

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANTEPROJETO DE EQUIPAMENTO PARA TRABALHOS SUBAQUÁTICOS

por

Felipe Barcellos Rodrigues

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2019

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Rodrigues, Felipe Barcellos
Anteprojeto de Equipamento para Trabalhos
Subaquáticos / Felipe Barcellos Rodrigues. -- 2019.
26 f.
Orientador: Joyson Luiz Pacheco.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Sinos de mergulho. 2. Câmara de resgate
submarino . 3. Vasos de pressão . 4. Projeto mecânico.
I. Pacheco, Joyson Luiz, orient. II. Título.

Felipe Barcellos Rodrigues

ANTEPROJETO DE EQUIPAMENTO PARA TRABALHOS SUBAQUÁTICOS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Joyson Luiz Pacheco

Comissão de Avaliação:

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara

Prof. Joyson Luiz Pacheco

Prof. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, dezembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos familiares e amigos que estiveram ao meu lado durante a longa jornada que é a engenharia, em especial aos meus pais que proporcionaram todo suporte à minha vida acadêmica.

Rodrigues, Felipe B. **Anteprojeto de Equipamento para Trabalhos Subaquáticos**. 2019. 27. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RESUMO

Este trabalho é um estudo preliminar para o desenvolvimento de uma estrutura de suporte à vida para mergulhadores de saturação, durante trabalhos em profundidade. Tal estrutura também pode ser empregada em resgates submersos. Entre os campos de interesse para utilização deste equipamento, está o petroquímico: em serviços de instalação, inspeção, manutenção e operação de componentes subaquáticos para extração e transporte dos combustíveis fósseis. A estrutura também tem grande utilidade na área militar, para salvamento de submarinistas. Para concepção do projeto, adota-se o código ASME, Seção VIII, como base para atender aos requisitos de segurança, estabilidade e funcionalidade. O design, seleção de componentes, materiais e processos de fabricação são inspirados nas particularidades de sinos de mergulho e câmaras de resgate submarino. O equipamento é tratado como um vaso de pressão com esforços internos e externos, para fins de cálculo estrutural.

PALAVRAS-CHAVE: sinos de mergulho, câmara de resgate submarino, vaso de pressão.

Rodrigues, Felipe B. **Draft of Equipment to Subaquatic Work**. 2019. 27. Mechanical engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

This paper is a preliminary study for the development of a life support structure for saturation divers during in-depth work. The structure can also be employed in submerged rescues. Among the fields of interest for the use of this equipment is petrochemical: in installation, inspection, maintenance and operation of underwater components for extraction and transportation of fossil fuels. A structure is also very useful in the military area for rescuing submarines. To design the project, adopt ASME code, section VIII, as a basis for meeting safety, stability, and functionality requirements. The design, component selection, materials and manufacturing processes are inspired by the particulars of dive breasts and underwater rescue chambers. The equipment is treated as a pressure vessel with internal and external components for structural calculation purposes.

KEYWORDS: diving bell, submarine rescue chamber, pressure vessel.

NOMENCLATURA

σ_{adm}	Tensão admissível	[Pa]
σ_{rad}	Tensão radial	[Pa]
σ_{circ}	Tensão circunferencial	[Pa]
p_e	Pressão externa	[Pa]
p_i	Pressão interna	[Pa]
p_{adm}	Pressão admissível	[Pa]
<i>PMTA</i>	Pressão máxima admissível	[Pa]
R_i	Raio interno	[m]
R_e	Raio externo	[m]
R_{ic}	Raio interno corroído	[m]
D_i	Diâmetro interno	[m]
D_e	Diâmetro externo	[m]
L	Comprimento	[m]
L_A	Distância entre reforços	[m]
t_r	Espessura requerida	[m]
t_c	Espessura commercial	[m]
t	Espessura	[m]
C	Espessura de corrosão	[m]
h	Altura do tampo	[m]
E_s	Eficiência de solda	
S_g	Coefficiente de segurança	
K_e	Constante utilizada na verificação de tampos	
A	Relação para verificação de vasos sob pressão externa	
B	Valor para verificação da pressão máxima admissível	[Pa]
<i>ROV</i>	Remotely operated vehicle	
<i>SRC</i>	Submarine rescue chamber	
<i>ASME</i>	American Society of Mechanical Engineers	
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials	
<i>AISI</i>	American Iron and Steel Institute	

SUMÁRIO

NOMENCLATURA	vii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Revisão Bibliográfica	1
1.2.1 Sino de Mergulho	2
1.2.2 Câmara de Resgate Subaquático	3
1.3 Objetivos	4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1. Código ASME, Seção VIII, Divisões 1 e 2	4
2.3. Teoria de Lamé para Cilindros e Esferas	4
3. REQUISITOS DE PROJETO DO EQUIPAMENTO SUBAQUÁTICO	5
3.1 Condições de Serviço do Equipamento	5
3.1.1 Pressões e Temperaturas	5
3.1.2 Formato da Câmara e Dimensões Básicas	7
3.1.2.1 Geometria do Casco	7
3.1.2.2 Formato dos Tamos	8
3.2 Componentes e Acessórios Necessários ao Projeto	9
3.2.1 Aberturas, Bocais e Detalhes do Equipamento	9
3.2.3 Acessórios Internos do Equipamento	10
4. ANTEPROJETO DE EQUIPAMENTO SUBAQUÁTICO	10
4.1 Seleção e Especificação do Material	10
4.1.1 Material Selecionado	11
4.1.2 Especificação do Material	11
4.1.3 Sobreesspessura de Corrosão	11
4.2 Cálculo Mecânico do Anteprojeto	12
4.2.1 Equipamento Submetido à Pressão Interna	12
4.2.1.1 Casco Cilíndrico Sob Pressão Interna	12
4.2.1.2 Tamos Elipsoidais Sob Pressão Interna	13
4.2.2 Equipamento Submetido à Pressão Externa	13
4.2.2.1 Cascos Cilíndricos Sob Pressão Externa	13
4.2.2.2 Tamos Elipsoidais Sob Pressão Externa	14
5. RESULTADOS	14
6. CONCLUSÃO	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A indústria petrolífera constitui uma parcela importante da economia mundial e é peça chave para a política externa. Em 2018, consumiu-se mais petróleo do que em qualquer outro ano da história. Foram 98,82 milhões de barris por dia (BBC, 2018). No Brasil, a exploração do combustível fóssil acontece predominantemente em áreas *offshore*, como nas bacias de Campos e de Santos, através de plataformas e navios-sonda.

Há décadas é possível observar forte ascensão na exploração marítima de recursos biológicos e minerais. Esta busca crescente torna o desenvolvimento de estruturas subaquáticas de extrema importância para operações diversas, como: inspeção, manutenção, montagem, substituição de equipamentos e transporte de técnicos ao fundo do mar. Isto evidencia a necessidade de projetos de estruturas fechadas, resistentes às pressões internas e externas encontradas em grandes profundidades, como em sinos de mergulho.

Estruturas e equipamentos subaquáticos também podem ser empregados na área militar, para salvamento, por exemplo. O Brasil possui largas dimensões costeiras, o mar é fonte de riquezas e cerca de 95% das exportações e importações do país são escoadas por ele (Marinha, 2019). Com isso, torna-se natural que o país desenvolva dispositivos que operem de forma submersa, a fim de garantir sua soberania. Câmaras resistentes à pressão externa podem ser úteis tanto no resgate de submarinos que não consigam emergir, quanto para operações de monitoramento.

1.2 Revisão Bibliográfica

O surgimento da ideia de criar equipamentos que pudessem transportar homens abaixo d'água está relacionado aos séculos IV e V, na época de Alexandre, o Grande. Há relatos de que durante uma expedição ateniense à Sicília houve a utilização de mergulhadores dentro de estruturas ocas de madeira. Porém, Harold Young, da Universidade Estadual de Ohio (1926), diz que a primeira embarcação subaquática tripulada construída e testada é atribuída a Cornelius Van Drebbel, em 1620. Com a evolução tecnológica, ao longo dos anos, diversos dispositivos utilizando o conceito de Drebbel foram construídos para facilitar a exploração marítima. Mergulhos de saturação, ou seja, a profundidades maiores que 50 metros, atualmente são realizados com auxílio de câmaras fechadas para o transporte dos técnicos. Equipamentos submersíveis tripulados têm grande utilidade para manutenção de estruturas subaquáticas e no resgate de pessoas em embarcações naufragadas.

Nas últimas décadas, o uso de veículos remotamente controlados (ROV's) intensificou-se. Esses robôs tornaram-se ferramentas básicas na realização de trabalhos subaquáticos, sendo empregados por indústrias, militares, ou para estudos científicos. A crescente aplicação destes meios está diretamente ligada à redução de custos e riscos intrínsecos do uso de sinos de mergulho, ou câmaras de resgate subaquático, em média 1.000 Libras por operador a cada dia. Os ROV's desempenham diversas funções, entretanto a atuação dos mergulhadores é essencial para manutenção e inspeção de estruturas submersas. O serviço dos mergulhadores comerciais exige uma longa preparação, com equipamentos especializados para dar suporte necessário antes mesmo de submergir a cápsula. O que muitas empresas normalmente fazem é utilizar os veículos remotos como ferramentas auxiliares, ao entrar na água antes dos homens e realizar inspeção visual. Esta técnica permite o mapeamento do local de trabalho dos mergulhadores, o que diminui tempo de operação, riscos e custo.

