

# **Desenvolvimento de Reservatórios em Materiais Compósitos**

*Nelson Marcelo Costa Pereira*

**Dissertação de Mestrado**

Supervisor: Prof. Dr. António Torres Marques

Co-Supervisor: Prof. Dr. Francisco M. Andrade Pires



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Junho 2017



## Resumo

Os reservatórios de pressão têm como função armazenar um líquido ou gás. Os reservatórios em sistemas compósitos conseguem ter uma grande vantagem em relação aos reservatórios metálicos, pois permitem armazenar fluidos/gás em reservatórios muito mais leves, o que permite satisfazer indústrias exigentes como a aeroespacial e automóvel.

Durante a Tese, foi feita uma introdução aos vários tipos de reservatórios existentes no mercado, tendo sido mais focalizado nos reservatórios em sistemas compósitos. Também foram abordados os diferentes processos de produção dos vários tipos de reservatórios, tendo sido dada mais atenção ao processo de enrolamento filamentar, visto ser esse o principal processo usado para a produção de reservatório em compósitos.

Foi igualmente realizada uma breve abordagem das várias formas de dimensionamento disponíveis atualmente no mercado, sendo também abordadas as várias normas a cumprir durante a produção de reservatórios.

Por fim, no último capítulo da Tese, foi dimensionado um reservatório do tipo IV capaz de suportar o hidrogénio a uma pressão de 30 MPa. Durante o desenvolvimento do reservatório, foi utilizada a Teoria *Netting Analysis* e um programa de elementos finitos, ABAQUS® 2017, para cálculo das espessuras das camadas helicoidais e circunferenciais do reservatório. Durante as simulações executadas no programa ABAQUS® 2017, fizeram-se várias simulações, sendo no final comparados os vários resultados das soluções encontradas.



# Development of composite pressure vessels

## Abstract

Pressure vessels have the function of storing a liquid or gas. The composite tanks have a great advantage over metallic reservoirs, as they allow to store fluids/gas in much lighter reservoirs, which allows to satisfy demanding industries like the aerospace and automobile.

During the thesis, an introduction was made to the various types of reservoirs existing on the market, having been more focused on composite tanks. It was also discussed the different production processes of the various types of reservoirs, with more attention paid to the filament winding process, since this is the main process used to produce composite tanks.

A brief approach was also given to some forms of sizing currently available on the market, as well as the various standards to be followed during the production of composite tanks.

Finally, in the last chapter of the thesis, a type IV pressure vessel was designed with the function of storage 24 liters of hydrogen at 30 MPa of pressure. During the development of the reservoir, the Theory Netting Analysis and a finite element program named ABAQUS® 2017, were used to calculate the thicknesses of the helical and hoop layers of the pressure vessel. During the simulations executed in the program ABAQUS® 2017, several simulations were made. In the end, a comparison is made between the several solutions found.



## Agradecimentos

Na realização desta tese, tive a ajuda de múltiplas pessoas às quais estou profundamente grato. Desde já quero agradecer:

Ao Professor Doutor António Torres Marques que foi o meu supervisor, que esteve sempre pronto para me ajudar, acabando por se tornar uma pessoa indispensável na realização deste Tese.

Ao meu cossupervisor Professor Doutor Francisco Andrade Pires que me ajudou na elaboração da simulação do reservatório em compósitos.

Ao Engenheiro Pedro Vieira, por me ter apoiado na minha pesquisa e ajudado a definir os parâmetros para o reservatório.

Ao Mestre Fernando Macedo, que foi uma ajuda indispensável na elaboração da simulação do reservatório de pressão em sistemas compósitos no programa ABAQUS®.



