,26	-7,31	-3,52	41,67	99,00	-1,57	-1,92	5,69	53,56
119,00	-4,32	-7,31	-3,55	41,89	100,00	-1,53	-1,90	5,78	54,36
120,00	-4,32	-7,36	-3,52	42,52	101,00	-1,55	-1,82	5,92	55,78
121,00	-4,43	-7,48	-3,74	44,46	102,00	-1,53	-1,80	6,01	56,87
122,00	-4,45	-7,56	-3,75	44,63	103,00	-1,57	-1,75	6,03	56,64
123,00	-4,62	-7,73	-3,94	46,22	104,00	-1,57	-1,70	6,18	58,35
124,00	-4,78	-7,96	-4,17	47,36	105,00	-1,55	-1,63	6,32	59,71
125,00	-4,78	-7,97	-4,19	47,30	106,00	-1,55	-1,66	6,41	59,77
126,00	-4,89	-8,15	-4,32	49,41	107,00	-1,55	-1,61	6,49	61,08
127,00	-4,95	-8,25	-4,43	50,03	108,00	-1,57	-1,54	6,65	62,56
128,00	-4,93	-8,23	-4,43	49,92	109,00	-1,59	-1,51	6,74	62,73
129,00	-5,12	-8,49	-4,65	52,48	110,00	-1,51	-1,49	6,80	63,41

130,00	-5,21	-8,61	-4,74	52,99	111,00	-1,55	-1,42	6,98	64,78
131,00	-5,23	-8,66	-4,77	53,51	112,00	-1,57	-1,39	7,11	65,80
132,00	-5,41	-8,92	-5,03	55,67	113,00	-1,55	-1,37	7,16	65,69
133,00	-5,48	-8,95	-5,01	55,50	114,00	-1,53	-1,32	7,33	66,94
134,00	-5,62	-9,19	-5,27	58,12	115,00	-1,55	-1,20	7,53	68,59
135,00	-5,67	-9,26	-5,32	58,23	116,00	-1,53	-1,18	7,65	68,76
136,00	-5,75	-9,38	-5,39	59,48	117,00	-1,53	-1,15	7,78	69,67
137,00	-5,92	-9,59	-5,63	61,31	118,00	-1,51	-1,03	8,11	71,61
138,00	-5,98	-9,72	-5,76	60,96	119,00	-1,53	-1,00	8,22	71,44
139,00	-6,17	-9,96	-5,94	63,41	120,00	-1,55	-0,98	8,27	71,84
140,00	-6,25	-10,12	-6,12	64,09	121,00	-1,55	-0,86	8,55	73,32
141,00	-6,26	-10,15	-6,12	64,15	122,00	-1,55	-0,81	8,80	73,88
142,00	-6,55	-10,56	-6,61	66,31	123,00	-1,55	-0,79	8,84	73,77
143,00	-6,74	-10,79	-6,91	67,11	124,00	-1,55	-0,65	9,28	75,59
144,00	-6,78	-10,91	-6,98	67,62	125,00	-1,53	-0,58	9,48	75,59
145,00	-7,11	-11,32	-7,40	70,01	126,00	-1,55	-0,53	9,60	75,93
146,00	-7,18	-11,39	-7,47	69,79	127,00	-1,55	-0,39	10,06	77,19
147,00	-7,26	-11,51	-7,58	71,21	128,00	-1,45	-0,34	10,35	76,96
148,00	-7,49	-11,80	-7,82	72,69	129,00	-1,45	-0,26	10,46	76,90
149,00	-7,53	-11,81	-7,89	72,40	130,00	-1,39	-0,09	10,93	77,76
150,00	-7,74	-12,14	-8,20	74,62	131,00	-1,34	0,02	11,26	77,19
151,00	-8,02	-12,57	-8,71	75,31	132,00	-1,32	0,05	11,39	77,07
152,00	-8,02	-12,57	-8,67	75,02	133,00	-1,26	0,24	11,92	77,41
153,00	-8,29	-12,96	-9,13	77,36	134,00	-1,18	0,38	12,35	76,50
154,00	-8,44	-13,13	-9,28	77,47	135,00	-1,17	0,43	12,45	75,76
155,00	-8,50	-13,24	-9,38	78,27	136,00	-1,07	0,67	13,12	75,59
156,00	-8,80	-13,65	-9,88	80,15	137,00	-0,88	0,91	13,59	73,32
157,00	-8,94	-13,77	-10,02	79,98	138,00	-0,88	0,94	13,79	72,40
158,00	-9,05	-13,91	-10,19	81,17	139,00	-0,31	1,72	15,03	69,84
159,00	-9,63	-14,87	-11,41	82,59	140,00	0,08	2,18	15,69	67,17
160,00	-9,68	-14,90	-11,46	82,25	141,00	0,19	2,30	15,84	66,49
161,00	-9,87	-15,14	-11,74	83,33	142,00	1,53	3,91	17,77	63,47
162,00	-10,28	-15,67	-12,46	84,59	143,00	2,31	4,73	18,75	60,39
163,00	-10,33	-15,81	-12,72	84,42	144,00	2,66	5,14	19,19	59,37
164,00	-10,66	-16,20	-13,25	85,90	145,00	3,06	5,85	19,95	58,46
165,00	-11,15	-16,91	-14,32	86,81	146,00	3,29	6,17	20,45	57,83
166,00	-11,15	-17,01	-14,41	86,41	147,00	3,34	6,24	20,61	57,38
167,00	-11,35	-17,22	-14,76	87,49	148,00	3,36	6,36	20,66	56,98
168,00	-11,84	-18,00	-16,04	88,63	149,00	3,44	6,40	20,75	56,92
169,00	-11,99	-18,21	-16,42	88,12	150,00	3,44	6,45	20,83	56,69
170,00	-12,11	-18,43	-16,78	88,86	151,00	3,46	6,48	20,88	56,58
171,00	-12,93	-19,89	-19,79	89,03	152,00	3,50	6,50	20,94	56,35
172,00	-24,08	-32,24	-39,71	-0,97	153,00	3,48	6,53	20,96	56,24

