

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2011

FLÁVIO GONÇALVES DE CAMPOS

ANÁLISE CRÍTICA DE UM VASO DE PRESSÃO
DO SETOR SUCROALCOOLEIRO

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias

Guaratinguetá
2011

C198a	Campos, Flávio Gonçalves de Análise crítica de um vaso de pressão do setor sucroalcooleiro / Flávio Gonçalves de Campos – Guaratinguetá : [s.n], 2011. 60 f : il. Bibliografia: f. 60 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Orientador: Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias 1. Vasos de pressão 2. Método dos elementos finitos I. Título
	CDU 621.643.2

"ANÁLISE CRÍTICA DE UM VASO DE PRESSÃO DO
SETOR SUCROALCOOLEIRO"

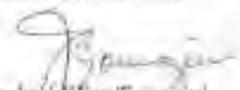
FLÁVIO GONÇALVES DE CAMPOS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
CÔMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA
DE GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias
Orientador UNESP-FEG


Prof. Dr. José Elms Tomazini
UNESP/FEG


Prof. Dr. Valdeci Donizete Gonçalves
IF - Instituto Federal Fluminense Campus - Macaé

Outubro de 2011

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais José Campos e Ignêz (in memoriam) que durante todo o sempre acreditaram nas minhas idéias, mesmo que às vezes sem compreendê-las, a eles minha eterna gratidão.

AGRADECIMENTOS

Em especial a Deus, por ter me ensinado os segredos do tempo e da vida.

A minha esposa Maria, pelas madrugadas de estudo e pela ajuda na revisão deste trabalho e aos meus filhos Carlos, Flávia e João Pedro pela inspiração diária.

A UNESP, casa em que vivi durante quase duas décadas entre os cursos de Física e Engenharia e a todos os professores que direta ou indiretamente contribuíram, seja pelos ensinamentos transmitidos durante o curso, sejam pelo apoio nos inúmeros desafios que passei ao longo destes anos.

E em especial ao professor, amigo e meu orientador Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias por contribuir para a realização deste trabalho.

Agradeço aos amigos do Grupo de Inspeção (GRINSP-SP), Eng. Adilson Zibordi (Rhodia), Eng. Antonio Carlos (Mixing), Eng. Eduardo Krugger (Welding) e Eng. Ary Ribeiro (COSAN) e ainda aos colegas da CEMEF ENGENHARIA, pelos comentários e por possibilitarem a realização deste trabalho.

E aos meus amigos de curso por toda paciência que tiveram.

A todos meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Este trabalho visa avaliar estruturalmente um trocador de calor que está em uso desde meados dos anos 60 e que fora incorporado a COSAN para operação em uma de suas usinas de produção de açúcar no interior de São Paulo, este equipamento assim como inúmeros equipamentos semelhantes estão em operação em usinas espalhadas pelo Brasil e deste modo ao serem adquiridos por grandes corporações como no caso do Grupo COSAN, passam pelo crivo de trabalhos de inspeção, eventuais trabalhos de recálculos e em ultimo caso em avaliações estruturais para verificar a necessidade de possíveis adequações de projeto ou de parâmetros de operação e com isso garantir a integridade estrutural do equipamento. Para isso foram realizados inicialmente levantamento em campo com utilização de técnicas de Ensaio Não Destrutivo ou END's para determinação de espessura das principais regiões do equipamento, efetuada a reavaliação dimensional e de projeto existente e considerando os carregamentos operacionais efetuando a caracterização do equipamento conforme especificada na norma regulamentadora número 13 - NR13 e demais aplicáveis a este tipo de equipamento e por fim uma análise através de uma abordagem estática, utilizando como ferramenta de análise o método por elementos finitos.

PALAVRAS-CHAVE: Vasos de pressão; estado de tensões; elementos finitos; análise estática; ensaios não destrutivos.

ABSTRACT

This study aims to evaluate structurally a heat exchanger that has been in operation since the mid-60's and was built COSAN for operation in one of its sugar production plants in São Paulo, this equipment as well as many similar devices are operation in plants throughout Brazil, and thus to be acquired by large corporations as in the case of COSAN, pass the scrutiny of inspection work, and work such as recalculations in the latter case in structural evaluations to verify the possible need for adjustments to project or operation and thus ensure the structural integrity of the equipment. To this were first done field survey using techniques of NDT and NDT's for determining the thickness of the main parts of the equipment, made the revaluation dimensional and existing project and considering the loads operating performing the characterization of the equipment as specified in the standard regulatory number 13 - NR13 and the other for this type of equipment and finally an analysis using a static approach, as an analysis tool using the finite element method.

KEYWORDS: Pressure vessels, stress state. finite elements. static analysis, nondestructive testing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Evaporador - Fonte: Cosan.....	16
Figura 2 -	Medidor de Espessura Digital Ultra-sônico.	19
Figura 3 -	Detalhe de Medidor de Espessura Digital Ultra-sônico.....	19
Figura 4 -	Esquemática do funcionamento de aparelho de Ultra-Som.	20
Figura 5 -	Esquemática de funcionamento de aparelho – Eco de reflexão.....	21
Figura 6 -	Diagrama Tensão x Deformação.....	22
Figura 7 -	<i>As built</i> de equipamento	27
Figura 8 -	Solda Longitudinal – corrosão acentuada no metal de adição	29
Figura 9 -	Detalhe de Solda Circunferencial.....	29
Figura 10 -	Chapa interna do corpo com desgaste acentuado.....	30
Figura 11 -	Região com desgaste próxima à solda circunferencial	30
Figura 12 -	Fundo do vaso – Detalhe de reparos	31
Figura 13 -	Fundo do vaso – Detalhe de reparos e reposições.....	31
Figura 14 -	Fundo do vaso – Detalhe de reparos e ruptura em solda.....	32
Figura 15 -	Fundo do vaso – Detalhe de ruptura em solda	32
Figura 16 -	Fundo do vaso – Reparos	33
Figura 17	Fundo do vaso – Detalhe de reparos	33
Figura 18	Detalhe interno na região de fechamento lateral de calandra.	34
Figura 19	Detalhe interno na posição de tampo inferior.	34
Figura 20	Medição de espessura – Região dos feixes tubulares.....	35
Figura 21	Medição de espessura – Região do costado	35
Figura 22	Medição de espessura – Resultados de inspeção de costado	36
Figura 23	Medição de espessura – Resultados de inspeção de calandra	36

Figura 24	Detalhes de reforços não padronizados.....	40
Figura 25	Padrão geométrico para comparação.....	41
Figura 26	Raio de bordo de fundo de equipamento.....	41
Figura 27	Espessuras e Dimensões conforme ASME VIII	42
Figura 28	Espessuras e Dimensões de calandra conforme ASME VIII.....	43
Figura 29	Modelo Geral do Equipamento	44
Figura 30	Modelo do Equipamento em Corte	45
Figura 31	Modelo de Elementos Finitos com Detalhes.....	45
Figura 32	Vista lateral de Modelo de Elementos Finitos	46
Figura 33	Modelo de Elementos Finitos com Detalhes.....	46
Figura 34	Modelo de Elementos Finitos – Condições de contorno.....	47
Figura 35	Detalhes das condições de contorno aplicadas.....	47
Figura 35	Aplicação de carregamento de pressão	48
Figura 36	Modelo com detalhe de pressão aplicada.....	48
Figura 37	Aplicação de carregamento de temperatura	49
Figura 38	Modelo com detalhe de pressão aplicada.....	49
Figura 39	Dimensões de costado – Calculadas x Medidas em Campo	50
Figura 40	Dimensões de calandra – Calculadas x Medidas em Campo.....	51
Figura 41	Distribuição de temperatura para o equipamento.....	52
Figura 42	Tensões de Von Mises devido à temperatura aplicada.	53
Figura 43	Detalhe de Tensões - Região de Apoio do Equipamento.....	54
Figura 44	Detalhe de Tensões de Von Mises – Limitada em 150 MPa.	55
Figura 45	Detalhe de Tensões de Von Mises – Limitada em 150 MPa.	55
Figura 46	Detalhe de Tensões – Tampo Superior – Limitada em 150 MPa.	56

Figura 47	Detalhe de Tensões – Tampo Inferior – Limitada em 150 MPa.	56
Figura 48	Resultado de Tensões – Carregamento Combinado.....	57
Figura 49	Resultado de Tensões – Limitada em 150 MPa.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AISC	<i>American Institute of Steel Construction</i>
CEMEF	<i>Cálculo Estrutural pelo Método dos Elementos Finitos - Engenharia e Consultoria</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

g	Aceleração gravitacional	m/s^2
s	Espaço percorrido	m
v	Velocidade média	m/s
t	Tempo	s
L_0	Comprimento inicial	m
L	Comprimento	m
ΔL	Variação do comprimento	m
ε	Deformação específica longitudinal	m
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	Deformações específicas direcionais	m
σ	Tensão normal	Pa
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Tensões normais direcionais	Pa
E	Módulo de elasticidade ou módulo Young	Pa
ν	Coefficiente de Poisson	-
S	seção transversal	m^2
V	Tensão	V

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	15
2 -FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA:	18
2.1 Determinação de Espessura através de ensaios de Ultra-Som.....	18
2.2 Deformação Elástica	21
2.3 Propriedades Elásticas de Material	23
2.4 Análise de deformações no estado plano de tensões	24
3 DESENVOLVIMENTO:	26
3.1 O Equipamento – Características Gerais	27
3.2 Inspeção Estrutural – Reparos, Soldas e Medição de Espessuras.....	28
3.3 Inspeção Interna - Exame visual das soldas.....	29
3.4 Inspeção Interna - Exame visual das chapas	30
3.5 Inspeção Interna e Externa de Fundo do Vaso.....	31
3.6 Inspeção Geral – Medições dimensionais e de Espessuras.....	35
3.7 Enquadramento – NR13	37
3.8 Dimensionamento Normalizado– ASME VIII div I.....	39
3.9 Análise Estrutural – Modelagem pelo Método dos Elementos Finitos.....	44
4 RESULTADOS:	50
4.1 Resultados Comparativos – Inspeção x Cálculo Normalizado:	50
4.2 Resultados obtidos através do Método dos Elementos Finitos:	51
4.3 Resultados obtidos - Carregamentos Térmicos:	52
4.4 Resultados obtidos - Carregamentos de Pressão e Carga de Produto:	55
4.5 Resultados obtidos - Carregamentos Combinados	57
5 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES:	58
REFERÊNCIAS:	60

1 - INTRODUÇÃO

A utilização de equipamentos estáticos na indústria sucroalcooleira vem sendo efetuada no Brasil há várias décadas, dentre estes equipamentos temos uma infinidade de usinas no interior do estado de São Paulo e em outros estados com um número acentuado de Vasos de Pressão como por exemplo o Evaporador (figura 1) utilizado neste trabalho.

