



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE UM**  
**TANQUE DE CONCENTRADO DE MINÉRIO DE FERRO**  
**ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

**Marcos Estevão Assumpção**

**Belo Horizonte, 16 de dezembro de 2015**

Marcos Estevão Assumpção

**AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE UM  
TANQUE DE CONCENTRADO DE MINÉRIO DE FERRO  
ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais,  
como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projetos Mecânicos

Orientador(a): Prof. Ernani Sales Palma, Dr. -Ing

UFMG

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2015



**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31.270-901 - Belo Horizonte – MG

Tel.: +55 31 3499-5145 - Fax.: +55 31 3443-3783

www.demec.ufmg.br - E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

## **AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE UM TANQUE DE CONCENTRADO DE MINÉRIO DE FERRO ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

**MARCOS ESTEVÃO ASSUMPCÃO**

Dissertação defendida e aprovada em 16 de dezembro de 2015, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Projetos Mecânicos".

---

**Prof. Dr. –Ing. Ernani Sales Palma - UFMG – Orientador**

---

**Prof. Dr. Claysson Bruno dos Santos Vimieiro – UFMG – Examinador**

---

**PhD. Maurício Centeno Lobão –Vesta Engenharia – Examinador**

Dedico este trabalho aos meus pais Saulo Hirã, Ângela e Domingos.

Aos meus avós Saulo e Belizanda.

Aos meus irmãos Gustavo Henrique e Luiz Guilherme.

A Joseane.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer ao Pai Celestial pela vida e conquistas realizadas até este momento em minha caminhada na busca de minha evolução.

Ao professor orientador Ernani Sales Palma pela dedicação, compreensão e o apoio durante esta jornada.

Aos meus ex-chefes Marley de Souza Lemos, Maurício Centeno Lobão e Baltazar Agenor Bailona que sempre me incentivaram e concederam a liberação para frequentar as aulas em horário de expediente.

A Anglo American Minério de Ferro Brasil em especial a Gerência de Engenharia de Manutenção em nome de Leonardo David de Sousa pela autorização da publicação deste trabalho e pelos investimentos realizados em infraestrutura e softwares que a cada dia veem trazendo progresso e evolução aos processos de Integridade Estrutural.

Ao engenheiro Kellson Takenaka Menezes pela parceria e a troca de experiência diante dos desafios da implantação da gestão de Integridade Estrutural no Sistema Minas-Rio.

Aos colegas de trabalho Anderson Belo Fernandes, Ângelo dos Reis Magalhães, Cassio Henrique Costa Felix, Edson Donato, Elcimar Izidoro Vieira, Eugênio Magalhães Gomes de Oliveira, Geraldo Anuniação Júnior, Marcos Alesxandro Reis, Marcos Silva Duarte, Orlando Favacho, Pedro Maciel de Souza, Sandro Horta e Sérgio Gomes de Melo pelo apoio durante o decorrer deste trabalho.

Aos meus amigos, familiares e Joseane Moreira Giarola que sempre me incentivaram e apoiaram na busca desta conquista.

*“Uma pessoa inteligente resolve um problema, um sábio o previne. ”*

Albert Einstein

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	9
LISTA DE GRÁFICOS .....	11
LISTA DE TABELAS .....	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	13
NOMECLATURA .....	14
RESUMO .....	16
1. INTRODUÇÃO .....	18
1.1. Justificativa .....	18
1.2. Anglo American .....	20
1.3. Sistema Minas – Rio .....	21
1.4. Objetivos .....	26
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	27
2.1. Gestão de Ativos e Integridade Estrutural .....	27
2.2. Tanques em Mineração .....	31
2.3. Mecanismos Causadores de Falhas em Tanques .....	32
2.3.1. Corrosão .....	32
2.3.2. Desgaste .....	34
2.4. Método dos Elementos Finitos .....	37
2.4.1. Análise não-linear .....	38
2.4.2. Análise Modal .....	40
2.5. Ensaio de Ultrassom .....	40
3. METODOLOGIA .....	44
3.1. Tanque de Concentrado 1120-TQ-01 .....	44
3.2. Materiais .....	48
3.3. Ensaio De Ultrassom .....	49
3.4. Método Dos Elementos Finitos .....	50
3.4.1. Análise Estrutural do Tanque. ....	51
3.4.2. Índice de Utilização .....	53
3.4.3. Análise Modal .....	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	55

4.1. Resultado dos Ensaio de Materiais.....	55
4.1.1. Ensaio de Tração .....	55
4.1.2. Análise Metalográfica.....	57
4.1.3. Análise Química .....	57
4.2. Projeto do tanque de acordo com API 650 .....	59
4.2.1. Costado .....	59
4.2.2. Fundo .....	60
4.2.3. Bocais .....	62
4.2.4. Porta de Limpeza .....	63
4.2.5. Seção Transversal do Anel de Reforço .....	65
4.3. Projeto do Tanque de acordo com o MEF .....	66
4.4. Análise de Tensões e Deslocamentos .....	69
4.5. Análise Modal .....	77
4.6. Medição de Espessura do Tanque.....	80
4.7. Adequação do Anel de Contraentamento .....	81
4.8. Verificação da Influência da Redução de Espessura dos Anéis do Costado .....	86
5. CONCLUSÕES .....	93
TRABALHOS FUTUROS .....	96
ABSTRACT .....	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	98
ANEXO A .....	104
ANEXO B .....	109

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1. Fluxograma de Processo Sistema Minas-Rio.	21
FIGURA 1.2. Mineroduto do Sistema Minas-Rio.	25
FIGURA 2.1. Ciclo de vida de um ativo.	28
FIGURA 2.2. Modos de desgastes.	34
FIGURA 2.3. Desgaste por erosão ocorrida em uma carcaça de uma bomba de água.	35
FIGURA 2.4. (a) Esquema de um ensaio por abrasão através de Roda de Borracha. (b) Exemplo de um equipamento utilizado nos ensaios.	36
FIGURA 2.5. Exemplo de discretização de uma malha de elementos finitos de uma treliça.	37
FIGURA 2.6. Princípio de funcionamento do ensaio por ultrassom.	41
FIGURA 2.7. Transdutores utilizados em ensaios por ultrassom.	42
FIGURA 3.1. Foto aérea da Estação de Bombas I.	45
FIGURA 3.2. Vista frontal e superior com as dimensões e detalhamento do Tanque de Concentrado 1120-TQ-01.	47
FIGURA 3.3. Dimensões padrões em <i>mm</i> para o corpo de prova.	49
FIGURA 3.4. Aparelho portátil de Ultrassom GE Kroutkomer USM 36.	49
FIGURA 3.5. Cabeçote GE MSEB 5 de 5 Mhz e diâmetro 9/2 mm de duplo cristal.	50
FIGURA 3.6. Elementos SHELL 281.	51
FIGURA 3.7. Distribuição de pressão hidrostática no Tanque de Concentrado.	53
FIGURA 4.1. Corpos de prova após rompimento no ensaio de tração.	56
FIGURA 4.2. Micrografia do material ASTM A36.	57
FIGURA 4.3. Distribuição de chapas do fundo, informações de soldagem e espessuras de chapas.	61
FIGURA 4.4. Padrão de reforço.	62
FIGURA 4.5. Dimensões da porta de limpeza do tanque 1120-TQ-01.	65
FIGURA 4.6. Detalhe do anel de reforço instalado no Tanque de Concentrado. Dimensões em <i>mm</i> .	66
FIGURA 4.7. Vista frontal do modelo de elementos finitos do Tanque de Concentrado 1120-TQ-01.	67
FIGURA 4.8. Vista superior do modelo de elementos finitos do Tanque de Concentrado 1120-TQ-01.	68

FIGURA 4.9. Detalhe do bocal de visita do modelo de elementos finitos do Tanque de Concentrado 1120-TQ-01.	68
FIGURA 4.10. Detalhe da porta de limpeza do modelo de elementos finitos do Tanque de Concentrado 1120-TQ-01.	69
FIGURA 4.11. Índice de utilização para a superfície externa do Tanque de Concentrado 1120-TQ-01.	70
FIGURA 4.12. Índice de utilização para a superfície externa no detalhe da porta de limpeza do Tanque de Concentrado.	71
FIGURA 4.13. Índice de utilização para a superfície interna no detalhe da porta de limpeza do Tanque de Concentrado.	71
FIGURA 4.14. Detalhe da região interna com deformação plástica na porta de limpeza do Tanque de Concentrado.	72
FIGURA 4.15. Deslocamento total do Tanque de Concentrado.	73
FIGURA 4.16. Detalhe da porta de limpeza do deslocamento total do Tanque de Concentrado.	73
FIGURA 4.17. Localização da Região 1 e Região 2	74
FIGURA 4.18. Medição das espessuras do Tanque de Concentrado com auxílio da plataforma articulada.	80
FIGURA 4.19. Proposta de adição de um segundo anel de contraventamento. Dimensões em mm.	82
FIGURA 4.20. Índice de utilização para a superfície externa do Tanque de Concentrado com anel de reforço secundário e redução de espessura.	87
FIGURA 4.21. Índice de utilização para a superfície externa no detalhe da porta de limpeza do tanque com anel de reforço secundário e redução de espessura.	88
FIGURA 4.22. Índice de utilização para a superfície interna no detalhe da porta de limpeza do tanque com anel de reforço secundário e redução de espessura.	88
FIGURA 4.23. Detalhe da região da porta de limpeza com deformação plástica na porta de limpeza do tanque com anel de reforço secundário e redução de espessura. a) Lado Interno b) Lado externo.	89
FIGURA 4.24. Deslocamento total do Tanque de Concentrado com anel de reforço secundário e redução de espessura.	90

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 2.1. Distribuição de erros em projetos de empreiteiras de construção civil.	29
GRÁFICO 3.1. Curva tensão versus deformação utilizado no MEF.	52
GRÁFICO 4.1. Curva Força versus Deslocamento para o CP2.	56
GRÁFICO 4.2. Índice de utilização de duas regiões distintas do Tanque de Concentrado para a condição de tanque em nível máximo.	75
GRÁFICO 4.3. Deslocamento radial ao longo da altura do Tanque de Concentrado em duas regiões distintas para a condição de nível máximo.	76
GRÁFICO 4.4. Comparação entre o total de modos de vibração compreendidos entre o intervalo de 0 a 30 Hz para cada condição de enchimento.	77
GRÁFICO 4.5. Comparação entre as frequências naturais e modos de vibração para três condições de enchimento do Tanque de Concentrado.	79
GRÁFICO 4.6. Comparação entre os deslocamentos radiais na condição de enchimento máxima nas regiões 1 e 2 para o tanque com a adição e sem a adição do anel de reforço.	83
GRÁFICO 4.7. Comparação entre o total de modos de vibração compreendidos entre o intervalo de 0 a 30 Hz para cada condição de enchimento com e sem a adição do segundo anel de reforço.	84
GRÁFICO 4.8. Comparação entre as frequências naturais e modos de vibração para três condições de enchimento com e sem a adição do segundo anel de reforço.	85
GRÁFICO 4.9. Comparação do índice de utilização de duas regiões distintas do Tanque de Concentrado com espessura nominal e reduzida para a condição de tanque em nível máximo com anel secundário.	91
GRÁFICO 4.10. Comparação entre o total de modos de vibração compreendidos entre o intervalo de 0 a 30 Hz para cada nível de enchimento na condição de espessura reduzida e nominal ambas com o segundo anel de reforço.	92

## LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1. Composição química exigida para chapas de aço ASTM A36.	48
TABELA 3.2. Propriedades Mecânicas para chapas de aço de acordo com a norma ASTM A36.	48
TABELA 3.3. Tensões Admissíveis.	53
TABELA 3.4. Definição das condições analisadas.	54
TABELA 4.1. Resultados dos Ensaios de Tração.	55
TABELA 4.2. Resultado da Espectrometria Ótica – Base Ferro para o material ASTM A36.	58
TABELA 4.3. Análise da composição química.	58
TABELA 4.4. Dados construtivos do Tanque de Concentrado.	59
TABELA 4.5. Dimensões calculadas dos anéis do costado conforme método <i>One-Foot</i> .	60
TABELA 4.6. Comparação entre as espessuras mínimas e as especificadas.	60
TABELA 4.7. Espessura nominal mínima para o fundo do tanque.	61
TABELA 4.8. Comparação das dimensões dos Bocais em relação à norma API 650, 2011 e o projeto do Tanque 1120-TQ-01.	62
TABELA 4.9. Resultados da Medição por Ultrassom dos anéis do Tanque de Concentrado. Todas as dimensões estão em mm.	81
TABELA 4.10. Valores de espessuras nominais, reduzidas e porcentagem de redução para o estudo da influência da perda de espessura no comportamento do tanque. Dimensões em <i>mm</i> .	86

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
API	American Petroleum Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATM	Pressão Atmosférica
AWS	American Welding Society
BSI	British Standard Institute
CP	Corpo de Prova
CSA	Canadian Standards Association
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
FTA	Failure Tree Analysis
IAM	Institute Asset Management
HAZOP	Hazard and operability study
ISO	International Organization for Standardization
MEF	Método dos Elementos Finitos
ND	Não Definido
NR	Norma Regulamentadora
PTV	Princípio dos Trabalhos Virtuais
RCM	Reliability Centered Maintenance
TCLD	Transportador de Correia de Longa Distância
TIG	Tungsten Inert Gas Welding

## NOMECLATURA

### Letras Latinas

$A_{CS}$	Área da seção transversal do reforço acima do topo da abertura da porta de limpeza [ $mm^2$ ]
$A_{CSP}$	Área da seção transversal do reforço acima do topo da abertura da porta de limpeza conforme especificado no projeto [ $mm^2$ ]
$A_{SR}$	Área da seção transversal do reforço do bocal [ $mm^2$ ]
$b$	Comprimento horizontal da porta de limpeza [ $mm$ ]
$CA$	Espessura de corrosão [ $mm$ ]
$D$	Diâmetro nominal do tanque [ $m$ ]
$D_R$	Diâmetro do furo da chapa de reforço do bocal [ $mm$ ]
$\{F\}$	Vetor das forças equivalentes nodais da estrutura [ $N$ ]
$G$	Densidade específica [ <i>adimensional</i> ]
$h$	Altura da porta de limpeza [ $mm$ ]
$h_c$	Altura do anel do costado [ $mm$ ]
$H$	Coluna de líquido do projeto [ $m$ ]
$H_2$	Altura do tanque, incluindo qualquer projeção acima da altura máxima de enchimento [ $m$ ]
$IU$	Índice de Utilização [ <i>adimensional</i> ]
$[K]$	Matriz de rigidez da estrutura [ $N/mm$ ]
$K_1$	Coefficiente de área de acordo com a Figura 5-11 da norma API 650, 2011 [ <i>adimensional</i> ]
$L$	Altura da chapa de reforço do bocal [ $mm$ ]
$S_d$	Tensão de projeto [ $MPa$ ]
$S_l$	Tensão de teste hidrostático [ $MPa$ ]
$OD$	Diâmetro de saída da tubulação [ $mm$ ]
$t$	Espessura do anel do costado de instalação do bocal [ $mm$ ]
$t_d$	Espessura do costado [ $mm$ ]
$t_{d1}$	Espessura calculada para o primeiro anel do costado [ $mm$ ]
$t_l$	Espessura do costado do teste hidrostático [ $mm$ ]

$t_p$	Espessura de projeto [ $mm$ ]
$T$	Espessura da chapa de reforço do bocal [ $mm$ ]
$\{U\}$	Vetor dos deslocamentos nodais da estrutura [ $mm$ ]
$V$	Velocidade do vento de projeto [ $km/h$ ]
$W$	Comprimento da chapa de reforço do bocal [ $mm$ ]
$Z$	Mínimo módulo de seção requerida [ $cm^3$ ]

### **Letras Gregas**

$\sigma$	Desvio Padrão da Amostra
$\sigma_1$	Primeira Tensão Principal [ $MPa$ ]
$\sigma_2$	Segunda Tensão Principal [ $MPa$ ]
$\sigma_3$	Terceira Tensão Principal [ $MPa$ ]
$\sigma_E$	Tensão equivalente de von Mises [ $MPa$ ]

## RESUMO

O trabalho desenvolvido tem por finalidade apresentar uma metodologia de avaliação de integridade estrutural de um Tanque de Concentrado de minério de ferro pertencente ao Sistema Minas-Rio. A metodologia de avaliação de integridade estrutural está baseada na norma ISO 55001, 2014 gestão de ativos. Foram avaliados os riscos de operação e manutenção relacionados à integridade estrutural do Tanque de Concentrado durante seu ciclo de vida. Uma nova proposta de aplicação do gerenciamento de integridade estrutural de estruturas significativas com base na norma ISO 55001, 2014 durante todo o ciclo de vida de um Tanque de Concentrado foi apresentada.

Inicialmente, o projeto do tanque foi verificado de acordo com a norma API 650 e através do método dos elementos finitos (MEF). Na conferência do projeto de acordo com a API 650, 2011, dois desvios relacionados às dimensões da porta de limpeza e ao anel de contraventamento foram identificados. A utilização do MEF permitiu avaliar o comportamento dinâmico do tanque através das frequências naturais e modos de vibração. Os resultados da análise modal do tanque atual indicaram duas frequências naturais abaixo de 1 Hz. Foi mostrado que a adição de um segundo anel de contraventamento permite o aumento da rigidez do tanque e conseqüentemente uma elevação das frequências naturais do mesmo.

Outro fator importante avaliado é a influência das dimensões da porta de limpeza acima do especificado na norma API 650, 2011. Análises das tensões e dos deslocamentos em torno da porta de limpeza mostram que o índice de utilização é ultrapassado e há existência de deformações plásticas localizadas. Foi implementado um plano de inspeções anual na região da porta de limpeza, para o monitoramento de trincas.

Através da técnica preditiva de ensaio de ultrassom foram medidas as espessuras dos anéis do costado para a criação de uma base de dados. Através da primeira medição foi criado um plano de inspeção periódico por ensaio de ultrassom para o monitoramento dos desgastes ocasionados pela corrosão e abrasão da polpa de minério de ferro. A influência da perda de espessura dos anéis do costado e o impacto na distribuição de tensões, deslocamentos, modos e frequências naturais foram avaliados através do MEF.

**Palavras Chaves:** Integridade Estrutural, Elementos Finitos, Tanque de Concentrado, Gestão de Ativos, API 650.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Justificativa

Um dos maiores projetos de mineração implantados no mundo é o Sistema Minas-Rio pertencente ao grupo Anglo American. Os desafios de engenharia encontrados ao longo de seu projeto e implantação mostram a capacidade da engenharia brasileira de enfrentar desafios.

Além dos desafios de projeto e implantação, é importante destacar também os desafios de operação e manutenção dos ativos, respeitando as normas internacionais, nacionais e internas, zelando pelo meio ambiente e trabalhando de maneira segura e responsável.

Todas as unidades de negócio do grupo Anglo American têm por obrigação seguir as normas internas e padrões do grupo. A unidade de negócio responsável pelo Sistema Minas-Rio, a Minério de Ferro Brasil, não é diferente. Desta maneira as boas práticas de engenharia, administração, segurança entre outras, podem ser compartilhadas por todo o grupo.

Inúmeras falhas estruturais ocorreram ao longo dos quase 100 anos de existência do grupo Anglo American. Devido a isso, foi estabelecida uma norma para balizar as ações de integridade dos ativos como forma de minimizar os riscos envolvidos com as falhas estruturais. As falhas de estruturas no setor de mineração são responsáveis por prejuízos consideráveis, interrupção da produção, não cumprimento de prazos, impactos ambientais e perda de vidas.

A garantia para que os ativos trabalhem de forma segura e eficiente, é uma tarefa que envolve desde sua concepção até o seu descarte. Um bom projeto deve garantir que o equipamento atenda com segurança, as exigências de operação, fornecendo um alto rendimento operacional, aliado há baixos custos de implantação e manutenção.

As normas de projeto são amplamente utilizadas no setor de mineração devido à consagração dos equipamentos de processo e as diversas empresas fabricantes. Muitos dos projetos de mineração têm pouca difusão na utilização de técnicas modernas de cálculo como os métodos

dos elementos finitos, volumes finitos e elementos discretos. Muito da não utilização dessas técnicas, se dá, pela falta de conhecimento das ferramentas pelas empresas projetistas e também a não exigência de memoriais de cálculos mais ricos em informação por parte das grandes corporações do setor minerário.

A maior evolução da manutenção foi conquistada através do desenvolvimento de técnicas para a manutenção de aeronaves, padronização das metodologias de trabalho, normatização, gestão da qualidade, que trouxeram hoje à mineração conceitos nunca utilizados antes. Podem ser citadas as técnicas como a manutenção preditiva, a confiabilidade e a integridade estrutural, além, da metodologia de gestão de ativos. Estas metodologias estão contribuindo para a redução dos custos operacionais, prolongamento da vida dos ativos e seus componentes. Garantindo aos ativos uma maior segurança operacional, maior disponibilidade e menores custos de manutenção.

O objetivo geral das atividades de integridade estrutural consistem em garantir a segurança dos trabalhadores, ativos, do meio ambiente e evitar perdas de produção que impactem diretamente no faturamento da empresa. As falhas estruturais ocorrem principalmente devido a erros de projeto, desrespeito às especificações técnicas na fase de fabricação, alterações sem a avaliação do projeto (Gestão de Mudança) ou condições de operação fora das estabelecidas.

Porém, é importante ressaltar que, mesmo em condições de operação normais, os componentes estruturais, em geral, sofrem um processo de degradação natural. Portanto, estruturas significativas precisam ser acompanhadas periodicamente.

O conceito de integridade estrutural na indústria consiste na aplicação de técnicas multidisciplinares como: conhecimentos em projeto, normas, distribuição de tensões, ciclo de trabalho, materiais, métodos de construção e inspeção que permitam avaliar, planejar e conservar as estruturas em condições satisfatórias.

De acordo com a norma GTS 19, 2011, de Integridade Estrutural da Anglo American, entende-se por estrutura significativa qualquer estrutura temporária ou permanente construída em concreto, madeira, aço, ou outros metais estruturais que necessitem de um profissional habilitado para efetuar o seu dimensionamento.

A boa performance das estruturas significativas do Sistema Minas-Rio é o objetivo da gestão de ativos associada à gestão de integridade estrutural. Através de técnicas avançadas de cálculo estrutural, aliado a um plano de monitoramento e inspeção, é possível garantir uma operação segura e responsável. Como exemplo da metodologia empregada na avaliação das estruturas significativas, um dos Tanques de Concentrado será avaliado neste trabalho.

Os Tanques de Concentrado são estruturas projetadas para armazenar a polpa de minério de ferro para posterior bombeamento através do Mineroduto ou acondicionamento no final do bombeamento. Essas estruturas são de fundamental importância no processo produtivo, uma vez que toda a produção passa por eles. A capacidade nominal de cada tanque é de 5010 metros cúbicos com 17 metros de altura e um diâmetro interno de 21,5 metros. Os tanques foram projetados e fabricados segundo as recomendações da norma API 650, 2011.

## **1.2. Anglo American**

A Anglo American, multinacional com sede em Londres no Reino Unido, iniciou no ano de 1917 suas operações na África do Sul através de seu fundador Ernest Oppenheimer. No Brasil, a empresa foi fundada em 1973 e hoje possui duas unidades de negócio: Níquel, Nióbio e Fosfato (NNP) e Minério de Ferro Brasil (IOB).

A Unidade de Negócios Níquel, Nióbio e Fosfatos com unidades de produção nas cidades goianas de Barro Alto, Niquelândia, Catalão e Ouidor, além de produção de fosfato em Cubatão (São Paulo). A sede administrativa está localizada em Belo Horizonte (MG). Os fosfatos dão origem a insumos para alimentação animal e fertilizantes, enquanto o níquel e o nióbio são utilizados na produção de aços de alta resistência.

A unidade mais recente da Anglo American no Brasil é a Minério de Ferro Brasil, criada em 2008, depois da aquisição do Sistema Minas-Rio. Sua sede fica localizada na capital mineira Belo Horizonte (MG). A Mina e a Planta de Beneficiamento estão localizadas nos municípios de Conceição do Mato Dentro e Alvorada de Minas, em Minas Gerais. O mineroduto atravessa 33 municípios mineiros e fluminenses transportando a polpa de minério da mina ao Porto do Açu, localizado em São João da Barra, Rio de Janeiro. No porto a Anglo American é detentora de 50% de participação no terminal de minério de ferro, em uma *joint venture* com a Prumo

Logística. Com capacidade inicial para produzir 26,5 milhões de toneladas de minério de ferro por ano, o empreendimento teve seu primeiro embarque realizado em outubro de 2014.

### 1.3. Sistema Minas – Rio

O Sistema Minas-Rio foi adquirido em 2007 pela Anglo American em uma transação de mais de US\$ 5 bilhões de dólares e um custo de implantação de mais de US\$ 8 bilhões de dólares. O sistema possui uma mina com mais de 3,6 bilhões de reservas certificadas, sendo o minério, derivado do itabirito. O produto final é o *Pellet Feed* com 67,5% de concentração de teor de ferro o que garante uma qualidade *Premium* ao produto final. A FIG 1.1 mostra um fluxograma do processo de produção de *Pellet Feed* do Sistema Minas-Rio.

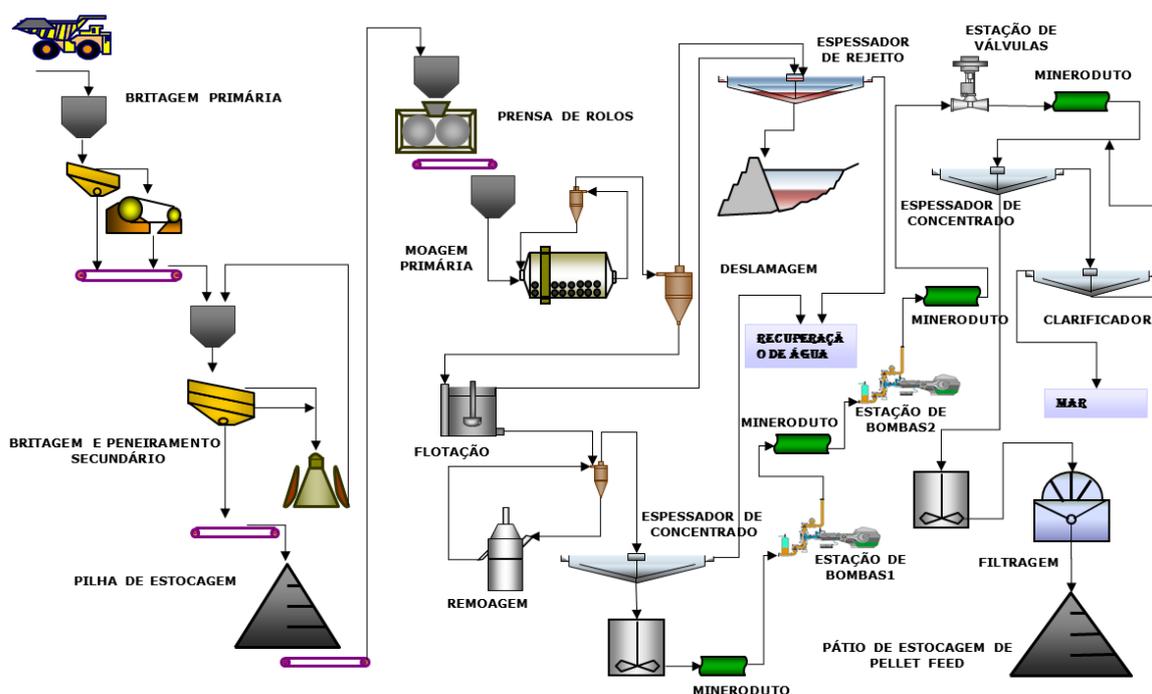


FIGURA 1.1. Fluxograma de Processo Sistema Minas-Rio.

FONTE: Arquivo Anglo American.

O minério é transportado da mina a Britagem Primária através de caminhões fora de estrada. No total são 31 com capacidade de 240 toneladas cada, que alimentam duas linhas de britadores primários.

Duas linhas de britagem primária com capacidade de fornecimento de 4328 *t/h* cada, onde alimentadores de sapata alimentam grelhas vibratórias que realizam a primeira separação, sendo o *overflow* triturado em britadores primários de mandíbula.

O minério segue para um transportador de correia de longa distância (TCLD) de 1,6 *km* com capacidade de 8657 *t/h* até os prédios da britagem secundária e peneiramento.

Quatro linhas de peneiras com dois decks com capacidade de produção de 2607,5 *t/h* separam o minério e o *overflow* é recirculado e britado em 4 linhas de britadores cônicos com capacidade de 616,5 *t/h* cada.

Através de uma casa de transferência o minério pode ser enviado para armazenamento em uma pilha pulmão com capacidade de 280.000 toneladas e/ou ser enviado por um *by-pass* ao processo de moagem através de prensas de rolos.

Três linhas de prensas de rolos com capacidade de 2164 *t/h* que tem como função ajustar o tamanho das partículas antes da Moagem Primária. Até esta etapa o processo é realizado sem a adição de água.

A Moagem Primária é constituída de duas linhas com moinhos de bolas de tamanho 26'x42' com capacidade de 3246 *t/h* e compreende o início do processo via úmida (com adição de água). O material cominuído na saída dos moinhos é descarregado em caixas individuais cada uma com duas bombas que alimentam quatro linhas de Hidrociclones de classificação, totalizando 4 baterias de 8 ciclones de 33 polegadas. O *underflow* dos Hidrociclones retorna aos moinhos como carga circulante e o *overflow* segue por gravidade até as caixas de polpa com a capacidade de 160 *m*<sup>3</sup> cada, onde se inicia o processo de Deslamagem.

A deslamagem do produto da moagem é realizada em dois estágios. Inicialmente o *overflow* da classificação da moagem alimenta caixas de polpa. Em seguida, existem nas caixas bombas para alimentação do primeiro estágio da Deslamagem. Este primeiro estágio é composto de 8 baterias de 11 ciclones de 15 polegadas.

O *overflow* das 8 baterias de ciclones do primeiro estágio segue por gravidade até as caixas de polpa. Destas caixas, a polpa é transferida pelas bombas de polpa para o segundo estágio da

Deslamagem, composto por 8 baterias de 60 ciclones de 4 polegadas. As lamas de todas as baterias de Hidrociclones, de segundo estágio da Deslamagem, seguem por gravidade para o Espessador de Rejeitos.

O circuito de flotação mecânica recebe o *underflow* do primeiro e segundo estágios da Deslamagem nas duas linhas de tanques destinados ao condicionamento da polpa. Esses possuem diâmetro e altura de 7,1 m e são dotados de agitadores, nos quais será adicionado o amido gelatinizado, soda (para correção de pH) e água. Por transbordo, a polpa segue para os tanques condicionadores, providos de agitadores sendo a amina adicionada no transbordo.

Após o condicionamento da polpa, esta alimentará os estágios de flotação Rougher, Cleaner 1, Cleaner 2, Scavenger 1 e Scavenger 2, a serem realizados em duas linhas de células mecânicas tipo *tank cell*. O rejeito da flotação vai por gravidade para o Espessador de Rejeitos.

O Espessador de Rejeitos é alimentado com as lamas provenientes da primeira e segunda etapa de Deslamagem e pelos rejeitos da flotação (rejeito Scavenger 2). O Espessador é do tipo coluna central, com 90 m de diâmetro. Na alimentação do Espessador de Rejeitos é dosado floculante para auxiliar na sedimentação de sólidos e coagulante para clarificação da água.

Os fluxos de lamas e rejeitos da flotação são reunidos na caixa de alimentação do Espessador de Rejeitos onde são adicionados o floculante e coagulante, com o objetivo de promover a sedimentação dos sólidos, clarificando a água do *overflow* e permitindo o controle de torque do Espessador.

O *overflow* do Espessador de Rejeitos segue para o reservatório de água recuperada dos Espessadores, da mesma forma que o *overflow* do Espessador de Concentrado. O *underflow* do Espessador de Rejeitos é bombeado por bombas até a Barragem de Rejeitos.

A Moagem Secundária opera para adequar a granulometria do produto final (*Pellet Feed*) para transporte através do Mineroduto.

O concentrado Cleaner 2 proveniente das bombas da flotação mecânica é recolhido nas caixas de polpa. Das caixas, a polpa é bombeada para alimentação das baterias de Hidrociclones de classificação, sendo 4 baterias de 10 ciclones de 20 polegadas, operando em circuito fechado.

O *underflow* da classificação alimenta 16 moinhos verticais, seguindo por gravidade para as caixas de polpa juntamente com a alimentação nova proveniente da flotação mecânica e fechando o circuito.

Os fluxos de *overflow* das baterias de Hidrociclones da classificação da Moagem Secundária segue por gravidade para a caixa de alimentação do Espessador de Concentrado, onde recebem adição de CO<sub>2</sub>, para correção do pH, floculante para auxiliar a sedimentação dos sólidos e coagulante para clarificação da água.

O Espessador de Concentrado é do tipo coluna central, com diâmetro de 57 m. O fluxo de *underflow* do Espessador de Concentrado é bombeado para os tanques do Mineroduto Júnior. Os dois Tanques de Concentrado do Mineroduto Júnior possuem a capacidade de armazenamento de 5010 m<sup>3</sup> cada um. O produto concentrado dos tanques é bombeado através de bombas centrifugas até a Estação de Bombas I.

O produto concentrado recebido na Estação de Bombas I é distribuído em quatro tanques de concentrado com 5010 m<sup>3</sup> de capacidade. O material do tanque é bombeado por bombas centrifugas até as bombas de deslocamento positivo. Ao total são oito bombas GEHO que impulsionam 1826 m<sup>3</sup>/h de polpa de minério a uma pressão de 186 kgf/cm<sup>2</sup> por 247 km até a Estação de Bombas II em Santo Antônio do Grama – MG.

A Estação de Bombas II é dotada de válvulas reguladoras de pressão que regulam a pressão no início do recebimento de polpa do trecho I do Mineroduto. O material recebido, pode ser direcionado a um tanque de 5010 m<sup>3</sup> ou ser diretamente bombeado pelo Trecho II e III. O bombeamento do Trecho II e III é feito por dez bombas GEHO que geram uma pressão de 210 kgf/cm<sup>2</sup> para impulsionar a polpa de minério por 282 km até a Filtragem em São João da Barra – RJ. Entre a Estação de Bombas II e a Filtragem há uma Estação de Válvulas que regula a pressão do Trecho II e III e está localizada na cidade de Tombos – MG a 109,4 km da Estação de Bombas II.

