



## **PROJETO DE GRADUAÇÃO**

# **SINO DE MERGULHO FLEXÍVEL PARA USO EM ÁGUA DOCE: CONCEPÇÃO E PROJETO**

Por,  
**Bráulio Almeida de Sousa**

**Brasília, 21 de fevereiro de 2015**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**SINO DE MERGULHO FLEXÍVEL PARA USO EM  
ÁGUA DOCE: CONCEPÇÃO E PROJETO**

POR,

**Bráulio Almeida de Sousa**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Mecânico.

**Banca Examinadora**

Prof. João Manoel Dias Pimenta, UnB/ ENM  
(Orientador)

---

Prof. Milton Luiz Siqueira, UnB/ ENM

---

Prof. Guilherme Caribe de Carvalho, UnB/ ENM

---

Brasília, 21 de fevereiro de 2015

### **Dedicatória**

*Este trabalho é dedicado a Vanessa Dayane Soares, que me foi grande fonte de força e inspiração na caminhada acadêmica e agora me acompanha no outro plano da vida.*

*Bráulio Almeida de Sousa*

## **Agradecimentos**

*Agradeço aos meus pais Antônio Ovídio e Lindacy Lopes pela compreensão, carinho e apoio em todos os momentos e a todos os que, de alguma forma, contribuíram para minha conclusão do curso de Engenharia Mecânica.*

*Agradeço, ainda, aos meus amigos Alessandra Bastos, Daniel Albuquerque e família, Leonardo Ruszczyk e família, ao professor orientador João Pimenta, aos técnicos do Laboratório de Engenharia da Madeira, do Departamento de Engenharia Ambiental, à minha companheira Tábata Laurice e ao meu tio Edson Sousa, por suas contribuições ao fundamentais no decorrer deste trabalho e ao longo de toda a minha graduação.*

*Bráulio Almeida de Sousa*



---

## RESUMO

Este trabalho é o projeto de construção do sino de mergulho flexível para dois mergulhadores em profundidades de até 40 metros com o mínimo custo financeiro possível, flexível e portátil. Os materiais utilizados possuem também a vantagem de serem sustentáveis, por serem facilmente recicláveis, não agredindo o meio ambiente. É apresentada uma revisão bibliográfica ilustrando o uso desse tipo de dispositivo e sua evolução ao longo dos anos. A partir da fundamentação teórica, é feita a proposta inicial para a geometria do sino de mergulho. São realizados ensaios de tração nos tipos de materiais disponíveis para a fabricação, bem como nas emendas que serão necessárias na construção do sino de mergulho. É prevista uma válvula para troca do ar no interior do sino de mergulho. Ao final do trabalho, são apresentadas recomendações para uma eventual implementação futura, em outro trabalho, do dispositivo projetado.

---

## ABSTRACT

This work presents the construction project of a diving bell for two divers at depths of up to 40 meters flexible, portable and with a reduced financial cost. The materials also have the advantage of being more sustainable, because they are easily recyclable, with low environmental impact. The literature review done illustrates the use of this device and its evolution over the years. From this theory basis, it was built the proposal of the geometry of the diving bell. Tensile tests were performed on the types of materials available for manufacturing as well as the amendments that will be required in its construction. And finally, it's presented all the steps should be followed in a future project for implementation of the designed device.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	TEMA EM ESTUDO	11
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
1.2.1	CONSHELF	13
1.2.2	SEALAB	15
1.2.3	TEKTITE	16
1.2.4	SINOS DE MERGULHO	18
1.3	OBJETIVOS	19
1.4	METODOLOGIA	19
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>21</b>
2.1	MEMBRANAS E TENSOESTRUTURAS	21
2.2	VASOS DE PRESSÃO	24
2.3	TEORIA DE VON MISES PARA FALHA ESTÁTICA	26
2.4	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	28
2.4.1	Método Analítico	28
2.4.2	Método dos Elementos Finitos	29
<b>3</b>	<b>PROJETO PRELIMINAR</b>	<b>32</b>
3.1	REQUISITOS DE PROJETO	32
3.2	DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA	32
3.3	PRÉ-SELEÇÃO DE MATERIAIS	36
3.4	DIMENSIONAMENTO	36
3.4.1	Cintas de ligação	36
3.4.2	Elementos metálicos	37
<b>4</b>	<b>DEFINIÇÕES CONSTRUTIVAS</b>	<b>45</b>
4.1	INTRODUÇÃO	45
4.2	MATERIAIS	45
4.3	ENSAIOS DE TRAÇÃO	46
4.3.1	Requisitos da ASTM D882	47
4.3.2	Ensaio	48
4.4	ENSAIO DAS EMENDAS	51
4.5	PLANO DE CORTE	53
4.6	TABELA DE CUSTOS	55
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E CONCLUSÃO</b>	<b>56</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	<b>57</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>58</b>

# LISTA DE FIGURAS

1.1	Instalação da CONSHELF I .....	13
1.2	CONSHELF II.....	14
1.3	CONSHELF III .....	14
1.4	Situação atual da habitação CONSHELF II.....	15
1.5	Habitções SEALAB .....	16
1.6	Maquete da habitação TEKTITE .....	17
1.7	Pintura do século XIII ilustrando o uso de um sino de mergulho .....	18
2.1	Centro Comunitário da UnB.....	21
2.2	Malha estrutural com revestimento. ....	22
2.3	Exemplos de emendas nas membranas. ....	23
2.4	Determinação dos padrões de corte. ....	23
2.5	Tensões de tração $\sigma$ na parede de um vaso esférico.....	24
2.6	Vaso de pressão cilíndrico.....	26
2.7	Critério de Von Mises para falha estática.....	27
2.8	Resolução de viga bi-apoiada pelo método analítico. ....	28
2.9	Deslocamento de um elemento de mola .....	30
2.10	Graus de liberdade de uma viga .....	30
2.11	Elemento sólido linear (a) e parabólico (b).....	31
3.1	Sino de mergulho flexível da equipe de televisão NatGeo .....	33
3.2	Esboço da estrutura .....	34
3.3	Detalhe do anel de entrada mostrando a alça e a tira .....	34
3.4	Detalhe da plataforma.....	35
3.5	Vista normal e em corte do esboço inicial .....	35
3.6	Resultado do ensaio da Tensão Máxima Equivalente de Von-Mises para a plataforma de acesso .....	37
3.7	Resultado do ensaio de deformação para a plataforma de acesso .....	38
3.8	Resultado do ensaio de deslocamento para a plataforma de acesso.....	38
3.9	Resultado do fator de segurança calculado para a plataforma de acesso .....	39
3.10	Resultado do ensaio da Tensão Máxima Equivalente de Von-Mises para o anel de entrada .....	40
3.11	Resultado do ensaio de deformação para o anel de entrada .....	40
3.12	Resultado do ensaio de deslocamento para o anel de entrada .....	41
3.13	Resultado do fator de segurança calculado para o anel de entrada .....	41
3.14	Resultado do ensaio da Tensão Máxima Equivalente de Von Mises para a alça .....	42
3.15	Resultado do ensaio de deformação para a alça.....	43
3.16	Resultado do ensaio de deslocamento para a alça.....	43
3.17	Resultado do fator de segurança calculado para a alça .....	44
4.1	Materiais selecionados. PVC transparente trançado (a), lona emborrachada (b) e vinil-toldo (c) .....	46
4.2	Corpos de prova .....	48
4.3	Ensaio de tração para determinar da tensão do material B na direção do urdume ..	49
4.4	Emenda do tipo sanduíche (a) e do tipo sobreposta (b) .....	51
4.5	Corpo de prova para ensaio das emendas.....	52
4.6	Aparato para ensaio de tração das emendas .....	52
4.7	Corpo de prova rompido do tipo sanduíche com 3 centímetros de comprimento de emenda.....	53
4.8	Matriz, em escala, do sino de mergulho.....	54
4.9	Papel cartão aberto.....	54

# LISTA DE TABELAS

3.1	Propriedades mecânicas do aço AISI 304.....	37
3.2	Resultados da simulação para a plataforma de apoio .....	39
3.3	Resultados da simulação para o anel de entrada .....	42
3.4	Resultados da simulação para a alça .....	44
4.1	Preços dos materiais .....	46
4.2	Propriedades mecânicas dos materiais.....	50
4.3	Dimensionamento da largura das tiras .....	50
4.4	Tabela de custos.....	55

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$m$	Massa	[kg]
$V$	Volume	[m <sup>3</sup> ]
$F$	Força	[N]
$S$	Resistência	[MPa]
$E$	Módulo de elasticidade	[GPa]
$M$	Momento	[Nm]
$K$	Constante de mola	[N/m]
$x$	Deslocamento ou deformação	[m]
$A$	Área	[m <sup>2</sup> ]
$p$	Pressão	[Pa]
$g$	Aceleração gravitacional	[m/s <sup>2</sup> ]
$h$	Altura ou elevação	[m]
$\{f\}$	Vetor força	
$[k]$	Matriz rigidez	
$\{u\}$	Vetor deslocamentos	

## Símbolos Gregos

$\rho$	Densidade	[m <sup>3</sup> /kg]
$\nu$	Coefficiente de Poisson	
$\Delta$	Variação entre duas grandezas similares	
$\sigma$	Tensão	[Pa]
$\sigma'$	Tensão equivalente de Von Mises	[Pa]
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensões principais	[Pa]
$\theta$	Inclinação	[°]

## Subscritos

0	Inicial
c	Compressão
c2	Segundo conjunto de cintas
t	Tração
e	Empuxo
d	Deslocado
ut	Última à tração
y	Escoamento

## **Siglas**

CONSHELF	Continental Shelf Station
ALB	Air Lift Bag
MEF	Método dos Elementos Finitos
SI	Sistema Internacional
PVC	Policloreto de vinila
PTFE	Politetrafluoretileno
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 TEMA EM ESTUDO

Os trabalhos de exploração subaquática têm tido avanços significativos nas últimas décadas. Grande parte desse desenvolvimento é devido à evolução tecnológica dos equipamentos utilizados pelos mergulhadores, que tem permitido tempos de mergulho cada vez maiores, bem como aumentado o nível de profundidade alcançado nas expedições ao fundo do mar.

O avanço tecnológico desses equipamentos, porém, não é capaz de compensar as limitações do organismo humano quando submetido a altas pressões em grandes profundidades por longos períodos de tempo em temperaturas frequentemente baixas.

Com o intuito de permitir trabalhos de exploração submarina mais longos, nos quais o tempo necessário de observação excede a capacidade humana de se expor a essas condições adversas de temperatura e pressão, foram criadas habitações submersas, fixadas ao fundo dos mares. Tais habitações consistem, fundamentalmente, de uma ou mais estruturas cilíndricas rígidas dentro das quais é possível manter as condições necessárias à permanência e ao desenvolvimento das pesquisas e trabalhos de exploração.

As primeiras habitações submersas datam do início da década de 1960 e foram desenvolvidas, tanto por instituições privadas, quanto por iniciativas governamentais. De acordo com o modo de operação, elas são classificadas de duas formas:

- Abertas à pressão ambiente; ou
- Fechadas ao ambiente externo.

Nas habitações do primeiro tipo, o ambiente interno, apesar de seco, está sob a mesma pressão do ambiente externo. Devido a esta equalização de pressões, a transição do mergulhador entre o ambiente seco e o ambiente molhado pode ser feita sem a necessidade da descompressão, fenômeno que o mergulhador experimenta ao regressar à superfície e que pode provocar graves acidentes quando o regresso ocorre rapidamente. O mesmo não ocorre em habitações do segundo tipo, fechadas ao ambiente externo, uma vez que a pressão do ar no interior da habitação é da mesma ordem da pressão atmosférica ao nível do mar e, na passagem do ambiente externo para o interno, existe uma câmara onde é realizado o processo de descompressão, permitindo assim que a transição entre os dois ambientes seja feita de forma a minimizar os efeitos da variação de pressão.

As habitações submersas tiveram seu auge entre as décadas de 1960 e 70, quando foram sendo, aos poucos, tiradas de operação devido à redução no financiamento para pesquisas. Algumas foram abandonadas, enquanto outras foram convertidas em locais de visitação com fim de entretenimento.

Paralelamente à redução progressiva do investimento em habitações submersas, houve a evolução tecnológica dos equipamentos de mergulho. Entre eles podemos citar os *rebreathers*, que possibilitam

ao mergulhador respirar novamente o gás expirado após ter passado por um processo de reciclagem. O aumento do uso de dispositivos como este representou uma expansão de possibilidades de tempo e profundidades alcançadas. Além da evolução dos componentes individuais, houve um investimento em habitações mais compactas e menos onerosas que permitissem, se não a permanência por longos períodos de tempo, pelo menos a possibilidade de mergulhadores e pesquisadores poderem conversar enquanto submersos. Essas novas habitações trouxeram a possibilidade de uma atividade menos cansativa, já que permitem uma diminuição do desconforto durante a permanência em grandes profundidades. Estavam, assim, ampliadas sobremaneira as possibilidades de exploração dos fundos dos mares.

## 1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Seja para buscar recursos naturais ou para estudar e descobrir novas espécies de vida animal e vegetal, a necessidade humana inerente de desbravar tem levado o homem a explorar os ambientes naturais desde a antiguidade. Os registros da pré-história vão das primeiras cartas náuticas traçadas no início da Idade Moderna até as viagens espaciais tripuladas da atualidade. Eles demonstram como essa necessidade de desbravar e explorar localidades até então desconhecidas é uma característica intrínseca ao ser humano.

Entre todos os ambientes naturais, um dos que causam maior curiosidade e fascínio é o ambiente subaquático. A variedade de espécies de vida vegetal e animal, bem como a possibilidade de explorações de recursos naturais como petróleo e minérios, justificam esse interesse pelo fundo dos oceanos e mares. Em contrapartida, ambientes naturais como este são os que mais oferecem resistência à exploração. As condições climáticas adversas à permanência e locomoção humana tendem a limitar o acesso de pesquisadores, cientistas e exploradores, mantendo parte da riqueza ainda oculta.

As primeiras explorações submarinas tinham como objetivo a confecção de cartas náuticas e estavam, em geral, limitadas à superfície. De acordo com os pesquisadores britânicos Tina Bishop, Peter Tuddenham e Melissa Ryan, o marco iniciador da exploração marinha se deu entre 1872 e 1876, com a expedição batizada de *Challenger Expedition*. Considerada a primeira expedição oceanográfica, foi liderada por Charles Thompson e John Murray a pedido do governo britânico. Eles adaptaram, a um navio já existente (*Royal Navy*), laboratórios e todo o aparato científico necessários às medições e análises que seriam feitas. Após quatro anos de expedição, a equipe do Royal Navy contava com 70 mil milhas náuticas (130 mil quilômetros) navegadas ao longo de todo o globo, 492 sondagens, 133 conjuntos de material de fundo colhido, 151 arrastos de rede em alto mar e 263 medições de temperatura da água em diferentes profundidades (WEYL, 1970).

As pesquisas não se limitaram aos trabalhos na superfície. Juntamente com o crescimento das primeiras expedições, houve o avanço dos equipamentos de mergulho e a concepção de novos dispositivos que permitiram ao homem submergir com mais segurança e praticidade.



O primeiro equipamento de mergulho baseado em ar comprimido foi concebido por Fréminet, em 1771, em Paris (PERRIER, 2008). Alguns anos mais tarde, já no século XIX, outro avanço significativo foi obtido entre os equipamentos de mergulho: a invenção do *rebreather*, permitindo a reciclagem do ar respirado pelo mergulhador. A primeira configuração comercial desse tipo de equipamento surgiu em 1878, pelas mãos do engenheiro Henry Fleuss (DENIS, 1955). Ele desenvolveu uma configuração padrão, similar a que é adotada nos dias atuais. Trata-se do regulador, mecanismo que permite a entrega do ar de acordo com sua demanda, sem que o mergulhador seja exposto ao fluxo contínuo de ar sob altas pressões como ocorria anteriormente.

Apesar da criação de novos equipamentos e das tecnologias que estavam sendo criadas, as habitações submersas não perderam sua importância. Mas, somente no século passado, passaram a figurar de fato no meio científico como instrumento de apoio às pesquisas realizadas no fundo dos mares. A seguir é ilustrado um breve histórico dos projetos mais relevantes de habitações submersas:

### 1.2.1 CONSHELF

O projeto *Continental Shelf Station* (CONSHELF) foi um projeto audacioso que teve por objetivo instalar, em até dez anos, cinco estruturas submersas para habitação humana em profundidades de até 300 metros. Idealizado pelo físico militar norte-americano Dr. George Bond e desenvolvido em parceria com o famoso mergulhador e pesquisador francês Jacques Cousteau, projeto CONSHELF encontrou apoio com a indústria petroquímica francesa, que visava à possibilidade de, no futuro, as habitações servirem como bases de apoio à exploração de petróleo no fundo do mar.

A primeira habitação da série, batizada de CONSHELF I, tinha como objetivo abrigar dez mergulhadores por até um mês em uma atmosfera de oxigênio e hélio. A operação se iniciou em 1961 com dois mergulhadores vivendo por uma semana em seu interior, a 11,3 metros de profundidade. A habitação, do tipo aberta à pressão ambiente, tinha formato cilíndrico e foi instalada na ilha de Frioul, na França, próximo à cidade de Marselha. A Figura 1.1 mostra a habitação durante sua instalação.



Figura 1.1. Instalação da CONSHELF I.

Um ano depois foi posta em operação, no mar vermelho, a CONSHELF II, abrigando dessa vez seis mergulhadores a 10 metros de profundidade por um mês. Bem mais completa que a CONSHELF I, tinha um formato de estrela do mar, como mostra a Figura 1.2, e possuía ainda duas outras estruturas: uma espécie de submarino e uma segunda cabine, menor, capaz de abrigar dois mergulhadores a uma profundidade maior que a primeira. A CONSHELF II foi muito utilizada para estudar o comportamento dos tubarões. O pequeno submarino permitiu que, pela primeira vez, fossem registradas imagens em vídeo do fundo do mar a profundidades de 300 metros (MILLER, 1995).



Figura 1.2. CONSHELF II.

O CONSHELF III, o mais ousado dos projetos da família CONSHELF, abrigou seis mergulhadores a 102 metros de profundidade por três semanas. Uma plataforma de petróleo simulada foi instalada no fundo do mar, onde os mergulhadores puderam desempenhar diversas tarefas industriais. Essa habitação foi instalada próxima à cidade de Mônaco e era a mais completa da família, sendo totalmente autossuficiente. A

Figura 1.3 mostra um desenho esquemático da habitação.

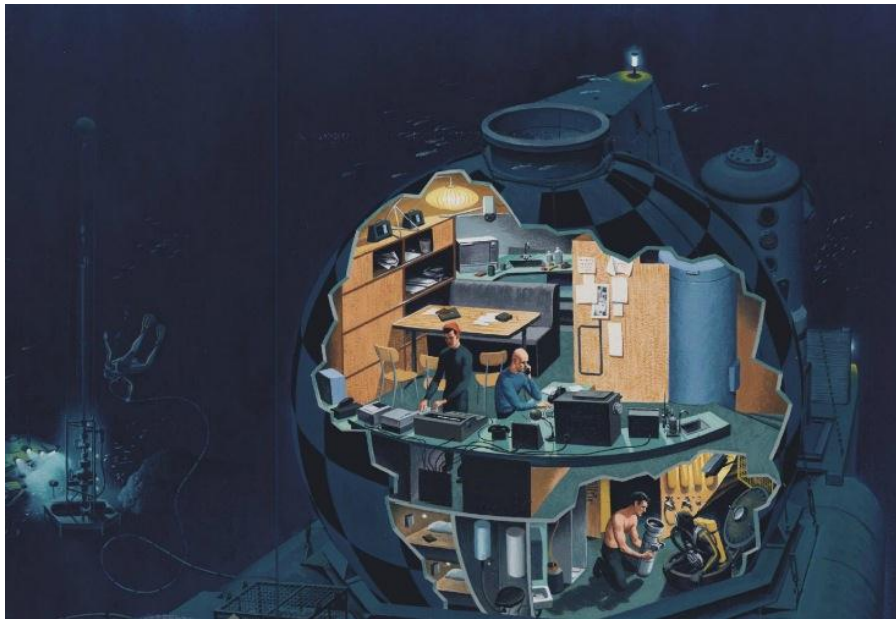


Figura 1.3. CONSHELF III.