# Índice de Conteúdos

1	Introdução .....	1
1.1	Enquadramento do projeto e motivação .....	2
1.2	Objetivos do projeto .....	2
1.3	Estrutura da Tese .....	2
2	Processo de enrolamento filamentar .....	3
2.1	Materiais .....	5
2.1.1	Fibras (Reforço).....	5
2.1.1.1	Fibras de carbono.....	6
2.1.1.2	Fibras Aramídicas.....	6
2.1.1.3	S-Glass.....	6
2.1.1.4	E-Glass.....	6
2.1.2	Matriz polimérica (Resina).....	6
2.1.3	Compatibilidade entre as fibras e a resina .....	9
2.2	Impregnação.....	9
2.3	Fatores que afetam as propriedades dos compósitos .....	11
2.4	Ângulo de enrolamento .....	12
3	Reservatórios de pressão .....	15
3.1	Tipo de reservatórios.....	16
3.2	Produção dos reservatórios .....	17
3.2.1	Tipo I.....	17
3.2.2	Tipo II.....	18
3.2.3	Tipo III.....	18
3.2.4	Tipo IV .....	18
3.2.4.1	Moldação rotacional .....	18
3.2.4.2	Moldação por injeção .....	20
3.2.4.3	Moldação por sopro.....	21
3.2.5	Tipo V .....	24
4	Permeabilidade .....	27
4.1	Cálculo da permeabilidade.....	29
5	Inspeção de reservatórios em compósitos e os principais modos de rotura .....	31
5.1	Inspeção dos reservatórios .....	31
5.2	Principais modos de fratura de reservatório em compósitos .....	33
6	Critérios de dimensionamento de reservatórios .....	35
6.1	Reservatório de material isotrópico (Tipo I) .....	35
6.1.1	Reservatório de parede fina ( $r/t \geq 10$ ).....	35
6.1.2	Reservatório de parede espessa ( $r/t < 10$ ).....	37
6.2	Reservatório em compósitos.....	39
6.2.1	Teoria Netting Analysis.....	39
6.2.2	Teoria clássica dos laminados compósitos .....	41
6.2.3	Modelação em ABAQUS® (software) .....	42
7	Especificações/design do reservatório.....	43
7.1	Especificações.....	43
7.2	Design .....	43
7.3	Materiais .....	44
7.3.1	Liner.....	44
7.3.2	Compósito.....	45
7.3.3	Partes metálicas .....	45

8	Dimensionamento do reservatório .....	47
8.1	Dimensionamento do liner (permeabilidade) .....	47
8.2	Dimensionamento do compósito .....	49
8.2.1	Calculo espessura do compósito (teoria Netting Analysis) .....	49
8.2.2	Dimensionamento do compósito a partir do ABAQUS® .....	50
8.2.2.1	Solução 1 .....	51
8.2.2.2	Solução 2 .....	58
8.3	Discussão dos resultados .....	65
9	Conclusões e trabalhos futuros .....	67
9.1	Conclusões .....	67
9.2	Trabalhos Futuros .....	68
10	Referências .....	69
ANEXO A:	Modificações feitas ao longo do projeto .....	73
ANEXO B:	Desenhos 2D .....	75

## Siglas

$\alpha$	Ângulo de enrolamento (radianos)
L	Cumprimento do reservatório (m)
R	Distância radial do eixo do reservatório até ao ponto atual da camada (m)
$R_0$	Distância radial do eixo do reservatório até ao ponto de início da curvatura da cúpula (m)
$R_{tl}$	Raio do cilindro na linha tangente da cúpula (m)
$\delta$	Parâmetro que controla o enrolamento geodésico
BW	Largura das bandas (m)
t	Espessura da camada de compósitos (m)
$t_{tl}$	Espessura da camada em $R_{tl}$ (m)
K	Kelvin
$\sigma_{adm}$	Tensão admissível (Pa)
$\sigma_{ced}$	Tensão de cedência (Pa)
S	Coeficiente de segurança (0 a 1)
t	Espessura (m)
p	Pressão interna (Pa)
r	Raio(m)
$\sigma_t$	Tensão tangencial (Pa)
$\sigma_l$	Tensão longitudinal (Pa)
$\sigma_{equiv}$	Tensão equivalente de Tresca (Pa)
N	Coeficiente de segurança (>1)
$p_i$	Pressão interna (Pa)
a	Raio interno (m)
b	Raio externo (m)
$\sigma_r$	Tensão radial (Pa)
E	Modulo de Young (Pa)
$\varepsilon_l$	Deformação longitudinal
$\nu$	Coeficiente de Poisson
$\sigma_f$	Tensão de rotura das fibras (Pa)
$t_{f\phi}$	Espessura das camadas de fibras helicoidais (m)
$N_\phi$	Força por unidade comprimento na direção longitudinal (N/m)
$t_{f\theta}$	Espessura das camadas de fibras circunferenciais (m)
$N_{\theta total}$	Força por unidade comprimento na direção circunferencial (N/m)
$N_\theta$	Força por unidade comprimento suportadas pelas fibras circunferenciais (N/m)

