

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA
DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

VALTER FIRMINO DA SILVA JUNIOR

PROJETO ESTRUTURAL E DE FABRICAÇÃO DE VASO DE
PRESSÃO ESFÉRICO

SÃO PAULO

2011

VALTER FIRMINO DA SILVA JUNIOR

PROJETO ESTRUTURAL E DE FABRICAÇÃO DE VASO DE
PRESSÃO ESFÉRICO

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de graduação em
Engenharia Mecânica

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Edison Gonçalves

SÃO PAULO

2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva Junior, Valter Firmino da

**Projeto estrutural e de fabricação de vaso de pressão esférico / V.F. da Silva Junior. – São Paulo, 2011.
86 p.**

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Tecnologia mecânica 2. Processos de fabricação 3. Tanque de combustível (Ensaio; Segurança) 4. Separação sólido-gás (Processos) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

Em seguida, ao meu orientador, Prof. Dr. Edison Gonçalves, por estar em todos os momentos disposto a me instruir, ter bastante paciência em me ensinar e ao mesmo tempo exigir de mim muito empenho e garra para enfrentar os momentos de dificuldades encontrados durante o projeto.

Agradeço ao Prof. Dr. Gilmar Batalha, por me instruir nos assuntos de fabricação mecânica. Não poderia deixar de agradecer também ao docente coordenador da disciplina, Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto, por nos passar ensinamentos de planejamento e estrutura para desenvolvimento de projetos, ensinamentos que são vitais para nossa formação de engenheiro.

Agradeço aos engenheiros Shen, Francisco e Abilio por transmitirem informações de difícil acesso sobre fabricação de esferas. Ainda deixo meus agradecimentos aos demais professores, familiares e amigos que diretamente ou indiretamente colaboraram neste trabalho.

RESUMO

No presente trabalho são abordados o projeto estrutural e estudo da fabricação e montagem de um vaso de pressão esférico para armazenamento de GLP. Para tanto, foram levados em consideração principalmente o Código ASME - que traz especificações de projeto e fabricação de vasos de pressão - e o contato com profissionais e empresas deste segmento.

No campo de projeto, são dimensionadas as estruturas do costado e das colunas de sustentação da esfera para uma capacidade de 10.000 m³ e selecionam-se materiais para as referidas estruturas. Ao passo que no campo da fabricação, são abordados os processos de corte e conformação dos gomos que compõem a esfera. E na montagem são abordadas as etapas principais da montagem, propriamente dita, da esfera em seu local de uso, com ênfase no processo de soldagem; são abordados ainda o tratamento térmico e o ensaio hidrostático da esfera.

Os resultados obtidos para as dimensões do costado e das colunas de sustentação da esfera são coerentes com valores típicos de esferas. Os materiais selecionados também são típicos de esferas e cobertos pelo código ASME. No processo de manufatura, realiza-se o corte por meio do processo de oxicorte, com auxílio de máquina CNC; a conformação é realizada por prensagem em uma prensa hidráulica.

Salienta-se que o projeto e a fabricação de uma esfera vão muito além do que foi abordado neste projeto. Ainda que neste tenham sido tratadas as partes essenciais de uma esfera (o costado e o suporte), uma análise mais aprofundada seria requerida nestas partes bem como também poderiam ser tratados os demais acessórios de uma esfera.

Palavras-chave: Esfera. Vaso de pressão. Projeto estrutural. Fabricação. GLP.

ABSTRACT

In the project were made to study the structural design and manufacture and erected of a spherical pressure vessel for storing LPG. For this purpose, we studied mainly the ASME Code - which has specifications for the design and manufacture of pressure vessels - and contacted professionals and companies in this segment.

In the field of design, the wall and the support columns of the sphere were designed for a capacity of 10,000 m³ and materials were selected for these structures. While in the field of manufacturing processes are discussed cutting and forming of the petals that make up the sphere. And in the erected are discussed the main stages of erected, itself, the sphere on its place of use, emphasizing the welding process, are discussed further heat treatment and hydrostatic test of the sphere.

The results obtained for the petals and of the support columns dimensions of the sphere are consistent with typical values. The selected materials are also typical and covered by the ASME Code. In the manufacturing process, the cutting will be done through the oxyfuel process, with the help of CNC machine, the conformation will be performed by pressing in a hydraulic press.

It should be noted that the design and manufacture of a sphere goes far beyond that was discussed in this project. Although this has been treated the essential parts of a sphere (the wall and support), further analysis would be required in these parts and could also be treated the accessories of a sphere.

Keywords: Sphere. Pressure vessel. Structural design. Manufacturing. LPG.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplos de reservatórios: cilíndrico, à esquerda; esférico, à direita (WIKIPÉDIA, 2010).	14
Figura 2 - Componentes principais da esfera.....	26
Figura 3 – Fluxograma: projeto, fabricação e montagem da esfera.	26
Figura 4 - Fluxograma: projeto do costado.....	26
Figura 5 - Fluxograma: projeto das colunas.	27
Figura 6 - Fluxograma: fabricação do costado.	27
Figura 7 - Fluxograma: Montagem da esfera.	28
Figura 8 - Esfera tipo Bola de Futebol. Adaptado de (MOSS, 2004).....	34
Figura 9 - Esfera tipo Meridiano, para “pequenos” diâmetros. Adaptado de (MOSS, 2004).	35
Figura 10 - Esfera tipo Meridiano, para “grandes” diâmetros. Adaptado de (MOSS, 2004).	35
Figura 11 -- Esfera tipo Bola de Futebol Parcial. Adaptado de (MOSS, 2004). 36	
Figura 12 – Proposta 1 - Esfera tipo Meridiano, para “grandes” diâmetros. Adaptado de [6].	37
Figura 13 - Suporte de um vaso esférico fixo. Fonte: figura da esquerda, origem desconhecida; figura da direita, (MOSS, 2004).	45
Figura 14 - Modelo de flambagem de viga engastada-apoiada. Extraído de (GERE, 2001).....	48
Figura 15 - Momento de inércia para uma seção tubo circular. Extraído de (GERE, 2001).....	49
Figura 16 - Esferas fabricadas com processo de hidroconformação a partir de poliedros. Extraído de (WANG, 1988).	62
Figura 17 - Conformação de gomos. Fabricante: Dillinger Hutte GTS. (Atente também para a prensa utilizada, ao fundo da figura).	63
Figura 18 - Fabricação de vaso esférico - fase 1: fundação das parte inferior das colunas, colocação de andaimes e início da fixação dos gomos do Equador(UNIMIT ENGINEERING, 2011).	66

Figura 19 - Fabricação de vaso esférico - fase 2: soldagem dos demais gomos do Equador, seguida pela montagem dos gomos dos trópicos, quando houver (UNIMIT ENGINEERING, 2011).....	67
Figura 20 - Fabricação de vaso esférico - fase 3: montagem das tampas inferior e superior (UNIMIT ENGINEERING, 2011).....	68
Figura 21 - Fabricação de vaso esférico - fase 4: esfera já com todos seus gomos montados, a partir desta fase, tem-se: furações, montagem de acessórios, PWHT, pintura e teste hidrostático (UNIMIT ENGINEERING, 2011).	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de vasos esféricos.	16
Tabela 2 – Requisitos de projeto: capacidade de armazenamento e propriedades do GLP.	16
Tabela 3 - Custo de fabricação.	30
Tabela 4 – Comparação de alternativas para geometria da esfera.....	37
Tabela 5 – Quantidade e dimensões de largura e comprimento circunferenciais dos gomos.....	39
Tabela 6 - Materiais da parede da esfera.....	40
Tabela 7 – Demais dados e propriedades do GLP.....	41
Tabela 8 - Espessura da parede (mm) de esferas em função da capacidade e da eficiência de solda.....	43
Tabela 9 - Resultados do dimensionamento do costado.....	44
Tabela 10 – Propriedades dos materiais considerados para a parte inferior da coluna (USIMINAS).....	46
Tabela 11 - Demais dados e propriedades do dimensionamento das colunas.....	46
Tabela 12 - Carregamentos.....	52
Tabela 13 - Dimensões e Tensão máxima atuante.....	52
Tabela 14 - Dimensões do tubo para os materiais considerados.....	54
Tabela 15 - Especificação de material: chapas dos gomos.	55
Tabela 16 - Especificação de material: tubos das colunas.....	57
Tabela 17 - Chanfro especificado para as juntas soldadas do costado.	70

LISTA DE SÍMBOLOS

EQ	Equador da esfera
TR	Trópico da esfera
TA	Tampa da esfera: inferior ou superior
i	Índice correspondente a um segmento da esfera (EQ, TR ou TA)
n_i	Quantidade de gomos do segmento i
r_i	Raio da circunferência máxima do segmento i
h_i	Altura da circunferência máxima do segmento i
l_i	Comprimento circunferencial dos gomos do segmento i
w_i	Largura circunferencial dos gomos do segmento i

SUMÁRIO

1	Introdução	13
1.1	Vasos de armazenamento	13
1.1.1	Tipos de tanques.....	13
1.1.2	Vasos esféricos.....	14
1.1.2.1	Aplicações	15
1.1.2.2	Dados de vasos esféricos	16
1.1.2.3	Requisitos da esfera deste projeto	16
1.2	GLP (Gás Liquefeito de Petróleo)	17
1.3	Objetivos	18
2	Revisão do material técnico	18
2.1	Moss	18
2.2	Código ASME.....	19
3	Metodologia.....	22
4	Descrição de etapas do trabalho	23
4.1	Descrição de atividades	23
4.2	Fluxograma de processos	25
4.3	Análise de custos	28
5	Descrição de componentes de uma esfera	31
5.1	Costado.....	31
5.2	Suporte.....	31
5.3	Demais componentes - acessórios	32
6	Projeto.....	33
6.1	Costado.....	34
6.1.1	Concepção geométrica.....	34
6.1.1.1	Tipos de esferas/ método de fabricação	34
6.1.1.2	Definição da geometria dos gomos	36
6.1.2	Espessura do Costado	40
6.1.2.1	Introdução.....	40

6.1.2.2	Materiais, dados e propriedades	40
6.1.2.3	Desenvolvimento	41
6.1.2.4	Resultados e análises	43
6.1.2.5	Conclusões	44
6.2	Colunas do suporte	45
6.2.1	Introdução	45
6.2.2	Materiais, dados e propriedades	46
6.2.3	Desenvolvimento	46
6.2.4	Resultados e análises	51
6.2.5	Conclusões	53
6.3	Especificação de Materiais	54
7	Estudo da Fabricação do costado	57
7.1	Descrição das etapas do processo	57
7.2	Especificação do processo de corte	58
7.3	Especificação do processo de conformação	60
7.3.1	Fundamentos da conformação mecânica	60
7.3.2	Processo adotado	62
8	Estudo da Montagem	65
8.1	Descrição das etapas do processo	65
8.2	Soldagem	69
8.3	PWHT (Postweld Heat Treatment)	71
8.4	Ensaio hidrostático	72
9	Conclusões	73
10	Trabalhos futuros	73
	REFERÊNCIAS	76
	APÊNDICE A – Comparação de esforços em esfera e em cilindro	79
	APÊNDICE B – Código SCILAB - Dimensionamento da parede da esfera	81
	APÊNDICE C – Resultados complementares - Dimensionamento da parede da esfera	82

APÊNDICE D – Código SCILAB - Dimensionamento da coluna do suporte.....	83
ANEXO A - ESPECIFICAÇÃO DE EQUIPAMENTO - SOLDAGEM.....	84
ANEXO B - ESPECIFICAÇÃO DE EQUIPAMENTO - CORTE	85

1 INTRODUÇÃO

1.1 VASOS DE ARMAZENAMENTO

Os vasos, reservatórios ou tanques de armazenamento, são vasos de pressão que se destinam a armazenar fluidos geralmente à pressão atmosférica ou a pressões superiores a esta. Estes vasos podem ter dimensões variadas, indo desde poucos centímetros até cerca de 50 m de diâmetro (Chattopadhyay, 2005). Sua fabricação deve satisfazer a normas técnicas específicas bem como receber inspeções periódicas a fim de segurança. Em termos de projeto, são classificados como tanques de armazenamento os reservatórios submetidos a uma pressão relativa inferior a 0,1 Mpa, os quais são projetados de acordo com o código API 620; vasos pressurizados (ou despressurizados) acima desta pressão relativa, seguem o código ASME.

1.1.1 Tipos de tanques

Os tanques de armazenamento podem ser classificados com relação à forma, utilização, localização e quanto ao teto; aqui será detalhada apenas a primeira classificação. Com relação à forma, os tanques costumam ser do tipo cilíndrico ou esférico, conforme ilustra Figura 1.

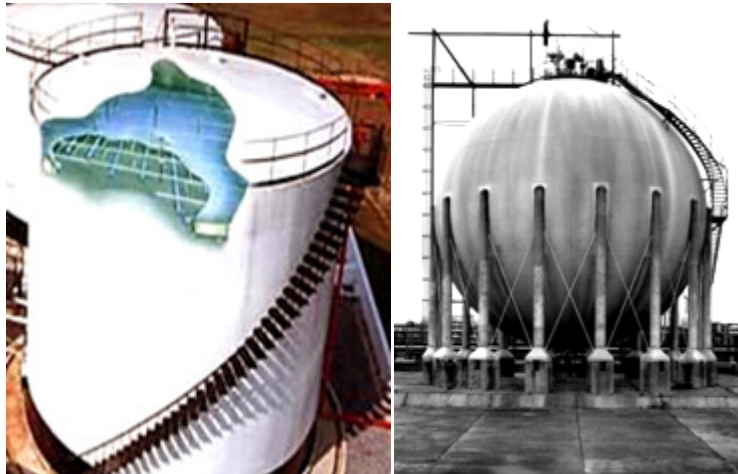


Figura 1 - Exemplos de reservatórios: cilíndrico, à esquerda; esférico, à direita (WIKIPÉDIA, 2010).

Os tanques cujo formato é cilíndrico são mais comuns, eles são utilizados por exemplo para armazenar água, gases sob alta pressão, combustíveis e outros produtos químicos, podem ser verticais ou horizontais. Já os tanques esféricos apresentam aplicações mais específicas, são empregados principalmente para armazenamento de gases sob alta pressão e podem ser encontrados por exemplo em refinarias de petróleo.