ANEXO A

As equações necessárias para calcular os termos ω , A_1 , A_2 e A_3 da Equação (3.6), definidas pelo *Eurocode 3*, item 5.3.4.3.3, são:

$$\omega = \frac{\pi r}{j l_i} \quad (\text{A. 1})$$

$$A_1 = j^4 [\omega^4 C_{44} + 2\omega^2 (C_{45} + C_{66})] + C_{22} + 2j^2 C_{25} \quad (\text{A. 2})$$

$$A_2 = 2\omega^2 (C_{12} + C_{33})(C_{22} + j^2 C_{25})(C_{12} + j^2 \omega^2 C_{14}) - (\omega^2 C_{11} + C_{33})(C_{22} + j^2 C_{25})^2 - \omega^2 (C_{22} + \omega^2 C_{33})(C_{12} + j^2 \omega^2 C_{14})^2 \quad (\text{A. 3})$$

$$A_3 = (\omega^2 C_{11} + C_{33})(C_{22} + C_{25} + \omega^2 C_{33}) - \omega^2 (C_{12} + C_{33})^2 \quad (\text{A. 4})$$

$$C_{11} = C_\phi + EA_s/d_s \quad (\text{A. 5})$$

$$C_{12} = \nu \sqrt{C_\phi C_\theta} \quad (\text{A. 6})$$

$$C_{22} = C_\theta + EA_r/d_r \quad (\text{A. 7})$$

$$C_{33} = C_{\phi\theta} \quad (\text{A. 8})$$

$$C_{14} = e_s EA_s / (r d_s) \quad (\text{A. 9})$$

$$C_{25} = e_r EA_r / (r d_r) \quad (\text{A. 10})$$

$$C_{44} = [D_\phi + EI_s/d_s + EA_s e_s^2 / d_s] / r^2 \quad (\text{A. 11})$$

$$C_{55} = [D_\theta + EI_r/d_r + EA_r e_r^2 / d_r] / r^2 \quad (\text{A. 12})$$

$$C_{45} = \nu \sqrt{D_\phi D_\theta} / r^2 \quad (\text{A. 13})$$

$$C_{66} = [D_{\phi\theta} + 0,5(GI_{ts}/d_s + GI_{tr}/d_r)] / r^2 \quad (\text{A. 14})$$

onde,

l_i é o comprimento de meia onda da potencial flambagem na direção vertical;

A_s é a área da seção transversal do perfil do montante;

I_s é o momento de inércia do perfil do montante no eixo circunferencial, para flambagem vertical;

d_s é a distância entre os montantes;

I_{ts} é a inércia a torção do perfil do montante;

e_s é a excentricidade entre o centro da chapa e o perfil do montante;

A_r é a área da seção transversal do anel de vento;

I_r é o momento de inércia do anel de vento no eixo vertical, para flambagem circunferencial;

d_r é a distância entre os anéis de vento;

I_{tr} é a inércia a torção do anel de vento;

e_r é a excentricidade entre o centro da chapa e o anel de vento;

C_ϕ é a resistência da chapa ao alongamento na direção axial;

C_θ é a resistência da chapa ao alongamento na direção circunferencial;

$C_{\phi\theta}$ é a resistência transversal da chapa ao alongamento;

D_ϕ é a resistência à flexão da chapa na direção axial;