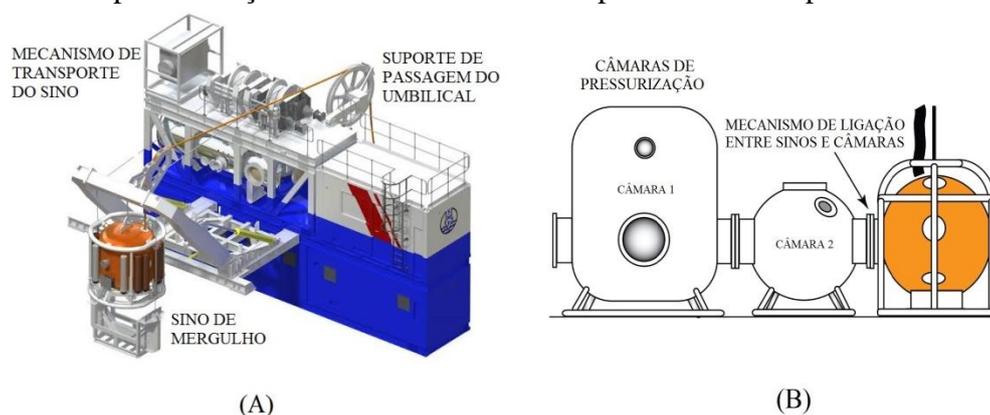
O trabalho de Carl T.F. Ross, Terry Whittaker & Andrew P.F. Little, da Universidade de Portsmouth (2010), investigam, de forma teórica e experimental, diversos métodos de cálculo

das cargas teóricas de colapso, estabilidade, análises estáticas e dinâmicas para vasos de pressão submetidos à pressão hidrostática externa; baseado em diferentes normas e códigos de projeto. Entre os códigos utilizados está o BS 5500, empregado geralmente para embarcações com pressão externa. O estudo do BS 5500 apontou diversas inconsistências na norma para diferentes modos de falha, o que forneceu resultados imprecisos. Com os resultados obtidos, observou-se que existem metodologias mais precisas que outras. Este estudo mostra que um casco sob pressão externa submarina pode sofrer instabilidade, ou flambagem lobular, através da curvatura de sua superfície, mesmo sob uma fração da pressão interna necessária para colapsar o vaso. Sugere-se, para diminuir a ineficiência estrutural de um vaso de pressão, o uso de anéis de reforço adequadamente separados e de tamanho suficiente para resistir aos esforços.

1.2.1 Sino de Mergulho

Sinos de mergulho são estruturas seladas utilizadas para trabalhos subaquáticos, como inspeção, manutenção e substituição de componentes. São dispositivos tripulados, geralmente de casco cilíndrico, ou esférico, que transportam mergulhadores para grandes profundidades. O modo mais comum de submergir os sinos é por cabos, Figura 1A. O equipamento é suspenso por uma estrutura acoplada a um navio e sem a necessidade de ser conduzido por algum operador de dentro da cápsula. Os sinos operam no fundo do mar, em mergulhos de saturação. Suas aberturas são basicamente constituídas de bocais para instrumentação e escotilhas para acesso dos ocupantes. O sino estará submetido à pressão hidrostática externa, e para que o mergulhador possa sair da câmara em segurança é necessário que a pressão interna seja equivalente à encontrada no fundo do mar. Para atingir esta pressão dentro do sino, os mergulhadores são preparados anteriormente, onde passam por um processo de pressurização, através de câmaras hiperbáricas de superfície, Figura 1B, que são acopladas ao sino semanas antes do mergulho.

Figura 1 – (A) Sistema completo para transporte de sino de mergulho; (B) Sistema de pressurização de sino com câmaras hiperbáricas de superfície.



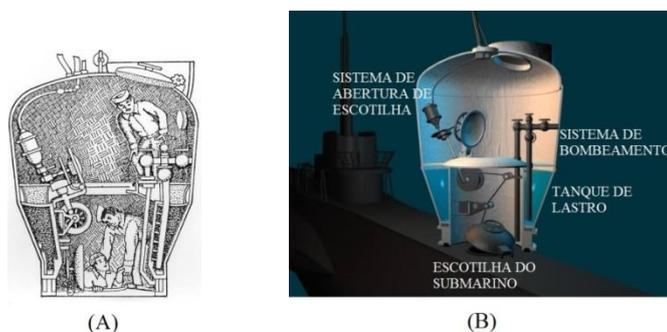
Fonte: SMP e MichaelSmart.

O trabalho em sinos de mergulho é extremamente insalubre, o oxigênio é altamente tóxico a grandes pressões. Para sobreviver a esse ambiente, os mergulhadores devem inalar uma mistura de gases, geralmente formada de hélio, hidrogênio e oxigênio, Heliox e Hydroheliox. A empresa francesa Comex, a partir 1983, iniciou diversos estudos com misturas respiratórias artificiais em sinos. Em 1986, foi realizada a Hydra 8, operação que levou mergulhadores à 530 m de profundidade para realizar a manutenção de uma linha de petróleo. A tarefa levou menos de 3 horas, entretanto os processos de pressurização e descompressão dos mergulhadores levaram aproximadamente 17 dias cada.

1.2.2 Câmara de Resgate Subaquático

Em acidentes subaquáticos utilizam-se diversas técnicas de salvamento. Uma delas é através de câmaras de resgate (SRC). Projetadas geralmente para resgate de submarinistas em específico, estas estruturas operam a grandes profundidades. O conceito de câmara de resgate submarino mais conhecido é o de McCann, projetado em 1931, na Suécia. Consiste de um vaso de pressão metálico, de casco cilíndrico, constituído de dois compartimentos, um fechado e outro aberto, onde a parte aberta é acoplada ao submarino para passagem dos tripulantes, como mostram as Figuras 2(A) e 2(B). Com algumas modificações, a maioria dos projetos atuais utiliza esta câmara como base. A reprodução da câmara de McCann é atribuída à eficiência demonstrada pelo projeto desde sua primeira utilização, em 1939, no acidente com o submarino americano *Squalus*, onde 33 tripulantes foram salvos através do equipamento. Peter Maas (2001) descreve o resgate dos tripulantes do USS *Squalus*, da marinha dos EUA, como sendo o maior resgate submarino da história, às vésperas da Segunda Guerra Mundial, a quase 100 metros de profundidade.

Figura 2 – (A) Conceito original da câmara McCann; (B) Câmara acoplada ao submarino.



Fonte: U.S. Navy e Háború Művészete.

Acidentes abaixo d'água não são raros, a história mostra diversos casos, entre eles, o submarino K-141 *Kursk*. O acidente com submarino nuclear russo ocorreu no Mar de Barents, em 2000, durante um exercício naval e pode ser considerado o pior já registrado. Uma explosão no compartimento de torpedos fez com que o *Kursk* afundasse 108 metros da superfície. Equipes de resgate munidas de câmaras de resgate foram acionadas, mas houve fracasso na operação, devido ao tempo empregado com questões diplomáticas, resultando na morte de 118 marinheiros. Após o incidente com o *Kursk*, as marinhas de todo o mundo passaram a priorizar projetos de resgate. Mikes A. e Migdal A. (2014), propõem estratégias de gerenciamento de riscos, a fim de evitar erros como este.

Segundo Joshua J. LaPenna (2010), o uso de SRC é a técnica mais segura para resgates submarinos. Em seu estudo, foi realizado o projeto conceitual de uma câmara para resgate subaquático. Dispositivos de salvamento normalmente são empregados em projetos de submarinos. Porém, o tamanho da câmara sugerida em seu estudo é equivalente ao de um míssil, e pode ser utilizado por submarinos da classe *Trident*, da Marinha dos Estados Unidos, em seu compartimento de torpedos. O artigo inclui a análise numérica para verificar a rigidez de cilindros submetidos a pressão hidrostática externa, com o uso de anéis de reforços. A superfície estudada tem como profundidade de operação cerca de 500 metros e comporta 70 tripulantes. Foi sugerido o uso de diversos equipamentos de resgate, para diminuir o tempo de salvamento. Embora o uso de câmaras de resgate subaquático como principal meio de resgatar submarinistas não seja o ideal, pois envolve diversos fatores que tornam a operação demorada, como o emprego de grupos de mergulhadores, operadores e embarcações, mas é a técnica mais segura.

1.3 Objetivos

Em busca de introduzir uma alternativa para a indústria de equipamentos militares e de exploração de petróleo, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver o estudo de uma estrutura para transporte e suporte à vida de técnicos e mergulhadores em águas profundas, com capacidade mínima para quatro tripulantes.

Como base para a realização do projeto, será adotada a norma ASME, Seção VIII, Divisões 1 e 2, para vasos de pressão, na definição da geometria e dimensões, material, componentes, processos de fabricação, bem como para análise e verificação da resistência da estrutura, por meio de critérios de falha adotados pelo código. Serão realizados cálculos analíticos para definir espessuras necessárias para a resistir às cargas que o equipamento estará submetido em operação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para concepção do equipamento, foi necessário obter conhecimento a respeito dos equipamentos subaquáticos utilizados atualmente: sinos de mergulho e câmaras de resgate subaquático (SRC). Como estas estruturas são projetadas, suas principais características, os esforços aos quais são submetidas, as teorias de falha empregadas e as normas seguidas pelos projetos. A construção de dispositivos subaquáticos fechados é feita considerando a estrutura como um vaso de pressão. As definições de geometria, dimensões, acessórios, materiais e processos de manufatura dos componentes devem seguir as exigências de normas reconhecidas. O presente projeto adotou o código ASME, Seção VIII, Divisões 1 e 2, para vasos de pressão, o mais utilizado neste tipo de projeto. A câmara desenvolvida é uma casca e suas tensões são descritas pela teoria membrana e a análise de pressões admissíveis, assim como no dimensionamento da estrutura, cálculo de espessuras requeridas baseiam-se neste critério. Vasos de pressão sob pressão interna, ou externa, podem colapsar, ou flambar. O código ASME utiliza expressões deduzidas da teoria de Lamé para dimensionar estruturas com base no critério de falha de Rankine.