1.1.2 Vasos esféricos

Dentre os tipos de vasos de armazenamento, o mais recomendado para armazenar gás é o esférico, ilustrado do lado direito Figura 1 . Assim, boa parte das empresas e indústrias que utilizam vasos para armazenamento de gás fazem uso do tipo esférico.

Uma esfera é a forma geométrica mais eficiente para vaso de pressão porque ela oferece o máximo volume para uma dada área superficial - o que propicia uma menor troca de calor com a atmosfera - e a espessura requerida de uma esfera - para o mesmo material, diâmetro e mesma pressão interna - é a metade da espessura de um cilindro, conforme mostrado no APÊNDICE A –

Comparação de esforços em esfera e em cilindro. As tensões em uma esfera são iguais em cada eixo principal desconsiderando os efeitos do suporte.

Em termos de peso, quando comparada com um vaso cilíndrico - para um dado volume e material - a esfera teria aproximadamente apenas metade do peso. Ressalta-se ainda que devido ao fato deste vaso não apresentar vértices, ele tem a vantagem de não ter pontos de concentração de tensão, tendo a tensão uniformemente distribuída em sua estrutura, desconsiderando os efeitos das colunas de sustentação.

Contudo, esferas apresentam maior custo de fabricação, assim praticamente não são usadas em pequenos volumes; já para volumes maiores tornam-se viáveis, pois os altos custos são compensados pela maior capacidade de armazenamento.

1.1.2.1 Aplicações

A principal aplicação de esferas no país é para armazenar GLP (Gás Liquefeito de Petróleo). Contudo, também são empregadas para armazenar outros Hidrocarbonetos separadamente como os C_3 e os C_4 , e em raríssimos casos em aplicações criogênicas, sendo que para este último caso é mais comum o emprego de tanques cilíndricos, tendo em vista a maior complexidade de fabricação de reservatórios para esta aplicação e por requererem materiais especiais para resistir às baixas temperaturas e um isolante térmico especial (SHEN).

De forma geral, os principais produtos armazenados são: propano, butano, gás natural, oxigênio, nitrogênio, hidrogênio, etileno, hélio e argônio (MOSS, 2004).

No Estado de São Paulo, por exemplo, são encontradas esferas na REPLAN (Paulínia), na REVAP (São José dos Campos) e também nas unidades da Transpetro em Santos, no ABC e em Barueri, porém esta fora de operação.

1.1.2.2 Dados de vasos esféricos

A Tabela 1 mostra algumas características técnicas de vasos esféricos para armazenamento de determinados gases.

Tabela 1 - Dados de vasos esféricos.

Produto armazenado	Diâmetro (mm)	Volume (m³)	Pressão (MPa)	Espessura (mm)
Oxigênio	10700	650	3,15	44
Oxigênio	12300	1000	3,15	52
Nitrogênio	9200	400	2,63	36
Nitrogênio	12300	1000	2,63	44
GLP	12300	1000	1,77	32
----	21200	5000	0,40	42

Vasos esféricos fabricados na China, material 15MnNbR (ALIBABA, 2010).

1.1.2.3 Requisitos da esfera deste projeto

A Tabela 2 mostra a capacidade do vaso esférico a ser projetado e Propriedades físico-químicas do GLP.

Tabela 2 – Requisitos de projeto: capacidade de armazenamento e propriedades do GLP.

Característica	Valor
Produto armazenado	GLP (Gás Liquefeito de Petróleo)
Capacidade	10.000 m³
Pressão	1,8 MPa
Temperatura	27 °C
Massa específica do GLP	508 kg/ m³
Massa específica do GLP (vapor)	2,05 kg/ m³

Fonte de dados do GLP: (SHEN) e (LIQUIGÁS, 2011).

1.2 GLP (GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO)

O GLP, também conhecido por gás de cozinha, é composto principalmente de Butano e Propano. A LIQUIGÁS - distribuidora da Petrobrás - especifica as seguintes faixas de composições em volume: Propano, 40 - 60 %; Butano, 40 - 60 %; Etano e Hidrocarbonetos mais leves, máximo de 11%; Pentano e hidrocarbonetos mais pesados, 0,5 - 2,0 %. Demais propriedades do GLP podem ser conferidas na Tabela 2.

O GLP, depois de liquefeito e armazenado sob pressão aproximada de 1,8 MPa, tem seu volume reduzido em cerca de 280 vezes, o que representa um significativo “ganho de espaço” caso este fosse armazenado no estado gasoso. Em operação, a esfera é abastecida até 85% de sua capacidade, sendo os demais 15% preenchidos pelo vapor.

As principais etapas de produção e distribuição do GLP são:

- i. Exploração e extração do petróleo.
- ii. Refino, separação do GLP (composto principalmente de Butano e Propano).
- iii. Liquefação e armazenamento em esferas (maiores capacidades).
- iv. Transporte em caminhões para unidades de distribuição, nas quais o GLP é armazenado em cilindros ou em Botijões e seguem para consumo em indústrias e residências.

1.3 OBJETIVOS

São objetivos deste trabalho a realização do projeto estrutural e estudo da fabricação e montagem de um vaso de pressão esférico para armazenamento de GLP (Gás Liquefeito de Petróleo). Tendo em vista que o projeto de uma esfera completa é decomposta em vários outros projetos para cada componente, neste projeto dá-se ênfase ao costado e às colunas de sustentação do vaso, que constituem as partes essenciais de uma esfera. Tal projeto visa atender à demanda de refinarias de petróleo ou de uma unidade de distribuição deste gás.

2 REVISÃO DO MATERIAL TÉCNICO

As principais referências bibliográficas empregadas para orientação técnica deste projeto são abordadas a seguir. Salienta-se que nesta parte são tratados de forma sistêmica os assuntos levantados, sendo os aspectos específicos abordados na parte onde os assuntos foram utilizados.

2.1 MOSS

Esta referência (MOSS, 2004) é um guia para projeto de vaso de pressão e nela consta uma seção específica para fabricação de esferas. Este material é bem sucinto e trata dos seguintes assuntos para esferas:

- Cita os Produtos que são tipicamente armazenados;
- Códigos de construção;
- Materiais de construção;

- Dimensões da estrutura de esferas;
- Tipos de suporte e quantidade de colunas a serem empregadas;
- Tratamento térmico;
- Acessórios da esfera;
- Métodos de fabricação;
- Ensaio hidrostático.

2.2 CÓDIGO ASME

A principal norma a ser seguida para projeto, fabricação, inspeção e testes de vasos de pressão é o código ASME Seção VIII Divisões 1 e 2, sendo que esta última cobre maior parte das informações de projeto de esferas.

Outras normas que também trazem especificações de projeto de vaso de pressão são a AD-Merkblatter, EN13445 (antiga BS5500). A Petrobrás, principal cliente de esferas no país, tem suas normas próprias para projeto de esferas, sendo a N - 1281 a principal. Contudo, esta não entra em detalhes de projeto, mas especifica que o código ASME deve ser o Código principal a ser seguido. Esta norma foi considerada principalmente para especificações de projeto das colunas do suporte.

- Materiais

As propriedades mecânicas dos materiais típicos para construção de vasos de pressão podem ser encontradas na Seção II - Divisão 2 - Parte A. Nesta parte, também são fornecidas mais informações sobre cada material, tais como composição química e recomendação de resultado esperado no ensaio "Charpy", realizado pelo fabricante das chapas.

- Projeto

A expressão para cálculo da espessura do costado é fornecida nas Divisões 1 e 2 da Seção VIII. Na primeira divisão a expressão leva em consideração uma relação linear da espessura com a pressão ao passo que na segunda é indicada uma relação exponencial. Contudo, do ponto de vista prático as duas expressões apresentam resultados próximos.

A norma também especifica valores para eficiência da solda (E), que é empregada no cálculo da espessura do costado. Com relação ao conceito, ressalta-se que baixos valores de eficiência implicam numa menor tensão permitida no vaso e, por conseguinte, numa maior espessura de projeto. O valor dela depende da inspeção a que a solda será submetida, o código também comenta em detalhes sobre os ensaios não destrutivos aplicáveis.

- Fabricação

A seção VIII, Divisão 2, especifica para aços carbono baixa liga (que é o caso dos aços empregados no trabalho):

- As placas não devem ser conformadas a frio por golpes. Requisito que, possivelmente, tenha sido estabelecido devido ao fato dos golpes afetar as propriedades mecânicas do material.

- Placas podem ser conformadas por golpes na temperatura de forjamento desde que o material passe posteriormente por um tratamento de PWHT (Postweld Heat treatment), o qual permite o alívio de tensões no material após a soldagem.

- Solda

A seção VIII, Divisão 1, especifica os tipos de juntas soldadas para vasos de pressão pelos processos de soldagem a arco ou a gás, bem como o limite da espessura da chapa para cada tipo de junta.

O Código também comenta sobre o chanfro a ser realizado na junta. A forma e a dimensão das extremidades a serem unidas devem ser tal que permita a completa fusão e penetração da junta.

- PWHT ("Postweld Heat Treatment")

A seção VIII, Divisão 2, também traz especificações sobre o tratamento térmico após soldagem a que os vasos precisam ser submetidos. Tais especificações são divididas de acordo com a classe do material a ser empregado. Também são levantados aspectos como Temperatura mínima de PWHT e tempo de exposição ao aquecimento, bem como o procedimento de aplicação do PWHT.

- Teste de pressão

A seção VIII, Divisão 2, determina como deverão ser realizados os testes de pressão em vasos. Trata de requisitos como seleção do método de teste (hidrostático, pneumático ou outro teste alternativo), da preparação do teste, do

fluido empregado, do procedimento e da checagem realizada após o ensaio. Sendo que as esferas são tipicamente submetidas a um ensaio hidrostático (MOSS, 2004).

- Pintura

Com relação à pintura do vaso o código pouco especifica. Contudo, afirma que os vasos podem ser pintados ou revestidos internamente ou externamente antes do Teste de pressão. Menciona ainda que nenhum tipo de pintura deve ser considerada como proteção permanente. Também comenta que um acréscimo na espessura do vaso, corrosão permitida, deve ser considerado mesmo no caso em que há pintura interna no vaso.

3 METODOLOGIA

As informações sobre projeto e fabricação de esferas foram coletadas a partir dos seguintes meios:

- *Na própria universidade:* Reuniões com o Orientador deste projeto, conversas com demais professores ligados as áreas de Fabricação Mecânica e Mecânica dos Sólidos e com técnicos de fabricação.
- *Fora da universidade:* Contato com profissionais experientes da área de projeto de esferas, com os quais marcou-se uma reunião, sendo:

Assunto: Projeto e fabricação de esferas.

Data da reunião: 27-09 2011

Presentes: Engenheiros Chieh Pin Shen, Francisco Ruiz Dominguez, Abilio Ascar Junior e Valter Firmino da Silva Junior.

- *Referências bibliográficas:* Normas técnicas pertinentes, sendo o código ASME a principal delas, e um manual de projeto de vaso de pressão (MOSS, 2004).

Com relação às ferramentas para tratamento de dados foi usado o programa SCILAB para realização de cálculos.

Demais ferramentas empregadas para realização deste projeto foram as técnicas de metodologia de projeto, tais como cronograma de atividades, fluxograma de etapas do processo do projeto e espiral de projeto.

4 DESCRIÇÃO DE ETAPAS DO TRABALHO

4.1 DESCRIÇÃO DE ATIVIDADES

As principais atividades do projeto são descritas a seguir. Além destas, também foram propostas outras atividades e projetos que complementaríamos ou dariam continuidade ao presente trabalho, conforme consta no item 10 Trabalhos futuros.

- *Dados e condições de operação*

Tais como produto armazenado, capacidade do vaso, diâmetro da esfera, espessura da parede, dimensões do suporte e temperatura e pressão de operação.

- Normas de projeto

Levantamento dos principais requisitos e instruções para projeto e fabricação de vasos esféricos: tais como materiais, equações de projeto e especificação de soldagem.

- Dimensionamento estrutural

Cálculo da espessura das chapas que compõe a parede do vaso esférico e das dimensões do suporte dos vasos de acordo com as normas aplicáveis. (obs.: tarefa parcialmente cumprida).

- Corte

Processo de corte das chapas de tal modo a adquirir as dimensões dos gomos da esfera dependendo do tipo físico de esfera a ser produzida.

- Conformação das chapas

Meios e processos de se conformar as chapas a fim de que estas adquiram a forma de segmento esférico.

- Soldagem/montagem

Análise do tipo e condições de soldagem adequadas para a estrutura do vaso, por meio desta são unidos os segmentos esféricos que perfazem a esfera.

- Contato com profissionais ou visita técnica

Contatam-se profissionais da área de projeto de esferas a fim de conhecer estas e obter informações tais como sobre o funcionamento, componentes e fabricação de vasos; com intuito de contemplar perguntas para as quais não se obtiveram respostas por outros meios de pesquisas.

- Ensaaios

Levantamento de ensaios para verificação e certificação de que o vaso foi fabricado conforme as especificações das Normas Técnicas e que estará apto as condições de trabalho a que este é submetido.

4.2 FLUXOGRAMA DE PROCESSOS

As etapas de desenvolvimento do projeto são apresentadas nas Figura 3 a Figura 7. Faz-se a ressalva de que algumas etapas são desenvolvidas simultaneamente ou com interação entre os blocos de atividades ou ainda de forma iterativa. O termo mais adequado para descrever o andamento do projeto é a espiral de projeto. Desse modo, a sequência lógica apresentada é apenas para facilitar uma visão sistêmica do processo. No entanto, esta representação

é sim uma boa estimadora da cronologia em que as atividades foram desenvolvidas.

A esfera foi decomposta em componentes, conforme Figura 2, sendo que no presente trabalho não são projetadas as “Demais partes – acessórios” da esfera, mais detalhes destes componentes constam em 5.3 Demais componentes - acessórios.