O projeto chegou ao fim quando a indústria petroquímica francesa, responsável pelo financiamento do projeto, percebeu que o trabalho desempenhado pelos mergulhadores poderia ser realizado, com uma eficiência igual ou até maior, por robôs. Uma vez que o interesse principal da indústria não era estudar o fundo do mar, mas sim explorá-lo, foi encerrado o financiamento e, assim, chegou ao fim o projeto CONSHELF. A Figura 1.4 ilustra a situação atual da habitação CONSHELF II.



Figura 1.4. Situação atual da habitação CONSHELF II. (Marco Cortesi, 2009).

### 1.2.2 SEALAB

O projeto *Underwater Sea Laboratory* (SEALAB) consistia em uma série de habitações submersas experimentais desenvolvidas pela *United States Navy*, divisão de guerras navais das Forças Armadas dos Estados Unidos, com objetivo de provar a viabilidade, no aspecto fisiológico e psicológico, do mergulho saturado, condição de mergulho presente em profundidades superiores a 300 pés (91,44 m) onde os gases existentes no organismo do mergulhador penetram os tecidos e o sangue e ali permanecem saturados até o fim do processo de descompressão, e da permanência de humanos em ambientes isolados por longos períodos de tempo.

A primeira habitação da família SEALAB foi colocada em operação a 54 metros abaixo da superfície abrigoando quatro mergulhadores em 1964, no território britânico de Bermudas. O



laboratório foi comandado pelo médico George Foote Bond, especialista em conduzir pesquisas na área de mergulho saturado.

Bem mais completo que o primeiro da família, o SEALAB II foi posto em operação em 1965 e contava até com sistema de refrigeração, além de água quente nos chuveiros. Instalado na costa da Califórnia, a 62 metros de profundidade, foi utilizado por equipes que se revezavam a cada 15 dias. Além dos testes normais de resistência física humana a condições adversas de mergulho, no laboratório, foram conduzidos testes de novas ferramentas e de sistemas de aquecimento para os equipamentos de mergulho, bem como treinamentos de resgate. A curiosidade a respeito do SEALAB II fica por conta do método utilizado para o transporte de ferramentas e suprimentos entre a habitação e a superfície: um golfinho foi treinado para essa função. Ele também servia de distração aos mergulhadores, sempre sujeitos a grande carga de estresse dos testes físicos e psicológicos aos quais eram submetidos.

A partir da remodelagem do SEALAB II, surgiu o SEALAB III. Esse laboratório foi adaptado para operar a uma profundidade três vezes maior que seu antecessor e abrigava nove mergulhadores que se revezavam a cada doze dias. O laboratório conduzia, além de testes de novos métodos de resgate, estudos oceanógrafos e sobre a vida marinha. Devido à grande profundidade, para fazer parte da equipe do SEALAB III era necessário passar por um treinamento em uma câmara de pressurização capaz de simular as mesmas condições de pressão encontradas em profundidades de até 312 metros. Em 1969 o laboratório apresentou um vazamento súbito. Quatro mergulhadores foram enviados para tentar realizar o reparo, mas não obtiveram sucesso. Uma segunda equipe foi enviada e um dos mergulhadores acabou falecendo na tentativa de conserto. Após o acidente e também por registros de tentativas de sabotagem do projeto, o SEALAB foi demolido. Aspectos importantes das pesquisas realizadas na habitação continuaram servindo como pontos de partida para novos estudos. Porém, não foram mais instaladas nem construídas novas habitações submersas SEALAB.

A Figura 1.5 mostra as três habitações SEALAB construídas.



Figura 1.5. Habitações SEALAB.

### 1.2.3 TEKTITE

Enquanto o projeto CONSHELF tinha como financiador a indústria petroquímica e o SEALAB apresentava um claro interesse em pesquisas com fins bélicos, pode-se afirmar que o projeto TEKTITE foi o primeiro a utilizar as habitações submersas com o foco totalmente voltado à pesquisa

científica. Financiado pela *General Electric*, a habitação tinha um formato de dois silos de 4 metros de diâmetro por 6 metros de altura, conectados por um túnel flexível e fixados a uma base retangular de 15 metros de comprimento.

Posta em operação em fevereiro de 1969, a primeira missão do projeto TEKTITE entrou para a história quando, em março, quatro de seus mergulhadores estabeleceram um novo recorde de mergulho saturado em grupo: 58 dias vivendo submersos na habitação trabalhando nas pesquisas marinhas. Foram necessárias dezenove horas de descompressão para que a equipe emergisse até a superfície. As pesquisas realizadas pelo projeto estavam centradas nas reações humanas a essas condições de vivência.

O segundo projeto, TEKTITE II, foi colocado em prática em 1970 e teve parte do seu financiamento feito pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), que estava interessada em estudos do efeito psicológico em uma equipe de cientistas vivendo em ambientes fechados e isolados, semelhante ao que encontram em estações espaciais. Ao todo foram 10 missões, durando entre 10 e 20 dias cada, realizadas pelo TEKTITE II, sendo uma delas composta exclusivamente por mulheres. Os resultados dos estudos do TEKTITE I foram utilizados no planejamento das missões do TEKTITE II. Os resultados do projeto foram compilados em uma série de relatórios que traziam resultados dos experimentos e pesquisas realizadas durante o projeto.

Finalizadas as missões, o TEKTITE foi vendido pela GE pelo preço simbólico de um dólar a uma organização sem fins lucrativos que tinha por objetivo utilizá-lo futuramente para fins acadêmicos. Após algumas tentativas de recolocá-lo em operação, a organização decidiu pela desmontagem e reciclagem do aço. A Figura 1.6 mostra uma maquete do TEKTITE.

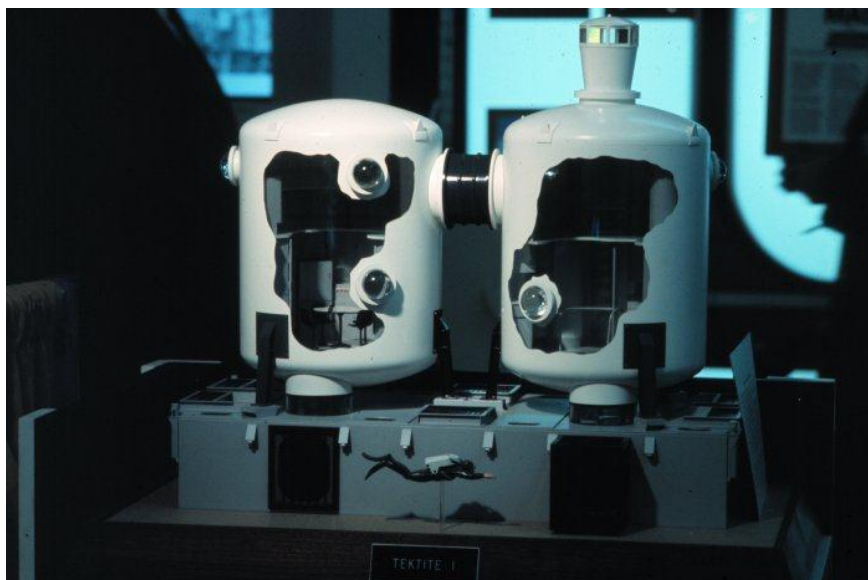


Figura 1.6. Maquete da habitação TEKTITE.

## 1.2.4 SINOS DE MERGULHO

Uma solução alternativa às habitações submersas são os chamados sinos de mergulho. Em sua concepção, os sinos de mergulho são similares às habitações submersas do tipo abertas à pressão ambiente. A vantagem é que são bem mais baratos e portáteis. A desvantagem é não oferecerem as mesmas possibilidades de permanência em seu interior por longos períodos de tempo.

Não há uma data precisa que marque o início da utilização desses bolsões de ar para fins de exploração da vida marinha. Segundo o fisiologista britânico Dr. John Bevan, a pintura francesa retratada na Figura 1.7 é o primeiro registro que se tem notícia do uso desse equipamento para exploração marinha. Nela está representado o monarca Alexandre, o Grande, que viveu no século IV a.C. na Macedônia.

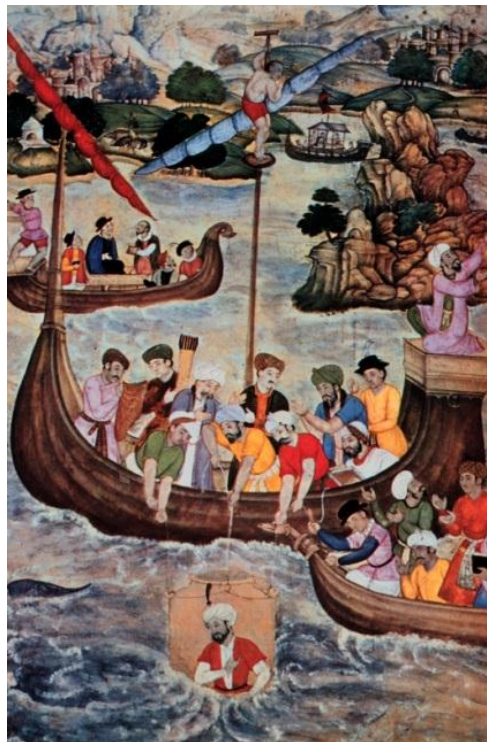


Figura 1.7. Pintura do século XIII ilustrando o uso de um sino de mergulho.

Sendo um dos primeiros equipamentos utilizados pelo homem para exploração submarina, os sinos de mergulho começaram a ser aprimorados de fato a partir do século XVII, quando o engenheiro John Smeaton pôs em prática a ideia dada cem anos antes pelo físico e inventor francês Denis Papin, de que seria possível manter o suprimento de ar fresco no interior do sino a partir do uso de compressores instalados na superfície.

Há dois tipos de sinos de mergulho: os sinos de mergulho do tipo seco e do tipo úmido. Os sinos de mergulho do tipo seco são muito similares a um vaso de pressão com uma abertura em sua extremidade inferior por onde os mergulhadores podem entrar e sair do sino. Os sinos do tipo úmido são basicamente gaiolas de proteção içadas ao ambiente submerso a partir de um barco na superfície, o qual é também o responsável por suprir o ar utilizado pelos mergulhadores no interior do sino, por meio de mangueiras. Os sinos de mergulho do tipo úmido são muito utilizados quando o ambiente a

ser explorado envolve algum risco aos mergulhadores, como por exemplo o trabalho de observação da vida de tubarões.

### **1.3 OBJETIVOS**

O projeto tem por objetivo geral contribuir com os trabalhos de pesquisa científica dos fundos de mares, rios e lagos através do desenvolvimento de um equipamento acessível no aspecto financeiro e de portabilidade que atue como uma ferramenta de apoio aos pesquisadores.

Como objetivo específico, o trabalho visa ao desenvolvimento do projeto de um sino de mergulho capaz de abrigar dois mergulhadores fornecendo-lhes o mínimo necessário em termos de segurança e conforto a fim de que possam respirar sem o auxílio do regulador e se comunicar verbalmente em seu interior.

O objetivo final do trabalho é fazer todo o levantamento bibliográfico e de fundamentação teórica e fornecer todo o projeto executivo para fabricação e instalação do sino de mergulho no Lago Paranoá.

### **1.4 METODOLOGIA**

Para atingir os objetivos propostos, diferentes etapas de trabalho foram estabelecidas. A primeira etapa consiste no estudo de toda a fundamentação teórica necessária à redação da revisão bibliográfica para fundamentar o desenvolvimento do projeto. Além da revisão bibliográfica, uma revisão da teoria envolvendo os conceitos utilizados no dimensionamento da estrutura se fará necessária.

Feita toda a fundamentação teórica, parte-se a definição dos requisitos de projeto, que irão ditar as exigências a serem cumpridas pelo sino de mergulho que será projetado. Os requisitos de projeto servirão para nortear todo o desenvolvimento do trabalho, pois são eles que definem de fato qual resultado se deseja atingir ao final do projeto.

Definidos os requisitos de projeto, pode-se então partir para um esboço da geometria inicial. Por ser ainda uma etapa inicial do projeto, esta geometria será utilizada em um processo iterativo até que se obtenha o projeto detalhado, abrangendo todos os detalhes construtivos necessários à fabricação do equipamento.

Uma pré-seleção dos materiais passíveis de utilização é feita com objetivo de confrontá-los quanto às suas propriedades de resistência, corrosão, flexibilidade e custos.

Com a geometria adotada no esboço inicial, parte-se para o dimensionamento preliminar, no qual são selecionados e dimensionados os primeiros componentes do equipamento. Para esse dimensionamento prévio, são utilizados, tanto cálculos analíticos, quanto simulações computacionais, utilizando *softwares* de elementos finitos para o cálculo das tensões máximas, deformações e fatores de segurança.

Serão consultados fabricantes de tensoestruturas em busca de apoio para o projeto. Este contato com os fabricantes visa, ainda, um trabalho de engenharia reversa com objetivo de detalhar o processo de fabricação da lona com vistas à confecção dos desenhos de fabricação no projeto de detalhamento.

Por fim, serão definidos os aspectos construtivos e os detalhes construtivos por meio dos desenhos de fabricação.

## **1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO**

O Capítulo 1 traz um breve histórico do uso de habitações submersas para fins de pesquisa e exploração submarinas, mostrando a importância que tais equipamentos desempenham nas pesquisas científicas nos fundos dos mares.

No Capítulo 2 é feita uma revisão dos conceitos teóricos necessários para o dimensionamento dos componentes do sino de mergulho.

O Capítulo 3 é dedicado ao projeto preliminar. Este capítulo inicia com a definição dos requisitos de projeto, a partir dos quais é definida a geometria inicial e detalha, com a fundamentação teórica apresentada na revisão bibliográfica, os cálculos utilizados no dimensionamento do anel que dará forma à geometria adotada, da plataforma intermediária e da seleção das cintas utilizadas. O Capítulo 3 traz ainda os resultados obtidos pelo software de método dos elementos finitos utilizado quanto ao dimensionamento dos componentes do sino de mergulho.

Por fim, o Capítulo 4 apresenta o resultado dos ensaios realizados nos materiais selecionados e nas suas emendas.

O Capítulo 5 é dedicado à conclusão e apresentação dos resultados alcançados no presente Projeto de Graduação.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 MEMBRANAS E TENSOESTRUTURAS

Tensoestruturas são coberturas tensionadas constituídas por membranas nas quais atuam esforços apenas de tração. Devido à similaridade dos materiais utilizados nessas estruturas, bem como os esforços aos quais eles estão submetidos, com o sino de mergulho, faz-se necessária uma breve explicação sobre os principais aspectos deste tipo de estrutura.

As tensoestruturas são largamente utilizadas em projetos civis e arquitetônicos tanto em estruturas permanentes como coberturas de aeroportos e estádios, quanto em estruturas temporárias, como cobertura de palcos e eventos. Elas podem ser de três tipos: estruturas tensionadas de membrana, estruturas tensionadas de malha e estruturas pneumáticas. As que guardam mais semelhança com o sino de mergulho são as estruturas tensionadas de membrana.

Nas estruturas tensionadas de membrana, o próprio elemento da membrana auxilia na aplicação da tração e age simultaneamente como estrutura e cobertura. A Figura 2.1 ilustra um exemplo deste tipo de cobertura.



Figura 2.1. Centro Comunitário da UnB. (Acervo pessoal)

O tecido utilizado em tensoestruturas possui dois componentes principais: a malha estrutural, responsável pela resistência mecânica atribuída ao tecido, e o revestimento, também chamado de matriz, que confere propriedades adicionais de impermeabilidade e brilho. Os principais materiais utilizados para as malhas estruturais são a fibra de vidro, o poliéster, o kevlar, a fibra de carbono ou o nylon. Já para o revestimento os materiais mais utilizados são o cloreto polivinílico (PVC), o politetrafluoretileno (PTFE), o teflon (PVDF) e o silicone (SHAEFFER, 1996). Os fios que compõem a malha estrutural são dispostos ao longo do tecido de forma sobreposta ou tramados e podem ser ou não pré-tracionadas antes de receber o material do revestimento. O pré-tracionamento anterior lhes

confere um módulo de deformação mais alto e um menor valor de alongamento percentual. A Figura 2.2 mostra a disposição de cada elemento do tecido.

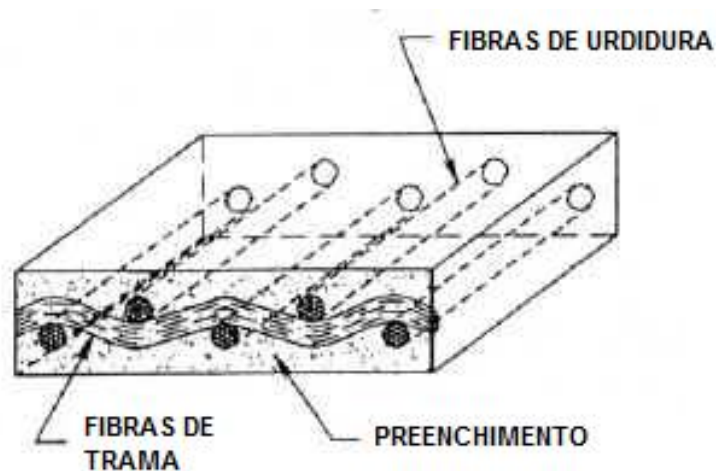


Figura 2.2. Malha estrutural com revestimento. (SHEFFER, 1981)

É possível trançar diferentes materiais estruturais em cada um dos sentidos da malha e, dessa forma, conferir à membrana propriedades não-homogêneas nas duas direções. A possibilidade de se tornar anisotrópico é uma vantagem para esse tipo de material, pois pode-se lançar mão dessa característica quando se desejam diferentes valores de flexibilidade, deformação e resistência à tração ao longo do comprimento do tecido com relação à direção de sua largura.

Atualmente, lonas tramadas de fibra de vidro e de poliéster apresentam, de forma geral, melhor desempenho pelas suas características, sendo, assim, os materiais mais utilizados nas tensoestruturas atuais.

As bordas das membranas são onde os esforços são transferidos do tecido para a estrutura de apoio. Essa transmissão pode se dar por meio de presilhas, ganchos, cabos ou fivelas e é um dos pontos cruciais do projeto, pois é onde podem ocorrer concentrações de tensão por conta de erros na montagem ou mesmo no projeto.

Para formar a membrana, unem-se várias faixas de tecido por meio de costura, solda ou cola. A emenda formada deve transmitir os esforços com o mínimo possível de influência sobre o comportamento global da estrutura. Segundo OLIVEIRA (2003), a resistência desta ligação é influenciada por fatores como a adesão da matriz e a largura da emenda, que varia de 25 a 50 mm para materiais como PVC e de 50 a 75 mm para silicone e PTFE. A Figura 2.3. ilustra um exemplo de emenda colada e costurada.

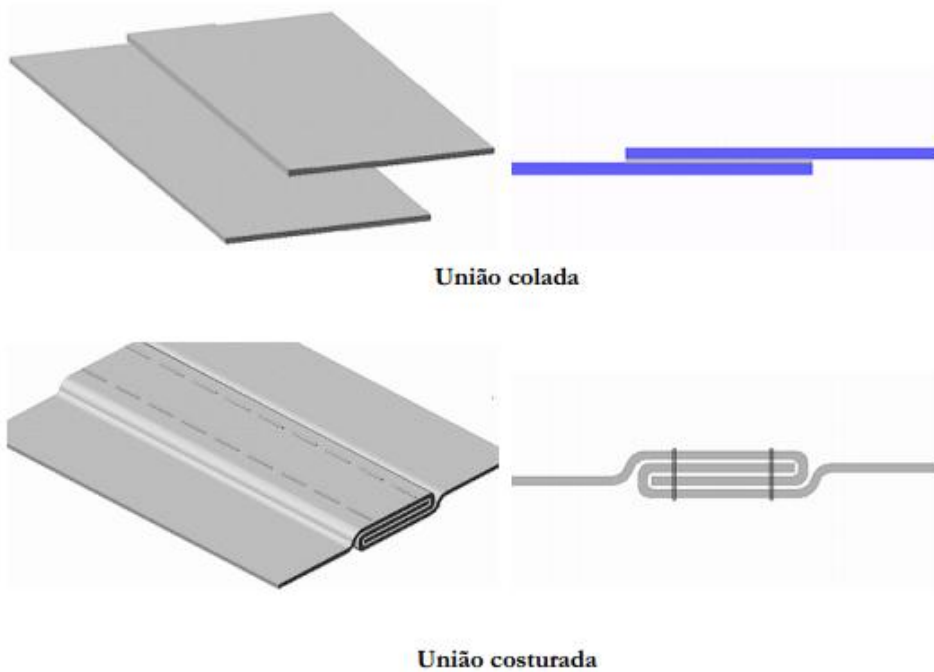


Figura 2.3. Exemplos de emendas nas membranas. (OLIVEIRA, 2003).