Devido ao histórico de ocorrências ao longo desses anos, seja por efeitos de longo período de atuação, de manutenção inadequada, de sobrecargas em operação ou até mesmo e em grande parte da não observação ou mesmo da não existência na época de sua fabricação de normas ou mesmo de estudos e cálculos para adequação de seu projeto as condições operacionais na qual seriam solicitados

Em decorrência destes e de outros fatores, frente ao entendimento atual das necessidades e exigências de segurança a qual estão inseridos estes equipamentos, e principalmente ao fato relevante destes equipamentos estarem em plena operacionalidade e da absoluta necessidade de que sejam avaliados e por sua vez sofrerem as adequações pertinentes, seja em suas cargas operacionais, seja em sua reavaliação ou alteração de seus projetos, considerando para isso o uso de técnicas atuais de inspeção de equipamentos, correção frente às normas vigentes e da utilização de métodos numéricos para a validação destes projetos ou reprojeto.

Por esses e outros motivos fez-se a necessidade deste trabalho, para diminuir a possibilidade da ocorrência de possível colapso estrutural, vazamentos e até mesmo explosões atentando contra a integridade do equipamento e de seus usuários e deste modo uma avaliação estrutural torna-se necessária.



Figura 1 - Evaporador - Fonte: Cosan

Com o intuito de uma operação segura do equipamento, além da verificação e equalização das condições do equipamento, atividades de levantamento de dados em campo, cálculos, inspeções, medições e análises, foram realizadas para executar a avaliação estrutural do evaporador.

Para o estudo teórico apresentado será realizada uma análise estática linear utilizando-se do método dos elementos finitos para verificação dos deslocamentos e tensões do equipamento, considerando para isso os carregamentos operacionais.

Ainda para que seja possível obtermos uma maior confiabilidade nos resultados é necessário um levantamento em campo das espessuras das chaparias envolvidas, já que devido a condições de processo e de desgaste por corrosão estas com certeza não são as mesmas do projeto original, que também não estava atualizado por conta de intervenções efetuadas ao longo de sua vida operacional

Um estudo que considera as abordagens experimentais e teóricas será desenvolvido, para a verificação de suas condições atuais, bem como, de fazer uma análise correta dos esforços a que estão sujeitos e possibilitar a elaboração de uma avaliação da integridade estrutural do equipamento para possíveis indicações de melhorias, reformas e substituições de partes constitutivas deste equipamento.

No capítulo 2, será abordado o conceito e a aplicação do uso de ensaio não destrutivo através da técnica de ultra-som para medição de espessura e da inspeção visual sensitiva para identificação das condições do equipamento, do conceito para a caracterização de equipamentos quanto a requisitos da norma regulamentadora 13 (NR13) e da teoria necessária para a o entendimento dos resultados de análise estática linear para tensões e deformações.

No capítulo 3, são descritas as ferramentas para a medição de espessuras pelo ensaio de ultra-som e de resultados mediante critérios já difundidos para as características do equipamento e de forma comparativa utilizando-se dessas características para conforme Norma ASME VIII div I identificar como o mesmo deveria éter sido constituído caso este equipamento estivesse sendo projetado por meio deste requisito e por fim pela descrição de modelagem e configurações para a análise teórica utilizando-se do método dos elementos finitos,

No capítulo 4, serão apresentados os resultados obtidos das análises teóricas, tanto pelos valores que estariam sendo proposto pela ASME VIII quanto pelo método dos elementos finitos, de modo a serem analisados a fim de se obter resultados para a avaliação do equipamento.

Finalmente no capítulo 5 serão expostas as conclusões finais obtidas a partir dos resultados extraídos das análises efetuadas.

2 -FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA:

2.1 Determinação de Espessura através de ensaios de Ultra-Som

Segundo Andreucci (2008), o ensaio por ultra-som, caracteriza-se num método não destrutivo que tem por objetivo a detecção de defeitos ou descontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais ferrosos ou não ferrosos.

Estes defeitos são caracterizados pelo próprio processo de fabricação da peça ou componentes a ser examinada como por exemplo: bolhas de gás em fundidos, dupla laminação em laminados, micro-trincas em forjados, escórias em uniões soldadas e muitos outros.

Além disso em equipamentos que possuem longo período de exposição a agentes corrosivos, desgastes por abrasão entre outros tendem a sofrer em sua vida operacional efeitos de diminuição de espessura que podem assim comprometer a integridade estrutural do equipamento, gerando com isso riscos em sua condição operacional de projeto e portanto, o exame com o uso do ensaio de ultra-som, visa identificar e mapear esses efeitos da diminuição de espessura e com isso servir de informação para a realização de recálculos seja para a condição operacional, seja para a identificação de correções estruturais a serem aplicadas ou até mesmo como parâmetro para a definição de sucateamento do equipamento.

Para a determinação da espessura em estruturas metálicas utiliza-se basicamente de aparelhos de ultra-som que são constituídos por circuitos eletrônicos especiais na qual permitem transmitir a um cristal piezelétrico, através do cabo coaxial, uma série de pulsos elétricos controlados, transformados pelo mesmo em ondas ultra-sônicas.

Os sinais captados no cristal são mostrados na tela em forma de pulsos luminosos denominados “ecos”, que podem ser regulados tanto na amplitude, como posição na tela graduada e se constituem no registro das descontinuidades encontradas no interior do material.

Um aparelho de ultra-som é basicamente um osciloscópio projetado para medir o tempo de percurso do som na peça ensaiada através da relação: $s = v \times t$ onde o espaço percorrido (s) é proporcional ao tempo (t) e a velocidade de propagação (v) no material.

Os medidores de espessura por ultra-som podem se apresentar com circuitos digitais ou analógicos, e são aparelhos simples que medem o tempo do percurso sônico no interior do material, através da espessura, registrando no display o espaço percorrido ou seja a própria espessura. Operam com transdutores duplo-cristal, e possuem exatidão de décimos ou até centésimos dependendo do modelo.



Figura 2 - Medidor de Espessura Digital Ultra-sônico.



Figura 3 - Detalhe de Medidor de Espessura Digital Ultra-sônico.

Os aparelhos para medição de espessura são bastante úteis para determinação de espessuras de chapas, tubos, taxas de corrosão em equipamentos industriais, porém para a obtenção de bons resultados, é necessária a sua calibração antes do uso, usando blocos com espessuras calibradas e de mesmo material a ser medido e com o ajuste correto da velocidade de propagação do som do aparelho.

Para compreender a geração e recepção do pulso no aparelho de ultra-som podemos verificar na figura a seguir onde o aparelho de ultra-som produz um pulso (1) através do cristal. Este se propaga pela peça, e neste instante os circuitos do aparelho iniciam a contagem de tempo.

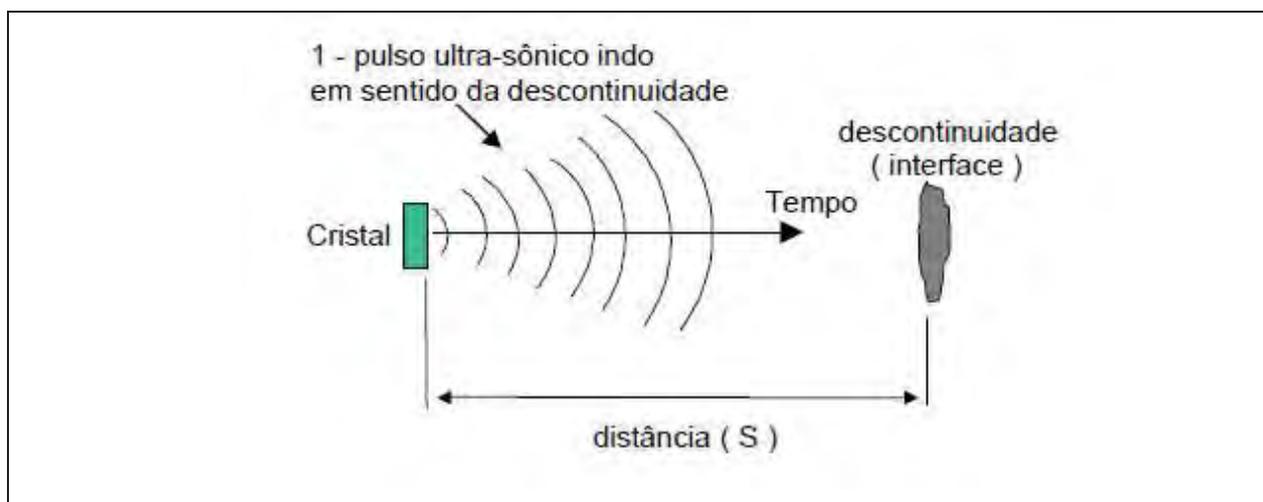


Figura 4 - Esquemática do funcionamento de aparelho de Ultra-Som.

O aparelho de ultra-som produz um pulso por meio do cristal que se propaga pela peça, inicia-se assim a contagem do tempo de percurso, e assim ao incidir em uma interface, ou seja descontinuidade de distância "s", ocorre à reflexão da onda (2) que é por sua vez detectada pelo cristal, dando origem a um sinal elétrico que é amplificado pelo aparelho e interpretado representado o eco de reflexão (3) na tela do aparelho de ultra-som. Sabe-se que a posição deste eco na tela é proporcional ao tempo de retorno medido como também ao caminho percorrido pelo som (s) até a descontinuidade na ou superfície posterior da peça.