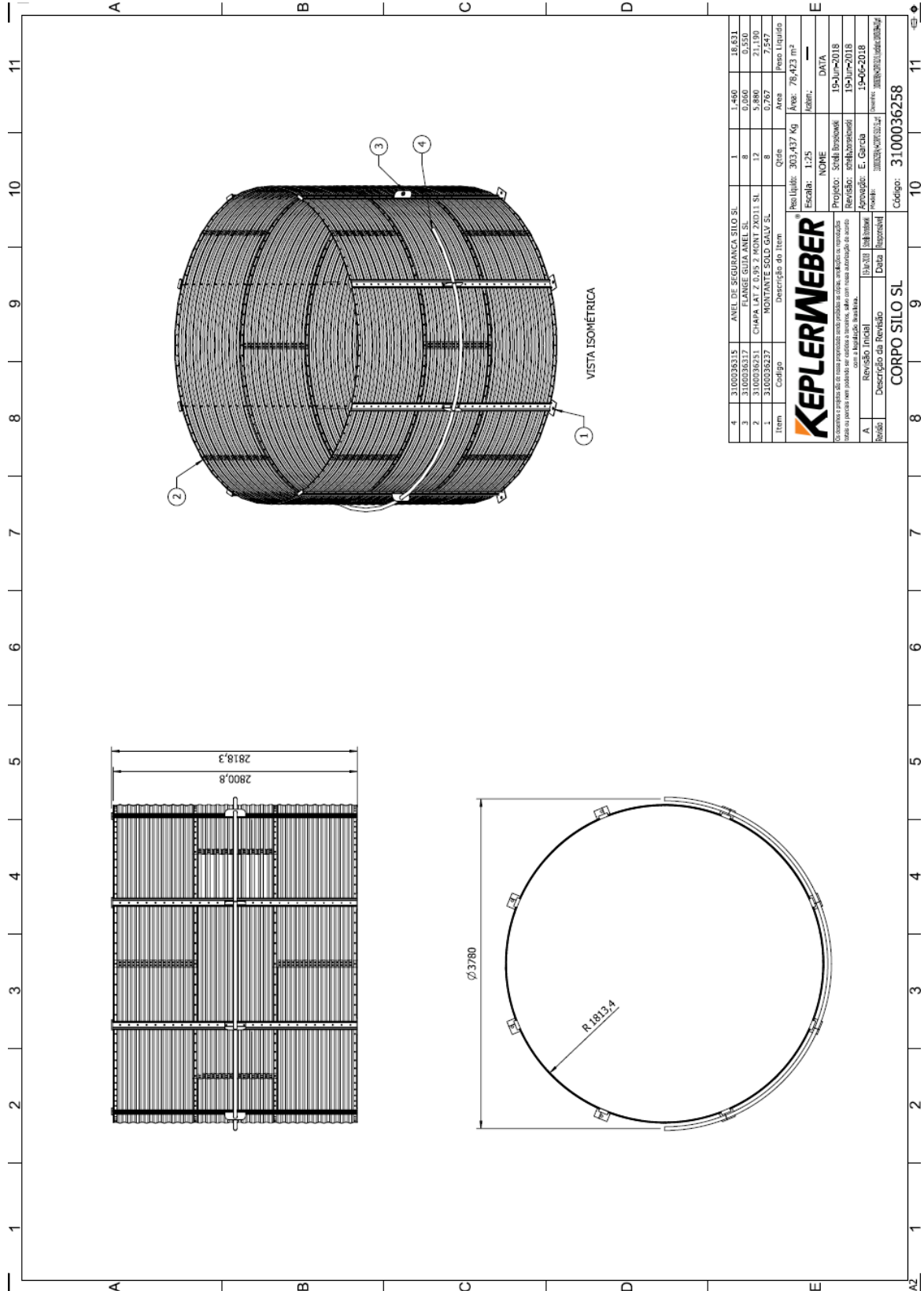
D_θ é a resistência à flexão da chapa na direção circunferencial;

