

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
RODRIGO GRACINSKI

**DESENVOLVIMENTO DE MODELO PARA TESTE HIDROSTÁTICO A FIM DE
VERIFICAR DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIO METÁLICO DE ÁGUA**

CASCADEL-PR

2017

RODRIGO GRACINSKI

**DESENVOLVIMENTO DE MODELO PARA TESTE HIDROSTÁTICO A FIM DE
VERIFICAR DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIO METÁLICO DE ÁGUA**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso I, do curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz (CUFAG), como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Professor orientador: José Claudio Terra Silveira

CASCADEL-PR

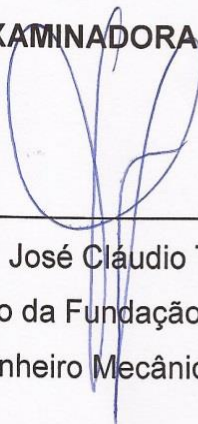
2017

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
RODRIGO GRACINSKI

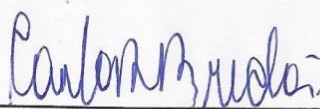
**DESENVOLVIMENTO DE MODELO PARA TESTE HIDROSTÁTICO A FIM DE
VERIFICAR DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIO METÁLICO DE ÁGUA**

Trabalho apresentado no curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob orientação do Professor José Cláudio Terra Silveira.

BANCA EXAMINADORA



Orientador: Prof. José Cláudio Terra Silveira
Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz
Engenheiro Mecânico



Prof. Carlos Alberto Breda
Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz
Engenheiro Mecânico



Prof. Eliseu Avelino Zanella Junior
Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz
Engenheiro Mecânico

Cascavel, 25 de outubro de 2017.

DEDICATÓRIA

Ao meu pai, orientador natural, por seu apoio e incentivo em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Deonesio e Beatriz, e a minha namorada Ana Flávia, por sempre estarem ao meu lado, me motivando, incentivando e apoiando.

À empresa Implavi-Reservatórios Metálicos, pela oportunidade de viabilizar este trabalho, dando todo o suporte necessário, fornecendo seu conhecimento e estrutura, também pelo incentivo e grande apoio aos meus estudos.

Ao meu orientador Prof. José Cláudio Terra Silveira, por sua dedicação, profissionalismo e pela oportunidade de ajudar a desenvolver meu conhecimento.

Ao meu coorientador Prof. Roberson Roberto Parizotto, minha estima, pelo apoio neste trabalho e minha admiração pelos seus conselhos.

“Os grandes feitos são conseguidos não pela força, mas pela perseverança.”

Samuel Johnson

RESUMO

Nos desenvolvimentos de projetos de reservatório metálicos de água, pode ser observada pouca informação técnica existente sobre essas estruturas. Para diminuir essa lacuna e por acreditar que seria algo de grande utilidade para projetistas e engenheiros, foi desenvolvido este trabalho, procurando-se dimensionar um modelo através de literaturas e normas correlativas, construir um protótipo e ao final submetê-lo a um ensaio hidrostático consolidando seu projeto. Para o dimensionamento optou-se pela literatura de Mecânica dos Materiais e pela norma NBR 8800. O processo de construção utilizou-se de chapa de aço carbono com classificação ASTM A36 e solda MAG com eletrodo ER70S-6. O teste hidrostático foi submetido com uma bomba elétrica da marca Graco e conduzido pelas regulamentações da norma Petrobras N-2688. Durante o ensaio, a pressão hidrostática não atingiu seu valor esperado, devido a uma falha inesperada do cordão de solda, interrompendo o teste.

Palavras-Chave: Reservatório metálico, teste hidrostático, resistência mecânica.

ABSTRACT

Throughout the deployment of metallic water tank projects, it is observed little technical information existence about these structures. To shorten this gap and because we believe it would be of great utility for designers and engineers, this work was developed in attempt to: size a model through correlative literature and standards; build a prototype; and finally, submit it to a hydrostatic test consolidating its project. As for the dimensioning, we opted for the Material Mechanics literature and the NBR¹ 8800 standards. The construction process used ASTM A36 carbon steel plate and MAG welding with ER70S-6 electrode. The hydrostatic test was submitted with an electric pump of the brand Graco and driven by Petrobras standards N-2688. During the test, the hydrostatic pressure did not reach its expected value due to an unexpected failure of the weld joint, interrupting the test.

Keywords: Metallic reservoir, hydrostatic test, mechanical resistance.

¹ NBR stands for Norma Brasileira Regulamentadora i.e. Brazilian Standards Regulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Reservatório metálico vertical cilíndrico	17
Figura 02 - Tensões atuantes em reservatório cilíndrico	20
Figura 03 - Diagrama de corpo livre	21
Figura 04 - Corte seção transversal mn	23
Figura 05 - Tipos de soldas de entalhe	25
Figura 06 - Solda de filete	25
Figura 07 - Solda de tampão	26
Figura 08 - Designação de eletrodos	27
Figura 09 - Distribuição das chapas no costado.....	32
Figura 10 - Máquina de solda Esab Smaschweld 408	39
Figura 11 - Puncionadeira Linha C.....	40
Figura 12 - Calandra de rolos.....	41
Figura 13 - Bomba pressurizadora Graco Ultra 490.....	42
Figura 14 - Exemplificação do corte das chapas.....	44
Figura 15 - Exemplificação da pressão hidrostática	46
Figura 16 - Marcação para corte fundo e teto	48
Figura 17 - Chapas do costado recortadas	49
Figura 18 - Chapa costado calandrada	50
Figura 19 - Processo de solda para montagem do modelo	51
Figura 20 - Conexões hidráulicas utilizadas para ensaio hidrostático	52
Figura 21 - Reservatório completamente cheio para início do teste hidrostático.....	53
Figura 22 - Reservatório a 20% da pressão máxima	55
Figura 23 - Reservatório a 40% da pressão máxima	56
Figura 24 - Comparação modelo antes e após teste hidrostático	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistências de cálculo de solda	28
Tabela 2 - Resistência mínima à tração do metal de solda.....	29
Tabela 3 - Tensão de resistência dos eletrodos AWS.....	29
Tabela 4 - Tensão de resistência do aço carbono A36	30
Tabela 5 - Parâmetros de solda Smashweld 408.....	39
Tabela 6 - Especificações Graco Ultra 490	42
Tabela 7 - Pressões de teste hidrostático conforme Petrobras N-2688	54
Tabela 8 - Comparativo de pressões de cálculo e teste hidrostático	57

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Definição dos grupos de risco para vasos de pressão	33
Gráfico 2 - Teste hidrostático do grupo de risco 1	34
Gráfico 3 - Teste hidrostático do grupo de risco 2	35
Gráfico 4 - Teste hidrostático do grupo de risco 3	35

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Tensão circunferencial	22
Equação 2 - Tensão longitudinal	23

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AWS - American Welding Society

ASTM - American Society for Testing and Materials

CONTEC - Comissão de Normalização Técnica

GMAW - Gas Metal Arc Welding

MAG- Metal Active Gas

MIG - Metal inert Gas

MSG - Metric Standard Gauge

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

LISTA DE SÍMBOLOS

A_w - área efetiva da solda [mm^2]

f_y - tensão escoamento metal base [N/mm^2]

f_w - tensão escoamento metal solda [N/mm^2]

P - pressão [N/mm^2]

r - raio [mm]

R_n - resistência nominal [N]

t - espessura chapa [mm]

ϕ - coeficiente de resistência

σ_1 - tensão circunferencial [N/mm^2]

σ_2 - tensão longitudinal [N/mm^2]

SUMÁRIO

1. CAPÍTULO 1	16
1.1 INTRODUÇÃO	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
1.3 JUSTIFICATIVA	18
1.4 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA	18
2. CAPÍTULO 2	19
2.1 REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS	19
2.1.1 Tensões atuantes em vasos de pressão cilíndricos	19
2.1.1.1 Tensão circunferencial	21
2.1.1.2 Tensão longitudinal	22
2.1.2 Soldas	24
2.1.2.1 Tipos de solda	24
2.1.2.2 Processo de soldagem	26
2.1.2.3 Designação de eletrodos	26
2.1.2.4 Dimensionamento de ligação soldada	27
2.1.3 Chapas metálicas	29
2.1.4 Procedimentos de fabricação	30
2.1.5 Procedimentos para teste hidrostático	32
3. CAPÍTULO 3	37
3.1 METODOLOGIA	37
3.1.1 Material	37
3.1.1.1 Livro Resistência dos Materiais 7ª ed. - Russell Charles Hibbeler	37
3.1.1.2 Norma para cálculo de solda ABNT NBR 8800	37
3.1.1.3 Aço carbono	38
3.1.1.4 Solda	38
3.1.1.5 Puncionadeira Linha C	40
3.1.1.6 Calandra de rolos	40
3.1.1.7 Bomba Hidráulica	41
3.1.1.8 Norma Petrobras N-270	42

3.1.1.9 Norma Petrobras N-2688	43
3.1.2 Métodos.....	43
3.1.2.1 Capacidade e dimensões gerais	43
3.1.2.2 Cálculo através das tensões atuantes.....	44
3.1.2.3 Cálculo de uniões dos componentes.....	45
3.1.2.4 Construção do modelo	47
3.1.2.5 Teste hidrostático	52
4. CAPÍTULO 4.....	57
4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5. CAPÍTULO 5.....	60
5.1 CONCLUSÃO.....	60
6. CAPÍTULO 6.....	62
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62

1. CAPITULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

Reservatórios metálicos elevados para armazenamento de água são muito empregados no Brasil. A mais importante finalidade desse tipo de estrutura é a armazenagem de grande quantidade de água potável com boa pressão hidrostática, uma vez que são fabricadas com altura considerável para este fim. Reservatórios são de grande utilidade em agricultura, cooperativas, frigoríficos e laticínios uma vez que esse tipo de comercio demanda água em abundancia para suas atividades. Segundo Allan, “a Organização das Nações Unidas (ONU) (2016) revela que aproximadamente 70% de toda a água disponível no mundo é utilizada para irrigação. No Brasil, esse índice chega a 72%.” (WALBERT; Allan, 2015). Para esse tipo de demanda, se utiliza os reservatórios metálicos, conforme mostra a figura 01.

Nos desenvolvimentos desse tipo de projeto, os projetistas ficam bem limitados tecnicamente, devido a não existência de uma norma exclusiva para o assunto. A falta de um entrosamento entre acadêmicos e indústrias dificulta e muito a realização desse tipo de propósito. Após inúmeras pesquisas, se encontrou algumas normas apenas com correlação. A norma estipulada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), cuja classificação se enquadra na NBR 7821 (Tanques soldados para armazenamento de petróleo e derivados) e também a norma desenvolvida pela Petrobras, N-270 (Projeto de tanque de armazenamento atmosférico), foram as mais próximas deste tema, porém, não claramente direcionadas.

As capacidades desses reservatórios são muito variadas, não tendo nenhum limite máximo nem mínimo para serem fabricados. Devido a essa variedade, se faz necessário ter um profundo conhecimento na área de desenvolvimento estrutural, e também muito conhecimento adquirido na prática de projeto e execução desse tipo de estrutura.

Figura 01 - Reservatório metálico vertical cilíndrico



Fonte: Autor (2017).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver ensaio hidrostático para avaliar dimensionamento teórico de um modelo de reservatório metálico cilíndrico vertical.

1.2.2 Objetivos específicos

Para se atingir o resultado esperado, alguns objetivos específicos são definidos:

- Definir a capacidade e dimensões gerais do reservatório;
- Definir forças atuantes no reservatório;
- Dimensionar o modelo de reservatório metálico;
- Construir protótipo conforme condições dimensionadas;

- Efetuar teste hidrostático;
- Avaliar discrepâncias entre dimensionamento e ensaio hidrostático.

1.3 JUSTIFICATIVA

Por se tratar de uma grande estrutura do ponto de vista de engenharia, um estudo é necessário para conseguir-se um parâmetro de confiança entre o cálculo teórico e sua real resistência. Busca-se conseguir uma orientação ao engenheiro projetista para ter-se mais clareza aos seus projetos de reservatórios metálicos. Com o ensaio esse problema é atenuado, concedendo mais segurança ao projeto.

