

**MARCOS ANTONIO FIGUEIRA**

**DETERMINAÇÃO COMPARATIVA DO GRAU DE DEFORMAÇÃO  
PLÁSTICA APLICADO A COMPONENTES OBTIDOS POR  
CONFORMAÇÃO**

Guaratinguetá

2015

MARCOS ANTONIO FIGUEIRA

DETERMINAÇÃO COMPARATIVA DO GRAU DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA  
APLICADO A COMPONENTES OBTIDOS POR CONFORMAÇÃO

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. Peterson Luiz Ferrandini

Guaratinguetá

2015

F475d Figueira, Marcos Antonio  
Determinação comparativa do grau de deformação plástica aplicado a componentes obtidos por conformação / Marcos Antonio Figueira – Guaratinguetá, 2015.  
45 f : il.  
Bibliografia: f. 44-45

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.  
Orientador: Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini

1. Vasos de pressão 2. Deformações (Mecânica) 3. Conformação de alta energia I. Título

CDU 621.643.2

**Determinação Comparativa do Grau de Deformação Plástica Aplicado a  
Componentes Obtidos por Conformação**

**Marcos Antonio Figueira**

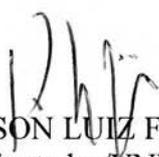
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

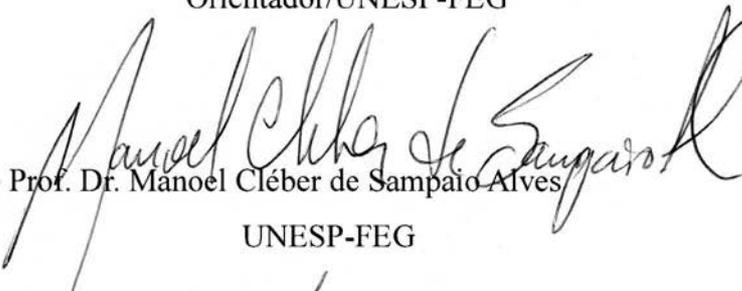
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

  
Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS

Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. PETERSON LUIZ FERRANDINI  
Orientador/UNESP-FEG

  
Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves

UNESP-FEG

  
Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza

UNESP-FEG

**Janeiro de 2016**

**DADOS CURRICULARES**  
**MARCOS ANTONIO FIGUEIRA**

NASCIMENTO 09.08.1987 – LAGOINHA / SP

FILIAÇÃO Antonio Assis Figueira  
Maria Celina Ribeiro Figueira

2005/2007 Curso Técnico em Mecânica  
Colégio SENAI “Félix Guisard”

2010/2015 Curso de Graduação  
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – Universidade  
Estadual Paulista “Julio Mesquita Filho”

## **Dedicatória**

em especial à minha esposa Eliana, aos meus filhos Luiza e Antonio, aos meus pais Antonio e Celina, e irmãos Júlio e Daiane que sempre me apoiaram em todos os momentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Antonio e Maria Celina, por me criarem, me apoiarem, me incentivarem e me darem condições de estudar, em todos os momentos, mesmo com todas as dificuldades enfrentadas.

À Sra. Eliana Azevedo dos Santos Figueira, por estar sempre ao meu lado em todos esses anos de estudos na Universidade, pelo apoio, pela paciência e incentivos cedidos nas longas noites e fins de semana de estudos.

Aos meus filhos Luiza e Antonio, que têm sido e sempre serão a principal fonte de motivação para a busca do sucesso profissional e pessoal.

Aos meus colegas de faculdade e trabalho, especialmente ao Sr. Tiago Correa Silva e à Sra Tamara Fernandes, que sempre estiveram presentes nessa jornada, nos momentos bons e difíceis, me apoiando e fazendo com que eu não desistisse dos objetivos traçados.

Ao Prof. Dr. Peterson pela sua disponibilidade e por contribuir com dicas essenciais como orientador deste trabalho de graduação.

De modo especial à equipe da Engenharia Industrial e da Produção da Confab Equipamentos em Pindamonhangaba, por terem me proporcionado a oportunidade de desenvolvimento profissional durante esses últimos 11 anos.

Por fim, de grande importância, agradeço a Deus por ter colocado todas essas pessoas em minha vida, me dando forças pra continuar mesmo nos momentos mais difíceis, me dando sabedoria, saúde e vitalidade.

## Epígrafe

“Há apenas uma maneira de evitar críticas:  
não fazer, não falar e  
não ser nada”  
Aristóteles

FIGUEIRA, Marcos Antonio. **Determinação comparativa do grau de deformação plástica aplicado a componentes obtidos por conformação**. 2015. 45 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

### **RESUMO**

O processo de fabricação dos componentes de um vaso de pressão tem grande importância na eficiência durante a operação e vida útil do equipamento. Considerando esta afirmação, o objetivo do trabalho foi analisar os métodos para determinação do grau de deformação de componentes conformados, através da medição nos próprios componentes e posterior comparação dos resultados com os valores encontrados em normas de fabricação de vasos de pressão. Neste estudo foi acompanhado todo o processo de fabricação do componente de um vaso de pressão denominado tampo industrial – também conhecido como cabeceira. Através da metodologia obtida em literaturas foi possível executar as medições das deformações relativa e verdadeira desses componentes e comparar aos resultados obtidos através de equações apresentadas nas normas de fabricação AD-Merkblatt e ASME (para vasos de pressão). Os resultados encontrados também foram comparados com a metodologia verdadeira considerando a deformação pelo comprimento da malha empírica e pela espessura dos componentes. Conclui-se do estudo, que embora existam os métodos empíricos de medição do grau de deformação em componentes conformados plasticamente, deve-se sempre optar pela metodologia imposta pela norma de fabricação do componente prevista no projeto, e isso é observado através da aplicação das diferentes metodologias e na comparação entre os resultados encontrados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Grau de Deformação. Tampo Industrial. Rebordeamento. Vaso de Pressão.

FIGUEIRA, Marcos Antonio. **Comparative determination of plastic deformation rate applied to the components made by forming**. 2015. 45 f. Graduate Word (Graduate Work in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

### **ABSTRACT**

The manufacturing process of components of Pressure Vessels has a great importance in the efficiency during the operation and life cycle of the equipment. Taking this into account, the objective of this dissertation was to analyze the methods to determine the strain rate in formed components by measuring the components themselves, and posterior results comparison with the values found in manufacturing standards of Pressure vessels. In this study the whole manufacturing process of a component from a pressure vessel, known as Head or End, was accompanied. Using the methodology obtained from literatures it was possible to execute the relative and logarithmic deformation measurements of these components and compare with the obtained results by means of equations presented in the Standards as AD-Merkblatt and ASME (for pressure vessels). The found results were also compared with the logarithmic methodology, taking into account the deformation of the empirical mesh and the thickness of the components studied. It is possible to conclude from this study that despite the existence of empirical methods of measurement of strain rate in components plastically formed, it is recommended the adoption in all situation of the component manufacturing standard. It can be noticed and explained during the development of this study and through the results found.

**KEYWORDS:** Strain Rate. Head. Spinning. Vessel Pressure.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Reator CrMoV.....	17
Figura 2: Vasos de Pressão – Foto cedida pela Confab Equipamentos.....	18
Figura 3: Tipos de Vasos de Pressão.....	19
Figura 4: Referências Dimensionais de um Tampo Torisférico.....	20
Figura 5: Tamos Torisféricos Conformados.....	20
Figura 6: Referências Dimensionais de um tampo Semi-elipsoidal.....	21
Figura 7: Tamos Semi Elipsoidais Conformados.....	21
Figura 8: Referências Dimensionais de um Tampo Hemisférico.....	22
Figura 9: Tampo Hemisférico conformado.....	22
Figura 10: Gomos de calota ajustados para a soldagem.....	23
Figura 11: Abaulamento de disco em Prensa Hidráulica.....	24
Figura 12: Processo de rebordeamento.....	25
Figura 13: Traçagem da malha empírica.....	32
Figura 14: Verificação da traçagem da malha empírica.....	33
Figura 15: Disco abaulado.....	33
Figura 16: Limpeza dos rolos da rebordeadeira.....	34
Figura 17: Lubrificação dos rolos com margarina sem sal.....	34
Figura 18: Rebordeamento dos discos abaulados.....	35