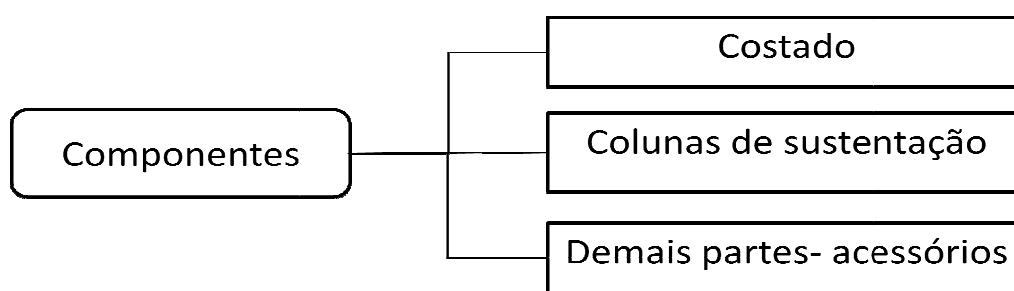


Figura 2 - Componentes principais da esfera.

Na Figura 3 tem-se o fluxograma das etapas percorridas pelo presente projeto.

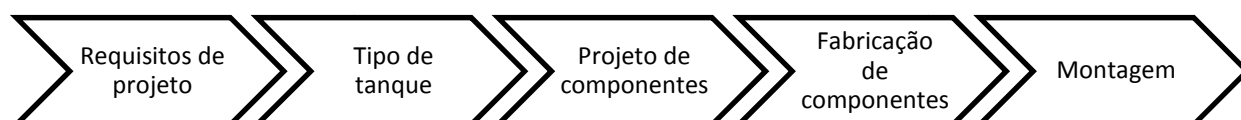


Figura 3 – Fluxograma: projeto, fabricação e montagem da esfera.

A Figura 4 ilustra os passos do desenvolvimento do projeto do costado.

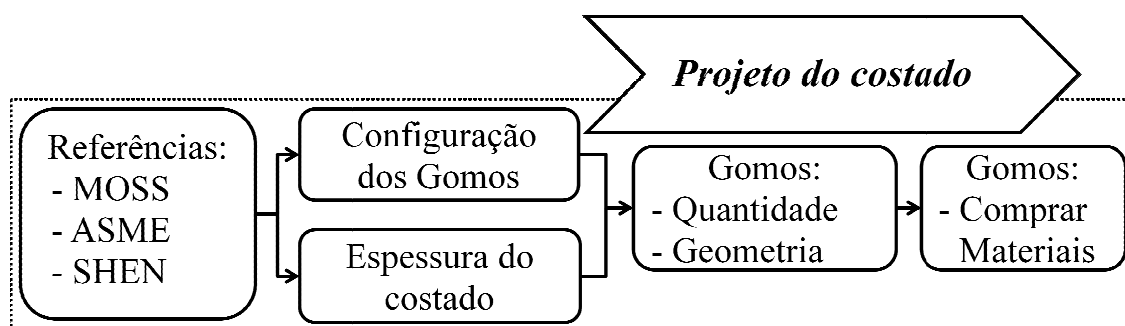


Figura 4 - Fluxograma: projeto do costado.

A Figura 5 ilustra os passos do desenvolvimento do projeto das colunas.

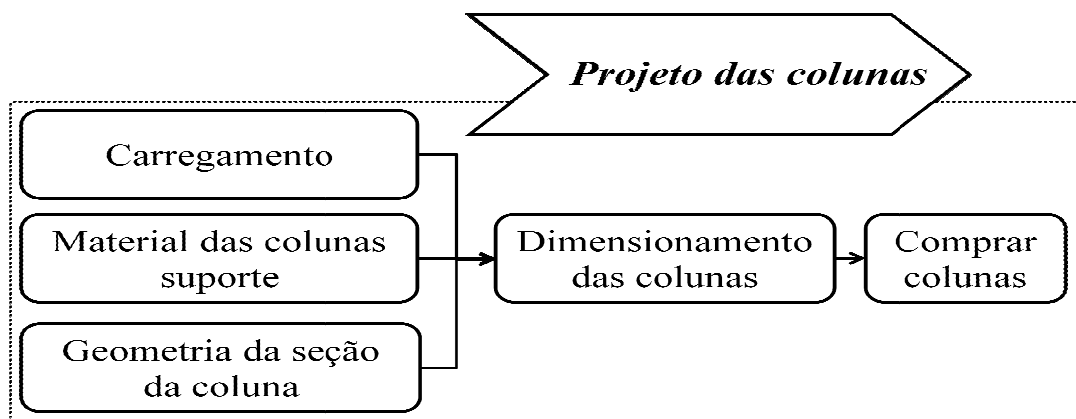


Figura 5 - Fluxograma: projeto das colunas.

A Figura 6 ilustra os passos do desenvolvimento da fabricação do costado.

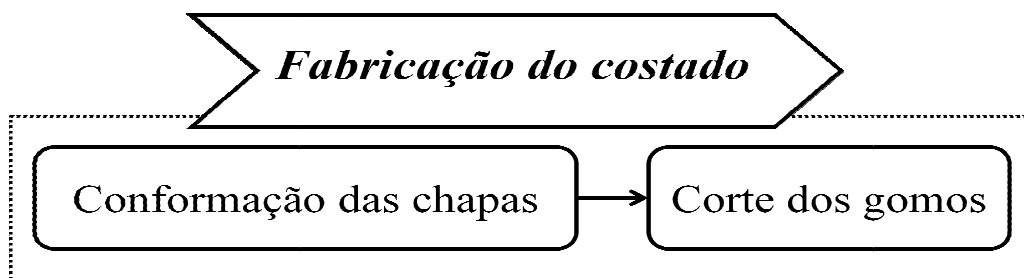


Figura 6 - Fluxograma: fabricação do costado.

A Figura 7 ilustra o caminho a ser percorrido para montagem da esfera.

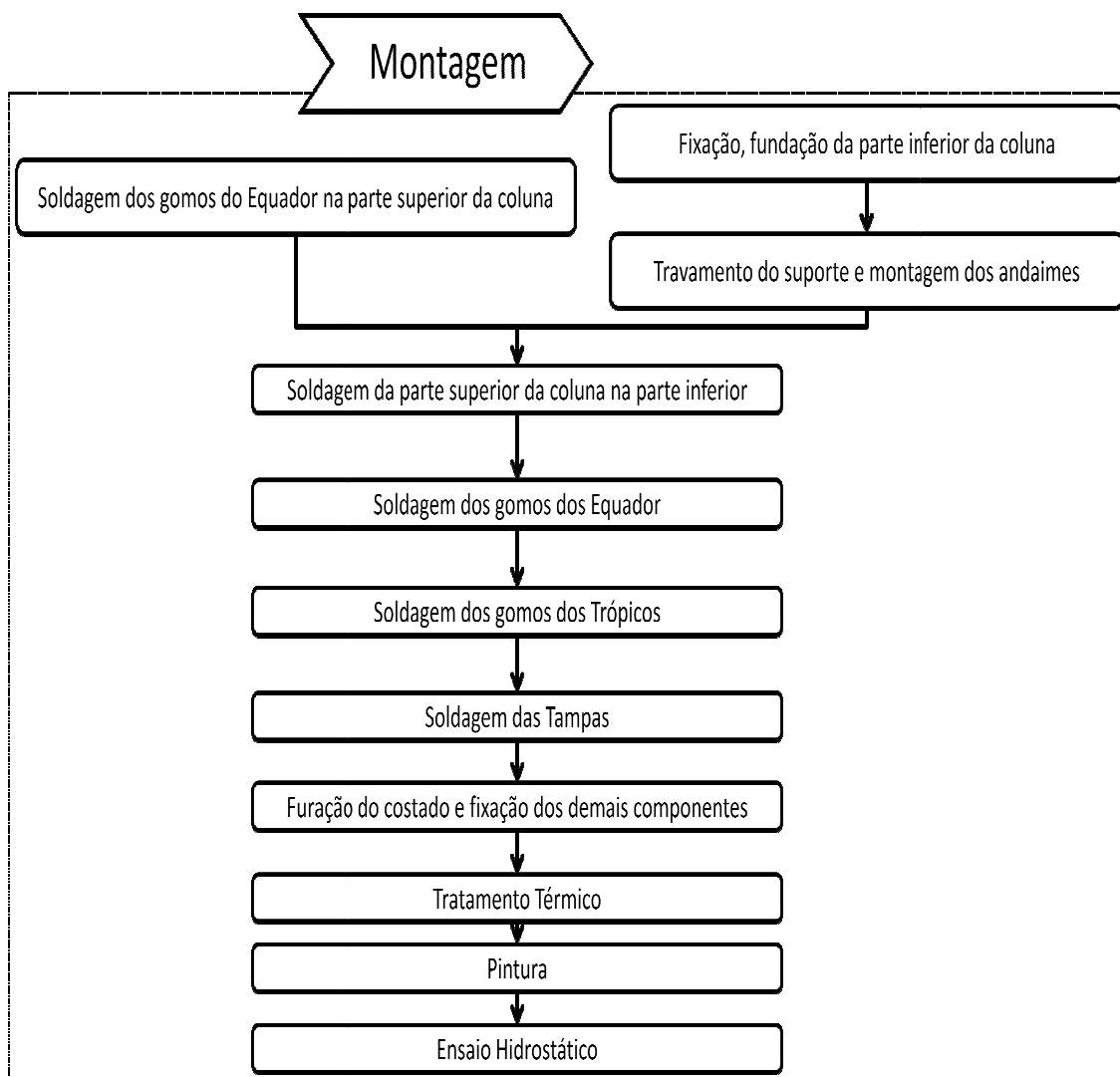


Figura 7 - Fluxograma: Montagem da esfera.

4.3 ANÁLISE DE CUSTOS

A estimativa dos principais custos para fabricar esferas, considerou apenas os processos de fabricação e componentes abordados neste projeto. Consideraram-se custos com aquisição de equipamentos, materiais e processos.

- Equipamentos

Os custos com aquisição de equipamentos representam uma despesa inicial para se implementar o projeto. Este é estimado individualmente para cada processo.

Para o processo de corte o equipamento mais custoso é a máquina de corte CNC, completam o custo deste processo os itens: cilindros de gás, “softwares”, bico de maçarico, e acessórios. Para o processo de conformação o principal custo de equipamento a considerar é com a prensa - hidráulica. Para o processo de soldagem o equipamento mais custoso é a fonte de energia, sendo que custos com os demais acessórios (cabos de solda, tenaz,...) são pouco representativos do custo deste processo.

- Processos

Para o processo de corte, são embutidos principalmente os custos com mão-de-obra, consumo de gases do oxicorte e energia elétrica. Para o processo de conformação, são embutidos principalmente os custos com mão-de-obra e energia elétrica. Para o processo de soldagem, são embutidos principalmente os custos com mão-de-obra, energia elétrica e eletrodos. Ressalta-se que a avaliação deste custo é realizada a partir da análise do custo de soldagem por metro de cordão de solda empregado na esfera.

- Materiais

Os custos com materiais representam o custo com matéria-prima do processo. Nestes são considerados os custos com as chapas dos gomos e com os tubos das colunas.

Tabela 3 - Custo de fabricação.

Tipo de custo	Divisão de custo	Custo por divisão (R\$ 1000)	Detalhamento de custo	Custo (R\$ 1000)
Custo inicial	Equipamentos	1000	Corte	200
			Conformação	700
			Soldagem	100
Custo para produção de 1 unidade	Processos	411	Corte	137
			Conformação	137
			Soldagem	137
	Materiais	8653	Chapa dos gomos	8000
			Tubo das colunas	653
Custo total combinado		10064	---	

Salienta-se ainda que não são levantados custos com a construção de protótipos ou modelos tendo em vista que isto não faz parte do escopo deste projeto, ainda que fosse desejável não seria factível tendo em vista os recursos humano, material e de tempo disponíveis ao projeto.

5 DESCRIÇÃO DE COMPONENTES DE UMA ESFERA

5.1 COSTADO

A parede da esfera, também conhecida por costado, é a parte principal do vaso de armazenamento tendo em vista que nela fica contido o fluido armazenado e por ser a parte mais complexa para fabricar e montar. Ela pode ser feita de parede simples ou parede dupla dependendo do produto armazenado, sendo as primeiras destinadas a armazenar fluidos à temperatura ambiente ao passo que as últimas destinam-se a armazenar fluidos a baixas temperaturas, como em aplicações criogênicas (MOSS, 2004).

5.2 SUPORTE

O suporte da esfera é constituído basicamente pelas colunas de sustentação do vaso e de tirantes.

As colunas do vaso são tubos verticais que sustentam o vaso, são encontradas em torno de 10 colunas para cada esfera de capacidades usuais (MOSS, 2004). Cada coluna pode ser feita inteiriça ou dividida em uma parte superior e outra inferior, sendo este caso o mais freqüente e que é tratado neste trabalho. Complementa-se ainda que a coluna inferior serve de fundação à estrutura do vaso como um todo.

Neste último caso, a parte de cima de cada coluna superior é soldada no vaso na altura da circunferência horizontal de maior diâmetro, nos gomos do Equador, ao passo que a parte inferior desta coluna é soldada na coluna inferior que, por sua vez, está fixa no solo por meio de uma base de concreto.

Compõem a estrutura, também, tirantes para entrelaçar e travar graus de liberdade das colunas que impedem a tendência de “abertura” das colunas na parte superior devido à carga atribuída ao peso próprio da esfera mais o fluido. No entanto estes elementos não são dimensionados aqui e fica como sugestão para um trabalho futuro.

5.3 DEMAIS COMPONENTES - ACESSÓRIOS

Cada esfera apresenta em torno de 10 bocais. Além dos bocais de entrada e saída de gás há bocais de instrumentação para medição de nível, temperatura e pressão. Os bocais possuem um projeto de fabricação a parte, eles são feitos do mesmo material do vaso e normalmente são forjados e importados. Eles são soldados nos respectivos furos do vaso. Os bocais de entrada e saída de gás têm ainda em sua outra extremidade um flange soldado (SHEN).

Há também uma escada para permitir o acesso à plataforma situada no topo da esfera a fim de permitir que um técnico faça calibração de válvulas, leitura de medidores e checar se há alguma anormalidade no funcionamento dos componentes em geral da instalação.

São encontrados no costado do vaso ainda os seguintes acessórios: boca de visita, válvulas, flanges, bombas e tomadores de amostra; estes são distribuídos em diferentes alturas da esfera e usados para análise de características físico-químicas do gás.

6 PROJETO

A principal norma a ser seguida para projeto e fabricação de esferas é o código ASME Seção VIII Divisões 1 e 2, sendo que esta última cobre maior parte das informações de projeto.