2.1. Código ASME, Seção VIII, Divisões 1 e 2

O código ASME é o mais utilizado no Brasil para projetos de vasos de pressão. A Divisão 1 contém especificações mínimas de segurança que devem ser aplicadas na construção, projeto, fabricação e certificação de vasos comuns, sob pressão interna ou externa. Os cálculos de vasos de pressão, exigidos pela Divisão 1 do código, utilizam a teoria de Lamé. A Divisão 2 é mais rigorosa quanto a seleção de materiais e exige cálculos rigorosos. A aplicabilidade do código cessa na primeira junta circunferencial de uma ligação soldada, primeira junta roscada de uma ligação deste tipo e face do primeiro flange de uma ligação flangeada (Groehs, 2014).

2.3. Teoria de Lamé para Cilindros e Esferas

O estudo das tensões em cilindros e esferas baseia-se na teoria de Lamé, que deduz expressões para calculá-las. Segundo Groehs (2014), atribui-se a G. Lamé o desenvolvimento das primeiras equações para cálculo de tubos de parede espessa submetidos à pressão interna ou externa devido a publicação “Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides” em 1852 (Belluzzi, 1967 – Timoshenko & Goodier, 1970). As tensões radiais e circunferenciais em cilindros podem ser obtidas pelas Equações 1 e 2. Já as Equações 3 e 4 servem para calcular as tensões na esfera.

$$\sigma_{rad} = \frac{p_e R_e^2 - p_i R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} - \frac{(p_e - p_i) R_e^2 R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} \frac{1}{r^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{circ} = \frac{p_e R_e^2 - p_i R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} + \frac{(p_e - p_i) R_e^2 R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} \frac{1}{r^2} \quad (2)$$

$$\sigma_{rad} = \frac{p_e R_e^3 - p_i R_i^3}{R_e^3 - R_i^3} - \frac{(p_e - p_i) R_e^3 R_i^3}{R_e^3 - R_i^3} \frac{1}{r^3} \quad (3)$$

$$\sigma_{circ} = \frac{p_e R_e^3 - p_i R_i^3}{R_e^3 - R_i^3} + \frac{(p_e - p_i) R_e^3 R_i^3}{R_e^3 - R_i^3} \frac{1}{r^3} \quad (4)$$

Para cilindros submetidos à pressão interna, $p_i = p$ e $p_e = 0$, foram obtidas as tensões principais e verificou-se que $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$. Com isso, adotou-se a teoria de resistência de Rankine, utilizada pela ASME. Este critério considera a máxima tensão normal. A tensão admissível por essa teoria para $t < R_i/2$ é expressa pela fórmula de Boardman, Equação 5.

$$\sigma_{adm} = \sigma_1 = \sigma_{circ}(r=R_i) = |p| \frac{(R_i+t)^2 + R_i^2}{(R_i+t)^2 - R_i^2} \quad (5)$$

A definição das tensões é necessária para dimensionar estruturas com espessuras capazes de resistir aos esforços submetidos. O código ASME adota a teoria de Rankine para vasos de pressão por serem mais conservadores que Von Mises, para pequenas espessuras, a favor da segurança.

3. REQUISITOS DE PROJETO DO EQUIPAMENTO SUBAQUÁTICO

O equipamento subaquático foi tratado no projeto como um vaso de pressão, que assim como na maioria dos casos não se trata de um item de linha de fabricação. Normalmente, os vasos são construídos por encomenda, o que faz com que o projeto seja feito individualmente para atender determinada finalidade. Este capítulo aborda as seguintes etapas realizadas durante o projeto: mapeamento das condições de operação do equipamento, seleção de geometria, além da definição dos detalhes construtivos.

3.1 Condições de Serviço do Equipamento

O dispositivo deve ser capaz de operar submerso a grandes profundidades, submetido ao ambiente corrosivo, de baixas temperaturas e altas pressões do fundo do mar, estando pressurizado internamente, como um sino de mergulho, ou não, como uma câmara de resgate. É de extrema importância que a estrutura suporte a diferença de pressão, considerando que as cargas podem ser internas e causar colapso, ou flambar devido à pressão externa. Esta etapa visou o estabelecimento dos dados de operação do equipamento nas piores situações, além da definição das características de funcionamento e desempenho básicas de um projeto, tais como:

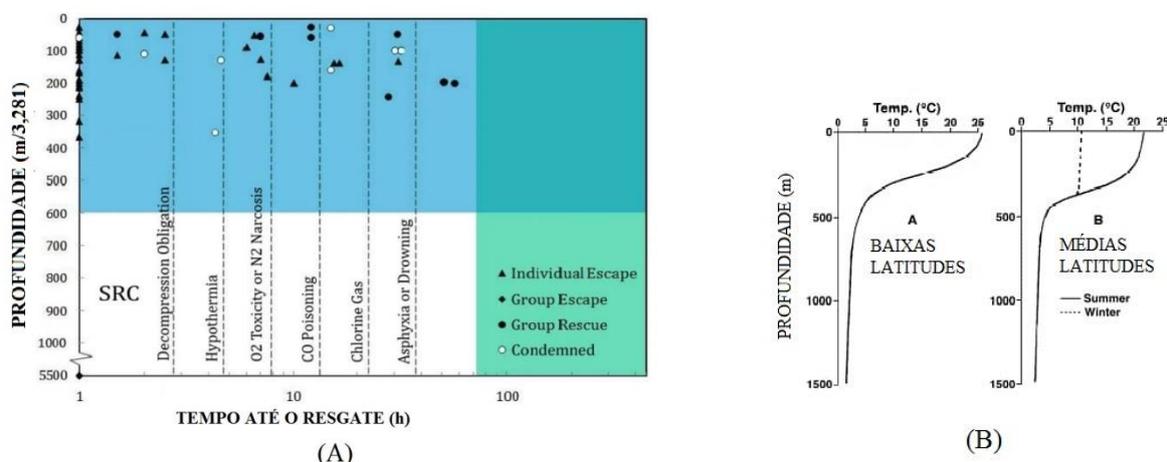
- Pressões e temperaturas de operação;
- Formato da câmara e dimensões básicas;
- Componentes e acessórios necessários ao projeto.

3.1.1 Pressões e Temperaturas

Para definir as pressões e temperaturas externas foram tomadas como base, principalmente, as plataformas fixas e semisubmersíveis da Petrobras, uma vez que uma das principais aplicações

do equipamento será na indústria petroquímica. Estas estruturas espalhadas pela costa brasileira podem alcançar profundidades entre 150 e 300 metros, respectivamente. Entre outros fatores levados em conta, estão as experiências prévias com equipamentos de resgate subaquático, utilizados em acidentes com os submarinos, como o Kursk e o Squallus, já mencionados. Nos dois eventos, a lâmina d'água era relativamente pequena, cerca de 100 metros. LaPenna fez um mapeamento dos resgates subaquáticos registrados durante a história e desenvolveu um gráfico que mostra a profundidade dos eventos em função do tempo, Figura 3(A). Com isso, adotou-se a profundidade de operação igual a 300 metros, onde a pressão externa da água é aproximadamente 3 MPa. Já a temperatura de trabalho foi adotada com base na Figura 3(B).

Figura 3 – (A) Eventos de resgate registrados; (B) Típicos perfis de temperatura subaquática.



Fonte: LaPenna e Pillai.

Estudos oceanográficos (PILLAI, 2016), resultaram nos gráficos da Figura 3(B), que avalia a temperatura em função da profundidade. Nele é possível observar que a faixa de temperatura na profundidade de 300 metros varia de 5°C a 20°C aproximadamente, de acordo com a latitude, perto, ou a médias distâncias da linha do Equador. Com isso, a favor da segurança, definiu-se a temperatura externa de projeto igual à 5°C.

As características internas de funcionamento quanto às pressões e temperaturas são muito distintas. Um sino de mergulho trabalha de forma hiperbárica, sua pressão interna é obtida ainda na superfície, de acordo com a pressão externa na profundidade de trabalho, igual à 3 MPa. Essa pressurização é necessária em sinos, para igualar às pressões internas e externas, a fim de que os mergulhadores não sofram despressurização ao sair do equipamento embaixo d'água. Portanto, ao atuar como sino, tomou-se como pressão interna 3 MPa. Contudo, quando equipamento estiver realizando salvamento abaixo d'água, como uma câmara de resgate, a pressão interna deve ser atmosférica, igual à encontrada em submarinos. Isso garante que os submarinistas resgatados não sofram nenhuma variação de pressão ao entrarem na câmara. A temperatura interna, embora seja maior no ambiente pressurizado, foi considerada 25°C, em ambos os casos, supondo que existam dispositivos para o controle de climatização.