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Composição química do Aço 1.4550.....	28
Quadro 2: Composição química Aço 1.4541.....	29
Quadro 3: Composição química do Incoloy 825.....	29
Quadro 4: Composição química do material P-275 NH.....	30
Quadro 5: Relação de tampos conformados.....	31
Quadro 6: Valores encontrados na malha empírica após a conformação.....	36
Quadro 7: Valores do grau de deformação relativa.....	36
Quadro 8: Valores do grau de deformação verdadeira.....	37
Quadro 9: Valores do grau de deformação verdadeira considerando variação de comprimento e de espessura.....	38
Quadro 10: Valores do grau de deformação calculado pelas normas ASME e AD-Merkblatt.....	39
Quadro 11: Valores dos graus de deformação calculados.....	39
Quadro 12: Resultados de grau de deformação dos materiais ferríticos.....	40
Quadro 13: Resultados de grau de deformação dos materiais austeníticos.....	40
Quadro 14: Graus de deformação de Tampos Torisféricos.....	41
Quadro 15: Graus de deformação de Tampos Semi-Elipsoidal.....	41

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Grau de deformação pelo método da Deformação Verdadeira .....	26
Equação 2: Grau de deformação pelo método da Deformação Relativa .....	26
Equação 3: Grau de Deformação de componentes rebordeados .....	26
Equação 4: Grau de Deformação de componentes prensados .....	27
Equação 5: Equação do grau de deformação conforme norma AD-Merkblatt 7/2 .....	28

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD-Merkblatt – Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter - Merkblatt;

ASME VIII Div.2 Ed.2013 - American Society of Mechanical Engineers VIII Divisão 2  
Edição 2013;

$D_b$  – diâmetro do disco antes da conformação;

$D_0$  – diâmetro externo do produto conformado;

$D_m$  – diâmetro médio final de conformação do componente

DIN - Deutsches Institut für Normung;

$\epsilon_f$  - Taxa de deformação calculada;

$e$  – grau de deformação;

$l_1$ =comprimento após a deformação;

$l_0$ = comprimento antes da deformação;

$R_f$  – Raio médio final da conformação;

$R_0$  – Raio médio original do disco, igual à infinito para uma chapa plana;

$s$  – espessura do material;

$t$  - espessura nominal da chapa;

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	14
1.2	MÉTODO .....	14
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS DO TRABALHO</b> .....	<b>16</b>
2.1	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	16
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
3.1	VASOS DE PRESSÃO.....	17
3.2	TAMPÓS INDUSTRIAIS .....	19
3.3	CONFORMAÇÃO MECÂNICA.....	22
3.4	GRAU DE ENCRUAMENTO .....	25
3.5	MATERIAIS UTILIZADOS .....	28
<b>4</b>	<b>MÉTODO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>36</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>43</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>44</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

No atual mercado competitivo, não basta contar apenas com uma respeitada qualidade do produto; para o sucesso de uma empresa, é de crucial importância que essa qualidade seja executada no menor custo de fabricação possível, com respeito às normas de fabricação.

Desta forma, torna-se imprescindível o estudo e conhecimento aprofundado das normas de fabricação aplicadas aos processos de fabricação.

Este trabalho foi motivado pelas dificuldades encontradas na indústria para a determinação do grau de deformação plástica aplicado a componentes conformados, principalmente pelo processo de rebordeamento. Escolheu-se determinar o grau de deformação de componentes rebordeados pelo fato do processo exigir muito do material sob trabalho, já que a solicitação durante a conformação é alta se comparada a outros processos de conformação plástica utilizados em caldeiraria.

## 1.2 MÉTODO

O trabalho foi realizado baseando-se nos resultados de medições executadas em ambiente fabril. O processo de conformação dos tampos estudados foi executado em uma empresa com equipamento específico para a realização de tal operação, na cidade de Piracicaba, onde todo esse trabalho de conformação foi acompanhado pessoalmente. Com o tampo conformado, o processo de medição final do traçado empírico foi executado na empresa Confab.

O processo de conformação por rebordeamento foi aplicado a um disco de chapa de aço carbono e um disco de aço inoxidável, ambos de espessura de 12 mm. O processo de rebordeamento consiste na conformação de um disco plano fazendo com que sua extremidade adquira a forma cilíndrica, ou de um copo.

Para a determinação do grau de deformação pelo método empírico, foi executada a medida de um traçado de referência após a conformação, utilizando uma trena métrica e determinando-se então a deformação real sofrida pelo componente. O método empírico consistiu em imprimir uma malha de elementos quadrados na face externa do componente e determinar o alongamento aplicado ao componente com base nas alterações dimensionais dos elementos de controle.

Os valores determinados empiricamente foram comparados aos valores obtidos a partir de fórmulas apresentadas nas normas AD-7/2, 7/3 e 8/1, segundo as quais o projeto foi realizado, e com suporte da norma ASME VIII Div.2 Ed.2013, também aplicável para equipamentos e vasos de pressão fabricados nacionalmente.

Tendo em vista que a Confab Equipamentos já executou este mesmo projeto no ano de 1986, foi possível ainda, comparar os resultados atuais com os obtidos naquela época, a partir da consulta em relatórios arquivados na empresa. Este último comparativo demonstra as metodologias aplicadas em cada época, revelando a mais robusta e confiável.

## **2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

Este estudo visa comparar quatro diferentes metodologias utilizadas para calcular o grau de deformação plástica em componentes conformados de vasos de pressão. Trata-se das metodologias contidas nas normas de fabricação AD-e ASME VIII Div.2 Ed.2013, da metodologia aplicada em projetos anteriores executados pela empresa Confab Equipamentos, e por fim, a metodologia do cálculo da deformação real aplicada.

### **2.1 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, explicitando as ideias principais de maneira resumida. No Capítulo 2, encontra-se a fundamentação teórica em que foi baseado o trabalho. Já no Capítulo 3, são descritos os materiais e métodos utilizados na realização dos experimentos e determinações práticas. O Capítulo 4, por sua vez, apresenta os resultados obtidos comparados aos valores encontrados nas normas consultadas, além dos comentários pertinentes. Por fim, o Capítulo 5, que apresenta as conclusões acerca do estudo realizado.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 VASOS DE PRESSÃO

Primeiramente serão apresentados alguns termos e conceitos sobre vasos de pressão e seus componentes, de grande importância para o entendimento do trabalho.

Vasos de pressão são definidos como reservatórios para contenção de pressão tanto externa, como internamente. Essa pressão pode ser obtida de uma fonte externa, ou pela aplicação de calor fornecido por uma fonte direta ou indireta, ou por qualquer combinação entre essas fontes. (TELLES, 2001)

As funções básicas de um vaso de pressão, de forma geral, são:

- Armazenamento de gases e líquidos sob pressão;
- Processamento de gases e líquidos;
- Acumulação intermediária de gases e líquidos.

Contrariamente ao que acontece com quase todos os outros equipamentos, máquinas, veículos, objetos e materiais de uso corrente, a grande maioria dos vasos de pressão não constituem um item de linha de fabricação industrial. Salvo raras exceções, os vasos são normalmente projetados e construídos por encomenda, sob medida, para atender, em cada caso, certas finalidades ou determinadas condições de desempenho. Como resultado, o projeto é quase sempre feito particularmente para cada vaso a ser construído. (TELLES, 2001)

Nas figuras 1 e 2 são demonstrados alguns vasos de pressão recém fabricados de uma indústria metalúrgica.

Figura 1: Reator CrMoV.