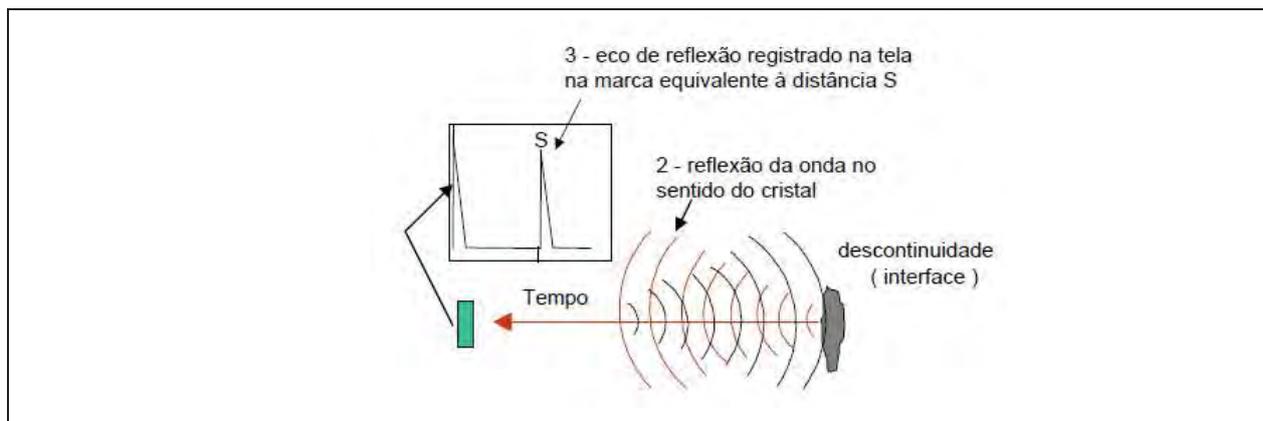


Figura 5 - Esquemática de funcionamento de aparelho – Eco de reflexão.

Incidindo numa interface, ou descontinuidade que está a uma distância “s” , ocorre a reflexão da onda , detectada pelo cristal que origina um sinal elétrico que é interpretado e amplificado, representado pelo eco de reflexão na tela do aparelho de ultra-som, ou no valor obtido da espessura do material medido.

2.2 Deformação Elástica

De acordo com Timoshenko & Gere (1961), todos os materiais estruturais possuem, de certo modo, propriedades como a da elasticidade, ou seja, se existir forças externas produzindo deformações e estas não excederem limites característicos, as deformações desaparecem cessando-se estas forças.

É utilizado o termo deformação específica para determinar o alongamento de uma seção representando assim uma variação relativa ao comprimento do mesmo.

A deformação é obtida em função de um dado carregamento, seja ele mecânico ou térmico e poderá ser obtida através da expressão:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.1)$$

Sendo ΔL a variação absoluta de comprimento, que representa a diferença entre a medida da seção no instante da deformação (L) e a medida da seção original L_0 .

A essa propriedade da elasticidade onde as deformações desaparecem quando as forças aplicadas são retiradas são conhecidas como deformações elásticas.

De acordo com Callister & Wiley (1991), para o comportamento de uma dada estrutura seu grau de deformação depende da magnitude de uma dada tensão na qual o corpo esta sujeito, de modo geral em diversos metais tensionados em tração e a baixos valores, a relação de tensão e deformação são proporcionais entre si conforme a correlação

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (2.2)$$

A equação acima é denominada como a lei de Hooke, em homenagem a Robert Hooke (1635-1703) e a constante de proporcionalidade E (dada em MPa ou psi) é denominado módulo de elasticidade ou também como módulo de Young.

Deste modo uma deformação é denominada elástica quando a relação entre a tensão e a deformação é proporcional; conforme se pode observar na figura 2.1 apresentada abaixo. Para esta constante de proporcionalidade a denominamos de modulo de elasticidade, e este módulo pode ser interpretado como a rigidez ou uma resistência do material à deformação elástica.

Ou seja quanto maior o módulo, tão mais rígido é o material, ou menor é a deformação elástica que resulta da aplicação de uma dada tensão. Esta deformação não é permanente, o que significa que quando cessada a carga aplicada, a peça retorna à sua forma original. Como mostrado no gráfico de tensão-deformação (Figura 6),

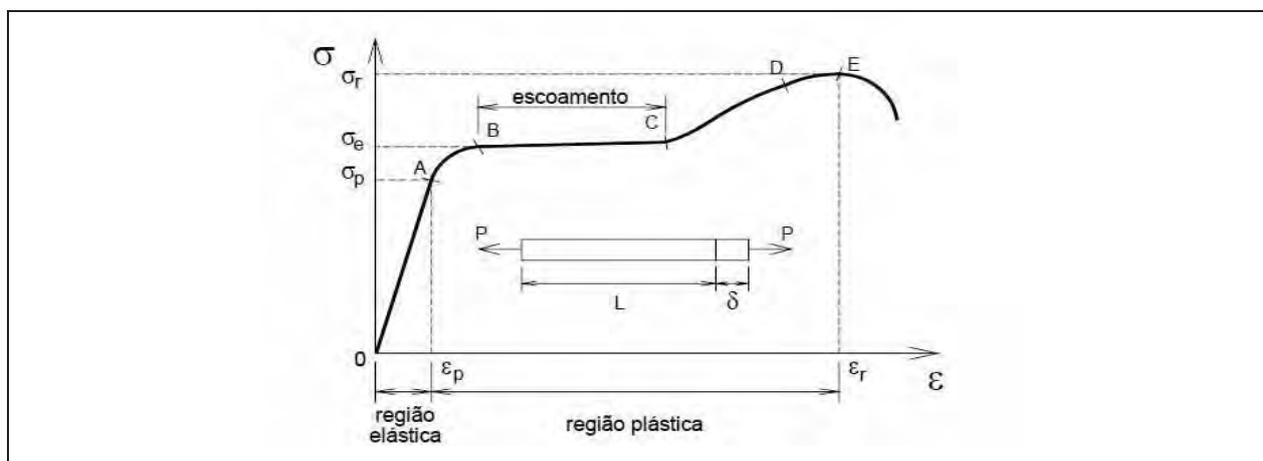


Figura 6 - Diagrama Tensão x Deformação

Deste modo defini-se como regime linear-elástico de um material a região onde solicitada por uma força sofre-se uma deformação, e retirada essa força, o mesmo recupera suas dimensões iniciais.

É nesta região onde são definidas as principais tensões do material, como por exemplo o limite de elasticidade (σ_e), onde o material não apresenta deformação após ser descarregado, e também o limite de proporcionalidade (σ_p), que representa o valor máximo da tensão, abaixo a qual o material obedece à lei de Hooke, perdendo assim sua linearidade. (NASH, 1976).

De acordo com Hibbeler (2004), após a região de escoamento do material, aumentando o carregamento, sua curva no gráfico crescerá continuamente e não mais de forma linear, até que se alcance a tensão máxima denominada de limite de resistência (σ_r). Para este aumento da curva denominamos de região de encruamento, ou somente de encruamento.

Retornando ao regime linear-elástico podemos definir algumas propriedades relacionadas a tensões e deformações dos materiais, chamadas propriedades elásticas.

2.3 Propriedades Elásticas de Material

Segundo Callister & Wiley (1991), para uma dada tensão de tração na direção z é imposta sobre um determinado corpo de prova (metálico), surge uma elongação elástica e uma deformação ε_z resultante na direção da tensão aplicada.

Como um resultado desta elongação, haverá nas direções laterais (x e y) efeitos de contrações perpendiculares à linha de tensão aplicada; a partir destas contrações, a deformação compressiva ε_x e ε_y podem ser determinadas.

Verifica-se ainda que se a tensão aplicada for apenas na direção z (uniaxial), logo teremos $\varepsilon_x = \varepsilon_y$.

Com isso um parâmetro denominado razão de Poisson ν é definido como a razão entre as deformações lateral e axial.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (2.3)$$

O sinal negativo para indicar a contração é incluído na expressão de maneira que ν será sempre positivo, uma vez que ε_x e ε_z serão sempre de sinal positivo.

De modo geral estes valores em vários metais e demais ligas, detém valores de razão de Poisson da ordem de 0,25 e 0,35.

2.4 Análise de deformações no estado plano de tensões

Dada uma barra no formato de um paralelepípedo retangular submetida a carregamentos de tração atuando em duas direções ortogonais x e y , a deformação em uma dessas direções dependerá não somente da tensão de tração nesta direção, como também da tensão na direção perpendicular.

No eixo x , a deformação relativa devido à tensão de tração σ_x , de acordo com a equação 2.1, será σ_x/E .

Já a tensão de tração σ_y irá produzir contração lateral na direção do eixo x , igual a $\nu \cdot \varepsilon_y$ ou seja, $\nu \cdot (\sigma_y/E)$, conforme equação (2.2); deste modo se ambas as tensões atuarem concomitantemente, o alongamento relativo na direção x é apresentado conforme a equação (2.4) descrita abaixo.

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} \quad (2.4)$$

Deste modo e de forma análoga podem-se obter as expressões para as direções y e z .

Segundo HIBBELER, 2004, as deformações direcionais podem ser obtidas através de cálculos conforme as equações (2.2) e (2.4) quando se conhece as tensões atuantes, ou de modo inverso pode-se calcular as tensões atuantes se as deformações direcionais forem conhecidas.

3 DESENVOLVIMENTO:

O desenvolvimento dos trabalhos de inspeção estrutural, seja visual sensitiva e de ensaios de ultra-som para medições de espessura e verificação de ligações soldadas, bem como a utilização do método dos elementos finitos nos permite identificar e posteriormente determinar o comportamento estrutural de componentes de formas complexas, servindo-se de aparelhagem adequadas para inspeção e de hardware adequados a complexidade de processamento e também de software dedicado adequado a aplicação do método em uso, tornando-se assim ferramentas poderosas para a avaliação e posterior solução de problemas complexos.