A principal aplicação de esferas no país é para armazenar GLP (Gás Liquefeito de Petróleo). Elas o conservam a temperatura ambiente e, para mantê-lo liquefeito, ele é armazenado a uma pressão aproximada de 1,8 Mpa.

As esferas de GLP típicas apresentam capacidade de 3200m³ e 1600m³, apresentando diâmetro em torno de 18250 mm e 14500 mm, respectivamente. Também são construídas esferas com diâmetros próximos a 11, 14 e 20 e 22 m.

A esfera deste projeto é dimensionada para uma capacidade de 10000 m³, que implicou num raio de 13365 mm, relativamente bem maior às convencionais, tendo em vista que quanto maior é a capacidade da esfera mais viável é para o usuário empregar este tipo de vaso.

Os projetos de cada componente da esfera são separados entre o costado e as colunas do suporte, os demais componentes e acessórios da esfera não são abordados. Também estuda-se a configuração de gomos que seria a mais adequada para construção da esfera conforme mostrado a seguir.

6.1 COSTADO

6.1.1 Concepção geométrica

6.1.1.1 Tipos de esferas/ método de fabricação

As esferas (em sentido restrito, considerando apenas o costado) são fabricadas a partir de cunhas (também chamadas de gomos ou pétalas) e segmentos esféricos obtidos de chapas que são conformadas previamente, estes “pedaços” são então soldados perfazendo assim a esfera. Nas ilustrações, Figura 8 a Figura 11, são mostrados os tipos de esferas dependendo do tamanho e do arranjo dos gomos.

- Bola de Futebol

Este tipo de esfera é indicado para diâmetros menores que aproximadamente 6 m.

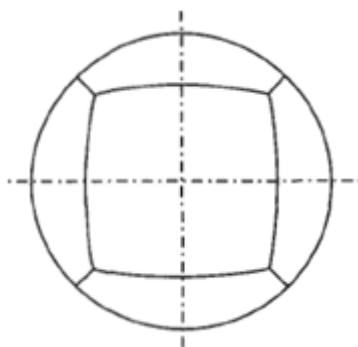


Figura 8 - Esfera tipo Bola de Futebol. Adaptado de (MOSS, 2004).

- Meridiano

É formada a partir de cunhas esféricas em sua parte central (chamada de Equador) e de duas Tampas, uma na parte superior e outra na parte inferior da esfera. Este tipo se subdivide em dois outros dependendo do tamanho.

O modelo da Figura 9, com 1 Equador, é indicado para esferas com diâmetro de 6 a 10 m aproximadamente.

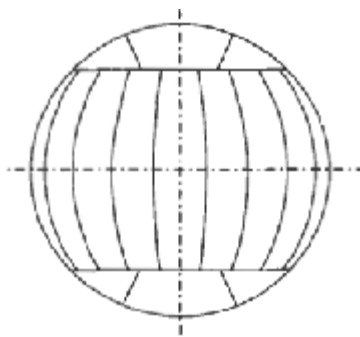


Figura 9 - Esfera tipo Meridiano, para “pequenos” diâmetros. Adaptado de (MOSS, 2004).

O modelo da Figura 10 é indicado para esferas de diâmetro maior que aproximadamente 19 m. Neste caso há também dois segmentos esféricos (chamados de Trópicos) que estão situados entre o Equador cada Tampa.

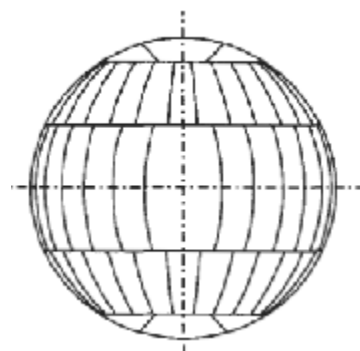


Figura 10 - Esfera tipo Meridiano, para “grandes” diâmetros. Adaptado de (MOSS, 2004).

- Bola de Futebol Parcial

Indicado para esferas com diâmetro de 9 a 19 m aproximadamente. É uma combinação dos tipos Bola de Futebol e Meridiano.

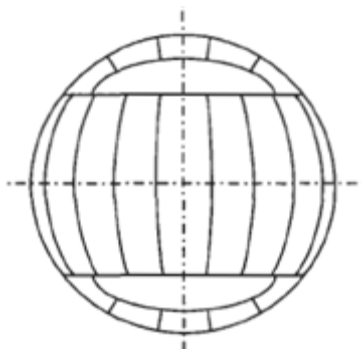


Figura 11 -- Esfera tipo Bola de Futebol Parcial. Adaptado de (MOSS, 2004).

6.1.1.2 Definição da geometria dos gomos

- Tipo de esfera

Considerando que a capacidade da esfera do projeto é um pouco maior do que aquela usualmente empregada no país, é proposto também outro tipo de esfera baseado no tipo “Meridiano para grandes diâmetros” (ver Figura 10), porém com algumas modificações na geometria dos gomos.

A Tabela 4 mostra uma comparação entre duas propostas de tipos de esferas analisados para construção do vaso. A alternativa 1 é a aplicação da esfera do tipo Meridiano que é indicada para grandes diâmetros e a alternativa 2 é a aplicação da esfera tipo Meridiano, mas com 4 trópicos em vez de 2 como na 1ª alternativa.

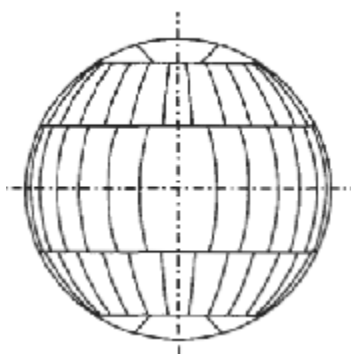


Figura 12 – Proposta 1 - Esfera tipo Meridiano, para “grandes” diâmetros. Adaptado de [6].

Tabela 4 – Comparação de alternativas para geometria da esfera.

Alternativa 1 (1 EQ, 2 TR e 2 TA)	Alternativa 2 (1 EQ, 4 TR e 2 TA)
Requer menos gomos	Requer mais gomos
Requer maior extensão de chapas	Gomos menores
Maiores dimensões dos gomos	Facilita o processo de conformação e transporte
Requer mais ferramentais	Requer um único ferramental
Contorno dos gomos das tampas de difícil fabricação	Tampas são compostas unicamente de uma calota esférica

A quantidade de gomos que são requeridos é maior na alternativa 2 devido aos dois trópicos adicionais que há nesta. Por outro lado, tem-se que as dimensões máximas dos gomos são menores nesta alternativa.

Embora se tenha a desvantagem de ter um maior perímetro de corte de material e de soldagem que, sob análise deste parâmetro isoladamente, implica em maior custo de fabricação, ganha-se em termos de processo, pois, devido ao fato de haver mais gomos, torna-se possível deixar suas dimensões mais próximas o que permite o uso de um mesmo ferramental para conformar os gomos de diferentes segmentos.

Salienta-se ainda que na alternativa 1 as Tampas são compostas de gomos que apresentam uma forma diferenciada dos demais gomos o que inviabiliza o emprego de um único ferramental (mais detalhes em 7.3.2 Processo adotado). Ao passo que na alternativa 2 torna-se possível o uso de uma única peça para

constituir cada Tampa (devido à menor dimensão da Tampa) e, além disso, é possível empregar uma única ferramenta para conformar cada peça deste tipo de esfera, inclusive para as Tampas que, apesar de apresentarem a forma de calota (diferentemente dos demais gomos), podem ser conformadas no mesmo ferramental.

Com base nas vantagens da alternativa 2, esta é empregada para construção da esfera.

- Dimensões dos gomos

Assim, uma vez definido o tipo de esfera, busca-se dimensionar as larguras dos gomos dos diferentes segmentos da esfera para que estas sejam iguais, a fim de permitir o emprego de uma única ferramenta, cuja matriz apresentaria uma largura igual àquela dos gomos. Com relação aos comprimentos circunferenciais dos gomos, buscam-se comprimentos que permitam obter um comprimento da tampa (que é inteiriça, neste projeto) igual, ou relativamente próximo, às larguras dos gomos, também com a finalidade de se empregar uma única ferramenta.

Contudo, em projetos típicos de esferas procura-se fazer gomos com dimensões (largura e comprimento) mais ou menos próximos, procurando otimizar o aproveitamento das chapas, visando menor perda de material, devido ao aspecto econômico. (SHEN)

Pensando na otimização dos gomos e no melhor aproveitamento de material, é desejável que se tenha tamanhos grandes de gomos a fim de minimizar os cortes e comprimentos de solda. Contudo, há o inconveniente de poder requerer guinchos de grandes capacidades para içar as peças.

As principais expressões empregadas para este dimensionamento, deduzidas de relações geométricas na esfera, são apresentadas a seguir:

$$l_{TA} = \frac{\pi \cdot D}{2} - l_{EQ} - 4 \cdot l_{TR}$$

$$r_i = \frac{D}{2} \cdot \cos \frac{2 \cdot l_i}{D}$$

$$l_{TR_i} = \frac{l_{EQ}}{2} , \quad l_{TR_s} = \frac{l_{EQ}}{2} + l_{TR} , \quad l_{TA} = \frac{l_{EQ}}{2} + 2 \cdot l_{TR}$$

$$n_{EQ} = \frac{\pi \cdot D}{w} , \quad n_{TR_i} = \frac{2\pi \cdot r_{TR_i}}{w} , \quad n_{TR_s} = \frac{2\pi \cdot r_{TR_s}}{w}$$

São buscadas soluções tais que $w_i \cong l_{TA}$, onde $w_i = w$ representa as larguras de cada tipo de gomo, admitidas iguais. Os resultados obtidos para as dimensões dos gomos são apresentados na Tabela 5.

Salienta-se que a partir destas dimensões circunferenciais, é empregado um “software” de CAD/CAM a fim de se obter as dimensões principais aproximadas do contorno dos “blanks” e a partir destas especificar as dimensões das chapas.

Tabela 5 – Quantidade e dimensões de largura e comprimento circunferenciais dos gomos.

Tipo de segmento do gomo	Quantidade (n_i)	Dimensões por segmento		Dimensões dos gomos	
		Raio da circunferência máxima(r_i)(mm)	Altura da circunferência máxima(h_i)(mm)	Comprimento (l_i) (mm)	Largura (w_i) (mm)
Equador	28	13365	0	10164	
Trópico inferior	26	12410	4884	7192	3000
Trópico superior	17	8133	10605	7192	
Tampa	2	1490	13281	3057	

6.1.2 Espessura do Costado

6.1.2.1 Introdução

Além das dimensões definidas para os gomos no item 6.1.1.2 Definição da geometria dos gomos, a dimensão principal a ser dimensionada é a espessura da parede da esfera, que é composta pelos gomos. Desse modo, esta etapa é determinante para que a parede da esfera resista à pressão exercida pelo fluido. A seguir, calcula-se a espessura para aços típicos para construção de esferas, a fim de que a esfera suporte a pressão exercida pelo GLP.

6.1.2.2 Materiais, dados e propriedades

A Tabela 6 apresenta alguns materiais típicos (MOSS, 2004) para construção de esferas bem como suas propriedades tensão limite de escoamento e massa específica. As propriedades dos materiais são obtidas do catálogo do fabricante (USIMINAS) e conferidas com os valores de referência especificados pela (ASME, 2010). A Tabela 7 mostra as propriedades do GLP empregadas no dimensionamento, estas foram extraídas de (LIQUIGÁS, 2011).

Tabela 6 - Materiais da parede da esfera.

Material do Gomo	Tensão limite de escoamento (σ_{esc}) (MPa)	Massa específica (kg/m ³)
SA 516 Gr 60	220	7850
SA 516 Gr 70	260	
SA 537-classe 1	345	
SA 537-classe 2	415	
SA 738 Gr B	415	

Tabela 7 – Demais dados e propriedades do GLP.

Símbolo	Significado	Valor	Unidade
P	Pressão relativa no vaso	1783320	Pa
ρ	Massa específica do GLP	580	Kg/m ³
g	Campo gravitacional	9,8	m/s ²

6.1.2.3 Desenvolvimento

A Divisão 1, Seção VIII do código ASME, determina que a espessura da parede da esfera (t) seja determinada a partir da expressão a seguir:

$$t = \frac{P \cdot r / 2}{\sigma \cdot E - a \cdot P}$$

Onde:

- E - Representa a eficiência da junta soldada, seu valores usualmente valem 1, 0,85 ou 0,7 dependendo do controle de qualidade da solda. Para o caso de máxima eficiência, a inspeção aplicada à solda é realizada com um ensaio completo da solda por raio x ou testes de ultrassom.
- a - é um fator que vale 0,1 e o termo subtraído do denominador, “a.P”, aparece como correção da espessura devido ao efeito de corrosão na parede do vaso. De forma geral, o valor da redução de espessura (chamada de corrosão permitida) considerada em esferas de capacidade comum é em torno de 1,5 mm, com base na experiência dos profissionais consultados. Notar ainda que a expressão sem o termo “a.P” é a mesma expressão obtida para a tensão atuante em uma esfera, que resulta da análise de vasos de pressão de parede fina, conforme apresentado no APÊNDICE A – Comparação de esforços em esfera e em cilindro.

- Sendo ainda: P , a pressão de projeto; r , raio interno da esfera; σ , a tensão permitida no material.

Observações:

- Salienta-se ainda que no processo de conformação das chapas ocorre uma pequena redução da espessura, em torno de 1 mm, o que precisa ser acrescido na especificação das chapas laminadas a serem compradas.
- O novo código ASME, Seção VIII, Divisão 2, prevê que o cálculo da espessura leve em consideração uma distribuição logarítmica de tensão ao longo da espessura da esfera. Contudo, para efeitos práticos, o cálculo da espessura com a expressão apresentada é bem satisfatório, tendo em vista que embora se consiga precisão no cálculo com a nova expressão, tal precisão é incompatível com a precisão conseguida no processo de laminação das chapas. De qualquer forma, a expressão apresentada pelo novo código ASME é:

$$t = r \cdot (e^{\left(\frac{0,5 \cdot P}{\sigma \cdot E}\right)} - 1)$$

- Após o dimensionamento da esfera empregando as duas expressões, verifica-se que a diferença de espessuras obtidas pelas duas expressões é da ordem de décimos de milímetros, o que é desprezível. Tal fato era previsível tendo em vista que a hipótese de distribuição linear, que resulta na primeira expressão apresentada, fornece bons resultados em vasos de pressão de parede fina. Podem ser admitidos como vasos de pressão de parede fina, com boa aproximação, aqueles vasos para os quais o raio excede ao menos em 10 vezes a sua espessura, condição que no caso do vaso de projeto é satisfeita.