1.4 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

O projeto proposto consiste em dimensionar um reservatório de água cilíndrico de proporções reduzidas ao que se encontra no mercado. O intuito é comparar os valores obtidos através dos cálculos matemáticos de dimensionamento com os valores reais de teste.

Para o trabalho em questão, serão utilizadas chapas de aço carbono de resistência estrutural A36, espessura MSG 16, sendo 1,52mm. Será utilizada solda de penetração total, do tipo MAG, utilizando-se eletrodo ER70S-6, sendo aplicada apenas no lado externo da estrutura. Detalhes construtivos, tais como, diâmetro, altura, tamanhos das chapas de costado e capacidade volumétrica serão analisadas e definidas posteriormente, para viabilizar a construção e ensaio hidrostático.

2. CAPÍTULO 2

2.1 REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS

2.1.1 Tensões atuantes em vasos de pressão cilíndricos

Uma das características de reservatórios cilíndricos é sua simetria de faces, eliminando as tensões cisalhantes. Dessa maneira, serão apenas consideradas duas tensões atuantes para cálculo e dimensionamento do reservatório, em condições estáticas e sob pressão do fluido interno.

Começamos nossa análise de vasos cilíndricos determinando as tensões normais em um tanque circular de parede fina AB submetido a pressão interna. Um elemento de tensão com suas faces paralelas e perpendiculares ao eixo do tanque está ilustrado na parede do tanque. As tensões normais σ_1 σ_2 agindo nas faces laterais desse elemento são as tensões de membrana na parede. Nenhuma tensão de cisalhamento age nessas faces por causa da simetria do vaso e de seu carregamento. Por isso, as tensões σ_1 σ_2 são as tensões principais (GERE, 2003, p.414).

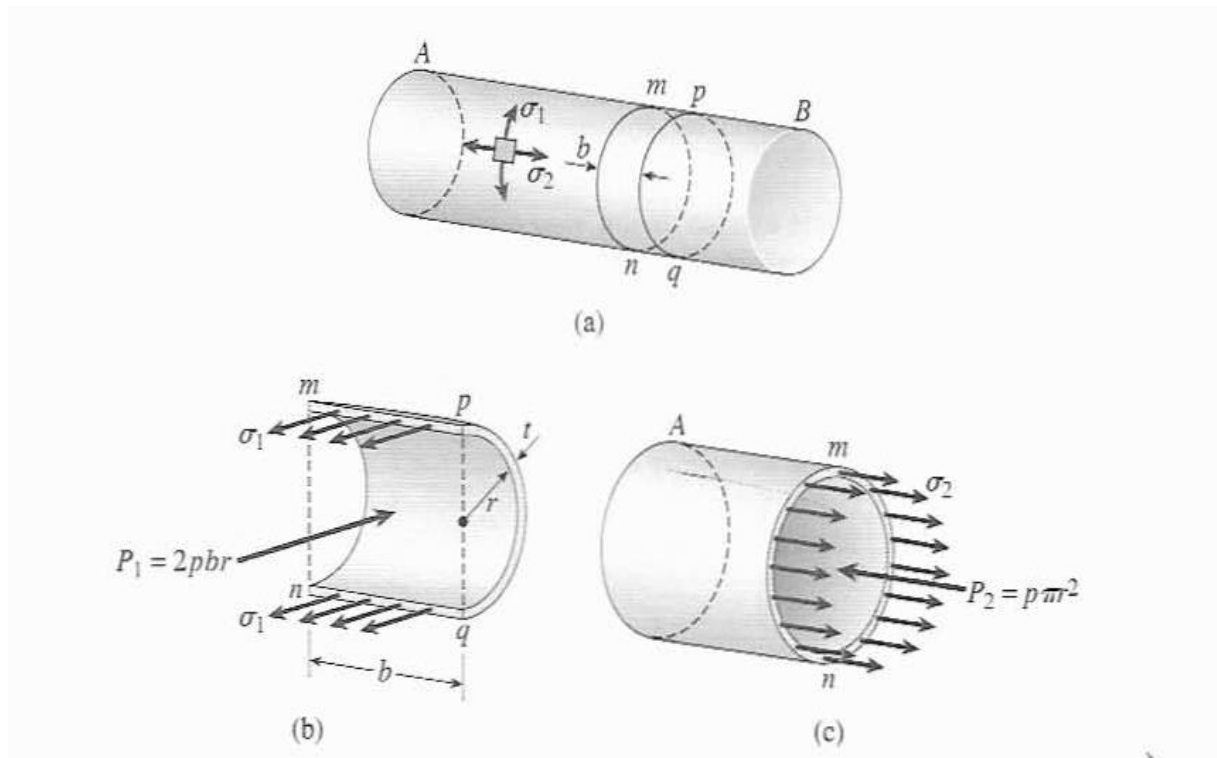
Reservatórios ou vasos de pressão são considerados como de “paredes finas”, quando seu raio é muito maior que a espessura de parede, essa relação é algebricamente descrita como $r/t \geq 10$, sendo r o raio e t espessura de parede. Quando satisfaz essa relação, então consideramos reservatório de parede fina.

Em geral, “paredes finas” refere-se a um vaso para o qual a relação raio interno-espessura da parede tem valor igual ou superior a 10 ($r/t \geq 10$). Especificamente, quando $r/t = 10$, os resultados de uma análise de parede fina preverão uma tensão aproximadamente 4 % menor que a tensão máxima real no vaso. Para relações maiores, esse erro será até menor (HIBBELER, 2010, p.300).

Para o devido entendimento, o cilindro será ilustrado, e consideraremos seus cortes em planos, conforme figura 02. Como iremos desconsiderar pontos de variação de geometria, e considerar distribuição de força de forma uniforme, diagramas de corpo livre irão ilustrar a teoria, conforme mostra a figura 03.

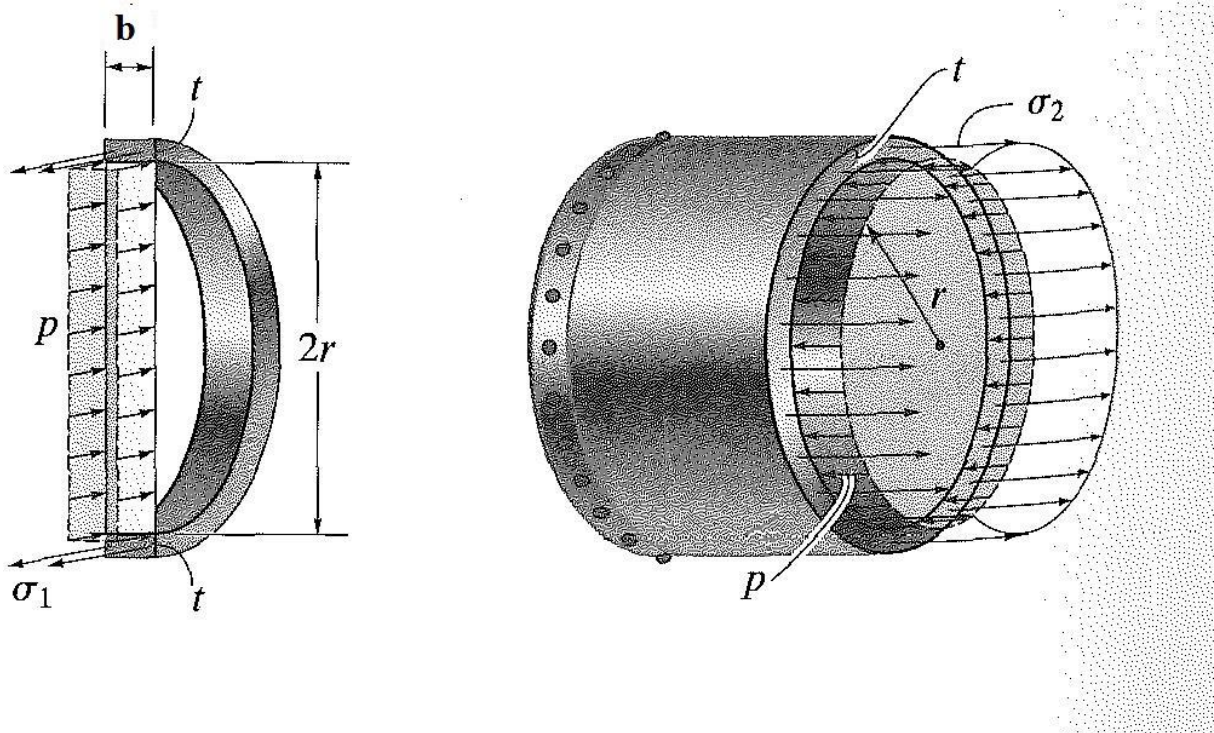
Quando a parede do vaso é "fina," a variação da distribuição de tensão pela sua espessura não será significativa, portanto consideraremos que ela é uniforme ou constante. [...] Em ambos os casos, entende-se que a pressão no vaso é a pressão manométrica, visto que ela mede a pressão acima da pressão atmosférica que consideramos existir dentro e fora da parede do vaso (HIBBELER, 2010, p.300).

Figura 02 - Tensões atuantes em reservatório cilíndrico



Fonte: Gere (2003, p.415).

Figura 03 - Diagrama de corpo livre



Fonte: Hibbeler (2010, p.300).

2.1.1.1 Tensão circunferencial

Considerando o vaso cilíndrico de raio interno r e parede de espessura t , faz-se dois cortes (mn e pq), conforme figura 02, perpendiculares ao eixo longitudinal, e a distância entre os dois planos, adotaremos como b . Conforme figuras 02 e 03. Dessa maneira podemos observar que o fluido exerce pressão sobre a parede, enquanto que de forma inversa, a tensão atuante nas extremidades da chapa exerce uma força contrária, como Newton nos ensinou: para toda ação existe uma reação.

Assim sendo, podemos chegar a uma conclusão simples e objetiva, a tensão circunferencial σ_1 , que age na parede do vaso tem uma resultante igual $F_1 = \sigma_1 \cdot (2 \cdot b \cdot t)$, em que t é a espessura da parede. A força resultante da pressão do fluido p , é igual a $F_p = 2 \cdot r \cdot b \cdot P$. Dessa forma chega-se a conclusão:

$$\sigma_1 \cdot (2 \cdot b \cdot t) = 2 \cdot r \cdot b \cdot P$$

Obtendo-se a equação 1, logo após simplificar:

$$\sigma_1 = \frac{P \times r}{t} \quad (1)$$

Onde:

σ_1 : tensão circunferencial (N/mm²)

P: pressão (N/mm²)

r: raio (mm)

t: espessura chapa (mm)

A tensão circunferencial σ_1 agindo na parede do vaso tem uma resultante igual a $\sigma_1 \cdot (2 \cdot b \cdot t)$, em que t é a espessura da parede. A força resultante P1 da pressão interna é igual a $2 \cdot p \cdot b \cdot r$, onde r é o raio interno do cilindro. Dessa forma, temos a equação de equilíbrio a seguir:

$$\sigma_1 \cdot (2 \cdot b \cdot t) - 2 \cdot r \cdot b \cdot p = 0$$

Dessa equação obtemos a fórmula a seguir para a tensão circunferencial no cilindro:

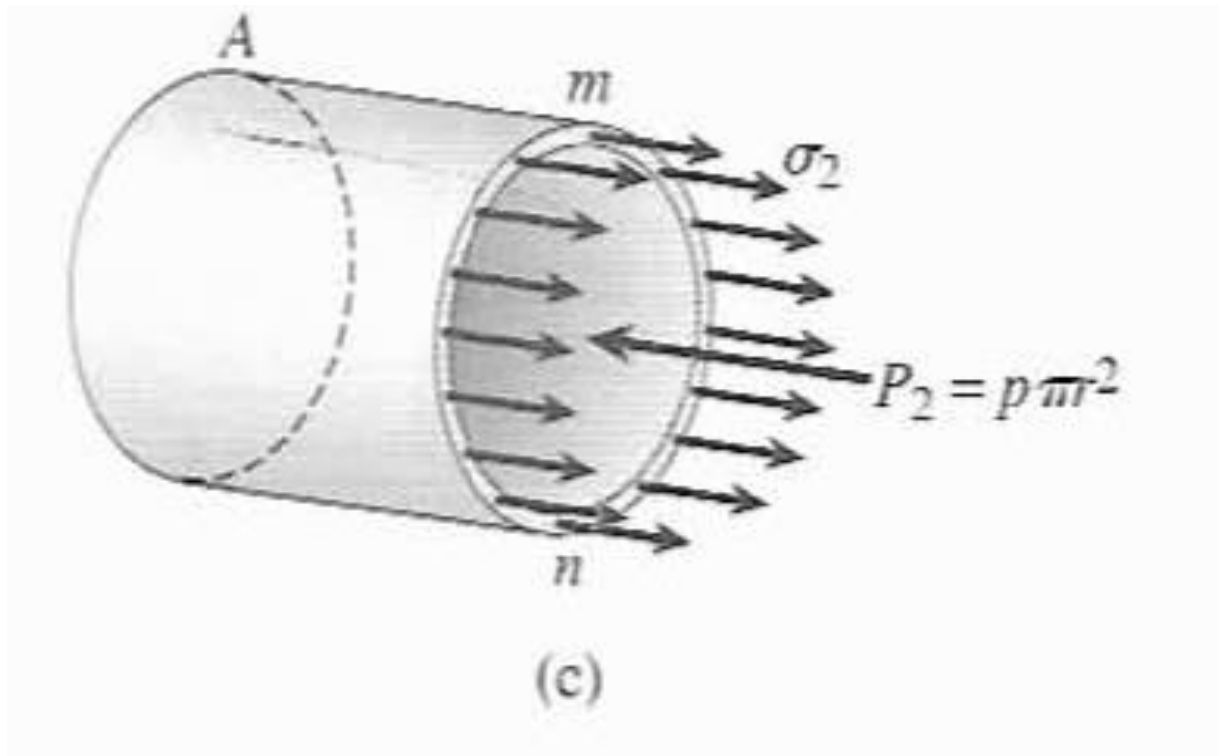
$$\sigma_1 = \frac{p \cdot r}{t}$$

Essa tensão é uniformemente distribuída sobre a espessura da parede, desde que a espessura seja pequena comparada com o raio. (GERE, 2003, p.415).

2.1.1.2 Tensão longitudinal

Para a tensão que atua no sentido longitudinal, tomaremos como exemplo o corte da seção transversal mn. Se analisarmos esse corte, que a figura 04 ilustra, teremos as tensões σ_2 agindo no sentido axial do corpo, e de maneira oposta, temos a força da pressão interna atuando sobre o fundo do reservatório.

Figura 04 - Corte seção transversal mn



Fonte: Gere (2003, p.415).

Dessa maneira, dispondo como resultado as seguintes forças: $F_2 = \sigma_2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot r \cdot t)$, sendo a força referente a tensão longitudinal, e $F_p = P \cdot (\pi \cdot r^2)$, como a força oposta, referente a pressão atuante no vaso. Chegando a seguinte conclusão:

$$\sigma_2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot r \cdot t) = P \cdot (\pi \cdot r^2)$$

Sendo a equação 2, portanto:

$$\sigma_2 = \frac{P \times r}{2t} \quad (2)$$

Onde:

σ_2 : tensão longitudinal (N/mm²)

P: pressão (N/mm²)

r: raio (mm)

t: espessura chapa (mm)

As tensões σ_2 agem longitudinalmente e têm uma força resultante igual a $\sigma_2.(2.\pi r.t)$. Note que estamos usando o raio interno da casca no lugar do raio médio.

A força resultante P_2 da pressão interna é uma força igual a $p.(\pi .r^2)$. Dessa forma a equação de equilíbrio para o corpo livre é:

$$\sigma_2.(2.\pi r.t) - p.(\pi .r^2) = 0$$

Resolvendo essa equação para σ_2 obtemos a fórmula a seguir para a tensão longitudinal em um vaso de pressão cilíndrico:

$$\sigma_2 = \frac{p.r}{2t} \text{ (GERE, 2003, p.415).}$$

2.1.2 Soldas

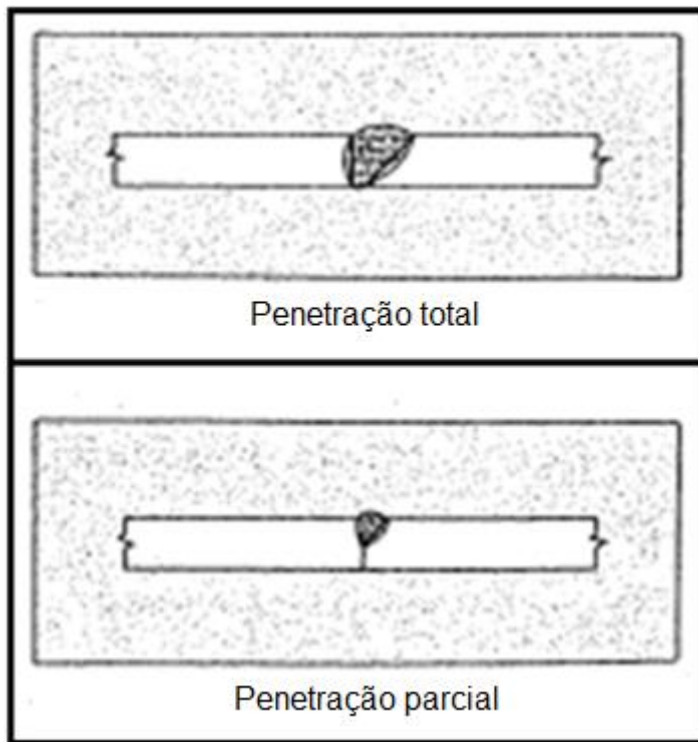
Para a união de chapas de aço carbono, existem vários tipos de uniões, que consistem em elementos de ligação, tais como, chapas de ligação, cantoneiras, vigas estruturais, dentre outros, e meios de ligação, que podem ser, soldas, pinos, parafusos, rebites.

Neste caso, como além de rigidez estrutural, outra condição é imposta, a estanqueidade, faz-se necessário a utilização da solda, que cumpre muito bem os dois requisitos. A solda une os materiais (nessa situação aço carbono A36), através da fusão das partes adjacentes.

2.1.2.1 Tipos de solda

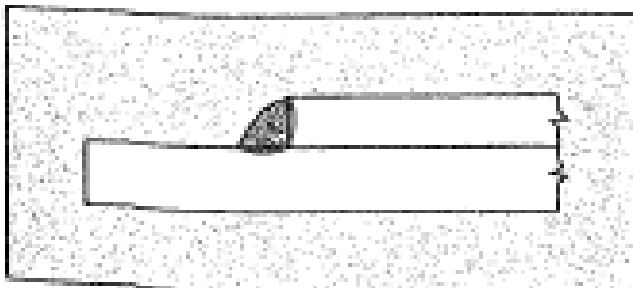
Existem diversos tipos de solda. São conhecidos como soldas de entalhe, podendo ser de penetração total ou parcial (figura 05), de filete (figura 06) ou tampão (figura 07). Para o estudo em questão apenas a solda de entalhe será abordada e utilizada, sendo em penetração total.

Figura 05 - Tipos de soldas de entalhe



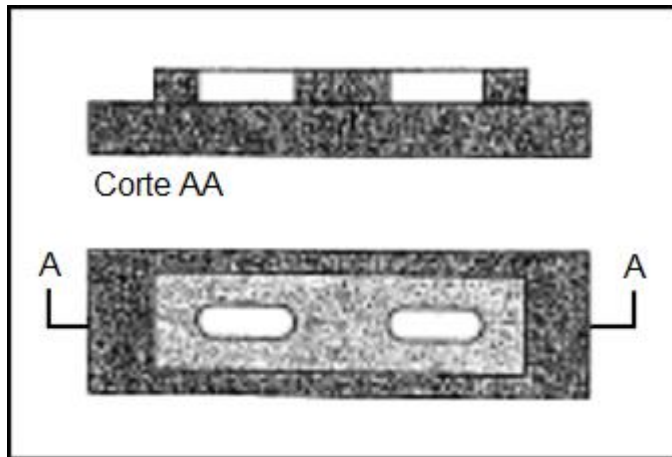
Fonte: Pinheiro (2005, p.101).

Figura 06 - Solda de filete



Fonte: Pinheiro (2005, p.101).

Figura 07 - Solda de tampão



Fonte: Pinheiro (2005, p.101).

2.1.2.2 Processo de soldagem

Diversos são os processos conhecidos e utilizados para soldagem. Porém para o caso em questão apenas um será abordado e escolhido. O processo definido é o GMAW (Gas Metal Arc Welding), que seria, solda ao arco elétrico com proteção gasosa. Será utilizado o processo MAG, com gás ativo, o CO₂.

Pode ser utilizada em todas as posições e permite um controle visual. No caso da solda ao ar livre é necessária a proteção contra o vento. O gás utilizado pode ser o CO₂. Também é chamada solda MIG (Metal Inert Gas), quando utiliza gases inertes ou mistura deles, ou MAG (Metal Active Gas) quando utiliza gases ativos ou mistura de gases ativos e inertes (PINHEIRO, 2005, p.104).

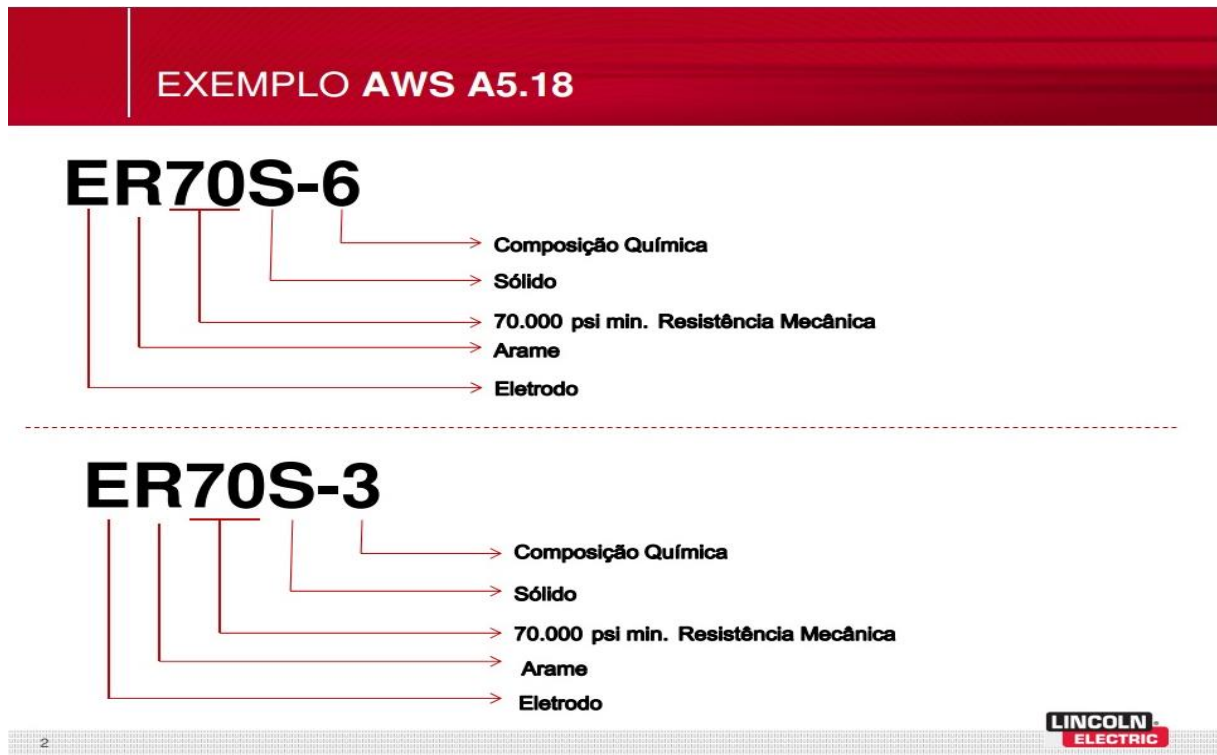
2.1.2.3 Designação de eletrodos

Os eletrodos a serem utilizados em uma união soldada, devem ter compatibilidade com o material que servirá de base. Além disso, sua resistência mecânica deverá ser maior que o metal base. Eles são designados através de uma sequência de números após a letra “ER”. Por exemplo: ER XX Y-Z. Segundo o site da Lincoln, “o primeiro termo, “ER”, designa eletrodo na forma de arame ou vareta, o segundo termo “XX” refere-se a sua resistência à tração, expresso em ksi (kilo libra / polegada²), o terceiro termo “Y”, diz respeito a sua composição, sendo: S = sólido ou

C = composto e o quarto termo “Z”, designa a faixa de composição química” (LINCOLN, 2017).