A determinação dos padrões de corte (Figura 2.4.) é outro aspecto importante a ser observado na teoria de membranas e tensoestruturas. Estes padrões de corte são a projeção planificada dos vários segmentos de tecido a fim de determinar a forma do corte na membrana plana. Como as estruturas são geralmente formadas por duplas curvaturas, sempre são obtidas formas aproximadas e não exatas. A utilização de modelos físicos, como maquetes em escala, e de métodos computacionais são os mais utilizados para a obtenção dos padrões de corte.

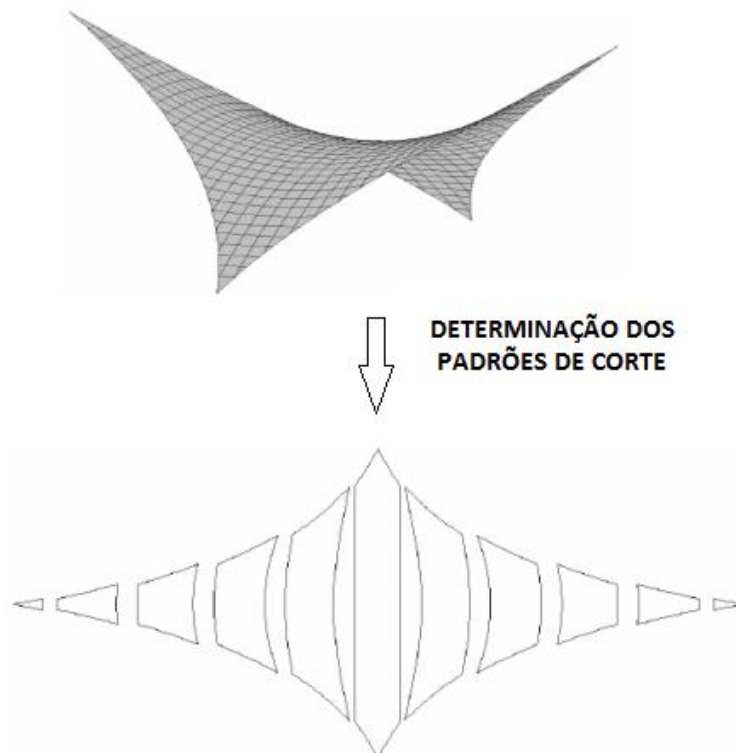


Figura 2.4. Determinação dos padrões de corte.

## 2.2 VASOS DE PRESSÃO

Vasos de pressão são estruturas fechadas contendo líquidos ou gases sob pressão. Apesar de o sino de mergulho não ser uma estrutura fechada, sua forma construtiva resulta em uma configuração cujo funcionamento, no que tange às tensões de membrana, é semelhante ao de um vaso de pressão.

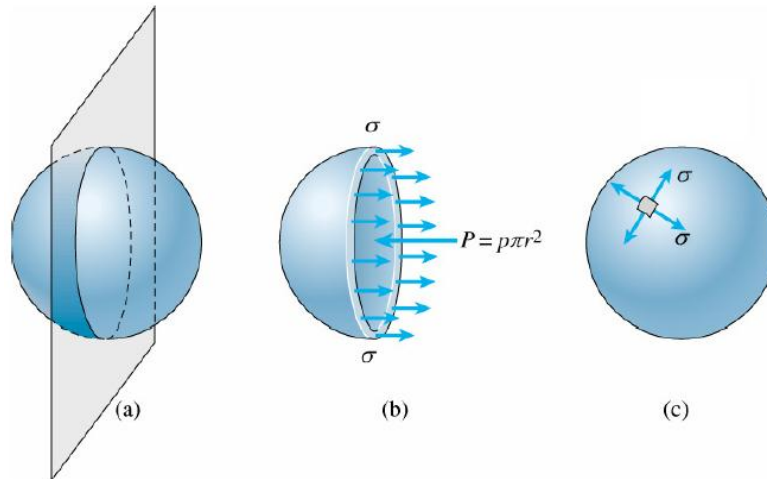


Figura 2.5 – Tensões de tração  $\sigma$  na parede de um vaso esférico. (GERE, 2003)

Seja a esfera da Figura 2.5 um vaso de pressão com raio interno  $r$  e espessura de parede  $t$ , cuja relação  $r/t \geq 10$  se verifica, ou seja, pode ser considerada uma estrutura de casca. Traçando-se um plano de corte vertical pela esfera (Figura 2.5a) e isolando-se metade de sua casca esférica e seu conteúdo fluido como sendo um único corpo livre, a força resultante exercida pela pressão interna  $p$  é dada por:

$$P = p(\pi r^2) \quad (1)$$

A resultantes das tensões de tração  $\sigma$  na parede é:

$$\sigma = 2\pi_m t \quad (2)$$

Onde  $r_m$  representa o raio médio da esfera e é dado por:

$$r_m = r + \frac{t}{2} \quad (3)$$

Fazendo o equilíbrio de forças a partir da Figura 2.5b na direção horizontal, resulta:

$$\sum F_{horizontal} = 0 \Rightarrow \sigma(\pi r_m t) - p(\pi r^2) = 0 \quad (4)$$

Uma vez que a análise em curso se aplica a estruturas do tipo casca, pode-se aproximar  $r_m$  por  $r$  e, desta forma, chega-se à seguinte equação para o cálculo da tensão de tração na parede de uma casca esférica:

$$\sigma = \frac{pr}{2t} \quad (5)$$

A simetria da casca esférica informa que pode-se obter a mesma equação para as tensões de tração qualquer que seja a direção do plano de corte através do centro da esfera (Fig. 2.5c).

Para o caso de vasos de pressão cilíndricos, o cálculo das tensões atuantes na casca desenvolve-se como se segue.

Seja o vaso cilíndrico de parede fina AB da Figura 2.6 submetido a uma pressão interna  $p$ . Um elemento de tensão representando as tensões de membrana na parede está alinhado com suas faces paralelas e perpendiculares ao eixo (Figura 2.6a). Isolando-se o segmento *mno*p e traçando-se um plano de corte ao longo do eixo por este segmento, tem-se o diagrama de corpo livre ilustrado na Figura 2.6b. Neste diagrama foram suprimidas as tensões atuantes nas faces esquerda e direita do corpo livre por não influenciarem no cálculo da tensão circunferencial.

Aplicando-se o equilíbrio de forças na direção perpendicular ao corte, na Figura 2.6b:

$$\sum F_{transversal} = 0 \Rightarrow \sigma_1(2bt) - 2pbr = 0 \quad (6)$$

A qual resulta na equação para a tensão circunferencial no cilindro:

$$\sigma_1 = \frac{pr}{t} \quad (7)$$

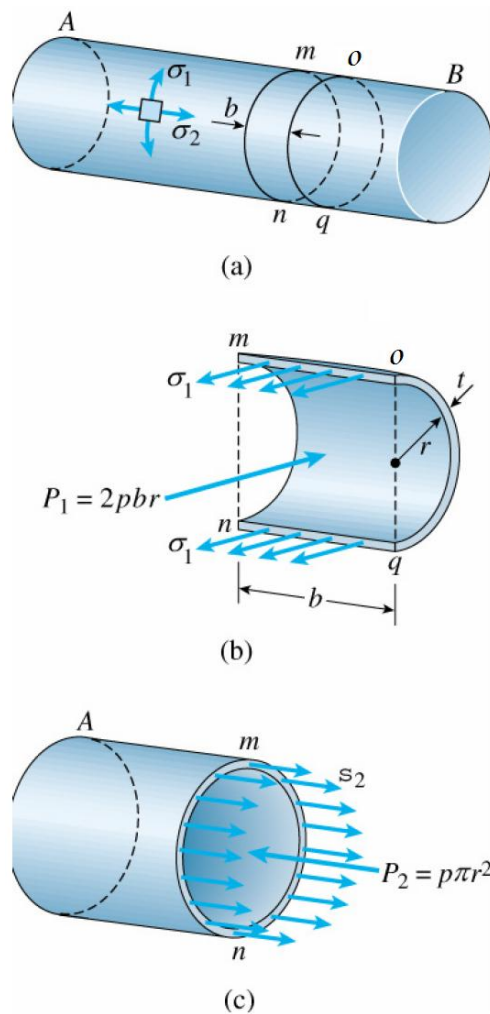


Figura 2.6. Vaso de pressão cilíndrico. (GERE, 2003).

Tomando agora o corte feito na Figura 2.6c, observa-se a seguinte equação de equilíbrio:

$$\sum F_{longitudinal} = 0 \Rightarrow \sigma_2(2\pi r t) - p\pi r^2 = 0 \quad (8)$$

De onde é possível encontrar a equação para a tensão longitudinal:

$$\sigma_2 = \frac{pr}{2t} \quad (9)$$

Assim, as Equações (5), (7) e (9) representam a forma de cálculo das tensões atuantes na membrana do sino de mergulho em função da pressão interna e de sua geometria e serão utilizadas na comparação dos resultados experimentais de resistência, obtidos com os ensaios de tração no material da membrana, com os valores teóricos máximos das tensões, calculados em função a pressão interna.

### 2.3 TEORIA DE VON MISES PARA FALHA ESTÁTICA

A ausência de correnteza no Lago Paranoá, onde será instalado o sino de mergulho, e também a forma de utilização do sino pelos mergulhadores faz com que não existam esforços cíclicos na

estrutura, o que permite concluir que o dimensionamento estático é suficiente. Deste modo, será feita uma revisão dos conceitos teóricos envolvendo o critério de falha estática da energia de distorção para materiais dúcteis. Este critério foi adotado por ser o mesmo utilizado no software de elementos finitos para avaliar a sollicitação na estrutura.

Este método é utilizado para materiais dúcteis, onde  $|\sigma_c| \cong \sigma_t$ , e consiste em calcular um escalar baseado no tensor de tensões do ponto sob análise a partir das tensões principais atuantes neste ponto. Calcula-se então um valor escalar que, quando comparado à tensão de escoamento do material, indicará se haverá ou não escoamento. Esta comparação deve levar em conta também o fator de segurança mínimo que se deseja para o projeto.

Essa metodologia tem origem na análise da energia de deformação e é apresentada em função das tensões principais como

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (10)$$

Tomando um estado plano de tensões é possível traçar um diagrama sobre o plano  $\sigma_1 \times \sigma_2$ , como mostra a Figura 2.7.

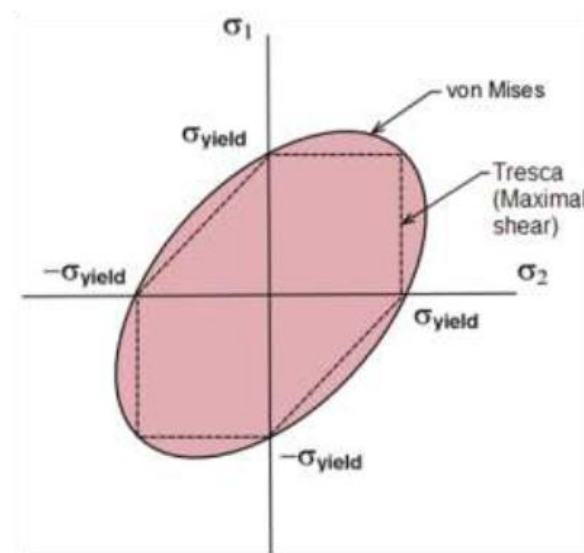


Figura 2.7. Critério de Von Mises para falha estática.

Qualquer ponto interno à região sombreada no plano  $\sigma_1 \times \sigma_2$  estará seguro quanto ao escoamento. Na Figura 2.7 observa-se também o critério de Tresca, também aplicável para materiais dúcteis, porém um pouco mais conservador em seus limites de segurança.

## 2.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF), é um método de aproximação de soluções de Equações Diferenciais Parciais. Para a maioria dos casos reais de engenharia, a solicitação de esforços nas estruturas se dá de modo que sua solução analítica é impossível. Para estes casos, uma aproximação com um erro controlado é a melhor solução. O MEF leva em consideração as teorias de Resistência dos Materiais e os Teoremas de Mecânica Geral para o estudo da estática. Para melhor entender a diferença, faz-se necessária uma breve descrição de cada um dos métodos.

### 2.4.1 Método Analítico.

Quando se aplica o método analítico para determinar as tensões atuantes em uma peça, existe uma relação entre as reações internas da estrutura em relação às forças externas atuantes na mesma. Realiza-se então uma integração ao longo de toda a geometria de forma a se conhecerem as tensões no material para cada ponto específico deste. Esses resultados podem ser apresentados na forma de diagramas de esforços, que mostram as solicitações na estrutura em função de seu comprimento. Os esforços em qualquer ponto da estrutura podem ser calculados através das equações de equilíbrio

$$\begin{aligned} \sum F &= 0 \\ \sum M &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

A aplicação do método analítico para solução de uma viga bi apoiada está ilustrado na Figura 2.8.

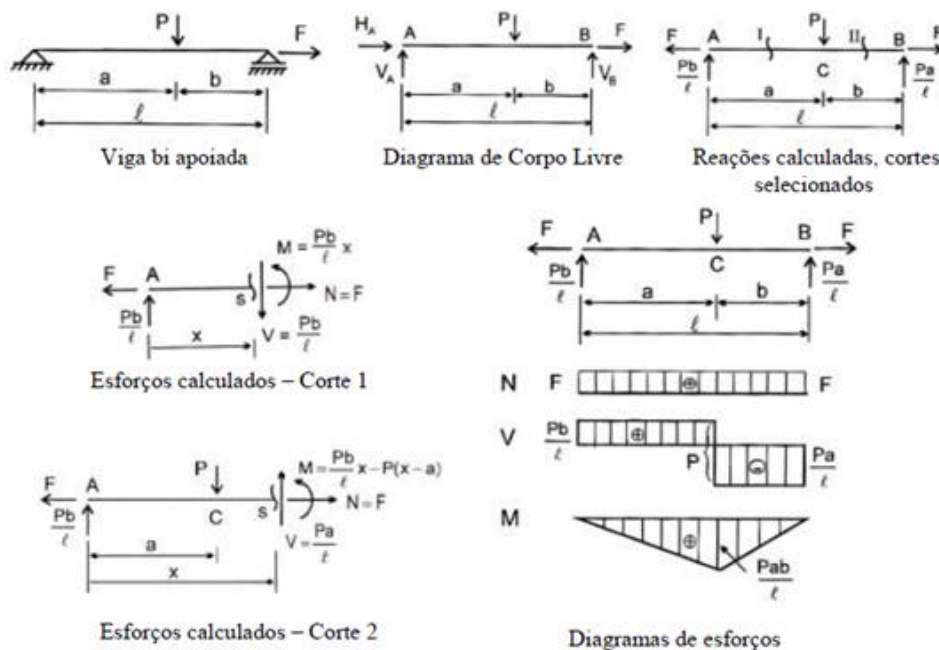


Figura 2.8. Resolução de uma viga bi-apoiada pelo método analítico. (KOMATSU, 2001).

Para geometrias simples e carregamentos bem comportados, tal solução é simples de ser obtida. Pelo diagrama de corpo livre isolamos o sistema sob análise de suas vizinhanças substituindo suas interações com o sistema por meio de forças e carregamentos externos. Calculam-se, a partir daí, as tensões ao longo da estrutura em função da área da seção transversal do ponto sob análise. Obtidas as



tensões, obtêm-se os deslocamentos pontuais através da matriz de rigidez do material e das tensões aplicadas sobre ele.

Esta abordagem envolve a análise de elementos infinitesimais da estrutura. A integração da solução para cada um desses elementos fornece a solução para toda a estrutura, fornecendo resultados exatos para deslocamentos, deformações e tensões em todos os pontos da estrutura. Entretanto, frequentemente as estruturas observadas na prática são complexas e suas interações com a vizinhança não são bem comportadas, surgindo então a necessidade de se aproximar um resultado para análise, necessidade esta suprida pela aplicação do método dos elementos finitos.

#### **2.4.2 Método dos Elementos Finitos.**

Este método difere do método analítico por não considerar porções infinitesimais do material. Ele consiste basicamente na divisão do meio contínuo em diversos elementos de dimensões finitas. Considera-se cada elemento como um sistema isolado e, então, calculam-se suas deformações, tensões e deslocamentos. Os elementos vizinhos ditam as condições de contorno, de modo que os deslocamentos calculados nos vértices dos elementos devem ser compatíveis àquele do elemento vizinho que compartilha aquele vértice.

Os erros decorrentes da discretização do modelo contínuo serão inversamente proporcionais às dimensões dos elementos. No limite, quando a dimensão de cada elemento tendesse a zero, a solução seria exatamente igual àquela fornecida pelos métodos analíticos.

Esses elementos discretizados são denominados elementos finitos. Os vértices destes elementos são denominados nós e é sobre eles que o cálculo do método ocorre. Antes de executar os cálculos sobre uma estrutura é então preciso discretizá-la através da geração de uma malha, que é a geração do conjunto de elementos finitos que abrange toda a estrutura. Aplicado o carregamento, o software então dividirá esse carregamento em diversas forças atuantes sobre os nós e calculará os deslocamentos de cada nó da malha através da matriz de rigidez conforme Eq. (12).

$$\{f\} = [k] \cdot \{u\} \quad (12)$$

A matriz de rigidez é função do material e da geometria e corresponde ao parâmetro mais importante para o cálculo por elementos finitos. Esta matriz será sempre quadrada e será maior quanto maior for o número de graus de liberdade da estrutura discretizada. Cada grau de liberdade corresponde a uma possibilidade de deslocamento apresentada pela estrutura.

Tomando como exemplo o caso de uma mola (Figura 2.9), esta se apresentará como um elemento com apenas dois nós (um por extremidade da mola), cujas possibilidades de deslocamento refletem em sua distensão e compressão. Temos, então, dois graus de liberdade e sua matriz de rigidez será então uma matriz quadrada 2x2 (Eq. (13)), onde  $K$  é a constante de rigidez da mola sob questão.

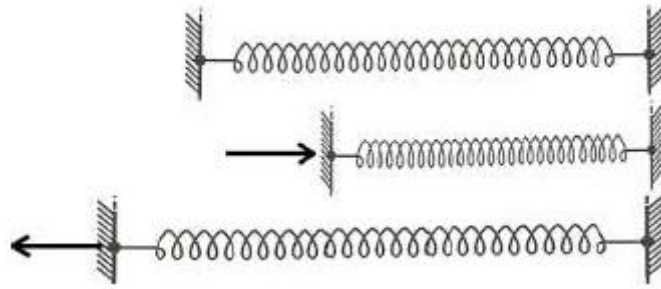


Figura 2.9. Deslocamento de um elemento de mola.

$$[k] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & -K \\ -K & K \end{bmatrix} \quad (13)$$

Na matriz de rigidez da Eq. (13), o elemento  $k_{ij}$  representa a força necessária a ser aplicada ao nó  $i$  da estrutura que resulte em um deslocamento unitário em seu nó  $j$ , fazendo todos os outros deslocamentos daquele elemento iguais a zero. Em função disso, na Eq. (13), observa-se que o elemento  $k_{11}$  corresponde à constante de rigidez  $K$  da mola, já que a aplicação de uma força de intensidade  $K$  neste nó resultará um deslocamento unitário, mantendo o outro nó (a outra ponta da mola), com deslocamento nulo. Esta deformação é obtida pela aplicação da Lei de Hooke:

$$F = K \cdot x \quad (14)$$

A ordem da matriz rigidez representa o número de graus de liberdade que a estrutura discretizada apresenta. Se tomarmos como exemplo uma viga no espaço, tomando cada extremidade sua como um nó, cada nó pode se deslocar no espaço de 6 formas diferentes (3 rotações e 3 translações). A sua matriz rigidez será então 12x12. Os 12 graus de liberdade estão ilustrados na Figura 2.10).

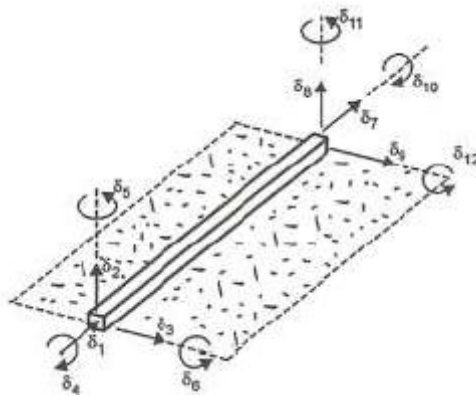


Figura 2.10. Graus de liberdade de uma viga.