O mineroduto tem um total de 529 km, sendo o maior do mundo. O material utilizado nos tubos é fabricado de acordo com a norma API 5L X70 e os diâmetros utilizados ao longo de sua extensão são de 24“ e 26”. A FIG 1.2 apresenta um esquemático do Mineroduto do Sistema Minas – Rio.

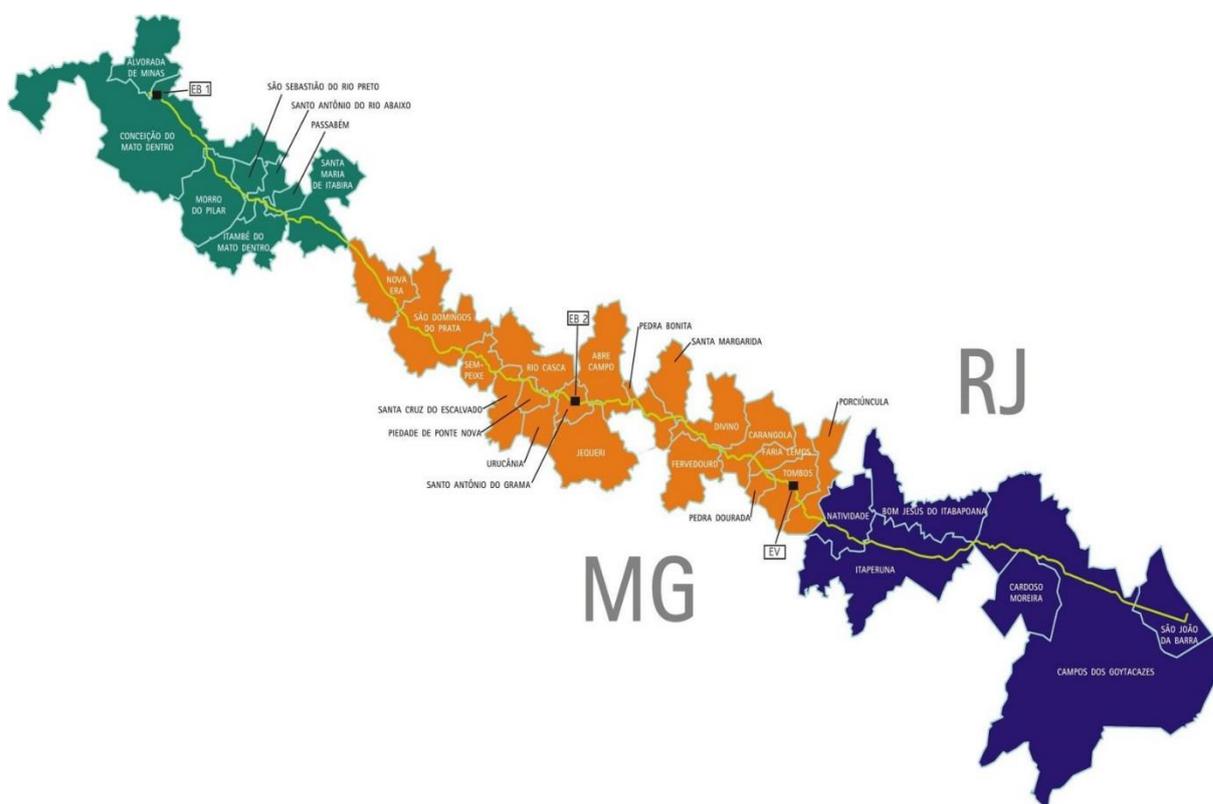


FIGURA 1.2. Mineroduto do Sistema Minas-Rio.

FONTE: Arquivo Anglo American.

A polpa de minério proveniente do Mineroduto alimenta o Espessador de Concentrado da Filtragem, onde a polpa é concentrada até atingir a porcentagem de sólidos especificada. O *underflow* do Espessador é bombeado para quatro Tanques de Concentrado com a capacidade de  $5010 m^3$ , já o fluxo de *overflow* alimenta o clarificador por gravidade.

O material armazenado nos Tanques de Concentrado é bombeado para três distribuidores de polpa que alimentam quatro filtros cada. Os filtros utilizados são do tipo filtros de discos cerâmicos, que operam pelo princípio de capilaridade. A taxa de produção da filtragem é de  $3040 t/h$  de *Pellet Feed*. O material depois de filtrado é encaminhado por correias transportadoras para ser empilhado em um pátio de estocagem. O material é recuperado e carregado no terminal de embarque de minério de ferro do Porto do Açú. O pátio de estocagem e o terminal de embarque de minério de ferro pertence a Ferroport, uma *joint venture* entre a Anglo American e Prumo Logística.

#### **1.4. Objetivos**

O objetivo específico deste trabalho consiste em investigar e garantir a integridade estrutural do Tanque de Concentrado 1120-TQ-01, através de uma metodologia que envolve a avaliação do projeto, memoriais de cálculos, ensaios de materiais, ultrassom, análise por elementos finitos e elaboração de planos de inspeção e manutenção. Pretende-se assim, estabelecer uma metodologia de trabalho que deverá ser seguida pela empresa na avaliação de seus tanques de armazenamento.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Gestão de Ativos e Integridade Estrutural

O *Institute Asset Management* (IAM) em parceria com empresas britânicas de diversos setores e o *British Standard Institute* (BSI) publicaram em 2004 a primeira edição do PAS 55. Uma Especificação Disponível Publicamente (*Publicly Available Specification* – PAS) sobre gestão de ativos, que foram divididas em duas partes o PAS 55-1:2004 e o PAS 55-2:2004. As últimas revisões destes PAS foram publicadas em 2008. O PAS 55-1:2008 trata da especificação para a gestão de ativos físicos e o PAS 55-2:2008 apresenta as diretrizes para a aplicação do PAS 55-1:2008. Em 2014 a *International Organization for Standardization* (ISO) lançou as primeiras edições das normas que tratam sobre a gestão de ativos. São as normas ISO 55000: *Asset management - Overview, principles and terminology*, ISO 55001: *Asset management – Requirements* e a ISO 55002: *Asset management - Guidelines on the application of ISO 55001*.

Ativo pode ser definido como algo que forneça valor real há uma organização. Podem ser tangíveis ou físicos, como as propriedades ou bens de uma organização, os estoques, equipamentos e diferentes dos ativos intangíveis, não físicos, como patentes, domínios de conhecimento e tecnologias, reputação e marcas. ISO 55002, 2014 e PAS 55-1, 2004

Gestão de ativos pode ser definida como um conjunto de boas práticas que visam gerir de forma coordenada, otimizada, sustentável e sistêmica o negócio. Esta metodologia tem por propósito garantir o cumprimento do planejamento estratégico da organização. Os ganhos relacionados à aplicação desta metodologia estão baseados nas melhorias da segurança e saúde dos colaboradores, gestão eficiente dos riscos envolvidos no negócio, otimização do uso dos ativos em todo seu ciclo de vida. Contribuindo assim, para um aumento da disponibilidade física e aumento da produtividade.

É definido como ciclo de vida de um ativo o intervalo de tempo que se inicia com a identificação da necessidade do desenvolvimento ou compra de um ativo e termina com sua desativação ou descarte. As etapas do ciclo de vida de um ativo compreendem a aquisição ou criação, utilização, manutenção, renovação ou descarte. A FIG 2.1 mostra uma representação do ciclo de vida de um ativo.



FIGURA 2.1. Ciclo de vida de um ativo.

FONTE: IAM, 2014 Adaptação.

A gestão dos riscos envolvidos no ciclo de vida dos ativos tem como objetivo entender a causa, o efeito e a probabilidade de ocorrência de eventos adversos. Este gerenciamento busca identificar potenciais riscos aos ativos e estimar os níveis de representatividade associados. Determinar a tolerância aos riscos e avaliar a necessidade de análises adicionais para estabelecer se estes são toleráveis ou não toleráveis. Projetar controles quando necessário ou desejáveis.

A gestão de integridade estrutural é o conjunto de técnicas multidisciplinares que visam projetar, construir, operar e manter estruturas e equipamentos de forma segura, controlando os riscos envolvidos em todas as fases do ciclo de vida. Será comentada a seguir, a aplicação da avaliação de integridade estrutural em cada fase do ciclo de vida de um ativo.

Na fase de aquisição, é fundamental que a especificação técnica do ativo contenha detalhadamente os limites operacionais, requisitos legais a serem atendidos e garanta o repasse das seguintes informações: desenhos detalhados, memoriais de cálculos, *books* de fabricação, certificados de matérias primas, relatórios de inspeções, manual de operação e manutenção.

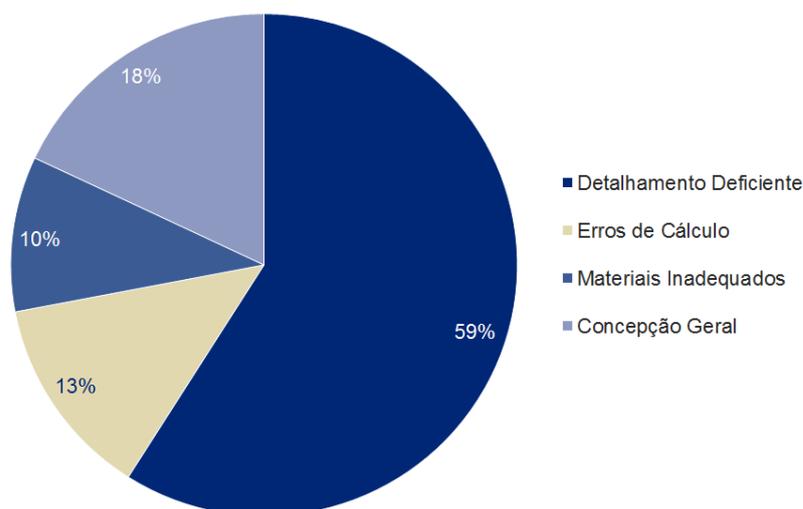
Durante a fase de projeto, os cálculos e desenhos devem ser revisados exaustivamente pelas empresas de projeto, montagem e pela adquiridora do ativo. De acordo com CARNEIRO 2012, recomenda-se a revisão do projeto por uma empresa independente que tenha experiência comprovada nas disciplinas a serem analisadas. A responsabilidade civil e criminal deve ser

compartilhada com a empresa detentora do projeto. Os prazos devem possuir tempo hábil para as revisões e devem ser previstos tempo para as alterações do projeto.

BRITO 2005, propôs em seu trabalho uma classificação dos erros de projeto que correspondem à inexistência de informações relevantes para a continuação das atividades em empreiteiras de engenharia civil. Em sua conclusão, o autor alerta que os erros da fase de projeto dão origem a soluções improvisadas que têm impacto em diversas outras disciplinas do projeto. O GRA 2.1 apresenta o resultado dos erros de projeto agrupados em quatro categorias levantados por BRITO, 2005.

GRÁFICO 2.1. Distribuição de erros em projetos de empreiteiras de construção civil.

FONTE: BRITO, 2005.



As revisões de projeto por empresas independentes têm por objetivo a mitigação dos riscos envolvidos na aquisição de novos ativos. Durante a fase de implantação é importante uma gestão eficiente dos processos de fabricação e montagem, com uma fiscalização e controle de qualidade presentes em todas as etapas e uma condição de armazenamento adequada. As vantagens da etapa de verificação de projeto, aliada a uma gestão eficiente de implantação contribuem para a redução dos custos de operação e manutenção. E a garantia de um rápido *ramp-up* do ativo a sua capacidade de produção nominal permitindo um breve retorno dos investimentos.

Durante as fases de operação e manutenção, é importante que a integridade estrutural dos ativos seja mantida de forma a garantir a segurança dos colaboradores e a produção esperada. Nesta

etapa da vida do ativo, são importantes as realizações de inspeções periódicas e o monitoramento das estruturas através das técnicas de preditiva. Podem ser citadas as técnicas de análise de vibração, ultrassom, emissão acústica, líquido penetrante, partículas magnéticas, correntes parasitas e radiografia.

Os processos de gestão de mudança que impactam diretamente na integridade estrutural dos ativos devem ser acompanhados, validados e aprovados pela gestão de integridade estrutural.

As organizações devem estabelecer, implementar e manter as ações para o cumprimento dos requisitos legais. No Brasil as normas regulamentadoras (NR) são institutos referentes à segurança e medicina do trabalho, de observância obrigatória por empresas públicas e privadas. A gestão de integridade estrutural tem papel fundamental no cumprimento da NR-13 Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações. A NR-13 determina os equipamentos a serem considerados, período de calibração e inspeções, testes e responsáveis.

Além da NR-13 a gestão de integridade estrutural pode contribuir para especificação, validação, manutenção e inspeção de suportes para linhas de vida, escadas, equipamentos para trabalho em altura e proteções de equipamentos conforme as exigências das NR-35 Trabalho em Altura e NR-12 Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos.

Os resultados das técnicas de manutenção centrada na confiabilidade (RCM), análise de modos de falha e efeito (FMEA), análise da árvore de falhas (FTA), estudos de operacionalidade e perigos (HAZOP) entre outras técnicas podem direcionar os trabalhos de integridade estrutural. Está é uma forma proativa de se trabalhar o gerenciamento da integridade estrutural nas fases de operação e manutenção dos ativos. Este direcionamento pode focar o prolongamento da vida de determinados componentes ou do próprio ativo a fim de reduzir os riscos envolvidos, além dos custos de manutenção. A otimização do ativo com o foco no aumento de produção pode ser avaliada através destas técnicas.

O descomissionamento do ativo deve proceder de forma planejada, direcionada e de maneira segura. Grandes estruturas e equipamentos devem possuir um planejamento de descarte acompanhado por profissionais habilitados, de forma segura e o material descartado direcionado a reciclagem. Deve-se garantir que estruturas sucateadas não sejam reaproveitadas para outros fins estruturais dentro da organização ou em outras instituições. Controles como a

marcação ou a inutilização através de esmagamento são recomendadas para que essa situação não ocorra.

A gestão das informações produzidas pela gestão de integridade estrutural em todo o ciclo de vida é de fundamental importância para uma correta avaliação de riscos dos ativos. É de vital importância para a gestão eficiente dos dados, um software dedicado a este propósito, que forneça informações suficientes a todos os níveis hierárquicos da corporação para a tomada de decisões.

## **2.2. Tanques em Mineração**

Os processos de concentração de minérios são constituídos de diversas etapas que necessitam grande capacidade de armazenamento de polpa de minério e insumos ao longo do processo de beneficiamento. Podem ser citados os tanques de soda cáustica, amido gelatinizado, amina, floculantes, água, coagulantes e polpa de minério. Os tanques podem apresentar como característica, a utilização de agitadores para homogeneização da mistura, bocais para bombeamento e podem ser abertos ou fechados.

Os tanques são projetados por meio de documentos normativos nacionais e internacionais e oriundos da indústria do petróleo. Os tanques aplicados à mineração apresentam algumas particularidades em relação aos tanques utilizados na indústria do petróleo, como a utilização de agitadores para a homogeneização da mistura, revestimentos para desgaste, entre outros. As normas comumente usadas para o projeto de Tanques de Armazenamento são as normas API 650, 2011 e ABNT 7821, 1983. Nas referências podem ser encontrados outros documentos normativos.

Os materiais utilizados na fabricação de tanques são chapas e perfis laminados, flanges fundidos, estojos, parafusos, porcas, juntas, tubos e eletrodos de soldagem.

As normas de projeto de tanques estabelecem ou referenciam as propriedades mínimas para os materiais utilizados na fabricação. Em resumo, a norma API 650, 2011 estabelece a utilização de seus materiais de acordo com normas específicas de materiais.

Para chapas e perfis estruturais são utilizadas as normas da *American Society for Testing and Materials*, *International Organization for Standardization*, *Canadian Standards Association* e normas nacionais devem atender as exigências mínimas especificadas na API 650, 2011. São apresentados como exemplos de materiais utilizados para a fabricação de tanques os seguintes materiais: ASTM A 36M, ASTM A 131M/A, ASTM 516M, G40.21M-260W e ISO 630

Para tubos que são aplicados na construção de tanques são utilizados os seguintes exemplo de materiais como os aços API Spec 5L, ASTM A 53, ASTM A 106 e ASTM A 333M/A.

Os materiais forjados são fabricados através das seguintes especificações ASTM A 105M/A 105, ASTM A 181M/A 181 e ASTM A 350M/A 350.

Para a soldagem de materiais com uma resistência mínima de 550 MPa, os eletrodos devem estar em conformidade com a classificação das séries E60 e E70 para atender a exigência da AWS A5.1. Entretanto, a utilização de arco elétrico manual para a soldagem de materiais com uma tensão mínima entre 550 e 585 MPa, deve ser realizada com eletrodo da série E80XX-CX conforme classificação da AWS A5.5.

### **2.3. Mecanismos Causadores de Falhas em Tanques**

As principais falhas que ocorrem em tanques estão relacionadas à perda de espessura de seu costado, fundo ou teto. Estas falhas ocorrem de forma geral ao longo de vários anos de operação destas estruturas. Os principais mecanismos de falha que ocasionam a perda da resistência mecânica estão relacionados aos mecanismos de corrosão, erosão ou a associação de ambos. A seguir, será feito um breve resumo destes mecanismos de falhas.

#### **2.3.1. Corrosão**

A corrosão pode ser definida como a degradação por meio de um processo químico ou eletroquímico de um material metálico. A corrosão é em geral um processo espontâneo onde o material busca voltar ao seu estado de menor energia. A corrosão química pode ser definida quando o material reage com o meio não iônico, por exemplo, a oxidação ao ar em altas temperaturas de chapas de aço no processo de laminação a quente. A corrosão eletroquímica ocorre devido ao transporte de elétrons através de um eletrólito, formação de uma pilha. Esta

corrosão ocorre em soluções salinas, na atmosfera, em solos e em outros meios. A corrosão causa um aumento significativo dos custos para as empresas, devido à necessidade de substituição de peças e equipamentos. Além dos custos relacionados à manutenção de sistemas de proteção como: pintura, proteção catódica e recobrimentos. GENTIL, 2001

De acordo com MEDVEDEVA e TIAM, 1998, GUTMA et al, 2000 e BERGMAN et al, 2006 é de conhecimento que a corrosão é um dos principais motivos para falhas de tanques de armazenamento e estruturas de parede fina. A velocidade desta falha dependente das fases e composição química do produto, do sistema de proteção anti-corrosão, temperatura de trabalho e das condições climáticas. A corrosão pode ter lugar em ambas às superfícies internas e externas.

Os projetos de tanques de armazenamento são concebidos para um regime de operação entre 20 a 40 anos. Em alguns casos são encontradas falhas em serviço devido a corrosão entre 1,5 e 2,5 anos de operação. MEDVEDEVA e TIAM, 1998

No trabalho apresentado por GEARY e HOBBS, 2013 foi realizado a análise de falha de um acidente com um tanque de solvente com mais de dez anos de operação. Foi identificado que a principal causa da falha foi a erosão-corrosão interna localizada, proporcionado por um misturador a jato posicionado próximo a parede do tanque e acidez do solvente. As lições aprendidas no estudo estão no monitoramento da espessura e inspeções periódicas para identificar regiões com perda acentuada de espessura e com isso prevenir falhas catastróficas.

Em tanques de armazenamento de petróleo as regiões que são mais propensas a sofrer com a corrosão são as partes dos anéis superiores e inferiores. A taxa de corrosão no anel superior é de aproximadamente de 0,4 *mm/ano*, sendo geralmente menor do que aquela do anel inferior cuja taxa varia entre 0,4-0,6 *mm/ano*. Nos anéis superiores a corrosão é ocasionada pela condensação de água, a formação de gases ácidos e o oxigênio atmosférico. Já nos anéis inferiores o meio corrosivo é formado pela água residual. MEDVEDEVA e TIAM, 1998

### 2.3.2. Desgaste

Desgaste não é uma propriedade intrínseca do material, mas um mecanismo de falha. Caracterizado pela perda progressiva de material de um corpo sólido pela ação mecânica gerada pelo contato e movimento relativo de um sólido, líquido ou gás contra um corpo sólido.

Na Alemanha, na década de 80 foi realizada uma pesquisa que identificou que juntos a corrosão e o desgaste contribuíram com a perda de 4,5% do produto interno bruto. Estudos realizados pela ASME na década de 70 nos Estados Unidos mostraram um prejuízo na econômica de 1% a 2,5% do produto interno bruto devido ao atrito e o desgaste. Estas perdas estão relacionadas aos custos diretos de manutenção, recuperação dos componentes, reposição e custos indiretos de parada de produção e estoque. GAHR, 1987 e SILVA, 2004

Os modos de desgaste são classificados como: desgaste por impacto, rolamento, atrito, oscilação, erosão e dependem da cinemática do sistema. A FIG 2.2 apresenta esquematicamente os diferentes modos de desgaste em uma superfície sólida.

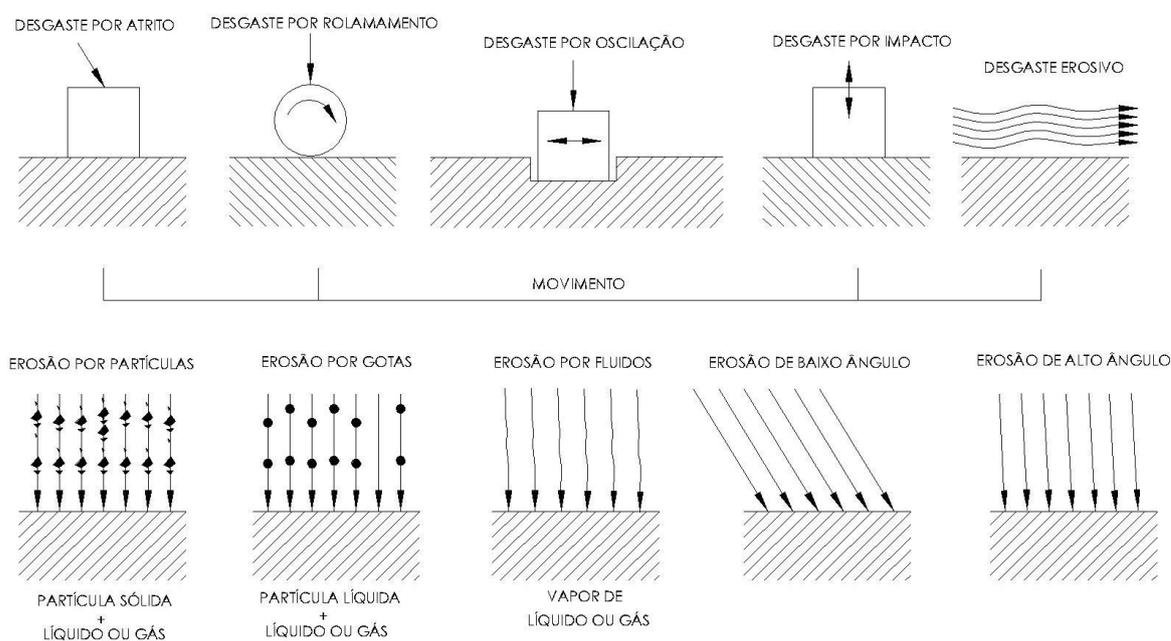


FIGURA 2.2. Modos de desgastes.

FONTE: Adaptação GAHR, 1987.

A definição de erosão é considerada como a perda gradual do material de origem de uma superfície sólida, em consequência da interação mecânica entre a superfície e um fluido multicomponente, ou a colisão de partículas sólidas, líquido ou gás. ASTM G76, 2013

As variáveis envolvidas no mecanismo de erosão são dependentes de ambos os materiais e fluidos envolvidos além da velocidade e ângulo de ataque de incidência das partículas na superfície. O tamanho, forma, dureza e tenacidade são características das partículas que contribuem para o desgaste. As propriedades mecânicas e físicas do material, como a dureza, tenacidade, ductilidade e a condutividade térmica. E por último o ambiente de natureza do fluido, gasoso ou líquido, sendo influenciado pela temperatura e viscosidade.

A FIG 2.3 apresenta um exemplo de desgaste por erosão ocorrida em uma bomba centrífuga de água. A falha prematura dos componentes ocorreu devido a constante concentração de sólidos na sucção da bomba aliada as altas velocidades na saída do impelidor.



FIGURA 2.3. Desgaste por erosão ocorrida em uma carcaça de uma bomba de água.

FONTE: Arquivo Pessoal.

O desgaste erosivo não é um fenômeno completamente entendido, e parte da sua complexidade tem a ver com sua natureza dinâmica e aleatória. Os tempos de interação partícula-fluido-superfície são muito pequenos e não apresentam padrão. A quantificação do desempenho do material em erosão se faz normalmente através de ensaios experimentais que medem a taxa de erosão. Esta propriedade pode ser definida como a perda de material medida em termos de massa, volume ou redução de espessura, por unidade de área do alvo e por unidade de tempo ou massa de partículas. OCHOA, 2007

No trabalho apresentado por SILVA, 2004 verificou-se a substituição de elementos de ligas para redução dos custos de produção de um material de desgaste a abrasão. Foram propostos dois substitutos, o nióbio e nióbio-boro, pelo molibdênio em aços Hadfield (aços-manganês austeníticos). O estudo apresentou melhora nas propriedades mecânicas a abrasão e redução

dos custos de produção dos aços devido à substituição e as menores quantidades de elementos de liga utilizados.

LEITE et al, 2009 e MACEDO et al, 2010 verificaram em seus trabalhos, o efeito da adição de elementos de ligas como o cromo, titânio e nióbio através das técnicas de soldagens de arame tubular e TIG sobre chapas de aço carbono. Os ensaios abrasivos dos corpos de prova foram realizados com base na norma ASTM G 65. O ensaio de abrasão consiste de um corpo de prova que é pressionado por uma força normal sobre uma roda de borracha movida por um motor elétrico e entre o corpo de prova é adicionado material abrasivo conforme mostrado pela FIG 2.4. Ambos os resultados apresentaram aumento da resistência ao desgaste por abrasão devido à formação de carbonetos duros envoltos por uma matriz.

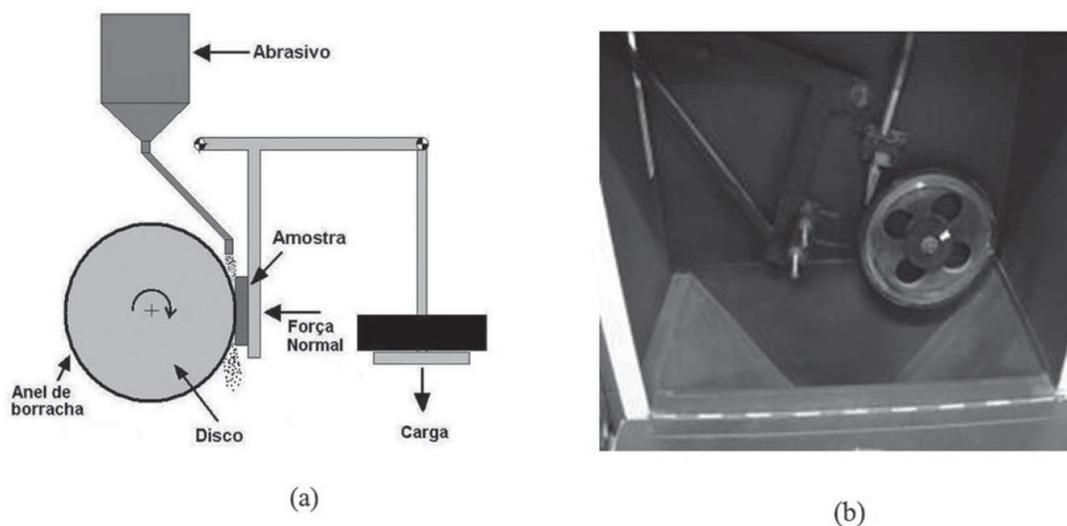


FIGURA 2.4. (a) Esquema de um ensaio por abrasão através de Roda de Borracha. (b) Exemplo de um equipamento utilizado nos ensaios.

FONTE: LEITE et al, 2009.

OCHOA, 2007 estudou o efeito da adição de nitrogênio na resistência a erosão-corrosão de aços inoxidáveis AISI 410 e AISI 304L. Quando a corrosão e erosão atuam conjuntamente, os mecanismos de danos são complexos e geralmente apresentam maiores perdas de massa, se comparadas com os mecanismos atuando separadamente. Foi constatado no estudo que a adição de nitrogênio melhora a resistência à corrosão e a resistência à erosão-corrosão do aço inoxidável austenítico AISI 304L. Para o aço AISI 410, a adição de nitrogênio melhora a resistência à corrosão, porém causa um aumento do desgaste em até 87 % através do mecanismo de erosão-corrosão.

## 2.4. Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma ferramenta de cálculo utilizada para analisar o desempenho mecânico e o comportamento dos materiais empregados em projetos estruturais. O MEF também pode ser utilizado para a resolução de problemas de fluido e transferência de calor. Em análises estruturais o MEF é utilizado para discretizar uma estrutura por diversos tipos de elementos como viga, mola, rígido, casca ou sólidos. Estes elementos podem receber propriedades geométricas e de material de forma a representar o comportamento da estrutura.

Em problemas estruturais o deslocamento é a incógnita principal que é obtida através da resolução de um sistema de equações lineares como pode ser expressa pela EQUAÇÃO (2.1). A disposição da malha, e conseqüentemente, os nós dos elementos finitos do modelo discretizado, influenciam a montagem do sistema de equação lineares, como pode ser visto na FIG 2.5.

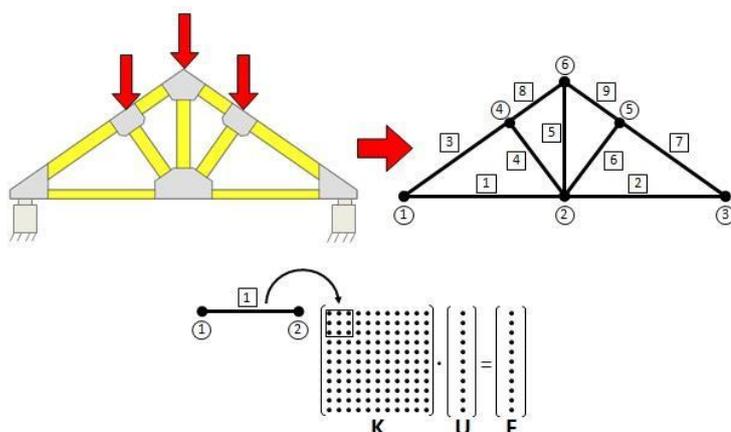


FIGURA 2.5. Exemplo de discretização de uma malha de elementos finitos de uma treliça.

FONTE: ASSUMPÇÃO et al, 2010.

$$[K]\{U\} = \{F\} \quad (2.1)$$

O produto da matriz de rigidez da estrutura ( $[K]$ ) vezes o vetor dos deslocamentos nodais da estrutura ( $\{U\}$ ) é igual ao vetor das forças equivalentes nodais da estrutura ( $\{F\}$ ).

Com relação ao emprego do MEF na avaliação do desempenho mecânico de estruturas alguns trabalhos podem ser citados tais como ASSUMPÇÃO et al, 2010 que correlaciona os métodos

analíticos e o MEF no cálculo da distribuição das tensões em tubulações enterradas e pressurizadas, obtendo excelente aproximação entre as duas metodologias.

ALMEIDA, 2012 apresenta em seu estudo a utilização do MEF para a avaliação estrutural de vasos de pressão submetidos a corrosão localizada seguindo as considerações da norma API 579, evidenciando a forte contribuição do MEF nos cálculos de integridade estrutural. Foi possível modelar os vasos de pressão com suas respectivas espessuras reais atentando para as regiões com perda acentuada de espessura. Através desta metodologia foi possível avaliar de forma eficiente a segurança operacional do vaso de pressão em estudo.

CHRISTOFORO, 2007 e CHEUNG et al, 2004, demonstram a aplicação do MEF e técnicas de otimização na determinação de propriedades mecânicas em materiais compósitos. Estes trabalhos mostraram a importância do MEF para a calibração das propriedades mecânicas de materiais compósitos, que em muitas das vezes apresentam forma complexas e de difícil solução analítica.

ALVES, 2003, e LOBÃO, 2003 apresentam em seus estudos a comparação entre métodos experimentais e a utilização do MEF para representar o processo de estampagem de chapas metálicas considerando a plasticidade dos materiais e análises não-lineares. Os trabalhos consistiram no levantamento da curva limite de conformação para materiais distintos e a correlação entre os ensaios experimentais e o MEF. Ambos os autores obtiveram correlação dos resultados.

#### 2.4.1. Análise não-linear

Diversas estruturas utilizadas em nosso dia a dia apresentam comportamento não-linear. Estes comportamentos estão relacionados aos grandes deslocamentos e deformações sofridos por estas estruturas. Podem ser definidos como comportamento não-lineares três tipos: geométrico, físicos e contatos. Sabemos assim, que a determinação de uma matriz de rigidez de um elemento finito está relacionada às características do material, das propriedades físicas e das características geométricas.

A não-linearidade geométrica está relacionada à mudança da rigidez estrutural devido à aplicação de grandes deslocamentos e deflexões. De acordo com FILHO, 2012 a rigidez de uma

estrutura se modifica pela presença de grandes deformações alterando as equações de equilíbrio. Assim para a resolução destes casos, as cargas são aplicadas gradualmente e a matriz de rigidez é atualizada a cada incremento de carga com os novos valores da estrutura deformada.

Os materiais são grandes fontes de comportamentos não-lineares físicos em análises pelo método dos elementos finitos. Os comportamentos elásticos, plásticos e viscoelásticos são exemplos típicos de características de materiais de engenharia. O comportamento elástico pode ser resumido na não deformação permanente da estrutura. Materiais em regime elástico apresentam características de comportamento linear governados pela lei de Hooke. Já o comportamento plástico apresenta a alteração permanente da estrutura e comportamento não-linear. Estes dois desempenhos são comumente encontrados na maioria dos materiais metálicos. Os materiais viscoelásticos apresentam comportamento altamente não-linear e são características de materiais como os elastômeros e borrachas.

Análises que envolvem contato podem ter o caráter linear ou não-linear dependendo das características dos vários modelos propostos para solucionar problemas de contato. Contatos são interações entre corpos distintos que se dá pelo toque entre suas superfícies. As forças envolvidas entre o contato de duas superfícies são: as forças normais, que se relacionam com a pressão de contato e as forças cisalhantes. Esta segunda é dependente da pressão de contato, coeficiente de atrito e coesão entre as duas superfícies.