A ilustração 08 irá melhor explicar a nomenclatura dos eletrodos. Para o projeto em questão será utilizado o eletrodo ER 70 S-6.

Figura 08 - Designação de eletrodos



Fonte: Lincoln (2017).

2.1.2.4 Dimensionamento de ligação soldada

Para o dimensionamento de uma união soldada, devem-se levar em conta as dimensões de controle, tipo do eletrodo e área de contato, estabelecidas em norma, a qual será a ABNT NBR 8800/1986.

A resistência de cálculo " ϕR_n " dos diversos tipos de solda está indicada na Tabela 8. Nesta tabela, "AMB" é a área teórica da face de fusão; "Aw" é a área efetiva da solda; "fy" é a tensão de escoamento do metal base de menor "fy" na junta e "fw" a resistência mínima à tração do metal da solda, obtida da Tabela 9.

Nota: Em nenhuma situação a resistência da solda poderá ser tomada maior do que a resistência do metal base na ligação (ABNT, 1986, p.75).

As tabelas mencionadas na citação anterior são apresentadas na Tabela 1, referente à tabela 8 da citação e Tabela 2, que refere-se a tabela 9 da citação. Elas informam a situação em que se está solicitando a solda e como deve se proceder com o cálculo, levando sempre em conta que o menor valor de tensão deve ser utilizado, uma vez que, a norma estipula a necessidade de comparar a resistência da solda e do material a ser utilizado como base.

Tabela 1 - Resistências de cálculo de solda

Tipo de solda	Tipo de solicitação e orientação	Resistência de cálculo ϕR_n (A) (B) (D)
Solda de entalhe de penetração total	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda	Mesma do metal base
	Tração normal à seção efetiva da solda	$R_n = A_w f_w$ e $\phi = 0,90$
	Compressão normal à seção efetiva da solda	
	Cisalhamento (soma vetorial) na seção efetiva	O menor dos dois valores: a) Metal base $R_n = 0,60 A_w f_y$ e $\phi = 0,90$ b) Metal da solda $R_n = 0,60 A_w f_w$ e $\phi = 0,75$
Soldas de entalhe de penetração parcial	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda (C)	Mesma do metal base
	Tração ou compressão normais à seção efetiva da solda	O menor dos dois valores: a) Metal base $R_n = A_w f_y$ e $\phi = 0,90$ b) Metal da solda $R_n = 0,6 A_w f_w$ e $\phi = 0,75$
	Cisalhamento (soma vetorial) na seção efetiva	O menor dos dois valores: a) Metal base $R_n = 0,6 A_w f_y$ e $\phi = 0,90$ b) Metal da solda $R_n = 0,6 A_w f_w$ e $\phi = 0,75$
Soldas de filete	Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda (C)	Mesma do metal base
	Cisalhamento na seção efetiva (a solicitação de cálculo é igual à resultante vetorial de todas as forças de cálculo na junta que produzam tensões normais ou de cisalhamento na superfície de contato das partes ligadas)	O menor dos dois valores: a) Metal base $R_n = 0,60 A_{MB} f_y$ e $\phi = 0,90$ b) Metal da solda $R_n = 0,6 A_w f_w$ e $\phi = 0,75$

Fonte: ABNT (1986, p.75).

Tabela 2 - Resistência mínima à tração do metal de solda

Metal da solda	fw (Mpa)
E60xx; F6x-EXXX;E6XT-x	415
E70XX; F7X-EXXX;ER70S-X; E7XT-X	485

Fonte: ABNT (1986, p.76).

Porém a norma preconiza a tabela de resistência de eletrodo diferente do que será utilizado, embora o cálculo seja elaborado com as mesmas variáveis, as resistências diferem. Portanto, a tabela mais adequada de tensões de trabalho, é a da norma AWS, que é apresentada na tabela 3.

Tabela 3 - Tensão de resistência dos eletrodos AWS

AWS Classification	Shielding Gas	Tensile Strength(minimum) Resistência a tração		Yield Strenght (minimum) Resistência ao escoamento		Elongation Percent (minimum)
		psi	Mpa	psi	Mpa	
ER70S-2 ER70S-3 ER70S-4 ER70S-5 ER70S-6 ER70S-7	CO2	70.000	480	58.000	400	22
ER70S-G	D	70.000	480	58.000	400	22
E70C-3X E70C-6X	78-80% Ar/balance CO2 or CO2	70.000	480	58.000	400	22
E70C-G(X)	D	70.000	480	58.000	400	22
E70C-GS(X)	D	70.000	480	Not Specified		Not Specified

Fonte: Adaptado de AWS (1993, p.4).

2.1.3 Chapas metálicas

Para a determinação das especificações da chapa na qual serão utilizadas para cálculos, a forma mais garantida de obter essas informações é levando em conta sua própria norma de fabricação. No entanto, a norma ASTM, é estadunidense, então descrição estará em inglês. Para a escolha tipo de chapa, foi levado em consideração a facilidade de encontrá-la no mercado e também o seu baixo custo de aquisição. A tabela 4 retrata as tensões de resistências da chapa de aço carbono A36.

Tabela 4 - Tensão de resistência do aço carbono A36

TABLE 3 Tensile Requirements	
Plates, Shapes(B), and Bars:	
Tensile strength, Resistência a tração ksi [MPa]	58-80 [400-550]
Yield point, min, Resistência ao escoamento ksi [MPa]	36 [250] (C)
Plates and Bars (D)(E):	
Elongation in 8in [200mm], min, %	20
Elongation in 2in [50mm], min, %	23
Shapes:	
Elongation in 8in [200mm], min, %	20
Elongation in 2in [50mm], min, %	21 (B)
(A) See the orientation subsection in the Tension Tests section of Specification A 6/A 6M (B) For wide flange shapes with flange thickness over 3in [75mm], the 80 ksi [550 MPa] maximum tensile strength does not apply and a minimum elongation in 2 in [50mm] of 19% applies (C) Yield point 32 ksi [220 MPa] for plates over 8 in [200mm] in thickness (D) Elongation not required to be determined for floor plate (E) For plates wider than 24 in [600mm], the elongation requirement is reduced two percentage points. See the Elongation Requirement Adjustments subsection under the Tension Tests section of Specification A 6/A 6M	

Fonte: Adaptado de ASTM (2004, p.3).

Analisando a tabela, e traduzindo para o português, observa-se que a resistência de tração equivale a 400 a 550 N/mm², e sua respectiva resistência ao escoamento vale 250 N/mm². A nota (C), diz que a tensão de escoamento, para chapas de espessura maior que 200 mm é um pouco menor (220 MPa), no entanto essa bitola de chapa não será utilizada neste trabalho. Dessa maneira, a tensão adotada para projeto é de 400 N/mm², uma vez que buscamos a máxima resistência suportada pela estrutura.

2.1.4 Procedimentos de fabricação

Os tanques de armazenamento podem ser fabricados de diversos tamanhos e alturas. Para cada capacidade e dimensões existe uma maneira de construção normatizada. O modelo deste trabalho será definido posteriormente, porém já se enquadra na classificação existente na norma Petrobras N-270.

Os tanques devem ter um dos seguintes tipos de fundo, a critério da PETROBRAS:

- a) Fundo plano;
- b) Fundo cônico com declividade para a periferia de, no mínimo, 1:120;
- c) Fundo cônico com declividade para o centro de, no mínimo, 1:100 e, no máximo, 1:25.

NOTA 1 Para tanques com diâmetro menor ou igual a 6m: é recomendado o uso de fundo plano.

NOTA 2 Para tanques com diâmetro acima de 6m: é recomendado o uso de fundo descrito em b)

NOTA 3 Para tanques com diâmetro acima de 6m: o uso de fundo plano só é permitido quando definido no projeto básico (PETROBRAS, 2013, p.14).

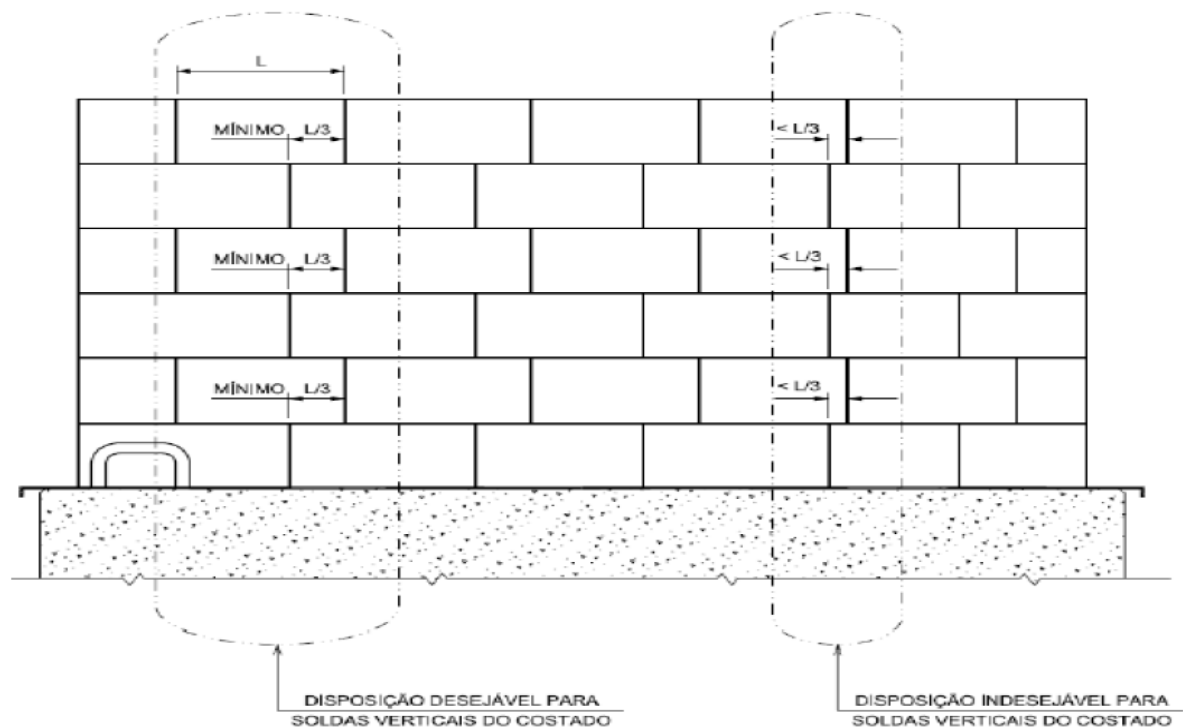
Dessa maneira, tal como já havia sido definido, o modelo terá fundo plano, levando em consideração que não terá um diâmetro igual ou maior que seis metros. Para o costado, a norma também preconiza algumas exigências. “O alinhamento das chapas do costado deve ser pela face interna ou pela linha de centro, sendo que para os tanques de teto flutuante o alinhamento tem que ser obrigatoriamente pela face interna” (PETROBRAS, 2013, p.17).

Outra informação importante é a maneira de como são dispostas as chapas do costado, uma vez que não podem ter uniões verticais alinhadas, de acordo com a norma.

As juntas verticais de 2 anéis adjacentes não podem ser alinhadas e devem estar afastadas, sempre que possível, de pelo menos 1/3 do comprimento de cada chapa. O espaçamento entre as soldas verticais de anéis adjacentes deve ser, no mínimo, de 5 vezes a espessura da chapa mais espessa da região considerada, conforme API STD 650. As juntas verticais não devem também se acumular em uma mesma região do costado do tanque, como mostrado na figura B.4 (PETROBRAS, 2013, p.18).

Assim, por uma questão de norma, as chapas adotam um método de fabricação onde são soldadas intercaladas, por assim dizer, oferecendo além de um aspecto estético melhor, também um alívio em tensões concentradas nas juntas soldadas, deixando a estrutura mais enrijecida. A figura B.4 que a citação menciona é a figura 09.

Figura 09 - Distribuição das chapas no costado



Fonte: PETROBRAS (2013, p.53).