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS,2013)

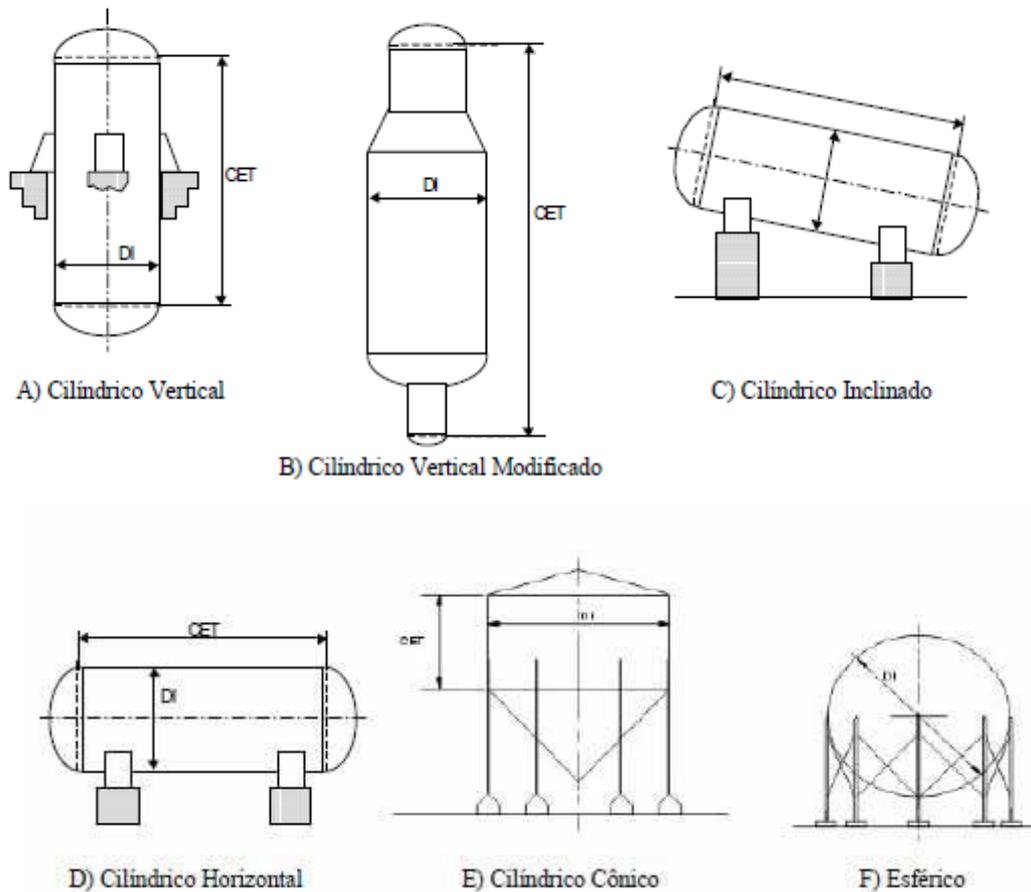
Figura 2: Vasos de Pressão – Foto cedida pela Confab Equipamentos



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Para cada aplicação ou serviço, pode-se ter um tipo de vaso de pressão específico. Os vasos mais comuns são: vasos verticais e vasos horizontais. Pode-se ter, também, algumas variações como: vasos inclinados, vasos cônicos, vasos esféricos, etc. A seguir, na figura 3, são mostradas algumas ilustrações dos tipos de vasos mais comuns fabricados atualmente.

Figura 3: Tipos de Vasos de Pressão.



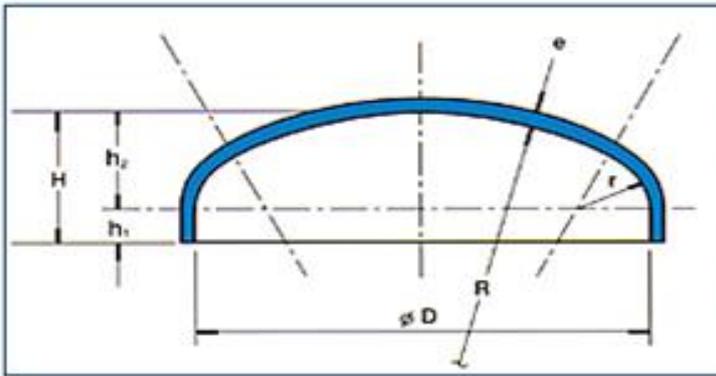
Fonte: (TELLES, 2001).

### 3.2 Tampos Industriais

Existem diversos tipos de tampos para vasos de pressão. Dentre eles, os mais comuns são os tampos conformados em formatos Torisférico, Semi-elipsoidal e Hemisférico, os quais se caracterizam por apresentarem uma suave transição para o fechamento dos corpos cilíndricos (costados) e por não possuírem pontos de concentração de tensões.

O tampo do tipo Torisférico, também chamado usualmente no meio industrial com Tampo 2:1, tem as características dimensionais apresentadas na figura 4 e alguns tampos torisféricos já conformados na figura 5.

Figura 4: Referências Dimensionais de um Tampo Torisférico.



Referência	Critério	Unidade	Observação
D	300 a 3300	mm	Tampo em disco
R	0,825.D	mm	-
r	0,154.D	mm	-

Referência	Fórmula	Unidade
$h_2$	0,25.D	mm
Disco (Ds)	de: $1,18.D + 2.h1 + 1,54.e$ para: $1,18.D + 2.h1$	mm

Fonte: (SITE: UNITAMPOS - ACESSO EM: 28/09/2015).

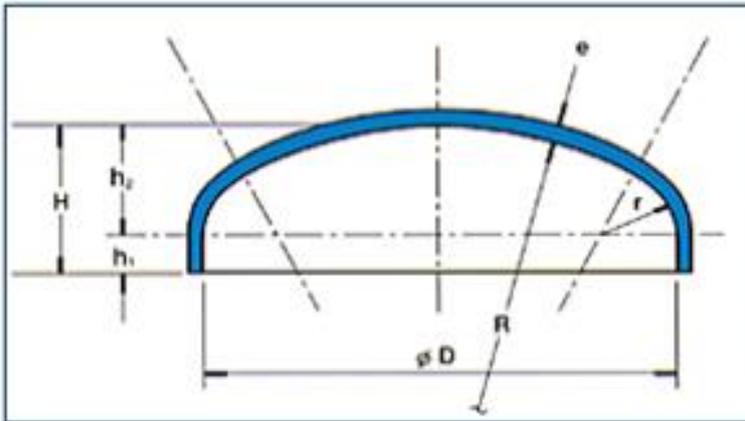
Figura 5: Tamos Torisféricos Conformados



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

O tampo Semi-elipsoidal – também chamado usualmente no meio industrial como Tampo 10% devido ao seu valor de raio de rebordo ser 10% do valor do raio de abaulamento – tem as características apresentadas na figura 6 e na figura 7 é mostrado tampos semi-elipsoidais já conformados.

Figura 6: Referências Dimensionais de um tampo Semi-elipsoidal.



Referência	Critério	Unidade
D	250 a 5000	mm
R	D	mm
r	0,1.D	mm

Referência	Fórmula	Unidade
h <sub>2</sub>	0,1937.D	mm
Disco (Ds)	de: 1,12.D+2.h1+1,54.e para: 1,12.D + 2.h1	mm

Fonte: (SITE: UNITAMPOS - ACESSO EM: 28/09/2015).

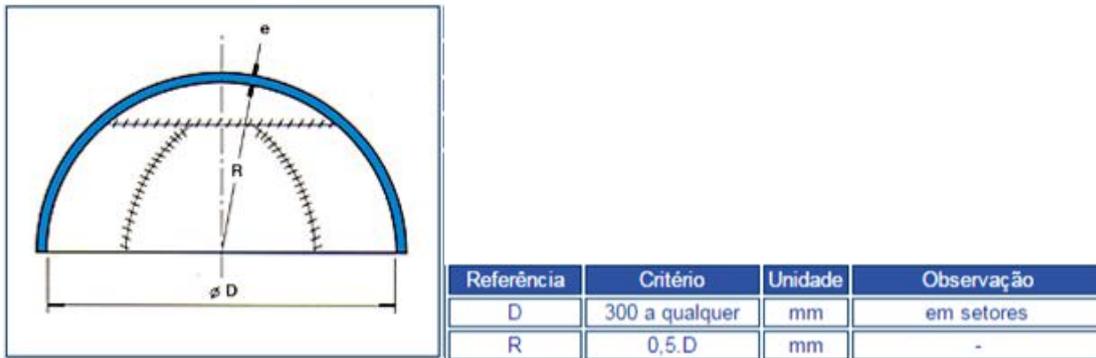
Figura 7: Tapos Semi Elipsoidais Conformados.



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Os Tampos Hemisféricos tem como principal característica ter um formato semiesférico (meia esfera), sendo o raio interno do tampo igual ao raio interno do vaso de pressão em que será montado. Suas características dimensionais são demonstradas na figura 8 e na figura 9 é mostrado um tampo de hemisférico já conformado.

Figura 8: Referências Dimensionais de um Tampo Hemisférico.



Fonte: (SITE: UNITAMPOS - ACESSO EM: 28/09/2015).