6.1.2.4 Resultados e análises

A partir da primeira expressão mostrada no item anterior e do código apresentado em APÊNDICE B – Código SCILAB - Dimensionamento da parede da esfera, calcula-se a espessura da parede de esferas em função da capacidade da esfera e da eficiência de solda, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Espessura da parede (mm) de esferas em função da capacidade e da eficiência de solda.

Volume (m³)	Diâmetro (mm)	Eficiência da junta	SA 516 Gr 60	<u>SA 516</u> <u>Gr 70</u>	SA 537- classe 1	SA 537- classe 2	SA738 Gr B
		1	54	46	35	29	29
10000	26730	0,85	64	54	41	34	34
		0,7	77	66	49	41	41

A sequência em que os materiais foram dispostos na tabela está em ordem crescente de tensão limite de escoamento (exceto para os dois últimos materiais que apresentaram o mesmo valor desta propriedade), por isso que a espessura requerida decresce na mesma sequência.

O código ASME especifica que para espessuras maiores que 38 mm é obrigatório empregar um ensaio radiográfico completo, e neste caso a eficiência da junta é igual a 1. Portanto, os dados da tabela que estão tachados não satisfazem a condição da ASME, não podendo empregar as respectivas eficiências associadas aos valores de espessura obtidos, em outras palavras, requerem uma inspeção da solda mais apurada e, portanto, o uso de uma eficiência de junta maior.

Conforme discutido em 6.3 Especificação de Materiais no item Costado-materiais, dentre os materiais típicos para construção do costado seleciona-se o material SA 516 Gr 70. Como para este material é requerido um ensaio

radiográfico completo (eficiência da solda igual a 1), pelo motivo exposto no parágrafo anterior, esta definido então o projeto do costado.

Salienta-se ainda que também calcula-se as espessuras para capacidades típicas de esferas, os resultados são apresentados no APÊNDICE C – Resultados complementares - Dimensionamento da parede da esfera. Os valores obtidos são um pouco inferior aos valores típicos de espessura, contudo, conservam a ordem de grandeza e não mostraram-se discrepantes.

6.1.2.5 Conclusões

A Tabela 9 mostra um resumo dos resultados principais obtidos do dimensionamento da espessura do costado bem como do material selecionado para esta estrutura. Comenta-se que o valor da espessura obtida está coerente com valores típicos de espessura para vasos de pressão.

Tabela 9 - Resultados do dimensionamento do costado.

Símbolo	Significado	Valor	Unidade
-	Material selecionado	SA 516 Gr 70	-
σ_{esc}	Tensão de escoamento deste material	220	MPa
t	Espessura da parede da esfera	46	mm
r	Raio da esfera	13365	mm
ϵ	Eficiência da união soldada	1	-

6.2 COLUNAS DO SUPORTE

6.2.1 Introdução

O suporte do vaso é parte essencial do projeto, tendo em vista que todo o peso do líquido e o peso próprio do costado e das colunas são suportados por esta estrutura.

A Figura 13 mostra esquemas do suporte com a coluna de sustentação de um vaso esférico, sendo as dimensões principais de uma coluna de sustentação inteira representadas na figura da direita.

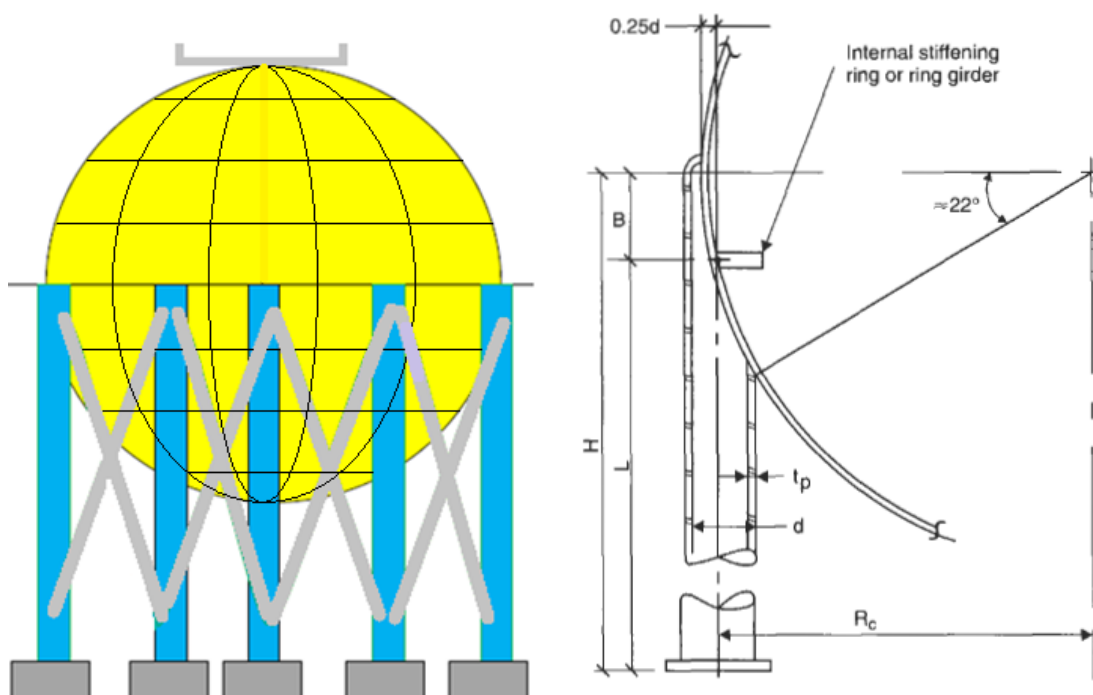


Figura 13 - Suporte de um vaso esférico fixo. Fonte: figura da esquerda, origem desconhecida; figura da direita, (MOSS, 2004).

6.2.2 Materiais, dados e propriedades

As Tabela 10 e Tabela 11 apresentam as propriedades dos materiais analisados para constituir a parte inferior das colunas de sustentação da esfera e demais dados empregados no dimensionamento das colunas.

Tabela 10 – Propriedades dos materiais considerados para a parte inferior da coluna (USIMINAS).

Material	Limite de escoamento (σ_{esc}) (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Massa específica (Kg/m ³)
ASTM A36	250	205	7850
ASTM A572-A-Gr 50	345		
USI-SAR-60T	460		

Tabela 11 - Demais dados e propriedades do dimensionamento das colunas.

Grandeza	Valor	Unidade
Volume da esfera	10000	m ³
Número de colunas	28	-
Massa específica do GLP	508	Massa específica da água
Massa específica do costado	7850	kg/m ³
Massa específica da água	1000	kg/m ³
Campo gravitacional	9,8	kg/m ³

6.2.3 Desenvolvimento

As colunas do suporte são dimensionadas por flambagem e, em seguida, é verificado se tensão atuante não supera o limite de escoamento do seu material. A carga em cada coluna a ser considerada deve levar em consideração tanto o peso do fluido quanto os pesos próprios da esfera, da coluna e de acessórios do vaso.

O projeto do suporte da esfera é baseado em (ASME, 2010) e também se consultou a norma para projeto de esferas (PETROBRAS, 2003). Esta Indica que as colunas do suporte de esferas devem ter um revestimento externo de proteção contra fogo (“fire-proofing”), contudo não se chegou aqui a selecionar este material.

Com relação ao dimensionamento, esta norma especifica duas condições de carga a serem satisfeitas.

i. Condição de carregamento em ensaio Hidrostático (ver 8.4 Ensaio hidrostático):

- Peso próprio da esfera e acessórios, mais peso do volume d’água do teste hidrostático.
- Peso próprio da coluna mais revestimento contra fogo (“fire-proofing”).

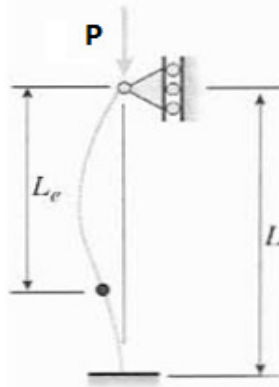
ii. Condição de carregamento do vaso em operação:

- Peso próprio da esfera e acessórios, mais peso do fluido (GLP no caso) no nível máximo.
- Peso próprio da coluna mais revestimento contra fogo.
- Carga de vento.

A Figura 14 ilustra o modelo de coluna engastada na base e apoiada na extremidade de cima, na qual é aplicado o carregamento (P); mostra também a expressão para o carregamento crítico (P_{cr}) e o comprimento efetivo de flambagem (L_e).

Coluna engastada-apoiada
por pinos

$$P_{cr} = \frac{2.046 \pi^2 EI}{L^2}$$



$$L_e = 0,699L$$

Figura 14 - Modelo de flambagem de viga engastada-apoiada. Extraído de (GERE, 2001).

Hipóteses:

- Desconsidera-se o efeito da presença da união soldada que une a parte superior à parte inferior de cada coluna. Desse modo, cada coluna é dimensionada como se fosse inteiriça, uma abordagem mais completa deveria considerar o efeito da união.
- Considera-se no dimensionamento que a “coluna inteiriça” é constituída de um único material. Esta é uma hipótese falsa, já que a parte superior da coluna é feita do mesmo material do costado e a parte inferior é construída de aço estrutural, o qual foi considerado no dimensionamento da “coluna inteiriça”. Todavia, a análise de flambagem não é afetada por esta falsa hipótese, pois a única propriedade mecânica do material que entra neste critério é o módulo de elasticidade, que varia relativamente pouco dentre os

aços. Ainda sim, o critério de escoamento precisa ser checado também para o material da parte superior da coluna (SA 516 Gr 70).

- É aplicável a teoria de flambagem de Euler, que considera que as colunas estão sob regime elástico.
- Desconsidera-se a possibilidade de ocorrência de efeitos de rajadas de vento, de abalos sísmicos ou de carregamentos dinâmicos.
- O comprimento da coluna corresponde a 1,25 vezes o raio do vaso, o que pode ser aproximadamente inferido a partir da observação da escala de fotos de vasos esféricos.
- O peso do revestimento “Fire profing” não é considerado, pois este não foi selecionado e por não exercer uma influência grande nos resultados dimensionais das colunas.
- Emprega-se um coeficiente de segurança igual a 1,2, com base na experiência de profissionais da área em projetos de esferas.

As normas de projeto especificam que a seção da coluna de sustentação seja tubo-circular. A Figura 15 ilustra esta geometria e seu momento de inércia (I) na direção do eixo de simetria.

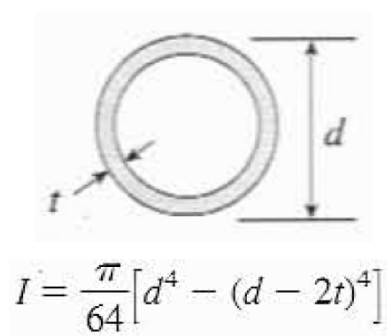


Figura 15 - Momento de inércia para uma seção tubo circular. Extraído de (GERE, 2001).

O carregamento sobre as colunas consiste na soma do peso do fluido contido na esfera e dos pesos próprios da esfera, da coluna e de acessórios do vaso. Os quais são dados por:

$$P_{flu} = \rho_{flu} \cdot V \cdot g; P_{esf} = \rho_{mat_{esf}} \cdot V_{mat_{esf}} \cdot g; P_{col} = \rho_{mat_{tub}} \cdot V_{mat_{tub}} \cdot g; P_{ace} = \frac{1}{4} P_{col}$$

Sendo o peso do fluido calculado para nas duas condições de carregamento comentada neste mesmo item: na condição de ensaio hidrostático considera-se o peso da água, ao passo que na condição operacional é considerado o peso do GLP.

Salienta-se que é estimado que o peso próprio dos acessórios representa um quarto do peso das colunas, embora essa estimativa não seja tão precisa, verifica-se após os cálculos que seu valor representa pequena fração do carregamento total, desse modo, tal estimativa já é suficiente.

Sendo P_{tot} a soma dos pesos considerados e (cs) o coeficiente de segurança, a carga crítica em cada uma das n colunas de sustentação é:

$$P_{cri} = \frac{P_{tot}}{n} \cdot cs$$

A quantidade de colunas de sustentação do suporte varia de acordo com a capacidade da esfera e do estado físico do fluido armazenado: para gases recomenda-se o uso de uma coluna a cada três gomos e para líquidos indica-se uma coluna a cada gomo (MOSS, 2004).

Portanto, das duas expressões vistas para o carregamento crítico, obtém-se o momento de inércia:

$$I = \frac{P_{cr} \cdot L^2}{2,046 \cdot \pi^2 \cdot E}$$

Assim, isolando a espessura da coluna do suporte da expressão do momento de inércia na Figura 15, tem-se a espessura mínima para que não ocorra flambagem desta:

$$t = \frac{1}{2} \cdot \left(d - \sqrt[4]{-\frac{64 \cdot I}{\pi} + d^4} \right)$$

E desta expressão, obtém-se também o mínimo diâmetro para que não ocorra flambagem das colunas, para tanto, iguala-se a expressão do radicando a zero.

Para certificação e validação da expressão acima, verifica-se se a tensão crítica atuante é inferior a tensão de escoamento do material analisado, sendo a primeira obtida pela expressão a seguir. Enfatiza-se que a comparação dos valores é direta tendo em vista que o coeficiente de segurança já foi considerado diretamente no carregamento.

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A}$$

6.2.4 Resultados e análises

A partir das expressões desenvolvidas nos itens anteriores e do código mostrado em APÊNDICE C – Resultados complementares - Dimensionamento da parede da esfera, calcula-se a espessura mínima que é requerida pela coluna, para alguns diâmetros obtidos, a fim de que esta resista à flambagem e não tenha sua tensão atuante maior do que seu limite de escoamento.

São obtidos os carregamentos (Tabela 12), a espessura mínima para uma faixa de diâmetros entre o valor mínimo - para não ocorrência de flambagem - até um diâmetro de 500 mm, sendo o passo adotado para incremento do diâmetro

de 50 mm. Também são calculadas a área mínima e a tensão máxima atuante na coluna, conforme Tabela 13.