Como o equipamento em estudo possui um tempo de vida operacional significativo é necessário desenvolver um levantamento dos princípios de projeto e construção, bem como da utilização de técnicas de ensaios não destrutivos como por exemplo o uso da técnica de medição de espessura por meio de Ultra-Som e principalmente da qualificação e experiência dos inspetores envolvidos no trabalho de campo.

Para uma utilização adequada dos softwares de análise estrutural existentes, é de grande importância para o usuário deter o conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais para os itens e componentes que compõem a estrutura a ser analisada, dentre estes podemos considerar propriedades como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, massa específica e dimensões do material utilizado.

E para completar existe ainda a necessidade da utilização correta das condições de contorno e da aplicação dos carregamentos atuantes na estrutura, como por exemplo os efeitos gravitacionais, pressões de operação, efeitos térmicos, dentre outros e deste modo com propriedade obter-se resultados em termos de deslocamentos, tensões, cargas críticas de flambagem e demais resultados necessários para identificar os pontos críticos e com isso propor as correções necessárias para garantir a integridade estrutural do equipamento.

3.1 O Equipamento – Características Gerais

Após levantamento em campo e trabalho de inspeção com medição de espessura por meio da técnica de Ultra-Som determinou-se as características principais do equipamento:

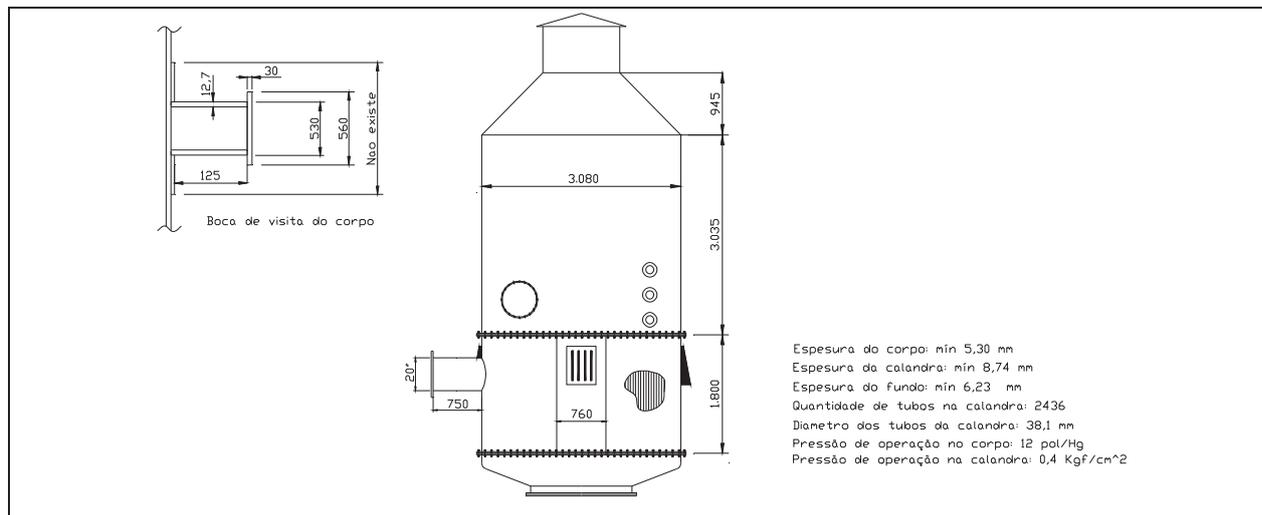


Figura 7 - *As built* de equipamento

A estrutura analisada é composta de perfis e chapas metálicas calandradas. Os desenhos utilizados para os estudos e análises foram obtidos através dos poucos desenhos de projeto existentes e principalmente dos trabalhos de levantamento em campo, medições de espessuras dos elementos principais da estrutura e posterior execução de “*as built*” do equipamento

As principais características dos materiais empregados são as seguintes:

Aço ASTM A36 (Chapas e perfis):

- Tensão de escoamento: σ_y 250 MPa
- Tensão de ruptura: σ_{rup} 350 MPa
- Módulo de elasticidade: E 200 GPa
- Densidade: ρ 7.800 kg/m³
- Coeficiente de Poisson: ν 0,3

- Cálculo da tensão admissível segundo a norma AISC:

$$\sigma_a = 250 / 1,5 = 166,7 \text{ MPa}$$

Os Carregamentos utilizados para as análises são os seguintes:

Os carregamentos considerados são apresentados a seguir:

- Efeitos gravitacionais: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- Pressão no Corpo: $12 \text{ pol Hg} = 40,64 \text{ kPa (Vácuo)}$
- Pressão Calandra: $0,4 \text{ kgf/cm}^2 = 39,23 \text{ kPa}$
- Temperatura de operação de calandra: 93°C
- Temperatura de operação face do costado: 56°C
- Massa de produto: 1500 kg
- Massa da Estrutura: 2800 kg

3.2 Inspeção Estrutural – Reparos, Soldas e Medição de Espessuras

O trabalho de inspeção visual sensitiva para estruturas e soldas e as de verificação dimensional e de espessuras dos elementos estruturais serviram de premissas para a elaboração de modelo numérico computacional para as análises por elementos finitos e de forma comparativa e simplificada para o ASME VIII div-I.

Os trabalhos inspeção de modo geral podem ser divididos em:

- Inspeção Interna consistiu em: exame visual das chapas, exame visual das soldas internas e medida de espessura no corpo do vaso;
- Inspeção externa consistiu em: exame visual no isolamento, medida de espessura na caixa tubular (calandra), verificação dos dispositivos de segurança do vaso e indicadores de pressão e temperatura, verificação dos riscos graves e iminentes (NR13);
- Verificação e análise da documentação existente

3.3 Inspeção Interna - Exame visual das soldas

As figuras 8 e 9 apresentam alguns resultados obtidos do trabalho de inspeção interna do equipamento com exame visual das soldas.



Figura 8 - Solda Longitudinal – corrosão acentuada no metal de adição



Figura 9 - Detalhe de Solda Circunferencial.

3.4 Inspeção Interna - Exame visual das chapas

As figuras 10 e 11 apresentam alguns resultados obtidos do trabalho de inspeção interna do equipamento com exame visual das chapas do costado.



Figura 10 - Chapa interna do corpo com desgaste acentuado



Figura 11 - Região com desgaste próxima à solda circunferencial

3.5 Inspeção Interna e Externa de Fundo do Vaso

As figuras a seguir apresentam detalhes das condições de costado, observados no trabalho de inspeção interna e externa do fundo do equipamento.



Figura 12 - Fundo do vaso – Detalhe de reparos



Figura 13 - Fundo do vaso – Detalhe de reparos e reposições



Figura 14 - Fundo do vaso – Detalhe de reparos e ruptura em solda



Figura 15 - Fundo do vaso – Detalhe de ruptura em solda



Figura 16 - Fundo do vaso – Reparos



Figura 17 - Fundo do vaso – Detalhe de reparos



Figura 18 Detalhe interno na região de fechamento lateral de calandra.



Figura 19 Detalhe interno na posição de tampo inferior.

3.6 Inspeção Geral – Medições dimensionais e de Espessuras

As figuras a seguir apresentam etapas dos trabalhos de medições de espessura do equipamento.