No trabalho apresentado por MAGALHÃES, 1991, verifica-se a utilização de modelos de elementos finitos lineares e não-lineares em tanques projetados com base na norma API 650. Foram estudados diversas relações entre a altura e o diâmetro ( $H/D$ ), considerando-se cargas hidrostáticas e cargas de vento, além de várias restrições dos graus de liberdade no fundo do tanque. Verifica-se nos resultados que as análises lineares apresentam grande divergência se comparadas com as análises não-lineares, para todas as configurações estudadas. Foi observado um aumento das tensões em determinadas regiões do costado devido à consideração não-lineares. Por fim, conclui que os modelos não-lineares apresentam maior representatividade nos campos das tensões e deformações sendo o mais indicado para este tipo de estrutura. O estudo confirma a aplicação eficiente da norma API 650 no dimensionamento de tanques de petróleo e seus derivados.

### 2.4.2. Análise Modal

A frequência natural e modos de vibração são importantes parâmetros para o projeto de estruturas que são submetidas a cargas dinâmicas. Uma ferramenta computacional frequentemente utilizada para determinar as frequências naturais e modos de vibração de uma estrutura é a análise modal. Neste caso em particular, o problema de encontrar as frequências de vibração de um determinado sistema é resolvido com base na análise do movimento em regime livre e sem amortecimento. Nestas condições as equações de equilíbrio dinâmico tomam uma forma mais simplificada. Logo a determinação de frequências e modos de vibração resulta em um problema clássico de cálculo de auto-valores e auto-vetores. Os auto-valores representam as frequências naturais e os auto-vetores os modos de vibração. FILHO, 2013

No trabalho proposto por MANSHADI E MAHERI, 2012, foram investigados o efeito da corrosão no comportamento dinâmico e a influência nas tensões ao longo dos anos. O estudo contemplou os efeitos dinâmicos relacionados aos modos de vibração e as tensões hidrostáticas, em três tanques, com a relação altura e diâmetro (H/D) variando através de simulações numéricas pelo MEF. Verificando-se que a progressão da corrosão provoca a redução da rigidez do sistema e o aumento das tensões hidrostáticas e deslocamentos. Também é observado, o aumento do número de modos de vibração em uma determinada faixa de frequência, em consequência do aumento da corrosão do costado.

### 2.5. Ensaio de Ultrassom

Ensaio não destrutivo apresenta grande aplicabilidade no controle de qualidade de fabricação e manutenção preditiva de componentes estruturais. Como vantagens, esses tipos de ensaios podem ser realizados diretamente nos elementos de uma estrutura ou máquina, previnem a ocorrência de falhas em serviço, permitem a detecção e caracterização de defeitos, requerem pouca ou nenhuma preparação de amostras, podem ser portáteis e mais rápidos que os ensaios destrutivos. Podem ser citados os seguintes ensaios não destrutivos: líquido penetrante, partículas magnéticas, raio x, análise de vibração, termografia e ultrassom. ANDREUCCI, 2014

Em particular, o ultrassom tem vasta aplicação no cotidiano seja em exames clínicos, na identificação de defeitos em materiais ou na medição de espessura em componentes mecânicos. Na indústria, o ultrassom tem papel importante no monitoramento do desgaste em estruturas,

devido à abrasão e/ou corrosão e na identificação de defeitos dos processos de soldagem e fundição como trincas e poros. SANTIN, 1996

O ultrassom é uma onda sonora que se localiza com uma frequência acima dos 20 kHz imperceptível aos ouvidos humanos. Como característica das ondas sonoras, está o efeito de reflexão que constitui a base do funcionamento do ultrassom. O meio onde as ondas sonoras são emitidas apresenta forte influência na velocidade de propagação, variando de um material para o outro. Utilizando as equações físicas de velocidade associados aos tempos de resposta pode-se determinar a distância das barreiras refletivas, lembrando que, os valores encontrados são divididos por dois, devido o ir e vir da onda sonora. REZENDE, 2011 e LEITE, 1996. A FIG 2.6 mostra de forma esquemática a técnica de medição de uma espessura por ultrassom.

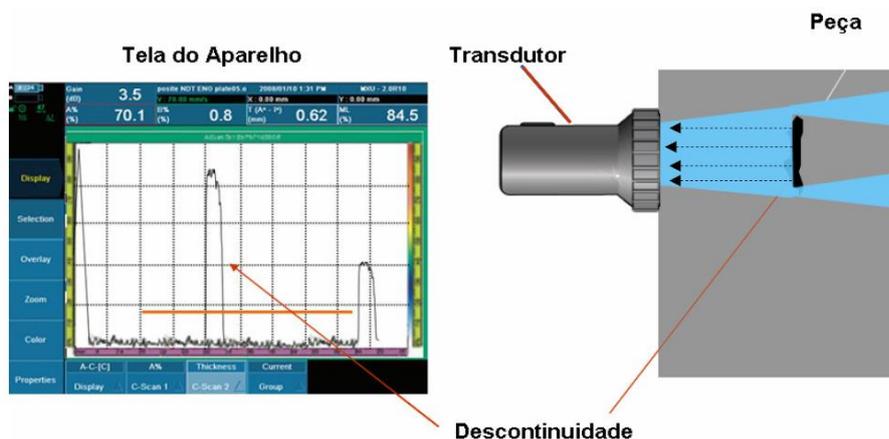


FIGURA 2.6. Princípio de funcionamento do ensaio por ultrassom.

FONTE: ANDREUCCI, 2014.

Os transdutores ou usualmente conhecido como cabeçotes são responsáveis pela emissão e recepção das ondas ultrassônicas. Este componente é constituído de um ou mais cristais piezelétricos. O mecanismo de funcionamento de cristais piezelétricos está relacionado com a resposta do cristal há geração de cargas elétricas devido a deformações ocasionadas por cargas de compressão em sua superfície, ou a geração de deformações por meio de alta voltagem aplicada. Os materiais usualmente empregados na fabricação de cristais piezelétricos são o quartzo, sulfato de lítio, o titanato de bário e o metaniobato de chumbo. Os transdutores podem ser de três tipos: os planos, angulares e duplo cristal.

Os transdutores planos geram ondas longitudinais normais à superfície e são utilizados para inspeção em superfícies planas para identificação de descontinuidades e medição de espessuras.

Os transdutores angulares possuem diversos ângulos que dependem de sua aplicação e são utilizadas geralmente para a inspeção de soldas onde a descontinuidade se encontra perpendicular à superfície. Já os transdutores de duplo cristal são utilizados para identificação de descontinuidades logo abaixo da superfície ou em pequenas espessuras, onde outros transdutores possuem uma zona morta, devido ao curto espaço de tempo entre a emissão e recepção, dificultando a resolução da inspeção. Assim para melhorar a resolução da medição, são utilizados dois transdutores, um para emissão e outro para recepção. A FIG 2.7 apresenta imagens ilustrativas dos três tipos de transdutores.

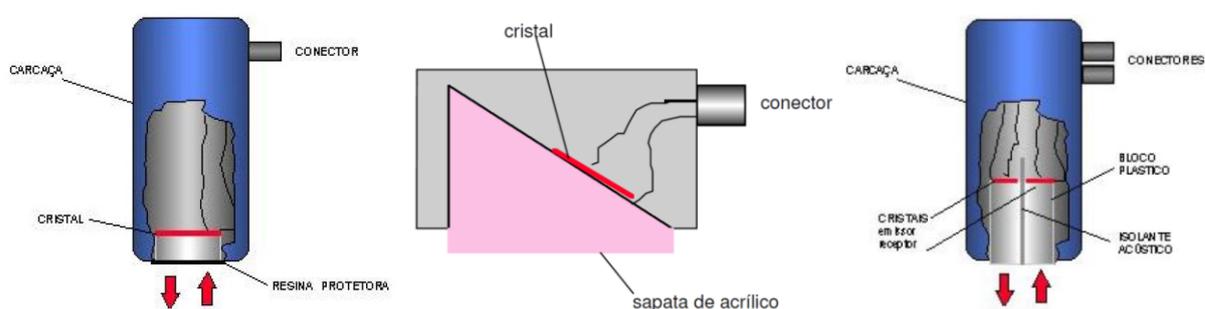


FIGURA 2.7. Transdutores utilizados em ensaios por ultrassom.

FONTE: ANDREUCCI, 2014.

CARDOSO et al, 2011 apresenta em seu estudo técnicas de medição de espessura por ultrassom de espessuras de óxidos e parede em tubos de caldeiras termoelétricas. Através da medição da camada de óxido é possível prever a vida do componente por meio de correlações já consagradas do meio científico.

THORNTON et al, 2012 e MARTÍN et al, 2007 demonstram em seus estudos a utilização da técnica de ultrassom para o controle de qualidade de soldas ponto, muito utilizado na indústria automobilística na união de peças do chassi. Os trabalhos mostram o desenvolvimento de metodologias de avaliação da qualidade de soldas a ponto com base nos resultados de ensaios por ultrassom para aços e alumínio. A garantia da qualidade da solda de chassi permite aos fabricantes uma maior vida de seus produtos e maior segurança aos seus clientes.

REZENDE et al, 2011 apresenta a técnica de medição de defeitos em painéis sanduíches de alumínio por meio de ultrassom. Através da inserção de defeito com teflon para simulação de vazios e bolhas de ar, a técnica de ultrassom consegue identificar os defeitos de maneira precisa.

VARGAS-ARISTA et al, 2012, COSTA, 2011 e LOPES et al, 2010 mostram em seus trabalhos a importância do ensaio de ultrassom para a identificação de defeitos em juntas soldadas. Os diversos defeitos de soldagem como, fissuras, poros, incrustações de escória são facilmente identificados no processo de ensaio não destrutivo por ultrassom.

### **3. METODOLOGIA**

A metodologia para a avaliação de integridade estrutural do Tanque de Concentrado está baseada em três pilares principais: a verificação do projeto, a verificação da documentação de fabricação e a inspeção de campo da estrutura.

A verificação de projeto consiste de uma avaliação criteriosa dos cálculos conforme a norma de projeto. Além disso, o estudo pelo método dos elementos finitos possibilita uma análise mais minuciosa dos resultados.

A análise da documentação de fabricação e montagem tem por objetivo identificar desvios, ocasionados por erros de projeto ou detalhamento. Além disto, podem ser avaliados os certificados da matéria-prima e os controles de qualidade utilizados durante o processo de fabricação e montagem.

A inspeção de campo visa verificar se toda a estrutura está conforme projeto, além de analisar se o seu comportamento durante a operação está dentro dos limites estabelecidos. Nesta fase é importante à verificação da pintura, bases de concreto, deformações, limites operacionais entre outros quesitos.

#### **3.1. Tanque de Concentrado 1120-TQ-01**

O componente analisado neste trabalho será o Tanque de Concentrado 1120-TQ-01. Este tanque compõe o complexo da Estação de Bombas I localizado no município de Conceição do Mato Dentro. Nesta estação de bombeamento existem ainda outros três tanques similares. Os tanques têm como objetivo armazenar e homogeneizar a polpa de minério de ferro para serem posteriormente bombeadas através do Mineroduto. A FIG 3.1 apresenta foto da Estação de Bombas I, onde a seta em vermelho indica a localização do tanque 1120-TQ-01.



FIGURA 3.1. Foto aérea da Estação de Bombas I.

FONTE: Arquivo Anglo American.

No fluxo de processo, os tanques 0417-TQ-10 e 0417-TQ-11 alimentam os quatro tanques da Estação de Bombas I. Essa alimentação é realizada através de uma tubulação que interliga o Espessamento a Estação de Bombas I chamado de Mineroduto Júnior. O tanque 1120-TQ-01 já recebe a polpa de minério na granulometria e qualidade especificada para o bombeamento através do trecho I do Mineroduto.

O tanque foi projetado através da metodologia *One Foot* seguindo as orientações da norma API 650 edição de 2011. A capacidade nominal de polpa de minério é de  $5010 m^3$ , na qual a densidade varia de 2,09 a  $2,41 t/m^3$ . Possui um diâmetro interno de 21,5 m e uma altura de 17 m. O material utilizado na fabricação foi o aço ASTM A36. O tanque não possui teto, apenas um anel de contraventamento de cantoneira de abas iguais de 3" e  $10,71 kg/m$  no final do costado e trabalha sobre pressão atmosférica.

Devido ao desgaste por erosão-corrosão causado pela alta abrasão da polpa, o fundo do tanque é revestido com chapas de desgaste HARDOX<sup>®</sup> 450 de 3/4" de espessura. O mesmo possui quatro defletores que amortecem o fluxo de material com a parede do tanque reduzindo o desgaste do costado.

No total o tanque possui nove bocais instalados no costado utilizados para amostragem, interligação, instrumentação, saída de polpa e dreno. A boca de visita tem diâmetro de 765 mm e a porta de limpeza tem dimensões de 1600 x 3200 mm.

O nível mínimo do tanque está localizado a uma altura de 2,5 m com capacidade de 908 m<sup>3</sup> de polpa. Já o nível máximo está a uma altura de 16,3 m com capacidade de 5907 m<sup>3</sup>, nesta altura o tanque possui uma caixa extravasora, que direciona o transbordamento para a calha de rejeitos.

O tanque possui um agitador com dois conjuntos de hélices que tem como objetivo a homogeneização da polpa de minério, evitando assim que ocorra decantação. A hélice superior possui um diâmetro de 4300 mm e movimenta o fluxo de material para cima. Já a hélice inferior, tem um diâmetro de 5900 mm e direciona o fluxo para baixo. Os fluxos invertidos geram uma turbulência necessária para uma perfeita homogeneização da polpa. O agitador possui um motor de 300 cv que forneça uma rotação nominal de 1790 RPM. O redutor tem uma relação de redução de 1:121,18 e fornece uma velocidade de saída de 14,7 RPM. A estrutura do agitador é uma estrutura independente que não transmite esforços ao costado do tanque, está constituída de acesso e talha elétrica para manutenção.

A FIG 3.2 apresenta a localização e distribuição dos bocais, defletores e porta de limpeza ao longo do costado. Também são apresentadas as dimensões principais do tanque e agitador e seu sentido de rotação.

O projeto do tanque será recalculado seguindo as recomendações da norma API 650, 2011. Será realizada a conferência do dimensionamento das espessuras dos anéis do costado e fundo, bocais, porta de limpeza e anéis de contraventamento.

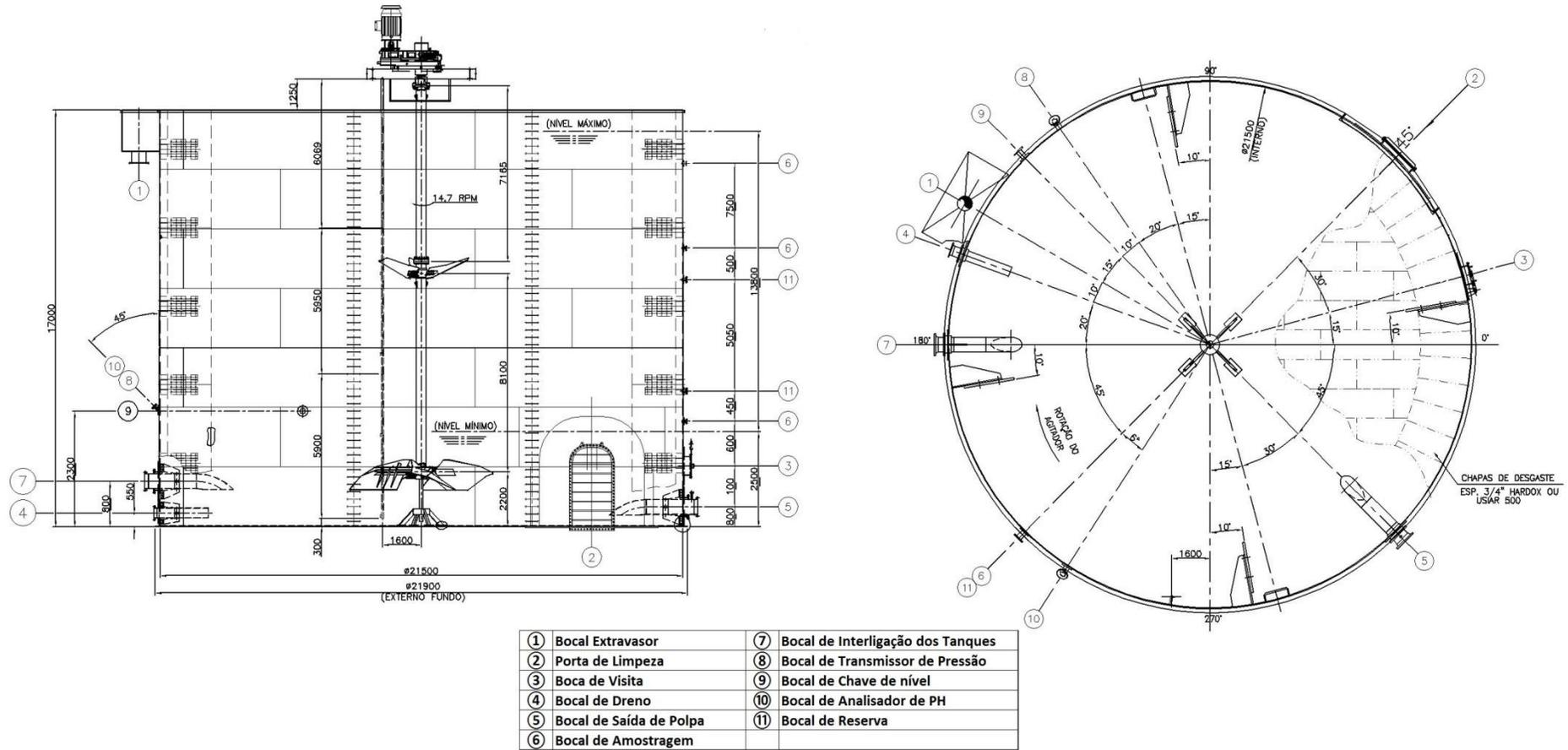


FIGURA 3.2. Vista frontal e superior com as dimensões e detalhamento do Tanque de Concentrado 1120-TQ-01.

### 3.2. Materiais

O material utilizado para a fabricação do tanque são chapas de aços de diversas espessuras do material ASTM A36. De acordo com a norma, a composição química do material e os valores mínimos das propriedades mecânicas são apresentados nas TAB 3.1 e TAB 3.2.

TABELA 3.1. Composição química exigida para chapas de aço ASTM A36.

FONTE: ASTM A36

C (máx)	Si (máx)	P (máx)	S (máx)
0,25	0,40	0,04	0,05

TABELA 3.2. Propriedades Mecânicas para chapas de aço de acordo com a norma ASTM A36.

FONTE: ASTM A36

Limite de Escoamento (mín) <i>MPa</i>	Resistência à Tração <i>MPa</i>
250	400 - 550

A fim de determinar o comportamento mecânico do aço ASTM A36, foram realizados ensaio de tração, análise metalográfica e análise química. O objetivo destes ensaios está relacionado em conhecer o comportamento mecânico do aço empregado na construção do tanque, estabelecendo os limites das propriedades mecânicas. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio e Análises em Materiais (LAMAT), do Senai Itaúna - CETEF Marcelino Corradi.

Os ensaios de tração seguiram as recomendações da norma ABNT NBR ISO 6892-1, 2013. Foram analisados três corpos de prova, identificados em CP1, CP2 e CP3 retirados de uma chapa de aço ASTM A36 de 16 x 1500 x 1600 mm fabricada pela ArcelorMital. Os ensaios foram realizados utilizando uma Máquina Universal hidráulica, modelo MKU, fabricante KRATOS.

As dimensões padrões do corpo de prova usinado para a realização do ensaio estão ilustradas na FIG 3.3.

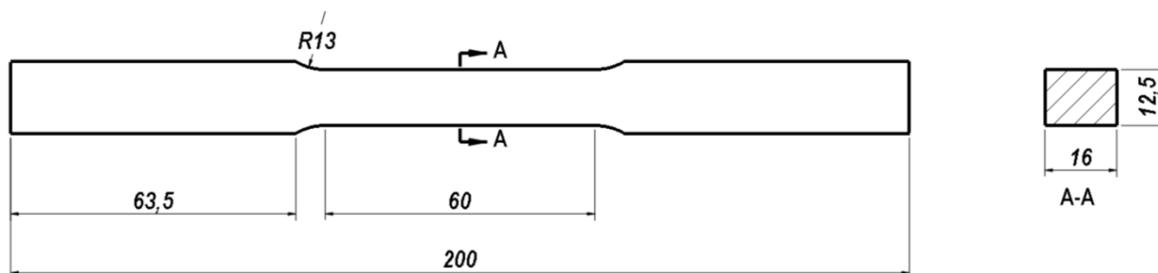


FIGURA 3.3. Dimensões padrões em *mm* para o corpo de prova.

A análise metalográfica foi realizada de acordo com a norma ABNT 15454, 2007, o equipamento utilizado foi o Microscópio Ótico GX51 Olympus. A amostra foi atacada com Nital 2%.

A composição química do material foi obtida com o método de Espectrometria Ótica – Base Ferro. A análise seguiu as recomendações do documento Instrução Técnica Lab 249 revisão 7 do próprio laboratório. Foi utilizado o Espectrômetro de Emissão Ótica SPECTROMAXx calibrado pelo fabricante. O equipamento analisa apenas os componentes especificados, sendo a base referente ao balanceamento da composição para cem por cento.

### 3.3. Ensaio De Ultrassom

O ensaio de ultrassom foi realizado utilizando o aparelho portátil de ultrassom GE Kroutkromer USM 36 conforme FIG 3.4.



FIGURA 3.4. Aparelho portátil de Ultrassom GE Kroutkromer USM 36.

FONTE: [www.ndt-vn.com](http://www.ndt-vn.com).

Foi utilizado o cabeçote de duplo cristal GE MSEB 5 de frequência de 5 MHz e diâmetro de 4,5 mm conforme apresentado na FIG 3.5.



FIGURA 3.5. Cabeçote GE MSEB 5 de 5 Mhz e diâmetro 9/2 mm de duplo cristal.

FONTE: Arquivo Pessoal.

O ensaio de ultrassom foi baseado na norma ASME Sec. V, 2010 e ASTM E 797, 2005 a calibração do aparelho foi realizada em chapas de material ASTM A36 sendo a velocidade do som assumida para o aço de 5920 m/s, foi utilizado um ganho de 72 db e óleo lubrificante foi usado como agente acoplante. Para a realização das medições foi utilizado uma plataforma articulada GENIE Diesel Z-45/25 J RT para acesso aos anéis superiores. Foram realizadas três medições no centro das chapas de cada anel do costado.

### 3.4. Método Dos Elementos Finitos

Neste trabalho as tensões, deslocamentos, modos de vibração e frequências naturais são determinadas numericamente com o auxílio do software Ansys Mechanical® licenciado a Anglo American Minério de Ferro Brasil, que se baseia no MEF.

O modelo de elementos finitos é constituído por elementos de casca SHELL281 com tamanho médio da aresta de 100 mm. Próximo às regiões de reforço dos bocais e porta de limpeza foi utilizado um tamanho de aresta de elemento de 40 mm. O elemento tem seis graus de liberdade por nó, sendo três de translação e três de rotação. O elemento possui três pontos de interpolação ao longo da espessura e apresenta resultados de tensões no *top*, *bottom*, e *mid* de sua espessura.

Prioridade foi dada aos elementos quadrados, enquanto que, os elementos triangulares são utilizados para melhorar a representação da geometria. Os elementos apresentam funções de interpolação quadrática (nós intermediários) contribuindo para a precisão dos resultados. A FIG 3.6 apresenta os elementos de casca quadrado e triangular utilizados com seus respectivos nós.

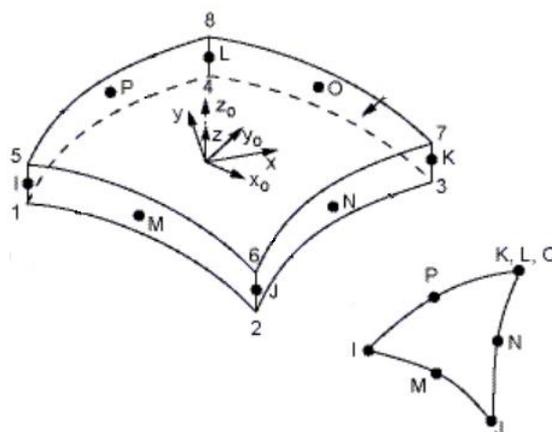


FIGURA 3.6. Elementos SHELL 281.

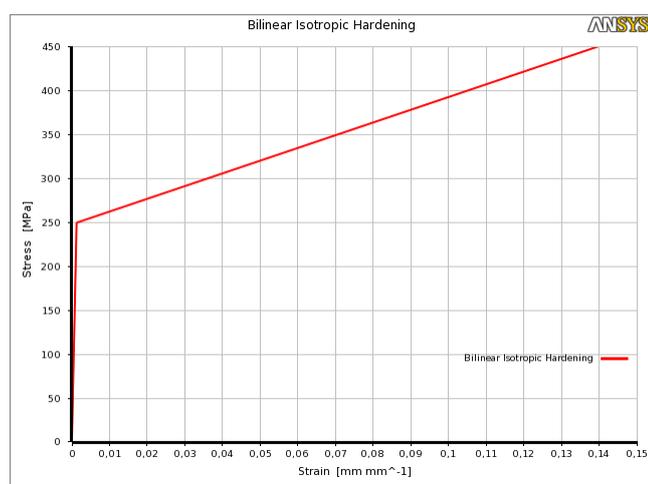
FONTE: ANSYS, 2013

#### 3.4.1. Análise Estrutural do Tanque.

Para a análise estrutural do Tanque de Concentrado foi utilizado uma abordagem não-linear pelo MEF seguindo as recomendações do estudo realizado por MAGALHÃES, 1991. As condições não-lineares utilizadas neste modelo foram a não-linearidade de material, grandes deslocamentos e contato.

Para a representação do comportamento não-linear do material adotou-se o modelo de encruamento linear na região plástica. Dessa forma, estabeleceu-se um comportamento bi-linear elastoplástico, O GRA 3.1 apresenta a curva bi-linear utilizada no modelo. Os valores adotados para as propriedades intrínsecas do material foram o módulo de elasticidade de  $210.000 \text{ MPa}$ , o coeficiente de Poisson de 0,3 e a densidade de  $7800 \text{ kg/m}^3$ .

GRÁFICO 3.1. Curva tensão versus deformação utilizado no MEF.



Foi considerada a gravidade de  $9,8 \text{ m/s}^2$ , a carga atuante no modelo é o peso próprio e hidrostática, assumindo uma densidade máxima da polpa de minério de  $2410 \text{ kg/m}^3$  e uma altura manométrica de  $13,8 \text{ m}$ , correspondendo ao volume nominal de  $5010 \text{ m}^3$ . A FIG 3.7 apresenta a distribuição de pressão no interior do tanque devido à carga hidrostática.

O fundo do tanque não é ancorado na base civil, tendo esta condição, a restrição imposta ao modelo foi a de deslizamento sobre uma base. A base foi restrita em todos os graus de liberdade e foi definida a condição de contato entre o fundo do tanque e a base. Esta condição permite que o fundo do tanque trabalhe e o modelo seja mais representativo.

Não será avaliado neste trabalho as cargas devido ao fluxo de material no enchimento do tanque e o movimento da polpa de minério em consequência da turbulência provocada pelo agitador.

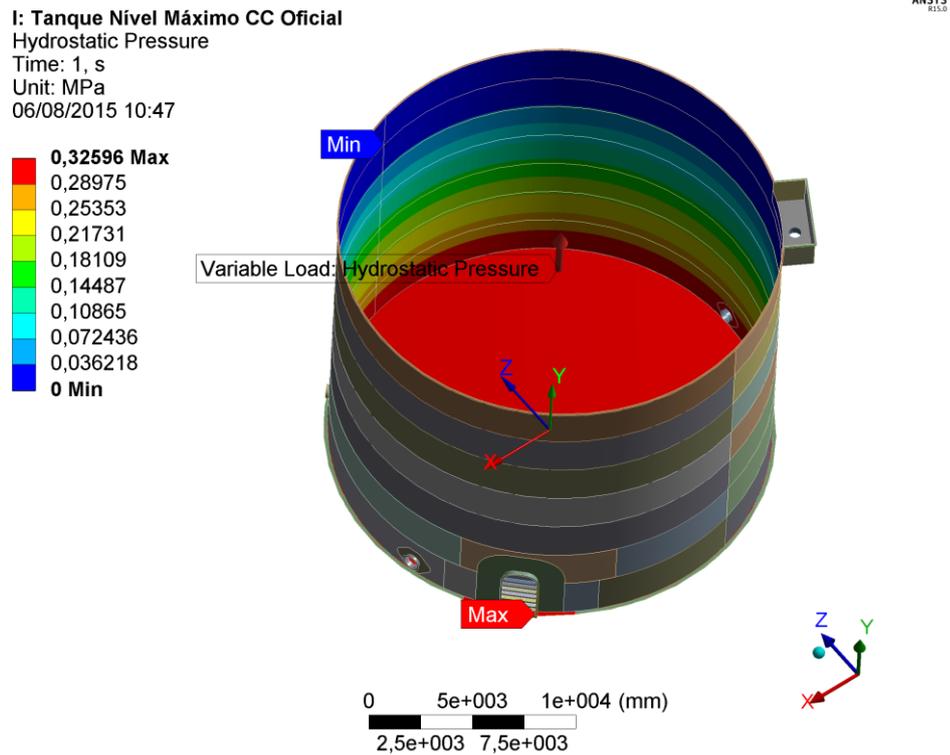


FIGURA 3.7. Distribuição de pressão hidrostática no Tanque de Concentrado.

3.4.2. Índice de Utilização

De acordo com a norma API 650, 2011 a tensão de projeto  $S_d$  é dois terços o limite de escoamento ou dois quintos do limite de resistência à tração. Para a tensão de teste hidrostático  $S_l$  os valores são de dois quartos do limite de escoamento ou  $3/7$  o limite de resistência à tração. A TAB 3.3 apresenta os valores limites das tensões admissíveis considerando o material ASTM A36.

TABELA 3.3. Tensões Admissíveis.

Tensão de Projeto ( $S_d$ )	160 MPa
Tensão de Teste Hidrostático ( $S_l$ )	171 MPa

O índice de utilização ( $IU$ ) é definido pela EQUAÇÃO (3.1). Para que uma estrutura trabalhe dentro de uma faixa segura, a relação apresentada pela EQUAÇÃO (3.2) deve ser respeitada.

$$IU = \frac{\sigma_E}{S_d} \tag{3.1}$$

$$IU \leq 1 \tag{3.2}$$

$\sigma_E$  é a tensão equivalente de von Mises representada pela EQUAÇÃO (3.3).

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3.3)$$

### 3.4.3. Análise Modal

A análise modal foi realizada com base no trabalho de MANSHADI E MAHERI, 2012. Foram avaliadas três condições para a análise modal, com o objetivo de identificar os modos de vibração e as frequências naturais de excitação na faixa de frequência de 0 a 30 Hz, e consequentemente, avaliar a influência da carga hidrostática sobre a rigidez do tanque. Foi avaliado o tanque com seu nível mínimo (0%), intermediário (50%) e nível máximo (100%). A TAB 3.4 apresenta as informações de altura da coluna de líquido e volume de cada condição.

TABELA 3.4. Definição das condições analisadas.

Nível	%	Volume ( $m^3$ )	Altura da coluna de líquido ( $mm$ )
Mínimo	0	908	2500
Intermediário	50	2960	8150
Máximo	100	5010	13800

No modelo da análise modal foi utilizada as mesmas restrições utilizadas no modelo estrutural do tanque e importadas às tensões devido à carga hidrostática dos modelos estruturais.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Resultado dos Ensaio de Materiais

#### 4.1.1. Ensaio de Tração

A TAB 4.1 apresenta os resultados das propriedades mecânicas obtidas através do ensaio de tração.

TABELA 4.1. Resultados dos Ensaio de Tração.

Propriedades	Unidade	CP1	CP2	CP3	Média	$\sigma$
Limite de Resistência a Tração	<i>MPa</i>	401	404	399	401	2,51
Limite de Escoamento	<i>MPa</i>	266	275	249	263	13,20
Alongamento Percentual após a Ruptura	%	43,5	38,5	39	40	2,75

Os limites mínimos estabelecidos em norma para a Resistência a Tração e Escoamento do aço ASTM A36 são, 400 e 250 *MPa*, respectivamente. Os valores médios encontrados para as propriedades mecânicas de resistência a tração e escoamento são 0,25 e 5,2 % maiores que o mínimo recomendado pela norma ASTM A36, respectivamente. Com a análise química apresentada na sequência deste trabalho, pode-se aferir sobre as razões para essa condição.

O GRA 4.1 apresenta a curva força *versus* deslocamento para o CP2. Pode ser observado o comportamento dúctil do material antes da ruptura. A FIG. 4.1 apresenta os corpos de prova fraturados confirmando o comportamento dúctil devido ao tipo de fratura apresentado.

GRÁFICO 4.1. Curva Força versus Deslocamento para o CP2.

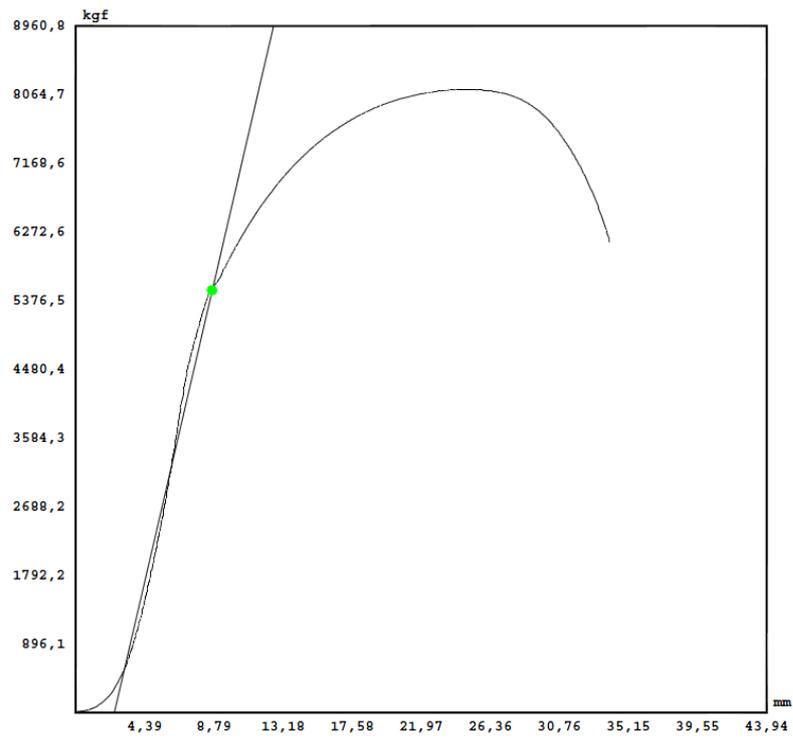


FIGURA 4.1. Corpos de prova após rompimento no ensaio de tração.