Com os dados de operação obtidos, foi possível observar que há dois casos de maior esforço sofrido pela câmara, duas situações críticas do equipamento, às quais são descritas a seguir:

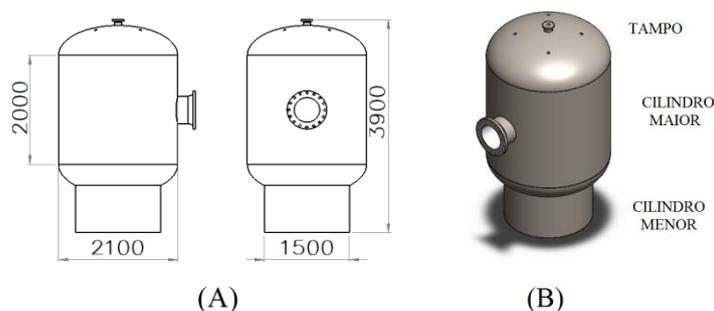
- I. Equipamento atuando como um sino de mergulho, antes de ser submerso, quando a pressão interna é 3 MPa e a pressão externa é atmosférica. As temperaturas, neste caso, são iguais à 25 °C e 5 °C, respectivamente.

- II. Estrutura na profundidade de trabalho, 300 metros, operando como uma câmara de resgate submarino, onde a pressão externa é igual à 3 MPa e a interna é atmosférica. Neste caso, a temperatura externa é de 5 °C e a interna 25 °C, também.

3.1.2 Formato da Câmara e Dimensões Básicas

O equipamento a ser projetado é basicamente um recipiente estanque, um vaso, submetido a pressões internas e externas. A parede de pressão e tampos, que constituem o invólucro externo, são as partes mais importantes. O equipamento irá operar de forma hiperbárica internamente, para trabalhos de manutenção de estruturas subaquáticas, e à pressão atmosférica quando utilizado para resgate submarino, casos I e II, descritos anteriormente. A geometria foi dimensionada para resistir a ambas as solicitações e garantir a funcionalidade da câmara, levando em conta o número mínimo de tripulantes igual à 4. As Figuras 5(A) e 5(B) ilustram as vistas 2D e 3D da geometria básica proposta para o conjunto casco e tampos.

Figuras 4 – (A) Vistas frontal e lateral direita com medidas aproximadas para o equipamento; (B) Vista isométrica da geometria proposta para a estrutura.



3.1.2.1 Geometria do Casco

Os vasos de pressão geralmente possuem uma das três superfícies básicas de revolução: cilíndrica, esférica ou cônica. Visando a simplicidade do projeto, optou-se pela forma cilíndrica, a mais usada para cascos, em posição vertical, pois facilita as transições da superfície ao fundo do mar por possuir menor arrasto hidrodinâmico. Conforme apresenta a Figura 4, a geometria adotada possui duas partes cilíndricas, a maior, para ocupação dos mergulhadores e a menor para passagem dos resgatados, quando esta estiver acoplada a escotilha do submarino. As principais dimensões de um vaso cilíndrico são o diâmetro D_i e a altura L . Os diâmetros internos D_i e alturas são apresentados pela Tabela 1.

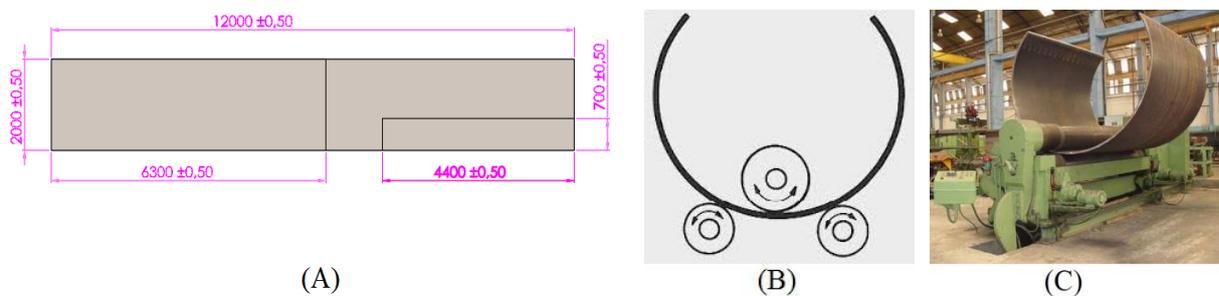
Tabela 1 – Dimensões básicas das partes cilíndricas do equipamento.

Cilindro	D_i (m)	L (m)
Maior	2	2
Menor	1,4	0,7

O cilindro maior gera uma área habitável de $3,14 \text{ m}^2$, suficiente para 4 ocupantes, 2 mergulhadores e 2 operadores confortavelmente, como sugere a norma NBR-13, ou mais tripulantes, para os casos de resgate. Segundo a literatura (STILL, G.K, 2019), o limite de ocupação de um metro quadrado é de 5 pessoas em pé, com certa visibilidade. Considerando que os submarinos possuem aproximadamente 35 homens, o espaço disponibilizado pela câmara comporta quase a metade da tripulação. Já o cilindro menor possui área de passagem equivalente

à $1,54 \text{ m}^2$, suficiente para dar estabilidade à câmara. Para definir as alturas, foi utilizada a norma brasileira P-EB-35, que relaciona as dimensões de chapas grossas. Uma chapa de 2 m de largura e 12 m de comprimento foi selecionada, como mostra a Figura 5(A).

Figuras 5 – (A) Chapa grossa P-EB-35 com dimensões demarcadas; (B) Esquemática do processo de calandragem; (C) Chapa de aço durante o a calandragem cilíndrica.



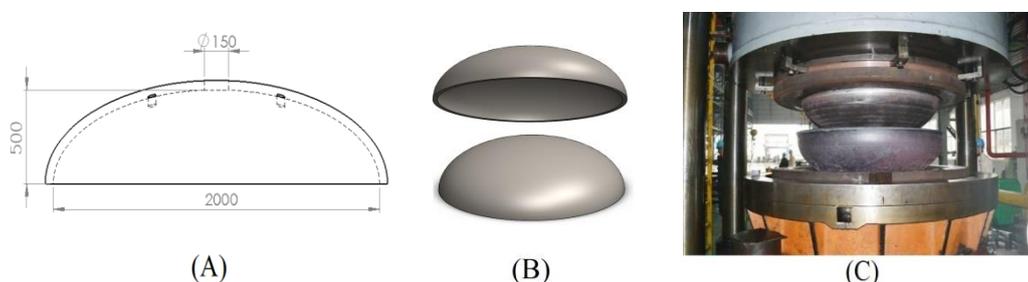
Fonte: Telles e Bmiil.

Pela Figura 5(A), observou-se a necessidade do uso de apenas uma chapa para ambas as partes cilíndricas do casco, o que diminui o uso de soldas e faz com que o projeto seja mais econômico. O método de fabricação selecionado para obtenção das peças foi o de conformação mecânica, por meio do processo de calandragem a frio, ilustrado pelas Figuras 5(B) e 5(C).

3.1.2.2 Formato dos Tampos

Os tampos são os componentes de fechamento dos cascos e podem ser construídos em diversos formatos, tais como: esféricos, elipsoidais e toro-esféricos. Para o projeto, foi realizada a seleção de tampos elipsoidais normais, de raio interno igual a 1 m e altura 0,5 m. Este tipo de perfil apresenta maior resistência que os toro-esféricos, os mais comumente encontrados em vasos de pressão, devido facilidade de construção. A Figura 6(A) e 6(B) apresentam o tampo elipsoidal normal adotado, com dimensões. O componente pode ser fabricado utilizando o processo de prensagem, mostrado na Figura 6(C).

Figura 6 – (A) Vista frontal do tampo elipsoidal; (B) Tampo em vistas 3D; (C) Processo de prensagem do tampo elipsoidal.



Fonte: Jiu Zhou Head

Os tampos elipsoidais chamados normais têm a relação $R/h = 2$, apresentam tensões menores que os toro-esféricos e a resistência semelhante ao casco cilíndrico, podendo utilizar as mesmas dimensões.

3.2 Componentes e Acessórios Necessários ao Projeto

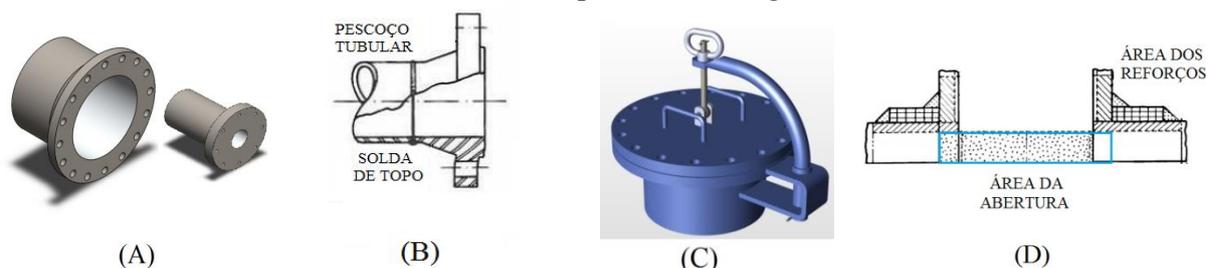
O equipamento, para contemplar as características de um sino de mergulho e de uma SRC, como um híbrido, deve possuir diversos componentes, tanto externos quanto internos. Essa seção trata dos detalhes construtivos da câmara.