Figura 20 Medição de espessura – Região dos feixes tubulares



Figura 21 Medição de espessura – Região do costado

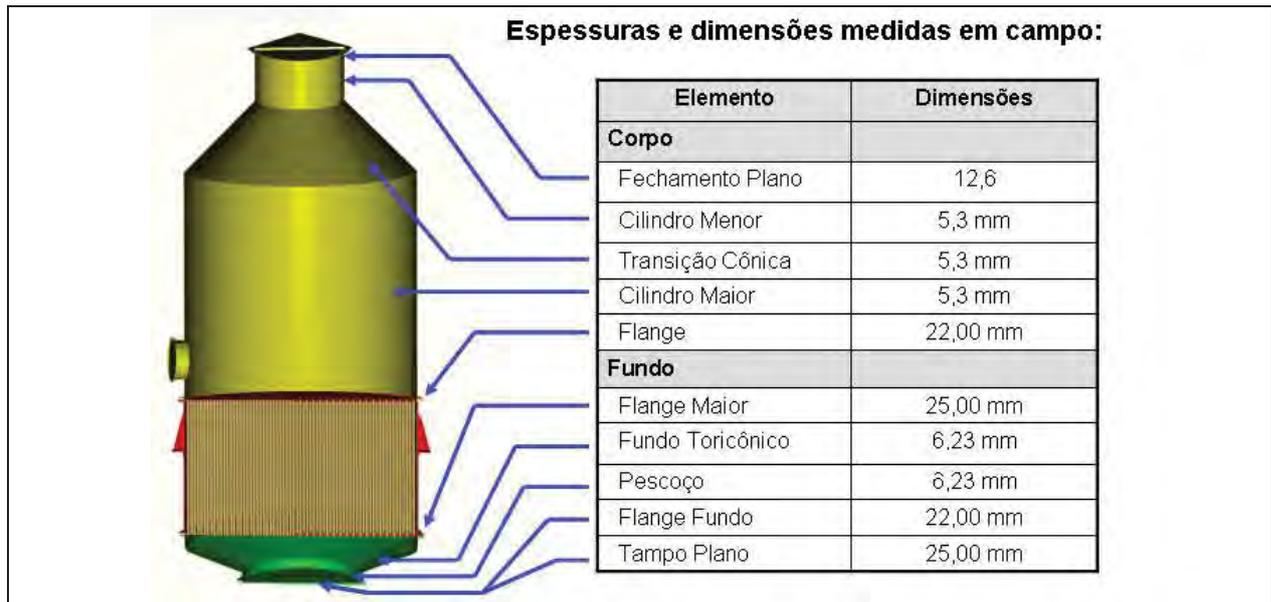


Figura 22 Medição de espessura – Resultados de inspeção de costado

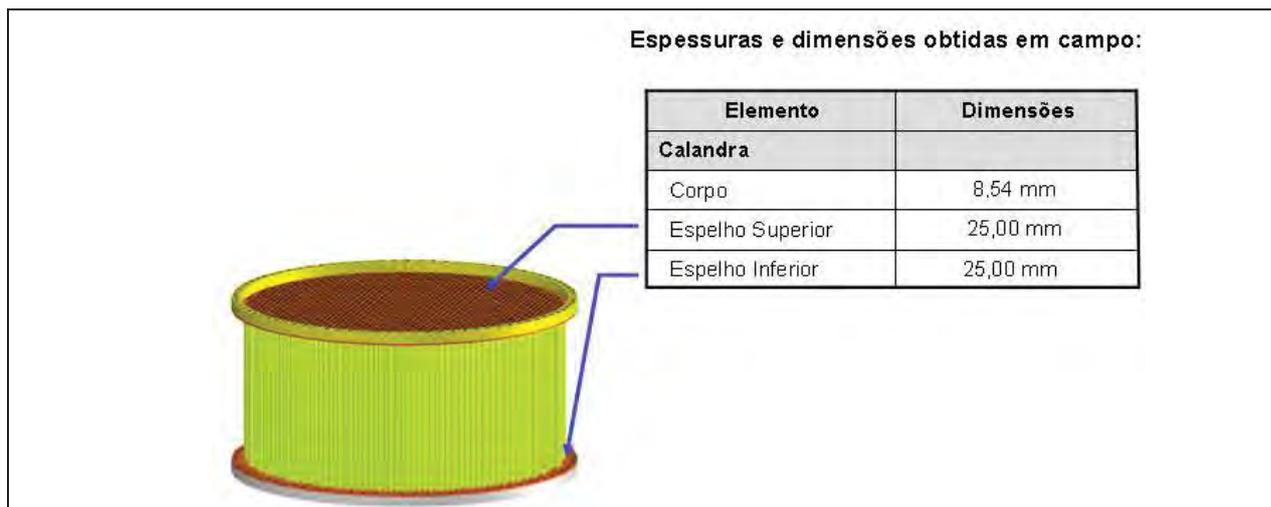


Figura 23 Medição de espessura – Resultados de inspeção de calandra

3.7 Enquadramento – NR13

O enquadramento de equipamentos estáticos como o apresentado neste trabalho estão atualmente definidos pela Norma Regulamentadora Número 13 do Ministério do Trabalho (NR-13) e baseado em seus fundamentos define-se:

Considerando o parágrafo 13.5.6 da respectiva Norma Regulamentadora estabelece que:

“Ao completar 25 (vinte e cinco) anos de uso, na sua inspeção subsequente, as caldeiras devem ser submetidas à rigorosa avaliação de integridade para determinar a sua vida remanescente e novos prazos máximos para inspeção, caso ainda estejam em condições de uso.”

Conforme Anexo III no item (a) do parágrafo (1) da respectiva Norma Regulamentadora número 13 – NR-13 menciona:

“(a) qualquer vaso cujo produto “P.V” seja superior a 8 (oito) onde “P” é a máxima pressão de operação em kPa e “V” o seu volume geométrico interno em m³, incluindo:

- *- permutadores de calor, evaporadores e similares;”*

Considerando assim a verificação e as especificações descritas na respectiva norma regulamentadora e a partir dos resultados obtidos em campo podemos através destes parâmetros enquadrar o equipamento conforme a norma.

Deste modo atentando-se as especificações da norma temos para:

Calandra.

- Pressão Máxima = 39,23 kPa
- Volume = 13.500L = 13,50 m³

Calculando o produto P x V temos:

- $PV = 39,23 \times 13,50 = 529,61 > 8 \Rightarrow$ **NR-13 aplicável.**

Corpo:

- Pressão Máxima (Vácuo) = 12 inHg (40,64 kPa)
- Volume = 30.000L = 30,00 m³

Calculando o produto P x V temos:

- Vácuo \Rightarrow **NR-13 aplicável**

3.8 Dimensionamento Normalizado– ASME VIII div I

Verifica-se que o equipamento está enquadrado pela NR13, além disso considerando sua característica operacional podemos dimensioná-lo utilizando-se de normas como por exemplo a do ASME VIII div I para seu costado e calandra e demais normas para suas conexões, deste modo considerando as características de operação do equipamento em estudo temos:

Condições operacionais do Evaporador

- Pressão no Corpo = 12 pol. Hg = 40,64 kPa (Vácuo)
- Pressão Calandra = 0,4 kgf./cm² = 39,23 kPa
- Temperatura = 93°C

Limites da Norma ASME Seção VIII, Div. I

- Pressão Máxima = 20 MPa = 20.000 kPa
- Pressão Mínima = 100 kPa

Vasos com pressões de projeto menores do que 100 kPa: podem ser calculados pela norma e vasos com pressões de projeto maiores do que 20 MPa: devem ser analisados por outros procedimentos além dos especificados pela norma.

Para dimensionar o Evaporador conforme norma ASME-VIII - Div. 1 exige-se:

1º - Assumir materiais compatíveis com a norma como por exemplo:

- SA-36 para espessuras até 16mm.
- SA-285 Grau C para espessuras acima de 16mm.
- SA-178 Grau A para os tubos da calandra.
- SA-106 Grau B para os bocais.
- SA-105 para as conexões e flanges forjados.
- SA-325 para os parafusos e prisoneiros.

2º - Desprezar elementos de reforço não padronizados como por exemplo:

- Reforços Radiais em tampos planos e reforços externos não circunferenciais como mostrados abaixo no equipamento analisado.



Figura 24 Detalhes de reforços não padronizados

3º - Assumir detalhes de solda

- Soldas de penetração total nos bocais e reforços.
- Soldas no corpo do vaso são do Tipo 1.
- Soldas em juntas de ângulo no corpo do vaso foram executadas com procedimento que garante a mesma eficiência de junta de uma solda Tipo 1

Onde Soldas do tipo -1 são soldas de topo em ambos os lados da chapa, com penetração total do cordão de solda. Pode ser inspecionada ou não por radiografia.

4º – Verificação de conformidades geométricas

- Raio de bordo menor do que 6% do diâmetro externo da base da transição cônica.
- Semi-ângulo do vértice dos cones maior do que 60º.

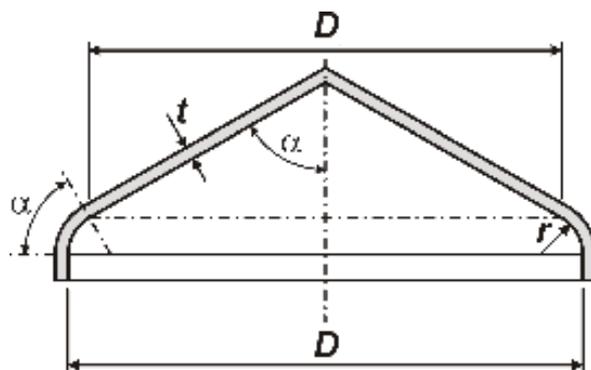


Figura 25 Padrão geométrico para comparação

Como a geometria original do equipamento não permite o cálculo direto pela norma, foi necessário adequar algumas dimensões do vaso para permitir o cálculo comparativo.

- Raio de bordo igual a 100 mm, menor do que o valor mínimo que é igual a 184mm
- Semi-ângulo do vértice do tampo de fundo igual a 69º. O tampo será calculado como um tampo plano

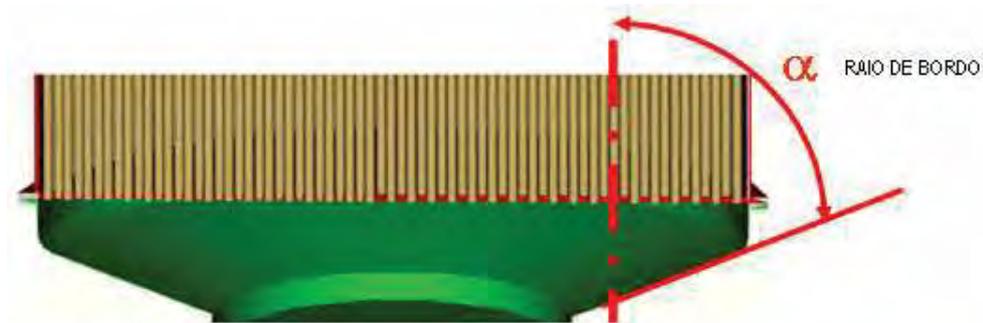


Figura 26 Raio de bordo de fundo de equipamento.

Após as adequações necessárias, o equipamento foi dimensionado de acordo com os seguintes parágrafos na norma:

- Calandra: UG-27, cilindros sob pressão interna.
- Corpo: UG-28, cilindros sob pressão externa.
- Corpo: UG-33, cones sob pressão externa.
- Tampos Planos: UG-34, para pressão interna e externa.
- Flanges: Apêndice 2.
- Espelho e Tubos: Seção UHX.

Na figura 3.31 podemos verificar as espessuras obtidas caso o equipamento estivesse sendo dimensionado para fabricação conforme norma ASME VIII div I.