#### 4.1.2. Análise Metalográfica

A FIG 4.2 apresenta o resultado da micrografia para o aço ASTM A36, verificou-se uma estrutura constituída de 97 % de ferrita e 13 % perlita. Nota-se a presença de inclusões de óxido e sulfetos.

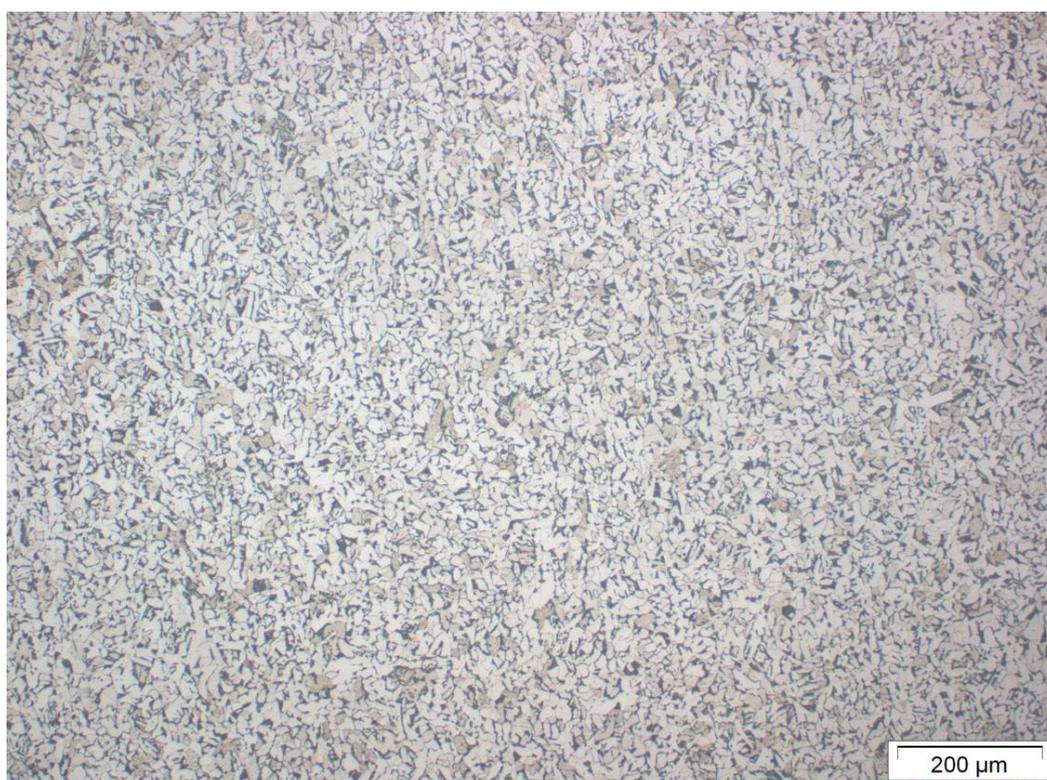


FIGURA 4.2. Micrografia do material ASTM A36.

#### 4.1.3. Análise Química

A TAB 4.2 apresenta o resultado para análise química do aço ASTM A36 através do método de Espectrometria Ótica – Base Ferro.

Como observado no resultado da análise química, a amostra analisada apresenta pequenas quantidades de elementos importantes no aumento das propriedades mecânicas em aços, como o Cromo, Molibdênio, Cobre, Titânio e Boro. Vale ressaltar que as quantidades encontradas nesta amostra não são suficientes para apresentar melhoras nas propriedades mecânicas.

TABELA 4.2. Resultado da Espectrometria Ótica – Base Ferro para o material ASTM A36.

Elementos	Concentração %	Elementos	Concentração %
Carbono (C)	0,1334	Chumbo (Pb)	0,0013
Silício (Si)	0,1274	Estanho (Sn)	0,0012
Manganês (Mn)	0,6498	Arsênio (As)	0,0021
Fósforo (P)	0,0188	Zircônio (Zr)	0,002
Enxofre (S)	0,0067	Bismuto (Bi)	ND
Cromo (Cr)	0,0146	Cálcio (Ca)	ND
Molibdênio (Mo)	0,0031	Cério (Ce)	0,0018
Níquel (Ni)	ND	Antimônio (Sb)	ND
Alumínio (Al)	0,0374	Selênio (Se)	ND
Cobalto (Co)	0,0019	Tântalo (Ta)	0,0153
Cobre (Cu)	0,0051	Boro (B)	0,006
Nióbio (Nb)	ND	Zinco (Zn)	ND
Titânio (Ti)	0,001	Lantânio (La)	ND
Vanádio (V)	ND	Nitrogênio (N)	0,0043
Tungstênio (W)	0,0123	Ferro (Fe)	98,9599

A TAB 4.3 confronta os valores obtidos na análise química com os estabelecidos pela norma ASTM A36, referente ao material utilizado.

TABELA 4.3. Análise da composição química.

Elementos	ASTM A36 [%]	Ensaio [%]
C	< 0,25	0,1334
P	< 0,04	0,0188
S	< 0,05	0,0067
Si	< 0,40	0,1274

Os elementos referenciados pela norma aparecem no ensaio realizado abaixo dos limites estabelecidos. Os demais elementos detectados (impurezas) não são mencionados na norma e aparecem em quantidades reduzidas, não sendo determinante para as características do material.

A análise de composição química foi motivada para embasar as análises de tensão de escoamento obtida no ensaio de tração. O teor de carbono indicado na amostra é 46% menor em relação ao limite superior estabelecido em norma. Isto justifica os valores próximos ao limite mínimo encontrado para as propriedades mecânicas mostrando a importância de se trabalhar com os limites inferiores da norma.

## 4.2. Projeto do tanque de acordo com API 650

A TAB 4.4 apresenta as informações utilizadas para o dimensionamento do Tanque de Concentrado. Estas informações foram retiradas da placa de identificação do tanque.

TABELA 4.4. Dados construtivos do Tanque de Concentrado.

Pressão de Projeto	ATM	Pressão de Trabalho	ATM
Capacidade Nominal	6123 m <sup>3</sup>	Densidade do Produto	2,09 - 2,41 t/m <sup>3</sup>
Altura Nominal	17 m	Diâmetro Nominal	21,5 m
Sobre espessura de Corrosão	4 mm	Temperatura de Projeto	40 °C

A seguir será realizada a verificação do projeto do Tanque de Concentrado conforme os cálculos da norma API 650, 2011.

### 4.2.1. Costado

O cálculo das espessuras será realizado através do método *One-Foot* descrito na norma API 650, 2011 que considera um ponto fixo localizado a 300 mm da extremidade inferior de cada anel do costado. Este método é limitado ao diâmetro de 60 m. O dimensionamento das espessuras dos anéis do costado pode ser realizado pelas EQUAÇÕES (4.1) e (4.2)

$$t_d = \frac{4,9 D (H - 0,3) G}{S_d} + C \quad (4.1)$$

$$t_l = \frac{4,9 D (H - 0,3) G}{S_l} \quad (4.2)$$

Para o cálculo das espessuras mínimas dos anéis do costado foram considerados uma densidade específica  $G$  de 2,41 e uma espessura de corrosão  $C$  de 4 mm. A TABELA 4.5 apresenta os valores calculados de  $t_d$  e  $t_l$  para os anéis do costado.

TABELA 4.5. Dimensões calculadas dos anéis do costado conforme método *One-Foot*.

Anel	$h_c$ (mm)	$H$ (m)	$t_d$ (mm)	$t_l$ (mm)
7	2422	2,122	6,89	1,20
6	2422	4,544	10,73	2,79
5	2422	6,966	14,58	4,39
4	2422	9,388	18,42	5,98
3	2422	11,810	22,26	7,58
2	2422	14,232	26,11	9,17
1	2425	16,700	30,02	10,80

A TAB 4.6 apresenta uma comparação entre os valores mínimos de espessura encontrados nos cálculos realizados pela metodologia *One Foot* e os especificados no detalhamento do projeto, de acordo com as espessuras de chapas comerciais. A menor porcentagem de sobre espessura foi de 12% no terceiro anel, é a maior está localizada no sétimo anel do costado com 81%.

TABELA 4.6. Comparação entre as espessuras mínimas e as especificadas.

Anel	$t_d$ (mm)	$t_p$ (mm)	Sobre espessura (mm)	% Sobre espessura
7	6,89	12,5	5,61	81%
6	10,73	16	5,27	49%
5	14,58	19	4,42	30%
4	18,42	22,4	3,98	22%
3	22,26	25	2,74	12%
2	26,11	31,5	5,39	21%
1	30,02	37,5	7,48	25%

Os resultados dos cálculos foram confrontados com os valores das espessuras das chapas dos anéis do costado e com os valores dos certificados de matérias-primas retiradas do book de projeto. Não foram encontrados desvios nesta conferência.

#### 4.2.2. Fundo

A norma API 650, 2011 determina a espessura do fundo do tanque em relação à espessura do primeiro anel do costado e a tensão do teste hidrostático conforme mostrado na TAB 4.7. Não é considerada neste cálculo a espessura de corrosão.

TABELA 4.7. Espessura nominal mínima para o fundo do tanque.

FONTE: API 650, 2011.

Espessura Nominal do primeiro anel do costado.	Tensão do Teste Hidrotático (MPa)			
	≤ 190	≤ 210	≤ 230	≤ 250
$t \leq 19$	6	6	7	9
$19 < t \leq 25$	6	7	10	11
$25 < t \leq 32$	6	9	12	14
$32 < t \leq 38$	8	11	14	17
$38 < t \leq 45$	9	13	16	19

Conforme calculado no item 4.2.1 a espessura do primeiro anel do costado é de 30,02 mm e a tensão do teste hidrostático é de 171 MPa. Consultando a TAB 4.7 a espessura mínima para o fundo do tanque é de 6 mm. Somando-se a espessura de corrosão de 4 mm e a espessura mínima para o fundo, o total de espessura necessário para o fundo é de 10 mm. A FIG 4.3 mostra a distribuição das chapas e o tipo de cordão de solda utilizado na junção das chapas de fundo. Como observado, a espessura especificada no projeto é de 25 mm, 150 % acima do mínimo especificado pela API 650, 2011.

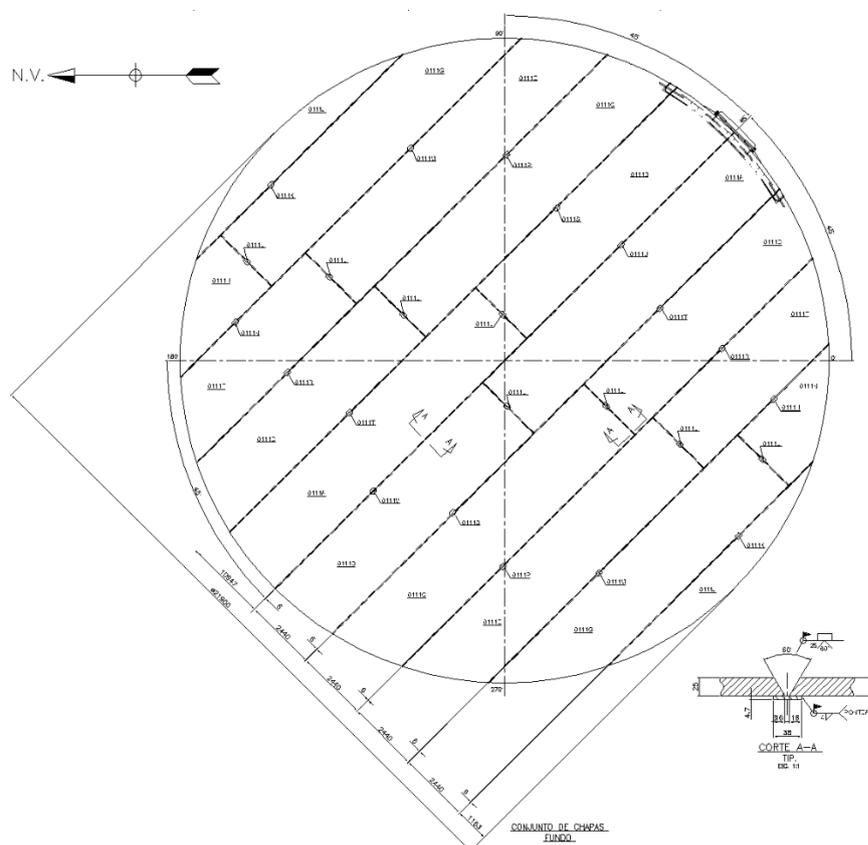


FIGURA 4.3. Distribuição de chapas do fundo, informações de soldagem e espessuras de chapas.

4.2.3. Bocais

A norma API 650, 2011 determina que todo furo acima do diâmetro nominal de 2” deve ser reforçado. Os reforços utilizados no projeto dos bocais do Tanque de Concentrado 1120-TQ-01 possuem o padrão como mostrado na FIG 4.4. A área mínima da seção transversal do reforço ( $A_{SR}$ ) não deve ser menor que o produto do diâmetro do furo do costado pela espessura do costado. Os bocais de instrumentação não serão estudados neste estudo devido a sua localização e seus pequenos diâmetros. Apenas os bocais de transporte de minério serão contemplados nesta verificação. A TAB 4.8 apresenta uma comparação entre as dimensões de projeto e as recomendadas para os bocais do Tanque de Concentrado.

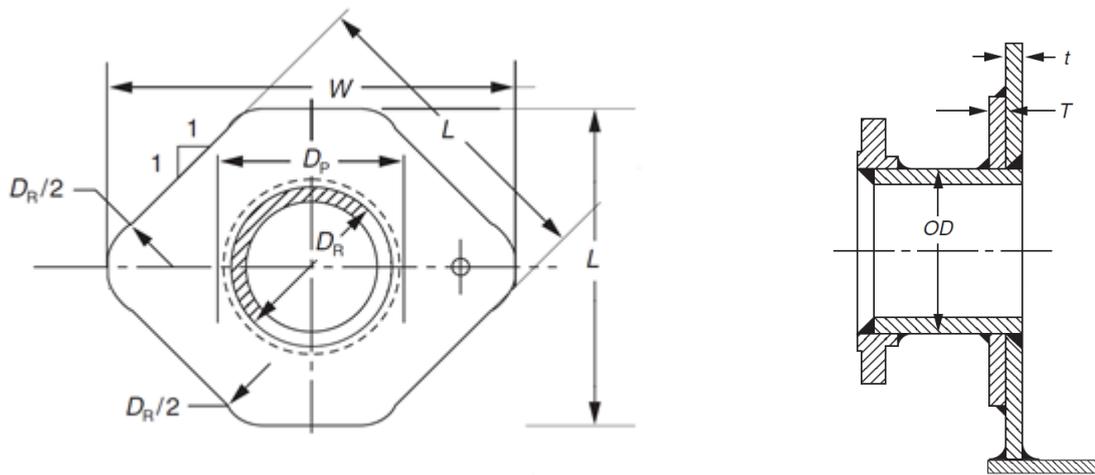


FIGURA 4.4. Padrão de reforço.

FONTE: Adaptação API 650, 2011.

TABELA 4.8. Comparação das dimensões dos Bocais em relação à norma API 650, 2011 e o projeto do Tanque 1120-TQ-01.

Bocal 3 (Boca de Visita)					
	$\phi$ Nominal	$D_R$ mm	$L$ mm	$W$ mm	$A_{SR}$ mm <sup>2</sup>
Norma	30"	765	1545	1865	29063
Projetado		766	1630	1969	30353
Bocal 5 (Saída de Polpa) e Bocal 7 (Interligação dos Tanques)					
Norma	26"	664	1340	1625	25237
Projetado		666	1340	1615	25013
Bocal 4 (Dreno)					
Norma	16"	410	850	1035	15653
Projetado		410	860	1027	16125

Como observado na TAB 4.8 as áreas  $A_{SR}$  dos Bocais 5 e 7 estão abaixo do valor especificado pela norma. Esta diferença é menor que 1% e não implica em perda da integridade estrutural. Este valor menor da largura do reforço ( $W$ ) pode ser um erro de arredondamento durante a fase de detalhamento do projeto.

#### 4.2.4. Porta de Limpeza

De acordo com a norma API 650, 2011 as portas de limpeza devem atender as seguintes especificações de projeto: a altura ou a largura devem possuir no máximo 1200 mm, a abertura deve ser retangular com cantos arredondados com um raio de no mínimo 1/3 a maior altura livre e toda a porta inclusive a chapa de reforço deve estar localizada no primeiro anel do costado.

Além disso, a área da seção transversal do reforço  $A_{cs}$  do costado acima do topo da abertura não deve ser menor igual como requerido pela EQUAÇÃO (4.3).

$$A_{cs} \leq \frac{K_1 h t_{d1}}{2} \quad (4.3)$$

Para se determinar o valor de  $K_1$  deve-se utilizar o gráfico da figura 5-11 da norma API 650, 2011.

O valor do eixo vertical do gráfico da norma pode ser determinado pela EQUAÇÃO (4.4).

$$\left[ \frac{(H + 8,8) D + 71,5}{1,408 h} \right] \left[ \frac{123 t_{d1}}{4,9 D (H - 0,3)} \right]^{0,5} \quad (4.4)$$

Assim, para se calcular a área da seção transversal do reforço acima da porta de limpeza, devem-se desenvolver os passos a seguir.

Determinando o valor do eixo vertical de acordo com a EQUAÇÃO (4.4).

$$\left[ \frac{(17 + 8,8) \times 21,5 + 71,5}{1,408 \times 3200} \right] \left[ \frac{123 \times 30,02}{4,9 \times 21,5 \times (17 - 0,3)} \right]^{0,5} = 0,20$$

O valor de 0,20 no eixo vertical corresponde ao valor no eixo horizontal  $K_1$  de 1,4 na figura 5-11 da norma API 650, 2011, assim o resultado de  $A_{cs}$  pode ser encontrado.

$$A_{cs} \leq \frac{1,4 \times 3200 \times 30,02}{2} \leq 67.244,8 \text{ mm}^2$$

O valor da seção transversal especificada no projeto ( $A_{csp}$ ) é calculado a seguir, sendo o valor especificado 38% maior que o mínimo calculado.

$$A_{csp} = 75 \times 1237,5 = 92.812,5 \text{ mm}^2$$

A norma API 650, 2011 determina que a largura da chapa de reforço do fundo ou soleira da porta de limpeza, medida na linha de centro da abertura, será igual a 250 mm mais a combinação das espessuras do costado e do reforço. A espessura mínima para a chapa da soleira pode ser determinada pela EQUAÇÃO (4.5).

$$t_b = \frac{h^2}{360000} + \frac{b}{170} \sqrt{HG} \quad (4.5)$$

A espessura da chapa de soleira  $t_b$  é igual a:

$$t_b = \frac{3200^2}{360000} + \frac{1600}{170} \sqrt{17 \times 2,41} = 88,687$$

De acordo com o projeto, a espessura da soleira é de 76 mm. Assim, o valor especificado é menor que o recomendado pela norma API 650, 2011.

Como observado na FIG 4.5, às dimensões da porta de limpeza estão acima do permitido, o raio da abertura não possui um terço da maior altura livre, a porta não está localizada apenas no primeiro anel e a espessura da soleira está menor que o mínimo calculado pela norma API 650,

2011, não atendendo aos critérios estabelecidos em norma. Com o auxílio do método dos elementos finitos poderá ser avaliado de forma mais precisa os efeitos destes desvios de projeto na distribuição de deslocamentos e tensões.

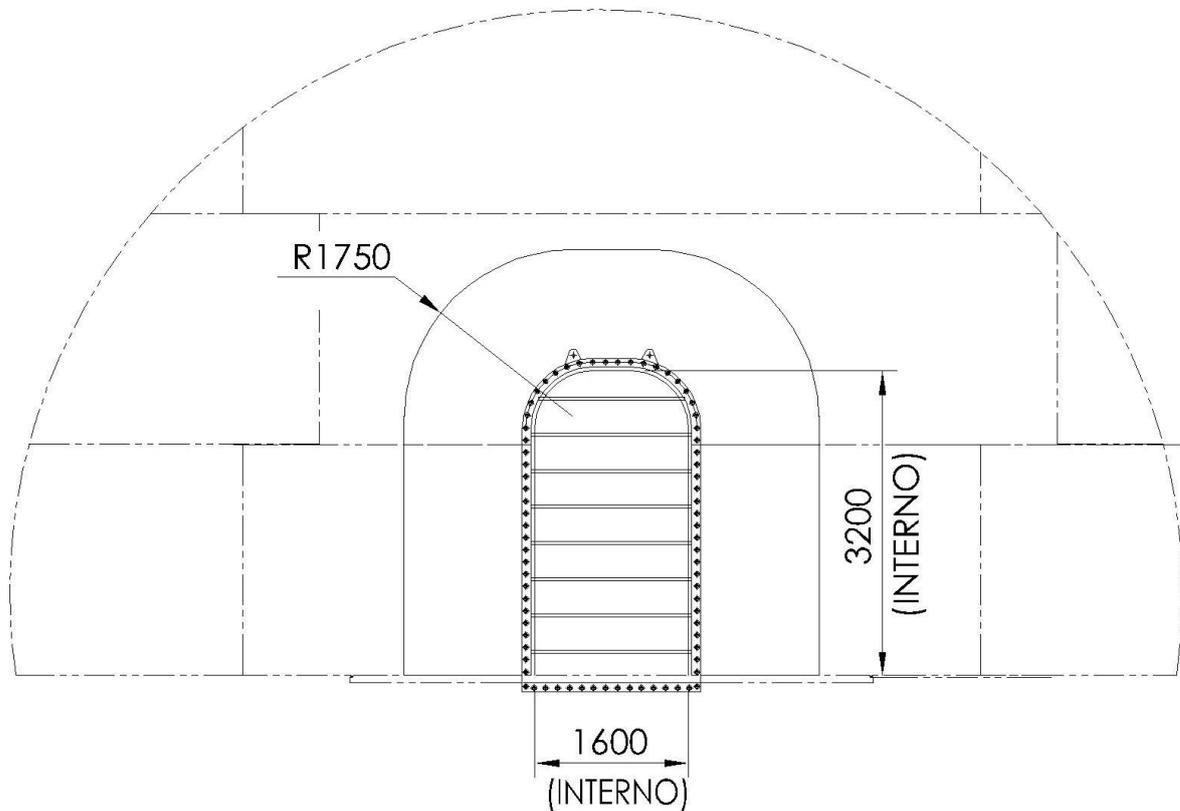


FIGURA 4.5. Dimensões da porta de limpeza do tanque 1120-TQ-01.

#### 4.2.5. Seção Transversal do Anel de Reforço

Para tanques abertos no topo, são necessários anéis de contraentamento para manter a circunferência e aumentar a rigidez nessa região, quando estes estiverem submetidos a cargas de vento. Os anéis de reforço devem estar posicionados próximo ao topo do tanque e do seu lado externo. Para determinação do momento resistente mínimo a API 650, 2011 utiliza a seguinte expressão como mostrada pela EQUAÇÃO (4.6).

$$Z = \frac{D^2 H_2}{17} \left( \frac{V}{190} \right)^2 \quad (4.6)$$

Para determinar a velocidade dos ventos no local de instalação do tanque, foi utilizada a norma ABNT 6123, 1988. Para se determinar o valor de  $V$  da EQUAÇÃO (4.6), conforme a norma

ABNT 6123, 1988, foi utilizado o gráfico de isopletas de velocidades básicas, medida sobre 3 segundos, a 10 metros do nível do terreno em uma região plana, que pode ser excedida em média uma vez em 50 anos. O Valor da velocidade  $V$  adotado para a região de Conceição do Mato Dentro foi de 108 km/h.

Com os dados do tanque 1120-TQ-01 o valor mínimo de módulo de seção requerida é:

$$Z = \frac{21,5^2 \times 17}{17} \left( \frac{108}{190} \right)^2 = 137,72 \text{ cm}^3$$

De acordo com o projeto do tanque 1120-TQ-01 o perfil utilizado para o reforço do tanque é uma cantoneira de abas iguais de 3" com peso nominal de 10,71 kg/m e o valor do módulo de seção de 13,60 cm<sup>3</sup>. A FIG 4.6 apresenta o detalhe do anel de reforço. O perfil especificado é 10,12 vezes menor do que o recomendado para o Tanque de Concentrado. Essa condição deixa o tanque susceptível a falhas provocadas pelo vento. Com a análise modal pelo método dos elementos finitos, será possível avaliar a influência desta condição fora das recomendações da norma API 650, 2011.

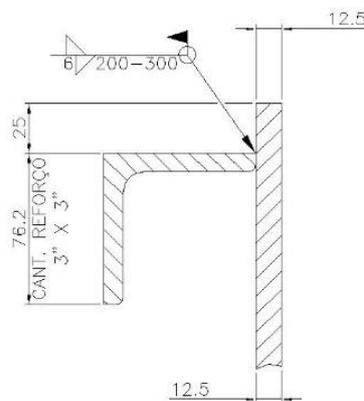


FIGURA 4.6. Detalhe do anel de reforço instalado no Tanque de Concentrado. Dimensões em mm.

### 4.3. Projeto do Tanque de acordo com o MEF

O modelo de elementos finitos do tanque foi concebido para ser representativo ao tanque 1120-TQ-01 como apresentado na FIG 4.7 em uma vista lateral e FIG 4.8 em uma vista superior. Foram modelados os reforços e bocais de saída de polpa, dreno, interligação dos tanques e boca de visitas. A FIG 4.9 apresenta em detalhes o modelamento do bocal de visita. Os demais bocais não foram considerados no modelamento devido seus pequenos diâmetros e sua posição em

regiões de baixa carga hidrostática o que não comprometem a precisão dos resultados e simplificam o modelo de elementos finitos.

A porta de limpeza foi modelada em detalhes considerando o reforço do costado, soleira, pescoço, flange e porta, a FIG 4.10 apresenta em detalhes o modelo da porta. A caixa extravasora além dos anéis de reforço do costado foi contemplada no modelo de elementos finitos.

Os defletores de material não foram modelados, por não apresentarem resistência significativa ao costado, considerando apenas o carregamento hidrostático. O modelo total do MEF apresentou um total de 74.510 nós e 73.375 elementos.

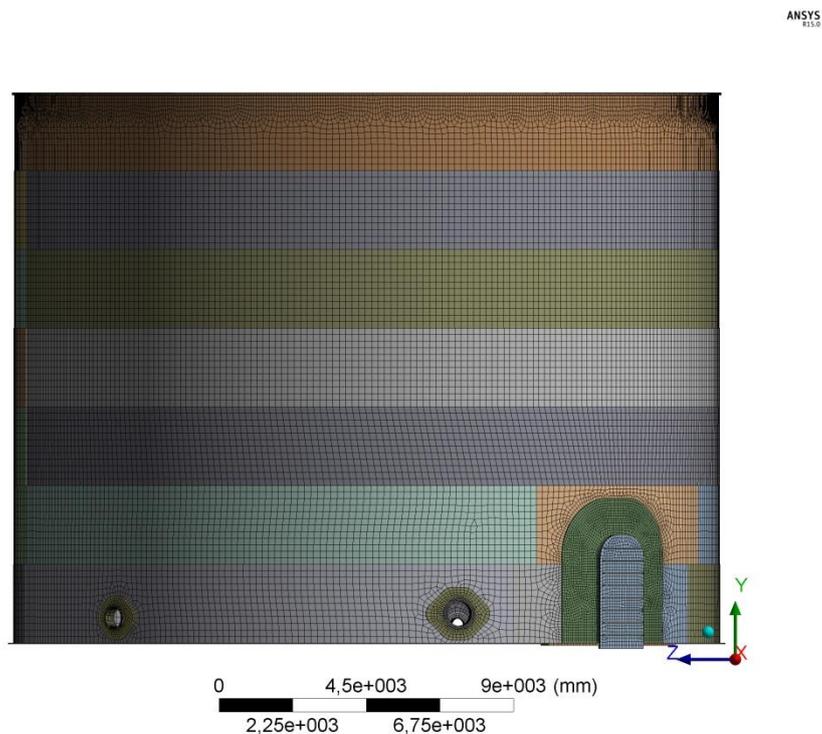


FIGURA 4.7. Vista frontal do modelo de elementos finitos do Tanque de Concentrado 1120-TQ-01.

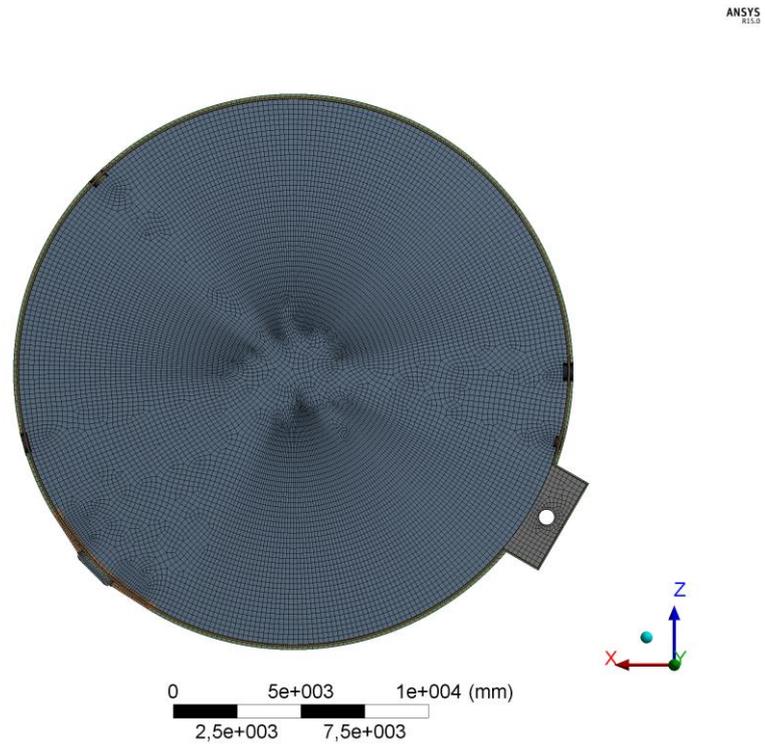


FIGURA 4.8. Vista superior do modelo de elementos finitos do Tanque de Concentrado 1120-TQ-01.

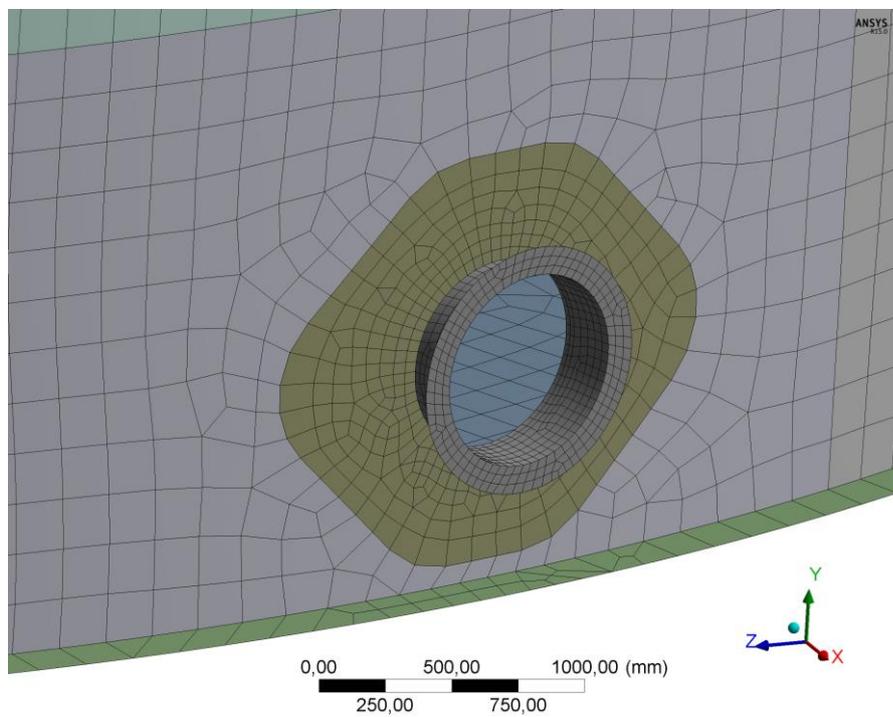


FIGURA 4.9. Detalhe do bocal de visita do modelo de elementos finitos do Tanque de Concentrado 1120-TQ-01.

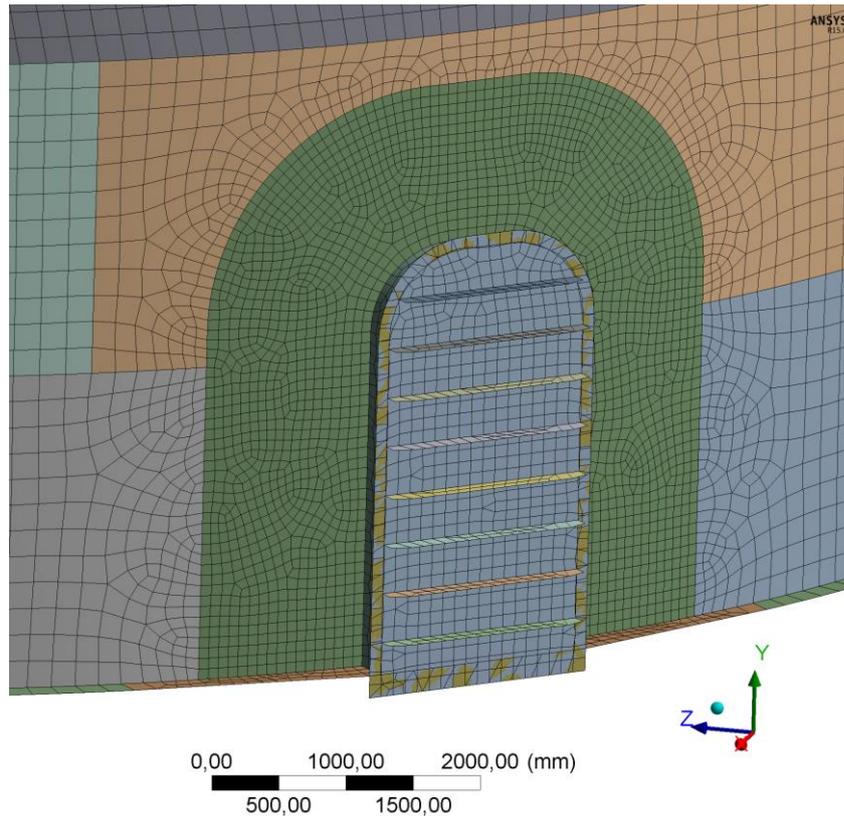


FIGURA 4.10. Detalhe da porta de limpeza do modelo de elementos finitos do Tanque de Concentrado 1120-TQ-01.