Tabela 12 - Carregamentos

Fluido	Pflu (KN)	Pesf(KN)	Pcol(KN)	Pace
Água	98000	7948	653	163
GLP	56840			

Verifica-se que o caso crítico de carregamento ocorre para a condição de ensaio hidrostático, tendo em vista que a água apresenta maior massa específica que o GLP. Desse modo, as dimensões apresentadas na Tabela 13 são relativas ao caso de carregamento crítico.

Tabela 13 - Dimensões e Tensão máxima atuante.

d (mm) ¹	tmin (mm)	Amin (mm ²)	tensaomax(Mpa)
282	113	59960	76
332	28	26501	173
382	16	18427	248
432	11	13906	329
482	7	10968	417

¹ Caso uma maior precisão fosse requerida poder-se-ia também refinar o passo de incremento do diâmetro.

Ressalta-se que embora os cálculos do critério de flambagem sejam feitos para três diferentes aços, os valores das dimensões obtidas são as mesmas aos materiais considerados, pois a única propriedade mecânica do material que entra nas expressões é o módulo de elasticidade do material, o qual varia relativamente pouco dentre os aços considerados. No entanto, na verificação se a tensão crítica atuante é inferior ao limite de escoamento, o mesmo não pode ser afirmado já que os limites de escoamento são diferentes.

Da análise de flambagem, basta escolher um diâmetro de tubo maior que 282 mm que o critério é satisfeito. Pelo critério de escoamento, aplicado às soluções obtidas do critério de flambagem, verifica-se até que diâmetro a tensão máxima atuante é inferior a tensão limite de escoamento, obtendo-se assim o máximo diâmetro possível para cada material.

Assim, com base no limite de escoamento dos aços estruturais considerados - ASTM A36 ($\sigma_{esc} = 250$ MPa), ASTM A572-A-Gr 50 ($\sigma_{esc} = 345$ MPa) e USI-SAR-60T ($\sigma_{esc} = 460$ MPa) – verifica-se que o máximo diâmetro possível para estes materiais, respectivamente, são: 382 mm, 432 mm e 482 mm.

Outro critério adicional para seleção de dimensões otimizadas é a análise da massa de material do tubo, tendo em vista que o material é vendido por peso. Para tanto, verifica-se quais dimensões fornece menor volume de material e, como a altura é a mesma, pode-se analisar diretamente a área da seção transversal, A_{min} . Conforme visto nos valores da Tabela 13, para diâmetros maiores têm-se áreas menores (e, por conseguinte, um menor custo de material), o que embora possa parecer contra intuitivo é natural já que a espessura do tubo diminui à medida que se aumenta o diâmetro. Assim, escolhe-se o maior diâmetro possível e que ainda satisfaça o critério de escoamento.

6.2.5 Conclusões

Portanto, das análises realizadas pelos critérios de flambagem, escoamento e massa de material são obtidos os diâmetros e espessuras do tubo para cada material, conforme apresentado na Tabela 14. Destes materiais, seleciona-se o ASTM A572-A-Gr 50 que apresenta qualidade e custo intermediários dentre os três materiais considerados.

Tabela 14 - Dimensões do tubo para os materiais considerados.

Material	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)
ASTM A36	382	16
ASTM A572-A-Gr 50	432	11
USI-SAR-60T	482	7

6.3 ESPECIFICAÇÃO DE MATERIAIS

O principal fabricante de chapas espessas (laminadas) no país é a USIMINAS, devido ao porte desta empresa e da tradição dela neste mercado, sendo a fornecedora de matéria-prima para as empresas fabricantes de esferas. Assim, a requisição de materiais para o costado e para as colunas de sustentação da esfera segue o catálogo deste fabricante.

Ela verifica a qualidade do material por meio de ensaio de impacto com os materiais e garante a qualidade deste em temperaturas acima de -20°. Abaixo desta temperatura não garante a qualidade do material, o que seria um problema em aplicações de esferas para criogenia - que era o caso do produto a ser armazenado durante a fase inicial deste projeto (GNL - Gás Natural Liquefeito).

- Costado - Materiais

Dentre os materiais típicos analisados para construção do costado - SA 516 Gr 60, SA 516 Gr 70, SA 537- classe 1 e SA 537- classe 2 e SA738 Gr B - é utilizado no projeto o material SA 516 Gr 70. Os motivos pelos quais os demais não são selecionados ou porque este é escolhido são descritos a seguir:

- O SA 537- classe 2 e o SA738 Gr B não são fornecidos pela USIMINAS, ao menos não constam no referido catálogo. Assim, iria requerer outro

fabricante o que implicaria em mais custos e não se teria a garantia de qualidade que se tem com este fornecedor referência no país.

- O SA 516 Gr 60, que apresenta um teor de carbono inferior ao SA 516 Gr 70, é indicado para uso em que há a necessidade de eliminar o tratamento térmico PWHT na presença de H₂S em serviço.
- O SA 537- classe 1 até seria uma segunda opção, contudo preferiu-se empregar o SA 516 Gr 70 tendo em vista que este é o material comumente empregado para esta aplicação(SHEN) o que implicaria em menores incertezas quanto à qualidade do material.
- Costado- Dimensões

Pensando na otimização dos gomos, no melhor aproveitamento de material, e no emprego de uma única ferramenta para conformar as chapas, conforme discutido em Dimensões dos gomos, chega-se às dimensões apresentadas para as chapas a serem compradas para a construção dos gomos do costado, mostradas na Tabela 15.

Tabela 15 - Especificação de material: chapas dos gomos.

Tipo de segmento do gomo	Material	Quantidade	Dimensões		
			Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura ¹ (mm)
Equador		28	10264		
Trópico inferior	SA 516 Gr 70	26	7292	3100	
Trópico superior		17	7292		47
Tampa		2	3157		

¹ O acréscimo de 1 mm (SHEN) na espessura obtida de projeto deve-se à redução de espessura no processo de conformação.

Embora, claramente, as dimensões de extensão ao longo da superfície esférica (medidas circunferenciais dos gomos conformados - obtidas no item Dimensões dos gomos) de cada gomo não correspondam exatamente às dimensões de extensão das chapas retangulares planas - devido à conformação plástica do material (sem a qual não haveria a mudança de forma geométrica) -, seus valores podem ser tomados como referência para especificação dimensional das chapas planas a serem compradas. Salienta-se ainda que são acrescidos 100 mm às dimensões de largura e comprimento lá obtidas, a fim de evitar um possível transtorno de “matar” uma peça no processo de fabricação.

Nestas dimensões é realizado o pedido de compra de material. Salienta-se ainda que a especificação de material também precisa seguir a restrição de dimensões do fornecedor, o qual especifica para chapas laminadas: *Espessura*: 6 a 150 mm; *Largura*: 900 a 3900 mm; *Comprimento*: 2400 a 18000 mm.

- Colunas do suporte

Conforme discutido nas hipóteses do dimensionamento das colunas do suporte, em 6.2.3 Desenvolvimento, o material do tubo da parte superior da coluna é o próprio material empregado no costado (SA 516 Gr 70), a fim de propiciar uma boa soldabilidade na união entre os gomos do Equador e esta parte das colunas.

Dentre os possíveis aços estruturais tubulares analisados para a parte inferior da coluna - ASTM A36, ASTM A572-A-Gr 50, USI-SAR-60T - é utilizado no projeto o material ASTM A572-A-Gr 50. Tal material é selecionado basicamente por apresentar qualidade e custo intermediários dentre os três materiais considerados e por satisfazer aos critérios de flambagem e escoamento, conforme discutido em 6.1.2.4 Resultados e análises.

Estes materiais já são comprados diretamente nas dimensões desejadas, assim, uma vez adquiridos, vão diretamente para a instalação onde estes são montados. A restrição de dimensões do fornecedor para o material é que este possua *Espessura*: 6 a 100 mm. E as dimensões dos tubos a comprar são especificadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Especificação de material: tubos das colunas.

Parte da coluna	Material	Quantidade	Diâmetro externo (mm)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)
Superior	SA 516 Gr 70	28	432	11	3400
Inferior	A572-A-Gr 50				13400

7 ESTUDO DA FABRICAÇÃO DO COSTADO

7.1 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO PROCESSO

As etapas principais de fabricação de esferas são descritas a seguir:

1. *Aquisição de material*: As chapas retangulares que formarão os gomos do costado já são compradas laminadas do fornecedor (USIMINAS) nas dimensões especificadas na Tabela 15. (Salienta-se que os tubos já são comprados nas dimensões de uso, indo diretamente para o local de montagem da esfera).
2. *Corte*: Cada “blank” é cortado e chanfrado por meio do processo de oxicorte. Uma máquina CNC é empregada para orientar a trajetória de corte do bico do maçarico.
3. *Conformação*: As chapas são conformadas a frio conforme processo selecionado em 7.3.2 - Processo adotado, cada gomo é prensado num

processo praticamente artesanal até adquirir a forma superficial de uma cunha esférica, conferida com um gabarito.

Propõe-se, portanto, uma inversão na sequência de operações do processo tradicional, em que a conformação é realizada antes do corte, conforme discutido em 7.2 -Especificação do processo de corte.

7.2 ESPECIFICAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE

Dentre os vários processos de corte (guilhotina, plasma, a LASER, jato d'água,...), o processo preferencial de forma geral é o Oxicorte por ser o processo mais barato de implementar, com equipamentos mais simples, com a maior facilidade de treinamento do operador e, particularmente na faixa de espessuras maiores que 30 mm, ser o processo que propicia o menor custo por metro cortado (RAMALHO). Sabe-se também que há empresas fabricantes de esfera que empregam este processo para o corte dos gomos da esfera. Por tais razões, não será cogitado para este projeto empregar um processo de corte diferente.

O corte de um metal por meio do Oxicorte ocorre a partir da fusão do material devido ao aquecimento local feito com um maçarico.

No processo empregado por ao menos uma das empresas fabricantes de esferas, os gomos são conformados a partir da chapa de aço no formato retangular (matéria-prima laminada) e, após conformação, cada peça tem seu contorno definido por uma traçagem e, em seguida, é aplicado o processo de Oxicorte; em outras palavras, a chapa laminada vinda da siderúrgica vai diretamente para o processo de conformação e depois para o processo de corte. Acrescenta-se também a informação de que a traçagem é feita com um gabarito, um para cada tipo de gomo. Os gabaritos são previamente confeccionados e com as dimensões estritamente verificadas (SHEN).

Neste projeto propõe-se a realização do corte antes da conformação e que a operação de corte seja automatizada, por meio do uso de máquina CNC para orientação da trajetória do bico do maçarico. A especificação desta máquina consta em ANEXO B - ESPECIFICAÇÃO DE EQUIPAMENTO - CORTE.

Vantagens do corte antes da conformação:

- Peça plana facilita as operações de corte e chanfro. Desse modo torna-se possível automatizar o processo, tendo em vista que os equipamentos CNC operam tipicamente em 2D. Caso o corte fosse realizado após conformação, estas operações tornam-se mais difíceis devido à curvatura da peça.
- Gomos já saem prontos do processo de conformação, não requerem cortes em seu contorno após conformação (exceto ajustes na montagem, conforme comentado em 8.1 Descrição das etapas do processo).

Obtenção do contorno “ideal” do “blank”

Como primeira aproximação, o trajeto a ser descrito pela máquina CNC é obtido com o auxílio de programa CAD/CAM que faz a transformação das dimensões em 3D dos gomos para dimensões em 2D, como uma planificação aproximada.

Salienta-se que o resultado obtido nesta etapa apresenta desvios de um contorno “ótimo” tendo em vista principalmente dois motivos. Primeiro: é inerente ao processo de conformação a introdução de deformações plásticas. Segundo: a redução da espessura da chapa (devido à compressão do material imposta pelo punção contra a matriz, no final do curso de avanço do pistão), o que torna ainda mais difícil prever ou estimar a medida do contorno do “blank”.

Numa fase seguinte, são realizados “try-outs” nos processos de corte e conformação, até que se obtenha um contorno de “blank” ideal para se obter os gomos nas dimensões especificadas.

Com relação ao chanfro, este é realizado pelo próprio equipamento de corte com a inclinação do bico do maçarico no suporte de fixação da máquina CNC. Sendo a operação de chanfro realizada após a operação de corte.

7.3 ESPECIFICAÇÃO DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO

7.3.1 Fundamentos da conformação mecânica

O processo de conformação mecânica de corpos metálicos consiste na modificação da forma deste, para uma forma definida, por meio da aplicação de esforços nestes corpos.

É do interesse deste trabalho a parte de conformação mecânica do tipo plástica, na qual as tensões a que o material está submetido durante o processo não ultrapassam o limite de resistência à ruptura do material (em oposição ao processo de conformação por usinagem, no qual este limite é ultrapassado, resultando que a forma final do produto é obtida pela remoção de material). Os processos de conformação plástica são classificados com vários critérios tais como: tipo de esforço predominante, quanto à temperatura de trabalho e quanto à forma do produto (BUTTON, 1997).

A principal dificuldade para conformar as chapas de aço (descritas em 6.3 Especificação de Materiais) para formação dos gomos da esfera, independentemente do processo selecionado, está nas dimensões dos gomos que são consideravelmente extensos e espessos. Tal fato implica em requerer

grandes esforços no processo e, por conseqüência, equipamentos robustos, com os quais se tornam mais difícil obter precisão na conformação. Desse modo, o processo detalhado de conformação empregado por fabricantes de vasos de pressão é mantido em sigilo.

No entanto, analisa-se a viabilidade de empregar os processos de calandragem, hidroconformação e prensagem.

O processo de calandragem não se mostra muito indicado tendo em vista principalmente o fato deste processo ser normalmente aplicável a perfis cilíndricos. Todavia, um modo para aplicar este processo seria por meio da confecção de pequenos triângulos com formatos cilíndricos, os quais em seguida seriam soldados e formariam uma “quase esfera” a partir destas pequenas partes triangulares, de forma similar a uma bola de futebol.

Posteriormente, para que este corpo “quase esférico” (com formato similar a um poliedro) formado adquira a forma de esfera, poder-se-ia empregar o processo de hidroconformação pressurizando internamente a esfera. A Figura 16 ilustra a aplicação do processo de Hidroconformação para fabricação de esfera de diâmetro da ordem de 300 a 3000 mm, sendo, portanto, bem menor que a esfera do presente trabalho, o que torna o processo menos inviável, tendo em vista a alta pressão requerida para “inflar” a esfera. Na referência em que é realizado o estudo deste processo (WANG, 1988), diz-se que o este é aplicável a esferas de aço carbono, alumínio e aço inoxidável.