Figura 9: Tampo Hemisférico conformado.



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

A conformação dos tampos industriais pode ser executada a frio ou a quente, e normalmente dois processos são utilizados em conjunto. O primeiro processo é o de prensagem, onde se utiliza uma ferramenta macho e fêmea, instalada numa prensa, que pode ser comparada a uma operação convencional de estampagem. O material é pressionado entres as duas partes da ferramenta, sendo assim conformado. Este processo é geralmente recomendado para prensagem de chapas de espessuras elevadas exigindo prensas de grande capacidade. Tal operação não exige muita habilidade do operador.

O segundo processo é o de rebordeamento, em que o disco é fixo a um eixo rotativo, que com pistões e apoios hidráulicos conformam o material. Esse processo exige grande habilidade do operador, pois o equipamento é completamente manual.

### 3.3 Conformação Mecânica

É o processo através do qual algum grau de deformação plástica é aplicado à peça, e portanto trabalha-se com tensões acima da tensão limite de escoamento do material (DIETER,

1981). Os processos utilizados para a conformação de tampos de vasos de pressão são a prensagem ou o rebordeamento. Nos dois processos aplica-se à chapa altos níveis de deformação plástica a frio, trabalhando-se então com níveis consideráveis de encruamento do material. Os pontos do componente que recebem os maiores níveis de deformação apresentam, como esperado, aumento considerável de resistência mecânica e perda de ductilidade e tenacidade.

Quando um tampo é conformado somente pelo processo de prensagem, ele é cortado em forma de gomos, que são conformados e ajustados, sendo unidos por soldagem, recebendo cordões de solda na direção radial, conforme projeto. Assim, na prensagem é executada a conformação da calota (coroa central) e dos gomos, e depois a soldagem.

Tampos de qualquer perfil, construídos em gomos ou cascos esféricos, são conformados inteiramente por prensagem (TELLES, 2001). Na figura 10 é apresentado um tampo fabricado em gomos, ajustados para a soldagem.

Figura 10: Gomos de calota ajustados para a soldagem



Fonte: Foto cedida pela Confab Equipamentos.

Para tampos obtidos pelo processo de rebordeamento, parte-se de um disco de diâmetro tal que após a conformação assumirá a forma geométrica nas dimensões do tampo desejado. Muitas vezes esse diâmetro é maior que a largura da chapa fornecida pela usina, logo deve ser executado uma soldagem dos setores de discos, em sua posição secante, antes da sua conformação. As etapas de conformação de um tampo de chapa única envolve as seguintes fases:

#### **1ª fase: Abaulamento do disco**

Nesta etapa a chapa de partida é prensada entre as ferramentas macho e fêmea, confeccionadas no raio que se deseja imprimir ao material. Para este processo utiliza-se um equipamento chamado Prensa e as ferramentas possuem formato hemisférico; o disco é movimentado sob a ferramenta e após várias repetições do processo de prensagem, até ficar completamente formado, conforme mostrado na figura 11.

Figura 11: Abaulamento de disco em Prensa Hidráulica



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

### **2ª fase: Rebordeamento do disco**

Após a formação da calota através do processo de prensagem do disco, é executado o rebordeamento (spinning) da região periférica. O rebordeamento é feito em máquinas conhecidas com Rebordeadeiras, processo no qual o tampo gira sobre o eixo do equipamento, ao mesmo tempo que é conformado com a força de um rolo interno e outro rolo externo. Durante a operação o rolo externo desloca-se radialmente, curvando a chapa contra o rolo interno, formando assim uma parte cilíndrica no componente (TELLES, 2001), conforme mostrado na figura 12.

Figura 12: Processo de rebordeamento



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Tanto na prensagem como no rebordeamento de um tampo, o controle dimensional durante e após a conformação é executado por um gabarito feito de madeira ou de chapa fina, o qual é cuidadosamente recortado conforme perfil desejado do tampo interno.

### 3.4 Grau de Encruamento

Como já mencionado, após operação de conformação plástica realizada a frio, o material apresenta alteração de suas propriedades mecânicas, diretamente proporcional ao grau de deformação imposto. Nos processos de conformação de tampos, o grau de encruamento aplicado ao material é especialmente importante, assim como o tratamento térmico a ser aplicado posteriormente para recuperação das propriedades.

A determinação do grau de encruamento aplicado a um componente mecânico, principal preocupação deste trabalho, pode ser realizado de várias formas, seguindo diferentes metodologias. A seguir estão descritos os métodos considerados para este trabalho:

#### 1. Método empírico

Este método consiste na execução de um traçado de malha sobre os discos para a determinação do grau de deformação. Padronizou-se a malha por quadrados de 25 mm x 25 mm, traçada sobre o material bruto, ou seja, antes da conformação. Após este processo, é executada a medição dessa malha para a aplicação da metodologia apresentada abaixo:

Segundo Telles, após a medição física da malha empírica, é possível determinar o grau de deformação através das fórmulas a seguir:

- **Deformação Logarítmica ou Verdadeira:**

Equação 1: Grau de deformação pelo método da Deformação Verdadeira

$$e = \ln \frac{l_1}{l_0}$$

Fonte: (TELLES, 2001).

onde:

$l_1$ =comprimento após a deformação

$l_0$ = comprimento antes da deformação

Esse método é aplicado para componentes que passam por grandes deformações.

- **Deformação Relativa:**

Equação 2: Grau de deformação pelo método da Deformação Relativa

$$e = \frac{l_1 - l_0}{l_0}$$

Fonte: (TELLES, 2001).

onde:

$l_1$ =comprimento após a deformação

$l_0$ = comprimento antes da deformação

Esse método é aplicado para componentes que passam por pequenas deformações.

## 2. Norma Asme VIII Div.2 Ed.2013:

Essa norma apresenta metodologias para a determinação de produtos conformados por dois processos distintos.

Para produtos duplamente curvados circunferencialmente em uma única peça, conformados por quaisquer processos incluindo dishing ou rebordeamento a frio:

Equação 3: Grau de Deformação de componentes rebordeados

$$\varepsilon_f = 100 \ln \left( \frac{D_b}{D_0 - 2t} \right)$$

Fonte: (NORMA ASME VIII DIV.2 ED.2013).

onde:

$D_b$  – diâmetro do disco antes da conformação;

$D_0$  – diâmetro externo do produto conformado;

$\varepsilon_f$  - Taxa de deformação calculada;

t - espessura nominal da chapa.

Para tampos que são montados de segmentos conformados, o grau de deformação é determinado pela equação:

Equação 4: Grau de Deformação de componentes prensados

$$\varepsilon_f = \frac{75t}{R_f} \left( 1 - \frac{R_f}{R_0} \right)$$

Fonte: (NORMA ASME VIII DIV.2 ED.2013).

onde:

$R_f$  – Raio médio final da conformação;

$R_0$  – Raio médio original do disco, igual à infinito para uma chapa plana;

$\varepsilon_f$  – Taxa de deformação calculada;

t - espessura nominal da chapa.

A norma ASME estabelece que para aços austeníticos que contém um grau de deformação acima de 15% deve ser tratado termicamente por solubilização e para aços ferríticos é requerido tratamento térmico de normalização para grau de deformação acima de 5%, para recristalização da estrutura do material.

### 3. Normas A.D.-Merkblatt:

São duas as normas que estabelecem os critérios de tratamento térmico devido ao grau de deformação dos materiais:

#### ➤ AD 2000-HP 7/2:2009-03 – Heat Treatment – Ferritic Steels

Essa norma cita que os materiais ferríticos com grau de deformação acima de 5% devem ser tratados termicamente de acordo com as especificações dos materiais. Nessa norma o grau de deformação é determinado pela equação:

Equação 5: Equação do grau de deformação conforme norma AD-Merkblatt 7/2

$$e > 0,05 \cdot D_m/s$$

Fonte: (AD 2000-MERKBLATT HP7/2, 2009).

onde:

s – espessura do material;

Dm – diâmetro médio final de conformação do componente

### ➤ AD 2000-HP 7/3:2001-04 – Heat Treatment – Austenitic Steels

Essa norma cita que os materiais austeníticos com grau de deformação acima de 15% e com limite de alongamento de usina abaixo de 30% devem ser tratados termicamente de acordo com as especificações dos materiais. Para materiais com temperatura de projeto abaixo de -196°C o grau de deformação não deve exceder 10%.