$\varepsilon_i$	Deformação na direção i
$E_i$	Módulo de Young na direção i (Pa)
$G_{ij}$	Módulos de corte (Pa)
$\nu_{32}$	Coefficiente de Poisson
$X_T$	Tensão longitudinal de resistência à tração (Pa)
$X_C$	Tensão longitudinal de resistência à compressão (Pa)
$Y_T$	Tensão transversal de resistência à tração (Pa)
$Y_C$	Tensão transversal de resistência à compressão (Pa)
S	Tensão de corte no Plano (Pa)

## Índice de Figuras

Figura 1- Processo de enrolamento filamentar [4] .....	3
Figura 2-Representação esquemática das técnicas de enrolamento de filamentos [61] .....	4
Figura 3- Tipos de Matrizes poliméricas [7] .....	7
Figura 4 – angulo de enrolamento num reservatório [12] .....	13
Figura 5- Constantes da equação (2) [14].....	13
Figura 6- Modos de rebentamento [14] .....	15
Figura 7-Reservatório Tipo I [57] .....	16
Figura 8-Reservatório Tipo II [58] .....	16
Figura 9-Reservatório tipo III (liner de alumínio) [59] .....	17
Figura 10-Metal spinnig [22].....	17
Figura 11 – Moldação rotacional [25] .....	18
Figura 12 – Moldação por injeção [26] .....	20
Figura 13 - Moldação sopro por extrusão [31] .....	22
Figura 14 - Moldação sopro por injeção [31] .....	22
Figura 15- Moldação sopro por estiramento [33] .....	23
Figura 16- Processo de produção e reservatórios com o mandril removível [20].....	24
Figura 17- Fabricação de um mandril de areia [35] .....	25
Figura 18- Fabricação de um mandril de Aquapour [35] .....	25
Figura 19- Típico uso do EOVB [39].....	29
Figura 20-Parte cilíndrica do reservatório [44] .....	35
Figura 21 – Topos do reservatório [45] .....	36
Figura 22- Cilindro de parede espessa, de raio interior a e exterior b. [46] .....	37
Figura 23- Distribuição de tensões para um cilindro sujeito a pressão interna [46] .....	38
Figura 24- Equilíbrio forças das camadas helicoidais - sentido longitudinal. [62] .....	39
Figura 25- Simulação de um reservatório em ABAQUS® [48] .....	42
Figura 26-Desenho de um reservatório Tipo III da AMTROL ALFA [49] .....	43
Figura 27 – Desing base das partes metálicas [48].....	44
Figura 28 – Alternativa para melhorar a permeabilidade do reservatório [55]. .....	48
Figura 29-Distribuição das tensões no reservatório com a espessura calculada pela teoria Netting Analysis (90MPa) .....	50
Figura 30- Simulação reservatório (30 MPa-solução 1).....	52
Figura 31- Simulação liner (30 MPa-solução 1) .....	52
Figura 32- Simulação peça metálica superior (30 MPa-solução 1).....	52
Figura 33- Simulação peça metálica inferior (30 MPa-solução 1).....	52
Figura 34- Simulação reservatório (45 MPa-solução1).....	53