3.2.1 Aberturas, Bocais e Detalhes do Equipamento

Todos os vasos têm aberturas para diversas finalidades, sem as quais os vasos seriam inúteis. As aberturas tanto podem ser feitas no casco como nos tampos. A grande maioria das aberturas tem seção transversal circular e eixo perpendicular à parede do vaso (Telles, 1990). Ao equipamento estudado foram atribuídas poucas aberturas, embora tenha sido calculado como um vaso de pressão. Entre as quais há duas principais: uma na lateral do casco para ligação de um vaso de pressão, no caso as câmaras hiperbáricas de superfície, e outra, no tampo inferior, para entrada e saída de mergulhadores equipados. O código ASME, Seção VIII, Divisão 1, exige que o limite para aberturas em cascos cilíndricos de diâmetro acima de 1,53 m seja $D/3$.

De acordo com o código ASME, todo vaso com diâmetro de 0,9 m, ou mais, deve ter uma boca de visita. Na abertura lateral do equipamento foi inserido um bocal flangeado de pescoço tubular, fabricado de chapa calandrada, com uma única solda longitudinal Figura 7(A) e 7(B). As duas aberturas projetadas necessitam de tampas removíveis, para a passagem dos mergulhadores e selagem da câmara. Foram selecionadas tampas com abertura para dentro da câmara e compostas por um sistema de abertura que garante a segurança, estanqueidade do equipamento e rapidez na abertura, o turco giratório (*davit*), Figura 7(C). As aberturas causam enfraquecimento da estrutura e, para compensar, faz-se o uso de reforços. A soma das áreas das seções longitudinais desses reforços, chapas e soldas, deve ser maior que a área da seção longitudinal da abertura onde é colocado o bocal, Figura 7(D).

Figuras 7 – (A) Bocais flangeados lateral e superior; (B) Bocal flangeado de pescoço tubular; (C) Escotilha composta de turco giratório.



Fonte: Telles e GrabCAD

Os diâmetros escolhidos para os dois maiores bocais do projeto, seguindo a norma N-253 da Petrobrás, são apresentados pela Tabela 2.

Tabela 2 – Lista de diâmetros dos principais bocais do equipamento.

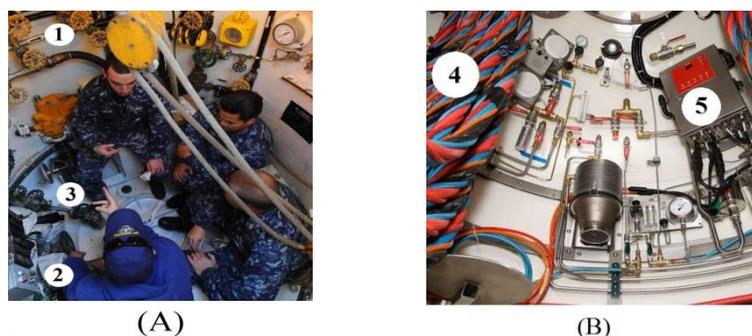
Bocal lateral	Bocal inferior	Bocal superior
500 mm	600 mm	150 mm

O bocal de menor diâmetro, no tampo superior da câmara, tem a seguinte função: passagem do umbilical, conjunto de cabos ligados ao navio, que transportam os suprimentos necessários aos operadores, como energia, comunicação, além da distribuição de gases respiratórios. Para esta abertura também foi selecionado um bocal com flange de pescoço tubular, Figura 7 (A).

3.2.3 Acessórios Internos do Equipamento

A fim de garantir o conforto e segurança dos mergulhadores, notou-se necessário o emprego de diversos componentes internos. A Figura 8 mostra possíveis configurações para o interior do equipamento.

Figuras 8 – (A) Interior da câmara McCann; (B) Instrumentos internos de um sino de mergulho.



Fonte: U.S. Navy e JFD.

Os principais sistemas com tubos e válvulas realizam o controle da pressão e temperatura e transporte de gases respiratórios (1), que partem de um navio, através do umbilical (4), que fornece energia para painéis de controle (2), luzes, câmeras e comunicação. Dispositivos para a depuração de CO₂, purificação do ambiente e recuperação de calor (5) são utilizados. Bombas e tanques retiram e armazenam a água contida entre a escotilha do submarino e a SRC (3).

4. ANTEPROJETO DE EQUIPAMENTO SUBAQUÁTICO

Este capítulo apresenta a seleção e especificação dos materiais da câmara; dimensionamento físico, através do cálculo mecânico, com base no código ASME, para que o equipamento resista às cargas marítimas atuantes em câmaras de resgate submarino e em sinos de mergulho.

4.1 Seleção e Especificação do Material

Entre os materiais utilizados em projetos de vasos de pressão, estão os metálicos ferrosos, como os aços-carbono, aço-liga e aços inoxidáveis. Em geral, aços-carbono são os mais aderidos em projetos, sejam eles com níveis baixos, ou médios de carbono, acalmados, ou não. Estes materiais propiciam diversos benefícios ao projeto, facilitam o uso dos processos de fabricação por possuírem boa conformabilidade e soldabilidade, além de serem facilmente adaptáveis a tratamentos térmicos e de superfície. Os aços-carbono são os mais notórios no mercado, o que não traz ao projeto a dificuldade na obtenção de material e também apresentam satisfatórias relações entre custo e resistência. Segundo (Telles, 1990), na construção de qualquer vaso de pressão, deve-se empregar alguma Especificação de Material, que são documentos normativos, emitidos por sociedades normativas reconhecidas, públicas ou particulares, ou por alguns fabricantes, contendo geralmente as seguintes informações e exigências: descrição e finalidades do material, composição química, propriedades mecânicas, ensaios e testes exigidos ou recomendados, condições de aceitação, rejeição e marcação do material. O código ASME, Seção VIII, Divisões 1 e 2, só permite que sejam empregados para partes pressurizadas dos vasos os materiais que constam nas tabelas de tensões admissíveis da norma.

4.1.1 Material Selecionado

A escolha do material pode ser um dos problemas mais difíceis do projeto, uma vez que diversos critérios devem ser analisados previamente. Um fator a ser observado antes de projetar um vaso de pressão é o fluido contido, bem como outros fluidos em contato com as paredes externas da estrutura. A câmara subaquática a ser desenvolvida terá como fluido interno uma mistura de gases, Heliox, ou Hidroheliox, e por fora estará em contato direto com o meio corrosivo proporcionado pela água salgada. Além disso, o material deve suportar as tensões oriundas das pressões internas e externas de operação, 3 MPa. O material deve resistir a uma faixa de temperatura que varia de 5 a 25 °C. Outros critérios levados em conta na seleção do material são: o custo, a facilidade de obtenção e de fabricação, tempo de vida e experiência prévia.

Pelos critérios apresentados anteriormente, a selecionou-se o aço-carbono, como material mais adequado. É o mais empregado na construção dos vasos de pressão. Esta escolha se justifica pelo fato do projeto trabalhar a temperaturas abaixo do limite máximo recomendado para aços-carbono em vasos de pressão, 450°C, o que evita a redução de resistência mecânica causada pelas deformações por fluência e a intensa oxidação superficial. Contudo, a temperatura de operação do equipamento não é baixa o bastante para causar a transição de comportamento de dúctil para frágil no material, que acontece abaixo de -45°C. Este é o motivo pelo qual o equipamento não deve ser empregado para altas latitudes. Isso evita fraturas frágeis repentinas. O aço-carbono é um material de baixa resistência à corrosão e, por isso, deve ser acrescentada uma sobresspessura nas partes em contato com fluidos. O uso de aços-liga, além de ser mais caro, não se justifica para aumentar a vida do vaso, pois a água salgada destrói a maioria dos aços especiais tão rapidamente como os aços-carbono. Aços inoxidáveis também não devem ser selecionados, pois apresentam dificuldade de soldagem e são mais adequados a serviços criogênicos, ou com elevadas temperaturas. Para especificação do aço-carbono utilizou-se a Tabela I do Anexo, a qual apresenta os materiais mais indicados para vasos de pressão, de acordo com a forma de apresentação e classe de aços-carbono e recomendado pela ASTM.

4.1.2 Especificação do Material

O equipamento subaquático será construído em sua maioria de chapas grossas, dimensões a partir de 4,76 mm segundo a norma ASTM A20. Esses componentes deverão ser fabricados com o aço-carbono A-516 Gr 70, de médio carbono e acalmados (*killed-steel*). Este material foi selecionado, pois aços de baixo carbono resultariam em grandes espessuras e maior peso e custo. O processo de acalmar o aço, adicionar até 0,3% de Si, deixa a estrutura do metal mais fina e uniforme, o que evita defeitos internos. Como o vaso pode, mesmo que por pouco tempo, trabalhar a temperaturas abaixo de 0°C, recomenda-se a aplicação deste processo. Para escolha do grau do aço (Gr) levou-se em conta a disponibilidade do mercado, bem como as propriedades mecânicas do material. O aço com Gr 70 possui maiores tensões admissíveis, de escoamento e ruptura, como apresenta a Tabela 2 do Anexo I. Para os componentes internos, que não sofrem tensões principais, utilizou-se aço de qualidade estrutural, como indica a norma N-253.

4.1.3 Sobreesspessura de Corrosão

É um incremento de espessura a ser consumido pela corrosão ao longo da vida útil do equipamento. A sobreesspessura utilizada no projeto foi definida como 6 mm, por considerar a água salgada um meio muito corrosivo.