2.1.5 Procedimentos para teste hidrostático

Para um teste hidrostático ocorrer satisfatoriamente, alguns requisitos mínimos devem ser cumpridos. A norma Petrobras N-2688, estabelece alguns parâmetros e orientações que devem ser seguidos em vasos de pressão submetidos a ensaios de pressão hidrostática.

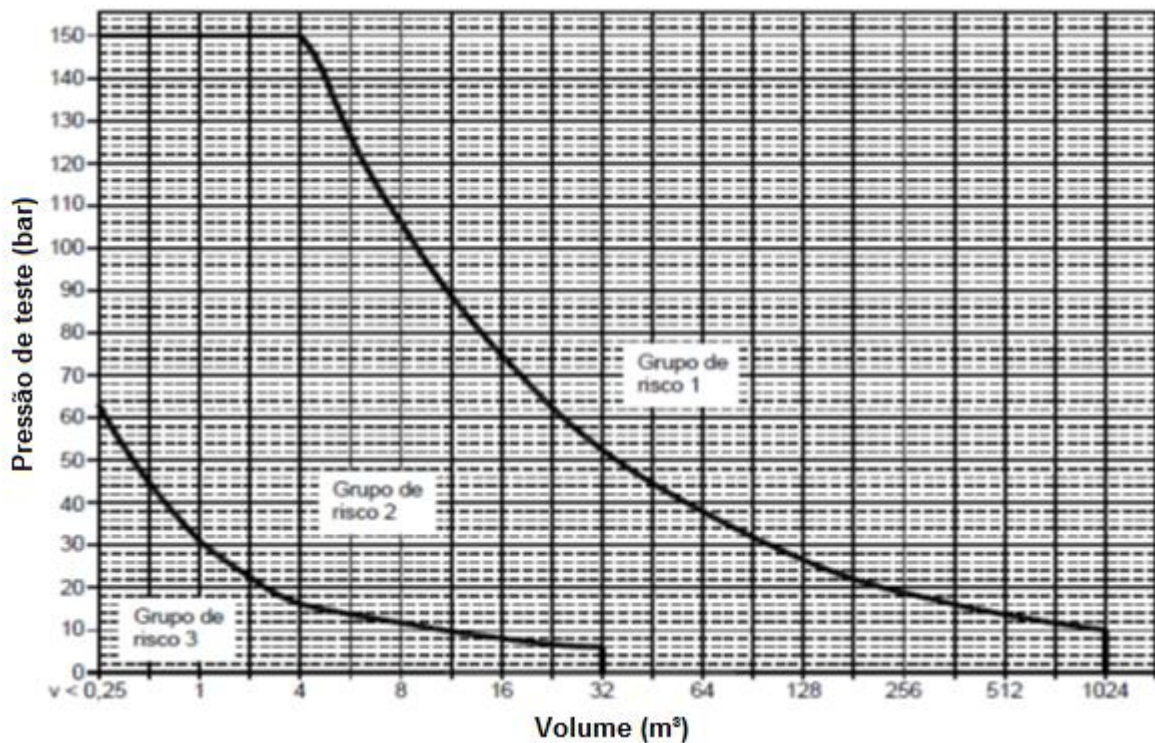
Antes da realização do teste, deve-se verificar em qual classe de risco o vaso de pressão se enquadra, e com isso, baseando-se na norma tomar as precauções.

5.6 Antes da realização do teste de pressão devem ser previstas todas as precauções de demarcação e isolamento da área de teste. A determinação da área de isolamento deve ser definida em função do grupo de risco do equipamento.

5.6.1 Para definir o grupo de risco para testes de pressão em vasos de pressão, entrar no gráfico da Figura 1 com a pressão do teste em bar e o volume em m^3 (PETROBRAS, 2014, p.7).

O gráfico em que a citação se refere, é o Gráfico 1, onde de acordo com a capacidade em metros cúbicos e com a pressão em que será submetido, o vaso de pressão é inserido em um grupo de risco, podendo ser de 1 a 3, sendo 1 o mais alto risco e 3 o menor risco.

Gráfico 1 - Definição dos grupos de risco para vasos de pressão



Fonte: PETROBRAS (2014, p.7).

Para cada grupo de risco, há uma exigência de isolamento da área onde será submetido o teste. A norma estipula alguns raios mínimos que devem ser seguidos isolando a região e impedindo a circulação de pessoas.

5.7.1 Grupo de Risco 1

Os equipamentos devem ser isolados em um raio mínimo de 4 m, durante todo o teste de pressão.

5.7.2 Grupo de Risco 2

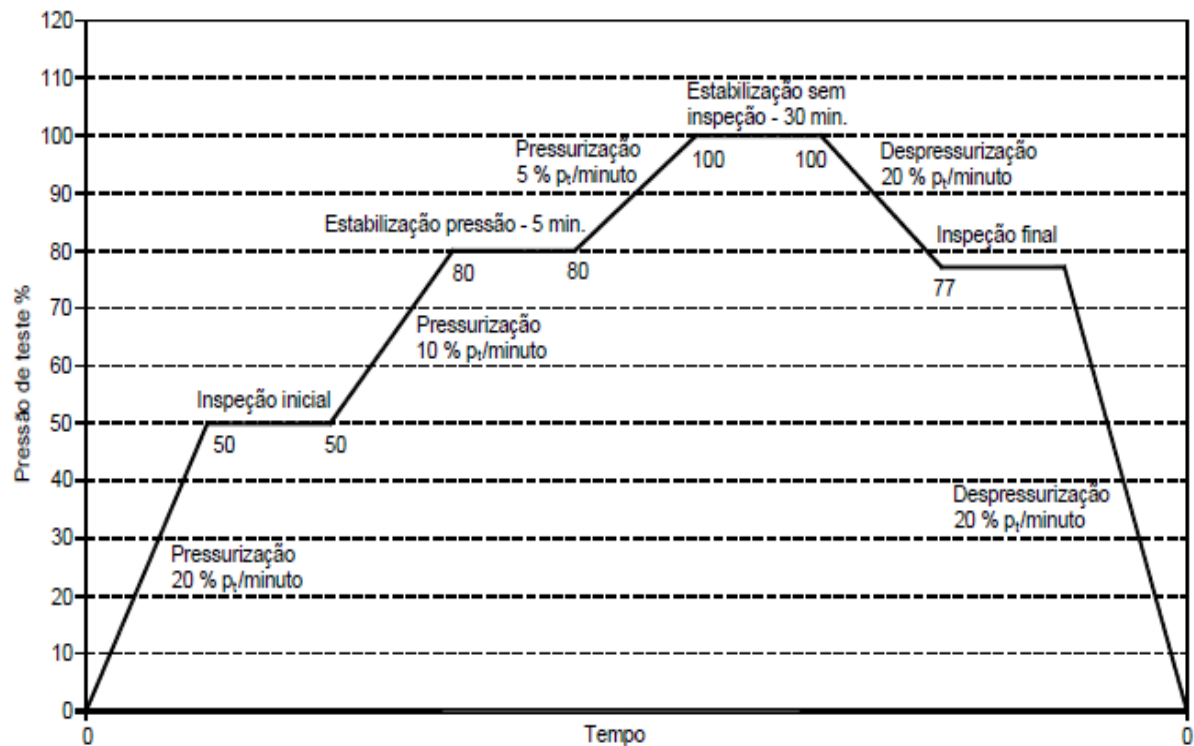
Os equipamentos devem ser isolados em um raio mínimo de 1 m, durante todo o teste de pressão.

5.7.3 Grupo de Risco 3

Os equipamentos não requerem isolamento durante todo o teste de pressão (PETROBRAS, 2014, p.8).

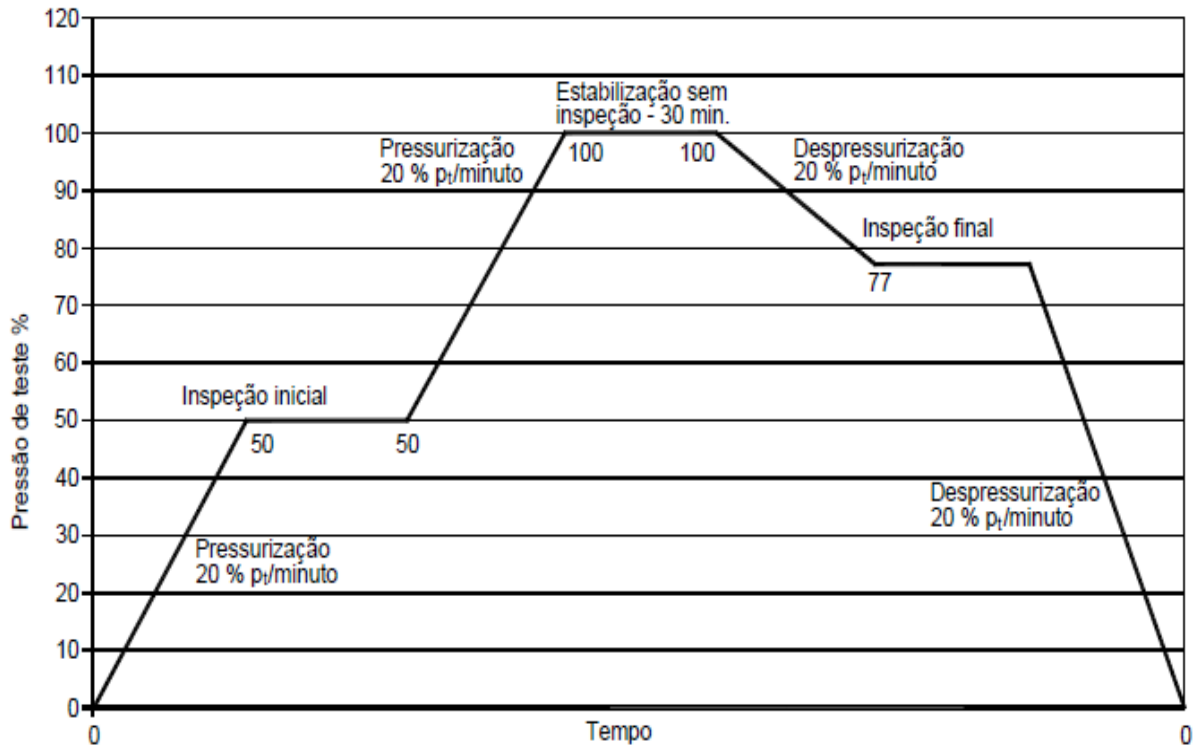
O teste também deve submetido de formas diferentes, dependendo do grau de risco do equipamento. A norma preconiza um gráfico para cada grupo, e exemplifica a forma em que o teste dever ser seguido. O gráfico 2 mostra os procedimentos para grupo de risco 1, o gráfico 3 para os que se enquadram no grupo de risco 2 e por ultimo, o gráfico 4, aqueles do grupo de risco 3.