O MEF depende um grande esforço computacional pelo fato de que a divisão da estrutura contínua em diversos elementos gera um grande sistema de equações cujas condições de contorno são as resoluções destas mesmas equações para o elemento vizinho. Por este motivo, a escolha da malha e do tipo de elemento são fundamentais para a obtenção de um bom resultado em análises por elementos

finitos. A determinação desses parâmetros deve ser fruto de um balanço de custo-benefício em função do quão acurado deseja-se que sejam os resultados e da capacidade de processamento computacional disponível para obtê-los.

O elemento tetraédrico linear é o mais simples elemento 3D usado no MEF. Um elemento tetraédrico linear é definido por quatro nós de canto conectados por seis arestas retas. Um elemento tetraédrico parabólico é definido por quatro nós de canto, seis nós intermediários e seis arestas. A Figura 2.11 mostra desenhos esquemáticos de elementos tetraédricos sólidos lineares e parabólicos.

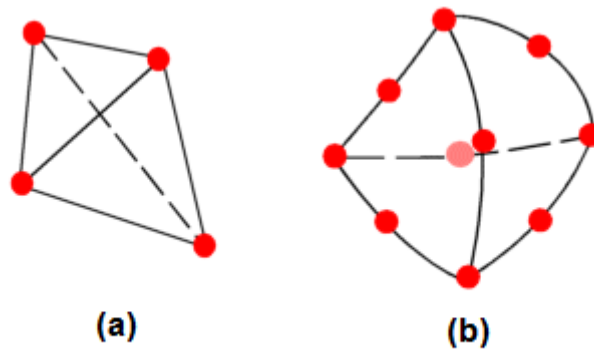


Figura 2.11. Elemento sólido linear (a) e parabólico (b).

Em geral, para a mesma densidade de malha (número de elementos), os elementos parabólicos dão melhores resultados do que elementos lineares porque: 1) eles representam arestas curvadas mais adequadamente, e 2) eles produzem melhores aproximações matemáticas. No entanto, elementos parabólicos necessitam de mais recursos computacionais do que elementos lineares.

Para problemas estruturais, cada nó de um elemento sólido possui três graus de liberdade que representam as translações nas três direções ortogonais. O software usa as coordenadas das direções X, Y, e Z do sistema global de coordenadas cartesianas para formular o problema.

## 3 PROJETO PRELIMINAR

### 3.1 REQUISITOS DE PROJETO

Deseja-se projetar um dispositivo para abrigar dois mergulhadores permitindo que possam se manter seguros e respirar em seu interior sem o recurso do regulador. As duas pessoas devem conseguir se acomodar em seu interior por, pelo menos, 20 minutos com o mínimo de conforto para trocarem informações a respeito da atividade em curso.

Deve ser previsto um mecanismo para renovação do ar em seu interior, de modo que seus usuários não se exponham ao ar viciado após longos ciclos de uso. O equipamento deve, ainda, ser dotado de uma plataforma inferior de acesso, que terá a função de facilitar a tarefa de entrada no sino de mergulho por parte do mergulhador.

A facilidade de instalação, manutenção e operação deve ser compatível com as capacidades e possibilidades de trabalho dos mergulhadores operando sujeitos às altas pressões e baixas visibilidades do ambiente subaquático.

A compatibilidade de seus mecanismos com os equipamentos comumente usados por mergulhadores é desejável a fim de facilitar sua manobra, instalação e manutenção com os equipamentos geralmente disponíveis no ambiente subaquático.

De acordo com LIPORONI (2012, p. 77), relatórios de batimetria do fundo do Lago Paranoá revelam que sua profundidade máxima é de 38 metros. Respeitando o nível mínimo de conforto na operação de entrada no sino, é possível prever que o mesmo se manterá a uma distância de, no mínimo, dois metros do leito do lago. Dessa forma é razoável trabalhar com o valor de 36 metros como valor da máxima profundidade de operação do sino.

Por fim, resumidamente, os requisitos de projeto são:

- Capacidade para até dois mergulhadores;
- Flexível e portátil;
- Operação em água doce sem correnteza;
- Capacidade para até 36 metros de profundidade; e
- Permanência mínima de 20 minutos.

### 3.2 DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA

A primeira referência para a definição da geometria a ser adotada para o sino de mergulho foi o formato do equipamento similar fabricado pela equipe de televisão do *National Geographic* (NatGeo), ilustrado na Figura 3.1. Esta decisão tem como fundamentação aproveitar a grande experiência da

equipe de televisão em trabalhos de exploração do mar. Dada a semelhança entre os dois dispositivos, a geometria ilustrada na Figura 3.1 constitui-se um bom ponto de partida para o projeto da habitação submersa.



Figura 3.1. Sino de mergulho flexível da equipe de televisão NatGeo. (LOMBARDI, 2012).

Dados os requisitos de projeto anteriormente apresentados, definiu-se que, para a permanência confortável de duas pessoas em seu interior, o sino de mergulho deve possuir uma abertura de, pelo menos, 1500 mm em seu diâmetro de entrada. Nesta posição ficará um anel metálico para manter a forma do equipamento. Neste primeiro anel será fixada, por meio de tiras e de alças, a membrana ou lona que servirá de divisor entre o meio externo, inundado, e o ar em seu interior. Nele também serão fixadas as cintas que farão a conexão entre este anel e a plataforma de acesso. Ele também será dotado de plataformas em forma de meia-lua para servir de assento aos mergulhadores.

A plataforma de acesso para entrada no sino terá um diâmetro igual ao diâmetro do anel de entrada e será dotada de uma grade. Isso permitirá aos mergulhadores se apoiarem nela de forma segura e confortável enquanto permanecem no interior do equipamento. Ela será posicionada 1500 mm abaixo do anel inferior, o que permitirá aos mergulhadores ficarem de pé apoiados na plataforma enquanto respiram sem o auxílio do regulador no interior do sino.

A ligação entre a plataforma de apoio e o anel inferior do sino de mergulho, bem como a fixação de toda a estrutura a partir da plataforma de apoio ao fundo do lago será feita por meio de cintas de

ligação. A Figura 3.2 mostra o esboço da geometria, em corte, identificando os principais componentes e as Figuras (3.3) e (3.4) a mostram os detalhes do esboço.

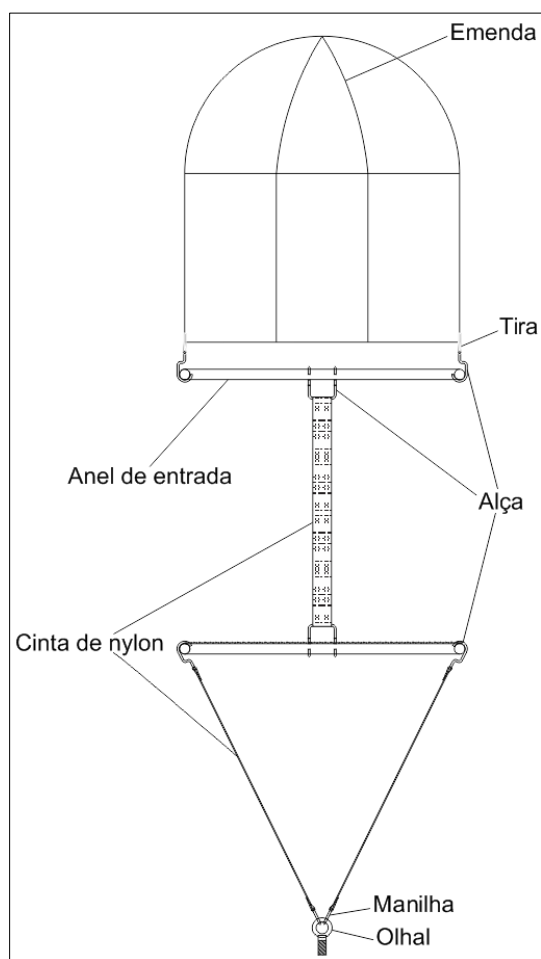


Figura 3.2. Esboço da estrutura.

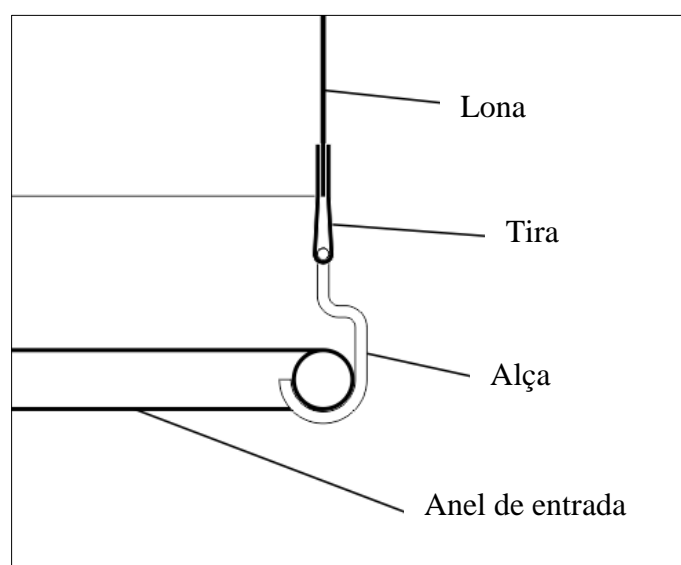


Figura 3.3. Detalhe do anel de entrada mostrando a alça e a tira.

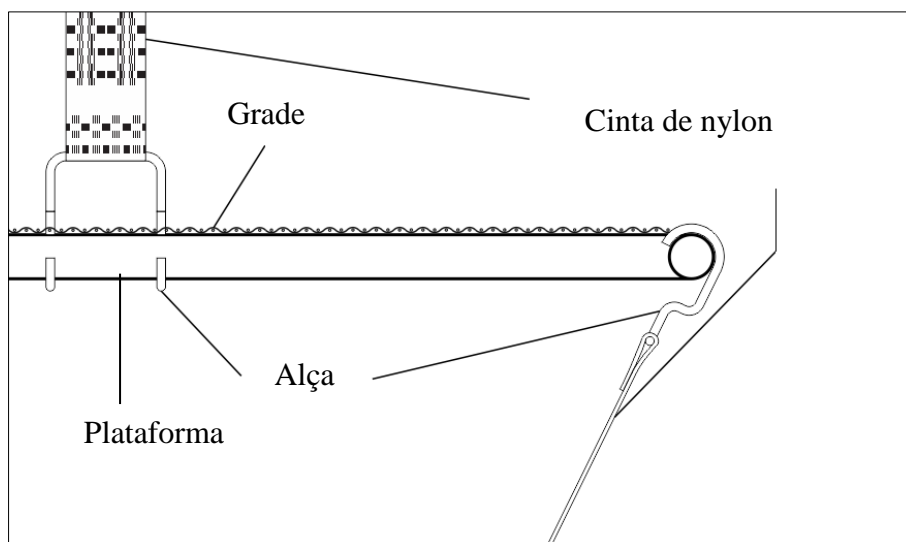


Figura 3.4. Detalhe da plataforma.

De acordo com BERTOLO (2014), o ser humano respira cerca de seis litros de ar por minuto. Dois adultos, portanto consumiriam 12 litros de ar por minuto. Em vinte minutos – tempo mínimo de permanência no interior do sino, segundo os requisitos de projeto – o volume total de ar consumido seria então de 240 litros. A geometria inicial resultou em um volume de ar interno de  $1,95 \text{ m}^3$ , ou seja, 1950 litros de ar. Dessa forma mostrou-se que o ar no interior do sino é suficiente para a permanência dos dois mergulhadores em seu interior pelo tempo requerido.

A Figura 3.5 mostra uma vista isométrica e em corte do esboço inicial da geometria do equipamento, ainda sem as cintas de ligação que irão unir a plataforma ao anel inferior e ao ponto de ancoragem.



Figura 3.5. Vista normal e em corte do esboço inicial.

### 3.3 PRÉ-SELEÇÃO DE MATERIAIS

A seleção de materiais com os quais serão fabricados os elementos do sino de mergulho foi feita levando em consideração, principalmente, que o mesmo irá operar sempre afogado. Esta é uma condição crítica de projeto, uma vez que seus elementos metálicos devem ser capazes de resistir à corrosão e seus componentes não-metálicos precisam resistir à deterioração que o contato com a água geralmente induz.

Como citado na seção 2.1, os materiais mais utilizados em membranas de tensoestruturas sujeitas a esforços de tração são o PVC, o PTFE e o silicone, tendo como malha estrutural as fibras de vidro, o kevlar, as fibras de carbono ou o nylon. Entre estes, o PTFE se mostra como uma opção pouco atraente por ser quebradiça e dificultar, desta forma, seu manuseio sem prejuízos à integridade da estrutura. O uso do PVC como matriz para fibras de poliéster é uma solução eficaz, pois o PVC é imune à hidrólise em baixas temperaturas e, portanto, consiste em um bom ponto de partida para a escolha do material a ser utilizado na membrana do sino de mergulho.

Para o anel metálico e a plataforma de apoio, além da resistência à corrosão, é necessário que o material possua propriedades mecânicas suficientes para que a geometria resista aos esforços aos quais estará sendo submetido. A tabela do Anexo I (NUNES, 2007), traz um resumo da resistência à corrosão e aplicações dos principais materiais ferrosos e não-ferrosos. Por ela é possível observar que as ligas de aço inox, cobre, alumínio e níquel são opções válidas para o uso no sino de mergulho quanto ao quesito resistência à corrosão.

### 3.4 DIMENSIONAMENTO

#### 3.4.1 Cintas de ligação.

A configuração inicial do sino de mergulho resultou em um volume interno de ar de 1,95 m<sup>3</sup>. Sabendo que este corresponde ao volume de fluido deslocado e considerando a densidade da água como sendo 1000 kg/m<sup>3</sup>, podemos então calcular a força de empuxo:

$$F_e = V_d \rho_{\text{água}} = 1,95 \cdot 1 \times 10^3 = 1950 \text{ kgf} = 19129,5 \text{ N} \quad (9)$$

As cintas deverão, portanto, suportar, juntas, a força de 19,3 kN, que tentará fazer o sino de mergulho emergir. Para selecionar as cintas que irão unir o anel de entrada à plataforma de apoio este valor é suficiente pois ambos possuem o mesmo diâmetro e, dessa forma, a cinta ficará sempre na vertical. Para selecionar as cintas que irão ancorar todo o conjunto ao fundo do lago a partir da plataforma de apoio, é necessário considerar que, ao contrário do primeiro conjunto de cintas, estas estarão inclinadas a 45° com relação ao eixo de simetria do sino. Assim faz-se necessário calcular a tensão neste elemento através da componente vertical da força:



$$F_{c2} = \frac{F_e}{\sin \theta} = \frac{19,3}{0,707} = 27,1kN \quad (10)$$

Estes valores iniciais de força são suficientes para a seleção das cintas de ligação.

### 3.4.2 Elementos metálicos.

Para o dimensionamento dos elementos metálicos fez-se uma análise pelo Método dos Elementos Finitos utilizando o complemento Simulation do software SolidWorks.

O material escolhido para simulação foi o aço inoxidável AISI 304, cujas propriedades mecânicas estão listadas na Tabela (3.1).

Tabela 3.1. Propriedades mecânicas do aço AISI 304.

Propriedade	Valor	Unidade
Módulo de Elasticidade - $E$	190,00	GPa
Coefficiente de Poisson - $\nu$	0,29	
Massa específica - $\rho$	8000	Kg/m <sup>3</sup>
Resistência à tração - $S_{ut}$	517	MPa
Limite de escoamento - $S_y$	206,81	MPa

As Figuras de (3.6) a (3.9) ilustram os resultados obtidos para a plataforma de acesso:

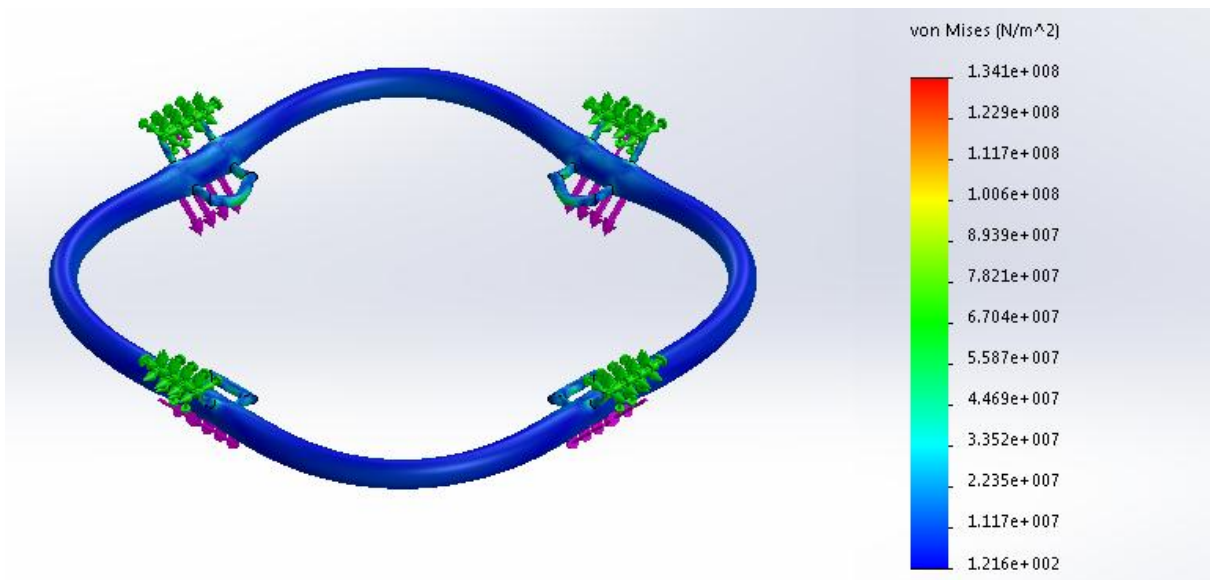


Figura 3.6. Resultado do ensaio da Tensão Máxima Equivalente de Von-Mises para a plataforma de acesso.

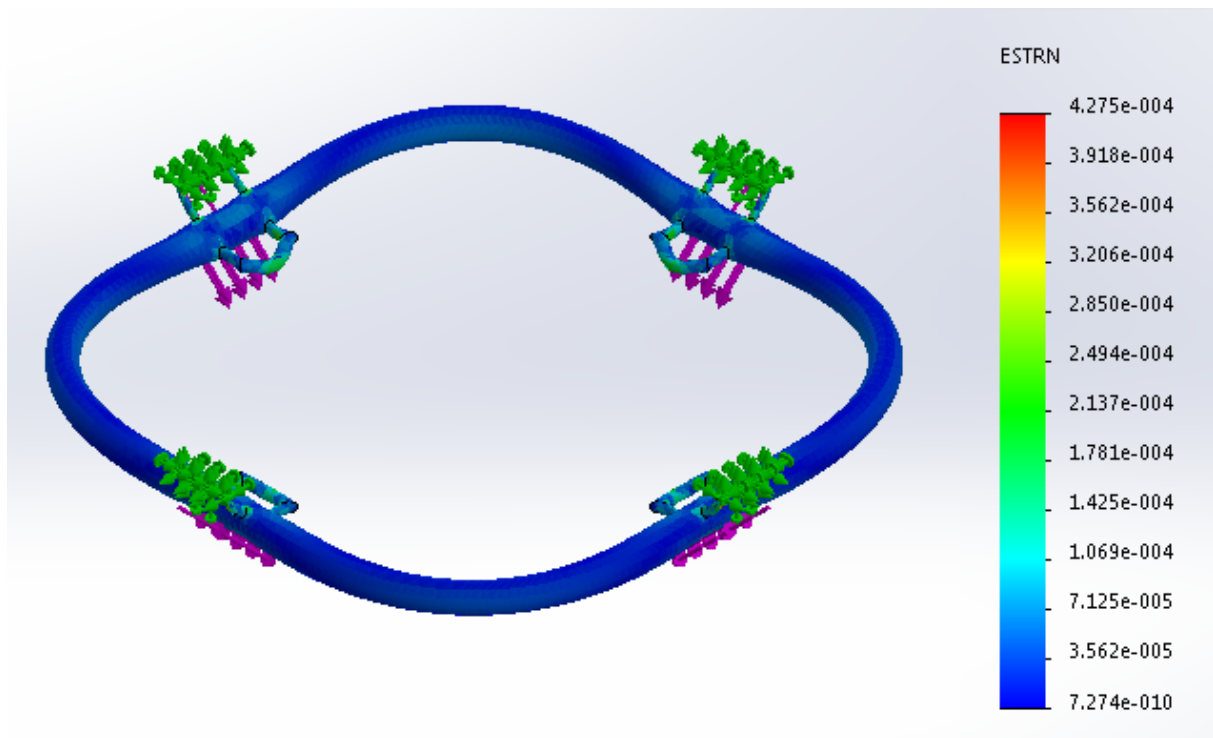


Figura 3.7. Resultado do ensaio de deformação para a plataforma de acesso.