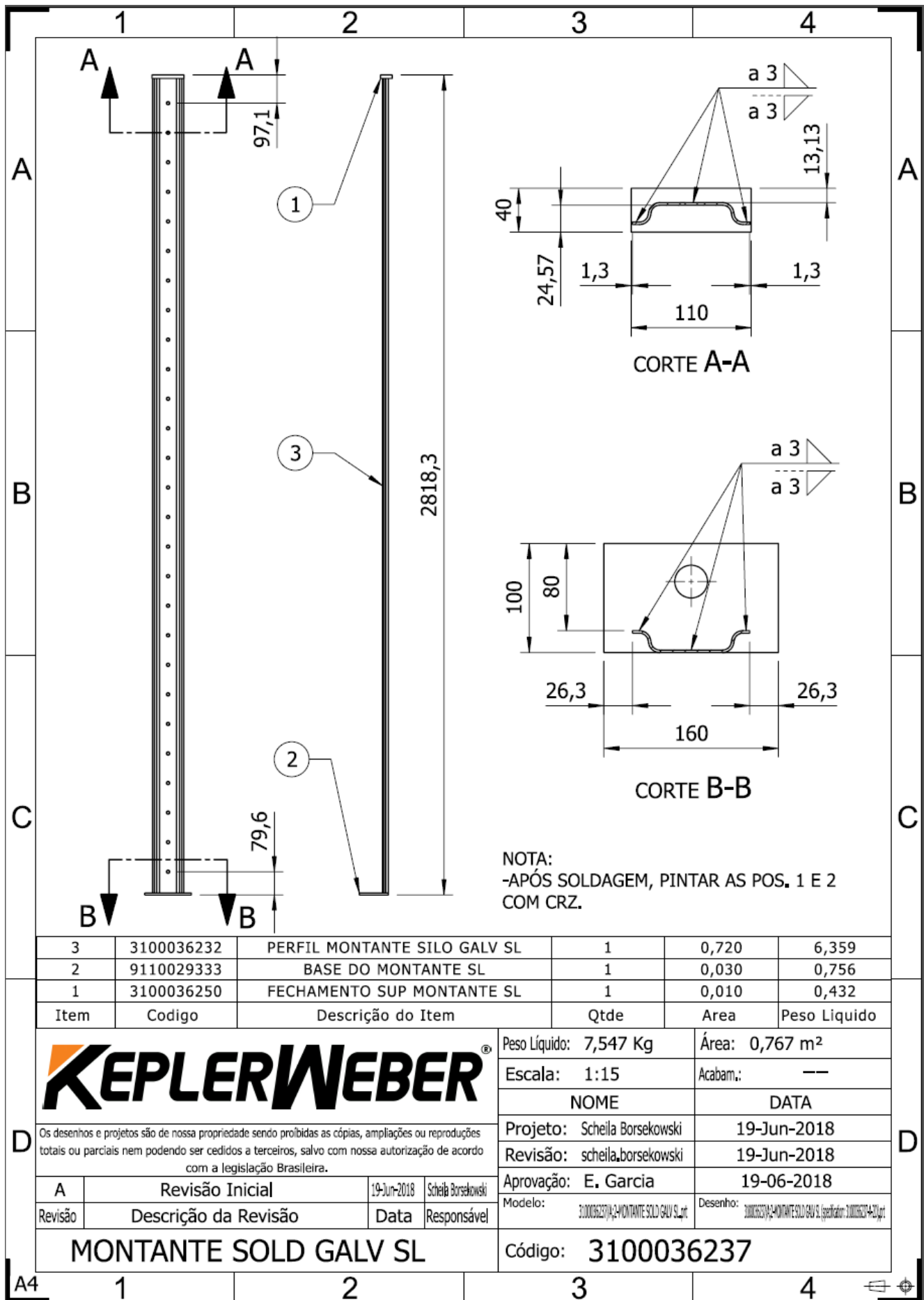
$D_{\phi\theta}$ é a resistência a torção da chapa;