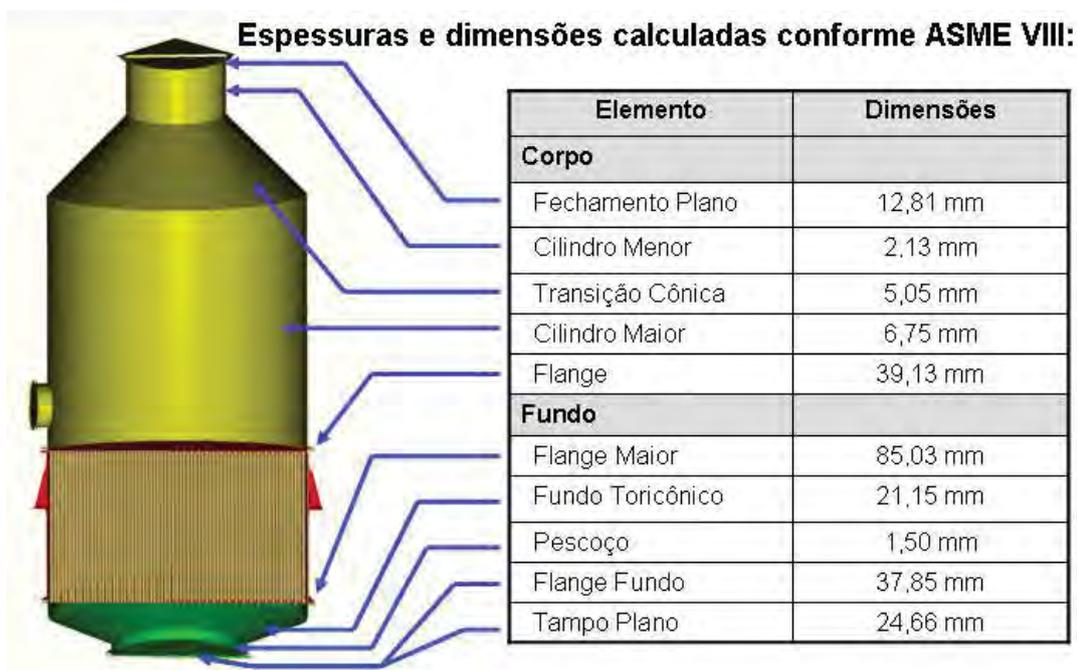


Figura 27 Espessuras e Dimensões conforme ASME VIII

Desta forma a aquisição das medidas descritas nos mostra como seria o dimensional caso o mesmo estivesse normalizado, e que de modo comparativo poderemos verificar as adequações a serem executadas no equipamento em estudo e também se as mesmas forem possíveis.

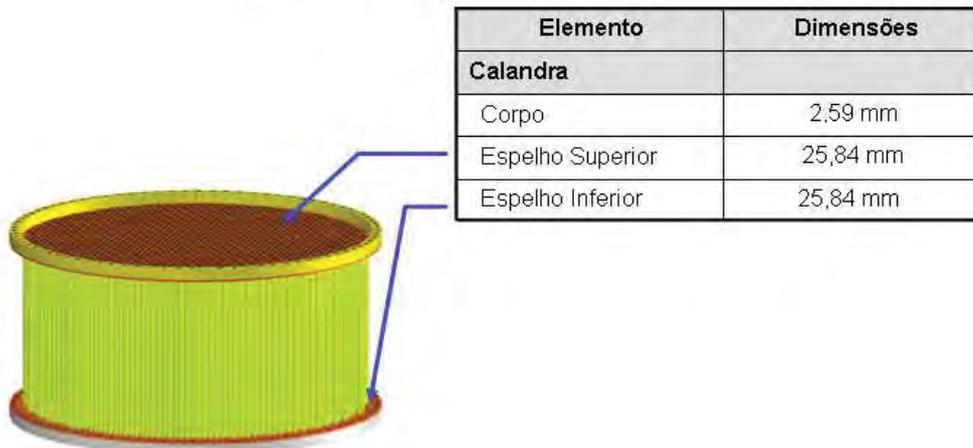
Espessuras e dimensões calculadas conforme ASME VIII:

Figura 28

Espessuras e Dimensões de calandra conforme ASME VIII

3.9 Análise Estrutural – Modelagem pelo Método dos Elementos Finitos

Toda a análise estrutural foi desenvolvida pelo método dos elementos finitos com o uso do programa COSMOS, sendo que o modelo da estrutura fora gerado tendo o eixo Y para a definição da altura e o plano XZ para a base do equipamento.

No modelo global da estrutura foram utilizados elementos de casca quadrilaterais (SHELL4) e quadrilaterais espessos (SHELL4T), elementos rígidos (RBAR) e elementos de viga tridimensionais (BEAM3D), todos com seis graus de liberdade por nó.. As condições de contorno consistem na restrição às translações y e z nos nós dos elementos de sustentação da estrutura e nos bocais modelados

O modelo de elementos finitos utilizado, os carregamentos e as condições de contorno podem ser visualizados nas figuras a seguir.

A figura 29 apresenta uma vista geral do modelo de elementos finitos do evaporador.



Figura 29 Modelo Geral do Equipamento

Na figura 30 é apresentado em detalhe o modelo da estruturas em corte



Figura 30 Modelo do Equipamento em Corte

Logo abaixo nas figuras 31 a 33 estão apresentados os detalhes de boca de visita, dutos de admissão e pontos de sustentação da estrutura.



Figura 31 Modelo de Elementos Finitos com Detalhes

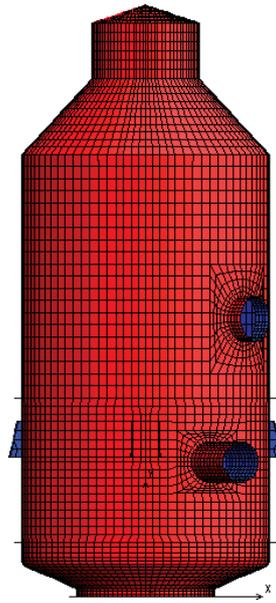


Figura 32 Vista lateral de Modelo de Elementos Finitos

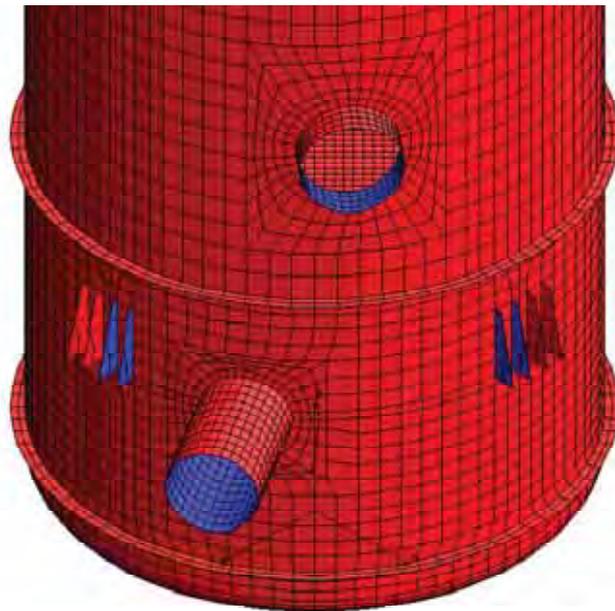


Figura 33 Modelo de Elementos Finitos com Detalhes

Abaixo nas figuras modelo contemplando detalhes da aplicação das condições de contorno utilizadas nas análises



Figura 34 Modelo de Elementos Finitos – Condições de contorno

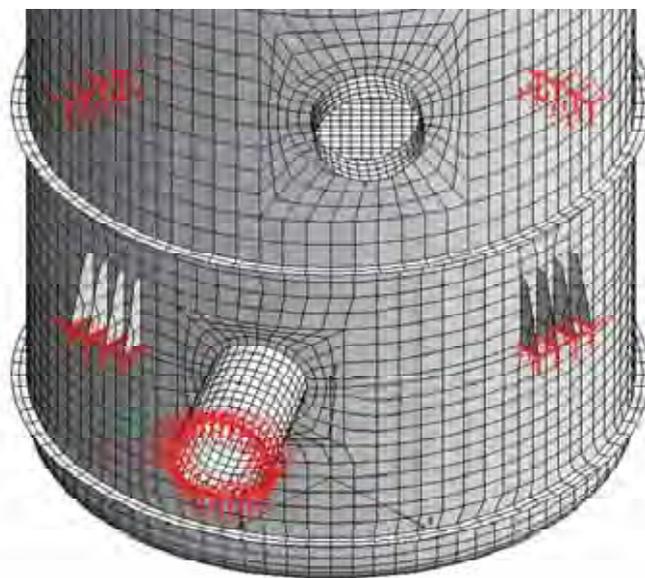


Figura 35 Detalhes das condições de contorno aplicadas

A seguir nas figuras 35 e 36 estão caracterizados os carregamentos de pressão operacional do equipamento



Figura 35 Aplicação de carregamento de pressão

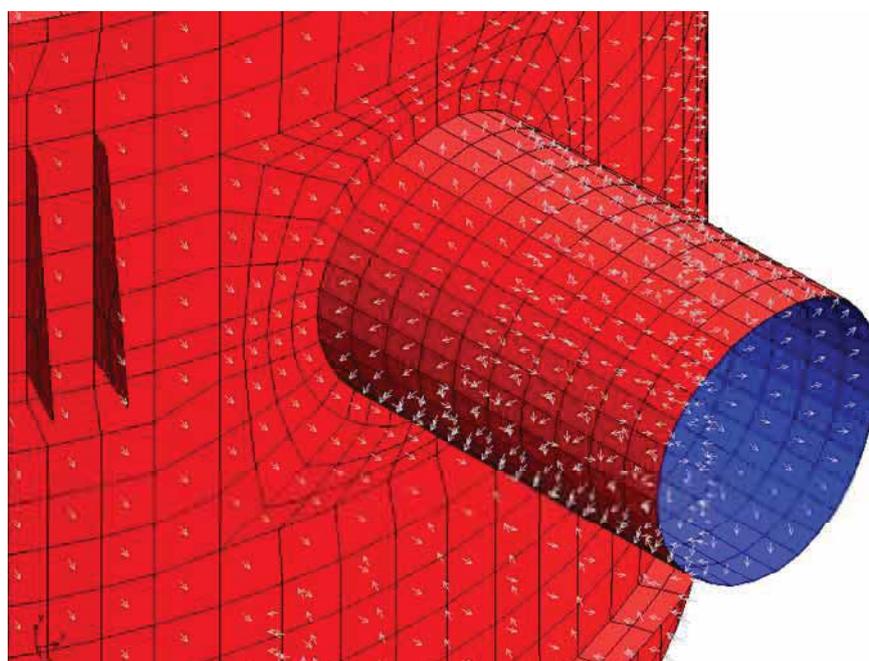


Figura 36 Modelo com detalhe de pressão aplicada

A seguir nas figuras 37 e 38 estão caracterizados os carregamentos térmicos de operação no equipamento