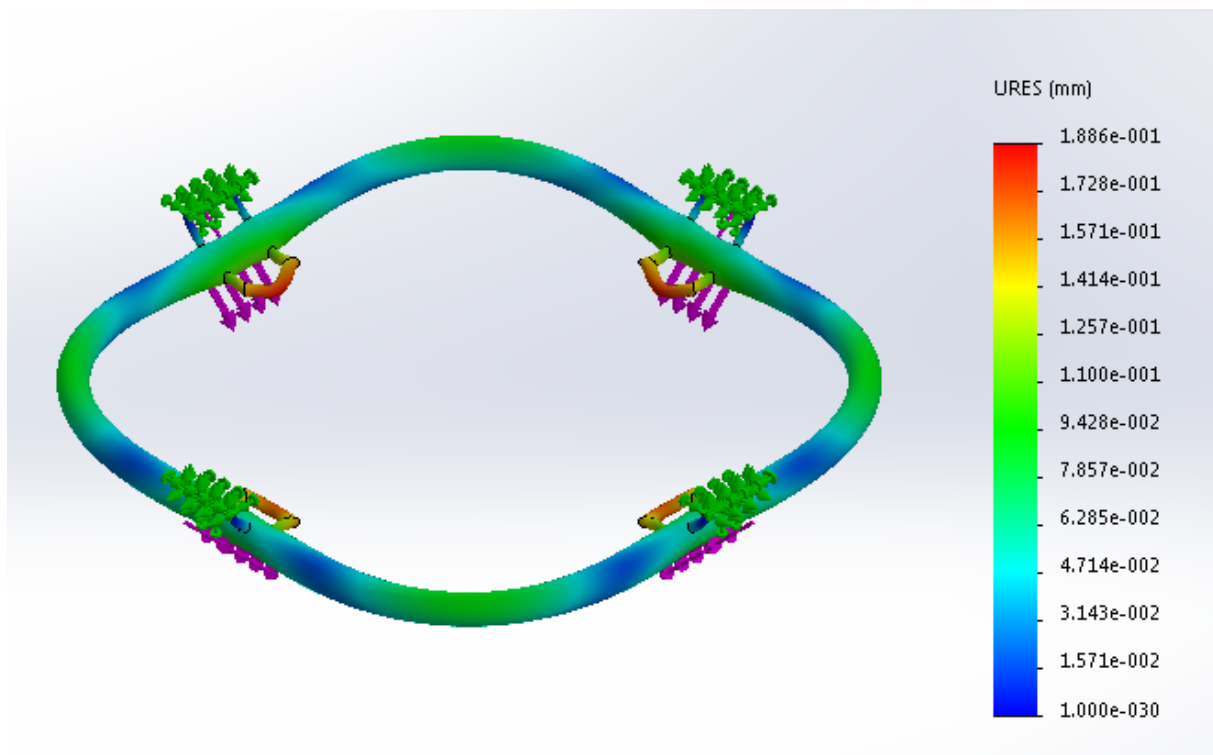


Figura 3.8. Resultado do ensaio de deslocamento para a plataforma de acesso.

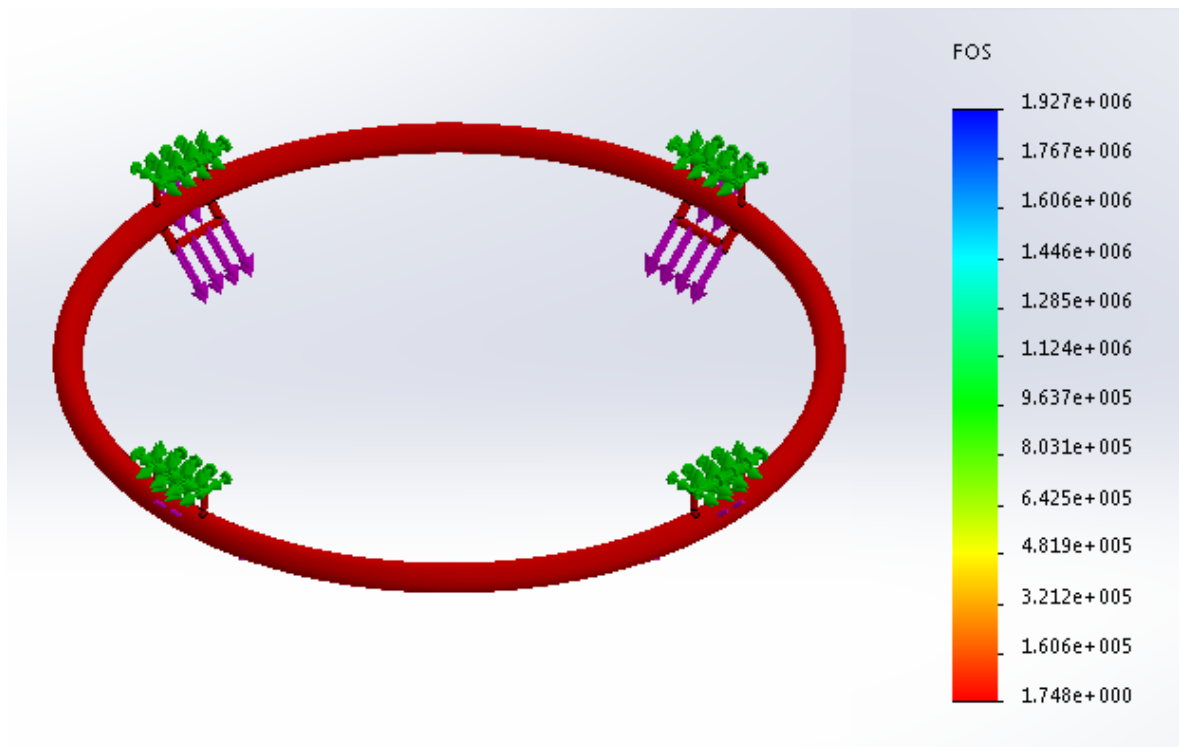


Figura 3.9. Resultado do fator de segurança calculado para a plataforma de acesso.

Por não apresentar função estrutural, a grade presente no interior da plataforma de apoio, mostrada nas Figuras (3.4) e (3.5), foi suprimida para fins simplificação para geração da malha.

Para simulação, as cintas foram substituídas pelas forças aplicadas por elas nas alças onde serão conectadas na plataforma de apoio. Para as alças acima do anel, foi utilizada a força calculada pela Equação (9) dividida por quatro. Já para as alças de baixo, a força utilizada foi um quarto da força encontrada pela Equação (10).

A Tabela (3.2) traz os principais parâmetros e resultados da simulação para a plataforma de apoio.

Tabela 3.2. Resultados da simulação para a plataforma de apoio.

<b>Dados da simulação</b>	
Tipo de malha	Malha sólida
Tipo do elemento	Tetraédrico sólido
Tamanho do elemento	16,7696 mm
Total de elementos	21973
Total de nós	43871
<b>Resultados da simulação</b>	
Tensão equivalente de Von-Mises	Mínima: 121 Pa Máxima: 134,01 Mpa
Deslocamento	Mínimo: 0,0 mm Máximo: 0,2 mm
Deformação	Mínima: 7,3e-10 Máxima: 4,3e-4
Fator de segurança mínimo	1,75

As Figuras de (3.10) a (3.13) ilustram os resultados obtidos para o anel de entrada:

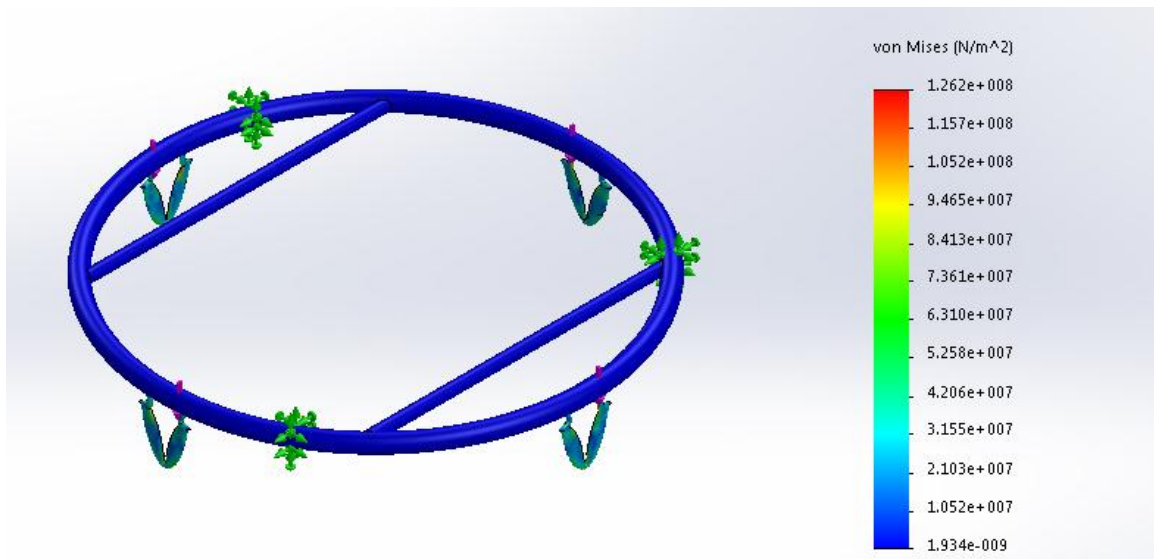


Figura 3.10. Resultado do ensaio da Tensão Máxima Equivalente de Von-Mises para o anel de entrada.

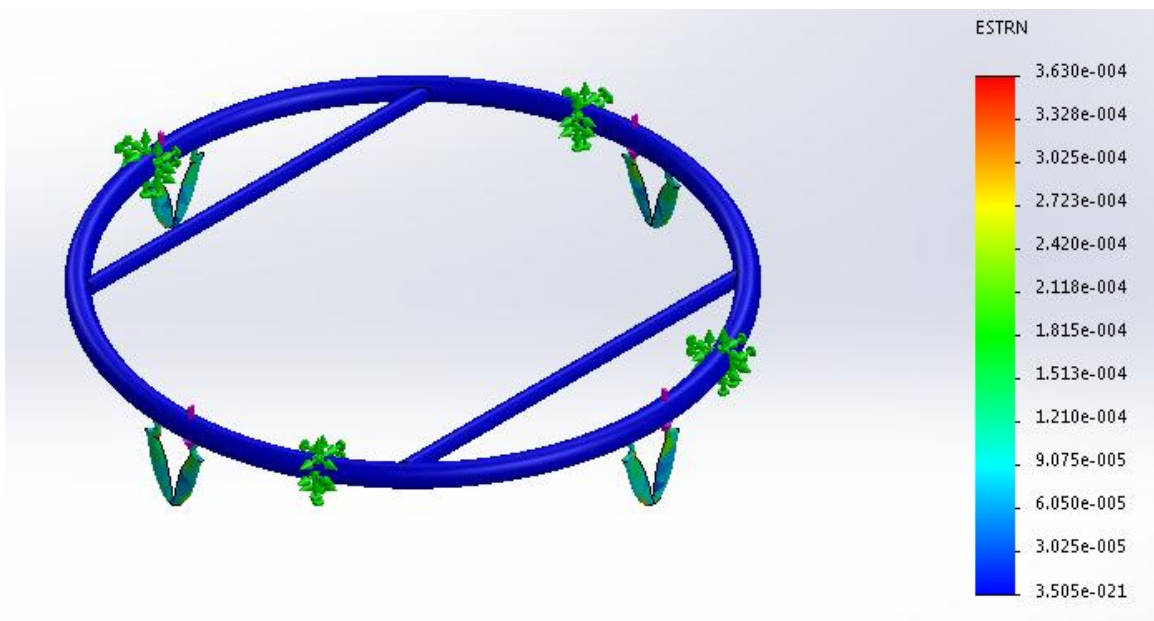


Figura 3.11. Resultado do ensaio de deformação para o anel de entrada.

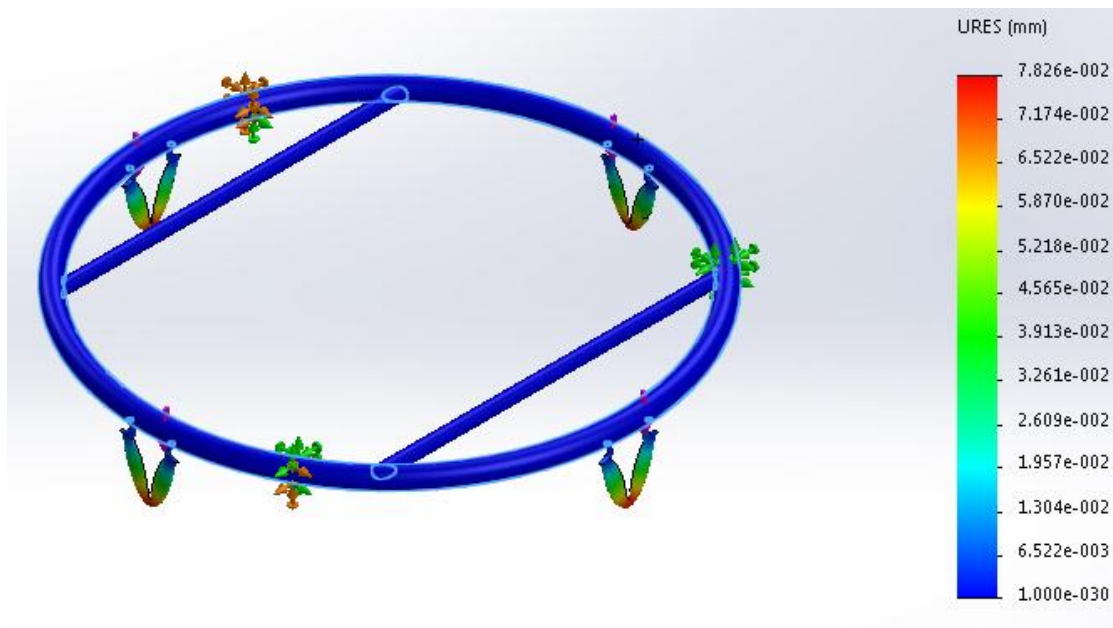


Figura 3.12. Resultado do ensaio de deslocamento para o anel de entrada.

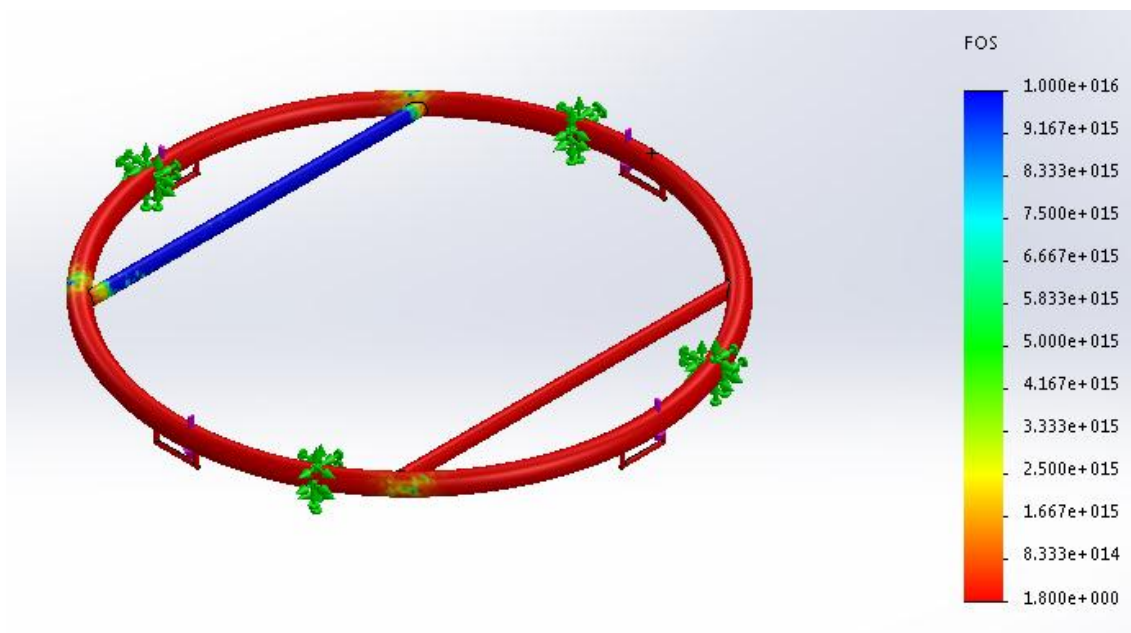


Figura 3.13. Resultado do fator de segurança calculado para o anel de entrada.

Ambos os anéis são obtidos a partir da revolução de um perfil circular vazado com as dimensões do padrão comercial schedule 40S.

A Tabela (3.3) traz os principais parâmetros e resultados da simulação para o anel de entrada.

Tabela 3.3. Resultados da simulação para o anel de entrada.

Dados da simulação	
Tipo de malha	Malha sólida
Tipo do elemento	Tetraédrico sólido
Tamanho do elemento	12,9461 mm
Total de elementos	33012
Total de nós	65242
Resultados da simulação	
Tensão equivalente de Von-Mises	Mínima: 2e-10 Pa Máxima: 126 Mpa
Deslocamento	Mínimo: 0,00 mm Máximo: 0,08 mm
Deformação	Mínima: 3,5e-21 Máxima: 3,6e-4
Fator de segurança mínimo	1,80

Para as alças foram obtidos os resultados ilustrados nas Figuras de (3.14) a (3.17) e na Tabela (3.4)

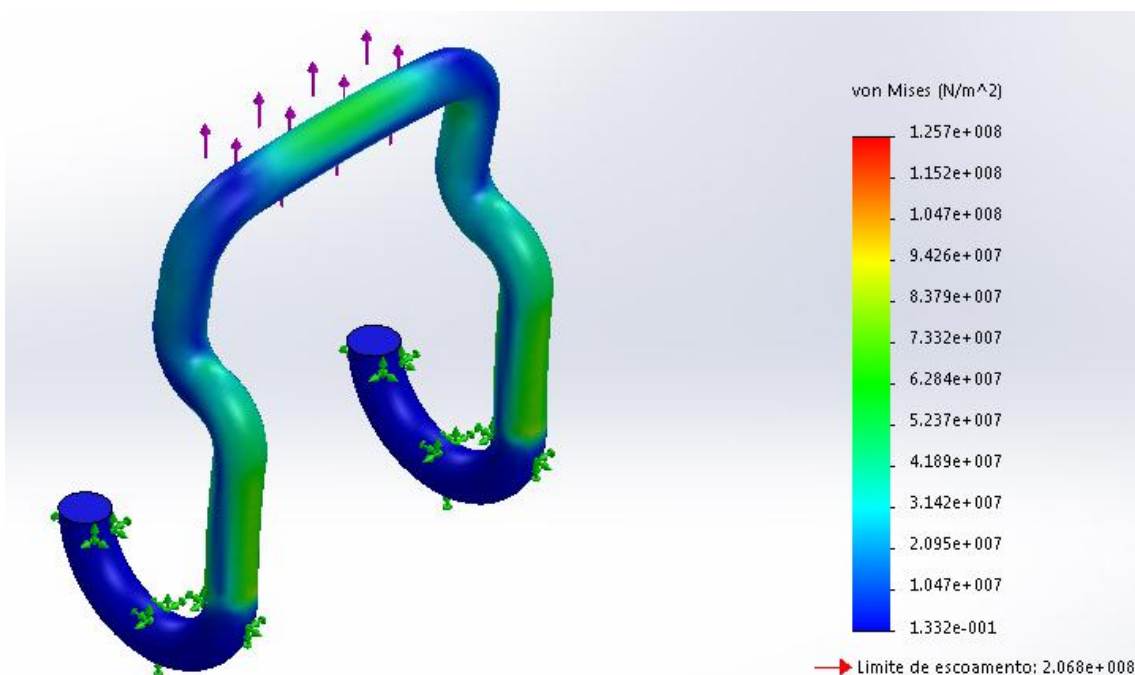


Figura 3.14. Resultado do ensaio da Tensão Máxima Equivalente de Von-Mises para a alça.