Apesar de serem citados os limites de grau de deformação, essa norma não estabelece a equação para determinação do mesmo, o que é resultado de muita discussão entre os envolvidos em um projeto, porque não ocorre um consenso de que a equação que determina o grau de deformação dos materiais ferríticos é aplicado para materiais austeníticos.

## 3.5 Materiais Utilizados

Os materiais utilizados para a conformação dos discos feitos em aços inoxidáveis austeníticos foram os aços SA-240 Tp 347 e SA-240 Tp 321. Também foi analisado um disco feito da Liga de Incoloy 825.

O material SA-240 Tp 347 é também denominado aço 1.4550 = X6CrNiNb 18-10 na norma DIN EN 10028 e sua composição química é mostrada no quadro 1.

Quadro 1: Composição química do Aço 1.4550

NOMENCLATURA ASME	NOMENCLATURA UNS	NOMENCLATURA DIN EN 10028	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)									
			C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Fe	Nb	OUTROS
SA-240 Tp 347	S34700	1.4550 = X6CrNiNb 18-10	0 - 0,08	0 - 2	0 - 1	17 - 19	9 - 13	0 - 0,045	0 - 0,05	64,1 - 74	0 - 1	Nb = Min. 10 x %C

Fonte: Autoria própria.

Devido a estabilização ao nióbio, este aço austenítico possui como principal característica maior resistência à corrosão em temperaturas elevadas. Quando submetidos a

temperaturas na faixa de 450-900 °C, alguns aços tendem a formar precipitado de carboneto de cromo na região do contorno de grão, deixando o material susceptível à corrosão intergranular. A estabilização com nióbio inibe a formação do carboneto de cromo, e conseqüentemente aumenta a resistência contra este tipo de corrosão. O aço inox SA-240 Tp 347 possui excelente soldabilidade, característica comum aos aços austeníticos, além de elevadas propriedades mecânicas que garantem boa ductibilidade, sendo recomendado para alguns processos de conformação a frio. A aplicação do aço SA-240 Tp 347 está voltada principalmente para ambientes que envolvam meios corrosivos e temperaturas elevadas (Site: APERAM, 2012).

O material SA-240 Tp 321 é também denominado aço 1.4541 = X6CrNiTi 18-10 na norma DIN EN 10028 e sua composição química é mostrada no quadro 2.

Quadro 2: Composição química Aço 1.4541

NOMENCLATURA ASME	NOMENCLATURA UNS	NOMENCLATURA DIN EN 10028	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)										
			C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Fe	Ti	N	OUTROS
SA-240 Tp 321	S32100	1.4541 = X6CrNiTi 18-10	0 - 0,08	0 - 2	0 - 1	17 - 19	9 - 12	0 - 0,045	0 - 0,03	65,3 - 74	0 - 0,7	0 - 0,1	Ti = Min. 5 x %C

Fonte: Autoria própria.

O Aço Inox 321 é um aço inoxidável austenítico estabilizado com titânio, tem maior resistência à corrosão, e não é suscetível à precipitação de carbonetos durante o aquecimento entre 427°C a 816°C. Os aços similares sem a adição de titânio, como o aço inox 304, tem um limite de temperatura de até 426°C dependendo da aplicação e estão mais suscetíveis a precipitação de carbonetos (Site: MEGALIGAS, 2012).

A liga Incoloy 825, que é uma liga Níquel-Ferro-Cromo com adições de Molibdênio, Cobre e Titânio. A composição química desta liga é apresentada no quadro 3.

Quadro 3: Composição química do Incoloy 825

NOMENCLATURA ASME	NOMENCLATURA UNS	NOMENCLATURA DIN EN 10028	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)												
			Ni	Cr	C	Mo	Cu	S	Al	Ti	Fe	Mn	Si	P	
SB-424 Tp N08825	N08825 (Incoloy 825)	2.4858 = NiCr21Mo	38 - 46	19,5 - 23,5	0 - 0,025	2,5 - 3,5	1,5 - 3	0 - 0,01	0 - 0,2	0,6 - 1,2	22 - 37,9	0 - 1	0 - 0,5	0 - 0,020	

Fonte: Autoria própria.

Essa liga é utilizada em ambientes de trabalho muitos corrosivos, pois se caracteriza por alta resistência a corrosão por pit, por fresta, intergranular e corrosão sob tensão. É também aplicado em ambientes ácidos, poços de petróleo e água do mar.

O intervalo de trabalho para conformação a quente é de 870 – 1180 °C, mas para se obter uma ótima resistência à corrosão o trabalho a quente deve ser feito a temperaturas entre 870 – 980 °C e o resfriamento deve ser em ar calmo ou forçado.

A taxa de deformação em trabalhos a frio é um pouco menor que para os aços austeníticos comuns, mas ainda relativamente alta. O equipamento de conformação deve ser bem potente e fortemente construído para compensar o aumento de resistência mecânica. Também apresenta boas propriedades mecânicas a partir de temperaturas criogênicas e para temperaturas moderadamente elevadas. Exposição a temperaturas acima de 540 °C podem resultar em alterações microestruturais, diminuindo significativamente sua ductilidade e resistência ao impacto. Por essa razão, a liga não é normalmente utilizada a temperaturas em que as propriedades de fluência são fatores de projeto (Site: SPECIALMETALS, 2012).

O aço P-275 NH (DIN 10028) é denominado conforme ASME o material SA-516 Gr60. Esse material é indicado para equipamentos como caldeiras e vasos de pressão, também é ideal para serviços a temperaturas baixas e moderadas. Tem ainda como principais características boa soldabilidade, alta tenacidade, elevadas tensão limite de escoamento e tensão limite de ruptura. O quadro 4 mostra sua composição química.

Quadro 4: Composição química do material P-275 NH

NOMENCLATURA ASME	NOMENCLATURA DIN EN 10028	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)														
		C	Mn	Si	Cr	Cu	P	S	Nb+Ti+V	Al (min.)	V	Mo	N	Nb	Ti	Cr+Cu+Mo
SA-516 Gr60	P-275 NH = Mat. N° 1.0487	0 - 0,16	0,80 - 1,50	0 - 0,4	0 - 0,3	0 - 0,3	0 - 0,020	0 - 0,015	0,05	0,02	0 - 0,05	0 - 0,08	0 - 0,012	0 - 0,05	0 - 0,03	0,045

Fonte: Autoria própria.

#### 4 MÉTODO EXPERIMENTAL

Para este trabalho foi estudado o grau de deformação em 5 tampos, cujas formas são torisféricas e semielipsoidais. Esses componentes foram fabricados para serem montados em vasos de pressão, que atuarão na Usina Nuclear de Angra III.

As dimensões dos tampos foram definidas desde a etapa inicial do projeto e são mostrados no quadro 5.

Quadro 5: Relação de tampos conformados

TIPO DE TAMPO	MATERIAL	ESPESSURA NOMINAL [mm] (T)	DIÂMETRO INTERNO (Ø) D [mm]	RAIO MÍNIMO [mm] (R)	KNUCKLE - ESPESSURA MÍNIMA [mm] (t)	RAIO - KNUCKLE [mm] (r)	LINHA TANGÊNCIA x LINHA DE SOLDADA [mm] (h)	DIÂMETRO DO BLANK [mm]
Semi-Elipsoidal End (2:1)	14550	8	800	650	6	125	24	1000
Semi-Elipsoidal End (2:1)	P-275 NH	12,5	1000	820	10,5	158	38	1232
Torispherical End (10%)	P-275 NH	12,5	975	1000	5,2	100	28	1160
Semi-Elipsoidal End (2:1)	1.4541	18	2170	1760	15	340	50	2640
Torispherical End (10%)	1.4541	10	786	800	7	80	57	980
Torispherical End (10%)	1.4541	21	1758	1800	18	180	70	2069
Torispherical End (10%)	2.4858	12,5	984	1000	8	100	35	1200

Fonte: Autoria própria.

A partir das medidas especificadas no projeto do vaso de pressão, a empresa executora do serviço de rebordeamento determinou o diâmetro do disco necessário para a conformação do tampo.