Figura 37 Aplicação de carregamento de temperatura

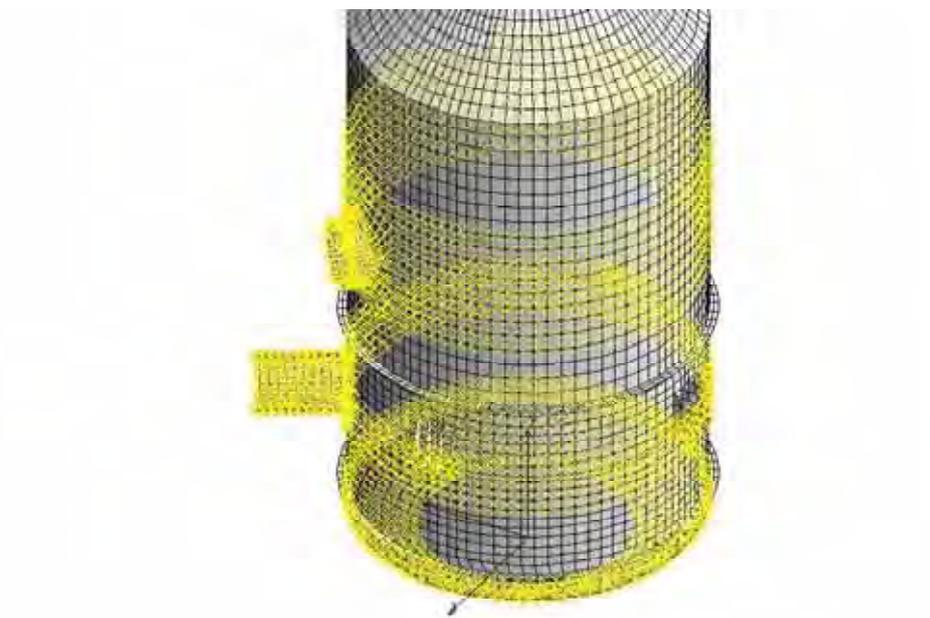


Figura 38 Modelo com detalhe de pressão aplicada

4 RESULTADOS:

4.1 Resultados Comparativos – Inspeção x Cálculo Normalizado:

O comparativo em questão desenvolvido em relação aos parâmetros obtidos nas inspeções dimensionais e de espessuras contra os resultados obtidos nos cálculos efetuados conforme norma ASME VIII div I e com isso pode-se identificar para o equipamento em questão se o mesmo está plenamente conforme, se necessita de adequação ou ainda se deverá ser utilizado outro parâmetro de análise e ou até mesmo em último caso se o equipamento deverá ser sucateado.

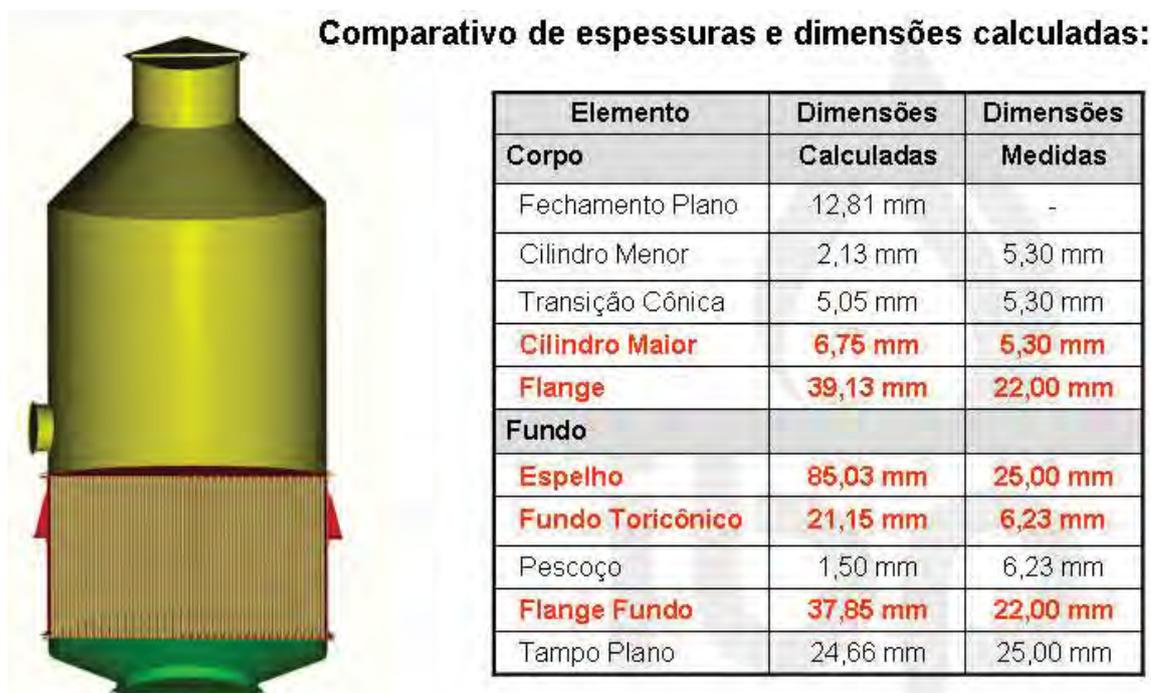


Figura 39 Dimensões de costado – Calculadas x Medidas em Campo

Indicamos os resultados conforme planilha da figura acima de forma comparativa para identificarmos possíveis divergências entre os valores desenvolvidos via softwares que contemplam os parâmetros do ASME VIII divisão I com os encontrados através das inspeções e medições geométricas e de espessuras para o equipamento, tanto do costado quanto da calandra apresentada a seguir.



Figura 40 Dimensões de calandra – Calculadas x Medidas em Campo

4.2 Resultados obtidos através do Método dos Elementos Finitos:

A análise estrutural estática do evaporador efetuada através do método dos elementos finitos com o uso do software COSMOS apresentou resultados de tensões conforme apresentados nas figuras de modelo identificadas abaixo.

De fato é evidente que a acuracidade dos resultados obtidos é diretamente relacionada com a confiabilidade dos resultados obtidos nos trabalhos de inspeções, principalmente por se tratar de resultados que dependem da geometria e das espessuras aplicadas aos modelos e sendo assim quão mais próximo o modelo estiver da situação real, mais coerente serão os resultados obtidos nas análises.

4.3 Resultados obtidos - Carregamentos Térmicos:

Na figura 41 apresentada a seguir pode-se verificar a distribuição da temperatura resultante ao carregamento térmico aplicado no modelo numérico tanto para a região da calandra e do costado

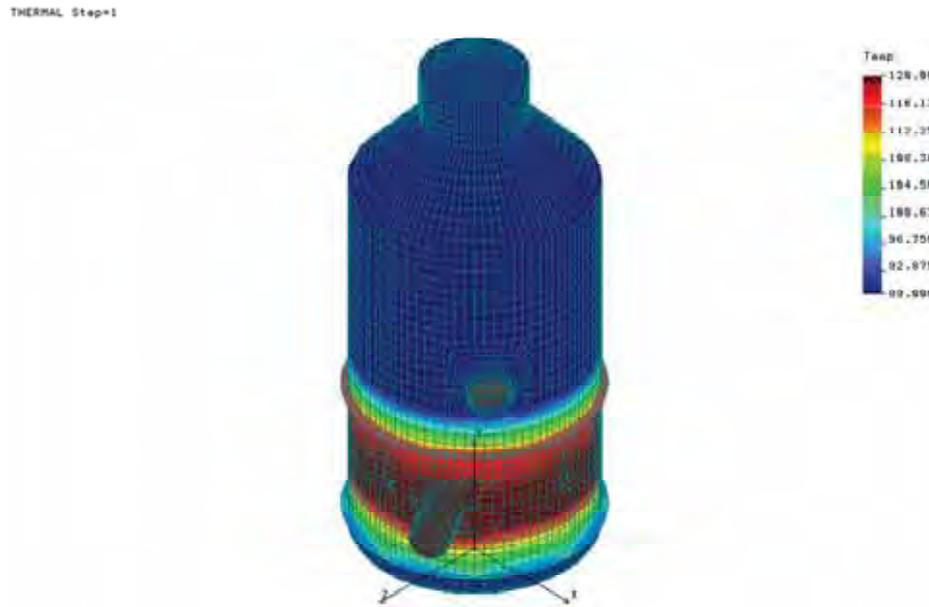


Figura 41 Distribuição de temperatura para o equipamento.

Através da distribuição de temperatura aplicada ao modelo podemos observar na figura 42 apresentada a seguir o resultado das tensões em função da distribuição de temperatura na região da calandra e costado, para a melhor visualização dos resultados as tensões nos dois casos foram limitadas em 150 MPa .



Figura 42 Tensões de Von Mises devido à temperatura aplicada.

Importante salientar que para este caso de carga os valores apresentados são identificados isoladamente com o objetivo de se identificar dentre as cargas em que o equipamento está sendo solicitado em qual destes carregamentos apresentam maior influência no que diz respeito a efeitos de tensões na estrutura.

Por meio da análise visual da figura 42 verifica-se que as regiões de concentração de tensões para este caso de carga estão exatamente na região da calandra, mais precisamente na região de sustentação do equipamento e principalmente na região dos bocais.

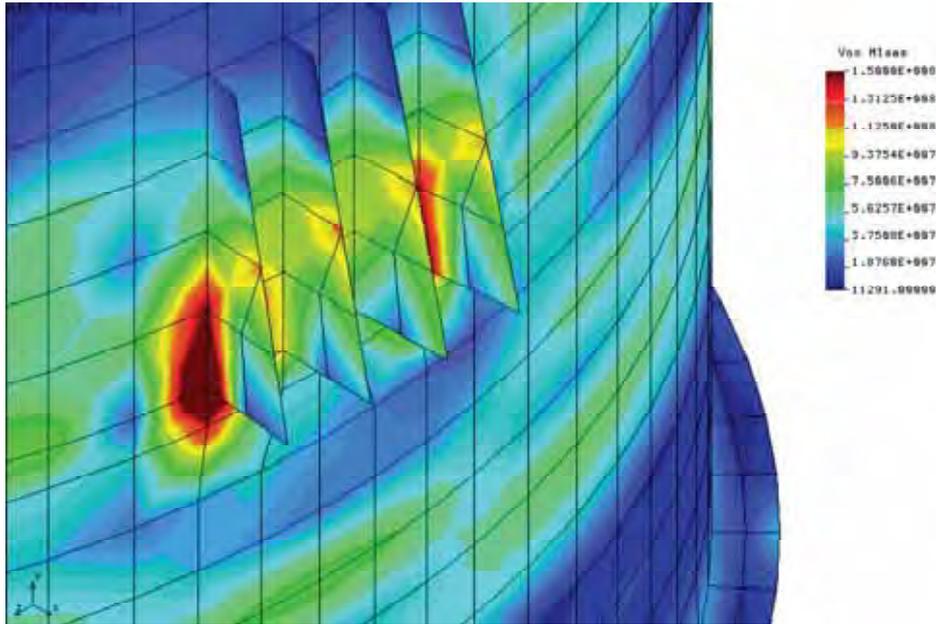


Figura 43 Detalhe de Tensões - Região de Apoio do Equipamento.