4.2 Cálculo Mecânico do Anteprojeto

Esta seção trata de apresentar os principais cálculos mecânicos realizados, necessários ao projeto dos cascos e tampos do vaso de pressão em estudo. O equipamento pode estar submetido a diferenças de pressão de até 3 MPa, sendo a pressão interna maior, para o caso I e para o caso II, onde a pressão externa é predominante. Utilizou-se como base para a determinação de espessuras, pressões e tensões a norma ASME, Seção VIII, Divisão 1. As sequências de cálculo foram sugeridas por (Groehs, 2014).

4.2.1 Equipamento Submetido à Pressão Interna

Este tópico considera a condição de operação de um sino de mergulho, caso I, apresentado anteriormente. Para o dimensionamento do casco e tampos, a fim de evitar o colapso plástico do vaso, foram calculadas as espessuras requeridas e máximas pressões admissíveis (PMTA). O equipamento nesta condição de operação é submetido à pressão manométrica interna de 3 MPa. As fórmulas utilizadas são aproximações das teorias de resistência e consideram o critério de Rankine, que é mais conservativo que Von Mises e recomendado pelo código ASME.

4.2.1.1 Casco Cilíndrico Sob Pressão Interna

Através do critério de Rankine, chegou-se a Fórmula de Boardman, Equação 6, para a espessura requerida t_r , em (mm), para cascos cilíndricos.

$$t_r = \frac{|p|R_{ic}}{E_s\sigma_{adm}-0,6|p|} \quad (6)$$

onde p é a pressão interna (Pa), R_{ic} é o raio interno corroído (m), E_s a eficiência da solda e σ_{adm} (Pa) a tensão admissível.

A Equação 6 é válida para $t_r \leq R/2$ e representa a espessura associada à tensão circunferencial. A pressão interna p à qual o equipamento será submetido é de 3 MPa, e eficiência das soldas considerada 1, ou seja, totalmente radiografadas. Já a σ_{adm} foi obtida da Tabela II do Anexo, para o aço AISI 516, na faixa de temperatura que varia de -28,9°C a 343,3°C.

O casco do equipamento subaquático é constituído dois cilindros, o maior, que liga os dois tampos elipsoidais, e o menor, soldado no tampo inferior, para dar estabilidade e para passagem dos mergulhadores e submarinistas socorridos. O raio R interno não corroído do maior cilindro foi definido como 1 m, enquanto que o cilindro menor 0,7 m. Entretanto, o cilindro menor é aberto na parte inferior, logo não sofre a influência da pressão interna enquanto está suspenso, ou quando é acoplado ao submarino. O valor calculado da espessura do cilindro maior é apresentado pela Tabela 3.

Tabela 3 – Espessura requerida pelo casco maior sob pressão interna.

Cilindro Maior	Espessura associada à tensão circunferencial $t = 31,24mm$
-------------------	---

O equipamento necessita de espessuras maiores para solicitações circunferenciais. Isto se verifica devido ao equilíbrio de tensões em vasos de pressão. Com t sendo a espessura do casco não corroído, calculada por $t = t_r + 2C$, onde $2C$ é a sobreespessura.

4.2.1.2 Tampos Elipsoidais Sob Pressão Interna

Os tampos elipsoidais foram definidos como normais, em que o raio é o dobro da altura. Embora necessitem de moldes especiais, são mais fáceis de construir, com relação aos esféricos e possuem maior resistência que toro-esféricos, cônicos e planos equivalentes. O código ASME adota uma expressão para o cálculo da espessura dos tampos elipsoidais dada pela Equação 7.

$$t_r = \frac{|p|R_{ic} K_e}{2E_s \sigma_{adm}^{-0,2}|p|} \quad (7)$$

Onde R_{ic} é igual ao raio interno corroído do cilindro maior, visto anteriormente e K_e corresponde a uma constante adimensional calculada pela Equação 8.

$$K_e = \frac{1}{3} \left[2 + \left(\frac{R}{h} \right)^2 \right] \quad (8)$$

Foi adotada a relação $R/h = 2$ que resulta numa resistência semelhante à do cilindro. As dimensões t_r e t foram calculadas pelas Equações 8 e 7, respectivamente, as quais estão dispostas na Tabela 4.

Tabela 4 – Espessuras requeridas pelos tampos sob pressão interna.

Tampo Elipsoidal	Espessura requerida $t_r = 24,93 \text{ mm}$	Tampo não corroído $t = 30,93$
------------------	---	-----------------------------------

Estudos em tampos elipsoidais realizados por Jawad & Farr, em 1984, indicam que para esta relação entre raio e altura a máxima tensão é circunferencial de tração na união tampo-cilindro.

4.2.2 Equipamento Submetido à Pressão Externa

Este item destina-se ao dimensionamento da câmara subaquática, casco e tampos, para resistir a operações com pressão externa de 3 MPa enquanto o ambiente interno encontra-se a pressão atmosférica, caso II. Nesta situação, deve-se encontrar espessuras que evitem falhas por instabilidade, ou flambagem do casco.

4.2.2.1 Cascos Cilíndricos Sob Pressão Externa

Cascos cilíndricos de paredes finas com pressão externa atuante estão sujeitos à instabilidade elástica, e entram em colapso ao atingir a pressão crítica p_{cr} , definida pela Equação 9.

$$|p_{cr}| = \frac{2AE}{(D_e/t)} \quad (9)$$

Para A, uma relação adimensional adotada pela ASME, para cilindros curtos, com a relação $(L_A/D_e) < (1,113\sqrt{D_e/t})$ e E o módulo de elasticidade do material. Na verificação dos cascos, foram utilizados dois anéis de reforço no cilindro maior e um no menor. Considerou-se $(D_e/t) \geq 10$ e para espessuras comerciais a partir das requeridas pelo casco sob pressão interna, (Item 4.2.1), realizou-se uma sequência de cálculos de resistência descrita a seguir:

1. Obteve-se as relações (D_e/t) e (L_A/D_e) para t calculado pela Eq.(6), que acrescida de $2C$ resulta em que t_c , a espessura comercial maior que a requerida pelo vaso sob pressão

interna (Item 4.2.1), seguindo a Tabela III do Apêndice, adaptada de (Telles, 1990), para chapas grossas segundo a norma P-EB-35 da Petrobrás.

2. Determinação do adimensional A, pelo gráfico da Figura 1, Anexo I, utilizando as relações obtidas anteriormente.
3. Com os dados acima, chegou-se ao fator B em (Pa), por meio do adimensional A, do módulo de elasticidade (Pa) e da temperatura (°C) e pelo gráfico da Figura 2 do Anexo I.
4. Por fim, calculou-se a pressão admissível $|p_{adm}|$, também chamada de máxima tensão de trabalho admissível (PMTA), em (Pa), através da Equação 10.

$$|p_{adm}| = \frac{4B}{3(D_e/t)} \quad (10)$$

No último item, a pressão obtida deve ser maior que a pressão externa, ou seja, $|p_{adm}| > |p|$. Porém, este valor não deve ser consideravelmente maior, visto que o código ASME utiliza um fator de segurança $S_g = 3$, em relação à pressão crítica do vaso, Eq.(10).

4.2.2.2 Tampos Elipsoidais Sob Pressão Externa

A espessura requerida para os tampos elipsoidais submetidos à pressão externa $|p|$, foi calculada pelas Equações 8 e 9, com E_s e K_e iguais aos utilizados para pressão interna. Contudo, a norma exige que a pressão seja multiplicada por 1,67.

5. RESULTADOS

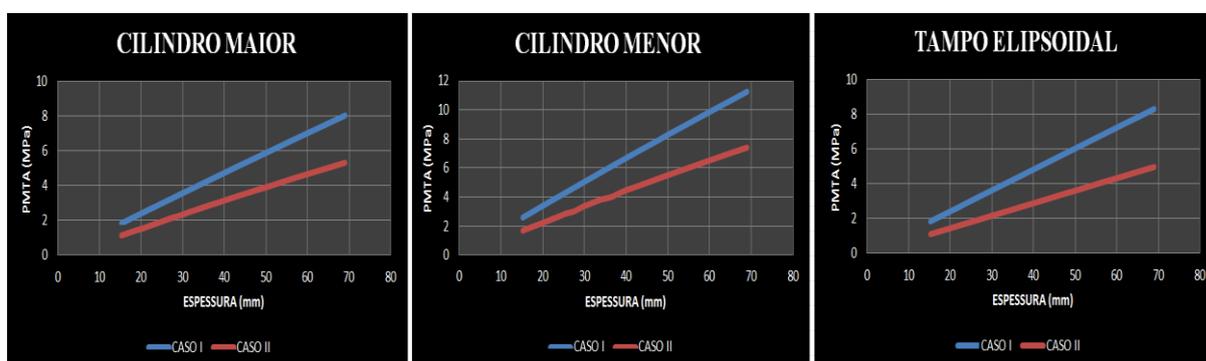
Os dados da Tabela 5 foram obtidos para as espessuras requeridas das partes cilíndricas do casco e dos tampos elipsoidais, através dos cálculos iterativos apresentados anteriormente para o equipamento submetido à pressão externa de 3 MPa, caso II, e exigidos pela ASME. Utilizou-se para início do cálculo espessuras comerciais t_c mínimas que satisfazem o equipamento em condições de serviço do caso I, ou seja, submetido à pressão interna de 3 MPa.

Tabela 5 – Cascos cilíndricos e tampos elipsoidais submetidos à pressão externa.