Figura 16 - Esferas fabricadas com processo de hidroconformação a partir de poliedros.
Extraído de (WANG, 1988).

7.3.2 Processo adotado

Seleciona-se o processo de prensagem a frio. Com base na análise dos possíveis processos existentes para a conformação de chapas de “grandes” dimensões realizada no item anterior, percebe-se que os processos de calandragem e hidroconformação apresentam maior dificuldade de implementação. Acrescenta-se a isso o fato do processo de prensagem ser usualmente utilizado para tais aplicações, tendo em vista que com ele é possível conseguir aplicar esforços maiores por meio de prensas. A Figura 17 ilustra gomos de esfera recém fabricados bem como uma prensa hidráulica empregada para conformá-los.



Figura 17 - Conformação de gomos. Fabricante: Dillinger Hutte GTS. (Atente também para a prensa utilizada, ao fundo da figura).

- Ferramental

Para conformação dos gomos é proposto o uso de um único ferramental. Salienta-se que cada gomo é dimensionado com o cuidado de se conseguir larguras iguais (conforme abordado em 6.1.1.2 Definição da geometria dos gomos) a fim de conseguir se empregar um mesmo ferramental para conformar todos os gomos da esfera (sendo que a matriz da ferramenta deve possuir largura igual ou relativamente próxima às larguras das peças calculadas), que implica em menor custo com a confecção de ferramentas.

As dimensões dos comprimentos dos gomos são bem maiores que o comprimento da ferramenta. Não é viável confeccionar uma ferramenta com comprimento igual ao dos gomos e nem seria possível reduzir o comprimento dos gomos (tendo em vista que isto é um requisito de projeto e que já passou por uma otimização, inclusive pensando no aspecto da ferramenta, sendo ainda o comprimento do gomo atrelado à capacidade da esfera). Desse modo, propõe-se que cada gomo seja conformado em partes ao longo de sua extensão: uma vez prensada uma parte do gomo, este será deslocado sobre a ferramenta para que outra parte dele também seja conformada, e assim por diante até conformar toda extensão do gomo. Como o gomo de maior dimensão é o gomo do Equador: 10164 mm e o comprimento da ferramenta (e

largura) é de 3060 mm (valores obtidos em 6.1.1.2 Definição da geometria dos gomos), tem-se que no máximo 4 deslocamentos de gomo (4 golpes em partes distintas do gomo) são necessários para conformação de cada gomo.

E sendo o comprimento dos gomos muito maior que a ferramenta - embora as larguras sejam a mesma -, propõe-se o desenvolvimento de um projeto de dispositivo de apoio para a parte da chapa que ficará para fora da ferramenta durante a conformação.

- Máquinas-ferramenta para deformação plástica

Os equipamentos cogitados para acionar o ferramental de deformação são Martelos, Prensas mecânicas e Prensas hidráulicas.

Embora as prensas hidráulicas tenham a característica de serem mais lentas que os martelos, estes apresentam um princípio de funcionamento menos automatizado e de características de maior robustez, conformando o produto à base da pancada literalmente. Ao serem comparadas as prensas mecânicas e hidráulicas, tem-se que estas apresentam a vantagem de permitir um controle da velocidade do carro superior bem como dispõe da força máxima em qualquer ponto do curso. No entanto, salienta-se que como estas não possuem volante de inércia requerem motores elétricos com potência de cerca de duas vezes e meia maiores do que os motores elétricos instalados em prensas mecânicas de igual capacidade (Rodrigues, 2005).

Propõe-se o uso de uma prensa hidráulica, tendo em vista principalmente que com esta é possível conciliar elevadas capacidades nominais com grandes cursos, requisitos essenciais para conformação dos gomos. Acrescenta-se ainda o fato de que com ela obtém-se boa precisão na conformação, devido ao fato de se ter um controle do processo de avanço do cabeçote superior da prensa.

Para pesquisar no mercado a prensa hidráulica a ser empregada, o requisito básico que se deve ter é a capacidade da prensa. Para tanto é necessário estimar qual esforço que será requerido na conformação dos gomos e daí selecionar um equipamento a partir de sua capacidade e demais vantagens x desvantagens. Contudo, este estudo fica para um trabalho futuro. No entanto, com base nas informações obtidas com os profissionais da área estima-se que uma prensa de capacidade em torno de 40000 KN seja suficiente para conformação dos gomos. Uma fabricante com boa aceitação no mercado de máquinas-ferramenta é a SCHULER a qual pode ser contatada a fim de se ver qual melhor modelo de equipamento poderia ser empregado para atender à necessidade do processo de conformação deste projeto.

8 ESTUDO DA MONTAGEM

8.1 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO PROCESSO

As principais etapas do processo de montagem das esferas na unidade em que esta será instalada são esquematizadas na Figura 7. A seguir há uma descrição das etapas do processo.

1. Cada gomo do Equador é soldado a uma parte superior da coluna de sustentação da esfera (que já vem pronta para ser montada diretamente do fornecedor - USIMINAS). (obs.: em esferas para armazenamento de fluido no estado gasoso admite-se o uso de uma coluna de sustentação a cada três gomos do Equador (MOSS, 2004)).
2. As peças são transportadas ao local da instalação, onde é feita a montagem (por empresas como a CB&I) das esferas. A parte inferior de cada coluna é fixada no chão e trava-se a estrutura por meio de tirantes, compondo assim o suporte do vaso. Em seguida são montados os andaimes sobre a

estrutura formada. Os gomos do Equador são previamente soldados à parte superior das colunas de sustentação e, então, são erguidos por equipamentos de levantamento de carga, colocados em sua posição final e soldada a parte superior da coluna à parte inferior desta. Em seguida é feita a soldagem entre os gomos do equador.



Figura 18 - Fabricação de vaso esférico - fase 1: fundação das parte inferior das colunas, colocação de andaimes e início da fixação dos gomos do Equador (UNIMIT ENGINEERING, 2011).



Figura 19 - Fabricação de vaso esférico - fase 2: soldagem dos demais gomos do Equador, seguida pela montagem dos gomos dos trópicos, quando houver (UNIMIT ENGINEERING, 2011).

3. Os gomos dos Trópicos são içados, posicionados e soldados, gomo por gomo, aos demais gomos já fixos na estrutura.
4. Ajustes nos últimos gomos de cada segmento. Dado o fato do processo de soldagem introduzir deformações nos gomos, são necessários ajustes nesta fase. Desse modo, estima-se que o ajuste no contorno do último gomo a ser montado em cada segmento esférico já é suficiente para “fechar” a esfera.
5. São erguidos e soldados os gomos das tampas inferior e superior, respectivamente.



Figura 20 - Fabricação de vaso esférico - fase 3: montagem das tampas inferior e superior (UNIMIT ENGINEERING, 2011).



Figura 21 - Fabricação de vaso esférico - fase 4: esfera já com todos seus gomos montados, a partir desta fase, tem-se: furações, montagem de acessórios, PWHT, pintura e teste hidrostático (UNIMIT ENGINEERING, 2011).

6. São realizados os furos, localizados principalmente nas Tampas de cima e de baixo, onde são instalados os demais componentes do costado (descritos em 5.3 Demais componentes - acessórios) ou para aberturas de visita da esfera.
7. São soldados ou rosqueados os demais componentes nos furos (descritos em 5.3 Demais componentes - acessórios).
8. É realizado o tratamento térmico para alívio de tensões na estrutura, descrito em 8.3 PWHT (Postweld Heat Treatment).
9. Quando especificadas em projeto, são realizadas uma pintura externa e um revestimento interno do vaso (mais detalhes em 2.2 Código ASME, no item Pintura). Para a esfera deste projeto recomenda-se o emprego de pintura externa a fim de amenizar o efeito de corrosão.
10. É realizado um teste hidrostático na esfera (conforme descrito em 8.4 Ensaio hidrostático).

8.2 SOLDAGEM

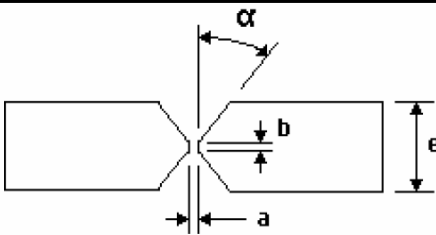
O tipo de união predominante na esfera é união soldada de topo, também são encontradas uniões parafusadas e rebitadas principalmente nos acessórios da esfera. Comenta-se ainda que a montagem é comumente realizada por uma empresa especializada, não sendo portanto a mesma empresa fabricante da esfera. No entanto, é do interesse deste projeto também uma abordagem da montagem da esfera.

A solda especificada é a arco elétrico por meio de eletrodos revestidos. Este processo é muito empregado para soldagens em campo tendo em vista atributos como: pode ser utilizado em qualquer posição de soldagem e possibilidade de uso em locais de difícil acesso ou sujeitos a ventos, que são

condições presentes na montagem de esferas. Ressalta-se também que este processo permite a soldagem de grandes espessuras de aços carbono e a simplicidade dos equipamentos necessários: basicamente é suficiente para realizar o processo uma fonte de energia de corrente constante, dois cabos elétricos e o eletrodo. Assim, implica em um baixo custo de operação. (ESAB)

O chanfro a ser empregado nos gomos do vaso é do tipo “X”. Este é realizado pelo próprio equipamento de corte, sendo a operação de chanfro realizada após a operação de corte. A forma e as dimensões das extremidades do chanfro são tais que permitem a completa fusão e penetração da junta, conforme determina o código ASME. Na Tabela 17 consta a especificação do chanfro a ser adotado para o costado.

Tabela 17 - Chanfro especificado para as juntas soldadas do costado.

	Dimensão	Valor ¹
	α	30°
	b	1,59 mm
	a	1,59 mm
	e	46 mm

¹ Valores baseados na tese de Doutorado do Orientador deste trabalho (Gonçalves, E.).

Comenta-se ainda que a disposição das uniões soldadas ao longo do costado é tal que se busca evitar ou reduzir a possibilidade de propagação de trinca na estrutura. Assim, as uniões soldadas ao longo da vertical são desalinhadas, feitas conforme Figura 10, de forma similar à disposição de tijolos em uma parede.

São especificados equipamentos de soldagem e uma relação de consumíveis indicados para unir os materiais que constituem a esfera, conforme consta em ANEXO A - ESPECIFICAÇÃO DE EQUIPAMENTO - SOLDAGEM.

Com relação à inspeção da solda, esta deverá é feita por meio de um ensaio radiográfico completo (raio x ou ultrassonografia), conforme especifica o Código ASME para espessuras de costado maiores que 38 mm.

- Unões soldadas

As principais uniões soldadas da esfera são entre as seguintes partes:

- Gomo-gomo: enquadram-se neste item todos os tipos de gomos (Equador, Trópicos e Tampas);
- Gomo do Equador - parte superior da coluna;
- Parte inferior da coluna com a parte superior da coluna.

8.3 PWHT (POSTWELD HEAT TREATMENT)

Consiste no tratamento térmico realizado após soldagem, empregado para melhorar a resistência a fraturas frágeis em uniões soldadas, por meio da atenuação das tensões residuais, e aumentar a resiliência do metal na zona termicamente afetada pela solda (ZTA).

Conforme (MOSS, 2004) as esferas fabricadas em aço carbono com espessuras acima de aproximadamente 37,5 mm requerem tratamento térmico após soldagem, portanto, especifica-se para a esfera deste projeto este tratamento.

Conforme (ASCAR) e (SHEN), o processo é realizado por firmas especializadas neste tipo de serviço. A combustão de gás, usualmente o próprio GLP, dentro da esfera é controlada para que a estrutura seja aquecida a uma temperatura de 593°C, definida pelo Código ASME para aço carbono, em seguida, a esfera é resfriada naturalmente pela ação do ambiente.

8.4 ENSAIO HIDROSTÁTICO

As esferas passam por um ensaio hidrostático, sendo que a pressão mínima em que o fluido de teste deve impor ao vaso é obtida pela expressão a seguir (ASME, 2010):

$$P_r = 1,43.MAWP = 2,55 \text{ MPA}$$

Onde MAWP representa a máxima pressão de trabalho permitida, que pode ser considerada a própria pressão de projeto imposta pelo GLP à parede da esfera ($P = 1,78 \text{ MPa}$).

Após o ensaio é realizado um exame visual para verificar se há vazamentos nas juntas, conexões e em todas as regiões submetidas a altas tensões tais como juntas das tampas e regiões ao redor dos bocais (ASME, 2010). Demais especificações do ensaio como preparação do teste e procedimento são fornecidas pelo código ASME Seção VIII Divisão 2.

9 CONCLUSÕES

Quanto ao desenvolvimento do projeto, ressalta-se que o contato o orientador e com profissionais experientes em projeto de esferas foram fundamentais para a realização deste projeto.

Os resultados obtidos para as dimensões do costado e das colunas de sustentação da esfera são coerentes com valores típicos de esferas. Os materiais selecionados também são típicos de esferas e cobertos pelo código ASME.

No processo de manufatura são propostas as seguintes alterações no processo tradicional de fabricação de esferas: automatização da operação de corte e realização do corte antes da conformação. O corte é realizado por meio do processo de oxicorte, com auxílio de máquina CNC; a conformação é realizada por prensagem em uma prensa hidráulica. A soldagem a ser empregada é por arco elétrico, o chanfro selecionado tem a forma em “X” e é aplicado um tratamento térmico após soldagem (PWHT). No ensaio hidrostático é aplicada uma pressão de 2,55 MPa.

10 TRABALHOS FUTUROS

Salienta-se que o projeto e fabricação de uma esfera vão muito além do que foi abordado neste projeto. Um tratamento mais aprofundado seria requerido para o costado e para o suporte. Como também poderia haver projetos específicos para cada componente da esfera tratado e para os demais acessórios de uma esfera, aqui só comentados.