Novamente e em detalhe, considerando a análise visual da figura 43 verifica-se a concentração de tensões decorrentes das cargas térmicas para a região da calandra, os pontos de sustentação do equipamento.

4.4 Resultados obtidos - Carregamentos de Pressão e Carga de Produto:

Nas figuras 44 e 47 apresentadas a seguir podem-se verificar os resultados das tensões obtidas em função das cargas de produto e de pressão de operação no modelo numérico do evaporador tanto na região da calandra quanto do costado



Figura 44 Detalhe de Tensões de Von Mises – Limitada em 150 MPa.



Figura 45 Detalhe de Tensões de Von Mises – Limitada em 150 MPa.

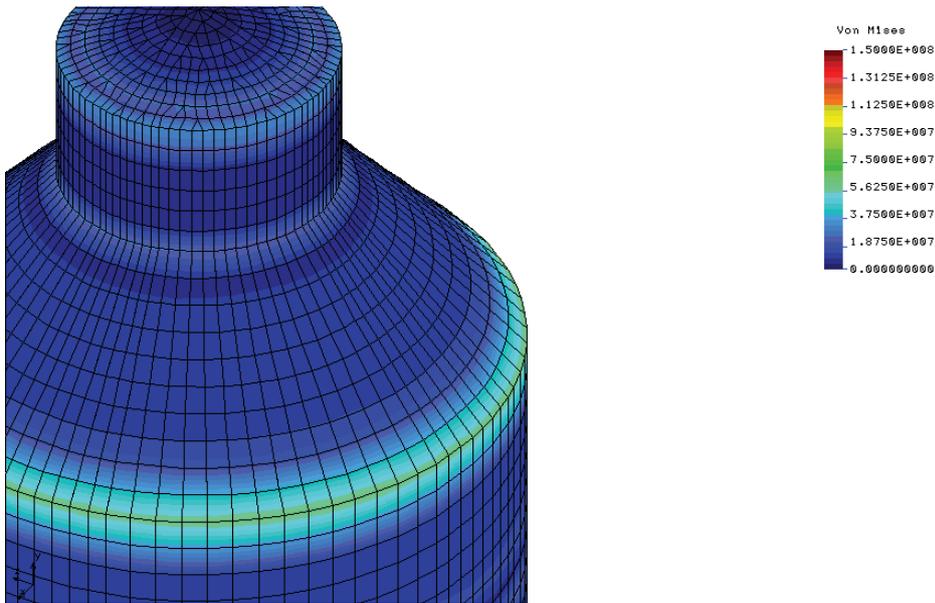


Figura 46 Detalhe de Tensões – Tampo Superior – Limitada em 150 MPa.



Figura 47 Detalhe de Tensões – Tampo Inferior – Limitada em 150 MPa.

4.5 Resultados obtidos - Carregamentos Combinados

Nas figuras 48 a 49 apresentadas a seguir podem-se verificar os resultados das tensões obtidas em função dos carregamentos combinados, com especial atenção para a figura 4.10 onde se identificam resultados acima dos limites de plastificação do material.



Figura 48 Resultado de Tensões – Carregamento Combinado.

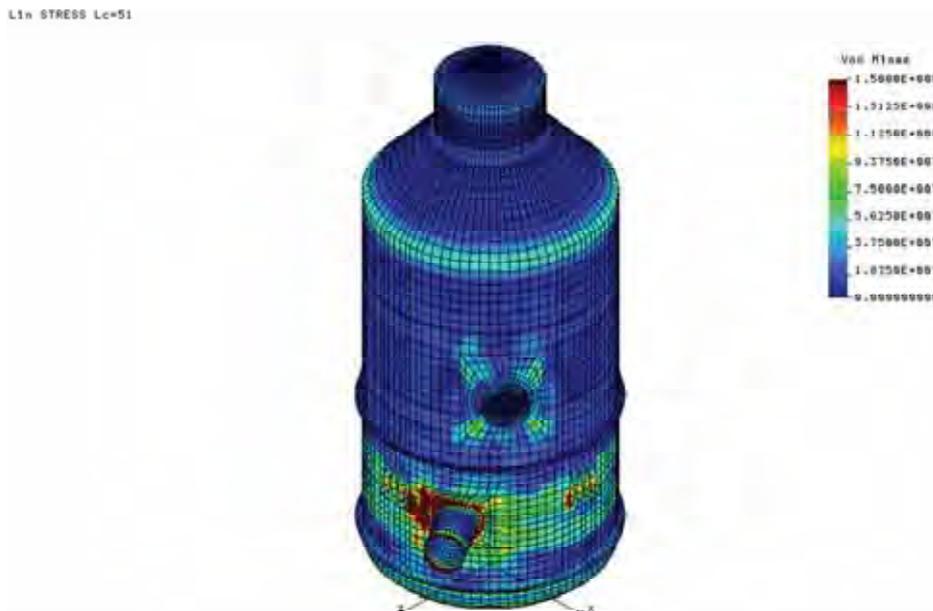


Figura 49 Resultado de Tensões -- Limitada em 150 MPa.

5 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES:

- No trabalho de inspeção constatou-se que o equipamento apresenta inúmeros problemas de desgaste e corrosão, além de incompatibilidades de fabricação e montagem;
- A inspeção realizada mostra que o equipamento deverá atender a NR 13, porém como é um equipamento antigo, o mesmo não foi projetado e muito menos fabricado para atender a NR13, necessitando para isso de adequações de projeto, documentação e até mesmo de operação.
- De modo geral o equipamento não se enquadra no ASME VIII-div.1 e ainda pelo estudo de tensões utilizando o método dos elementos finitos e considerando a AISC para os limites de tensões, os resultados das tensões obtidas no modelo numérico mostraram que as tensões estão acima dos limites admissíveis em regiões de costado, sustentação e de fechamentos do equipamento;
- Em princípio o estudo desenvolvido nos mostra que o trabalho de inspeção estrutural de equipamentos estáticos no setor sucro-alcooleiro é de grande importância para identificar e garantir a integridade estrutural desses equipamentos, considerando-se quando possível a comparações baseado em normas específicas demonstra que este trabalho de qualificação e avaliação para posterior verificação caso necessário com o método dos elementos finitos oferece uma excelente alternativa para a determinação das características reais destes equipamentos em operação e por sua vez da equalização de eventuais problemas que possam comprometer o funcionamento ou mesmo a segurança operacional do mesmo.

- Essa metodologia aplicada em equipamentos em geral, inicialmente na elaboração de inspeção visual sensitiva, agregada posteriormente através de técnicas de ensaios não destrutivos, pode ser aplicada também na avaliação de outros equipamentos, como por exemplo, equipamentos portuários e de mineração.
- Quanto à aplicação do método dos elementos finitos em se tratando de uma ferramenta já difundida e de teoria aceitável nos meios acadêmicos e profissionais esta alternativa final para avaliação destes equipamentos se torna um grande aliado para a solução de problemas deste porte na indústria em geral, mas deve-se também considerar e evidente que as informações obtidas em campo, principalmente de equipamentos sem históricos e sem detalhamento de fabricação e montagem como o deste trabalho se faz extremamente necessário e portanto para a sua aplicação deve-se ter alta confiança nas informações levantadas para somente assim efetivar a geração de modelos numéricos coerentes, desenvolverem também análises compatíveis com a realidade apresentada e com isso tecer considerações mais próximas da realidade.
- Os resultados obtidos nos carregamentos combinados apresentaram valores bem acima dos limites de escoamento do material, considerando-se que as análises desenvolvidas para este estudo foram análises estáticas e que neste caso as análises necessariamente seriam não lineares e com isso os resultados obtidos seriam relativamente menores aos encontrados, mas para o estudo em questão podemos considerar pois o objetivo do mesmo era identificar que as geometrias do equipamento deveriam ser re-projetadas e caracterizadas conforme norma específica obedecendo é claro os parâmetros da norma.
- Conforme sugestão apresentada os valores definidos conforme ASME VIII div I serão as dimensões de equipamento semelhante ao analisado caso seja projetado nos dias de hoje, quanto às suas características operacionais e sua geometria mantida.

REFERÊNCIAS:

- ANDREUCCI, Ricardo; **Ensaio por Ultra-Som - Aplicações Industriais**, Ed Julho de 2008 – Abende.
- BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON JR, E.Russel. **Mecânica Vetorial para Engenheiro**. 5ª. Ed. São Paulo: Makron Books, 1994.
- BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON JR, E.Russel. **Resistência dos materiais**. 4ª. Ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006
- CALLISTER, William D. Jr.; WILEY, John. **Materials Science and Engineering**. 7ª. Ed. New York. 2008.
- DASSAULT SYSTEMES. **Geostar**, 2009.
- HIBBELER, Russel Charles. **Resistência dos Materiais**. 5ª. Ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004.
- MATWEB **Material Property Data**. Disponível em <<http://www.matweb.com>>. Acesso em 16 de Abril de 2011.
- NASH, William A.; **Resistência dos Materiais** – Coleção Schaum - McGraw-Hill 2ª Ed. -1976.
- TIMOSHENKO, Stephen P.; GERE, James M. **Theory of Elastic Stability**. 2ª. Ed. McGraw-Hill Book Company. 1961.