Os discos em material P-275 NH foram cortados na Confab pelo processo de oxicorte, enquanto que os demais materiais passaram pelo corte a plasma (chapas de 1.4550, 1.4541 e 2.4858). Após o corte térmico, os discos tiveram seus cantos vivos (quinas) eliminados, ou seja, suas bordas foram arredondadas por esmerilhamento, com o objetivo de evitar ao máximo o acúmulo de tensões residuais. Observa-se da experiência fabril, que todas as chapas conformadas sem a eliminação previa de cantos vivos apresentaram trincas durante o processo de prensagem e rebordeamento.

Na sequência do corte foi executado o traçado da malha empírica sobre os discos para a utilização no cálculo do grau de deformação. O traçado da malha (quadrados de 25 mm x 25 mm) foi executado por inspetores dimensionais qualificados, utilizando riscador industrial e trena métrica, conforme demonstrado nas figuras 13 e 14. Como o processo de conformação implica em alto grau de deformação sobre a chapa, que poderia levar à perda do traçado, os cruzamentos da malha (“nós”) foram levemente puncionados, de forma a garantir que após o processo de rebordeamento os elementos pudessem ser medidos. Deve-se aqui chamar a atenção para o fato de que puncionamento muito profundo poderia funcionar como ponto de acúmulo de tensão, formando portanto regiões preferenciais de nucleação de trincas. Desta forma, garantiu-se o puncionamento mais superficial nos tampos.

Figura 13: Traçagem da malha empírica



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Figura 14: Verificação da traçagem da malha empírica



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Foi necessário usinar um furo de diâmetro aproximadamente 40 mm no centro de cada tampo, para fixar o pino de travamento da máquina rebordeadeira.

Primeiramente, os discos foram abaulados em uma prensa hidráulica, com a dimensão de seu raio maior, utilizando-se uma ferramenta específica para cada raio, conforme demonstrado na figura 15. Este processo foi executado na Unitampos.

Figura 15: Disco abaulado



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Na sequencia, os discos foram enviados para a máquina de rebordeamento. Antes do início deste processo para os discos em materiais austeníticos, os rolos da máquina passaram por limpeza, visando a descontaminação por materiais ferríticos, e evitando assim a contaminação do aço inoxidável. Os rolos foram lixados com um disco especial para polimento, denominado disco flap, com posterior limpeza das superfícies com álcool isopropílico, conforme figura 16. Durante o rebordeamento é necessário lubrificar a área de contato entre os rebolos e o disco, devido ao aquecimento causado pelo elevado atrito entre ambos. O lubrificante utilizado foi margarina sem sal, visto que o sal quebra a camada passiva dos aços inoxidáveis, deixando o material sujeito à contaminação e corrosão. A aplicação do lubrificante é demonstrado na figura 17.

Figura 16: Limpeza dos rolos da rebordeadeira



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Figura 17: Lubrificação dos rolos com margarina sem sal



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Figura 18: Rebordeamento dos discos abaulados



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Nota-se que o rebordeamento depende diretamente da experiência do operador da máquina, pois o processo de regulagem de avanço versus a força dos rolos é totalmente manual, conforme demonstrado na figura 18.

O controle dimensional dos tampos foi acompanhado pelo próprio operador da máquina, com o auxílio de um gabarito de madeira aprovado pelo inspetor dimensional qualificado.

Após o rebordeamento, os tampos voltaram para a prensa hidráulica para a execução da calibragem, uma vez que após o processo de rebordeamento houve desvio dimensional no raio das calotas, ficando fora das tolerâncias estabelecidas no projeto.

Ao final do processo, os tampos foram inspecionados quanto às dimensões por inspetor qualificado, apresentando as medidas em conformidade com o projeto. Também foi executada a medição da malha empírica, cujos resultados serão apresentados no próximo capítulo.

Após toda etapa de manuseio, os tampos foram limpos com panos umedecidos em solvente adequado e armazenados em uma área da fábrica protegida do trabalho com aço carbono, a fim de evitar possível contaminação do aço inoxidável e incolloy pela ferrita.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de deformação encontrados na medição da malha empírica após o processo de conformação estão dispostos abaixo, no quadro 6.

Quadro 6: Valores encontrados na malha empírica após a conformação

TIPO DE TAMPO	MATERIAL	ESPESSURA NOMINAL [mm] (T)	ESPESSURA APÓS CONFORMAÇÃO NO REBORDO [mm]	DIÂMETRO INTERNO ( $\phi$ D) [mm]	RAIO MÍNIMO [mm] (R)	KNUCKLE - ESPESSURA MÍNIMA [mm] (t)	RAIO - KNUCKLE [mm] (r)	LINHA TANGÊNCIA x LINHA DE SOLDA [mm] (h)	DIÂMETRO DO BLANK [mm]	MÉDIA DE MEDIDAS PELO MÉTODO EMPÍRICO
Semi-Elipsoidal End (2:1)	14550	8	8,2	800	650	6	125	24	1000	28,0
Semi-Elipsoidal End (2:1)	P-275 NH	12,5	11,98	1000	820	10,5	158	38	1232	28,5
Torispherical End (10%)	P-275 NH	12,5	12,51	975	1000	5,2	100	28	1160	30,5
Semi-Elipsoidal End (2:1)	1.4541	18	14,3	2170	1760	15	340	50	2640	28,5
Torispherical End (10%)	1.4541	10	9,64	786	800	7	80	57	980	31,0
Torispherical End (10%)	1.4541	21	20	1758	1800	18	180	70	2069	29,5
Torispherical End (10%)	2.4858	12,5	13,1	984	1000	8	100	35	1200	30,0

Fonte: Autoria própria.

Percebe-se que a relação espessura/raio é importante, pois para o caso da mesma espessura (12,5 mm) o raio igual a 158 mm gerou menor deformação do que o raio igual a 100 mm.

A partir dos resultados apresentados, foi calculado o grau de deformação dos tampos pela equação da deformação relativa, conforme quadro 7.

Quadro 7: Valores do grau de deformação relativa

TIPO DE TAMPO	MATERIAL	ESPESSURA NOMINAL [mm] (T)	DIÂMETRO INTERNO ( $\phi$ D) [mm]	RAIO MÍNIMO [mm] (R)	KNUCKLE - ESPESSURA MÍNIMA [mm] (t)	RAIO - KNUCKLE [mm] (r)	MÉDIA DE MEDIDAS PELO MÉTODO EMPÍRICO	DEFORMAÇÃO RELATIVA ((I-I <sub>0</sub> )/I)
Semi-Elipsoidal End (2:1)	14550	8	800	650	6	125	28,0	12%
Semi-Elipsoidal End (2:1)	P-275 NH	12,5	1000	820	10,5	158	28,5	14%
Torispherical End (10%)	P-275 NH	12,5	975	1000	5,2	100	30,5	22%
Semi-Elipsoidal End (2:1)	1.4541	18	2170	1760	15	340	28,5	14%
Torispherical End (10%)	1.4541	10	786	800	7	80	31,0	24%
Torispherical End (10%)	1.4541	21	1758	1800	18	180	29,5	18%
Torispherical End (10%)	2.4858	12,5	984	1000	8	100	30,0	20%

Fonte: Autoria própria.

No quadro 7 vemos que a relação espessura/raio é de fato importante, visto que a variação de deformação relativa é ainda maior:

- Para a relação 12,5/158 – foi encontrado um grau de deformação de 14%;
- E em uma relação de 12,5/100 – foi encontrado um grau de deformação de 22%

O método da deformação relativa confirma a tendência de menor deformação para um maior raio, de maneira geral.

O grau de deformação dos tampos calculado pelo método da deformação verdadeira, considerando apenas o comprimento, está demonstrado no quadro 8.

Quadro 8: Valores do grau de deformação verdadeira

TIPO DE TAMPO	MATERIAL	ESPESSURA NOMINAL [mm] (T)	DIÂMETRO INTERNO ( $\phi$ ) [mm] (D)	RAIO MÍNIMO [mm] (R)	RAIO - KNUCKLE [mm] (r)	MÉDIA DE MEDIDAS PELO MÉTODO EMPÍRICO	DEFORMAÇÃO VERDADEIRA [ $\ln(l/l_0)$ ]
Semi-Elipsoidal End (2:1)	14550	8	800	650	125	28,0	11%
Semi-Elipsoidal End (2:1)	P-275 NH	12,5	1000	820	158	28,5	13%
Torispherical End (10%)	P-275 NH	12,5	975	1000	100	30,5	20%
Semi-Elipsoidal End (2:1)	1.4541	18	2170	1760	340	28,5	13%
Torispherical End (10%)	1.4541	10	786	800	80	31,0	22%
Torispherical End (10%)	1.4541	21	1758	1800	180	29,5	17%
Torispherical End (10%)	2.4858	12,5	984	1000	100	30,0	18%

Fonte: Autoria própria.