#### 4.4. Análise de Tensões e Deslocamentos

Na FIG 4.11 é apresentado o índice de utilização da superfície externa para a condição do tanque em nível máximo com  $5010 m^3$ . Na sequência as FIG 4.12 e FIG 4.13 mostram em detalhes o índice de utilização na região da porta de limpeza, superfície externa e interna do tanque, respectivamente.

Como pode ser observado nas figuras, as regiões próximas a porta de limpeza e ao seu reforço apresentam índices de utilização superiores a um. O descumprimento das recomendações especificadas na norma API 650, 2011, que estabelece as dimensões máximas da porta de limpeza em  $1200 mm$  e determina que as dimensões não excedam o primeiro anel, são os principais indícios destas concentrações de tensão. Uma região mais rígida em uma estrutura tende a concentrar maiores níveis de tensões, pela restrição dos deslocamentos.

Conforme apresentado na FIG 4.13, à região interna superior a porta de limpeza é a que apresenta maior índice de utilização. Verificou-se nessa região a existência de deformação

plástica localizada, devido as tensões ultrapassar o limite de escoamento do material. Para avaliar a deformação plástica do componente foi utilizado o mapa de deformações plásticas. A FIG 4.14 apresenta a região interna da porta de limpeza que ocorreu deformações plásticas localizadas.

Não foram encontrados índices de utilização maiores que 1 para os bocais e bocal de visita, onde se comprova à eficiência do método de cálculo dos reforços conforme a norma API 650, 2011.

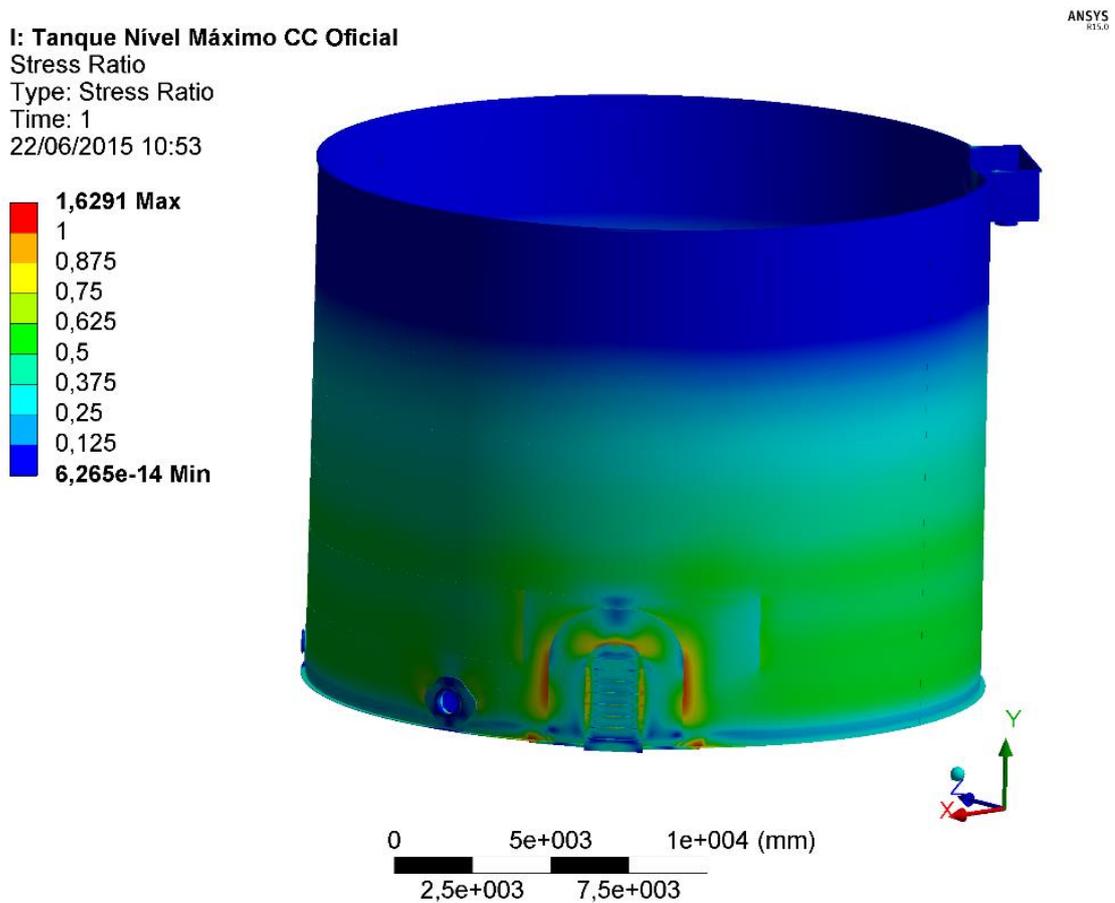


FIGURA 4.11. Índice de utilização para a superfície externa do Tanque de Concentrado 1120-TQ-01.

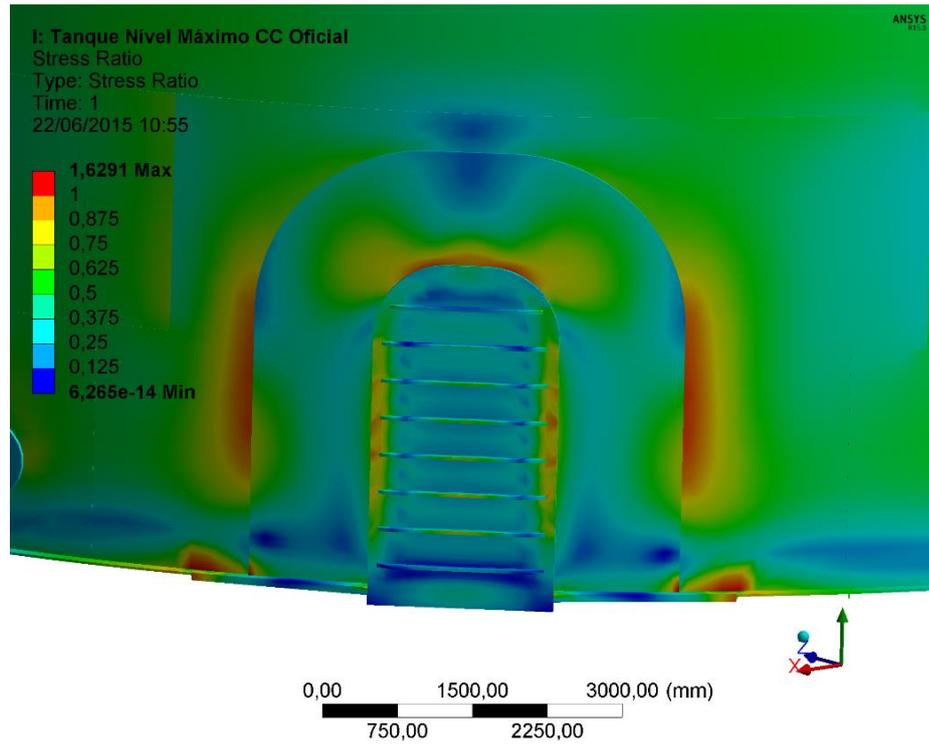


FIGURA 4.12. Índice de utilização para a superfície externa no detalhe da porta de limpeza do Tanque de Concentrado.

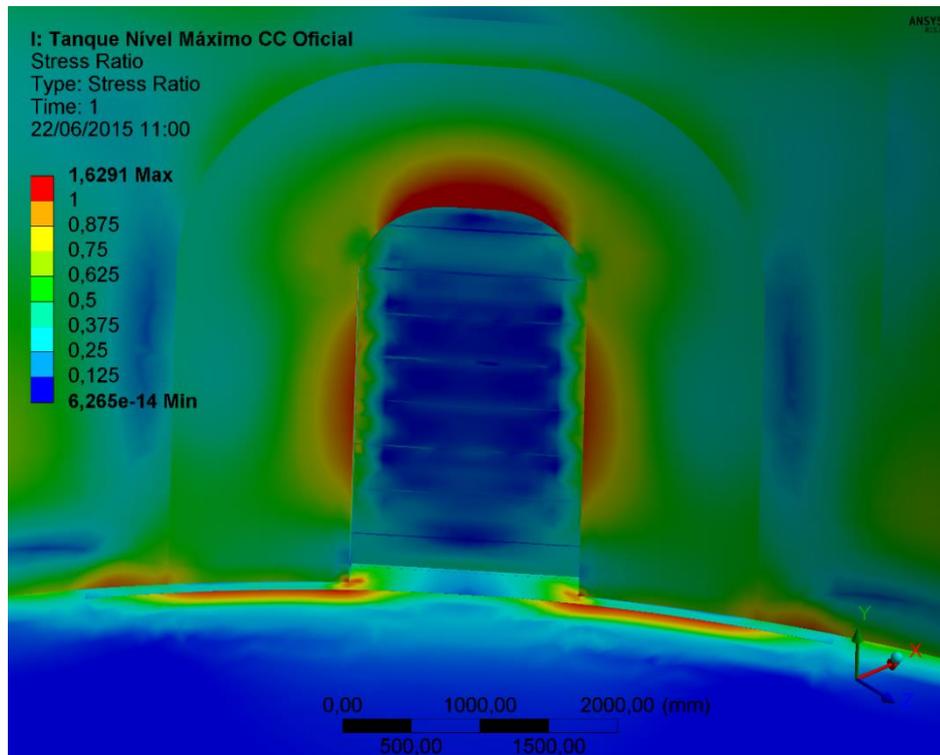


FIGURA 4.13. Índice de utilização para a superfície interna no detalhe da porta de limpeza do Tanque de Concentrado.

De acordo com a FIG 4.14 a região superior da porta de limpeza entre o pescoço e o costado apresenta uma pequena região com deformações plásticas. Estas deformações não

comprometem a integridade estrutural do equipamento devido a região de concentração ser pequena. Para o acompanhamento de possíveis nucleações de trinca devido ao fenômeno de fadiga por baixo ciclo é importante que esta região seja inspecionada periodicamente.

É importante que os limites operacionais não ultrapassem a capacidade máxima do tanque. Uma maior altura manométrica pode provocar o aumento da região plastificada e consequentemente reduzir a vida do componente em relação a fadiga.

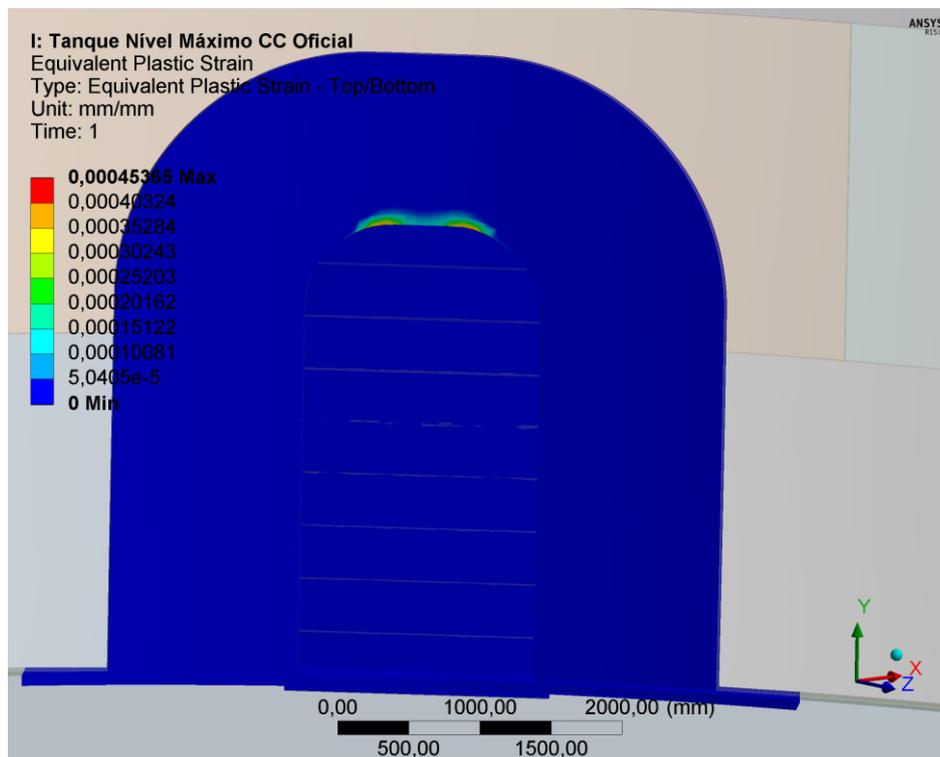


FIGURA 4.14. Detalhe da região interna com deformação plástica na porta de limpeza do Tanque de Concentrado.

A FIG 4.15 apresenta os deslocamentos totais do Tanque de Concentrado na região da porta de limpeza. A porta de limpeza influencia diretamente na distribuição dos deslocamentos no tanque. Verificou-se uma não homogeneização dos deslocamentos devido as dimensões da porta, no qual, os deslocamentos máximos estão localizados entre o reforço e o costado em ambos os lados. Esta condição pode ser observada com mais detalhes na FIG 4.16.

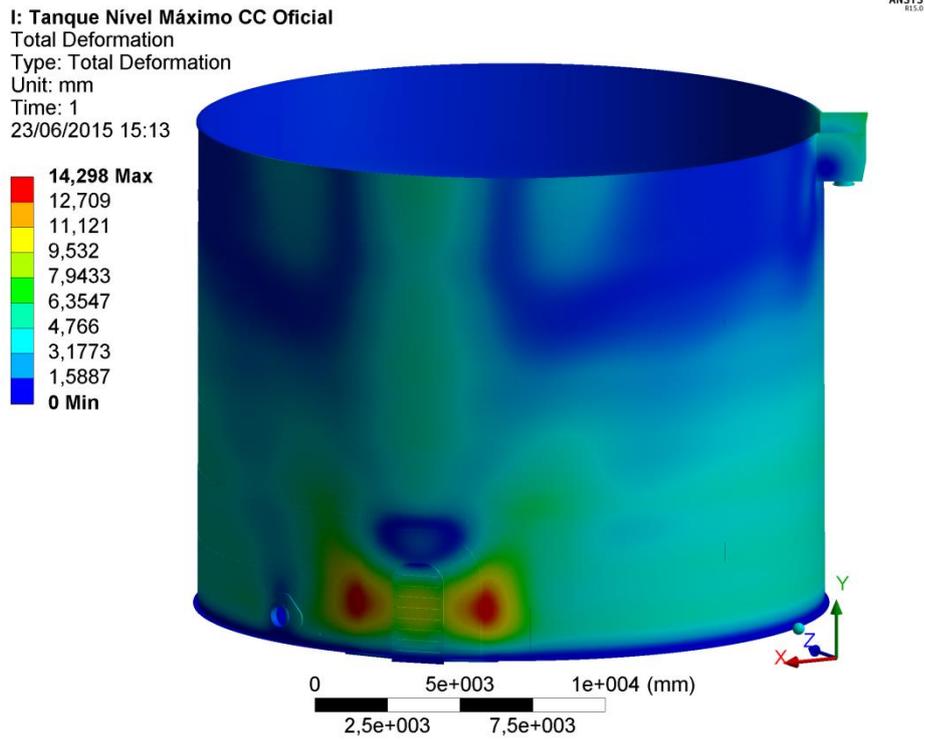


FIGURA 4.15. Deslocamento total do Tanque de Concentrado.

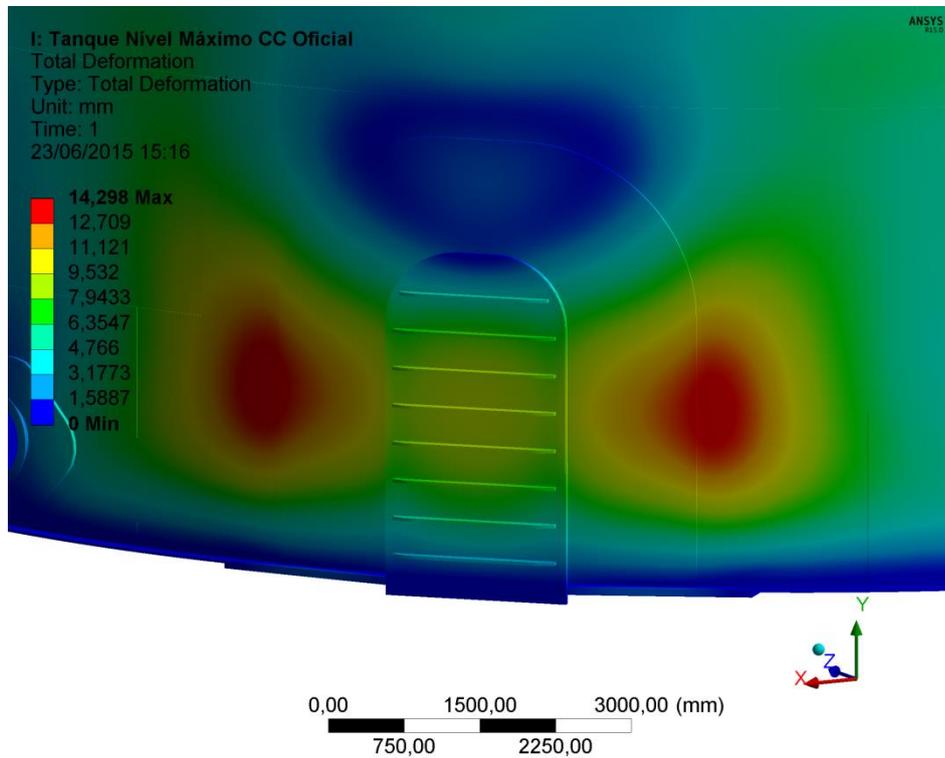


FIGURA 4.16. Detalhe da porta de limpeza do deslocamento total do Tanque de Concentrado.

A concentração de deslocamento na região da porta de limpeza pode ser explicada devido à diferença de rigidez desta região pela presença do reforço.

Conforme apresentado na FIG 4.17 foram avaliados o deslocamento radial e o índice de utilização ao longo da altura do Tanque de Concentrado na Região 1 do ponto A-1 ao A-2 e Região 2 do ponto B-1 ao B2. O objetivo é avaliar o dimensionamento das espessuras dos anéis do costado do tanque fora das regiões de concentração de tensão e deslocamento distantes da porta de limpeza.

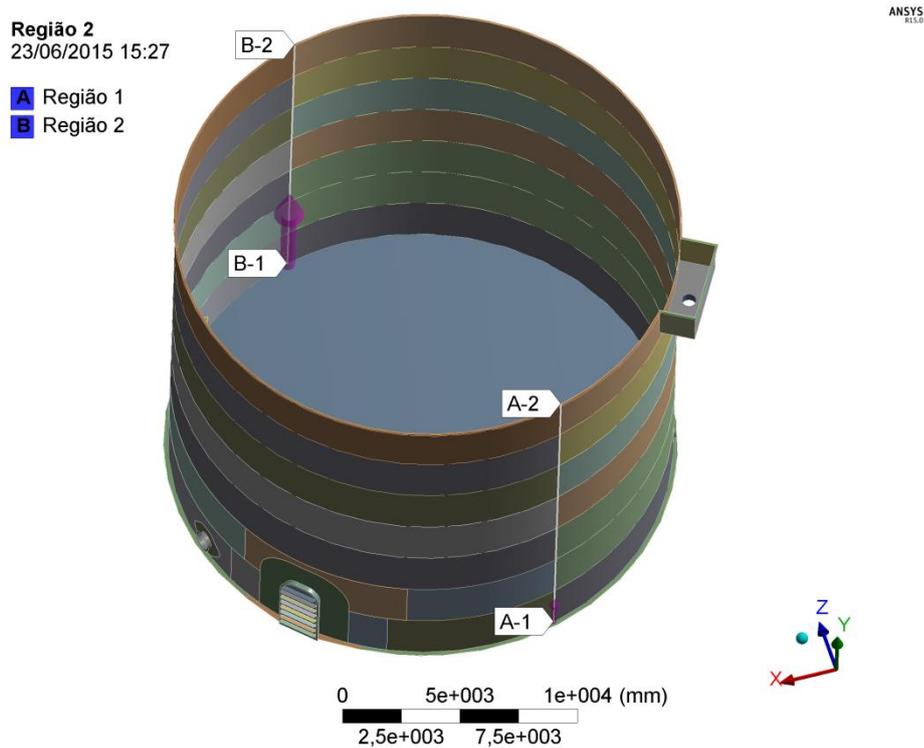


FIGURA 4.17. Localização da Região 1 e Região 2

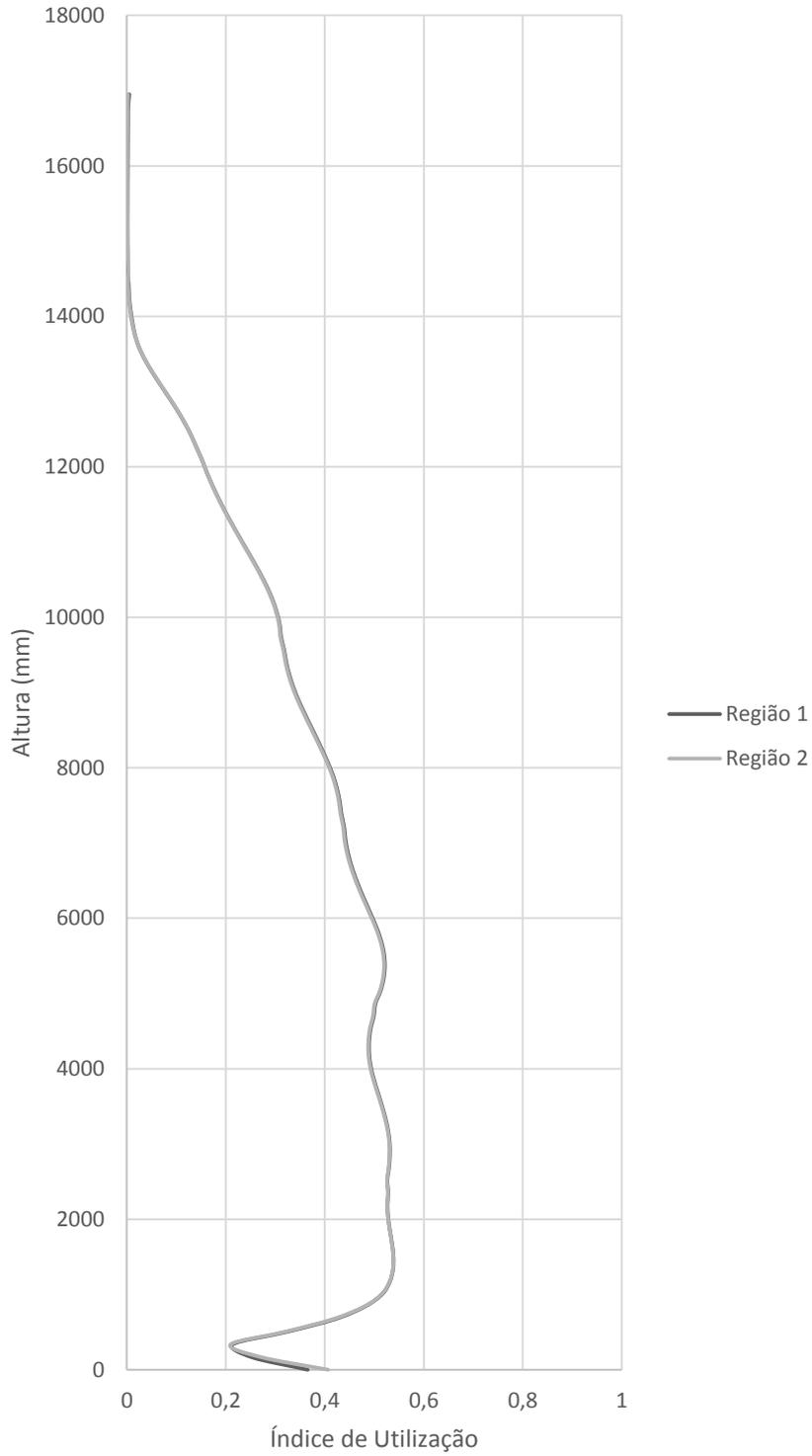
O GRA 4.2 e GRA 4.3 apresentam o índice de utilização e o deslocamento radial em duas regiões distintas e distantes da porta de limpeza e bocais.

O GRA 4.2 apresenta o índice de utilização para a região externa do costado do tanque. Os maiores níveis do índice de utilização estão localizados entre as alturas de  $1000\text{ mm}$  e  $3860\text{ mm}$ . O maior índice de utilização encontrado entre as regiões em estudo foi de  $0,54$  há uma altura de  $1340\text{ mm}$ . Os dois primeiros anéis apresentam os maiores índices de utilização sendo os dois últimos os que possuem os menores índices de utilização.

O índice de utilização fora da região da porta de limpeza se comporta de forma homogênea e estão abaixo de um. Este resultado mostra a eficiência da aplicação da metodologia “*One Foot*”

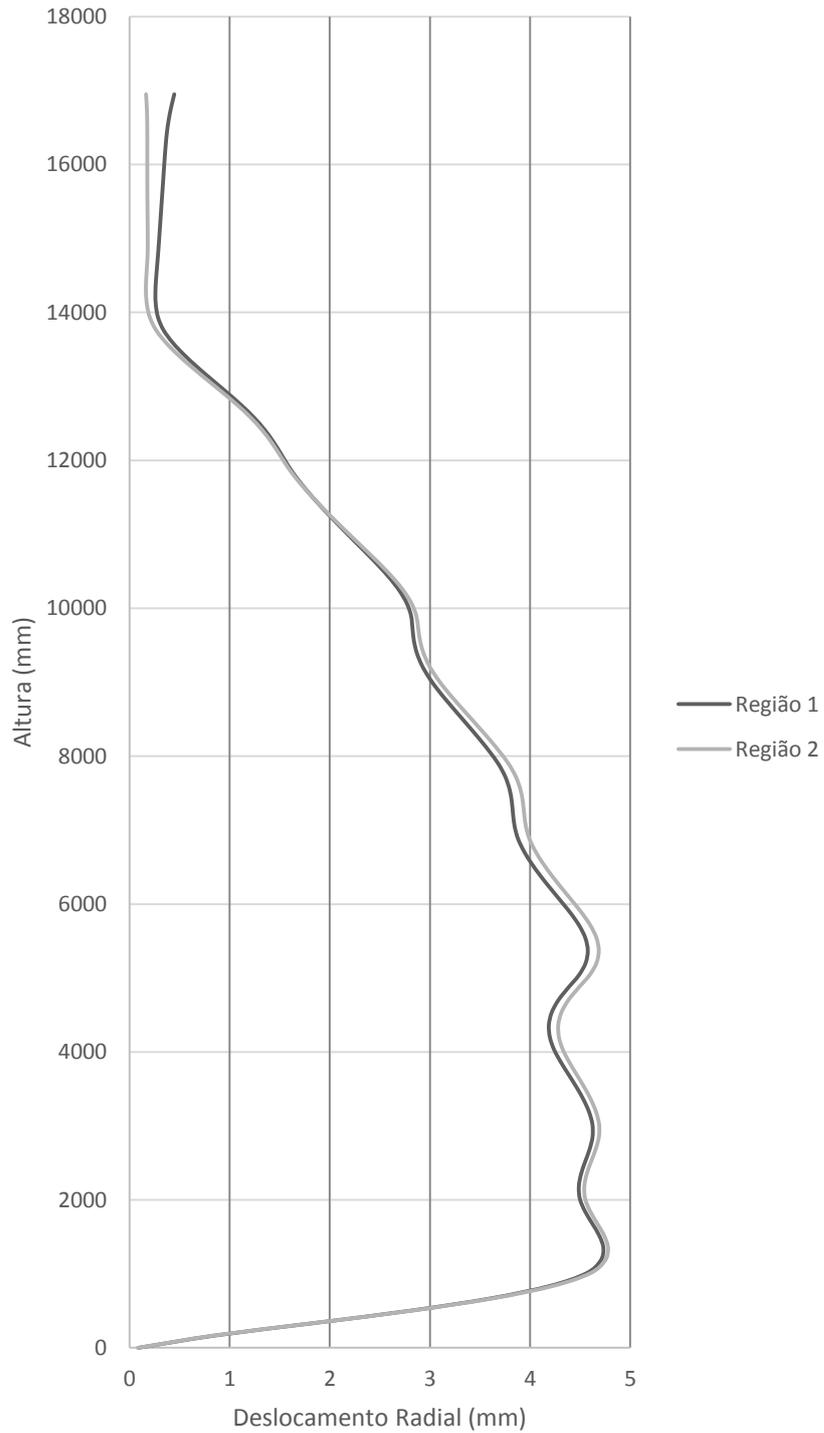
para o dimensionamento de anéis de costado de acordo com a norma API 650, 2011. Esta conclusão também foi encontrada por MAGALHÃES, 1991.

GRÁFICO 4.2. Índice de utilização de duas regiões distintas do Tanque de Concentrado para a condição de tanque em nível máximo.



O GRA 4.3 apresenta os deslocamentos radiais do tanque nas regiões em estudo. Conforme apresentado, as duas regiões mostram deslocamento similar, diferenciando apenas em módulo em alguns níveis, mas conservando a forma de deslocamento.

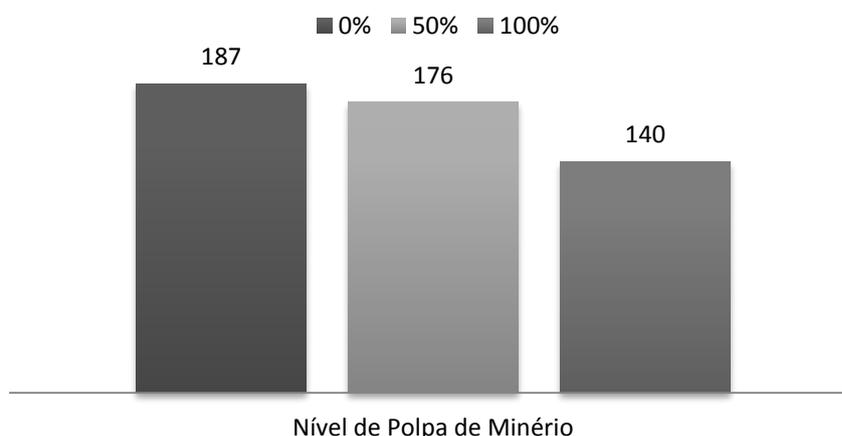
GRÁFICO 4.3. Deslocamento radial ao longo da altura do Tanque de Concentrado em duas regiões distintas para a condição de nível máximo.



#### 4.5. Análise Modal

O GRA 4.4 apresenta os resultados do total de modos de vibração encontrados para as três condições de enchimento do Tanque de Concentrado entre o intervalo de 0 a 30 Hz. Conforme observado, na medida em que o tanque é alimentado até seu nível máximo, ocorre uma redução do número de modos de vibração. O contrário ocorre na medida em que o nível reduz, ocorre o aumento do número de modos de vibração. Estes resultados indicam uma contribuição das forças hidrostáticas no aumento da rigidez da estrutura a medida que o nível do tanque é completado.

GRÁFICO 4.4. Comparação entre o total de modos de vibração compreendidos entre o intervalo de 0 a 30 Hz para cada condição de enchimento.



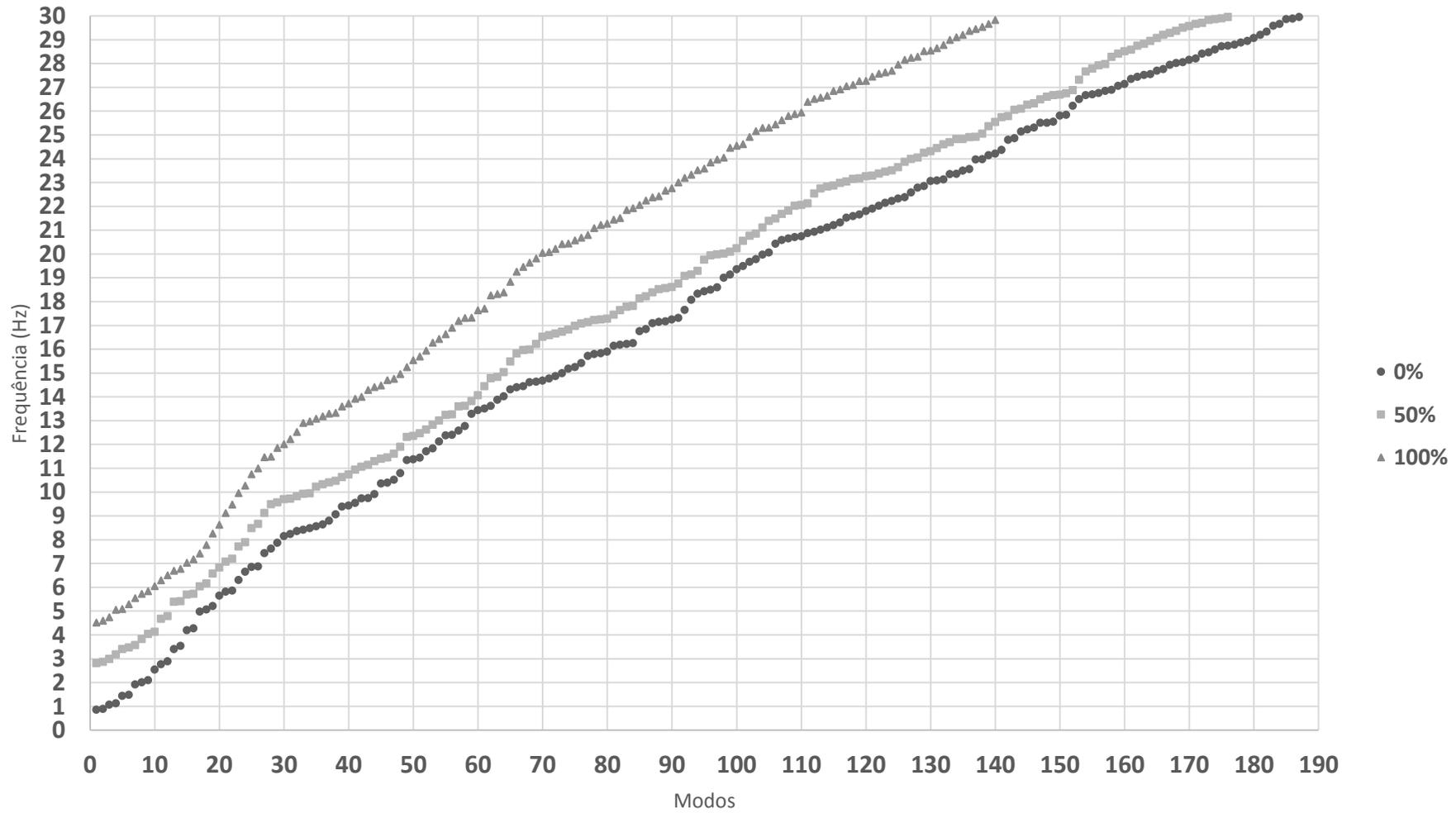
O GRA 4.5 apresenta os valores das frequências naturais para cada modo natural para as três condições de enchimento do tanque. Comparando as primeiras frequências naturais das condições de 100% e 0% de enchimento, 4,52 e 0,86 Hz respectivamente, o tanque em nível máximo apresenta uma frequência natural 5,5 vezes maior que em nível mínimo. Para maiores detalhes sobre os modos de vibração e frequências naturais, o Anexo A apresenta os dez primeiros resultados da análise modal para cada condição de enchimento analisada.