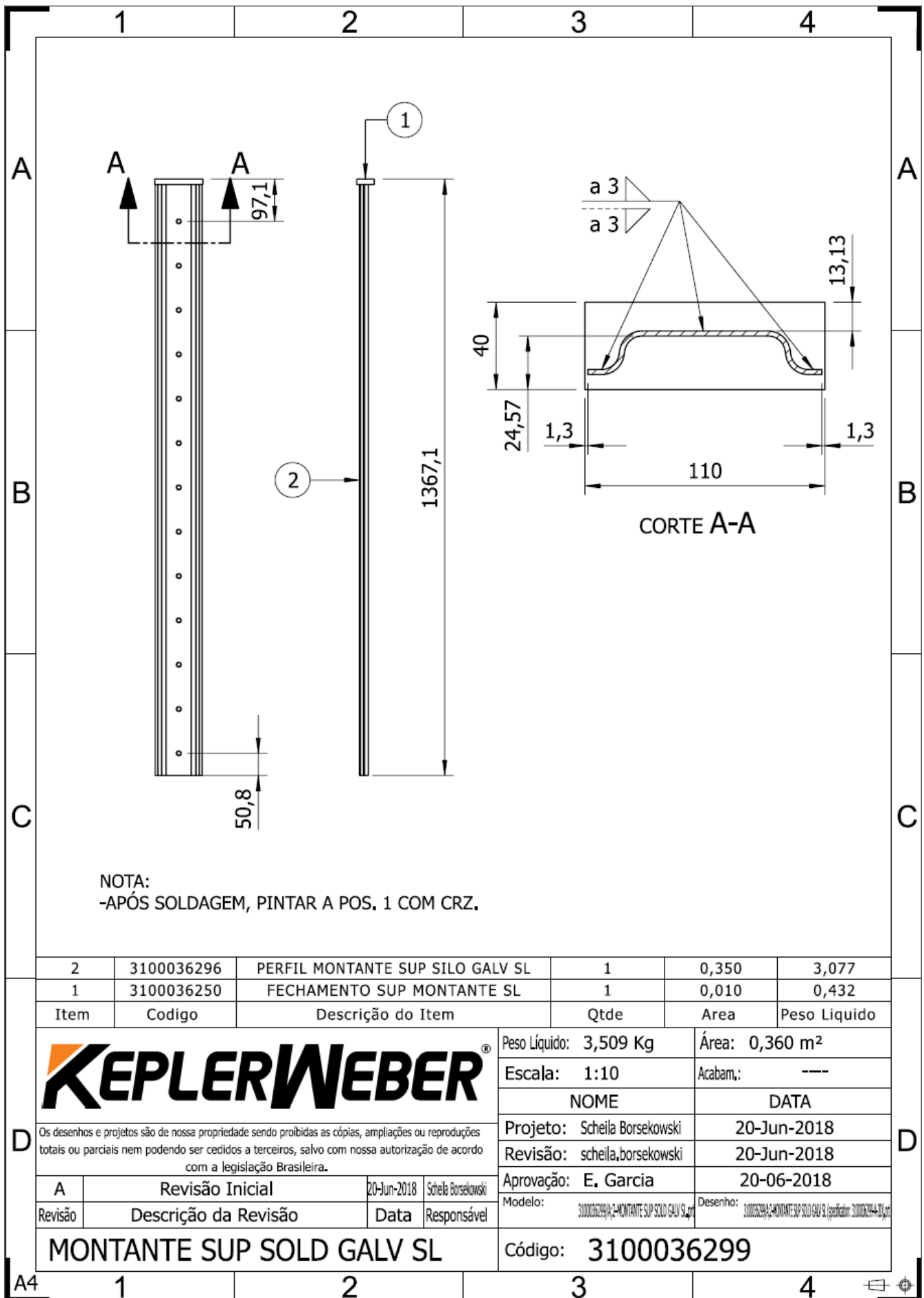
r é o raio do silo.