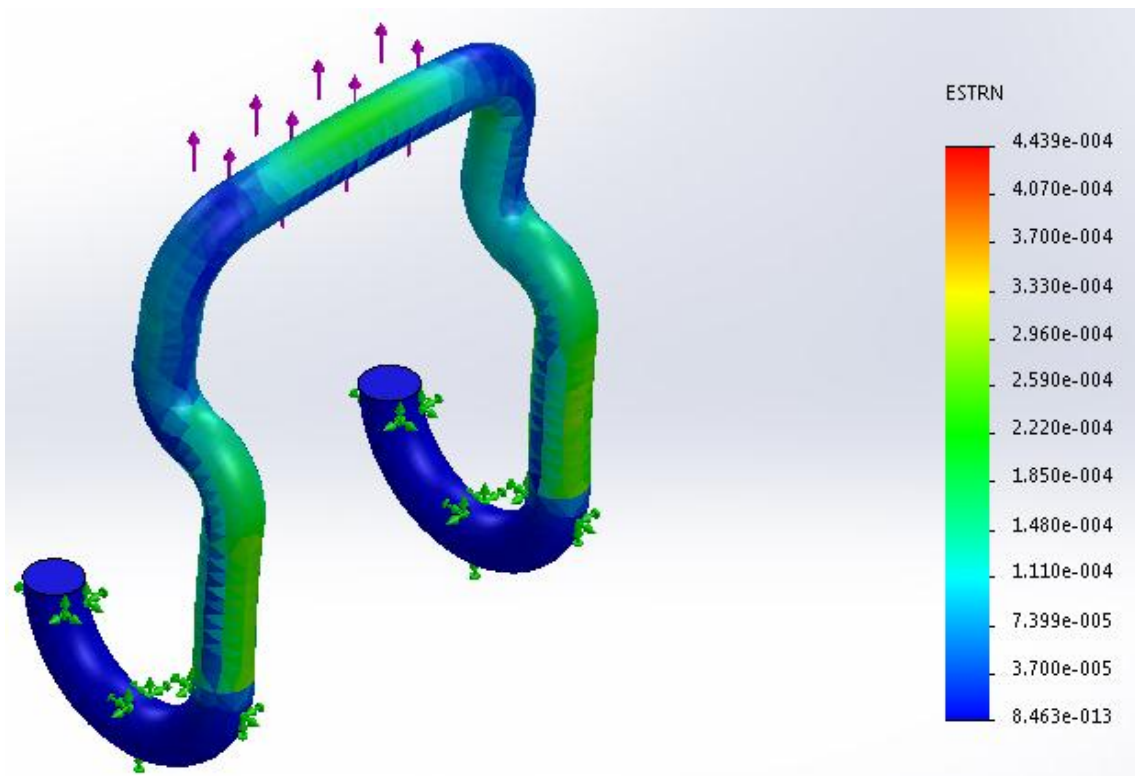


Figura 3.15. Resultado do ensaio de deformação para a alça.

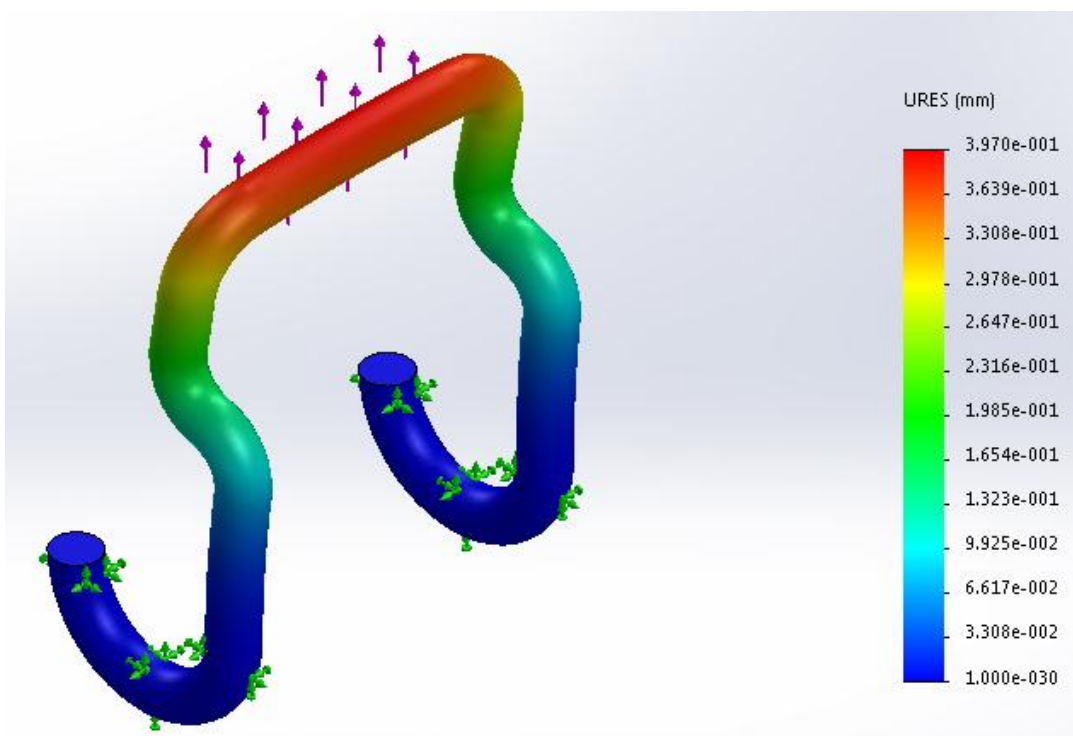


Figura 3.16. Resultado do ensaio de deslocamento para a alça.

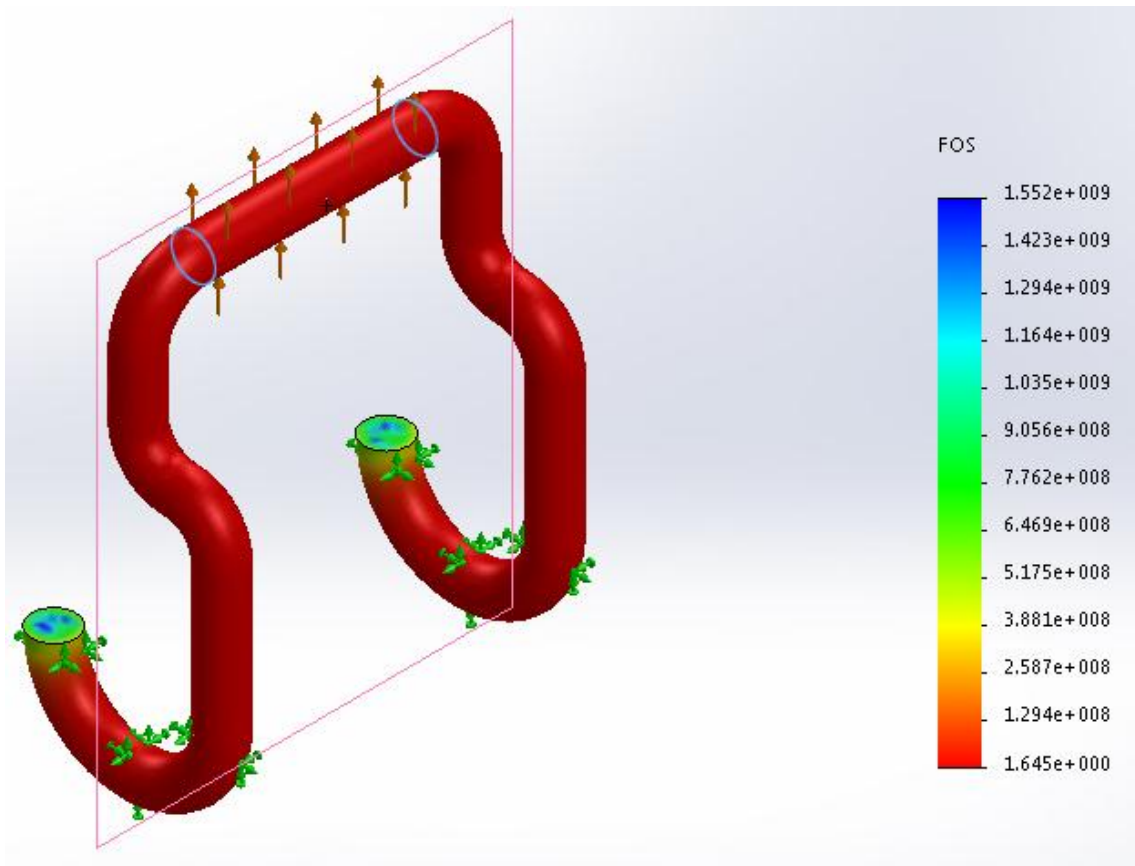


Figura 3.17. Resultado do fator de segurança calculado para a alça.

Tabela 3.4. Resultados da simulação para a alça.

<b>Dados da simulação</b>	
Tipo de malha	Malha sólida
Tipo do elemento	Tetraédrico sólido
Tamanho do elemento	4,8316 mm
Total de elementos	6125
Total de nós	10716
<b>Resultados da simulação</b>	
Tensão equivalente de Von-Mises	Mínima: 0,1 Pa Máxima: 125 Mpa
Deslocamento	Mínimo: 0,0 mm Máximo: 0,4 mm
Deformação	Mínima: 8,5e-13 Máxima: 4,4e-4
Fator de segurança mínimo	1,65



# 4 DEFINIÇÕES CONSTRUTIVAS

## 4.1 INTRODUÇÃO

Conforme mencionado anteriormente, a ideia de construir um sino de mergulho utilizando material flexível surgiu da necessidade de tornar mais acessível tal ferramenta de pesquisa. O tema, porém, traz complicadores, uma vez que o componente crítico do projeto (a lona) é feito de um material cujas propriedades mecânicas, e a própria classificação, são de difícil aquisição, pois as lojas que comercializam tal produto não dispõem de tal dados.

O levantamento de dados como a tensão admissível do material e o alongamento, por exemplo, foi preparado para ser obtido por meio de ensaios de tração. Para tal, foi pesquisada uma norma para ensaios de tração que abrangesse materiais poliméricos não isotrópicos. Inicialmente, seguindo o estudo feito por Niemeyer em seu Projeto de Graduação “Construção de um Coletor Solar Inflável”, estudou-se a norma ASTM D638: “*Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*”, entretanto tal norma só é aplicável a materiais com 1,0 milímetro ou mais de espessura. Os materiais encontrados à venda no comércio local que podem atender à necessidade do projeto possuem, todos, espessura menor que 1 milímetro. Partiu-se então para a pesquisa de outro documento que apresentasse procedimentos e métodos padrão para ensaio em materiais poliméricos não isotrópicos. Encontrou-se a norma ASTM D882: “*Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheet*”, a qual foi estudada e utilizada para confeccionar os corpos de prova conforme descrito neste capítulo.

## 4.2 MATERIAIS

Como foi dito anteriormente, um dos propósitos do projeto é a utilização de materiais baratos e de fácil aquisição e ainda que possam suportar trabalhar na condição “mergulhado”.

O anel e as manilhas, componentes responsáveis diretos pelo ancoramento do sino de mergulho ao fundo do lago são feitos em aço inox. As cintas, que fazem as ligações entre as manilhas e a plataforma e entre a plataforma e o anel, são feitas em nylon e têm aplicação náutica podendo, portanto, trabalharem mergulhadas. O material da plataforma e do anel já foram definidos previamente: aço inox AISI 304, mesmo material utilizado nas barras utilizadas para fabricação das alças.

Para fabricar a lona, após pesquisa nas principais lojas do comércio local, foram selecionados três materiais que, num primeiro contato, parecem atender às exigências de impermeabilidade e resistência, o que será testado com ensaios de tração. A Figura 4.1 mostra em detalhe o aspecto físico de cada um dos três tipos de materiais.

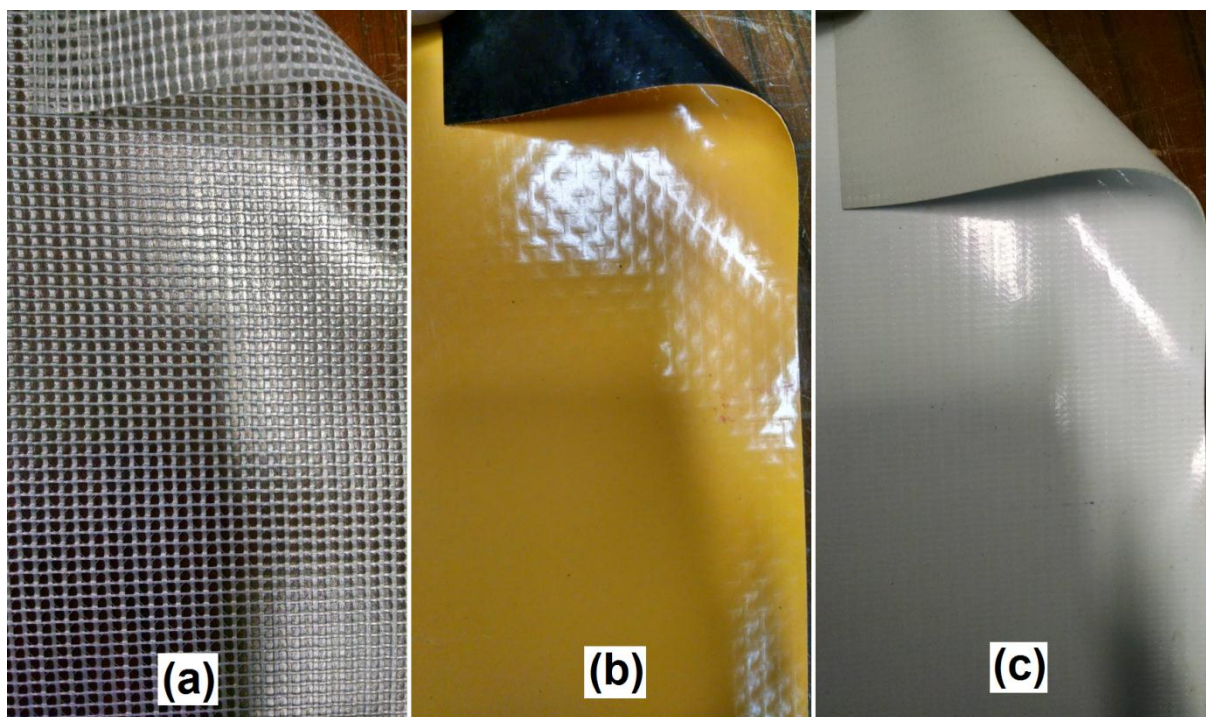


Figura 4.1. Materiais selecionados. PVC transparente trançado (a), lona emborrachada (b) e vinil toldo (c).

A denominação utilizada na Tabela 4.1 seguiu o adotado nas lojas que comercializam o material. Para fins de identificação nos ensaios de tração será utilizada apenas a identificação “A”, “B” e “C”, seguindo que foi utilizado na Figura 4.1.

A Tabela 4.1) mostra os preços e dimensões disponíveis dos três materiais.

Tabela 4.1 - Preço dos materiais.

Material	Dimensão (largura máxima)	Preço por metro
PVC transparente trançado (a)	1,4 m	R\$ 32,90
Lona emborrachada (b)	1,4 m	R\$ 24,90
Vinil toldo (c)	1,4 m	R\$ 27,60

### 4.3 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Para levantar as curvas de tensão *versus* deformação de cada um dos materiais, necessário se faz a execução de ensaios de tração. Os ensaios serão executados em conformidade com a norma ASTM D882 já citada. Devido à função fundamental desta norma no projeto, faz-se necessário um subitem específico para comentá-la.

#### 4.3.1 Requisitos da ASTM D882.

A norma ASTM D882 tem por objetivo normatizar ensaios realizados em materiais plásticos com espessura menor que 1,0 milímetros para obtenção de propriedades mecânicas. Abaixo segue a lista dos principais itens a serem observados na elaboração dos corpos de prova e na execução do ensaio:

- A norma ASTM D6287, Standard Practice for Cutting Film and Sheeting Test Specimens, deve ser observada com relação aos aparatos e técnicas de corte utilizadas na confecção dos corpos de prova;
- Os corpos de prova devem consistir em tiras de largura e comprimento uniformes e devem ter pelo menos 50 milímetros de comprimento a mais que a separação utilizada nas garras;
- A largura nominal dos corpos não pode ser menor que 5 milímetros nem maior que 25,4 milímetros;
- A razão de largura/espessura deve ser de pelo menos 8;
- Durante o corte dos corpos de prova, evitar a todo custo a geração de entalhes que possam causar falhas prematuras;
- A espessura deve ser uniforme dentro de 5% das medições de espessura feitas ao longo de seu comprimento;
- No caso de materiais anisotrópicos, dois conjuntos de corpos de prova devem ser preparados, um em cada direção paralela e normal ao sentido da anisotropia;
- Para minimizar efeitos de escorregamento nas garras, deve ser utilizadas amostras de 250 mm de comprimento em testes para determinação de módulo de elasticidade à tração. Se tal comprimento não for factível, amostras de pelo menos 100 milímetros podem ser usadas caso tenha sido previamente demonstrado que os resultados não são apreciavelmente afetados. Apesar disso, a amostra de 250 milímetros de comprimento deve ser usada para fins de referência. A velocidade do teste das amostras curtas deve ser ajustada de modo que a taxa de deformação nelas seja da mesma ordem daquela conseguida com a amostra padrão;
- São necessárias pelo menos dez amostras de corpos de prova: cinco normal e cinco paralelas ao eixo principal de anisotropia;
- Amostras que falharem em algum rasgamento óbvio ou fora do comprimento padrão devem ser descartados e os testes refeitos. No entanto, falhas que ocorrerem na seção de aperto das garras podem ser levadas em consideração se os dados obtidos estiverem de acordo com aqueles obtidos de falhas ao longo do comprimento padrão;
- A velocidade do teste deve estar dentro de 5% da velocidade que a máquina é capaz de atingir quando a máquina está operando com capacidade total; e

- A velocidade do teste deve ser determinada multiplicando-se a taxa de deformação inicial pela distância de separação das garras. A taxa de deformação inicial varia em função do alongamento percentual no momento da falha, sendo dividida em três faixas: até 20% de alongamento, de 20 a 100% e mais que 100% de alongamento no momento da ruptura. A taxa de deformação inicial para cada faixa de alongamento é dada pela Tabela 1 da norma ASTM D882. Em casos de classificação conflitante de material, a menor taxa de deformação deve ser usada.

#### 4.3.2 Ensaios

Com o objetivo de encontrar os valores de tensão limite de escoamento, tensão limite de ruptura e módulo de elasticidade, os materiais descritos no item 4.2 e ilustrados na Figura 4.1 foram submetidos a ensaios de tração. Para cada material foi preparado um conjunto de corpos de prova (tiras) respeitado o recomendado pela norma ASTM D882 - *Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting*. Para cada direção foram realizados três ensaios: o primeiro para obter o alongamento máximo na ruptura. Com o resultado deste ensaio a velocidade do ensaio para determinação do módulo de elasticidade e da tensão limite de escoamento podia ser determinada e, então, partia-se para estes ensaios.

As tiras utilizadas nos ensaios de determinação do alongamento na ruptura e do módulo de elasticidade foram confeccionadas com uma lâmina de estilete, fazendo uso de um gabarito de vidro nas dimensões de 24,5 milímetros de largura por 310 milímetros de comprimento. Para as tiras usadas nos ensaios para determinar a tensão limite de escoamento, o gabarito de vidro tinha as dimensões de 24,5 mm de largura por 190 mm de comprimento. A Figura 4.2 mostra as tiras de cada material ensaiado.