Nos quadros 6, 7 e 8, observamos que para a mesma relação espessura/raio, o tampo tipo torisférico gera menor deformação que um tampo tipo semielipsoidal.

O quadro 8 mostra que quanto maior o raio Knuckle menor será o grau de deformação, o que é esperado, já que quanto menor o raio a ser gerado numa chapa plana, maior será a deformação exigida.

Nota-se que o material austeníticos (2.4548) apresentou maior nível de deformação quando comparado ao material (P-275NH).

Na sequencia foi calculado o grau de deformação verdadeira, considerando as variações dimensionais do comprimento da malha empírica e as variações na espessura da mesma região. Os resultados estão dispostos no quadro 9.

Quadro 9: Valores do grau de deformação verdadeira considerando variação de comprimento e de espessura.

TIPO DE TAMPO	MATERIAL	ESPESSURA NOMINAL [mm] (T)	DIÂMETRO INTERNO ( $\phi$ D) [mm]	RAIO MÍNIMO [mm] (R)	RAIO - KNUCKLE [mm] (r)	MÉDIA DE MEDIDAS PELO MÉTODO EMPÍRICO	DEFORMAÇÃO VERDADEIRA COM A ESPESSURA [ $\ln(l/l_0)+\ln(e/e_0)$ ]
Semi-Elipsoidal End (2:1)	14550	8	800	650	125	28,0	14%
Semi-Elipsoidal End (2:1)	P-275 NH	12,5	1000	820	158	28,5	9%
Torispherical End (10%)	P-275 NH	12,5	975	1000	100	30,5	20%
Semi-Elipsoidal End (2:1)	1.4541	18	2170	1760	340	28,5	-10%
Torispherical End (10%)	1.4541	10	786	800	80	31,0	18%
Torispherical End (10%)	1.4541	21	1758	1800	180	29,5	12%
Torispherical End (10%)	2.4858	12,5	984	1000	100	30,0	23%

Fonte: Autoria própria.

No quadro acima pode-se observar que ao somar a deformação no comprimento com deformação na espessura a tendência se mantém, já que em geral a deformação na espessura é muito pequena em relação à deformação no comprimento. Há apenas uma exceção em que a soma resultou em -10% , já que a diminuição da espessura foi muito acentuada.

Por fim, foi executada a metodologia de cálculos para a determinação do grau de deformação pelas normas ASME VIII div.2 Ed.2013 e AD-Merkeblatt 2000 HP 7/2, mostrados No quadro 10.

Quadro 10: Valores do grau de deformação calculado pelas normas ASME e AD-Merkblatt

TIPO DE TAMPO	MATERIAL	ESPESSURA NOMINAL [mm] (T)	DIÂMETRO INTERNO ( $\phi$ D) [mm]	RAIO MÍNIMO [mm] (R)	RAIO - KNUCKLE [mm] (r)	DIÂMETRO DO BLANK [mm]	GRAU DE DEFORMAÇÃO (%) acc. HP 7/2 [S > 0,05 x Dm]	GRAU DE DEFORMAÇÃO (%) acc. ASME VIII [100.ln(Db)/(Do-2.t)]
Semi-Elipsoidal End (2:1)	14550	8	800	650	125	1000	13%	22%
Semi-Elipsoidal End (2:1)	P-275 NH	12,5	1000	820	158	1232	16%	21%
Torispherical End (10%)	P-275 NH	12,5	975	1000	100	1160	11%	17%
Semi-Elipsoidal End (2:1)	1.4541	18	2170	1760	340	2640	35%	20%
Torispherical End (10%)	1.4541	10	786	800	80	980	9%	22%
Torispherical End (10%)	1.4541	21	1758	1800	180	2069	19%	16%
Torispherical End (10%)	2.4858	12,5	984	1000	100	1200	11%	20%

Fonte: Autoria própria.

Pelos resultados encontrados observamos que os tampos com raios de rebordo menores apresentaram maiores graus de deformação pelas metodologias das normas AD-Merkblatt e ASME, ou seja, quanto menor o raio de conformação, maior será o alongamento observado. O quadro 11 apresenta todos os resultados obtidos.

Quadro 11: Valores dos graus de deformação calculados

TIPO DE TAMPO	MATERIAL	MÉDIA DE MEDIDAS PELO MÉTODO EMPÍRICO	GRAU DE DEFORMAÇÃO (%) acc. HP 7/2 [S > 0,05 x Dm]	GRAU DE DEFORMAÇÃO (%) acc. ASME VIII [100.ln(Db)/(Do-2.t)]	DEFORMAÇÃO RELATIVA ((l-l <sub>0</sub> )/l)	DEFORMAÇÃO VERDADEIRA COM A ESPESSURA [ln(l/l <sub>0</sub> )+ln(e/e <sub>0</sub> )]	DEFORMAÇÃO VERDADEIRA [ln(l/l <sub>0</sub> )]
Semi-Elipsoidal End (2:1)	14550	28,0	13%	22%	12%	14%	11%
Semi-Elipsoidal End (2:1)	P-275 NH	28,5	16%	21%	14%	9%	13%
Torispherical End (10%)	P-275 NH	30,5	11%	17%	22%	20%	20%
Semi-Elipsoidal End (2:1)	1.4541	28,5	35%	20%	14%	-10%	13%
Torispherical End (10%)	1.4541	31,0	9%	22%	24%	18%	22%
Torispherical End (10%)	1.4541	29,5	19%	16%	18%	12%	17%
Torispherical End (10%)	2.4858	30,0	11%	20%	20%	23%	18%

Fonte: Autoria própria.

Para se obter uma correlação entre os graus de deformação encontrados, foram comparados os resultados dos materiais ferríticos, mostrados No quadro 12.

Quadro 12: Resultados de grau de deformação dos materiais ferríticos

TIPO DE TAMPO	MATERIAL	MÉDIA DE MEDIDAS PELO MÉTODO EMPÍRICO	GRAU DE DEFORMAÇÃO (%) acc. HP 7/2 [ $S > 0,05 \times D_m$ ]]	GRAU DE DEFORMAÇÃO (%) acc. ASME VIII [ $100 \cdot \ln(D_b / (D_o - 2 \cdot t))$ ]	DEFORMAÇÃO RELATIVA [( $l-l_0$ )/ $l$ ]	DEFORMAÇÃO VERDADEIRA COM A ESPESSURA [ $\ln(l/l_0) + \ln(e/e_0)$ ]	DEFORMAÇÃO VERDADEIRA [ $\ln(l/l_0)$ ]
Semi-Elipsoidal End (2:1)	P-275 NH	28,5	16%	21%	14%	9%	13%
Torispherical End (10%)	P-275 NH	30,5	11%	17%	22%	20%	20%

Fonte: Autoria própria.

Comparando-se os resultados encontrados entre os materiais ferríticos, para o tampo semielipsoidal a deformação verdadeira com a espessura obteve um valor considerável de variação com as outras metodologias empíricas, enquanto que o método da AD-Merkblatt não teve grande variação em relação as deformações verdadeira e relativa, e também a metodologia ASME apresentou grande variação quando comparada com os graus de conformação empíricos e AD-Merkeblatt. Para o tampo torisférico apenas a metodologia da AD-Merkblatt apresentou uma grande variação em relação ao restante das metodologias aqui estudadas.

Para se obter uma correlação entre os graus de deformação encontrados, foi verificado os resultados nos materiais austeníticos, mostrados No quadro 13.