Propõem-se ainda as seguintes análises ou projetos de pesquisa:

- Realizar uma otimização estrutural do vaso. Solicita-se uma ênfase na região de contato, união soldada, entre a coluna de sustentação e o gomo do equador. Esta é uma parte crítica do projeto devido ao efeito de transferência da carga do costado para cada coluna, o que implica na tendência de abertura das colunas na região do Equador, além da tendência de flambagem destas. Recomenda-se uma abordagem por meio do MEF (Método dos Elementos Finitos).
- Incluir no dimensionamento das colunas a possibilidade de ocorrência de efeitos de rajadas de vento.
- No processo de conformação, sugere-se um estudo da teoria de deformação plástica, atrelado à Mecânica dos sólidos para se estimar qual esforço que será requerido na conformação dos gomos e daí selecionar uma máquina-ferramenta a partir de sua capacidade e demais vantagens x desvantagens. Uma indicada referência para este estudo é (RODRIGUES, 2005).
- Ainda para este processo, como o comprimento dos gomos é muito maior que o ferramental de conformação - embora as larguras sejam a mesma-, propõem-se o desenvolvimento de um projeto de dispositivo de apoio para a parte da chapa que ficará para fora da ferramenta durante a conformação. Dependendo, talvez até já exista um dispositivo no mercado com características as desejadas a este equipamento, de qualquer forma um estudo deste acessório seria requerido para suporte à chapa no processo de conformação.
- Estudo mais apurado em busca de materiais alternativos para construção do costado e das colunas de sustentação da esfera.
- Dimensionamento da solda, análise da zona termicamente afetada (ZTA) e especificações do processo: procedimento de soldagem, voltagem, amperagem.

- Estudo de corrosão e pintura da esfera.
- Realizar uma análise de falhas mais comuns em vasos esféricos. Identificar suas causas e apontar medidas de prevenção tanto no campo de projeto e fabricação quanto no aspecto de implementação.
- Especificação da prensa hidráulica e dos demais equipamentos necessários ao processo de corte.

REFERÊNCIAS

ALIBABA. Site de vendas. Disponível em:

<<http://portuguese.alibaba.com/product-gs/spherical-tank-215296293.html>>.

Acesso em: 12 out. 2010.

ASCAR, A. J. **Projeto e fabricação de esferas**. São Paulo, EMROD, 27-11-2011. Reunião com profissionais desta área.

ASME. **Boiler and Pressure Vessel Code - Section VIII - Division 2: Rules for construction of Pressure Vessels (Alternative Rules)**. New York, 2010.

_____. **Boiler and Pressure Vessel Code - Section VIII - Division 1: Rules for construction of Pressure Vessels**. New York, 2010

BUTTON, S. T.; GOMES, E.; NERY F. A. C.; ZAVAGLIA, C. A. C.

Conformação Plástica dos Metais. 5ª ed. Editora da Unicamp. Campinas, 1997.

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 5ª ed., LTC, 2002.

CHATTOPADHYAY, S. **Pressure Vessels Design and Practice**. CRC PRESS, 2005.

DILLINGER HUTTE GTS. Conformação de chapas grossas para esferas.

Disponível

em:<http://www.dillinger.de/imperia/md/content/weiterverarbeitung/spherical_shell_segments.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2011.

EFUNDA. Site de propriedades de materiais. Disponível em:

<http://www.efunda.com/materials/alloys/stainless_steels/show_stainless.cfm?l

D=AISI Type 304HN&show_prop=all&Page Title=AISI%20Type%20304HN>.

Acesso em: 11 abr. 2011.

ESAB .Eletrodos revestidos. Disponível em:

<<http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/Apostilas.cfm>>. Acesso

em: 08 dez. 2011.

GERE, J. M. **Mecânica dos Materiais**. Ed. Thomson. 2001.

INCROPERA, F.; DEWIT, D.T. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

LIQUIGÁS. Propriedades do GLP. 2011. Disponível em:

<<http://www.liquigas.com.br>>. Acesso em: 14 nov. 2011.

MATWEB. Site de propriedades de materiais. Disponível em:

<<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ba9d30ff56a94d7e857e66fe8d3d53fb&ckck=1>>. Acesso em: 11 abr. 2011.

MOSS, D. R. **Pressure Vessel Design Manual: illustrated procedures for solving major pressure vessel design problems**. 3nd ed. Elsevier. USA, 2004.

PETROBRAS. **N-1281- Norma Técnica - Projeto de esferas**. Contec (Comissão de Normas Técnicas), 2003.

RAMALHO, J. **Processo Oxicorte**. Disponível em:

<<http://www.scribd.com/doc/7552221/Apostila-Processo-Oxicorte>>. Acesso em:

03 nov. 2011.

REAL, R. V. **Fatores condicionantes ao desenvolvimento de projeto de GNL para o cone sul: uma alternativa para a monetização das reservas de gás da região**. 141 p. Tese (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P. **Tecnologia Mecânica: Fundamentos Teóricos. Vol. I Aplicações Industriais**. Editora escolar. Lisboa, 2005.

_____. **Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica. Vol. II Aplicações Industriais**. Editora escolar. Lisboa, 2005.

SHEN, C.P. **Projeto e fabricação de esferas**. São Paulo, EMROD, 27-11-2011. Reunião com profissionais desta área.

UNIMIT ENGINEERING PLC. Montagem de vaso esférico. Disponível em: <http://www.set.or.th/th/company/files/presentation/2_50/UEC.pdf>. Acesso em: 27 set. 2011.

USIMINAS. Catálogo de chapas grossas. Disponível em: <<http://www.usiminas.com/irj/portal?NavigationTarget=navurl://b9550c6a5ba15c7c7e5ff882496a52b2&>>. Acesso em: 12 nov. 2011.

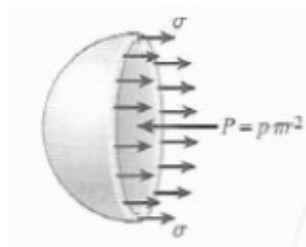
WANG, Z.R.; WANG, T.; KANG, D.C.; ZHANG, S.H. **The technology of the hydro-bulging of whole spherical vessels and experimental analysis**. Harbin institute of technology. China, 1988.

WIKIPÉDIA. Figuras de tanques de armazenamento. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Tanque_%28reservat%C3%B3rio%29>. Acesso em: 12 out. 2010.

_____. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Tanque_%28reservat%C3%B3rio%29>. Acesso em: 12 out. 2010.

APÊNDICE A – COMPARAÇÃO DE ESFORÇOS EM ESFERA E EM CILINDRO

Os Vasos de pressão representam um caso particular de estrutura submetida a um estado plano de tensões, estrutura classificada como casca. A distribuição de tensão ao longo da espessura de um vaso pode ser considerada constante em vasos de pressão de parede fina. Assim, o diagrama de corpo livre de uma esfera e de um cilindro cortados em um plano central pode ser representado conforme mostrado a seguir.

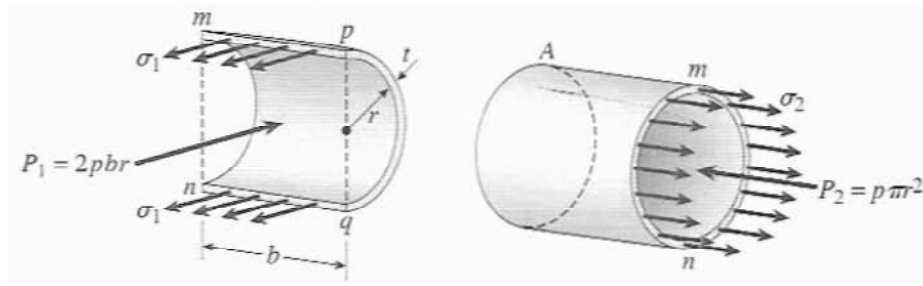


Tensão em um vaso esférico de parede fina. Extraído de (GERE, 2001).

Do equilíbrio de forças na esfera, tem-se:

$$\sigma \cdot 2\pi r t = p \cdot \pi r^2 \Rightarrow \sigma_{esfera} = \frac{pr}{2t}$$

Para o cilindro, tem-se que o diagrama de corpo livre e o equilíbrio de forças são mostrados a seguir:



Tensão em um vaso cilíndrico de parede fina. Extraído de (GERE, 2001).

Tensão circunferencial,

$$\sigma_1 \cdot 2bt = p \cdot 2br \Rightarrow \sigma_1 = \frac{pr}{t}$$

Tensão Longitudinal,

$$\sigma_2 \cdot 2\pi rt = p \cdot \pi r^2 \Rightarrow \sigma_2 = \frac{pr}{2t}$$

Portanto, para vasos de pressão feitos de um mesmo material, submetido a uma mesma pressão e com mesmo raio, a espessura requerida pela esfera é a metade da requerida por um cilindro, tendo em vista que este está submetido a uma tensão máxima (a circunferencial) que é o dobro da tensão a que a esfera está submetida.

APÊNDICE B – CÓDIGO SCILAB - DIMENSIONAMENTO DA PAREDE DA ESFERA

```
//dados
ro=580;
p=1783320;
g=9.8;
////////// v=10000
v=10000;
r=(3*v/(4*pi))^(1/3)
epsi=1 //eficiencia da junta(solda)
tensaoesc=[220 260 345 415]*10^6;
//resultados
t=p*r./(2*tensaoesc*epsi-0.2*p)
epsi=0.85
t=p*r./(2*tensaoesc*epsi-0.2*p)
epsi=0.7
tensaoesc=[220 260 345 415]*10^6;
t=p*r./(2*tensaoesc*epsi-0.2*p)
```

APÊNDICE C – RESULTADOS COMPLEMENTARES - DIMENSIONAMENTO DA PAREDE DA ESFERA

Na Tabela constam os dados da espessura da parede de esferas em função da capacidade e da eficiência de solda. Onde os valores em destaque representam os dados da esfera deste projeto.

Volume (m³)	Diâmetro (mm)	Eficiência da junta	SA 516 Gr 60	<u>SA 516</u> <u>Gr 70</u>	SA 537- classe 1	SA 537- classe 2	SA738 Gr B
10000	26730	1	54	46	35	29	29
		0,85	64	54	41	34	34
		0,7	77	66	49	41	41
3200	18283	1	37	31	24	20	20
		0,85	44	37	28	23	23
		0,7	53	45	34	28	28
1600	14511	1	29	25	19	16	16
		0,85	35	29	22	18	18
		0,7	42	36	27	22	22

APÊNDICE D – CÓDIGO SCILAB - DIMENSIONAMENTO DA COLUNA DO SUPORTE

```
//dados
ro=580; //mudar o ro para 1000 para verificar o caso com o ensaio hidrostático
g=9.8;
v=10000;
r=(3*v/(4*%pi))^(1/3);
l=1.25*r; //comprimento da coluna
cs=1.2; //coeficiente de segurança-segundo o SHEN
n=28; //do dimensionamento dos gomos
E=205*10^9;//módulo de elasticidade dos aços

//desenvolvimento
//carregamentos
Pflu=ro*v*g //peso do fluido
Pesf=7850*(4/3*%pi*(r+0.0458664)^3-10000)*g //peso da esfera
Pcol=n*7850*(%pi*(0.400^2-0.370^2)/4*l)*g //estimativa peso das colunas
Pace=1/4*Pcol //estimativa do peso de acessórios
Pcri=(Pflu+Pesf+Pcol+Pace)*cs/n;
l=(Pcri*l^2)/(2.046*%pi^2*E);
dmin=(64*l/%pi)^(1/4)+0.0001; // valor mínimo para o radicando ser positivo
d=dmin:.050:.500 //atribuindo valores para o diametro externo do tubo

//Resultados
//Critério de flambagem -> tmin: mínima espessura que o tubo precisa ter para
resistir a flambagem, no diametro externo considerado
tmin=(d-(d^4-64*l/%pi)^(1/4))/2
Amin=%pi*(d^2-(d-2*tmin)^2)/4 //Amin correspondente ao tmin
//Verificando o critério de escoamento
tensaomax=Pcri./Amin*10^(-6)
sigmaesc=[250 345 460] // (a36, a572-a gr 50, usi sar 60T)
```

ANEXO A - ESPECIFICAÇÃO DE EQUIPAMENTO - SOLDAGEM

Foi especificada para a soldagem com eletrodos revestidos uma fonte de energia cujas características técnicas estão descritas a seguir. Estima-se que serão necessárias 10 unidades deste equipamento, o qual é fabricado pela ESAB e é designado por “Origo™ Arc 328 AC/DC”. Demais acessórios como cabos e tenaz seriam especificados na aquisição da fonte de energia.



Características Técnicas

AC	
Faixa de Corrente	60 - 325 A
Tensão em Vazio Máxima	77 V
Cargas Autorizadas	325 A / 33 V @ 35%
	230 A / 29,2 V @ 60%
	180 A / 27,2 V @ 100%
DC	
Faixa de Corrente	45 - 250 A
Tensão em Vazio Máxima	72 V
Cargas Autorizadas	250 A / 30 V @ 35%
	200 A / 28 V @ 60%
	160 A / 26,4 V @ 100%
Tensão de Alimentação	220/380/440 V - 1Ø 60 Hz
	220/380 V - 1Ø - 50 Hz
Classe térmica	H (180° C)
Dimensões (L x C x A)	600 x 1200 x 730 mm
Peso	154 kg

Os materiais indicados ao consumível (eletrodo revestido) são E7018-M, E8018-D3 e E80218-C1, os quais são indicados para o material da união ASTM A516 – 70, segundo USIMINAS. Com base nestes materiais podem ser especificados os eletrodos a partir do contato com fornecedores.

ANEXO B - ESPECIFICAÇÃO DE EQUIPAMENTO - CORTE

A máquina especificada para orientação da trajetória de corte é a “Shadow 2” fabricada pela ESAB. O equipamento é controlado por CNC e é baseado em projeto de pórtico com dupla motorização com trilhos sobre pedestais que permite maiores velocidades de deslocamento com maior estabilidade do processo. Demais características técnicas estão descritas a seguir. Demais equipamentos necessários ao processo de corte ficam para serem especificados em um trabalho futuro.



Configuração básica	10'
Shadow 2	
Largura do Corte	3048 mm
Largura da Máquina	4800 mm
Largura entre Trilhos	3886 mm
Espaço Livre Interno	3683 mm
Altura da Máquina	1651 mm
Área de Estacionamento	914 mm
Estações de Oxicorte	4
Estação de Plasma	1
Número de Processos (máx.)	3
Velocidades de Deslocamento	50,8 a 19,050 mm/min
Tensão de Alimentação	1Ø, 220 VAC 50/60 Hz, 30 A