Cilindro Maior	$t_c(mm)$	$t(mm)$	$D_e(mm)$	D_e/t	$L_A(mm)$	L_A/D_e	A	B (MPa)	PMTA(MPa)
CASO I	31,5	25,5	2057	80,67	665	0,3232	0,007	118,59	1,960
CASO II	45	39	2078	53,28	665	0,3200	0,014	123,45	3,090
Cilindro Menor	$t_c(mm)$	$t(mm)$	$D_e(mm)$	D_e/t	$L_A(mm)$	L_A/D_e	A	B (MPa)	PMTA(MPa)
CASO I	31,5	25,5	1451	56,90	350	0,241	0,017	122,06	2,859
CASO II	33,5	27,5	1455	52,91	350	0,240	0,020	122,53	3,087
Tampo	$t_c(mm)$	$t(mm)$	E_s	R(mm)	K_e	PMTA(MPa)			
CASO I	31,5	25,5	1	1000	2	1,843			
CASO II	50	44	1	1000	2	3,174			

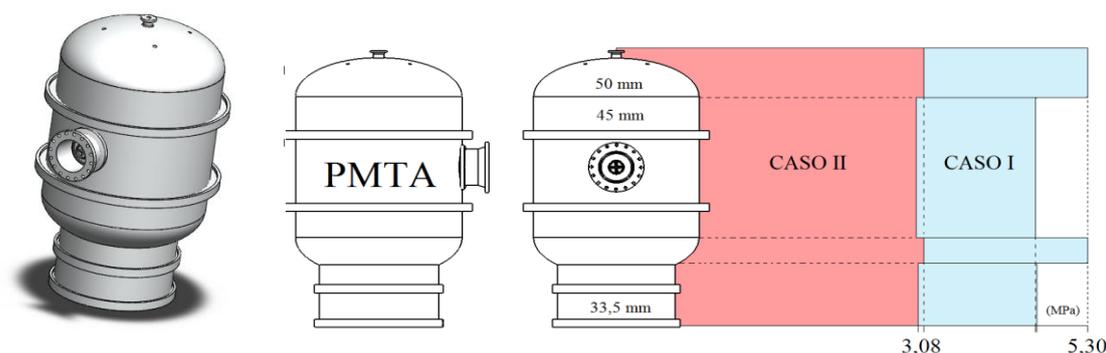
Através da análise da Tabela 5, pôde-se observar a diferença entre as espessuras comerciais requeridas para o caso I e caso II. Quando o vaso trabalha à pressão atmosférica internamente, na profundidade de trabalho, necessita de espessuras significativamente maiores. Mas quando apenas o interior está pressurizado, ainda na superfície, caso I, que é a pior situação de um sino de mergulho, requer espessuras menores, que não são verificadas na tabela acima, em uma câmara de resgate, caso II, pois estará sujeita a flambagem com $PMTA < 3(MPa)$. Isto fica claro nos gráficos da Figura 9, que mostram as máximas pressões admissíveis para os dois casos em função das espessuras comerciais para cada componente do vaso.

Figura 9 – Máxima pressão de trabalho admissível em função das espessuras para os casos I e II.



O gráfico da figura abaixo mostra onde o equipamento possui menor resistência. Para as espessuras definidas no projeto, o caso I admite pressões consideravelmente maiores, para os tampos até 5,30 MPa. Porém, submetido à pressão externa apenas, caso II, o equipamento irá falhar por flambagem com uma PMTA de 3,08 MPa, no cilindro menor. Portanto, a pressão admissível geral da câmara é 3,08 MPa.

Figura 10 – Máxima pressão de trabalho admissível de cada parte do equipamento.



Selecionados os componentes, materiais e dimensões, chegou-se a configuração final da câmara, Figura 10, com massa de 10.000 kg aproximadamente e espessuras comerciais selecionadas dos tampos, cilindros maior e menor de 50 mm, 45 mm e 33,5 mm respectivamente.

6. CONCLUSÃO

Os objetivos do trabalho foram concluídos de forma integral: através do mapeamento das condições de serviço e das diretrizes do código ASME, Seção VIII, o estudo inicial para o projeto de um equipamento subaquático funcional e capaz de resistir às cargas atuantes em sinos e câmaras de resgate foi desenvolvido. Os dois conceitos apresentaram diferenças durante a concepção do projeto, a mais significativa é a superioridade das espessuras necessárias à construção de uma câmara de resgate em relação ao sino de mergulho. O projeto utilizou grandes coeficientes de segurança nos cálculos. A aplicação de uma teoria de resistência menos conservadora e sobreespessuras menores são possíveis soluções para a redução de material. Como forma de dar continuidade ao projeto, os detalhes de soldas e reforços têm importância considerável, assim como a realização de testes hidrostáticos. Além disso, a fim de sanar a limitação do equipamento em altas correntes e grandes ângulos, sugere-se otimizar o sistema de acoplamento da câmara com o submarino.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASME Boiler and Pressure Vessels Code, Section VIII, Division 1 - **Rules for Construction of Pressure Vessels**, 2004.

ASME Boiler and Pressure Vessels Code, Section VIII, Division 2 – **Alternative Rules**, 2004.

BBC News – **Quais são os países com as maiores reservas de petróleo e por que isso não é sempre um sinal de riqueza**. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/internacional-47795371>> Acessado em 09/10/2019.

BMIIL. **Calandragem de Chapas**. Disponível em: <<https://www.bmiil.com.br>> Acessado em 12/11/2019.

GRABCAD. **Horizontal Manhole Davit**. Disponível em: <<https://www.grabcad.com/library/>> Acessado em 12/11/2019

GROEHS, Ademar G. **Resistência dos Materiais e Vasos de Pressão**. 2ª ed. Editora Unisinos. São Leopoldo, 2014.

HÁBORÚ MÚVÉSZETE. **USS Squalus**. Disponível em: <<https://www.haborumuveszete.hu/minden-ami-uszik/uss-squalus-uszo-halalcsapda>>

JAWAD Maan H., FARR James R. **Structural Analysis and Design of Process Equipment**. 1984.

JFD. **Modular Saturation Systems**. Disponível em: <<https://www.jfdglobal.com>> Acessado em 16/11/2019.

JIN ZHOU HEAD. **Equipment**. Disponível em: <<https://www.jzinspiring.com/EQUIPMENT/>> Acessado em 08/12/2019.

LAPENNA Joshua J. **Surfacing Rescue Container Concept Design for Trident Submarines**. Naval Engineers Journal, 2010.

MAAS P. **The Terrible Hours**. Editora Harper Perennial. 2001.

Marinha do Brasil. **O PROBUB**. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/node/813>> Acessado em 07/08/2019.

MIKES A., MIDGAL A. **Learning from the Kursk submarine rescue failure: The case of pluralistic risk management**. Harvard Business School, 2014.

NBR-13: **Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações**. 2015

PETROBRAS N-253. **Projeto de Vasos de Pressão**, 1ª Emenda, 2014.

PILLAI J., POINTS M. **How much would sealevel rise only due to expansion of the water from heat by the warming up the oceans with two degrees.** 2016.

ROSS Carl T.F., WHITTAKER T. & LITTLE Andrew P.F. Little. **Design of Submarine Pressure Hulls to Withstand Buckling Under External Hydrostatic Prssure.** Conference Paper, 2010.

SMART M. **Into the Lion's Mounth: The Story of the Wildrake Diving Accident,** 2011.

SMP. **Commercial Diving.** Disponível em: <<https://www.smp-ltd.com/our-markets/commercial-diving/>> Acessado em 03/10/2019.

STILL G. Keith. **Crowd Safety and Risk Analysis,** 2019. Disponível em: <<https://www.gkstill.com>> Acessado em 09/12/2019.

TELLES, Pedro C. Silva. **Vasos de Pressão.** 1ª ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora. Rio de Janeiro, 1990.

U.S. Navy. **NH 97291 McCann Rescue Chamber.** Disponível em: <<https://history.navy.mil/>> Acessado em 08/12/2019.

ANEXO

Tabela I – Principais especificações de aço-carbono ASTM.

Formas de Apresentação	Aços de baixo carbono	Aços de médio carbono (não acalmados)	Aços de médio carbono acalmados (temperaturas altas)	Aços de médio carbono acalmados (baixas temperaturas)	Aços de qualidade estrutural
Chapas grossas	A-285 Gr A	A-285 Gr B, C	A-515 Gr 55, 60, 65 e 70	A-516 Gr 55, 60, 65, 70	A-283 Gr C
Chapas finas					A-570 Gr C
Tubos de condução (sem costura)	A-106 Gr A (com Si)		A-106 Gr B, C (com Si)		
Tubos de condução (com ou sem costura)	A-53 Gr A API-5L Gr A	A-53 Gr B API-5L Gr B		A-333 Gr 6	A-120
Tubos de condução (solda por eletrodo)	A-139 Gr A	A-134 A-139 Gr B A-671(285 B)	A-672 (515 e 516)	A-671 (516)	
Tubos de condução (solda por resistência elétrica)	A-135				
Tubos para permutadores	A-179 (s/costura) A-214 (solda por resistência elétrica)			A-334 Gr 6	
Tubos para caldeiras	A-178		A-210 A-192		
Peças forjadas		A-181	A-105	A-350 Gr LF1	
Peças fundidas		A-216 Gr WCB		A-352 Gr LCB	
Acessórios de tubulação	A-234 Gr WPA	A-234 Gr WPB		A-420 Gr WP6	

Fonte: Telles, 1990.

Tabelas II – Tensões admissíveis em 10^6 Pa em função da temperatura.