Figura 35- Simulação liner (45 MPa-solução1) .....	53
Figura 36- Simulação peça metálica superior (45 MPa-solução1).....	53
Figura 37- Simulação peça metálica inferior (45 MPa-solução1).....	53
Figura 38- Simulação reservatório (90 MPa-solução1).....	54
Figura 39- Simulação liner (90 MPa-solução1) .....	54
Figura 40- Simulação peça metálica superior (90 MPa-solução1).....	54
Figura 41- Simulação peça metálica inferior (90 MPa-solução1).....	54
Figura 42- Simulação reservatório (30 MPa-solução 2).....	59
Figura 43- Simulação liner (30 MPa-solução 2) .....	59
Figura 44- Simulação peça metálica superior (30 MPa-solução 2).....	59
Figura 45- Simulação peça metálica inferior (30 MPa-solução 2).....	59
Figura 46- Simulação reservatório (45 MPa-solução 2).....	60
Figura 47- Simulação liner (45 MPa-solução 2) .....	60
Figura 48- Simulação peça metálica superior (45 MPa-solução 2).....	60
Figura 49- Simulação peça metálica inferior (45 MPa-solução 2).....	60
Figura 50- Simulação reservatório (90 MPa-solução 2).....	61
Figura 51- Simulação liner (90 MPa-solução 2) .....	61
Figura 52- Simulação peça metálica superior (90 MPa-solução 2).....	61
Figura 53- Simulação peça metálica inferior (90 MPa-solução 2).....	61
Figura 54- Tensão radial, longitudinal, circunferencial e de corte no reservatório ((solução 2- 90 MPa)).....	62
Figura 55- Algumas mudanças feitas nas peças metálicas .....	73

## Índice de Gráficos

Gráfico 1--Influência da fração volúmica da fibra na pressão de arrebentamento [11].....	12
Gráfico 2- Evolução dos preços com o aumento da produção [60].....	20
Gráfico 3- Permeabilidade de vários polímeros [63].....	27
Gráfico 4- Permeabilidade de vários tipos de materiais [39] .....	28
Gráfico 5 Variação da permeabilidade do PA6 com a pressão [54].....	47
Gráfico 6- Evolução da tensão de Von Mises nas camadas compósitas ao logo do comprimento do reservatório (solução 1- 90 MPa) .....	55
Gráfico 7- Deslocamento radial (solução 1- 90 MPa).....	56
Gráfico 8-Deslocamento longitudinal (solução 1- 90 MPa).....	57
Gráfico 9- Evolução da tensão de Von Mises nas camadas compósitas ao logo do comprimento do reservatório (solução 2- 90 MPa) .....	62
Gráfico 10- Deslocamento longitudinal (solução 2- 90 MPa).....	64
Gráfico 11-Deslocamento radial (solução 2- 90 MPa).....	64
Gráfico 12-Distribuição da espessura das camadas compósitas.....	66



## Índice de Tabelas

Tabela 1- Resumo propriedades das fibras [6] .....	5
Tabela 2- Comparação qualitativa de algumas resinas [8] .....	8
Tabela 3 – Comparação qualitativa entre Dry Winding e Wet Winding [10] .....	10
Tabela 4- Influência das variáveis de fabrico na resistência e qualidade das peças fabricadas [11] .....	11
Tabela 5-Permeabilidade do hidrogénio de vários termoplásticos [38] .....	28
Tabela 6- Fração volúmica de fibras [47].....	41
Tabela 7- Propriedades do PA6 para moldação e extrusão [50] (valores médios).....	44
Tabela 8-Propriedades do compósito T300/914 [51] .....	45
Tabela 9-Propriedades do alumínio 2014-T6 [52] .....	45
Tabela 10- Propriedades do alumínio 7075-T6 [53] .....	46
Tabela 11- Configuração das camadas na solução 1 .....	51
Tabela 12-Tipos/número de elementos usados na solução 1.....	51
Tabela 13-Massa das peças do reservatório (solução 1).....	56
Tabela 14- Configuração das camadas na solução 2 .....	58
Tabela 15- Tipos/número de elementos usados na solução 2.....	58
Tabela 16-Massa das peças do reservatório (solução 2).....	63
Tabela 17-Tensões máximas nas várias partes do reservatório (tensões em MPa).....	65
Tabela 18 – Comparação da espessura das duas soluções encontradas .....	65



## 1 Introdução

Atualmente, existe a necessidade de materiais com uma combinação de propriedades que não é encontrada em ligas metálicas convencionais, cerâmicos e materiais poliméricos. Como tal, surgiu a necessidade do desenvolvimento de sistemas compósitos (combinação entre dois ou mais materiais com propriedades distintas). Esta afirmação é verdadeira particularmente quando estamos a falar de materiais utilizados nos transportes e na aeronáutica. Por exemplo, no caso da indústria aeronáutica existe a necessidade de materiais resistentes a impactos, baixa densidade, elevada rigidez, resistência a corrosão e à fadiga.