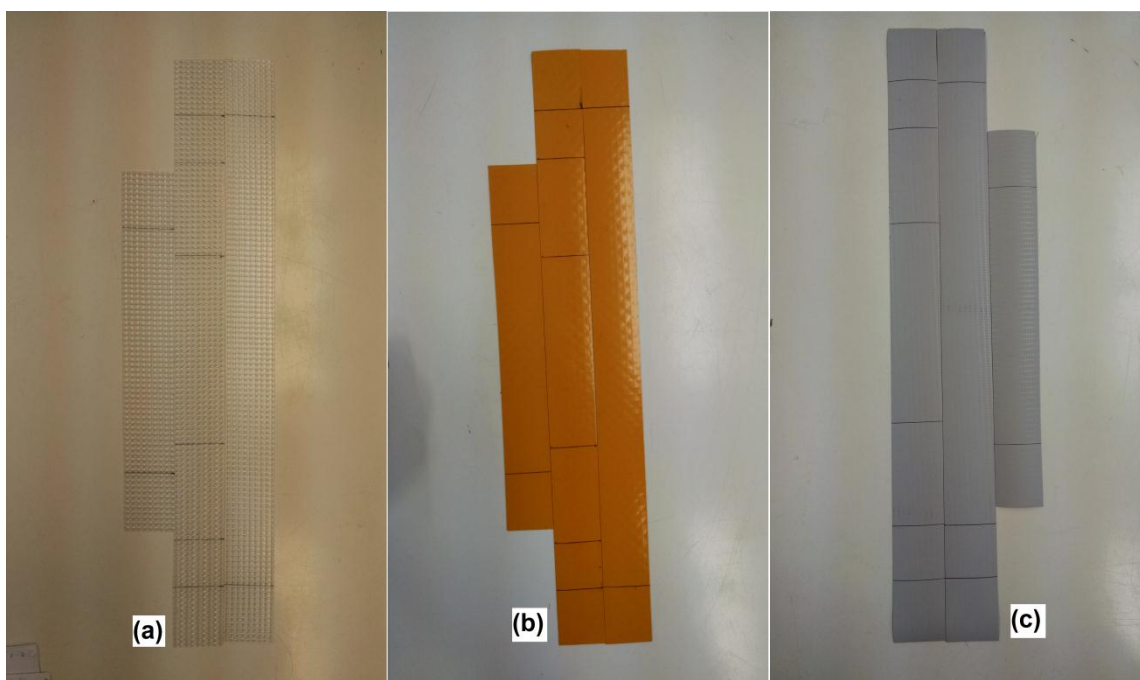


Figura 4.2. Corpos de prova.



Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas dos materiais.

Material	Direção	Alongamento na ruptura (%)	E (kgf/cm <sup>2</sup> )	Sigma (kgf/cm <sup>2</sup> )
A	Urdume	25,6	2.131,4	565,3
	Trama	28,6	1.650,5	500,0
B	Urdume	21,5	1.048,0	249,7
	Trama	33,1	498,2	195,9
C	Urdume	17,6	1.499,0	386,6
	Trama	17,8	1.007,0	296,0

Os valores foram calculados a partir de medições diretas nas amostras e analisando-se a escala do gráfico plotado em cada ensaio. As tiras apresentaram comportamento de material frágil e, portanto, o valor da tensão encontrado representa a resistência máxima à tração.

A máquina utilizada nos ensaios foi a EMIC DL2000, montada com célula de carga de capacidade 200 kgf e garras para tração também da marca EMIC. Com o alongamento percentual na ruptura dado na Tabela (4.2) e consultando a norma ASTM D882 a velocidade de separação das garras escolhida para o teste foi de 1 milímetro por segundo.

A força de empuxo imprimida ao sino de mergulho é equilibrada através de tiras que “abraçam” as alças que, por sua vez, são ligadas ao anel de entrada do sino de mergulho. Tal configuração pode ser visualizada na Figura 3.3, do capítulo de Projeto Preliminar. A partir deste raciocínio e conhecendo-se os valores de resistência de cada material foi possível dimensionar a largura das tiras utilizando uma planilha Excel. Nela comparou-se a quantidade e a largura das tiras que fixarão a lona na estrutura do anel metálico através das alças para cada material. A planilha leva em conta a força de empuxo dividida pela área de cada secção da lona logo acima da alça, o que resulta em um valor de tensão que, comparado à tensão de ruptura do material, determina a quantidade de tiras necessárias, a largura de cada tira e também o fator de segurança resultante.

Tabela 4.3. Dimensionamento da largura das tiras.

Tensão de Ruptura(kgf/cm <sup>2</sup> )	Material A		Material B		Material C		Número de Tiras
	Urdume	Trama	Urdume	Trama	Urdume	Trama	
	565,3	500,0	249,7	195,9	386,6	296,0	
Largura da Alça (cm)	15,83	17,90	35,85	45,69	23,15	30,24	4
	10,56	11,94	23,90	30,46	15,44	20,16	6
	<b>7,92</b>	<b>8,95</b>	17,92	22,85	11,58	15,12	<b>8</b>
	6,33	7,16	14,34	18,28	9,26	12,10	10

Tomando-se por base o valor inicial de 11 cm para a largura das alças, é seguro escolher o número de oito alças e utilizar o material A, conforme destacado em negrito na Tabela 4.3.

#### 4.4 ENSAIO DAS EMENDAS

Devido às dimensões do sino de mergulho, será necessário fazer uso de emendas no material da lona, pois a lona é fornecida em quantidades de largura fixa de 1,4 metros. Devido a isto, fez-se necessário ensaiar os diversos tipos de emendas a fim de constatar se a emenda não representaria risco à resistência do sino como um todo. Para isso foram feitos dois tipos de emendas: sobrepostas e do tipo “sanduíche”. A Figura de 4.4 mostra, esquematicamente, a configuração das emendas.

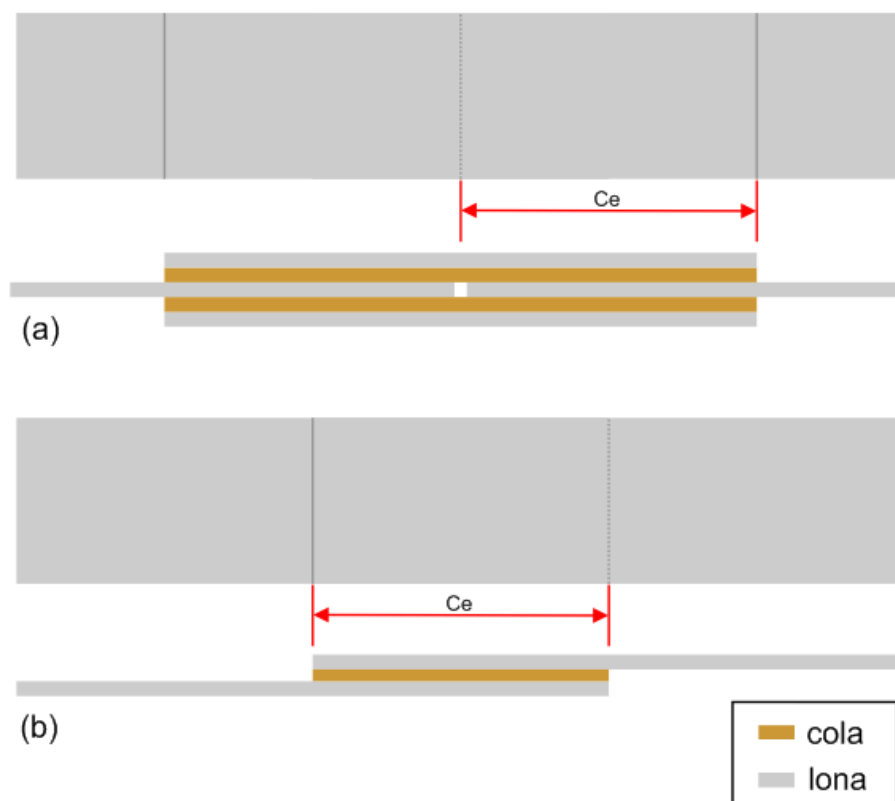


Figura 4.4. Emenda do tipo sanduíche (a) e do tipo sobreposta (b).

O comprimento da emenda, identificado por “ $C_e$ ” na Figura 4.4, varia entre um, dois e três centímetros para cada tipo de emenda. Para cada tipo de emenda foram construídos três corpos de prova, totalizando 18 corpos de prova ensaiados. A cola utilizada é feita à base de resinas de poliuretano e solventes do tipo cetona e tolueno. Conhecida no mercado como “cola vinil”, esta cola é específica para realizar junções em materiais deste tipo – pvc flexível. Outras colas foram pesquisadas e a que mais se aproximou do desempenho da cola vinil foi a cola cianoacrilato, popularmente conhecida como cola instantânea. Esta cola, entretanto, apresentou uma elevada degradação do material e por isso não foram feitos mais testes com ela.

O objetivo do ensaio das emendas é realizar uma comparação qualitativa da resistência da emenda com relação à resistência do material sem emenda. Para isso os corpos de prova foram produzidos em formato circular contendo, de um lado, a emenda e do outro o material na mesma largura, porém sem a emenda. A Figura 4.5 ilustra melhor o formato dos corpos de prova confeccionados mostrando a seção com a emenda à esquerda e a parte sem emenda do lado direito.



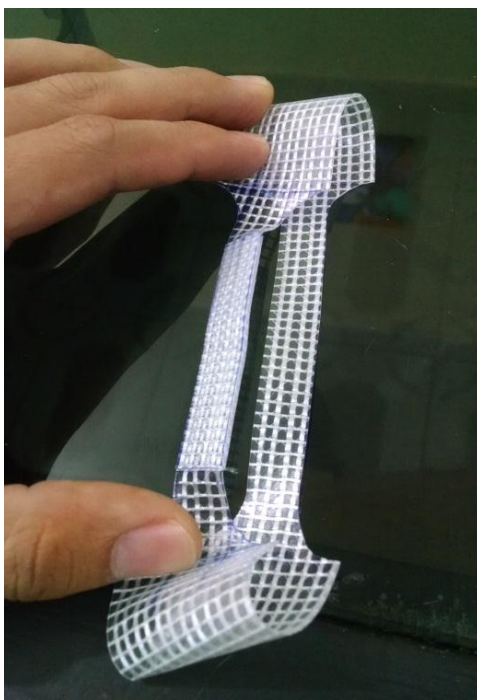


Figura 4.5. Corpo de prova para ensaio das emendas.

Por se tratar de um ensaio apenas qualitativo, cujo objetivo é descobrir se a falha ocorrerá primeiro no material ou primeiro na emenda, o mesmo foi realizado com ajuda de um aparato experimental feito utilizando alguns tubos de aço e um balde, onde foi colocada água até a ruptura do corpo de prova. A Figura 4.6 mostra o aparato utilizado para ensaiar os corpos de prova.

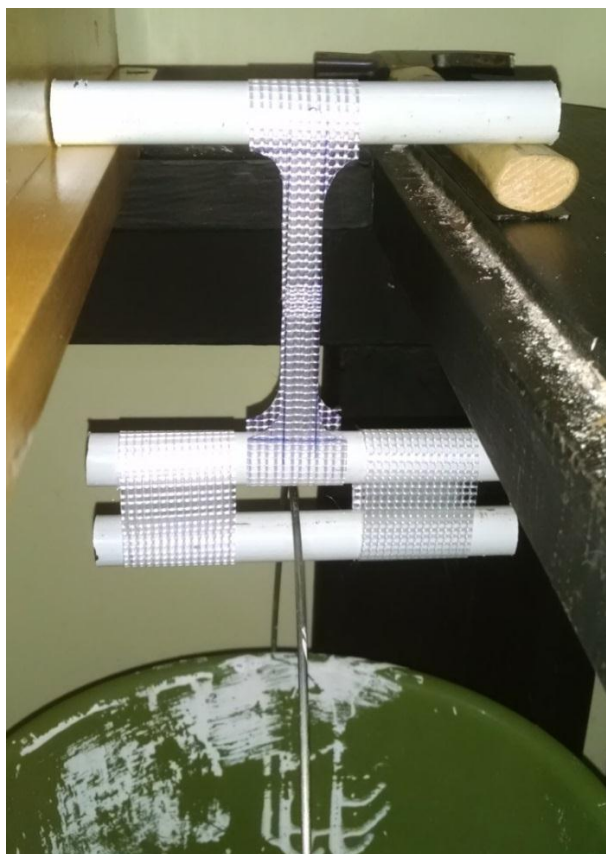


Figura 4.6. Aparato para ensaio de tração das emendas.



Após a conclusão dos ensaios, observou-se que nenhuma das 18 emendas ensaiadas rompeu antes da ruptura do próprio material sem emenda. A Figura 4.7 mostra um dos corpos de prova rompido, evidenciando a falha no lado do material sem emenda.

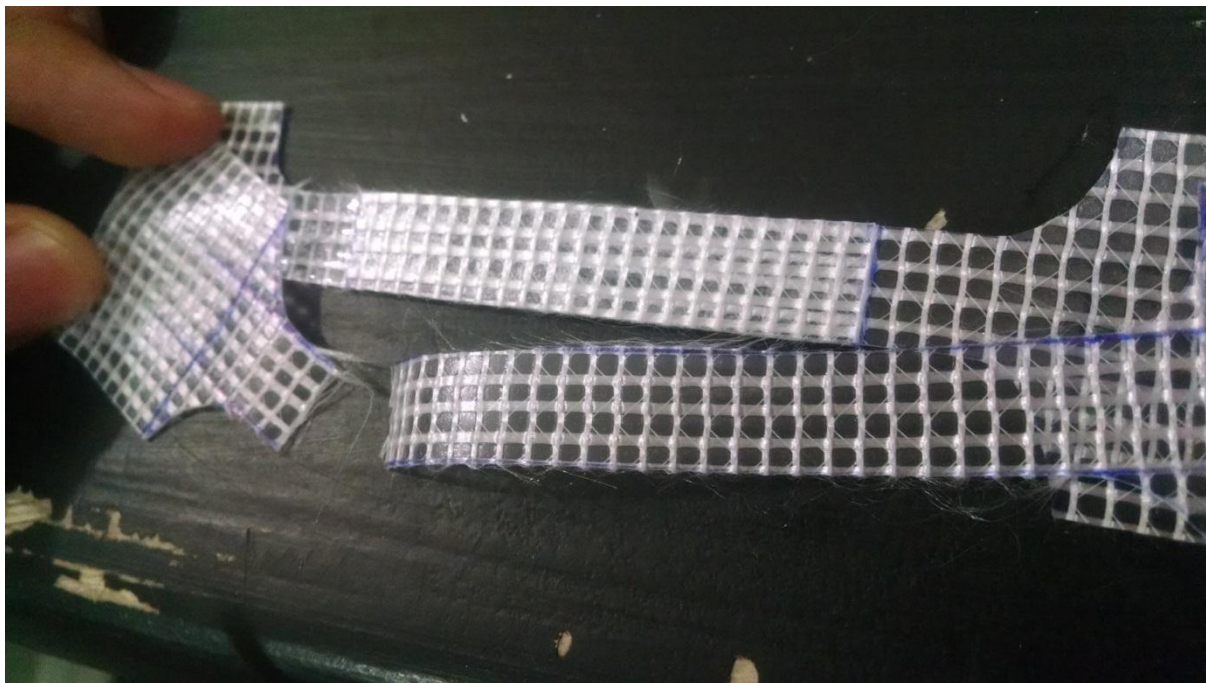


Figura 4.7. Corpo de prova rompido do tipo sanduíche com 3 centímetros de comprimento de emenda.

Os resultados dos ensaios mostram que qualquer configuração de emenda (sanduíche ou sobreposta) e de comprimento (1, 2 ou 3 centímetros) pode ser escolhida para a construção do sino, já que o material em si rompe antes da emenda. Os resultados também evidenciam a não necessidade do uso de costura para reforçar as emendas, pois o aumento da resistência da emenda em si não representa um ganho na resistência do conjunto, uma vez que ela não é o ponto crítico do projeto. Ademais, a costura, além de aumentar a complexidade na fabricação das emendas, comprometeria a impermeabilidade das mesmas e, conseqüentemente, do projeto como um todo, o que exigiria mais dispositivos e soluções para tornar o conjunto da lona com as emendas impermeável.

#### **4.5 PLANO DE CORTE**

Para que a lona tome a forma cilíndrico-esférica do sino de mergulho, é necessário que sejam realizadas dobras e colagens em posições específicas ao longo do material. A determinação dessas posições é feita a partir da construção de um modelo físico do sino de mergulho, em torno do qual a lona é moldada e só então são feitas as marcas que identificam as regiões de dobra e colagem. Uma vez que a construção de um modelo físico em tamanho real seria um processo oneroso e demorado, foi construído um modelo em escala do sino de mergulho usando um cesto plástico, correspondendo à

parte cilíndrica, com a metade de uma esfera de isopor em seu topo, correspondendo à parte semi-esférica do sino de mergulho. A Figura 4.8 mostra o aparato construído.



Figura 4.8. Matriz, em escala, do sino de mergulho.

Uma folha de papel pardo foi utilizada, fazendo o papel da lona, para moldar a matriz. Depois de realizadas todas as dobras, cortes e marcações o papel foi novamente aberto e foram feitas medições que possibilitaram, a partir da relação entre as dimensões do sino de mergulho e do aparato construído em escala, a determinação das dimensões que a lona deve ter, bem como onde deverá ser cortada e colada. A Figura 4.9 mostra um dos quatro quadrantes do papel utilizado novamente aberto após feitas todas marcações. Os demais quadrantes são simétricos a este.

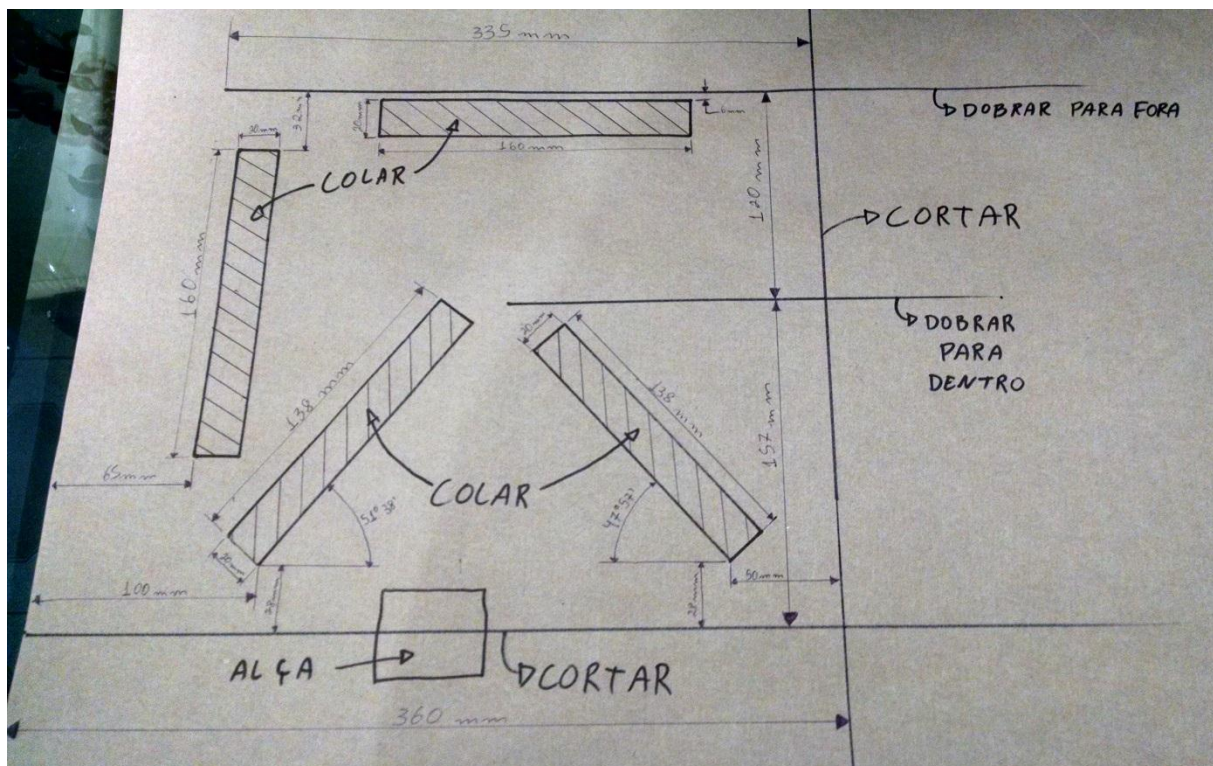


Figura 4.9. Papel cartão aberto.

A partir das marcações e dimensões da folha, mostradas na Figura 4.9, foi possível criar o desenho de fabricação da lona do sino de mergulho, presente no Anexo II.