Gráfico 2 - Teste hidrostático do grupo de risco 1



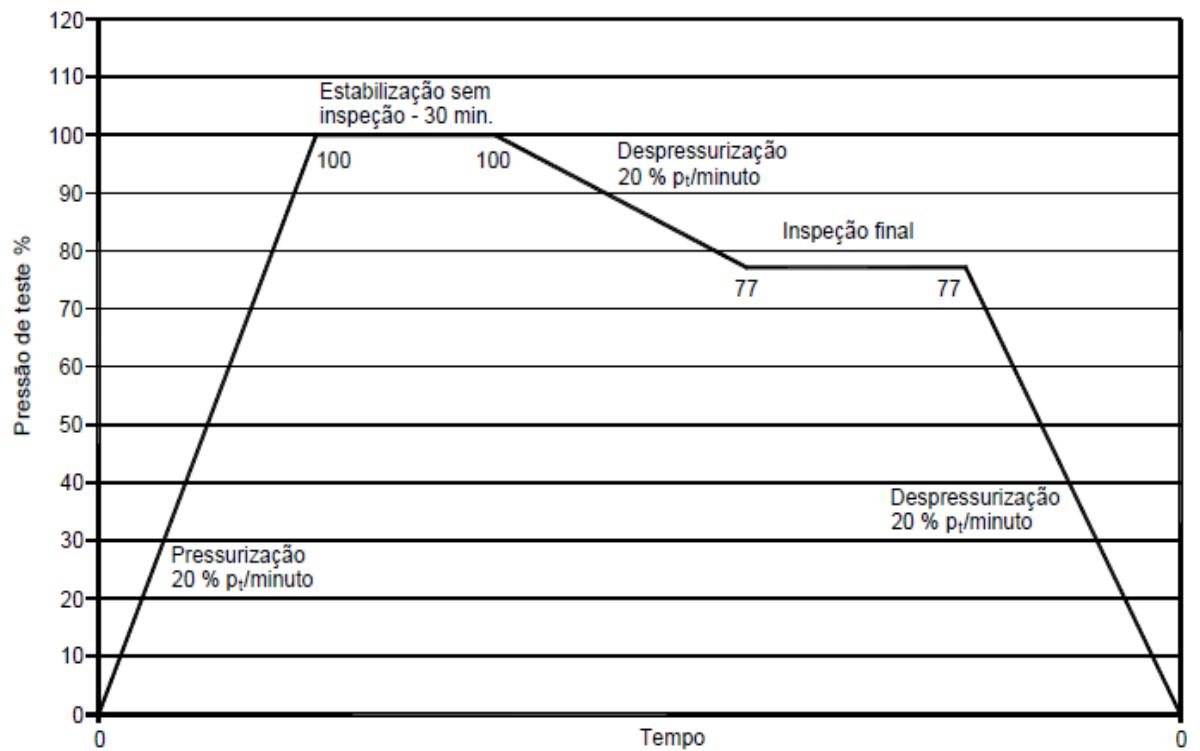
Fonte: PETROBRAS (2014, p.10).

Gráfico 3 - Teste hidrostático do grupo de risco 2



Fonte: PETROBRAS (2014, p.10).

Gráfico 4 - Teste hidrostático do grupo de risco 3



Fonte: PETROBRAS (2014, p.11).

Dessa forma, a maneira de conduzir o teste em ambos os graus de risco basicamente segue a mesma orientação, a pressão deve ser iniciada com 20% da pressão última, e a cada minuto aumenta-se mais 20%. Em alguns grupos de risco, uma inspeção inicial deve ser feita ao se atingir 50% da pressão máxima. Ao se atingir o ponto máximo, o vaso deve permanecer por 30 minutos em estanqueidade, e após, ocorre a despressurização, que também segue uma lógica de tempo e inspeções, igualando-se a maneira da pressurização inicial.

3. CAPÍTULO 3

3.1 METODOLOGIA

O reservatório em questão pode ser projetado em diversos tamanhos e capacidades diferentes, porém neste trabalho o objetivo crucial é atingir o ponto de falha da estrutura com a menor chapa que se consiga trabalhar, além de ser elaborado em tamanho reduzido, visando apenas estudo acadêmico. Será dimensionado com chapa de aço carbono de característica estrutural ASTM A36, de espessura MSG 16, ou seja, 1,52mm. Seu fundo será plano e apoiado sobre uma base sólida. A metodologia será dividida em etapas, que serão descritas na continuação.

3.1.1 Material

3.1.1.1 Livro Resistência dos Materiais 7ª ed. - Russell Charles Hibbeler

Os reservatórios metálicos não são utilizados para armazenar água pressurizada, contudo, suas grandes alturas geram consideráveis pressões de coluna d'água, por isso a metodologia adotada segue os princípios de vasos de pressão de paredes finas.

Para embasamento teórico de dimensionamento, a literatura utilizada será a apresentada nas referências e de autoria de Russell C. Hibbeler, onde demonstra as tensões atuantes em vasos de pressão de paredes finas.

3.1.1.2 Norma para cálculo de solda ABNT NBR 8800

Como embasamento teórico para cálculo de resistência da união soldada, será utilizado a norma NBR 8800, empregando-se da tabela apresentada nas

referências e de orientação para determinar os tipos de esforços atuantes na estrutura.

3.1.1.3 Aço carbono

Para o referido trabalho, faz-se necessário a utilização de chapas de aço carbono, de classificação estrutural ASTM A36, com espessura de 1,52mm, que será utilizada para construção do modelo de ensaio.

3.1.1.4 Solda

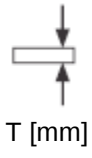
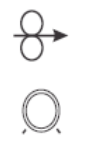
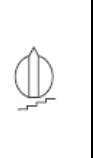
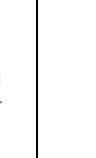
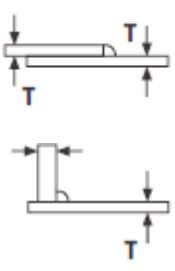
A construção do modelo necessita de união dos componentes, que será feita utilizando-se de uma máquina de solda MAG, de marca ESAB, modelo Smaschweld 408, conforme figura 10. Como material de solda, será utilizado eletrodo de tipo ER70S-6 da marca Arcelor Mittal, com bitola de 1,00mm de espessura e gás de proteção ativo, CO₂, da marca AirLiquide. Para os parâmetros de soldagem, foram utilizados os próprios fornecidos pela fabricante, tais como são apresentados na tabela 5, destacados na cor vermelha. A regulagem do gás utilizou-se a instrução, conforme Senai (2001, p.11), “uma regra para determinar a vazão ideal é fazer um teste, iniciando com vazão elevada e diminuindo gradativamente até que se comece uma oxidação superficial do cordão, a vazão ideal será a mais próxima e superior a essa”.

Figura 10 - Máquina de solda Esab Smaschweld 408



Fonte: Esab (2017).

Tabela 5 - Parâmetros de solda Smashweld 408

SMASHWELD 408/408 TopFlex	 T [mm]	 d [mm]	Fe Ar+25%CO ₂			Fe CO ₂ 100%		
			 1-19	 1-2	 1-10	 1-19	 1-2	 1-10
	1,5 2,0	0,8	7	1	2	5	1	3
		0,9						
		1,0	5	1	1	4	1	3
		1,2	3	1	1	2	1	1
	3,0 4,0	0,8	8	1	6	8	1	6
		0,9						
		1,0	7	1	4	5	1	5
		1,2	5	1	3	4	1	4

Fonte: Adaptado de Esab (2017).

3.1.1.5 Puncionadeira Linha C

O fundo e a tampa precisam ser cortados de forma que suas extremidades não fiquem com rebarbas e com geometria defeituosa. Para o corte circular, a máquina utilizada será uma puncionadeira de tipo C, também conhecida popularmente como “guilhotina tico-tico”, que funciona através de dois bits quadrados de aço rápido, onde um está fixo e outro se movimenta no sentido vertical varias vezes por segundo, e a chapa ao passar pelo espaço que entre as duas ferramentas de corte, é rasgada. A figura 11, mostra a máquina de corte.

Figura 11 - Puncionadeira Linha C



Fonte: Franho (2017).

3.1.1.6 Calandra de rolos

As chapas do costado para tomar a forma de um cilindro precisam ser curvadas, e a máquina utilizada foi a calandra de rolos. A calandragem consiste de um processo de conformação de metais, pelo qual se dá forma a chapas e/ou

laminados através da passagem destes por cilindros, ficando com seu aspecto final curvado. A figura 12 exhibe uma calandra de rolos.

Figura 12 - Calandra de rolos



Fonte: Faccin (2017).

3.1.1.7 Bomba Hidráulica

Para o ensaio de pressão hidrostática, uma bomba pressurizadora incorporada a um manômetro é necessária. A bomba que será utilizada é uma máquina de pintura Airless, que pressuriza e pulveriza tinta, vernizes e outros produtos, inclusive água. O equipamento será da marca Graco, de modelo Ultra Max II 490 PC Pro, que a figura 13 mostra com mais detalhes, seu sistema de informação conta com manômetro digital e segundo fabricante atinge até 227 bar de pressão, conforme tabela 6. No entanto, seu marcador informa apenas a pressão em MPa, e inicia sua escala em 1,6 MPa. Devido a isto, um manômetro de menor escala foi instalado à linha de pressão para efetuar o monitoramento.

Figura 13 - Bomba pressurizadora Graco Ultra 490



Fonte: Graco (2017).

Tabela 6 - Especificações Graco Ultra 490

Ultra Max II 490 PC Pro	
Maximum Tip Size	0.023
Maximum Psi (bar)	3300 (227)
Maxim gpm (lpm)	0.54 (2.0)
Motor HP	1.0 Brushless DC

Fonte: Graco (2017).

3.1.1.8 Norma Petrobras N-270

A construção do modelo deve respeitar um método já conhecido e normatizado, para que duvidas quanto à resistência da estrutura não apareçam. A norma estabelecida pela Petrobras exemplifica e direciona a melhor maneira para que sejam dispostas as chapas.

3.1.1.9 Norma Petrobras N-2688

Para que o teste hidrostático ocorra com segurança e com resultados aceitáveis, a melhor maneira é seguir os procedimentos previstos em norma, esta desenvolvida pela Petrobrás, que aplica em seus ensaios de vasos pressão cotidianamente. No objeto de estudo deste trabalho, foram utilizadas as mesmas condições impostas para ensaios em vasos de pressão, devido aos reservatórios deterem uma considerável pressão exercida pela coluna de água no fundo e costado.

3.1.2 Métodos

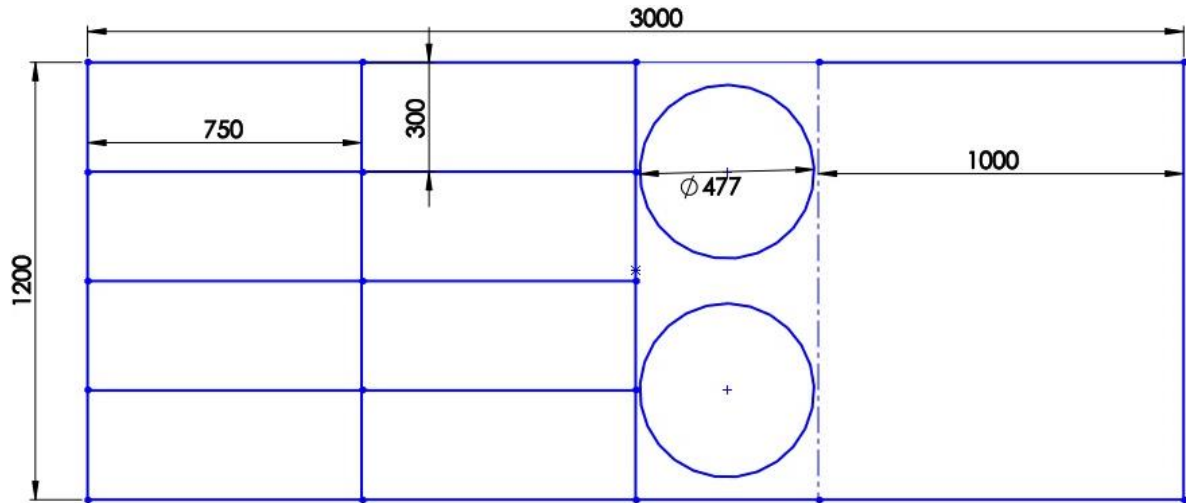
3.1.2.1 Capacidade e dimensões gerais

As dimensões e capacidade do referido modelo, foram baseadas em fatores construtivos e financeiros para sua construção, uma vez que após o ensaio estará comprometido estruturalmente.

Analisando esses aspectos, a conclusão é que o melhor tamanho para a construção do modelo é com aproximadamente 477 milímetros de diâmetro e com 1.200 milímetros de altura, comportando aproximadamente 0,2144 m³, ou seja, 214,44 litros. A chapa do teto e fundo serão inteiriças, e as chapas de costado terão aproximadamente 750 x 300 milímetros, sendo comprimento e altura respectivamente. Para efeitos de cálculos, adotou-se o raio como sendo 238,50 milímetros.

Dessa maneira, consegue-se ter o melhor proveito da chapa, que comercialmente possui 1200 x 3000 milímetros de largura e comprimento, nesta ordem, restando apenas um único pedaço de 1200 x 1000 milímetros de chapa. A figura 14 mostra a maneira como foi cortada a chapa.

Figura 14 - Exemplificação do corte das chapas



Fonte: Autor (2017).