No caso de compósitos constituídos por duas fases, uma é denominada matriz sendo esta responsável por transferir os esforços mecânicos para o reforço e por garantir a tenacidade, resistência a fadiga e à corrosão do material compósito. Por outro lado, o reforço tem a função de suportar os esforços transferidos pela matriz, sendo para isso necessário existir uma boa afinidade química entre ambos.

Os compósitos não são de origem recente, por exemplo, antigamente os tijolos eram produzidos a partir do barro e capim seco, formando assim um compósito. O desenvolvimento dos compósitos foi muito lento em comparação aos metais. Os compósitos de fibra de vidro foram os primeiros compósitos à base de fibras a serem desenvolvidos (em meados do século XVIII), mas só foram comercialmente utilizados a partir do ano de 1939, no decorrer da Segunda Guerra Mundial. Após a guerra mundial apareceram as primeiras “fibras avançadas”, primeiramente as fibras de boro no final da década de 1950 e por fim as fibras de carbono no final da década de 1960. [1]

O interesse nos compósitos está ligado a dois fatores: o fator económico e fator desempenho. O fator económico vem do facto dos materiais compósitos serem mais leves para a mesma função que os materiais metálicos (redução de massa pode chegar a 30% ou mais), o que implica uma redução nos consumos de combustível (aeronáutica e aeroespacial), podendo-se assim reduzir os custos.

Com o aumento do uso dos compósitos surgiu a necessidade de programas que permitem avaliar o comportamento dos compósitos, permitindo assim uma redução dos custos/tempo associados a produção de amostras para ensaios.

## 1.1 Enquadramento do projeto e motivação

Nos dias de hoje, os reservatórios em compósitos têm tido uma grande utilidade principalmente na indústria dos gases, porque consegue-se produzir reservatórios com um peso consideravelmente mais baixo quando comparado com um reservatório em metal.

A redução de peso dos reservatórios em compósitos em relação aos de metal nos veículos de transporte de líquidos/gases e nos reservatórios de combustível de um carro permitindo a redução do consumo de combustível, o que vai conduzir a uma redução dos custos, criando assim um interesse económico nos sistemas compósitos.

O estudo dos reservatórios tem uma grande relevância, visto existir uma necessidade de estudar a disposição/distribuição das fibras de modo a se conseguir minimizar o peso do reservatório, diminuindo assim o custo de produção. Por outro lado, existem normas a cumprir dando assim um nível de segurança maior.

## 1.2 Objetivos do projeto

Ao longo desta tese pretende-se desenvolver um reservatório em compósitos com um *liner* de polietileno, sendo preparado para aguentar altas pressões. A realização da tese vai ser dividida nas seguintes fases:

- Definição de requisitos, avaliação de normas e conceitos;
- Definição de conceitos e aplicação de princípios de desenvolvimento de produto;
- Seleção de materiais e tecnologias;
- Simulação numérica para o projeto mecânico;
- Realização do relatório final.

## 1.3 Estrutura da Tese

A tese está organizada por vários capítulos, tendo como objetivo principal abordar os vários processos realizados de produção dos reservatórios, como também as várias etapas realizadas antes de um reservatório chegar ao mercado (exemplo: escolha dos materiais, dimensionamento do reservatório e inspeção final).

Do capítulo 2 ao 4, é realizada uma abordagem dos vários tipos de reservatórios existentes no mercado, sendo consequentemente apresentado as suas vantagens/desvantagens e o seu processo de fabrico.

No capítulo 5 é feita uma abordagem rápida as normas existentes no mercado como também os principais modos de fratura nos reservatórios.

No capítulo 6 são apresentados vários métodos possíveis para o dimensionamento de reservatório existentes no mercado.

No capítulo 7 é feita uma breve abordagem ao design do reservatório escolhido, como também das várias matérias-primas escolhidas para o reservatório.

No capítulo 8 é feito o dimensionamento dos vários constituintes do reservatório, e discutidas as soluções obtidas.

E por fim, no capítulo 9, é feita a conclusão final e apresentados possíveis trabalhos futuros.