Quadro 13: Resultados de grau de deformação dos materiais austeníticos

TIPO DE TAMPO	MATERIAL	MÉDIA DE MEDIDAS PELO MÉTODO EMPÍRICO	GRAU DE DEFORMAÇÃO (%) acc. HP 7/2 [ $S > 0,05 \times D_m$ ]]	GRAU DE DEFORMAÇÃO (%) acc. ASME VIII [ $100 \cdot \ln(D_b / (D_o - 2 \cdot t))$ ]	DEFORMAÇÃO RELATIVA [( $l-l_0$ )/ $l$ ]	DEFORMAÇÃO VERDADEIRA COM A ESPESSURA [ $\ln(l/l_0) + \ln(e/e_0)$ ]	DEFORMAÇÃO VERDADEIRA [ $\ln(l/l_0)$ ]
Semi-Elipsoidal End (2:1)	14550	28,0	13%	22%	12%	14%	11%
Semi-Elipsoidal End (2:1)	1.4541	28,5	35%	20%	14%	-10%	13%
Torispherical End (10%)	1.4541	31,0	9%	22%	24%	18%	22%
Torispherical End (10%)	1.4541	29,5	19%	16%	18%	12%	17%
Torispherical End (10%)	2.4858	30,0	11%	20%	20%	23%	18%

Fonte: Autoria própria.

Entre os materiais austeníticos pode – se observar que entre as deformações relativa e verdadeira não ocorreram grandes variações, porém quando comparados os valores dessas duas metodologias com a deformação verdadeira considerando a espessura, com a norma

ASME e AD-Merkblatt são apresentados grandes variações nos graus de deformação encontrados.

Obteve-se mais uma correlação entre os graus de deformação encontrados, foi verificado os resultados por tipo de tampos conformados mostrados nos quadros 14 e 15.

Quadro 14: Graus de deformação de Tampos Torisféricos

TIPO DE TAMPO	MATERIAL	MÉDIA DE MEDIDAS PELO MÉTODO EMPÍRICO	GRAU DE DEFORMAÇÃO (%) acc. HP 7/2 [ $S > 0,05 \times D_m$ ]	GRAU DE DEFORMAÇÃO (%) acc. ASME VIII [ $100 \cdot \ln(D_b / (D_o - 2 \cdot t))$ ]	DEFORMAÇÃO RELATIVA (( $l-l_0$ )/ $l$ )	DEFORMAÇÃO VERDADEIRA COM A ESPESSURA [ $\ln(l/l_0) + \ln(e/e_0)$ ]	DEFORMAÇÃO VERDADEIRA [ $\ln(l/l_0)$ ]
Torispherical End (10%)	P-275 NH	30,5	11%	17%	22%	20%	20%
Torispherical End (10%)	1.4541	31,0	9%	22%	24%	18%	22%
Torispherical End (10%)	1.4541	29,5	19%	16%	18%	12%	17%
Torispherical End (10%)	2.4858	30,0	11%	20%	20%	23%	18%

Fonte: Autoria própria.

Entre os tampos torisféricos pode – se verificar que as mesmas diferenças apresentadas entre as metodologias para o tampo ferrítico também é observada nos tampos de material austenítico.

Quadro 15: Graus de deformação de Tampos Semi-Elipsoidal

TIPO DE TAMPO	MATERIAL	GRAU DE DEFORMAÇÃO (%) acc. HP 7/2 [ $S > 0,05 \times D_m$ ]	GRAU DE DEFORMAÇÃO (%) acc. ASME VIII [ $100 \cdot \ln(D_b / (D_o - 2 \cdot t))$ ]	DEFORMAÇÃO RELATIVA (( $l-l_0$ )/ $l$ )	DEFORMAÇÃO VERDADEIRA COM A ESPESSURA [ $\ln(l/l_0) + \ln(e/e_0)$ ]	DEFORMAÇÃO VERDADEIRA [ $\ln(l/l_0)$ ]
Semi-Elipsoidal End (2:1)	14550	13%	22%	12%	14%	11%
Semi-Elipsoidal End (2:1)	P-275 NH	16%	21%	14%	9%	13%
Semi-Elipsoidal End (2:1)	1.4541	35%	20%	14%	-10%	13%

Fonte: Autoria própria.

Pode-se verificar que os valores de grau de deformação determinados pelo método empírico, para os tampos semi-elipsoidais, são bem próximos. Porém, quando comparados com os resultados da metodologia ASME ocorre uma maior diferença entre os valores.

Também pode ser verificado que exceto para o tampo de material 1.4541 (grau de deformação de 35%) a metodologia da norma AD-Merkblatt também apresentam valores próximos aos encontrados do grau de conformação pelo método empírico.

## 6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados nota-se que na prática o método empírico aplicado é muito difícil de ser medido com precisão, uma vez que após conformação dos tampos os locais para medição ficam bastante restritos, ou seja, há uma redução dos locais ideais para uma medição confiável, o que requer instrumentos de medição com alto grau de precisão para se obter dados robustos.

A análise do conjunto de resultados permite concluir que a metodologia utilizada pela norma alemã é conservadora e voltada para o fator segurança, já que ela indica o maior grau de deformação – 35% – para o caso em que houve maior diminuição de espessura.

As metodologias apresentadas pelas normas, quando comparadas, tem distintas equações do grau de deformação e indicam resultados também bastante diferentes.

O cálculo das deformações pelos métodos tradicionais (deformação relativa e deformação verdadeira), assim como esperado, apresentaram resultados muito próximos entre si, mas muito diferentes daqueles obtidos segundo as normas de referência. Os resultados obtidos pelos métodos tradicionais levaram em consideração apenas ou majoritariamente a deformação externa, que claramente é um raciocínio muito simplificado.

De maneira geral, recomenda-se que em um projeto em que haja a conformação plástica de componentes, o grau de deformação seja determinado pela norma de fabricação definida no projeto. A metodologia empírica, por sua vez, deve ser evitada sempre que possível devido ao tempo empregado para a execução do traçado da malha e pela imprecisão nas medições, podendo acarretar no aumento do tempo gasto para tais atividades e em um grau de deformação nem tão preciso para os componentes deformados plasticamente.

## REFERÊNCIAS

TELLES, Pedro C. Silva. **Vasos de pressão**. 2. ed. Rio De Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2001.

UNITAMPOS **Tampos**. 2014. Disponível em: <http://www.eica.com.br/tampos.html>. Acesso em: 28/09/2015.

CALLISTER Jr.; William D. **Materials science and engineering: an introduction**. 7. ed. New York: John Wiley & Sons, 2007. 852 p.

DIETER, George E.. **Metalurgia mecânica**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A., 1981.

ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL COMMITTEE (Org.). **2013 Asme boiler & pressure vessel code: VIII division 2 – alternative rules - rules for construction of pressure vessels**. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2013.

ASM HANDBOOK COMMITTEE. **Asm handbook: properties and selection: irons steels and high performance alloys - volume 1**. Detroit: ASM, 1993.

APERAM **Aisi 347/347H: aço inoxidável austenítico estabilizado ao nióbio**. 2012. Disponível em: [http://www.biblioaqui.com.br/ref\\_homepages.php](http://www.biblioaqui.com.br/ref_homepages.php). Acesso em: 28/11/2015  
MEGALIGAS **Aço inox 321**. 2013. Disponível em: [http://www.megaligas.com.br/produtos\\_aco\\_inox\\_321.asp](http://www.megaligas.com.br/produtos_aco_inox_321.asp). Acesso em: 28/11/2015.

SPECIALMETALS **Incolloy alloy 825**. 2013. Disponível em: <http://www.specialmetals.com/assets/documents/alloys/incolloy/incolloy-alloy-0825.pdf>. Acesso em: 28/11/2015.

ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL COMMITTEE (Org.). **2013 Asme boiler & pressure vessel code: II Part A2 – ferrous material specifications (SA-451 to end)**. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2013.

AD 2000 – MERKBLATT. **Hp 7/2: manufacture and testing of pressure vessels: heat treatment - ferritic steels**. Berlin: VdTÜV, 2009.

AD 2000 – MERKBLATT. **Hp 7/3: manufacture and testing of pressure vessels: heat treatment - austenitic steels.** Berlin: VdTÜV, 2001.

BRESCIANI FILHO, Ettore (Coord.) **Conformação plástica dos metais.** 5. ed. Campinas: Ed. UNICAMP, 1997. 385 p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Din en 10028-1: flat products made of steels for pressure purposes - part 1: general requirements.** Berlin, 2009-07.

HELMAN, Horacio; CETLIN, Paulo Roberto. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais.** 2. ed. São Paulo, SP: Artliber, 2005. 260 p.

SCHAEFFER, Lirio; ROCHA, Alexandre da Silva. **Conformação mecânica: cálculos aplicados em processo de fabricação.** 1. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2007.

SCHAEFFER, Lirio. **Conformação mecânica.** Porto Alegre: Imprensa Livre, 1999.