De acordo com a norma ABNT 6123, 1988, o vento natural apresenta flutuações em torno de sua velocidade média que são designadas por rajadas. Os efeitos dinâmicos devidos à turbulência gerada pelo vento podem gerar em estruturas flexíveis, oscilações na direção da velocidade média, que são designadas como resposta flutuante. A norma especifica que em estruturas com baixo amortecimento, com frequências naturais menores que 1 Hz, podem ser excitadas e ocorrer o fenômeno de ressonância.

A condição analisada com nível mínimo apresenta os dois primeiros modos de vibração abaixo de 1  $Hz$ , o primeiro modo com 0,86  $Hz$  e segundo com 0,89  $Hz$  (maiores detalhes desta condição podem ser avaliados no ANEXO A). Estes resultados apresentam a importância da utilização do anel de contraventamento em tanques, mostrando a baixa rigidez destas estruturas quando estão próximas ao seu nível mínimo de enchimento. Grande parte da rigidez é obtida devido às forças hidrostáticas exercidas na parede dos últimos anéis do costado. Baixas frequências naturais podem ser responsáveis pelo efeito de ressonância ocasionado por cargas de vento ou até mesmo do próprio líquido dentro do tanque sendo homogeneizado. Vale lembrar que esta condição também foi identificada na verificação do dimensionamento do anel de contraventamento no item 4.2.5 conforme a norma API 650, 2011.

Será apresentada uma proposta de um anel de contraventamento secundário para evitar a falha do tanque pela excitação por cargas de vento no item 4.7.

GRÁFICO 4.5. Comparação entre as frequências naturais e modos de vibração para três condições de enchimento do Tanque de Concentrado.



#### 4.6. Medição de Espessura do Tanque

A medição de espessura ocorreu na Estação de Bombas I no município de Conceição do Mato Dentro. O Tanque de Concentrado foi medido conforme mostrado na FIG 4.18. Cada anel do costado foi medido em três posições diferentes com o auxílio da plataforma elevatória. A medição foi realizada por um inspetor experiente e qualificado na técnica de ultrassom.



FIGURA 4.18. Medição das espessuras do Tanque de Concentrado com auxílio da plataforma articulada.

Os resultados da medição de espessura podem ser observados na TAB 4.9. De acordo com as medições de ultrassom realizadas, as espessuras dos anéis estão próximas às espessuras nominais definidas em projeto. Apenas a espessura do sexto anel apresentou uma diferença média negativa, ou seja, perda de espessura. Considerando a tolerância de fabricação de 0,75 *mm*, para a chapa de 16 *mm* do anel com base na norma ASTM A6, 2007. Podemos considerar que a diferença de -0,11 *mm* está dentro do limite de fabricação e ainda não apresenta desgaste.

TABELA 4.9. Resultados da Medição por Ultrassom dos anéis do Tanque de Concentrado. Todas as dimensões estão em mm.

	1º Medição	2º Medição	3º Medição	Média	Desvio Padrão	Nominal	Diferença
1º Anel	37,95	37,92	38,1	37,99	0,10	37,5	0,49
2º Anel	31,84	31,98	32,04	31,95	0,10	31,5	0,45
3º Anel	25,21	25,71	25,53	25,48	0,25	25	0,48
4º Anel	23,65	23,75	24,48	23,96	0,45	22,4	1,56
5º Anel	19,76	19,25	19,22	19,41	0,30	19	0,41
6º Anel	15,61	16,16	15,91	15,89	0,28	16	-0,11
7º Anel	12,47	13,04	12,74	12,75	0,29	12,5	0,25

#### 4.7. Adequação do Anel de Contraventamento

Tendo os resultados apresentados nos itens 4.2.5 e 4.5, o anel de contraventamento necessita ser alterado para garantir uma maior rigidez da borda do Tanque de Concentrado. De acordo com as especificações normativas, o anel deve apresentar um módulo de seção maior que  $137,72 \text{ cm}^3$  e o primeiro módulo de vibração deve possuir uma frequência natural acima de  $1 \text{ Hz}$ .

A norma API 650, 2011 propõe a utilização de duas cantoneiras soldadas formando um perfil U no entorno do tanque próximo a sua extremidade. A condição da utilização de duas cantoneiras em relação à utilização de um perfil U está relacionada às questões de fabricação. A cantoneira apresenta maior facilidade de calandragem em relação ao perfil U, que necessita em muitos dos casos realizar esta operação a quente. O anel de contraventamento especificado em projeto e montado no tanque foi mantido. Desta maneira, o novo anel de contraventamento será adicionado abaixo do anel existente. Com tal característica, foi especificado um perfil que atendesse todas as exigências normativas, conforme apresentado na FIG 4.19.

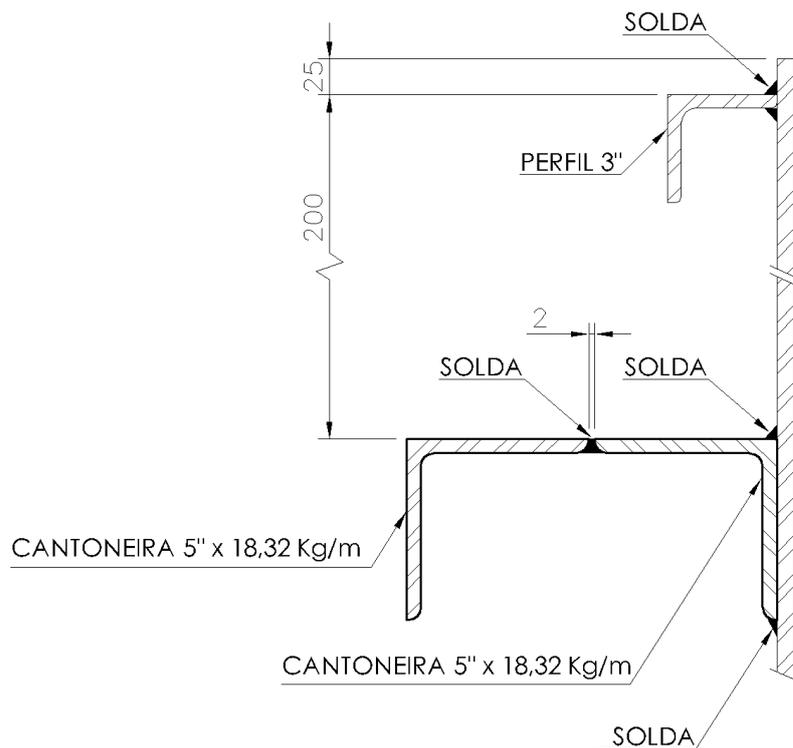


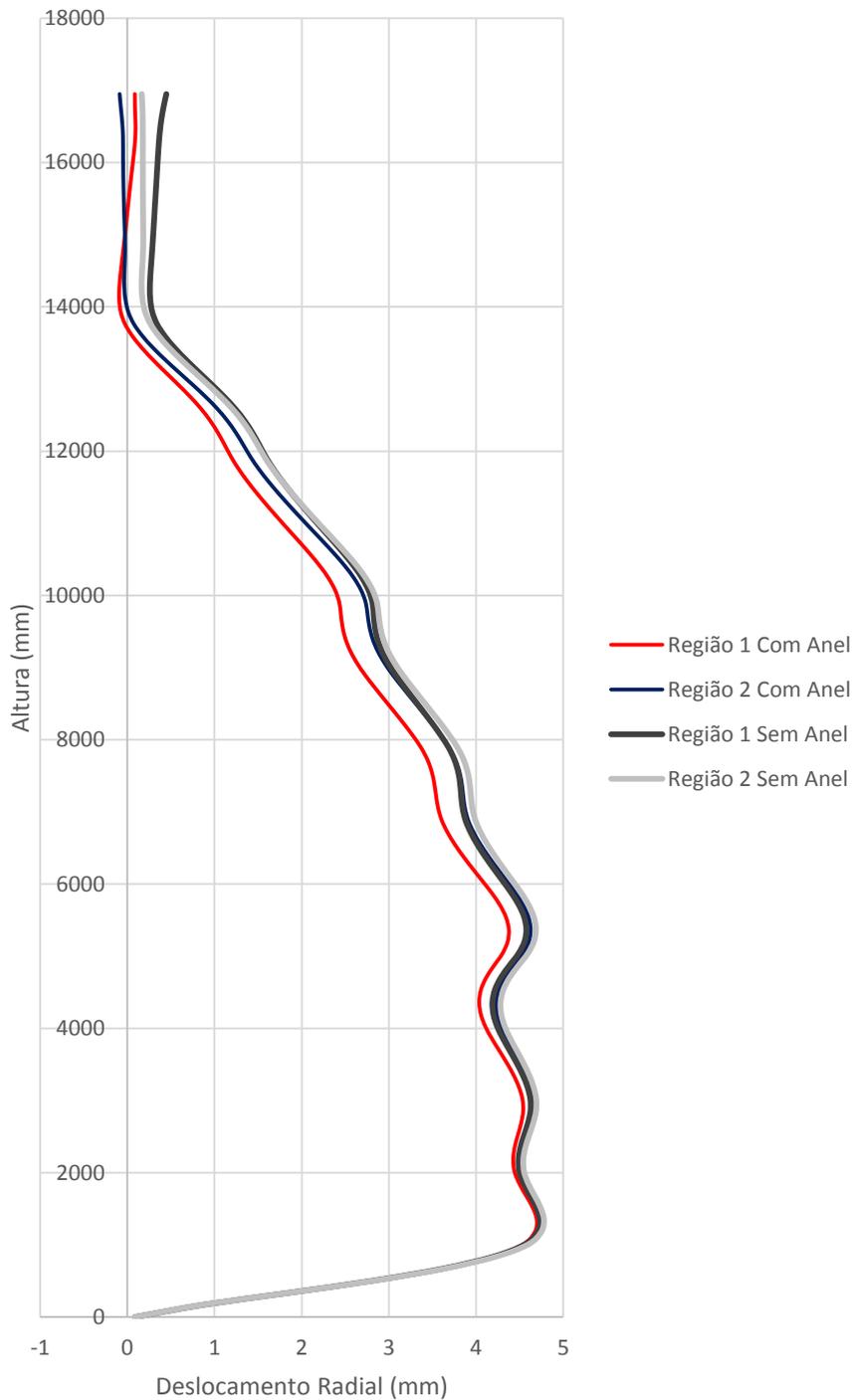
FIGURA 4.19. Proposta de adição de um segundo anel de contraventamento. Dimensões em mm.

O anel de contraventamento foi adicionado ao modelo de elementos finitos seguindo as mesmas condições de contorno adotadas nos modelos anteriores e os resultados das simulações são apresentados na sequência.

Não foram encontradas diferenças significativas na distribuição do índice de utilização em nenhuma das condições de enchimento estudadas.

O GRA 4.6 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para o deslocamento radial do tanque com e sem a adição do segundo anel de reforço. O aumento da rigidez na região da borda do tanque com a adição de um segundo anel de contraventamento resultou em uma redução nos deslocamentos ao longo da altura do tanque, como pode ser melhor observado na curva retirada na região 1. Em ambas as regiões acima da altura de 13900 mm são possíveis perceber deslocamentos negativos ou próximos de zero, indicando uma alta rigidez próxima a borda do tanque.

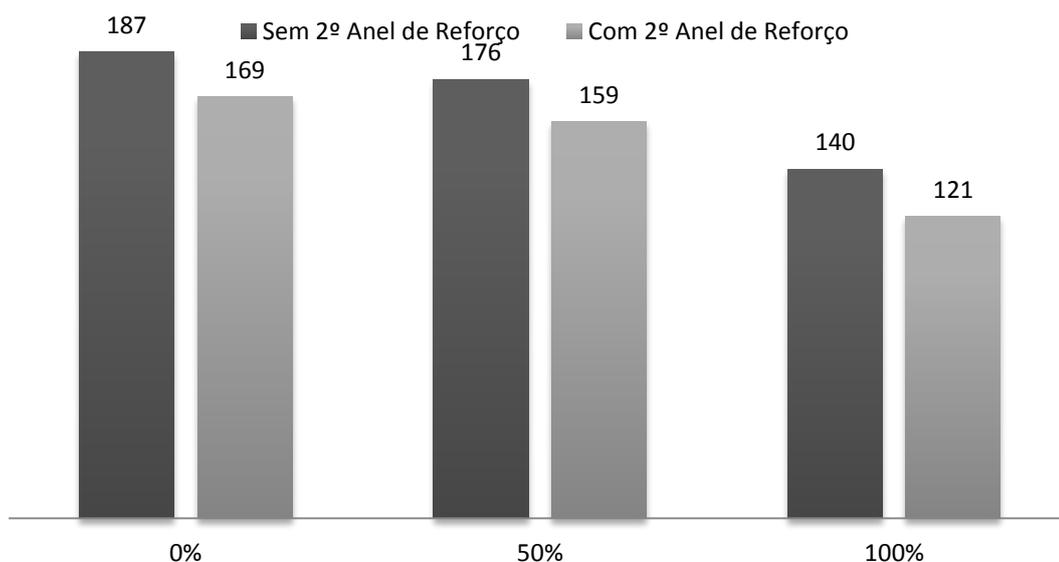
GRÁFICO 4.6. Comparação entre os deslocamentos radiais na condição de enchimento máxima nas regiões 1 e 2 para o tanque com a adição e sem a adição do anel de reforço.



O GRA 4.7 apresenta, um comparativo entre as diferentes quantidades de modos de vibração encontrados entre as faixas de frequência de 0 a 30 Hz para as seguintes condições: enchimento com 0%, 50% e 100% e considerando ou não a existência do segundo anel de reforço. Com a adição do segundo anel de reforço houve uma redução do número de modos de vibração para

todas as três condições de enchimento estudadas, esta redução foi em média de 11% para cada condição. Analisando cada condição, verificou-se uma redução de 18, 17 e 19 modos, para os níveis de enchimento mínimo, intermediário e máximo, respectivamente. A maior rigidez da borda do tanque foi a responsável pela redução do número total de modos de vibração.

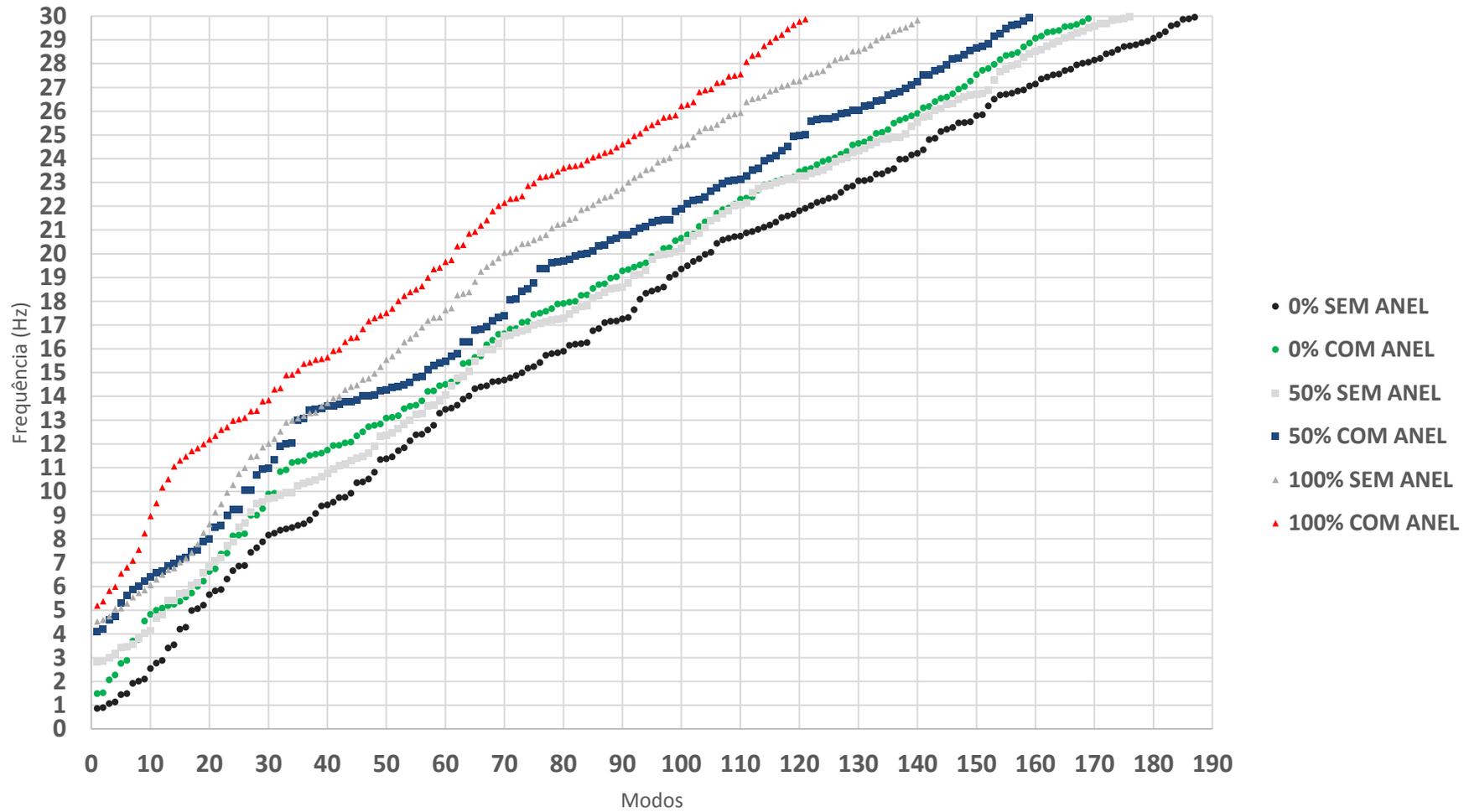
GRÁFICO 4.7. Comparação entre o total de modos de vibração compreendidos entre o intervalo de 0 a 30 Hz para cada condição de enchimento com e sem a adição do segundo anel de reforço.



Como apresentado no GRA 4.8, o aumento da primeira frequência natural de 0,86 Hz para 1,49 Hz na condição de tanque em nível mínimo faz com que o tanque atenda ao critério da norma ABNT 6123, 1988 e API 650, 2011 relacionada à carga de vento. Como podem ser observadas no gráfico, para todas as três condições analisadas, ocorreu aumento das frequências naturais, em virtude do aumento da rigidez do tanque em sua borda, pela a adição do segundo anel de contraventamento.

Uma maior rigidez da borda do tanque, apresenta menores chances de acoplamentos de frequências de excitações com as frequências naturais, devido a redução do total de modos de vibração encontrados. Para melhor visualização e compreensão dos resultados, o ANEXO B apresenta o resultado para os dez primeiros modos de vibração para as três condições de enchimento estudadas. A partir destes resultados, comprova-se que a proposta de alteração, pode trazer uma maior segurança operacional ao Tanque de Concentrado.

GRÁFICO 4.8. Comparação entre as frequências naturais e modos de vibração para três condições de enchimento com e sem a adição do segundo anel de reforço.



#### 4.8. Verificação da Influência da Redução de Espessura dos Anéis do Costado

Conforme mencionado nos trabalhos de MEDVEDEVA e TIAM, 1998, MANSHADI E MAHERI, 2012, GUTMA et al, 2000 e BERGMAN et al, 2006, uma das principais causas de falhas em tanques é dada pela redução da espessura dos anéis do costado. Os mecanismos responsáveis pela perda de massa são a corrosão associadas à abrasão provocada pela polpa de minério de ferro. Vale lembrar que na especificação do projeto do tanque, este foi concebido para trabalhar com uma sobre espessura de corrosão de 4 *mm*.

Avaliando um cenário hipotético com perda constante de espessura de 1 *mm* por ano, pode-se verificar através do método dos elementos finitos, os efeitos da perda da integridade estrutural ao longo dos anos. Para este estudo será avaliado um cenário de 10 anos de operação. A TAB 4.10 apresenta os valores nominais, reduzidos e os percentuais de redução dos anéis do costado. Como os últimos anéis, sexto e sétimo, não possuem contato direto com a polpa de minério assumiu-se um desgaste de 0,4 *mm* por ano com base no trabalho de MEDVEDEVA e TIAM, 1998.

TABELA 4.10. Valores de espessuras nominais, reduzidas e porcentagem de redução para o estudo da influência da perda de espessura no comportamento do tanque. Dimensões em *mm*.

	Nominal	Reduzida	% de Redução
1º Anel	37,5	27,5	27%
2º Anel	31,5	21,5	32%
3º Anel	25	15	40%
4º Anel	22,4	12,4	45%
5º Anel	19	9	53%
6º Anel	16	12	25%
7º Anel	12,5	8,5	32%

Os valores de espessura reduzida foram inseridos no modelo de elementos finitos para verificar o comportamento da estrutura com esta nova condição. O modelo com o anel de reforço secundário foi o utilizado para esta verificação, por se tratar de uma adequação as normas de projeto. Será avaliado a seguir o índice de utilização, deslocamentos, modos de vibração e frequências naturais.

A FIG 4.20 apresenta o índice de utilização da superfície externa para a condição do tanque em nível máximo com 5010 *m*<sup>3</sup>, com anel de reforço secundário e a redução de espessura. Na

sequência as FIG 4.21 e FIG 4.22 mostram em detalhes o índice de utilização na região da porta de limpeza, superfície externa e interna do tanque, respectivamente.

**AA: Tanque anel de reforço superior\_Espessura**

Stress Ratio

Type: Stress Ratio

Time: 1

25/08/2015 11:03

ANSYS  
R15.0

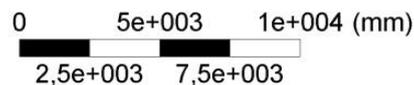
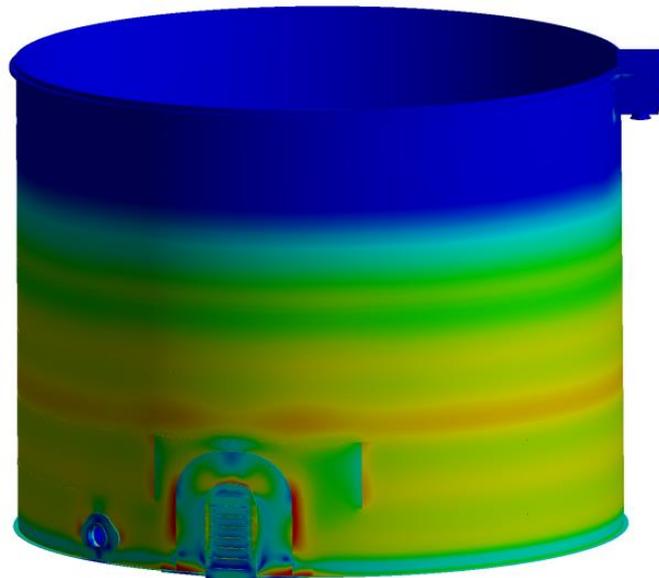
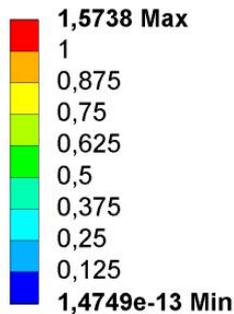


FIGURA 4.20. Índice de utilização para a superfície externa do Tanque de Concentrado com anel de reforço secundário e redução de espessura.

A região da porta de limpeza continua sendo a que apresenta os maiores índices de utilização, mas pode ser observada a redução do índice global máximo de 1,6291 para 1,5738. A explicação para esta redução de 3,5 % está relacionada à menor rigidez na região da porta de limpeza que contribui para uma melhor distribuição das tensões.

As FIG. 4.21 e 4.22 apresentam um aumento da concentração dos índices de utilização superiores a um, na região da porta de limpeza entre a solda do fundo e do primeiro anel do costado, em ambos os lados, interno e externo. Estes resultados demonstram a importância de se planejar inspeções periódicas em todas as soldas e zonas termicamente afetadas constituintes da porta de limpeza.

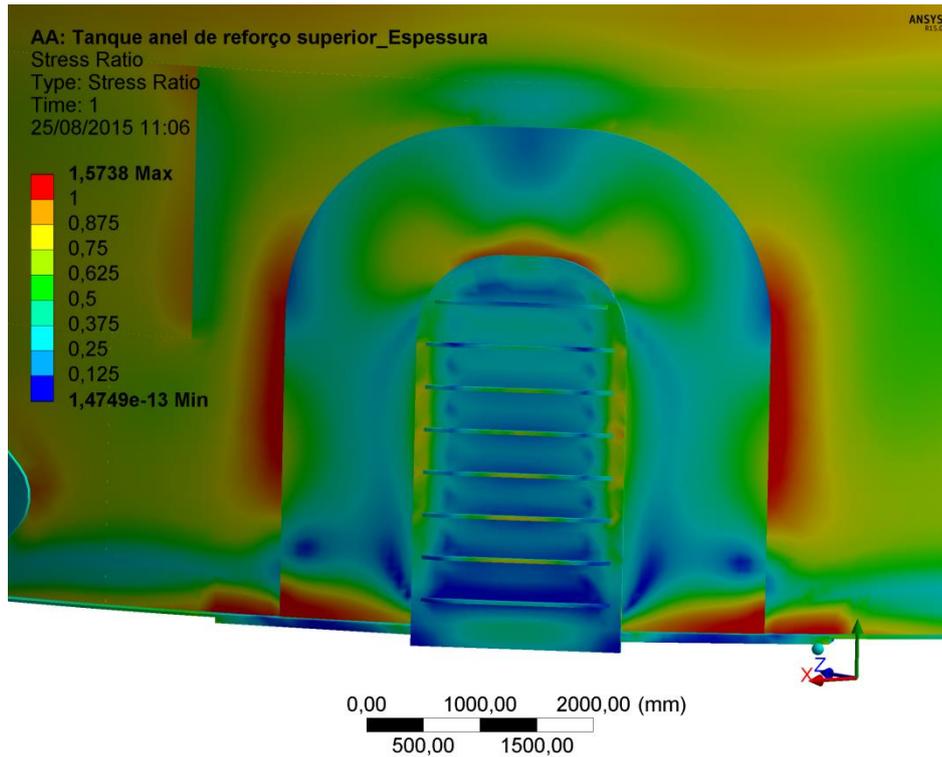


FIGURA 4.21. Índice de utilização para a superfície externa no detalhe da porta de limpeza do tanque com anel de reforço secundário e redução de espessura.

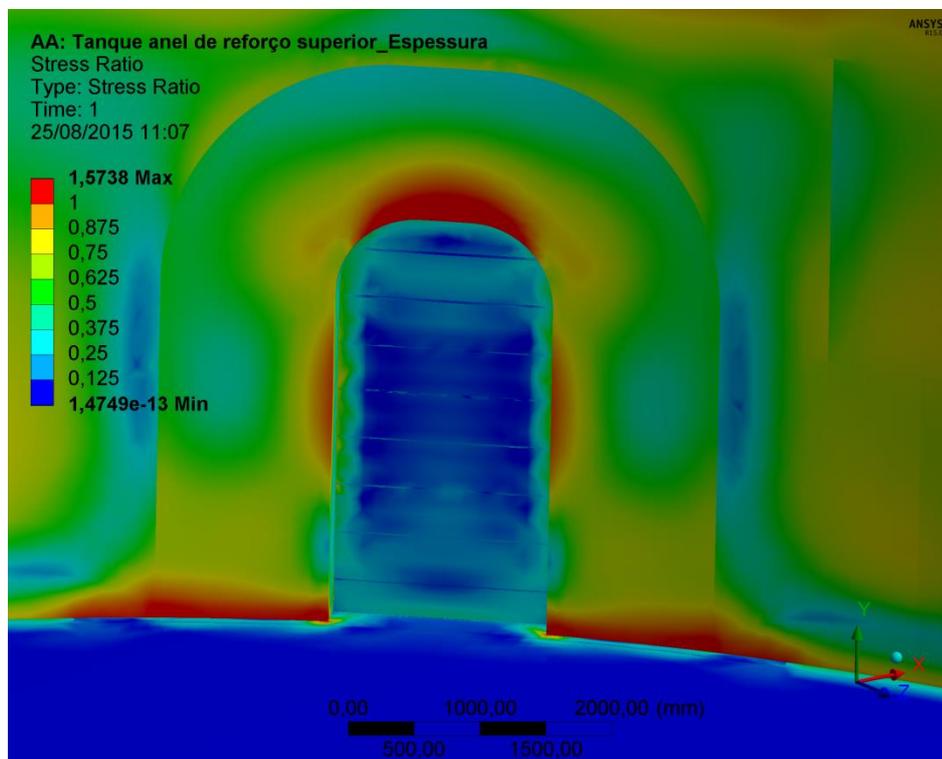


FIGURA 4.22. Índice de utilização para a superfície interna no detalhe da porta de limpeza do tanque com anel de reforço secundário e redução de espessura.

A FIG 4.23 apresenta a região interna e externa da porta de limpeza onde ocorrem as deformações plásticas localizadas. Nota-se na região interna um aumento das regiões com deformações plásticas agora sendo propagadas para as quinas inferiores da porta de limpeza conforme mostrado pelos círculos vermelhos na FIG. 4.23a. O reforço da porta de limpeza nesta condição começa a apresentar deformações plásticas nas regiões da extremidade do reforço entre a solda da soleira e primeiro anel do costado como mostrado pelos círculos marrons na FIG. 4.23b.

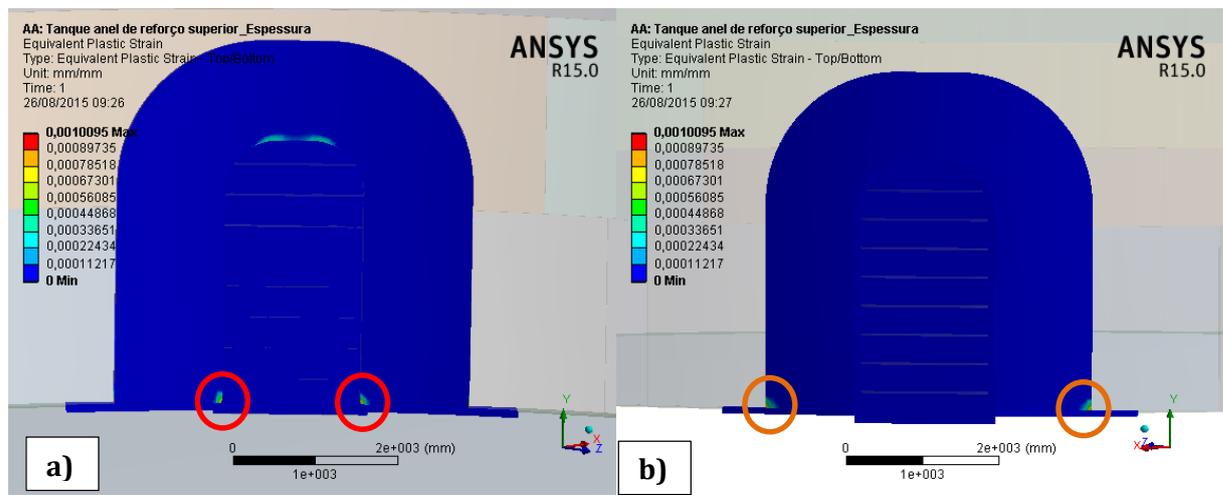


FIGURA 4.23. Detalhe da região da porta de limpeza com deformação plástica na porta de limpeza do tanque com anel de reforço secundário e redução de espessura. a) Lado Interno b) Lado externo.

A FIG 4.24 apresenta os deslocamentos totais do tanque com o anel de reforço secundário e espessura reduzida. Pode ser observado que a estrutura se desloca mais com a perda de rigidez. As regiões distantes da porta de limpeza apresentam um aumento significativo de seus deslocamentos realçando o perfil de deslocamento.