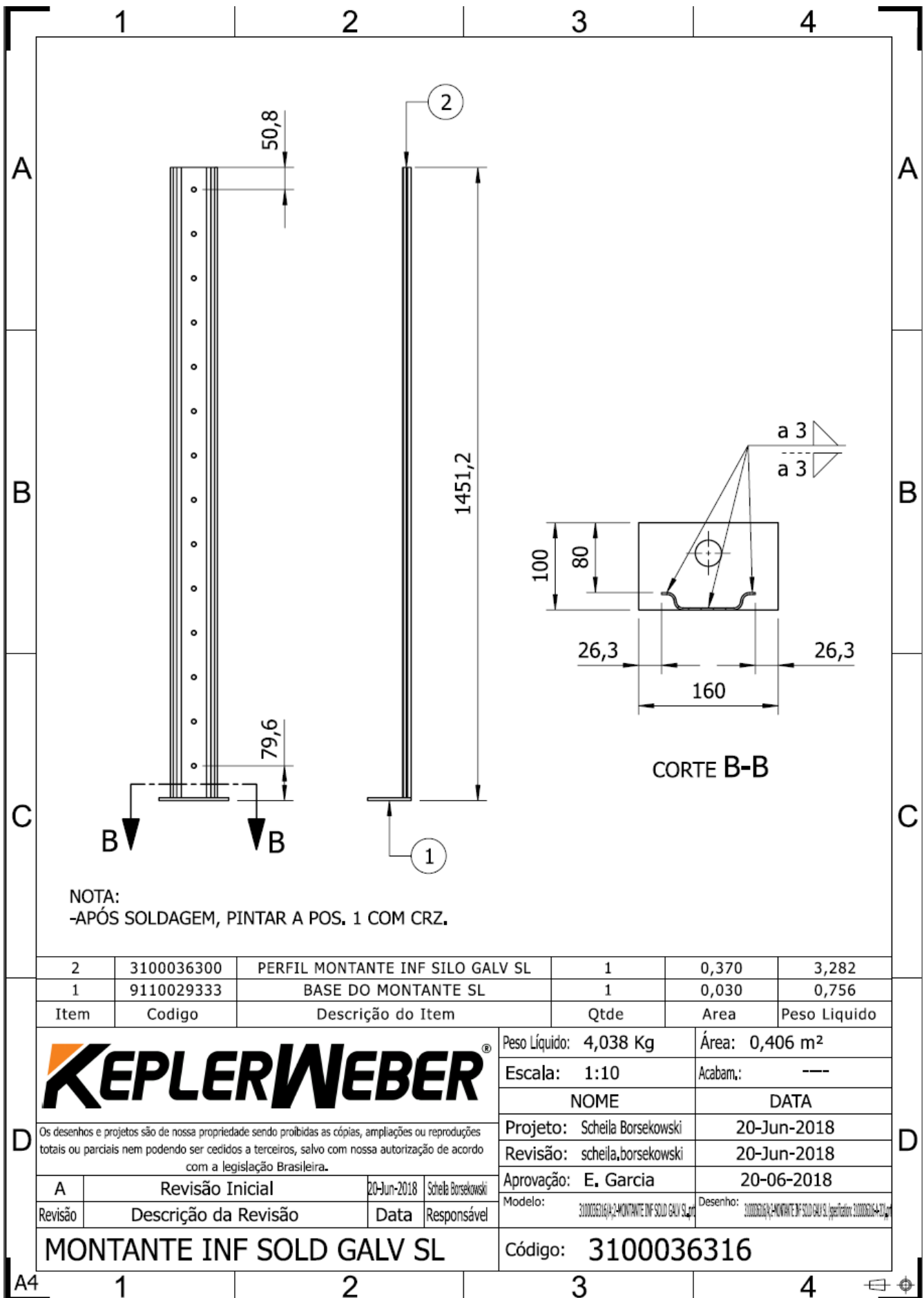
ANEXO B

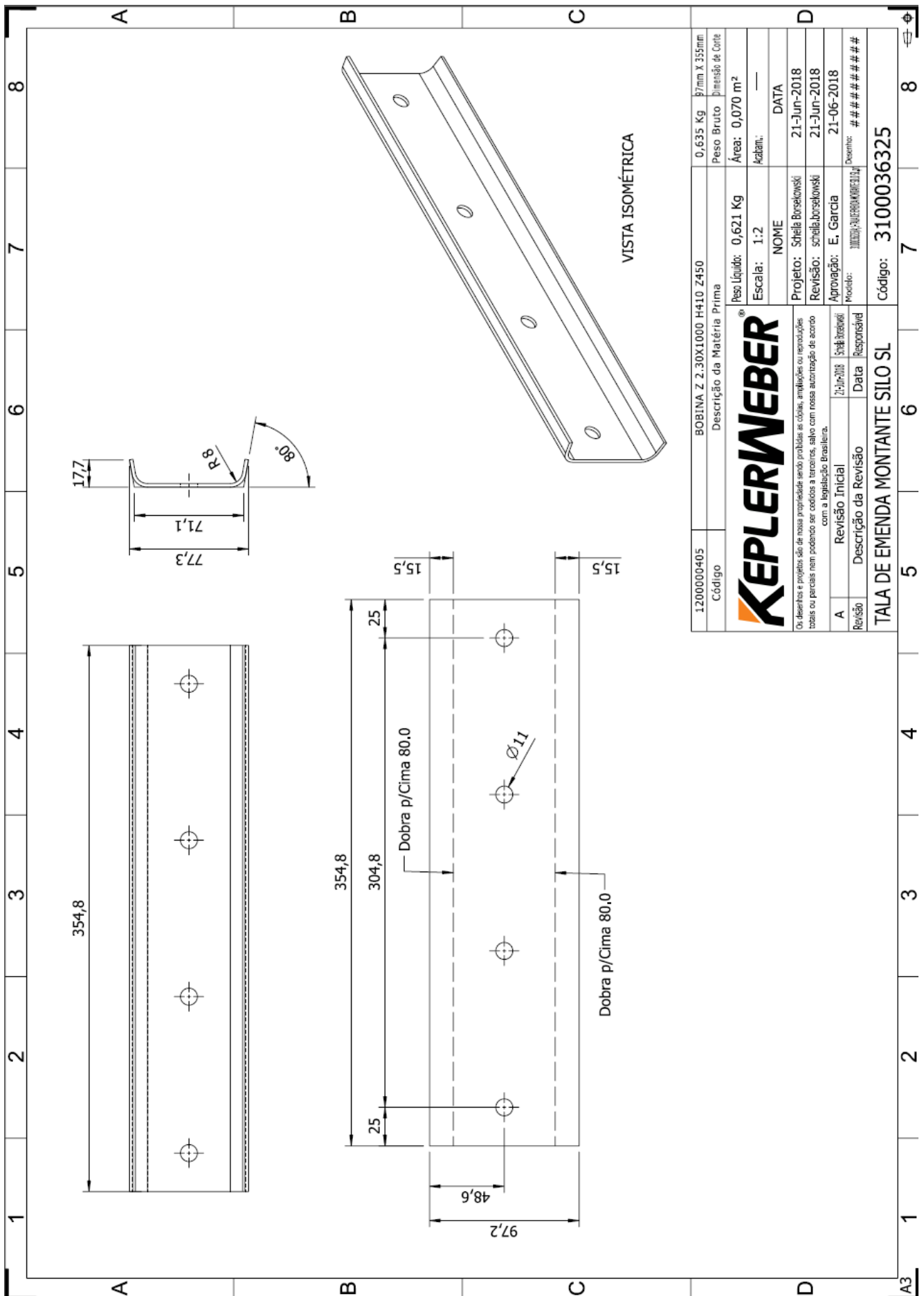
Projetos feitos especialmente para a pesquisa, de autoria da indústria Kepler Weber.