Aço	Gr.	-28,9°C 343,3°C	371°C	399°C	427°C	457°C	482,2°C	510°C	538°C
AS-36	---	100	---	---	---	---	---	---	---
AS-283	A	78	---	---	---	---	---	---	---
	B	86	---	---	---	---	---	---	---
	C	95	---	---	---	---	---	---	---
	D	103	---	---	---	---	---	---	---
AS-285	A	78	76	71	62	54	45	---	---
	B	86	83	77	66	56	45	---	---
	C	95	92	83	70	58	45	---	---
AS-414	A	78	76	71	62	54	45	---	---
	B	86	83	77	66	56	45	---	---
	C	95	92	83	70	58	45	---	---
	D	103	99	89	79	59	45	---	---
	E	112	107	95	79	61	45	---	---
AS-515	F	120	114	101	83	63	45	---	---
	G	130	122	108	87	66	45	---	---
	55*	95	92	83	70	58	45	31	17
	60	103	99	90	74	60	45	31	17
	65	112	107	96	79	62	45	31	17
	70	121	114	102	83	64	45	31	17
	AS-516	55	95	92	83	70	58	45	31
AS-516	60	103	99	90	74	60	45	31	17
	65	112	107	96	79	62	45	31	17
	70	121	114	102	83	64	45	31	17

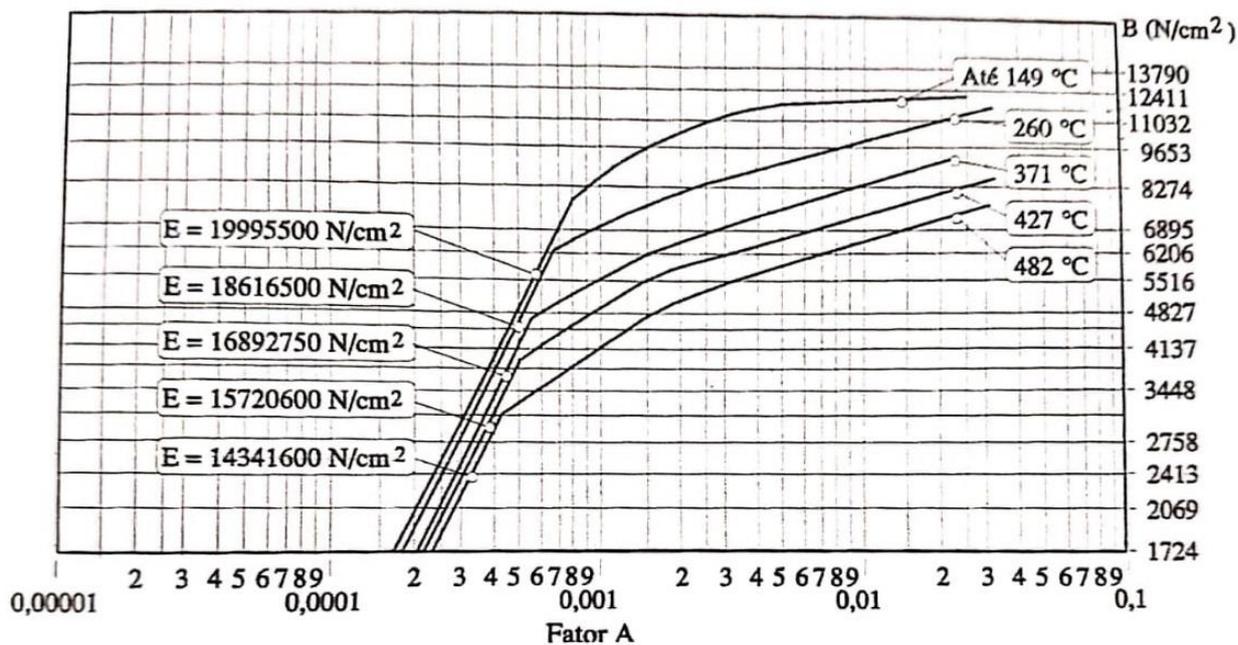
Fonte: Groehs, 2014.

Tabela III – Espessuras de chapas grossas pela a norma N-EB-35.

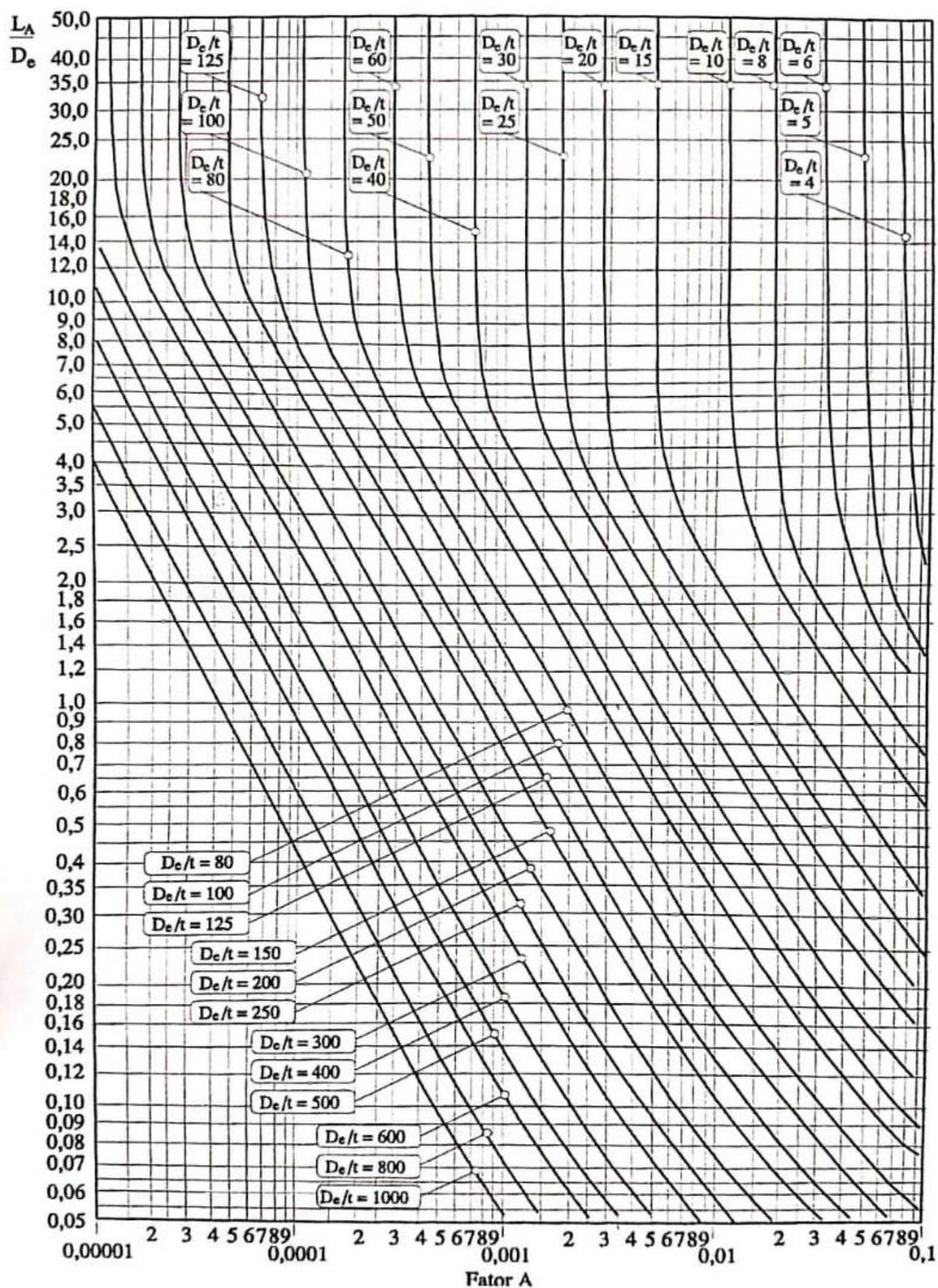
Espessura (mm)	Peso (kg/m ²)	Espessura (mm)	Peso (kg/m ²)	Espessura (mm)	Peso (kg/m ²)
5,3	41,55	15,0	117,60	42,5	333,20
5,6	43,90	16,0	125,44	45,0	352,80
6,0	47,04	17,0	133,28	47,5	372,40
6,3	49,39	18,0	141,12	50,0	392,00
6,7	52,59	19,0	148,96	53,0	415,52
7,1	55,66	20,0	156,80	56,0	439,04
7,5	58,80	21,2	166,21	60,0	470,40
8,0	62,72	22,4	175,62	63,0	493,92
8,5	66,64	23,6	185,02	67,0	525,28
9,0	70,56	25,0	196,00	71,0	556,64
9,5	74,48	26,5	207,76	75,0	558,00
10,0	78,40	28,0	219,52	80,0	627,20
10,6	83,10	30,0	235,20	85,0	666,40
11,2	87,81	31,5	246,96	90,0	705,60
11,8	92,51	33,5	262,64	95,0	744,80
12,5	98,00	35,5	278,32	100,0	784,00
13,2	103,49	37,5	294,00		
14,0	109,76	40,0	313,60		

Fonte: Telles,1990.

Figura I – Gráfico tipo CS-2 para obtenção do fator B.



Fonte: Grochs, 2014.

Figura II – Obtenção do fator A em função (L_A/D_e) e (D_e/t).

Fonte: Groehs, 2014.