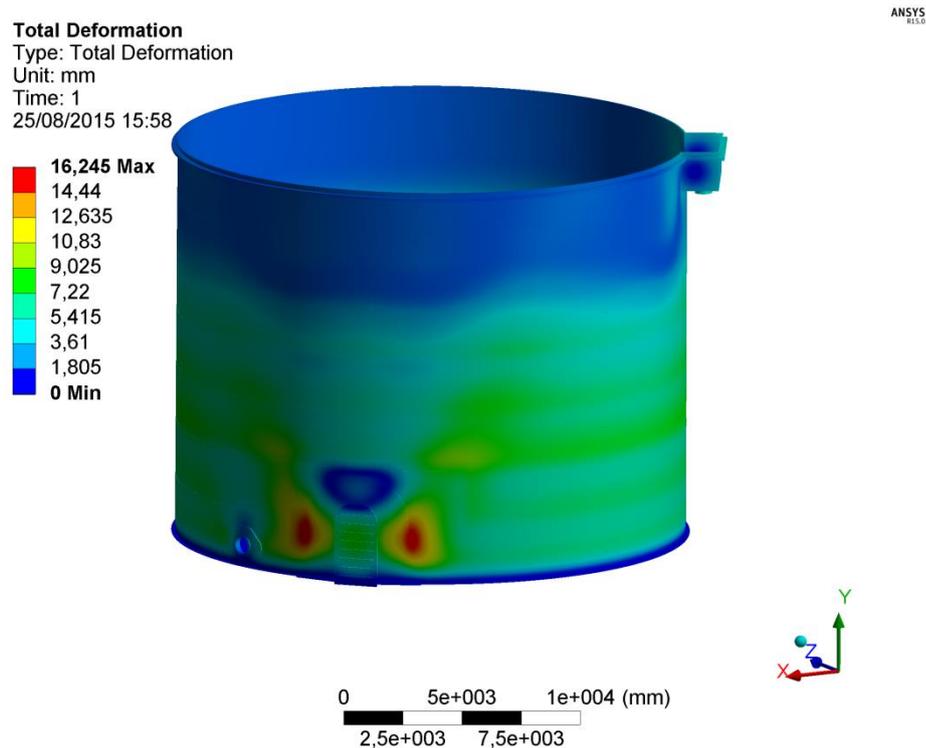
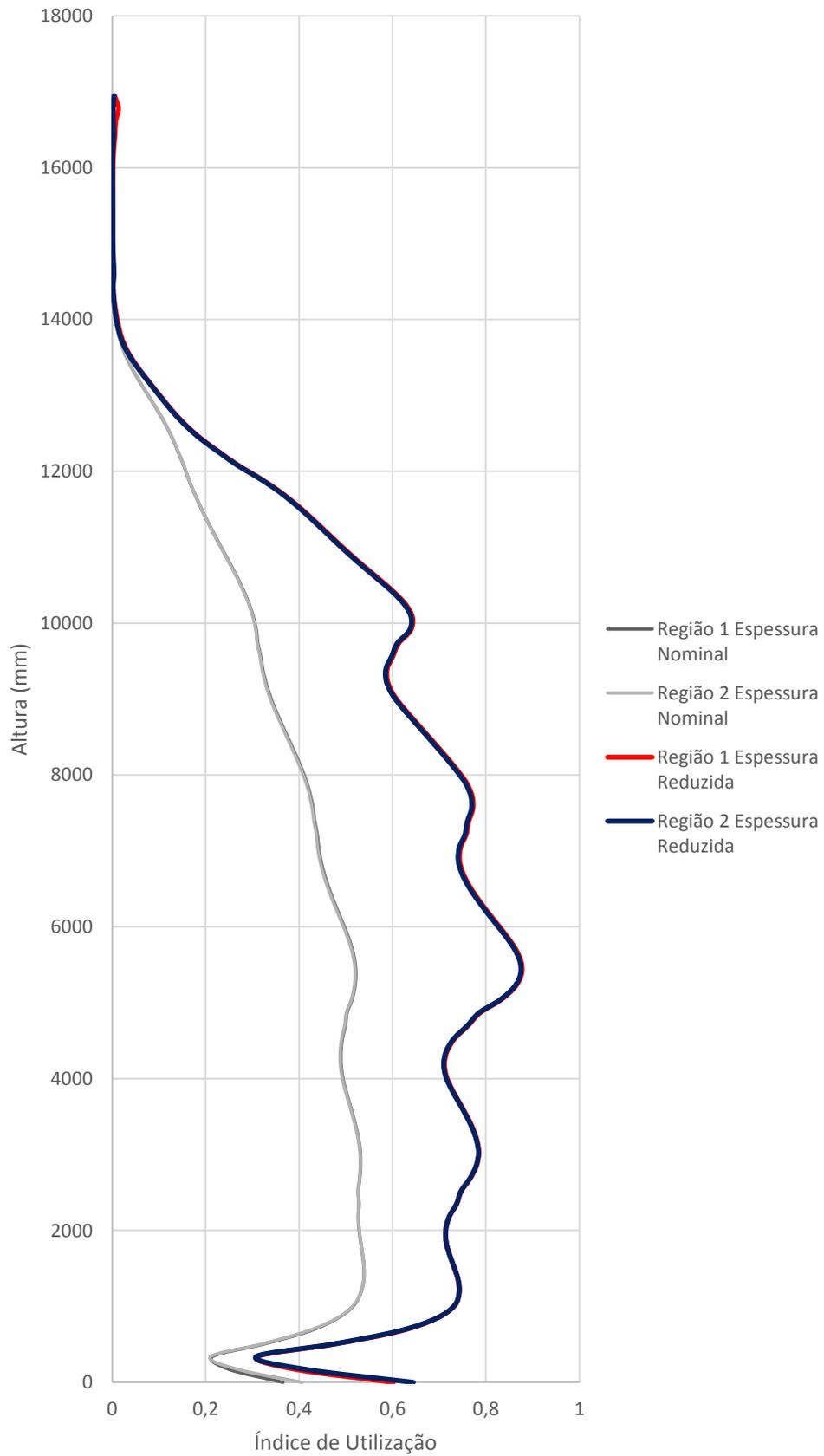


FIGURA 4.24. Deslocamento total do Tanque de Concentrado com anel de reforço secundário e redução de espessura.

O GRA 4.9 apresenta uma comparação do índice de utilização para a região externa do costado do tanque com espessura nominal e reduzida na condição de enchimento máximo de 5010 m<sup>3</sup> com anel secundário. O maior nível do índice de utilização está localizado na altura de 5450 mm no terceiro anel do costado com um valor máximo de 0,87. Os maiores níveis de utilização no primeiro, segundo e quarto anéis são respectivamente, 0,74, 0,78 e 0,77.

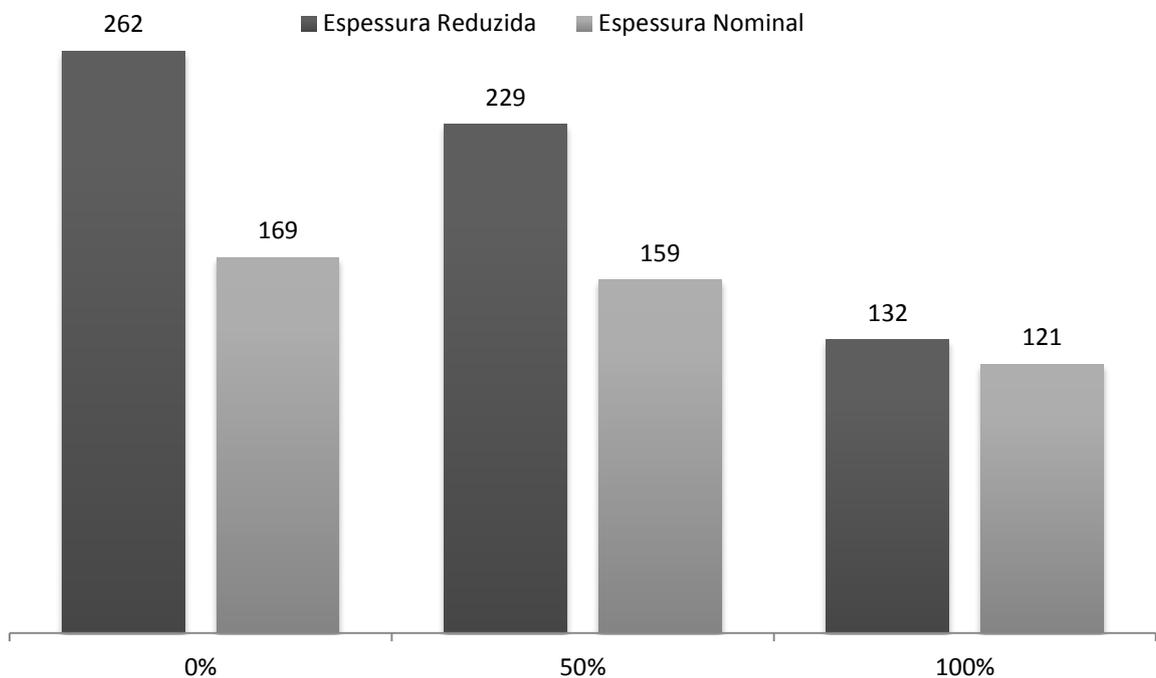
Avaliando, como exemplo, de tomada de decisão uma possível intervenção para reduzir o desgaste no terceiro anel do costado, e com isso, obter um aumento da vida do equipamento com uma melhor distribuição de tensão no tanque. Uma proposta seria a utilização de revestimento anticorrosivo e abrasivo apenas na região do terceiro anel para reduzir a taxa de desgaste neste local. Reduzindo a taxa de perda de espessura nesta região, pode-se melhorar a forma de desgaste do tanque reduzindo os custos com reparo devido a redução da área de intervenção. O monitoramento e realimentação dos modelos de elementos finitos podem fornecer informações importantes na tomada de decisões de investimentos e avaliação dos riscos envolvidos, fazendo desta forma uma gestão de ativos eficiente baseada em dados e fatos.

GRÁFICO 4.9. Comparação do índice de utilização de duas regiões distintas do Tanque de Concentrado com espessura nominal e reduzida para a condição de tanque em nível máximo com anel secundário.



O GRA 4.10 apresenta os resultados do total de análises modais para as três condições de enchimento do Tanque de Concentrado com espessura reduzida e nominal, ambas com o segundo anel de reforço. Estas análises foram realizadas no intervalo de 0 Hz a 30 Hz. Conforme observado no gráfico às condições com 0% e 50% apresentam alta variação do número de modos de vibração. A variação em porcentagem para as duas condições de espessuras para 0% e 50% de enchimento foram de 55% e 44%, respectivamente.

GRÁFICO 4.10. Comparação entre o total de modos de vibração compreendidos entre o intervalo de 0 a 30 Hz para cada nível de enchimento na condição de espessura reduzida e nominal ambas com o segundo anel de reforço.



A primeira frequência natural variou de 1,49 para 2,6 Hz na condição do tanque em nível mínimo. Essa variação da frequência natural é esperada uma vez que os processos de abrasão e corrosão em andamento no interior do tanque acarretam na redução de sua massa global. É conhecido que a frequência natural é inversamente proporcional à massa e a conservação da rigidez proporcionada pelo anel de reforço contribuem para a variação das frequências naturais.

## 5. CONCLUSÕES

Os ensaios de material demonstraram que a amostra de aço ASTM A36 apresentaram na análise química uma concentração 46% menor de carbono do que o limite superior especificado em norma. Esta condição garantiu ao aço propriedades mecânicas próximas ao limite mínimo estabelecido em norma. Esses resultados demonstraram a importância de se trabalhar com os limites inferiores estabelecidos em normas na realização das verificações estruturais.

As verificações do dimensionamento das espessuras dos anéis do costado e fundo demonstraram que o projeto está dentro das especificações recomendadas pelo método “*One Foot*” da norma API 650, 2011. Foi observado que todos os anéis possuem uma sobre espessura devido à espessura comercial especificada ser maior que o mínimo calculado. Isto garante uma maior vida ao tanque se os mecanismos de desgaste forem a abrasão e corrosão.

Os reforços dos bocais e bocal de visita foram verificados de acordo com a norma API 650, 2011. Não foram encontrados desvios e seus dimensionamentos estão dentro dos limites mínimos de projeto.

A porta de limpeza apresentou desvios de projeto por não seguir as recomendações das dimensões de altura e largura máximas recomendadas e não estar limitada no primeiro anel do costado. A norma recomenda que as dimensões máximas sejam de 1200 mm e a especificada foi de 3200 x 1600 mm. Foi verificado o dimensionamento do reforço da porta de limpeza, que se encontra acima do mínimo recomendado pela API 650, 2011. A influência destes desvios não pode ser avaliada através de cálculos analíticos e será apresentada a seguir, nas conclusões referentes ao modelamento por elementos finitos.

O dimensionamento do anel de contraventamento foi verificado seguindo as recomendações da norma API 650, 2011. Verificou-se que o anel especificado é 10,12 vezes menor que o mínimo recomendado. O anel de contraventamento tem função importante para a manutenção da rigidez estrutural do tanque submetido a cargas de vento. Foi proposta a adequação desta condição inserindo um anel secundário logo abaixo do anel existente.

O modelo de elementos finitos buscou ser o mais representativo contemplando todos os detalhes dimensionais dos bocais, bocal de visita, reforços, anéis de contraventamento e a porta de limpeza.

Os resultados apresentados para a análise de tensões do tanque com nível máximo, mostrou elevados níveis de utilização na região da porta de limpeza. Muitas das regiões apresentaram níveis de utilização acima de um. Foi verificada a existência de regiões que ocorrem deformações plásticas. Estas regiões devem ser monitoradas anualmente para a identificação da existência de trincas. Estas verificações devem ser realizadas com o auxílio das técnicas de ensaios não destrutivas como o líquido penetrante. Nas regiões fora da porta de limpeza foram encontrados índices de utilização menores que um, comprovando a eficiência da utilização da norma API 650, 2011 fora da região da porta de limpeza deste projeto.

A análise modal identificou que o tanque, em nível mínimo, apresenta frequências naturais abaixo de um hertz. A norma ABNT 6123, 1988 recomenda para este tipo de estrutura que os valores da primeira frequência natural sejam maiores que um hertz. Estes resultados confirmaram que o anel dimensionado está abaixo do especificado estando o tanque suscetível ao efeito da ressonância provocada por cargas de vento. Foram verificados outros modos de vibração e frequências naturais para a capacidade de enchimento intermediária e máxima. Em todas estas verificações foram encontrados valores de frequências naturais acima de um hertz.

Com o ensaio de ultrassom realizado, foi possível verificar a montagem do tanque, confrontando as espessuras especificadas no projeto e as instaladas nos anéis do tanque. Não foram encontrados desvios de montagem para este tanque, todas as dimensões estão próximas às espessuras nominais. Através desta primeira medição de espessura, é possível criar a base zero para um posterior acompanhamento da perda de espessura ao longo dos anos de operação.

O MEF foi utilizado para estudar uma proposta de adequação do anel do costado. O anel proposto aumentou a rigidez da região da borda do tanque elevando a frequência natural do primeiro modo acima de um hertz para a condição de nível mínimo. Não houve variações significativas do índice de utilização para a condição de nível máximo. Houve uma redução do número total de modos de vibração encontrados na faixa de frequência de 0 a 30 Hz para ambas as condições estudadas, ocasionada pelo aumento da rigidez da borda do tanque. A solução foi considerada eficiente e aprovada para a instalação em campo.

A verificação da influência da redução da espessura mostrou que houve uma pequena redução dos níveis do índice de utilização global na região da porta de limpeza. Em consequência, houve um aumento das regiões com índice de utilização maiores que um, também na região da porta de limpeza. Fora da região da porta de limpeza houve um aumento dos valores do índice de utilização, mas ainda abaixo de um. O maior índice de utilização foi encontrado no terceiro anel do costado, que devido a sua espessura, é o que apresentou a menor sobre espessura entre a espessura especificada conforme calculado por norma e a comercial. O número de modos de vibração total aumentou com a redução da espessura. A primeira frequência natural, para o tanque na condição de enchimento mínima, aumentou com a redução da massa do tanque e a conservação da rigidez proporcionada pelos anéis de contraventamento.

O MEF mostrou-se uma forma rápida, precisa e intuitiva de apresentar os resultados do comportamento da estrutura do tanque identificando as possibilidades de forma rápida, precisa e segura. O MEF neste caso forneceu informações suficientes para a tomada de decisões avaliando os riscos através de cenários e hipóteses sendo uma ferramenta de vital importância para o gerenciamento de integridade estrutural.

As avaliações de Integridade Estrutural do projeto do tanque conforme norma, inspeção de campo, ensaios de materiais, ensaios de ultrassom e cálculo estrutural através do MEF estabeleceu a importância do acompanhamento e verificação durante todas as fases do ciclo de vida do ativo. Os desvios encontrados reduzem a segurança operacional do tanque ao longo de sua vida, caso não forem corrigidos e monitorados. As propostas de adequação são de fácil instalação e custo muito baixo, se comparadas com as consequências da falha da estrutura. Os desvios que necessitam ser monitorados, foram cadastrados no plano de manutenção e inspeção para serem realizados em janelas de oportunidade, para que não haja perdas de produção. Estas medidas foram replicadas para os outros 10 tanques constituintes do Mineroduto devido à similaridade dos projetos. A gestão de Integridade Estrutural apresentada neste trabalho teve como objetivo demonstrar os ganhos relacionados à segurança, minimização dos riscos operacionais, otimização, previsibilidade e redução de custos.

## **TRABALHOS FUTUROS**

Estudo experimental de análise de vibrações dos tanques de concentrado para verificar a influência das vibrações ocasionadas pelo vento quando vazio e a influência da vibração ocasionada pela agitação da polpa.

Reprodução através do acoplamento entre o MEF e da dinâmica de fluidos computacionais (CFD) das cargas de vento e de agitação da polpa atuantes nos tanques.

Estudo utilizando a técnica de ensaio de extensometria para calibrar as tensões encontradas pelo MEF.

Levantamento da curva de fadiga do material ASTM-A36 e posterior estudo de fadiga do tanque de concentrado através do MEF para se determinar a vida em fadiga do equipamento.

## ABSTRACT

This paper presents the methodology for evaluating the structural integrity of an iron ore concentrate tank at the Minas-Rio system. The structural integrity assessment methodology is based on ISO 55001, 2014 asset management standard. The operational and maintenance risks related to structural integrity of the concentrate tank during this life cycle were assessed based on ISO 55001, 2014 asset management standard. It is presented an application proposal of structural integrity management of significant structures based on the ISO 55001, 2014 standard throughout the life cycle of a concentrate tank. The tank design has been evaluated based on API 650, 2011 standard and by the finite element method (FEM). Based on API 650, 2011 standard, two gaps was found in the project. Those gaps are related to the dimensions of the cleanout fitting and to the wind girder. The use of the FEM made possible to evaluate the dynamic behavior through the natural frequencies and vibration modes. It has been found the need for a second wind girder due to two natural frequencies below 1 Hz. During the assessment of stresses and displacements it was possible to evaluate the influence of having cleanout fitting dimensions above the specification of API 650, 2011 standard. It was found a region of high stress concentration around the cleanout fitting overcoming the utilization rate and a small region with localized plastic strain. Through these analyzes it was identified the need for a secondary wind girder and for annual inspections of the cleanout fitting region in order to monitor cracks. The annular plates thicknesses were measured using ultrasound predictive technique in order to create a database. Based on the first measurement a periodic inspection plan was created for monitoring the wear caused by corrosion and abrasion of iron ore slurry, through ultrasound test. It was evaluated through the FEM the influence of thickness loss on the annular plates and the impact on the distribution of stresses, displacements, natural modes and frequencies. A significant increase in the number of vibration modes was identified on the minimum and intermediate tank levels of the analyzed filling conditions. There was a small reduction in the overall utilization rate, but an increase of regions with utilization rate greater than one.

**Key words:** Structural Integrity, Finite Element, Concentrate Tank, Asset Manager, API 650.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J. I. L. **Análise numérica da integridade estrutural de vasos de pressão com corrosão usando a norma API 579**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica UFPB, 2012.

ALVARENGA, R. C. S. S.; ANTUNES, H. M. C. C. **Otimização de treliças**. In: Congresso Ibero Latino-Americano Sobre Métodos Computacionais para Engenharia, Belo Horizonte, MG. Anais, pp 1699-1708, 1994.

ALVES, J. L. C. M. **Simulação numérica do processo de estampagem de chapas metálicas – Modelação mecânica e métodos numéricos**. Tese de Doutorado, Universidade do Minho, Guimarães, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A 6/A 6M**: Standard Specification for General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A 36/A 36M**: Standard Specification for Carbon Structural Steel, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 797**: Standard Practice For Measuring Thickness By Manual Ultrasonic Pulse-Echo Contact Method, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G76**: Conducting erosion test by solid particle impingement using gas jets, 2013.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME SEC. V** – Article 5 – Ultrasonic Examination Methods for Materials, Edition 2010.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 12A**: Specification For Oil Storage Tanks With Riveted Shells, 1941.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 12D:** Specification For Field Welded Tanks For Storage Of Production Liquid, 2008.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 12F:** Design And Construction Of Larger, Welded Low-Pressure Storage Tanks, 2008.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 620:** Design And Construction Of Larger, Welded Low-Pressure Storage Tanks, 2013.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 650:** Welded Tanks for Oil Storage, 2011.

ANGLO AMERICAN PLC. **AA GTS 19:** Norma de Integridade Estrutural, 2011.

ANDREUCCI, R. **Ensaio não destrutivo por ultrassom.** Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção, Ed. Maio, 2014

ANSI/AWS A5.1-91. **Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding.** Miami, Fla.: American Welding Society

ANSI/AWS A5.5-96. **Specification for Low-Alloy Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding.** Miami, Fla.: American Welding Society.

ANSYS Inc, **ANSYS Mechanical User's Guide**, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Forças devidas ao vento em edificações**, NBR 6123, ABNT, Rio de Janeiro, 66p, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Tanques Soldados Para Armazenamento de Petróleo e Derivados**, NBR 7821, ABNT, Rio de Janeiro, 118p, 1983.

ASSUMPCÃO, M. E. ; COSTA, C. M. ; CHRISTOFORO, A. L. ; BRITO, J. N. ; BRANDAO, L. C. . **Emprego de Metodologias Analítica e Numérica na Avaliação das Tensões em Tubos Axissimétricos com o Auxílio do Critério de Von-Mises.** I Jornada Brasileira do Grupo de Pesquisa Euro-Latino-Americano, 2010, Ponta Grossa-PR. Anais da

Primeira Jornada Brasileira de Pesquisa Euro-Latino-Americana Matemática do Mundo Real, 2010.

BARROS, S. M. , **Tanques de Armazenamento Teoria**. Petrobrás, Rio de Janeiro, 1998.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 2654: Manufacture Of Vertical Steel Welded Non-Refrigerated Storage Tanks With Butt-Welded Shells For The Petroleum Industry**, 1989.

BERGMAN R. M., LEVITSKY S. P., HADDAD J., GUTMAN E. M. **Stability loss of thin-walled cylindrical tubes, subjected to longitudinal compressive forces and external corrosion**. Thin-Walled Structures;44:726–9, 2006.

BRITO, J.; SEQUEIRA, J. **Proposta para uma classificação dos erros nas empreitadas de construção Civil**, Revista Engenharia & Vida, N<sup>a</sup> 19 Dezembro, 2005.

CARDOSO, B. R., COMELI, F.W., SANTANA, R. M., FURTADO, H. C. **Previsão de vida em tubos de caldeiras com base na medição da espessura da camada de óxido por ultrassom**. Revista Matéria, v. 16, n. 4, pp. 819 – 829, 2011.

CARNEIRO, R. F. C. S. **Inovação na revisão de projetos – algumas sugestões**. Dissertação de Mestrado. Mestrado Integrado em Engenharia Civil - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.

CHEUNG, A. B.; LINDQUIST, M.; CALIL, C. J. **Calibração de propriedades elásticas de uma placa ortótropa utilizando algoritmos genéticos**. In: Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural. Universidade de Passo Fundo. Mato Grosso do Sul. Vol.1, n<sup>o</sup> 2, pp74-92, 2004.

CHRISTOFORO, A. L, **“Influência das irregularidades da forma em peças de madeira na determinação do módulo de elasticidade longitudinal”**, Tese de Doutorado, EESC – USP, 2007.

COSTA, A. C. **Ensaio por ultrassom com as técnicas convencional A – Scan e *Phased Array* em juntas soldadas dissimilares de aço carbono e aço inoxidável austenítico**. Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – UFMG, 2011.]

FILHO, A. A. **Elementos Finitos – A Base da Tecnologia CAE/Análise Dinâmica**. 2ª Edição, São Paulo, 2013.

FILHO, A. A. **Elementos Finitos – A Base da Tecnologia CAE/Análise não Linear**. 1ª Edição, São Paulo, 2012.

GAHR, KARL-HEINZ ZUM. **Microstructure and wear of materials**. Tribology series, v10. Amsterdam: Elsevier, 1987. p.560

GEARY, W., HOBBS, M. R. **Catastrophic failure of a carbon steel storage tank due to internal corrosion**, Case Studies in Engineering Failure Analysis, V 1, p 257-264, 2013.

GENTIL, V. **Corrosão**, 3ª Edição. Rio de Janeiro, Editora LTC. 2001.

GUTMA E, HADDAD J, BERGMAN R. **Stability of thin-walled high-pressure vessels subjected to uniform corrosion**. Thin-Walled Structures;38: 43–52, 2000.

INSTITUTE OF ASSET MANAGEMENT. **BSI PAS 55 1:2008**. Part 1 - Specification for the optimized management of physical infrastructure assets, 2008.

INSTITUTE OF ASSET MANAGEMENT. **BSI PAS 55 1:2008**. Part 2 - Guidelines for the application of PAS 55-1, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **BS ISO 55000 Asset Management** – Overview, principles and terminology, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **BS ISO 55001 Asset Management** – Requirements, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **BS ISO 55002 Asset Management** – Guidelines on the application of ISO 55001, 2014.

LEITE, P. G. P, **Curso de Ensaios Não Destrutivos**. Associação Brasileira de Metais – ABM , 8ª Ed 1966.

LOBÃO, M. C. **Determinação de curvas limite de conformação por procedimentos experimentais e simulação numérica do processo de estampagem.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica UFSC, 2003.

LOPES, D., FARIAS, C., ALBUQUERQUE, M. C., OLIVEIRA, T., SOUZA, I. S. **Visão geral sobre a inspeção em cordões de solda através de técnicas não destrutivas ultrassônicas.** V Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, Maceió, 2010.

MAGALHÃES, V. J. D. A. **Análise linear e não-linear de reservatórios metálicos pelo método dos elementos finitos.** Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 1991.

MANSHADI, S. H. D., MAHERI, M. R. **The effects of long-term corrosion on the dynamic characteristics of ground based cylindrical liquid storage tanks,** Thin-Walled Structures, V 48, p 888-896, 2010.

MARTÍN O., LÓPEZ M., MARTÍN F. **Artificial neural networks for quality control by ultrasonic testing in resistance spot welding.** Journal of Materials Processing Technology. V 183, pp 226–233, 2007.

MEDVEDEVA M. L., Tiam T. D. **Classification of corrosion damage in steel storage tanks.** Chemical and Petroleum Engineering, V 34, pp 9–10, 1998.

OCHOA, D. M. L. **Estudo do desgaste erosivo-corrosivo de aços inoxidáveis de alto nitrogênio em meio lamacento.** Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007

REZENDE, E. J. O., CRUZ, MELO, J. C., **Ensaio não destrutivo por ultrassom.** XV Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e XI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação, Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2011.

RIGO, E. **Métodos de otimização aplicados à análise de estruturas.** Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 1999.

SANTIN, Jorge Luiz, **Ultra-som – técnica e aplicação** – editora Qualitymark – Ed. 1996, pp 52-60, 72, 96-101, 258.

SILVA, G. N, **Efeito da substituição do molibdênio pelo nióbio e nióbio-boro em aços Hadfield no desempenho ao desgaste abrasivo.** Dissertação de Mestrado – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 2004.

The Institute of Asset Management. **Asset Management – an anatomy.** 2014.

THORNTON, M., HAN, L., SHERGOLD, M. **Progress in NDT of resistance spot welding of aluminium using ultrasonic C-scan.** NDT&E International. V. 48, pp 30–38, 2012.

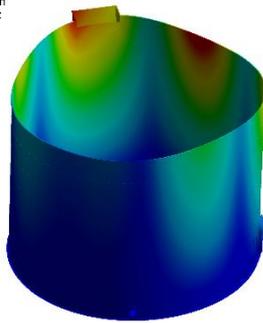
VARGAS-ARISTA, B., BALVANTIN, A., BALTAZAR, A., GARCÍA-VÁZQUEZ, F. **On the use of ultrasonic spectral analysis for the characterization of artificially degraded API 5L X52 steel pipeline welded joints.** Materials Science and Engineering. V 550, pp 227–234, 2012.

# ANEXO A

## A1. Modos de vibração do tanque para a condição de projeto do Tanque de Concentrado 1120-TQ-01

R: Modal  
Total Deformation 1  
Type: Total Deformation  
Frequency: 0,86109 Hz  
Unit: mm  
06/08/2015 14:50

0,25498 Max  
0,22665  
0,19832  
0,16998  
0,14165  
0,11332  
0,084992  
0,056601  
0,028331  
0 Min



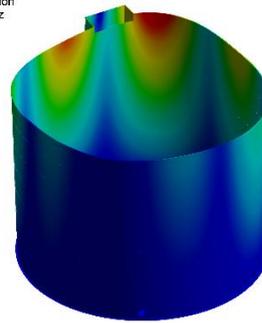
0 5e+003 1e+004 (mm)  
2,5e+003 7,5e+003

Modo 1 nível mínimo  $f = 0,86$  Hz.

ANSYS

R: Modal  
Total Deformation 2  
Type: Total Deformation  
Frequency: 0,8958 Hz  
Unit: mm  
06/08/2015 14:51

0,29246 Max  
0,25996  
0,22747  
0,19497  
0,16248  
0,12998  
0,097486  
0,06499  
0,032405  
0 Min



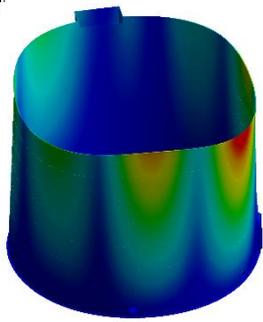
0 5e+003 1e+004 (mm)  
2,5e+003 7,5e+003

Modo 2 nível mínimo  $f = 0,89$  Hz.

ANSYS

R: Modal  
Total Deformation 3  
Type: Total Deformation  
Frequency: 1,0752 Hz  
Unit: mm  
06/08/2015 14:53

0,28285 Max  
0,26031  
0,22778  
0,19524  
0,1627  
0,13016  
0,097618  
0,065079  
0,032539  
0 Min



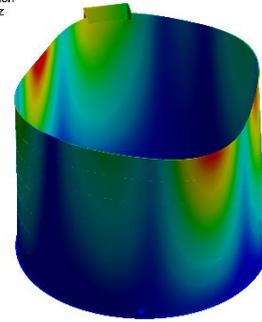
0 5e+003 1e+004 (mm)  
2,5e+003 7,5e+003

Modo 3 nível mínimo  $f = 1,07$  Hz.

ANSYS

R: Modal  
Total Deformation 4  
Type: Total Deformation  
Frequency: 1,1346 Hz  
Unit: mm  
06/08/2015 14:54

0,24435 Max  
0,2172  
0,19005  
0,1629  
0,13575  
0,1086  
0,08145  
0,0543  
0,02715  
0 Min



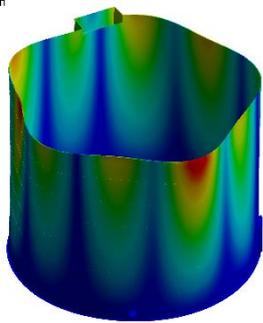
0 5e+003 1e+004 (mm)  
2,5e+003 7,5e+003

Modo 4 nível mínimo  $f = 1,13$  Hz.

ANSYS

R: Modal  
Total Deformation 5  
Type: Total Deformation  
Frequency: 1,447 Hz  
Unit: mm  
06/08/2015 14:54

0,24218 Max  
0,21527  
0,18836  
0,16145  
0,13454  
0,10763  
0,080725  
0,053817  
0,026908  
0 Min



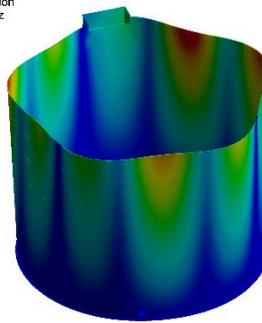
0 5e+003 1e+004 (mm)  
2,5e+003 7,5e+003

Modo 5 nível mínimo  $f = 1,44$  Hz.

ANSYS

R: Modal  
Total Deformation 6  
Type: Total Deformation  
Frequency: 1,4882 Hz  
Unit: mm  
06/08/2015 14:56

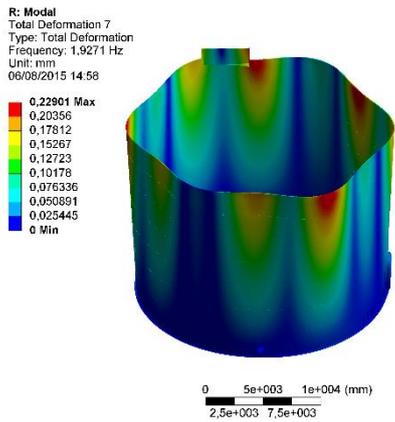
0,25473 Max  
0,22643  
0,19813  
0,16982  
0,14152  
0,11322  
0,084912  
0,056608  
0,028304  
0 Min



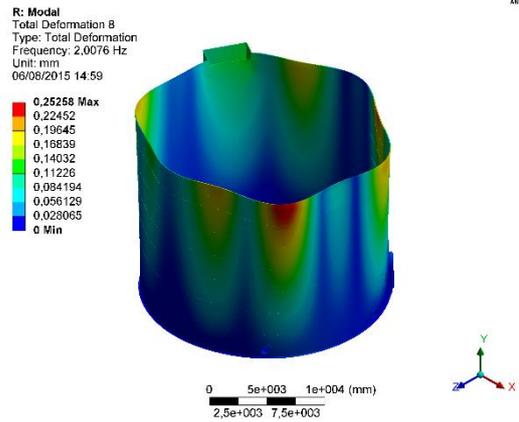
0 5e+003 1e+004 (mm)  
2,5e+003 7,5e+003

Modo 6 nível mínimo  $f = 1,48$  Hz.

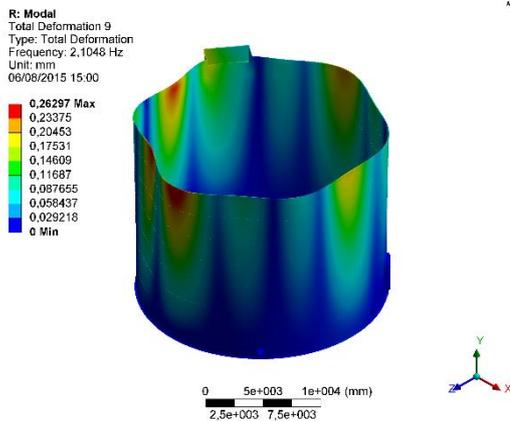
ANSYS



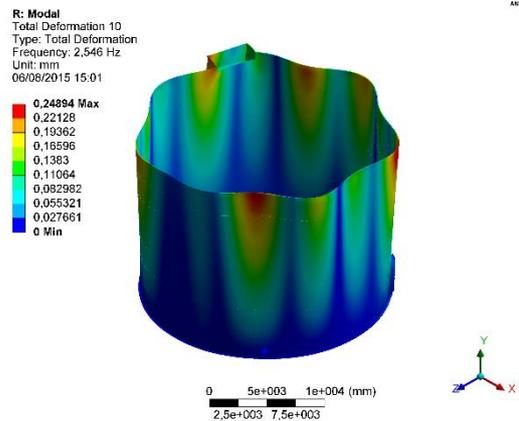
Modo 7 nível mínimo  $f = 1,92$  Hz.