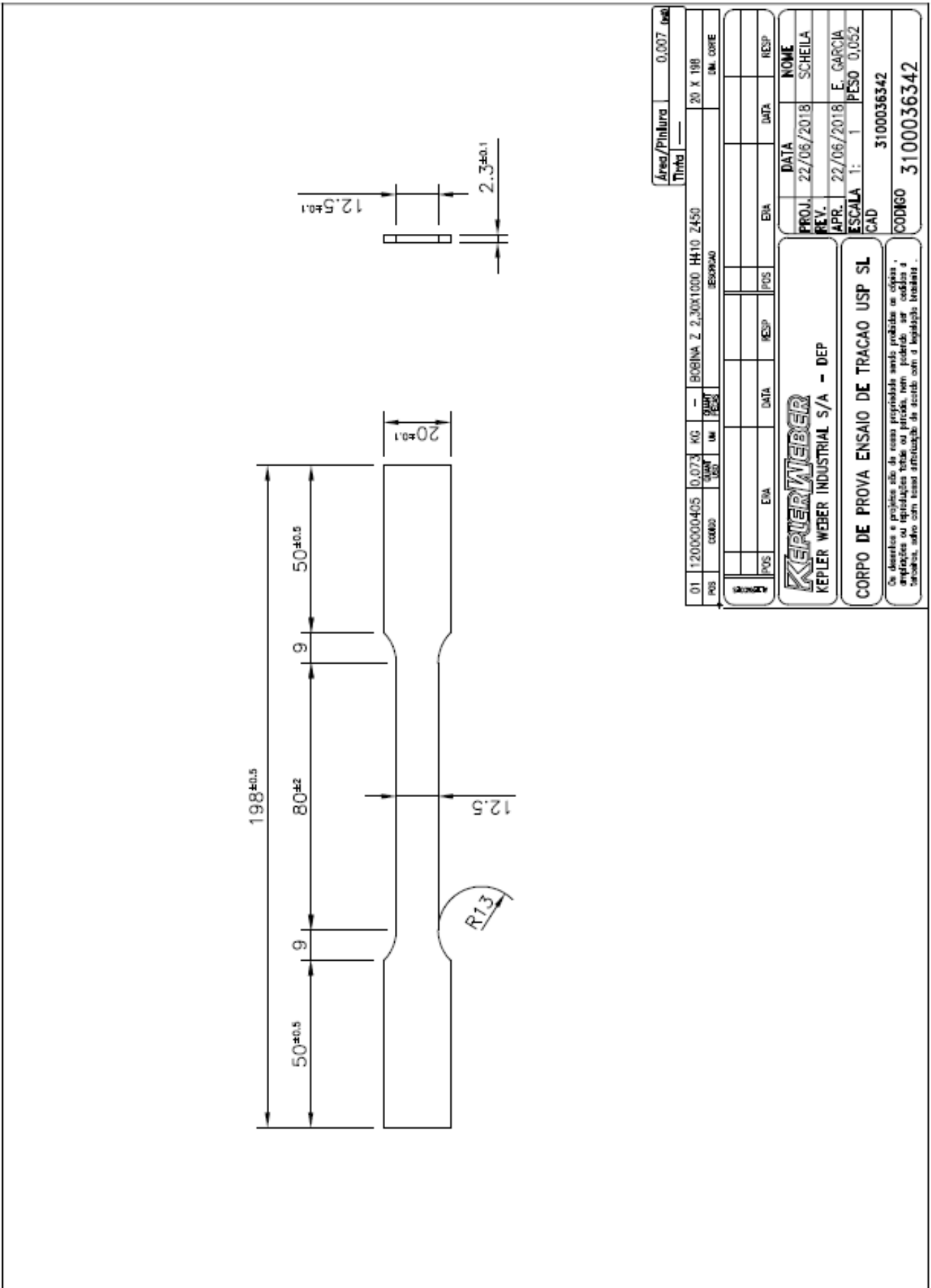












<p>USIMINAS USINAS SIDERÚRGICAS DE MINAS GERAIS S.A. USINA BELVIDERIZ, CARÁVIA - BRÁSILGANGIBRÁSIL R. PROF. JOSÉ VIEIRA DE MENDONÇA, 3011 BAIRRO ENGENHO NOGUEIRA - CP 808 - CEP: 31310-280 CNPJ: 80.894.750/0025-82 INSCRIÇÃO ESTADUAL: 313.002022.0120</p>	<p>CERTIFICADO DE INSPEÇÃO INSPECTION CERTIFICATE BOBINA GALVANIZADA A QUENTE - GI TRATAMENTO QUÍMICO HOT DIP GALVANIZED - GI COIL CHEMICALLY TREATED</p>	<p>Cliente-Customer: KEPLER WEBER INDUSTRIAL S A</p> <p>Tolerâncias - Tolerances Espessura-Thickness Largura-Width</p>	<p>Nota Fiscal Commercial Invoice 3 000503940 1</p> <p>Ordem de Venda Sale Order</p> <p>Item 3</p> <p>Data de Emissão Date of Issue 30/05/2018</p> <p>Nº Certificado Certificate Nº 4266874</p>
<p>ASTM-A653-17-HSLAS-410</p>		<p>Dimensões Nominais - Nominal Dimensions 2,30 x 1000,0 mm</p>	<p>Folha - Sheet = 1 Aparência Superficial - Surface Appearance SUPERFICIE CNBR-11888/SUPERFICIE 3(INBR7008) SUREFACE C.INBR-11888/SURFACE 3.INBR7008</p>
<p>Placa Volume Slab 301 6445939</p>	<p>Pecas por Volume Pieces per Packages 1</p>	<p>Peso Líquido Net Weight 11510</p>	<p>Corrida Amostra Heat Sample 523029 51763457</p>
<p>Peso Líquido Real Total-Actual Net Weight = 11.510 Tonelagem Métrica-Metric Ton Peso Bruto Real Total-Actual Gross Weight = 11.567 Tonelagem Métrica-Metric Ton</p>		<p>Pecas-Pieces = 1 Volumes = 1</p>	<p>Ensaio de Tração - Tensile Test</p>
<p>Amostra Pos Dir LE IR Sample YS TS YS/TS EI 51763457 T4 L 431 509 85</p>	<p>Volume Line 6445939 C01#2</p>	<p>Revestimento Coating 181,0 194,0 365,0</p>	<p>Sub Inf Total 181,0 194,0 365,0</p>