## 2 Processo de enrolamento filamental

O processo de enrolamento filamental é um meio eficiente e frequentemente usado para fabricar reservatórios de pressão, isto porque este processo permite ao projetista otimizar o reservatório, colocando as fibras ao longo das direções das tensões principais. Por outro lado, se fosse utilizado um material isotrópico, as propriedades na direção longitudinal eram desperdiçadas isto porque a tensão nesta direção é metade da tensão circunferencial. Devido a eficiência oferecida por este processo, esta técnica tem vindo a ser usada na construção de uma grande variedade de reservatórios de pressão nos anos após a Guerra Mundial II. Outros exemplos do uso deste processo são tubos, remos, carcaças dos mísseis e postes de iluminação. [2]

As peças produzidas a partir deste processo possuem razões de rigidez/peso bastante altas, tendo um alto grau de controlo sobre a uniformidade e a orientação do enrolamento que, quando automatizado, torna-se um processo economicamente atrativo.

A primeira parte do processo é a seleção dos materiais, seleccionando a combinação fibras/resina tendo em conta a sua compatibilidade e qual vai ser a sua aplicação. Neste processo pode-se usar rolos de fibras já pré-impregnados ou então a mistura das fibras e resina pode ser feito na ocasião. Na segunda parte do processo, os filamentos (fibras/resina) são enrolados sob tensão sobre um mandril rotativo (Eixo 1), enquanto as fibras se deslocam horizontalmente (Eixo 2), colocando fibras no padrão ou ângulo desejado (Figura 1). Para além destes dois graus de liberdade existem máquinas que possuem mais graus de liberdade tais como o deslocamento vertical, permitindo assim uma melhor liberdade na distribuição dos filamentos. Após a primeira fase, a peça é colocada num forno com temperatura controlada ou num local à temperatura ambiente dependendo da resina utilizada. Depois da cura, a peça está pronta a ser utilizada. [3]

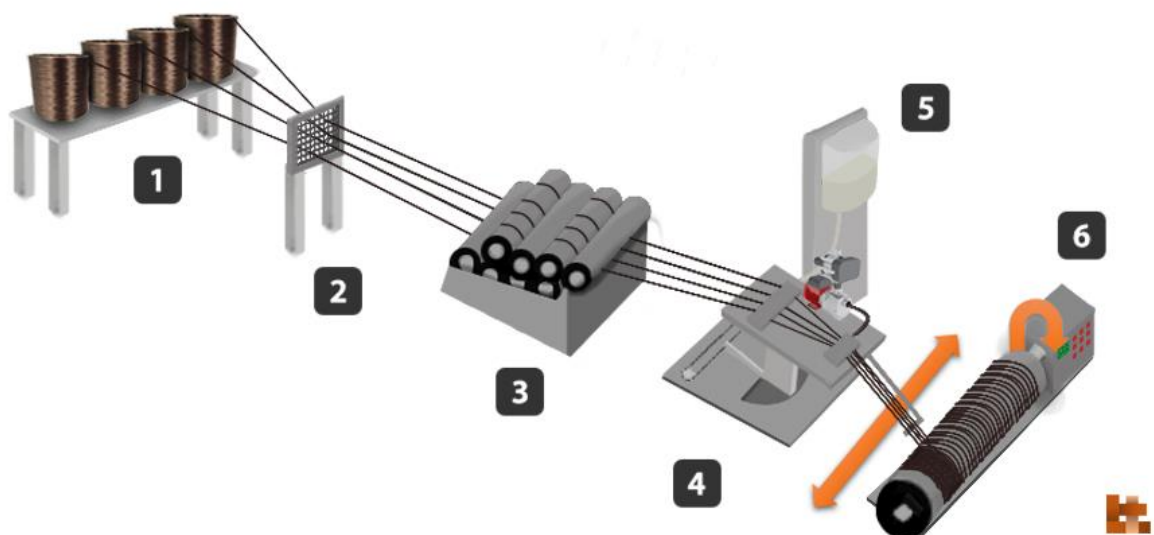


Figura 1- Processo de enrolamento filamental [4]

O processo de enrolando filamental pode ser classificado como contínuo ou descontínuo. O processo contínuo é usado para fabricar tubos de baixa pressão continuamente sobre um mandril formando um “tubo sem fim”. Os tubos fabricados através deste processo são normalmente utilizados em redes de transmissão (água, esgotos, águas residuais). E por fim o processo de enrolamento descontínuo é usado para fabricar peças de alta pressão, tubos,

reservatórios de pressão e componentes complexos. Máquinas de múltiplos eixos são usadas para personalizar o ângulo enrolando da fibra, obtendo um melhor aproveitamento. [5]

São possíveis vários padrões de enrolamento (isto é, circunferencial, helicoidal e polar), de forma a dar as características mecânicas desejadas, como está mostrado na Figura 2.