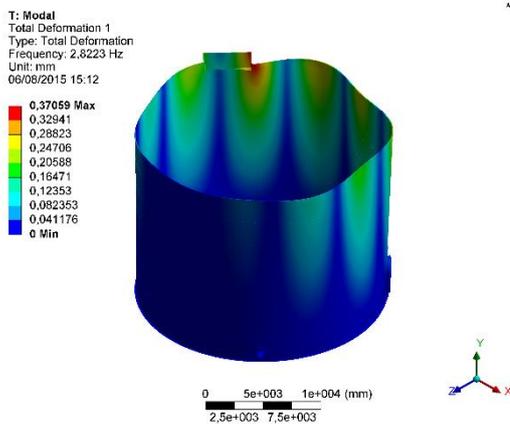
Modo 8 nível mínimo  $f = 2,00$  Hz.



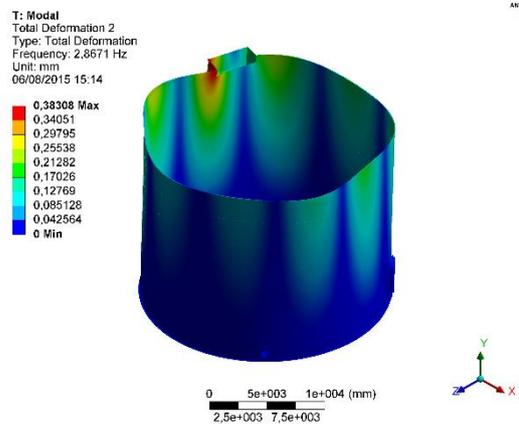
Modo 9 nível mínimo  $f = 2,10$  Hz.



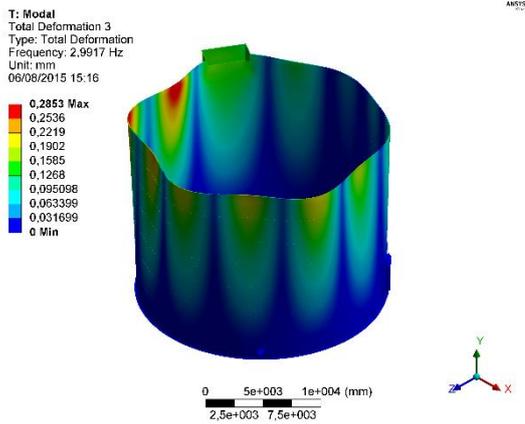
Modo 10 nível mínimo  $f = 2,54$  Hz.



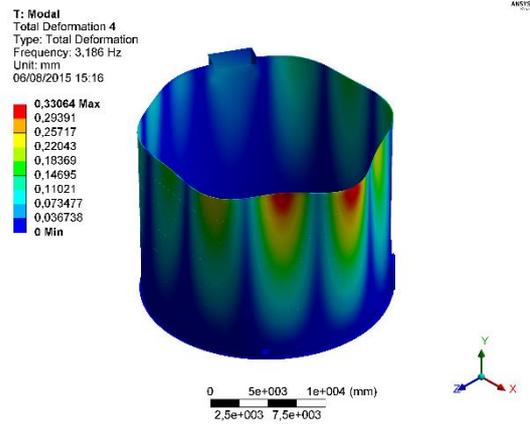
Modo 1 nível Intermediário  $f = 2,82$  Hz.



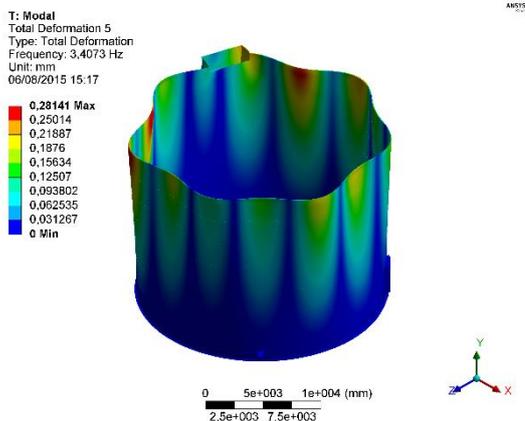
Modo 2 nível Intermediário  $f = 2,86$  Hz.



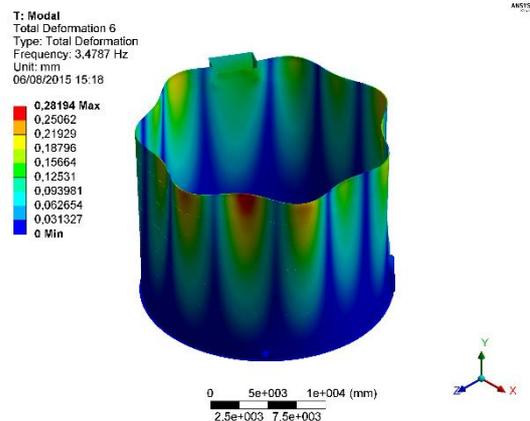
Modo 3 nível Intermediário  $f= 2,99$  Hz.



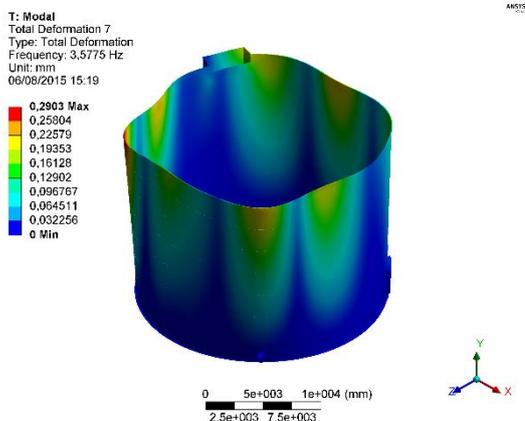
Modo 4 nível Intermediário  $f= 3,18$  Hz.



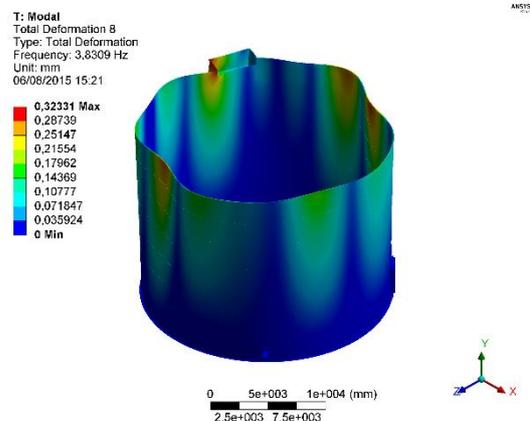
Modo 5 nível Intermediário  $f= 3,40$  Hz.



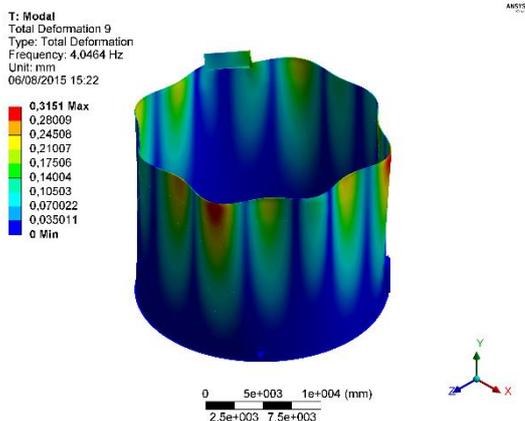
Modo 6 nível Intermediário  $f= 3,47$  Hz.



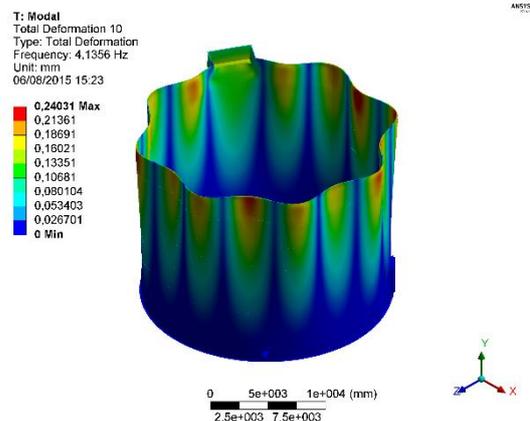
Modo 7 nível Intermediário  $f= 3,57$  Hz.



Modo 8 nível Intermediário  $f= 3,83$  Hz.

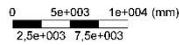
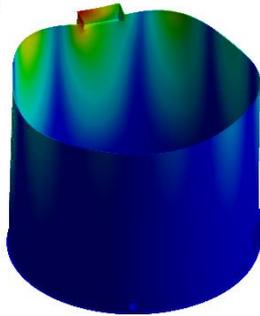
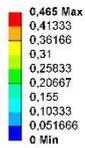


Modo 9 nível Intermediário  $f= 4,04$  Hz.



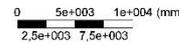
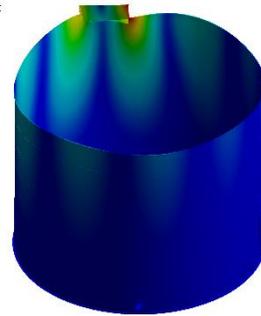
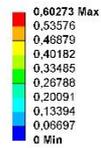
Modo 10 nível Intermediário  $f= 4,13$  Hz.

P: Modal  
 Total Deformation 1  
 Type: Total Deformation  
 Frequency: 4.6107 Hz  
 Unit: mm  
 06/08/2015 15:41



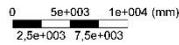
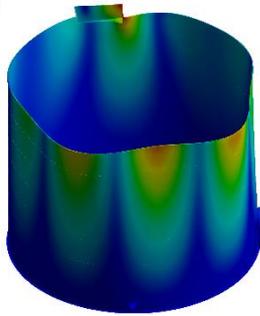
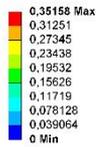
Modo 1 nivel máximo  $f=4,61$  Hz.

P: Modal  
 Total Deformation 2  
 Type: Total Deformation  
 Frequency: 4.6222 Hz  
 Unit: mm  
 06/08/2015 15:43



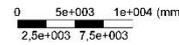
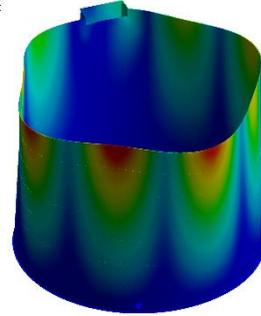
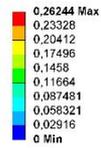
Modo 2 nivel máximo  $f=4,62$  Hz.

P: Modal  
 Total Deformation 3  
 Type: Total Deformation  
 Frequency: 4.8028 Hz  
 Unit: mm  
 06/08/2015 15:43



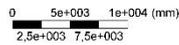
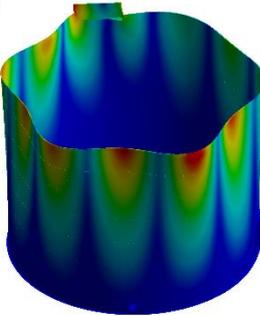
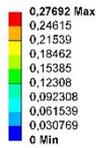
Modo 3 nivel máximo  $f=4,80$  Hz.

P: Modal  
 Total Deformation 4  
 Type: Total Deformation  
 Frequency: 4.9785 Hz  
 Unit: mm  
 06/08/2015 15:44



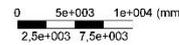
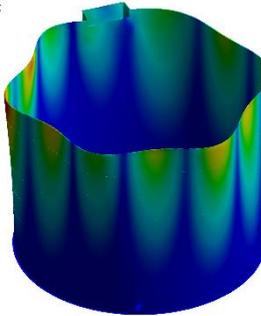
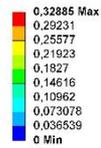
Modo 4 nivel máximo  $f=4,97$  Hz.

P: Modal  
 Total Deformation 5  
 Type: Total Deformation  
 Frequency: 5.0779 Hz  
 Unit: mm  
 06/08/2015 15:44



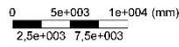
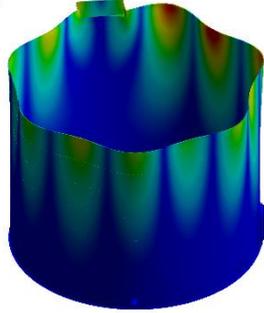
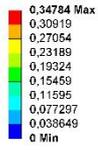
Modo 5 nivel máximo  $f=5,07$  Hz.

P: Modal  
 Total Deformation 6  
 Type: Total Deformation  
 Frequency: 5.3551 Hz  
 Unit: mm  
 06/08/2015 15:45



Modo 6 nivel máximo  $f=5,35$  Hz.

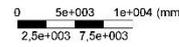
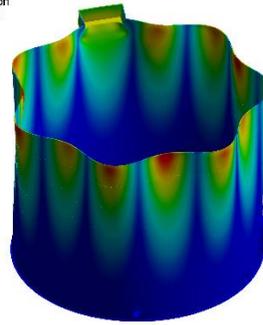
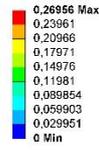
P: Modal  
Total Deformation 7  
Type: Total Deformation  
Frequency: 5.5945 Hz  
Unit: mm  
06/08/2015 15:45



Modo 7 nivel máximo  $f= 5,59$  Hz.

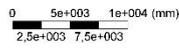
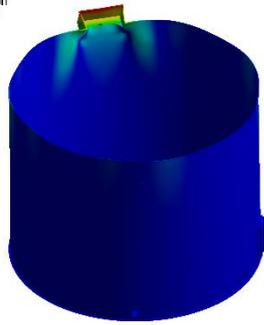
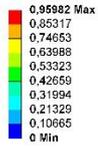
ANSYS

P: Modal  
Total Deformation 8  
Type: Total Deformation  
Frequency: 5.7345 Hz  
Unit: mm  
06/08/2015 15:45



Modo 8 nivel máximo  $f= 5,73$  Hz.

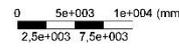
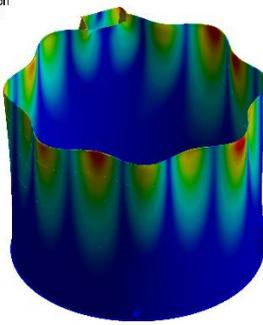
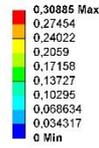
P: Modal  
Total Deformation 9  
Type: Total Deformation  
Frequency: 5.8355 Hz  
Unit: mm  
06/08/2015 15:46



Modo 9 nivel máximo  $f= 5,83$  Hz.

ANSYS

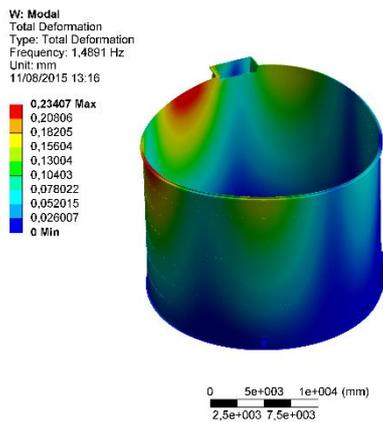
P: Modal  
Total Deformation 10  
Type: Total Deformation  
Frequency: 6.0506 Hz  
Unit: mm  
06/08/2015 15:47



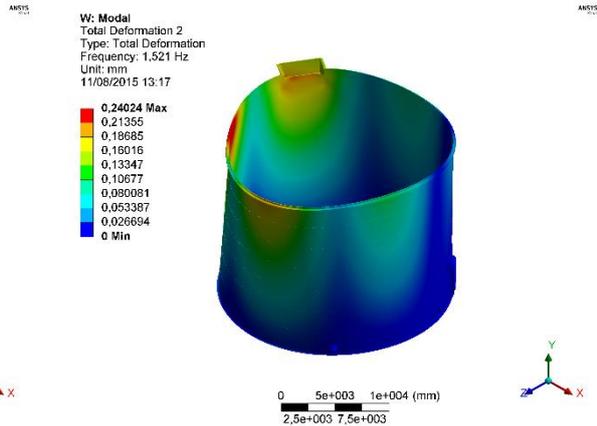
Modo 10 nivel máximo  $f= 6,05$  Hz.

# ANEXO B

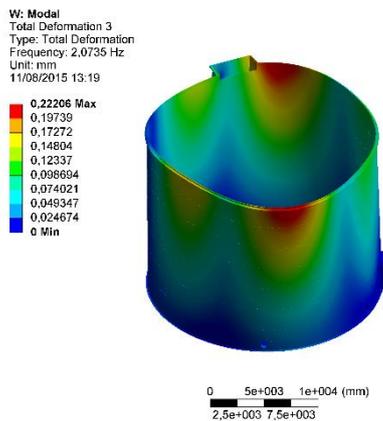
## B1. Modos de vibração do tanque para a condição do Tanque de Concentrado com adição do segundo anel de contraventamento.



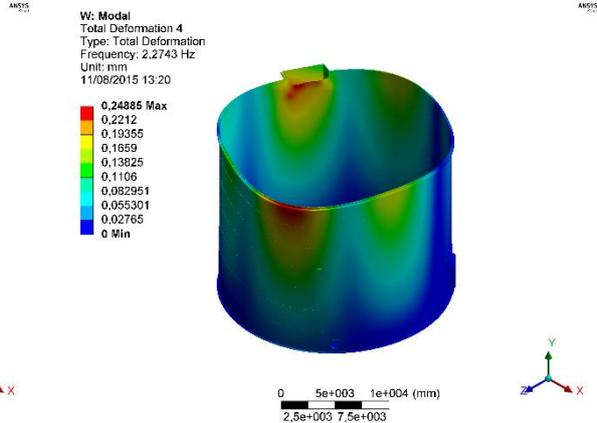
Modo 1 nível mínimo  $f = 1,49$  Hz.



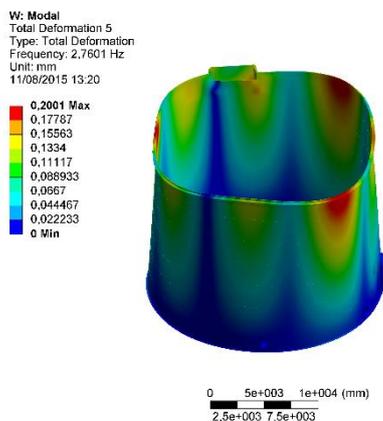
Modo 2 nível mínimo  $f = 1,52$  Hz.



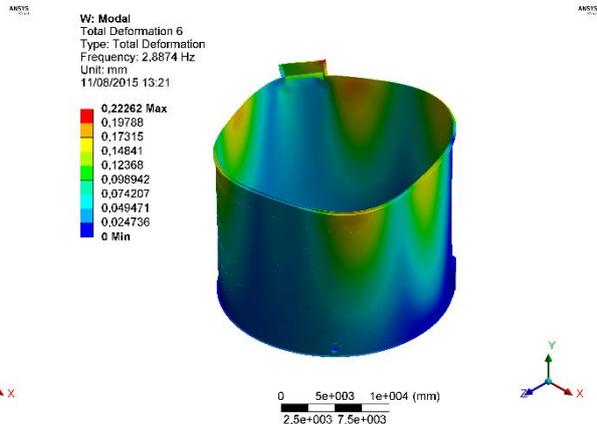
Modo 3 nível mínimo  $f = 2,07$  Hz.



Modo 4 nível mínimo  $f = 2,27$  Hz.



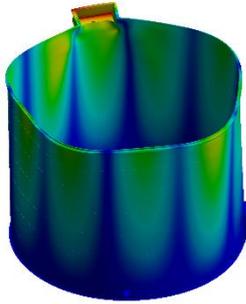
Modo 5 nível mínimo  $f = 2,76$  Hz.



Modo 6 nível mínimo  $f = 2,89$  Hz.

W: Modal  
Total Deformation 7  
Type: Total Deformation  
Frequency: 3.7071 Hz  
Unit: mm  
11/08/2015 13:21

0.23468 Max  
0.25305  
0.22142  
0.18979  
0.15816  
0.12652  
0.094893  
0.063262  
0.031631  
0 Min

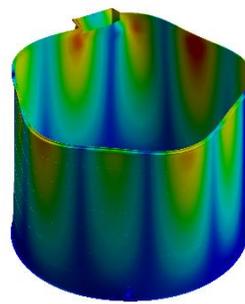


Modo 7 nível mínimo  $f = 3,71$  Hz.

ANSYS

W: Modal  
Total Deformation 8  
Type: Total Deformation  
Frequency: 3.7766 Hz  
Unit: mm  
11/08/2015 13:21

0.20742 Max  
0.18437  
0.16133  
0.13828  
0.11523  
0.092187  
0.069141  
0.046094  
0.023047  
0 Min

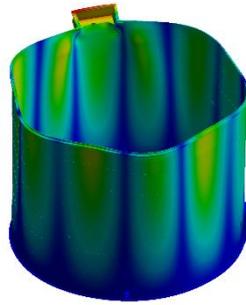


Modo 8 nível mínimo  $f = 3,77$  Hz.

ANSYS

W: Modal  
Total Deformation 9  
Type: Total Deformation  
Frequency: 4.5378 Hz  
Unit: mm  
11/08/2015 13:22

0.25105 Max  
0.22315  
0.19526  
0.16737  
0.13947  
0.11158  
0.083683  
0.055786  
0.027894  
0 Min

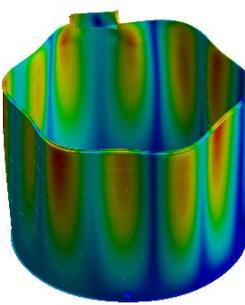


Modo 9 nível mínimo  $f = 4,54$  Hz.

ANSYS

W: Modal  
Total Deformation 10  
Type: Total Deformation  
Frequency: 4.8229 Hz  
Unit: mm  
11/08/2015 13:22

0.16669 Max  
0.14817  
0.12965  
0.11113  
0.092606  
0.074085  
0.055564  
0.037042  
0.018521  
0 Min

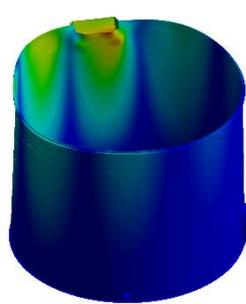


Modo 10 nível mínimo  $f = 4,82$  Hz.

ANSYS

Y: Modal  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Frequency: 4.1088 Hz  
Unit: mm  
11/08/2015 13:27

0.4047 Max  
0.35974  
0.31477  
0.2698  
0.22484  
0.17987  
0.1349  
0.089934  
0.044967  
0 Min

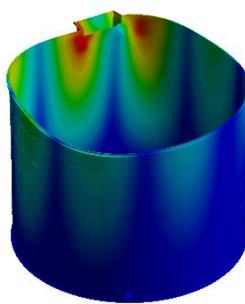


Modo 1 nível Intermediário  $f = 4,11$  Hz.

ANSYS

Y: Modal  
Total Deformation 2  
Type: Total Deformation  
Frequency: 4.2188 Hz  
Unit: mm  
11/08/2015 13:28

0.30865 Max  
0.27436  
0.24006  
0.20577  
0.17147  
0.13718  
0.10288  
0.06859  
0.034295  
0 Min

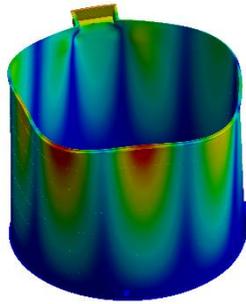


Modo 2 nível Intermediário  $f = 4,21$  Hz.

ANSYS

Y: Modal  
Total Deformation 3  
Type: Total Deformation  
Frequency: 4.6137 Hz  
Unit: mm  
11/08/2015 13:28

0.24658 Max  
0.21918  
0.19178  
0.16439  
0.13699  
0.10959  
0.082193  
0.054795  
0.027398  
0 Min



0 5e+003 1e+004 (mm)  
2,5e+003 7,5e+003

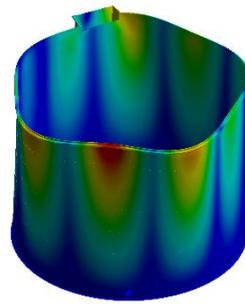


Modo 3 nível Intermediário  $f= 4,61$  Hz.

ANSYS

Y: Modal  
Total Deformation 4  
Type: Total Deformation  
Frequency: 4.7491 Hz  
Unit: mm  
11/08/2015 13:28

0.26608 Max  
0.23652  
0.20695  
0.17739  
0.14782  
0.11826  
0.088695  
0.05913  
0.029565  
0 Min



0 5e+003 1e+004 (mm)  
2,5e+003 7,5e+003

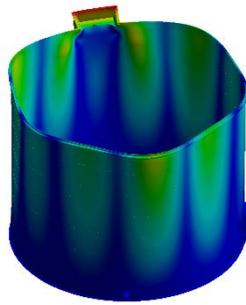


Modo 4 nível Intermediário  $f= 4,75$  Hz.

ANSYS

Y: Modal  
Total Deformation 5  
Type: Total Deformation  
Frequency: 5.2925 Hz  
Unit: mm  
11/08/2015 13:29

0.32953 Max  
0.29202  
0.2563  
0.21969  
0.18307  
0.14646  
0.10984  
0.073229  
0.036614  
0 Min



0 5e+003 1e+004 (mm)  
2,5e+003 7,5e+003

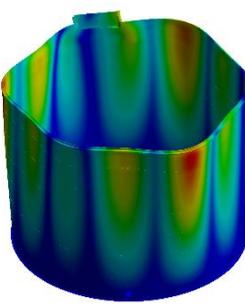


Modo 5 nível Intermediário  $f= 5,29$  Hz.

ANSYS

Y: Modal  
Total Deformation 6  
Type: Total Deformation  
Frequency: 5.622 Hz  
Unit: mm  
11/08/2015 13:29

0.22545 Max  
0.2004  
0.17535  
0.1503  
0.12525  
0.1002  
0.075149  
0.050099  
0.02505  
0 Min



0 5e+003 1e+004 (mm)  
2,5e+003 7,5e+003

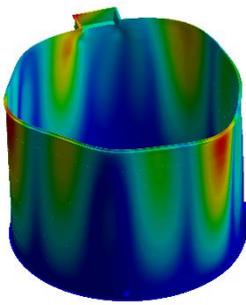


Modo 6 nível Intermediário  $f= 5,62$  Hz.

ANSYS

Y: Modal  
Total Deformation 7  
Type: Total Deformation  
Frequency: 5.8719 Hz  
Unit: mm  
11/08/2015 13:29

0.23489 Max  
0.20879  
0.1827  
0.1566  
0.1305  
0.1044  
0.078298  
0.052199  
0.026099  
0 Min



0 5e+003 1e+004 (mm)  
2,5e+003 7,5e+003

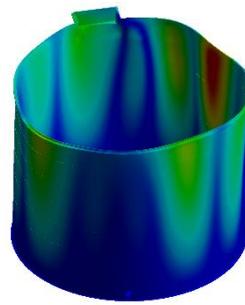


Modo 7 nível Intermediário  $f= 5,87$  Hz.

ANSYS

Y: Modal  
Total Deformation 8  
Type: Total Deformation  
Frequency: 6.0345 Hz  
Unit: mm  
11/08/2015 13:30

0.27561 Max  
0.24498  
0.21436  
0.18374  
0.15311  
0.12249  
0.091869  
0.061246  
0.030623  
0 Min



0 5e+003 1e+004 (mm)  
2,5e+003 7,5e+003

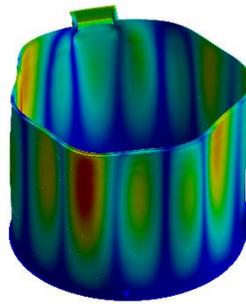


Modo 8 nível Intermediário  $f= 6,03$  Hz.

ANSYS

Y: Modal  
Total Deformation 9  
Type: Total Deformation  
Frequency: 6.2093 Hz  
Unit: mm  
11/08/2015 13:30

0.20984 Max  
0.18653  
0.16321  
0.13989  
0.11658  
0.093263  
0.069947  
0.046631  
0.023316  
0 Min



0 5e+003 1e+004 (mm)  
2,5e+003 7,5e+003

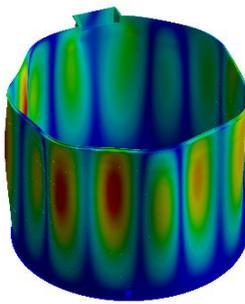


Modo 9 nível Intermediário  $f= 6,21$  Hz.

ANSYS

Y: Modal  
Total Deformation 10  
Type: Total Deformation  
Frequency: 6.3886 Hz  
Unit: mm  
11/08/2015 13:31

0.19918 Max  
0.17705  
0.15492  
0.13279  
0.11065  
0.088524  
0.066393  
0.044262  
0.022131  
0 Min



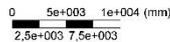
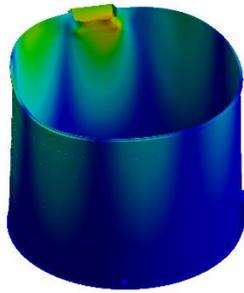
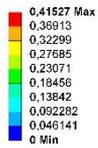
0 5e+003 1e+004 (mm)  
2,5e+003 7,5e+003



Modo 10 nível Intermediário  $f= 6,39$  Hz.

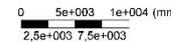
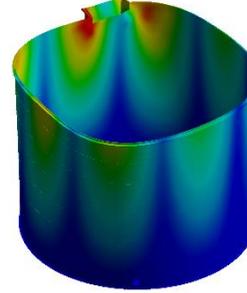
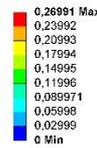
ANSYS

Z: Modal  
 Total Deformation  
 Type: Total Deformation  
 Frequency: 5.2041 Hz  
 Unit: mm  
 11/08/2015 13:36



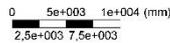
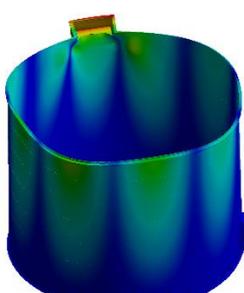
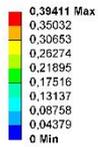
Modo 1 nivel máximo  $f= 5,20$  Hz.

Z: Modal  
 Total Deformation 2  
 Type: Total Deformation  
 Frequency: 5.3864 Hz  
 Unit: mm  
 11/08/2015 13:36



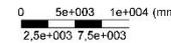
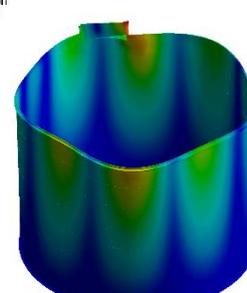
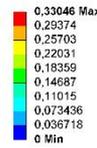
Modo 2 nivel máximo  $f= 5,39$  Hz.

Z: Modal  
 Total Deformation 3  
 Type: Total Deformation  
 Frequency: 5.8235 Hz  
 Unit: mm  
 11/08/2015 13:37



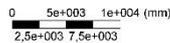
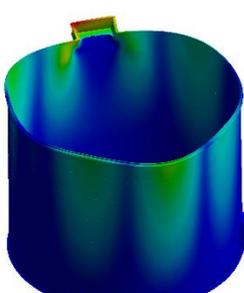
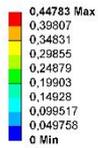
Modo 3 nivel máximo  $f= 5,82$  Hz.

Z: Modal  
 Total Deformation 4  
 Type: Total Deformation  
 Frequency: 5.9985 Hz  
 Unit: mm  
 11/08/2015 13:38



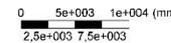
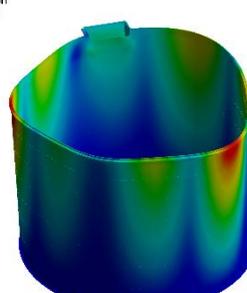
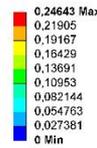
Modo 4 nivel máximo  $f= 6,00$  Hz.

Z: Modal  
 Total Deformation 5  
 Type: Total Deformation  
 Frequency: 6.5549 Hz  
 Unit: mm  
 11/08/2015 13:38



Modo 5 nivel máximo  $f= 6,55$  Hz.

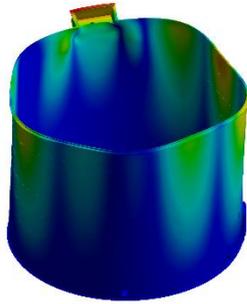
Z: Modal  
 Total Deformation 6  
 Type: Total Deformation  
 Frequency: 6.8084 Hz  
 Unit: mm  
 11/08/2015 13:39



Modo 6 nivel máximo  $f= 6,81$  Hz.

Z: Modal  
Total Deformation 7  
Type: Total Deformation  
Frequency: 7.0964 Hz  
Unit: mm  
11/08/2015 13:39

0.3127 Max  
0.27795  
0.24321  
0.20847  
0.17372  
0.13898  
0.10423  
0.069489  
0.034744  
0 Min



0 5e+003 1e+004 (mm)  
2,5e+003 7,5e+003

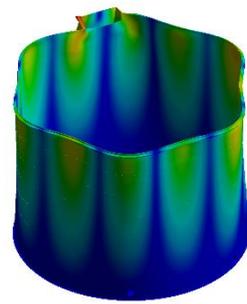


Modo 7 nivel máximo  $f=7,10$  Hz.

ANSYS

Z: Modal  
Total Deformation 8  
Type: Total Deformation  
Frequency: 7.5484 Hz  
Unit: mm  
11/08/2015 13:40

0.27118 Max  
0.24104  
0.21091  
0.18078  
0.15065  
0.12052  
0.090392  
0.060261  
0.030131  
0 Min



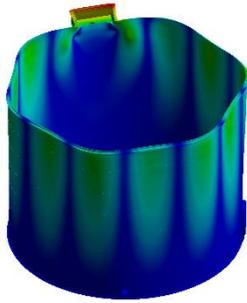
0 5e+003 1e+004 (mm)  
2,5e+003 7,5e+003



Modo 8 nivel máximo  $f=7,55$  Hz.

Z: Modal  
Total Deformation 9  
Type: Total Deformation  
Frequency: 8.2415 Hz  
Unit: mm  
11/08/2015 13:40

0.35839 Max  
0.31857  
0.27875  
0.23893  
0.19911  
0.15929  
0.11946  
0.079643  
0.039821  
0 Min



0 5e+003 1e+004 (mm)  
2,5e+003 7,5e+003

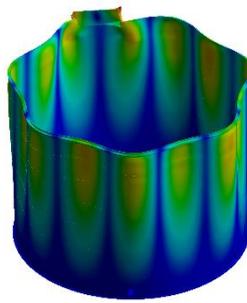


Modo 9 nivel máximo  $f=8,24$  Hz.

ANSYS

Z: Modal  
Total Deformation 10  
Type: Total Deformation  
Frequency: 8.9683 Hz  
Unit: mm  
11/08/2015 13:40

0.2301 Max  
0.20453  
0.17897  
0.1534  
0.12783  
0.10227  
0.076701  
0.051134  
0.025567  
0 Min



0 5e+003 1e+004 (mm)  
2,5e+003 7,5e+003



Modo 10 nivel máximo  $f=8,97$  Hz.