<p>Unidade-Unit = MPa Método de Ensaio LE-Test Method YS = 0,2% EM = 50 mm Larg = 12,5 mm S = Retangular</p>			
<p>Composição Química (%) - Chemical Composition (%)</p>			
<p>Corrida Análise Heat Analysis 523029 P</p>	<p>C Si Mn P S Al Cu Nb V Ti Cr Ni Mo Sn B Ca Sb Pb</p>	<p>0,07 0,22 1,06 0,021 0,008 0,035 0,01 0,032 0,004 0,002 0,01 0,01 0,00 0,001 0,0039 0,0001 0,0021 0,002 0,003</p>	<p>0,003</p>
<p>Abreviaturas - Abbreviations</p>			
<p>LE = Limite de escoamento - YS = Yield Strength AL = Alongamento - El = Elongation L = Longitudinal T4 = Topo a um quarto da largura-Top at a quarter width Larg = Largura-Width Diam = Diâmetro-Diameter Sup = Superfície Superior-Upper Surface Inf = Superfície Inferior-Lower Surface Al = Alumínio Total-Total Aluminum</p>	<p>LR = Limite de Resistência - TS = Tensile Strength Dir = Direção-Direction Pos = Posição de Amostragem-Sampling Position EM = Base Medida-Gauge Length S = Secção Transversal-Cross Section P = Panela-Ladle</p>	<p>Abreviaturas - Abbreviations</p>	<p>Produto Conforme RoHS&ELV Compliant Product Produto 100% Reciclável 100% Recyclable Product</p>
<p>Sistema de Gestão Certificado pelas normas: Management System certified according to the standards: ISO 9.001 ISO 14.001 IATF 16.949 OHSAS 18.001</p>			
<p>Observações - Remarks</p>			
<p>JULHO/2018 1200000405</p>			
<p>FDS - Ficha de Dados de Segurança do Produto número 23, disponível na Extranet da Usiminas MSDS - Material Safety Data Sheet N° 23 available at Usiminas Extranet</p>			
<p>Helber Luiz Oliveira Ribeiro helber.ribeiro@usiminas.com +55 031 3629-3215</p>		<p>GERENTE GERAL CONTROLE INTEGRADO DE QUALIDADE INTEGRATED QUALITY CONTROL GENERAL MANAGER</p>	
<p>USIMINAS</p>		<p>WITNESS SURVEILLOR</p>	