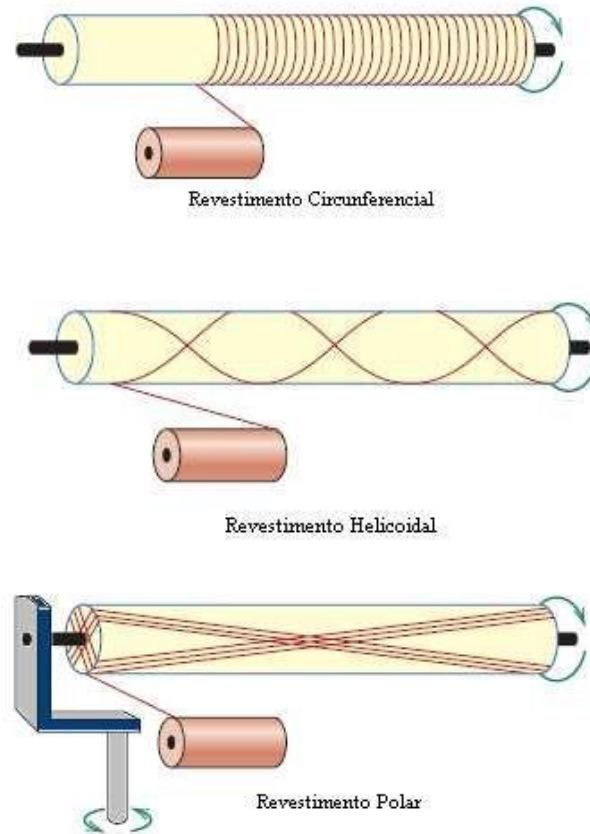


Figura 2-Representação esquemática das técnicas de enrolamento de filamentos [61]

A tensão de enrolamento é um elemento crítico na construção de estruturas compósitas. Se a tensão for baixa, a estrutura laminada compósita terá menor resistência mecânica e desempenho. Se a tensão for muito alta, os fios podem sofrer desgaste dos suportes, por outro lado a relação resina/fibra no laminado pode também aumentar para além de um limite aceitável resultando em laminados mais fracos. Os tensores de fibra de vidro podem conferir uma tensão seca ou molhada, dependendo da sua localização, antes ou após a impregnação dos fios das fibras. [5]

### Vantagens

- O processo pode ser um método muito rápido;
- A percentagem de resina pode ser controlada através da medição da resina sobre cada fio de fibra através de intervalos ou matrizes;
- O custo de fibra é minimizado, uma vez que não há processo secundário para converter a fibra em tecido antes do uso;
- As propriedades estruturais dos laminados podem ser muito boas, uma vez que as fibras retas podem ser colocadas num padrão complexo para corresponder às cargas aplicadas.

## Desvantagens

- Dífícil fabrico de peças de forma não convexa;
- A fibra não pode ser facilmente colocada ao longo do comprimento de um componente;
- Os custos de mandril para componentes grandes podem ser elevados;
- A superfície externa do componente é não moldada e, portanto, cosmeticamente não atraente.

## 2.1 Materiais

No enrolamento filamentar são usados pelo menos duas matérias-primas, as fibras e as resinas. Nesta secção irei falar uma pouco destes materiais, comparando algumas das suas características.

### 2.1.1 Fibras (Reforço)

As fibras têm como principal função absorver a maior parte dos esforços transmitindo ao compósito, como tal é importante saber escolher que tipo de fibra se deve usar para cada aplicação. Atualmente as fibras mais usadas no mercado são as fibras de vidro devido a sua boa relação preço/qualidade.