#### 4.6 TABELA DE CUSTOS

A Tabela 4. traz uma estimativa de custos para o sino de mergulho.

Tabela 4.4 - Tabela de custos.

Item	Quantidade	Preço Unitário	Preço Total
Tubo de aço inox AISI 304, DN 2" SCH-S40 sem costura fornecido dobrado em forma de anel de 1,5 m de diâmetro com extremidades soldadas.	2,0 m	R\$ 448,50	R\$ 897,00
Tubo de aço inox AISI 304, DN 1" SCH-S40.	2,1 m	R\$ 36,35	R\$ 76,36
Barra de aço inox AISI 304 de 5/8" (15,87 mm.)	4,0 m	R\$ 20,86	R\$ 83,46
Lona	14,1 m	R\$ 32,90	R\$ 463,89
Colagem da Lona	-	R\$ 85,00	R\$ 85,00
Chapas de PVC rígido cortadas e furadas	2	R\$ 50,00	R\$ 100,00
Abraçadeiras plásticas	1 pct c/ 100	R\$ 15,00	R\$ 15,00
Válvula	1	R\$ 120,00	R\$ 120,00
Anel de aço inox $\phi$ 65 mm e 10 mm de espessura	02	R\$ 18,00	R\$ 36,00
Manilha de aço inox, espessura 15 mm	04	R\$ 68,75	R\$ 275,00
Cinta em nylon capacidade 3 toneladas, largura 70 mm	08	R\$ 89,00	R\$ 712,00
		<b>Total</b>	<b>R\$ 2.863,71</b>

## 5 RESULTADOS E CONCLUSÃO

O presente trabalho teve por objetivo geral contribuir com os trabalhos de pesquisa científica dos fundos de mares, rios e lagos através do desenvolvimento de um equipamento acessível em todos os aspectos que atue como uma ferramenta válida de apoio aos pesquisadores e, como objetivo específico, o desenvolvimento do projeto de um sino de mergulho capaz de abrigar dois mergulhadores fornecendo-lhes o mínimo necessário em termos de segurança e conforto a fim de que possam respirar sem o auxílio do regulador e se comunicar verbalmente em seu interior.

A pesquisa sobre o tema e a revisão bibliográfica possibilitou a revisão dos conceitos teóricos necessários ao entendimento dos fenômenos físicos envolvidos, o que, por sua vez, permitiu o dimensionamento e seleção de materiais em conformidade com os esforços aplicados e as exigências de projeto.

Os requisitos de projeto estabelecidos e o sino de mergulho flexível utilizado pela equipe de televisão NatGeo permitiram a concepção de um esboço inicial cuja estrutura atendeu aos requisitos de resistência às forças de empuxo e pressão às quais o sino estará submetido. Isso permitiu um correto dimensionamento e seleção dos componentes metálicos e flexíveis.

A flexibilidade e o comportamento anisotrópico do material da membrana constituíram um desafio para o Projeto de Graduação. O ensaio de tração realizado de acordo com a norma ASTM D882 permitiu obter valores confiáveis de resistência dos materiais, condição fundamental para um projeto seguro. Do mesmo modo, o ensaio das emendas demonstrou que estas não serão o ponto crítico do projeto e que os materiais escolhidos são adequados aos esforços atuantes no sino de mergulho.

Como sugestões de continuidade deste trabalho, citam-se as seguintes atividades:

- Estudo do problema de ancoramento do sino de mergulho ao fundo do lago;
- Detalhamento da válvula de troca de ar;
- Elaboração de manuais técnicos de instalação e montagem;
- Aquisição dos materiais, construção e instalação do sino de mergulho.

Embora a construção do equipamento não tenha sido realizada, as atividades desenvolvidas e concluídas neste trabalho representam uma importante e fundamental etapa para a implementação do sino de mergulho. Desta forma pode-se concluir que o presente Projeto de Graduação cumpriu as expectativas apresentadas inicialmente.

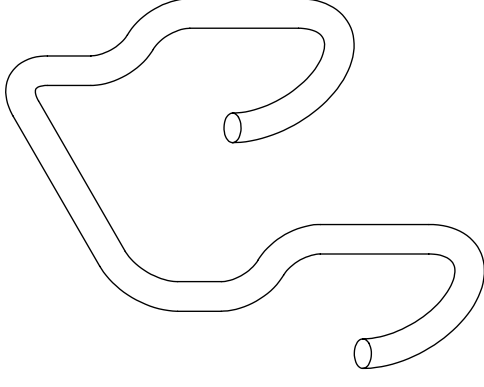
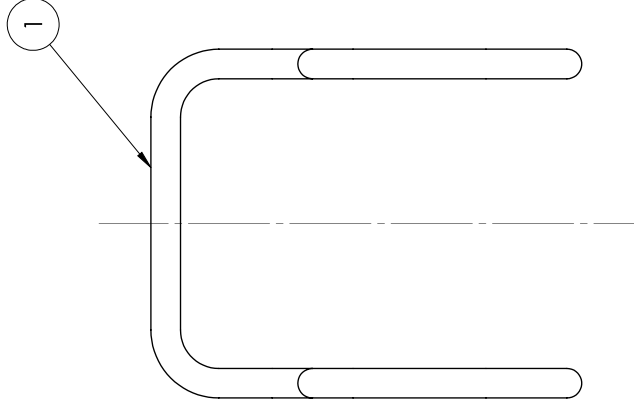
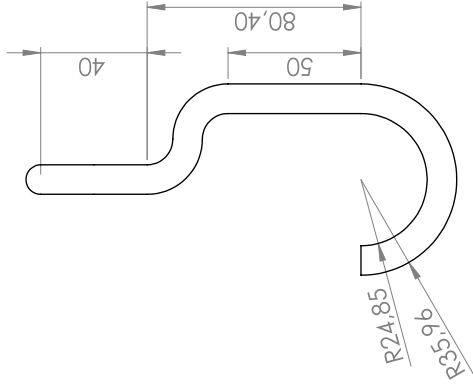
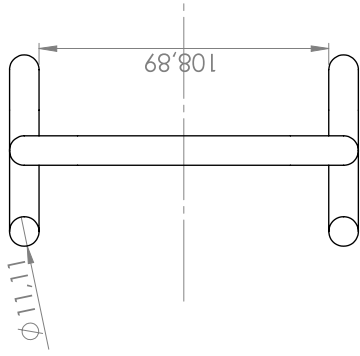
## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BERTOLO, Luis Antonio, A Física dos Pulmões e Respiração. Disponível em: <<http://www.bertolo.pro.br/Biofisica/Fluidos/Pulmoes.htm>> Acesso em: 15 de junho de 2014.
- BEVAN, J. Diving Bells Through the Centuries – SPUMS Journal, Volume 29, No. 1, 1999.
- LIPORONI, L. M. Estudo Preliminar da Qualidade da Água do Lago Paranoá, Brasília – DF, Utilizando um Modelo de Qualidade da Água Bidimensional - Dissertação de Mestrado, 2012.
- SHAEFFER, R. E. Tensioned Fabric Structures – A Practical Introduction, 1996.
- OLIVEIRA, Vinicius Maia Barreto; Análise e projeto de tenso-estruturas têxteis para coberturas ; Rio de Janeiro, 2003
- AZEVEDO, Diego. FARAGE, Vitor. Análise Estática de uma Estrutura de Reboque Leve Utilizando o MEF. Universidade de Brasília, 2011.
- NIEMEYER, Rômulo Castro. Construção de um Coletor Solar Inflável. Universidade de Brasília, 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D882: Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. West Conshohocken, 2012. 11fls.
- GRÜNDIG, L.; MONCRIEFF, E. Cutting Pattern Generation of Textile Structures, 1993.
- HALLIDAY, David. RESNIK, Robert. WALKER, Jearl. Fundamentos de Física 2, 2012.
- NUNES, Laerce de Paula. Fundamentos de Resistência à Corrosão, 2007.
- WILKINSON, Jerry. History of the Gulf Stream. Disponível em: <<http://www.keyshistory.org/gulfstream.html>>. Acesso em 05 set. 2014.
- BISHOP, Tina; TUDDENHAM, Peter; RYAN, Melissa. Then and now: The HMS Challenger Expedition and the “Mountains in the Sea” Expedition.
- WEYL, Peter K. Oceanography: an introduction to the marine environment. 1970. p.49.
- PERRIER, Alan. 250 réponses aux questions du plongeur curieux. Paris: Éditions du Gerfaut, 2008. p.46. ISBN-978-2-35191-033-7.
- DENIS, Robert Henry. Deep diving and submarine operations. Surrey: Siebe Gorman & Company Ltd, 1955.p.693.
- MILLER, James. Living and working in the sea. Vermont: Five Corners Publications, 1995.p.438. ISBN-10: 1886699011.
- GERE, J. M. Mecânica dos Materiais, Editora Thomson Learning, 2003.

# ANEXOS

		Pág.
Anexo I	Tabela de resistência à corrosão	59
Anexo II	Desenhos	60
Anexo III	Relatórios técnicos dos ensaios de tração	64

<b>Materiais Metálicos</b>		<b>Resistência à corrosão</b>	<b>Principais Utilizações</b>	<b>Limitações</b>
Materiais ferrosos	Aço carbono	- Em meios básicos - Em meios neutros desaerados - Em meios secos, com baixa umidade ou ausência de água líquida	Projetos industriais em geral	Necessita da utilização de meios adicionais de proteção (revestimentos, proteção catódica, inibidores de corrosão etc) devido à fraca resistência à corrosão nos meios usualmente encontrados
	Aço liga	Depende da composição da liga: - Aços patináveis – resistentes à corrosão atmosférica - Aços cromo-molibdênio – resistentes à corrosão química	Estruturas metálicas em geral Para internos de fornos, caldeira e equipamentos para alta temperatura	Características mecânicas de soldabilidade Os aços patináveis não devem ser usados em meios cloretados, em imersão e em regiões onde haja variação de nível
	Aço inoxidável	Resistente em uma vasta gama de meios, a depender da composição As mais resistentes são as de alto Cr, Ni e Mo	Superfícies expostas à atmosfera, imersão em água doce e salgada Equipamentos de processo	Meios que quebrem a passividade do aço inoxidável
	Ferros fundidos	Resistentes à corrosão pelo solo e pela água doce	Tubulações na área de saneamento básico	Em meios muito agressivos pode ocorrer a corrosão gráfitica
Materiais não-ferrosos	Cobre e ligas de cobre	Boa na maioria dos meios	Tubos de permutadores de calor, tubulações domésticas para água e gás, hélice e leme de embarcações	Meios contendo amônia e atmosferas contendo gás sulfídrico
	Alumínio e ligas de alumínio	Boa resistência à corrosão atmosférica em atmosferas não-cloretadas As ligas para anodos não devem passivar	Revestimentos em geral Ligas resistentes à corrosão com o cobre e alumínio Anodos galvânicos	Meios que quebrem a passividade do alumínio  Meios básicos
	Níquel e ligas de níquel	Muito boa na maioria dos meios	Ligas para elevada resistência à corrosão em unidades de processo Corrosão em altas temperaturas (Ni-67% e Cu-32%) e o inconel (Ni-78%, Cu-14% e Fe-7%)	Atmosferas e meios sulfurosos
	Chumbo e ligas de chumbo	Muito boa na maioria dos meios	Muito usado no passado em tubulações domésticas para água, em cabos de energia e telecomunicações e também para revestir de tanques de ácido sulfúrico	Atualmente tem-se utilizado muito pouco o chumbo por ser um metal pesado e prejudicial à saúde
	Titânio	Excelente resistência à corrosão em água salgada	Tubos de permutadores de calor Implantes ortopédicos Anodos de sistema por corrente impressa	Meios desaerado



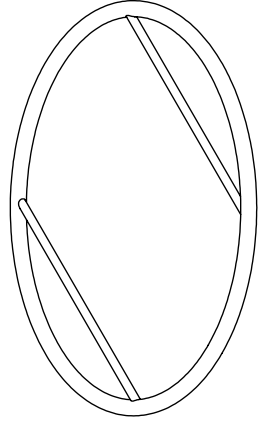
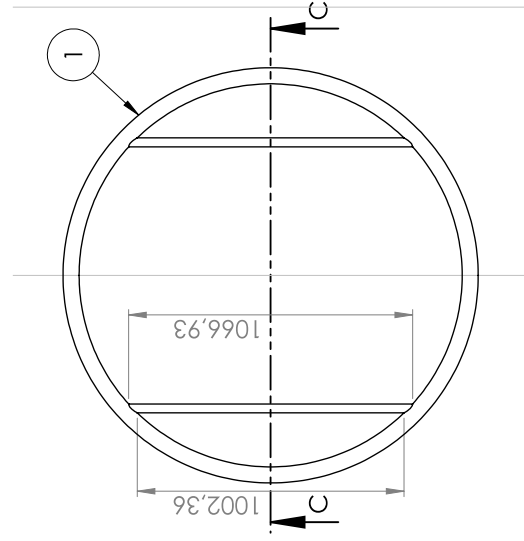
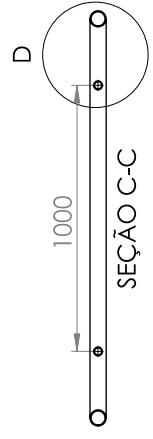
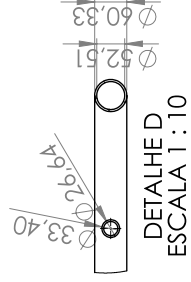
Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	DESCRIÇÃO	QTD.
1	Alça	Alça em aço estrutural ASTM A-36 fabricada a partir de barra maciça dobrada	16

SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS UNIDADE: mm TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		REBARBAR E QUEBRAR AGUDAS		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
DES.	NOVE	ASSINATURA	DATA	TÍTULO:					
VERIF.									
APROV.									
MANUF.									
QUALID.									
				MATERIAL:		DES. Nº		A3	
				PESO:		ESCALA 1:2		FOILHA 1 DE 1	



1 2 3 4 5 6 7 8

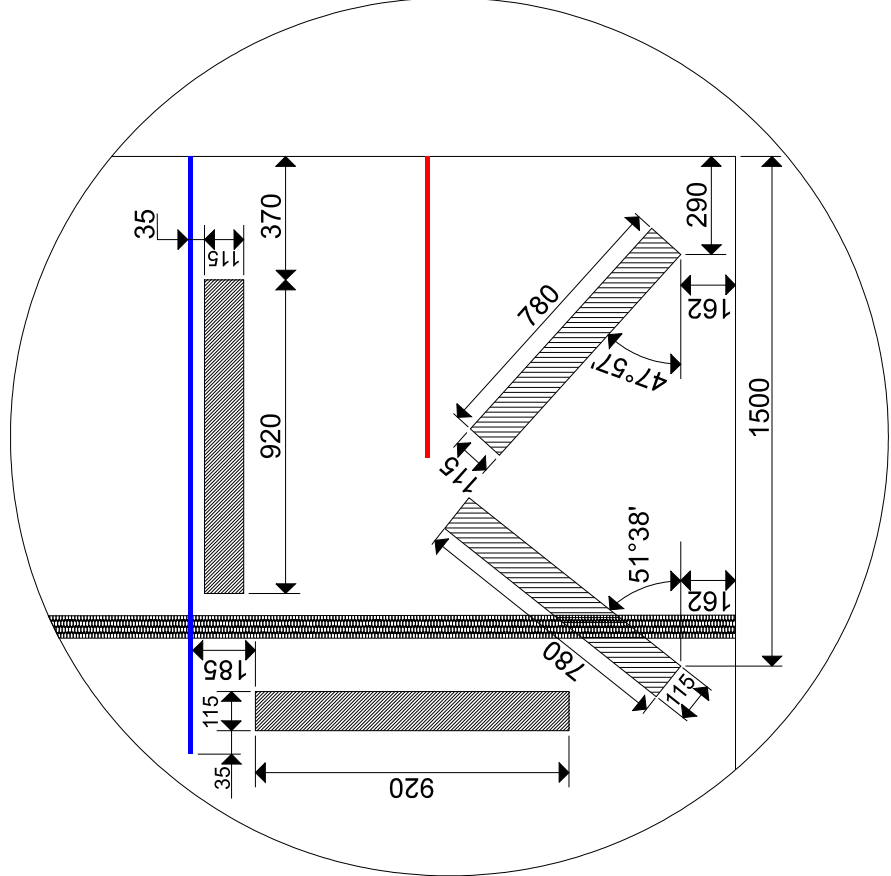
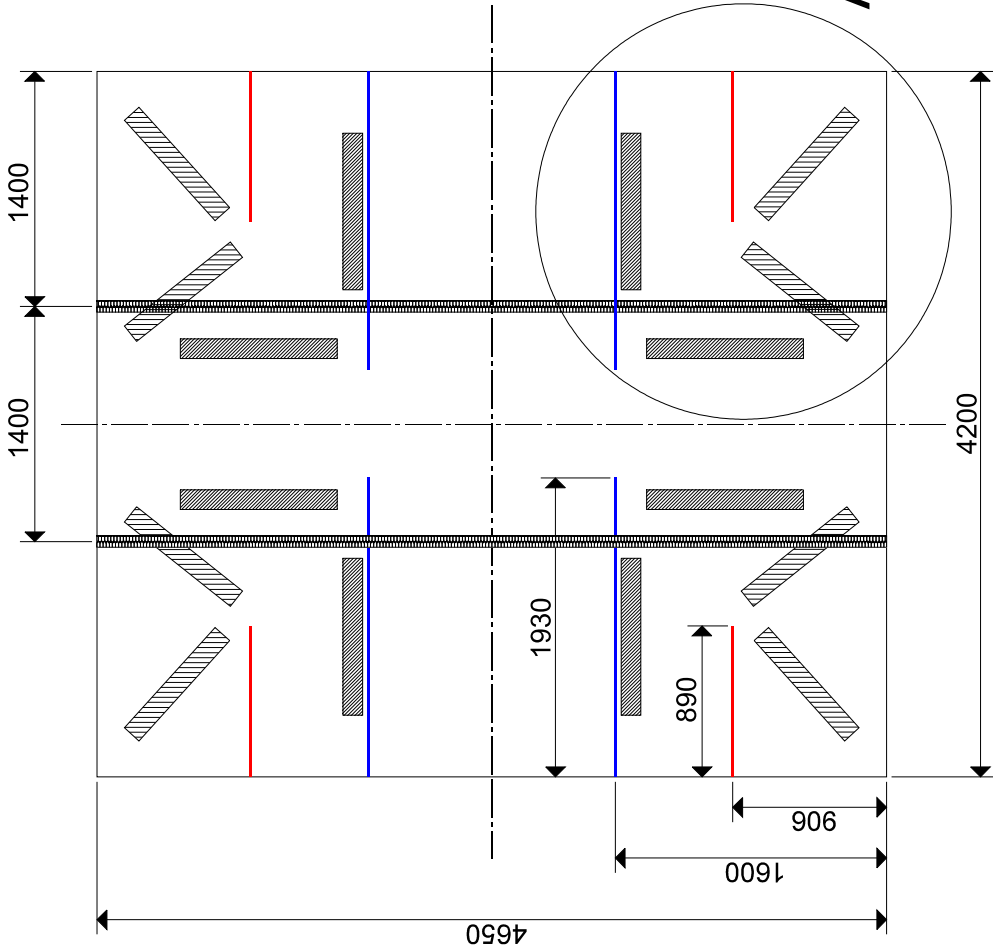
A B C D E F








Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	DESCRIÇÃO	QTD.
1	Anel	Tubo padrão Schedule 40 S em aço inox AISI 304 DN 1"	1

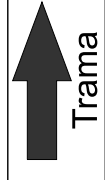
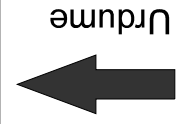
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS CAPACIDADE DE CARGA TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:	ACABAMENTO: REBARBARE QUEBRAR ARREDORE AGUDAS	NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO	REVISÃO
NOME	ASSINATURA	DATA	TÍTULO:
DES.			<b>Tubo padrão Schedule 40 S em aço ino</b>
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			
QUALID.	MATERIAL:		DES. Nº
			A3
		PESO:	ESCALA 1:20
			FOIHA 1 DE 1





**DETALHE A**  
**ESCALA 1:2**

-  Dobrar para fora
-  Dobrar para dentro
-  Colar áreas com a mesma hachura
-  Colar áreas com a mesma hachura
-  Região da emenda



**Lona**

Escala:  
1:20





