3.1.2.2 Cálculo através das tensões atuantes

O primeiro procedimento foi a obtenção da resistência estrutural ao qual o reservatório irá suportar. Através do método de tensões planas, e utilizando-se das tensões do material, obtivemos a força na qual o material resistirá até que sua ruptura seja alcançada. A tensão de resistência à ruptura utilizada para dimensionamento foi a determinada pela ASTM (American Society for Testing and Materials). Para o referido descrito, temos atuando duas tensões principais, que aplicando valores chegamos aos seguintes resultados:

a) Tensão circunferencial

$$\sigma_1 = \frac{P \times r}{t}$$

$$400 = \frac{P \times 238,50}{1,52}$$

$$P \times 238,50 = 608$$

$$\rightarrow P \cong 2,55 \text{ N/mm}^2$$

Dessa maneira, temos que para a tensão circunferencial, a pressão máxima suportada será de 2,55 N/mm².

b) Tensão longitudinal

$$\sigma_2 = \frac{P \times r}{2t}$$

$$400 = \frac{P \times 238,50}{2 \times 1,52}$$

$$P \times 238,50 = 1.216$$

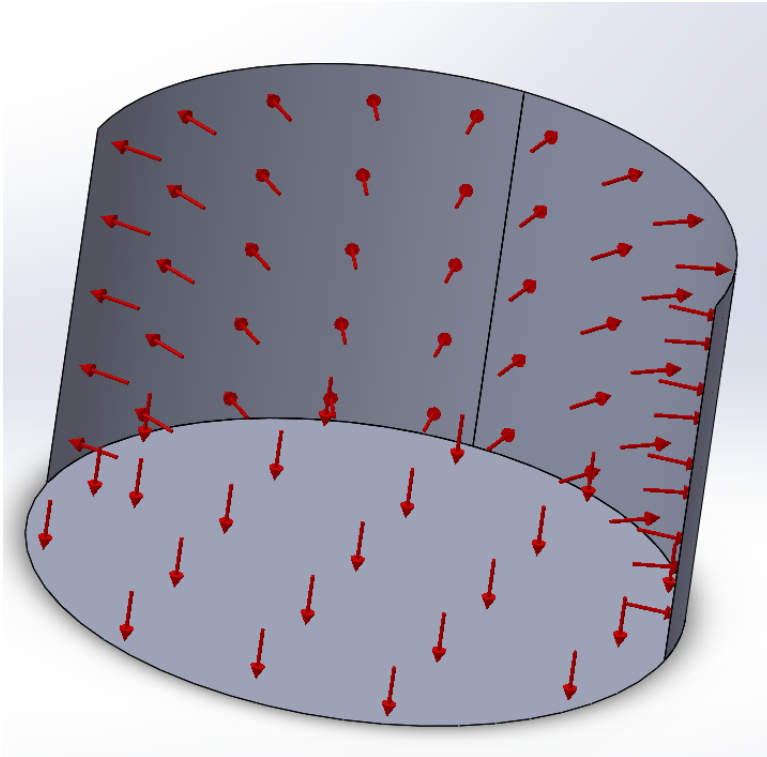
$$\rightarrow P \cong 5,09 \text{ N/mm}^2$$

Assim, temos que para a tensão longitudinal, a pressão máxima de resistência da estrutura será de 5,09 N/mm².

3.1.2.3 Cálculo de uniões dos componentes

Como segundo procedimento, outro fator limitante na estrutura é a união de chapas, que no caso em questão será confeccionada através de solda MAG, de penetração total, neste caso, somente externa à estrutura. O procedimento de cálculo de solda foi tomado com base na norma ABNT NBR 8800/1986, a resistência do eletrodo foi adotado a preconizada pela norma AWS A5.18, sendo a sua resistência máxima, ou seja, tensão de tração. Apenas um tipo de solda foi utilizado, de entalhe com penetração total. A figura 15 exemplifica como a pressão atua no modelo, e com base nisso temos a definição do vetor força e a consequente maneira de como calcular a resistência da solda, conforme norma.

Figura 15 - Exemplificação da pressão hidrostática



Fonte: Autor (2017).

Para esse tipo de solda, e essa solicitação de força temos que a tração é normal ao eixo da solda, portanto, segundo tabela 1:

a) Chapas do costado

$$\varphi Rn = Aw \times fw \quad e \quad \varphi = 0,90$$

$$Aw = [(2 \times 750) + (2 \times 300)] \times 1,52$$

$$Aw \cong 3.192 \text{ mm}^2$$

$$Rn = 3.192 \times 480$$

$$Rn = 1.532.160 \times 0,90$$

$$\varphi Rn \cong 1.378.944 \text{ N}$$

$$P = \frac{F}{A}$$

$$P = \frac{1.378.944}{(750 \times 300)}$$

$$\rightarrow P \cong 6,12 \text{ N/mm}^2$$

b) Chapas do fundo e teto

$$\varphi Rn = Aw \times fw \quad e \quad \varphi = 0,90$$

$$Aw = (2 \times \pi \times \text{raio}) \times 1,52$$

$$Aw = (2 \times \pi \times 238,50) \times 1,52$$

$$Aw \cong 2.277,78 \text{ mm}^2$$

$$Rn = 2.277,78 \times 480$$

$$Rn = 1.093.334,40 \times 0,90$$

$$\varphi Rn \cong 984.000 \text{ N}$$

$$P = \frac{F}{A}$$

$$P = \frac{984.000}{(\pi \times \text{raio}^2)}$$

$$P = \frac{984.000}{(\pi \times 238,50^2)}$$

$$\rightarrow P \cong 5,50 \text{ N/mm}^2$$

Sendo assim, a pressão máxima que o reservatório irá suportar até que sua ruptura ocorra, é a pressão de 2,55 N/mm², ou seja, a tensão circunferencial é a limitante neste estudo.

3.1.2.4 Construção do modelo

Como maneira de comprovar e concluir o trabalho, um protótipo foi confeccionado, utilizando-se de matéria prima determinada em dimensionamento, no caso, chapa laminada a quente, ASTM A36, de 1,52 milímetros de espessura. A solda também será a definida em cálculo anterior.

Para a construção da estrutura, a melhor maneira de disposição das chapas do costado é de forma intercalada, onde a junção vertical de duas chapas deve permanecer no mínimo um terço de seu comprimento, de distância de outra junção superior ou inferior, esse método de construção deixa a estrutura mais rígida

(PETROBRAS, 2013). Para este trabalho, foi adotado que as uniões verticais coincidiriam exatamente na metade do comprimento das chapas adjacentes.

As chapas do fundo e teto foram desenhadas com um compasso composto de um pequeno pedaço de metal duro em sua extremidade, que ao ser pressionado no aço deixa uma marca definida, conforme figura 16. Após a marcação, foi feito o corte a plasma.

Figura 16 - Marcação para corte fundo e teto



Fonte: Autor (2017).

Para a construção do costado, as chapas também foram marcadas com um riscador e após recortadas em guilhotina, buscou-se aproveitar o máximo das chapas, para não haver desperdícios e retalhos. A figura 17 mostra as chapas cortadas e prontas para o próximo passo.

Figura 17 - Chapas do costado recortadas



Fonte: Autor (2017).

Após ter todas as peças, a próxima etapa foi a calandragem, onde as chapas do costado irão ser arredondadas dando forma ao tanque. Como a metade da circunferência do tanque coincide com o tamanho em comprimento das chapas, ao atingir o diâmetro (477,00 mm) o processo de calandra está terminado e outra peça pode ser colocada na máquina. A figura 18 apresenta a chapa em seu estado final de calandragem.

Figura 18 - Chapa costado calandrada



Fonte: Autor (2017).

De posse de todas as peças, o processo final é a união. Utilizando solda MAG, todas as partes foram unidas e sempre buscando a perfeita penetração da solda e o alinhamento dos elementos. A solda utilizada sempre foi a de entalhe, onde as duas faces de junção são colocadas de topo e a solda efetuada. No fundo e teto, foi cortado com o diâmetro ligeiramente maior, para que apoie sobre as chapas de costado perpendicularmente, assim formando um cordão de entalhe em toda a circunferência. Para a montagem inicial, a solda foi feita através de pontos, e após o modelo estar todo montado a solda de cordão foi aplicada. A figura 19 exhibe a solda de montagem sendo efetuada.

Figura 19 - Processo de solda para montagem do modelo



Fonte: Autor (2017).

Após todo o tanque estar soldado e unido, uma conexão hidráulica de bitola $\frac{1}{4}$ " é soldada à sua estrutura, adotada a posição média da altura do modelo, para não impactar as tensões atuantes no modelo, comprometendo os resultados. Nesta será acoplada a mangueira para efetuar o teste hidrostático. Também, não menos importante, foi unida à estrutura, uma conexão de bitola $\frac{3}{4}$ ", utilizada para sangria do ar, que não deve conter dentro do reservatório durante o ensaio, esta foi soldada na parte superior do reservatório, permitindo também a visualização de quando estiver completamente cheio de água. A figura 20 exhibe as conexões utilizadas para o ensaio.

Figura 20 - Conexões hidráulicas utilizadas para ensaio hidrostático



Fonte: Autor (2017).

3.1.2.5 Teste hidrostático

Para o teste final, o corpo de prova, será submetido a uma pressão de água, através de uma bomba pressurizadora. Para o processo ocorrer adequadamente, primeiro o reservatório será preenchido de água completamente em posição vertical até seu transbordo pela conexão localizada na tampa, de modo que não restem espaços vazios com gases, na condição, ar, podendo comprometer o resultado do ensaio, visto que, os gases diferentes dos fluidos incompressíveis expandem-se para preencher um volume.

Na realidade, a água também é compressível, porém muito pouco, e isso não irá comprometer de forma significativa os testes, pois o que estaremos observando é somente a pressão submetida e a deformação e/ou ruptura da estrutura, não sendo muito importante a pouca compressibilidade do fluido em questão.

Diz-se que um fluido é incompressível se o seu volume não varia ao modificar a pressão. Isso implica o fato de que, se o fluido for incompressível, a sua massa específica não variará com a pressão.

É claro que na prática não existem fluidos nessas condições. Os líquidos, porém, tem um comportamento muito próximo a esse e na prática, normalmente, são considerados como tais. [...]

É importante compreender que nenhum fluido deve ser julgado de antemão. Sempre que ao longo do escoamento a variação de massa específica μ for desprezível, o estudo do fluido será efetuado pelas leis estabelecidas para fluidos incompressíveis (BRUNETTI, 2008, p.10).

Após a água escorrer completamente pela conexão e não restar mais nenhum espaço com ar, conforme a figura 21, o tampão da conexão superior é firmemente apertado e então aplicamos uma leve pressão para verificar possíveis vazamentos nas juntas soldadas e conexões.

Figura 21 - Reservatório completamente cheio para início do teste hidrostático.



Fonte: Autor (2017).

Comprovando a estanqueidade, o teste iniciou-se, elevando a pressão lentamente e observando o comportamento físico do modelo. Como foi inserido um manômetro auxiliar na linha de pressão para efetuar o monitoramento, as pressões foram convertidas para bar, devido sua escala estar nesta unidade, facilitando assim a verificação.

Conforme condições calculadas, o modelo terá uma pressão máxima prevista de 2,55 N/mm², sendo, 25,50 bar, e um volume de 0,2144 m³, assim, enquadrando-se no grupo de risco 3, não necessitando de isolamento da área. De acordo com o grupo de risco, o teste é feito elevando-se 20% da pressão máxima a cada minuto. As elevações de pressão ocorreram conforme estipulado pela norma, como mostra a tabela 7.

Tabela 7 - Pressões de teste hidrostático conforme Petrobras N-2688

Pressão de teste (%)	Pressão de teste (Bar)
20%	5,10
40%	10,20
60%	15,30
80%	20,40
100%	25,50

Fonte: Autor (2017).

Iniciamos o teste buscando atingir 20% da pressão máxima, 5,10 bar, porém ao atingir aproximadamente 4,00 bar, algumas deformações físicas apareceram, conforme figura 22. Uma leve deformação no fundo e teto foram identificados. Após um minuto, elevou-se a pressão á 20%, 5,10 bar e as deformações não tiveram consideráveis avanços.

Figura 22 - Reservatório a 20% da pressão máxima



Fonte: Autor (2017).

Aguardou-se mais um minuto, e a pressão foi elevada a 40%. Durante esse processo, as deformações antes observadas aumentaram consideravelmente à medida que a pressão foi elevada. Ao atingir a pressão de 40%, ou talvez muito próximo de alcançar 10,20 bar, o modelo não colapsou, mas ocorreu um ponto de vazamento na junta soldada da tampa, conforme figura 23.

Figura 23 - Reservatório a 40% da pressão máxima



Fonte: Autor (2017).

Após a ocorrência do orifício no cordão de solda, continuou-se a pressurização, porém conforme a água tornava a entrar, escoava pela trinca, não conseguindo estabilizar a pressão, então o teste foi encerrado. No entanto, a despressurização ocorreu mais rápido do que preconizada em norma, devido à fratura acelerar o processo de atenuação da pressão, não atingindo um controle preciso do tempo de esvaziamento.

4. CAPÍTULO 4

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como foi observado, o teste hidrostático foi encerrado muito antes de atingir seu limite de resistência, ao aproximar-se de 40 % da pressão máxima prevista de 2,55 N/mm², o ensaio teve de ser interrompido.

Embora a tensão limitante calculada tenha sido a circumferencial, observou-se que a fratura foi na região da solda de tampo, mesmo o material base sendo menos resistente em relação ao material de solda. O local onde ocorreu a fissura é considerado como solda de tampo e, portanto, sua resistência previamente calculada, foi de aproximadamente 5,50 N/mm², 55,00 bar de pressão. Para um melhor entendimento, os dados comparativos da relação aproximada em porcentagem referente à pressão atingida e a pressão máxima calculada, são mostrados na tabela 8.

Tabela 8 - Comparativo de pressões de cálculo e teste hidrostático

Tensões atuantes	Pressão Máxima Calculada (bar)	Pressão suportada em teste hidrostático (bar)	Relação em % da pressão máxima
Circunferencial	25,50	10,20	40%
Longitudinal	50,90	10,20	20%
Solda: Costado	61,20	10,20	16,7%
Solda: tampa / fundo	55,00	10,20	18,6%

Fonte: Autor (2017).

Dessa maneira, a resistência da solda de tampo, de 5,50 N/mm², atingiu apenas aproximadamente 18,6% de seu valor máximo. Ao final do teste foi conferida sua altura, que ficou em 1300 mm, ou seja, teve um estiramento longitudinal de 130 mm, e seu resultado final é mostrado na figura 24. O diâmetro não teve significativas alterações, e manteve-se praticamente igual ao inicial, com 477 milímetros.

Figura 24 - Comparação modelo antes e após teste hidrostático



Fonte: Autor (2017).

Pode-se observar que as discrepâncias na avaliação dos valores críticos das tensões estipuladas são fatores que divergiram e muito dos parâmetros experimentais. Uma vez que a tensão máxima e limitante apontou para uma fratura no sentido circunferencial da chapa, e a mesma ocorreu na solda de tampa. Também, não foram instalados outros itens que são comumente inseridos nos reservatórios metálicos de água, tais como escadas, guarda corpos, linhas de vida, tubulações, dentre outros, que podem também contribuir para acúmulos de tensões e causar pontos frágeis, passíveis de ruptura.

Outro detalhe a ser apontado, se a geometria do fundo e tampa não fossem planos, e tivessem uma menor redução abrupta da geometria, talvez ter-se-ia atingido uma maior resistência, pois o resultado final da deformação mostrou que ambos tenderam a tornar-se abaulados.

Assim sendo, temos que o método de análise tratado neste trabalho, não cumpriu satisfatoriamente a ideia proposta, devido a não ter atingido um valor próximo àquele previsto, além de a fratura ocorrer em um local inesperado.

Contudo, caso se adotasse os dados provenientes deste ensaio, 10,20 bar de pressão máxima na solda, um coeficiente de segurança de 5,40 poderia ser

utilizado neste cálculo. Como exemplificação de aplicação em caso real, um reservatório comercial de 1,91 metros de diâmetro, utilizando-se da mesma chapa de aço carbono A36, de 1,52 mm de espessura:

$$\phi Rn = A_w \times f_y \text{ e } \phi = 0,90$$

$$A_w = (2 \times \pi \times 955) \times 1,52$$

$$A_w \cong 9.120,67 \text{ mm}^2$$

$$\phi Rn = 9.120,67 \times 480 \times 0,90$$

$$\phi Rn \cong 3.940.130 \text{ N}$$

$$P = \frac{F}{A}$$

$$P = \frac{3.940.130}{(\pi \times 955^2)}$$

$$\rightarrow P \cong 1,37 \text{ N/mm}^2$$

Utilizando um fator de segurança de 5,40, tem-se:

$$P \cong 0,2546 \text{ N/mm}^2$$

Dessa maneira, resistiria a uma pressão de aproximados 0,2546 N/mm² (2,54 bar), equivalendo-se a uma altura de coluna de água, ao nível do mar, de aproximadamente 15,62 metros.

O presente modelo teve seu tamanho e capacidade reduzidos, e não apresentou nenhum dano ou possível risco de acidente em sua ruptura, no entanto, caso fosse fabricado um reservatório de maior escala, as chances de incidentes seriam elevadas.

5. CAPÍTULO 5

5.1 CONCLUSÃO

Poucas literaturas têm exemplificado esse tipo de dimensionamento de reservatórios metálicos de água, apesar de ser uma estrutura que se encontra facilmente em diversas instalações.

Atualmente, as empresas fabricantes deste tipo de produto, tem uma vasta experiência no ramo, e, por conseguinte, uma grande informação de projetos de engenharia, mas por concorrência de mercado, não são divulgados.

Os reservatórios de água não são submetidos à pressurização, tem sua estrutura responsável somente por armazenar água à pressão atmosférica, contudo, tem elevadas alturas e assim, grandes pressões de coluna de água em seu fundo e costado. O teste hidrostático foi a maneira encontrada para atingir uma pressão elevada sem a necessidade de um modelo com uma grandiosa altura.

A comparação dos resultados obtidos pelas expressões teóricas com os obtidos com o ensaio hidrostático foi a forma encontrada para defrontar duas ferramentas de projetos mecânicos e conseguir parâmetros de segurança.

Obviamente, era esperado que os resultados encontrados, tanto pelo desenvolvimento teórico, como pelo teste prático, fossem divergentes, porém não se esperava que a diferença fosse tão distante, e que tendesse a valores mais aceitáveis.

Esse fato pode ser observado pela “tabela 8” apresentada no capítulo anterior, onde a pressão limitante de $2,55 \text{ N/mm}^2$ (25,50 bar), que foi a menor encontrada, que apontava para uma fratura no sentido circunferencial da chapa de costado não teve sequer início de uma possível ruptura, sendo que a pressão atingiu 40% de seu valor, e a tensão da solda que une a tampa ao costado, com aproximados 215% a mais de resistência em relação à tensão limitante, foi quem determinou a máxima resistência. Dessa maneira, ao atingir apenas 18,6% da tensão de solda onde ocorreu o fato, o modelo já apresentou uma falha.

Outro detalhe a ser apontado, é que a maior deformação ocorreu no sentido longitudinal, tendo uma alteração de aproximadamente 130 milímetros, e no sentido

circunferencial não teve modificações significantes, assim, por mais que a tensão longitudinal seja duas vezes maior que a de aro, foi a que mais teve deformidades.

Um coeficiente de segurança poderia ser extraído deste ensaio, no entanto não foram obtidos resultados confiáveis, por tratar-se de um caso possivelmente isolado, e isto, iria acrescentar material em toda a estrutura, aumentando seu custo de fabricação, e em reservatórios maiores seria muito menos competitivo comercialmente adotar esta medida. Além do que, não se teve certeza que o resultado teórico necessita um fator de correção, devido a ter-se efetuado apenas um teste prático de verificação.

Como observação final, os resultados encontrados não foram satisfatórios para balizar um projeto de reservatório metálico, devido a não ter atingido a previsão previamente calculada, e uma falha prematura e inesperada ter acontecido, impedindo a continuidade do ensaio hidrostático. Algumas estimativas do que pode ter ocorrido, são que algo impremeditado ocorreu durante a fabricação, mas especificamente durante a soldagem, ocasionando um ponto frágil específico, resultando em uma falha do cordão de solda e acarretando a falha antecipada não esperada, também, o material ter um defeito em sua laminação, com pontos concentrados de carbono, tornando-o frágil e não atingindo suas propriedades mecânicas estipuladas.

Após o término do ensaio, foi feita uma correção com solda no local do orifício de falha, e tentado um novo teste, porém não se teve resultados convincentes, devido a um novo defeito ter ocorrido muito próximo ao conserto, mais especificamente logo ao lado do reparo, com praticamente a mesma pressão.

Para um melhor embasamento, novas análises devem ser feitas, tais como, elaborar mais alguns ensaios em novos protótipos, nas mesmas condições, para inutilizar as suspeitas de problemas de construção, uma inspeção através de radiografia na junta soldada deste modelo buscando alguma imperfeição e/ou não penetração adequada da solda e um ensaio de tração de uma junta soldada neste mesmo aço carbono, averiguando sua resistência mecânica.

Sugere-se que se deve ter cautela ao projetar um reservatório metálico apenas com literaturas, sem ter um conhecimento prático, uma vez que as falhas estruturais podem ocorrer muito antes daquelas previstas e em locais inesperados. Além disso, os efeitos de um erro de projeto podem ser catastróficos.

6. CAPÍTULO 6

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, ficam aqui descritas algumas propostas:

- Repetir o teste hidrostático em novos modelos nas mesmas condições;
- Analisar o modelo dimensionado através do método de elementos finitos;
- Construir o referido modelo em outro tipo de aço estrutural;
- Efetuar uma radiografia na solda onde ocorreu a ruptura;
- Ensaiar uma junta soldada com os mesmos materiais utilizados neste modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7821**: Tanques soldados para armazenamento de petróleo e derivados. Rio de Janeiro: Abnt, 1983. 118 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto e Execução de Estruturas de Aço em Edifícios. Rio de Janeiro: Abnt, 1986. 107 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A36**: Standard Specification for Carbon Structural Steel. West Conshohocken: Astm, 2004.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **A5.18**: Specification for Carbon Steel Electrodes and Roods for Gas Shielded Arc Welding. Miami: AWS, 1993.

BEER, Ferdinand Pierre. **Resistência dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 1995.

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos Fluidos**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

ELETRIC, Lincoln. **Nomenclatura AWS**. 2017. Disponível em: <<http://www.lincolneletric.com.br/>>. Acesso em: 22 abr. 2017.

ESAB. **Equipamento Industrial**. 2017. Disponível em: <<http://www.esab.com.br/br/pt/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=0030016>>. Acesso em: 17 ago. 2017.

FACCIN. **Calandras para Chapas**. 2017. Disponível em: <<http://www.faccin.com/pt/produtos/calandras-para-chapas/>>. Acesso em: 01 set. 2017.

FRANHO. **Máquina Universal Para Corte De Chapas**. 2017. Disponível em: <<http://www.franho.com.br/produto.php?codigo=4804>>. Acesso em: 01 set. 2017.

GERE, James M.. **Mecânica dos Materiais**. 5. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2003.

GRACO. **Equipamento de pintura por pulverização**. 2017. Disponível em: <<http://www.graco.com/br/pt/products/contractor/ultra-max-ii-490-pc-pro.html>>. Acesso em: 17 ago. 2017.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

PETROBRAS. **N-270**: Projeto de Tanque de Armazenamento Atmosférico. Rio de Janeiro: Contec, 2013. 49 p.

PETROBRAS. **N-2688**: Teste de Pressão em Serviço de Vasos de Pressão e Caldeiras. Rio de Janeiro: Contec, 2014. 14 p.

PINHEIRO, Antônio Carlos da Fonseca Bragança. **Estruturas Metálicas**: Cálculos, detalhes, exercícios e projetos. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2005.

SENAI. **Tecnologia de solda**: Processo tig e eletrodo revestido. Recife: Senai, 2001. 49 p.

WALBERT, Allan. **Agricultura é quem mais gasta água no Brasil e no mundo**. 2015. Disponível em:
<<http://www.ebc.com.br/noticias/internacional/2013/03/agricultura-e-quem-mais-gasta-agua-no-brasil-e-no-mundo>>. Acesso em: 10 de mar. 2017.