Na Tabela 1, podemos ver comparação das propriedades de 4 tipos de fibras, podendo variar um pouco as propriedades dependendo de como forem fabricadas.

Tabela 1- Resumo propriedades das fibras [6]

<b>Propriedades</b>	<b>Carbono</b>	<b>Kevlar</b>	<b>S-Glass</b>	<b>E-Glass</b>
Tensão de rotura (MPa)	3445	3260	3970	2275
Modulo de Young (GPa)	228	128	88	71
Alongamento máximo (%)	1.7	2.5	5.3	4.3
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1.8	1.44	2.48	2.57
Resistência à fadiga	Excelente	Bom	Excelente	Bom
Resistência ao impacto	Razoável	Excelente	M. Bom	Bom
Tensão de compressão	Excelente	Razoável	M. Bom	Bom
Modulo de compressão	Excelente	Bom	M. Bom	Bom
Resistência a flexão	Excelente	Bom	M. Bom	Bom
Modulo de flexão	Excelente	M. Bom	M. Bom	Bom
Resistência ao corte entre camadas	Excelente	Razoável	Excelente	Excelente

### 2.1.1.1 Fibras de carbono

É a fibra com a maior relação rigidez/peso possuindo um bom módulo de Young de 228 GPa a 588GPa. As fibras de carbono baseadas em PAN têm um peso específico baixo de 1,8 g/cm<sup>2</sup> e excelente resistência à tração e compressão.

Os compósitos à base das fibras de carbono, devido às suas boas propriedades, permitem melhorar o desempenho de praticamente qualquer produto, baixando o seu peso e melhorando a sua rigidez. Projetado corretamente podem ser uma alternativa rentável aos materiais tradicionais, o único problema é o preço superior em relação a outras fibras, tornando-se não rentável para alguns projetos.

### 2.1.1.2 Fibras Aramídicas

Possuem uma massa específica de 1.44 g/cm<sup>2</sup> comparado com 2.48 g/cm<sup>2</sup> das fibras de vidro, sendo mais rígido que as fibras E-vidro e o alumínio. A tensão de “cedência” das fibras aramídicas aproxima-se da das fibras de carbono. Um tipo de fibra aramídica bastante conhecida é o KEVLAR<sup>®</sup>, sendo o melhor tipo de fibra para resistir a impactos de altas velocidades, sendo bastante usada em coletes à prova de bala.

### 2.1.1.3 S-Glass

O vidro de alta resistência oferece seis propriedades vitais essenciais para aplicações exigentes: resistência (40% maior que *E-Glass*), resistência ao impacto (maior resistência do que *E-Glass*), rigidez (20% acima de *E-Glass*), resistência à temperatura (200 °C mais resistente que *E-Glass*), fadiga (vida mais longa para peças altamente que sobre de fadiga) e é invisível ao radar.

A "*S-Glass* família" é composto por três produtos únicos: o *S-2 Glass*, Vetron e Zentron. Em comparação com o *E-Glass*, os produtos *S-Glass* reduzem o peso e melhoram todas as propriedades mecânicas a um preço moderado. Quando comparada com fibra de aramídica ou de carbono, a família *S-Glass* pode oferecer melhor propriedades mecânicas/custo.

### 2.1.1.4 E-Glass

Oferece uma excelente relação rigidez/preço. Está disponível uma grande variedade de fios o que permite um potencial de design ilimitado em estilos de tecido. O *E-Glass* tem uma boa estabilidade dimensional, resistência à humidade e a produtos químicos com um excelente isolamento térmico e elétrico a baixo custo.

## 2.1.2 Matriz polimérica (Resina)

A resina tem como função transferir as solicitações para as fibras, bem como proteger as fibras dos danos provocados que pelo meio ambiente ou da utilização. Na maior parte dos casos pode-se dizer que a resina concede muita pouca resistência ao compósito, mas por outro lado quando o compósito está sujeito a forças compressivas a matriz diminui bastante a possibilidade de encurvadura das fibras.

Atualmente, existe uma grande variedade de matrizes poliméricas utilizadas no fabrico de compósitos, estando estas agrupadas em dois grupos: matrizes termoendurecíveis e matrizes termoplásticas (Figura 3).

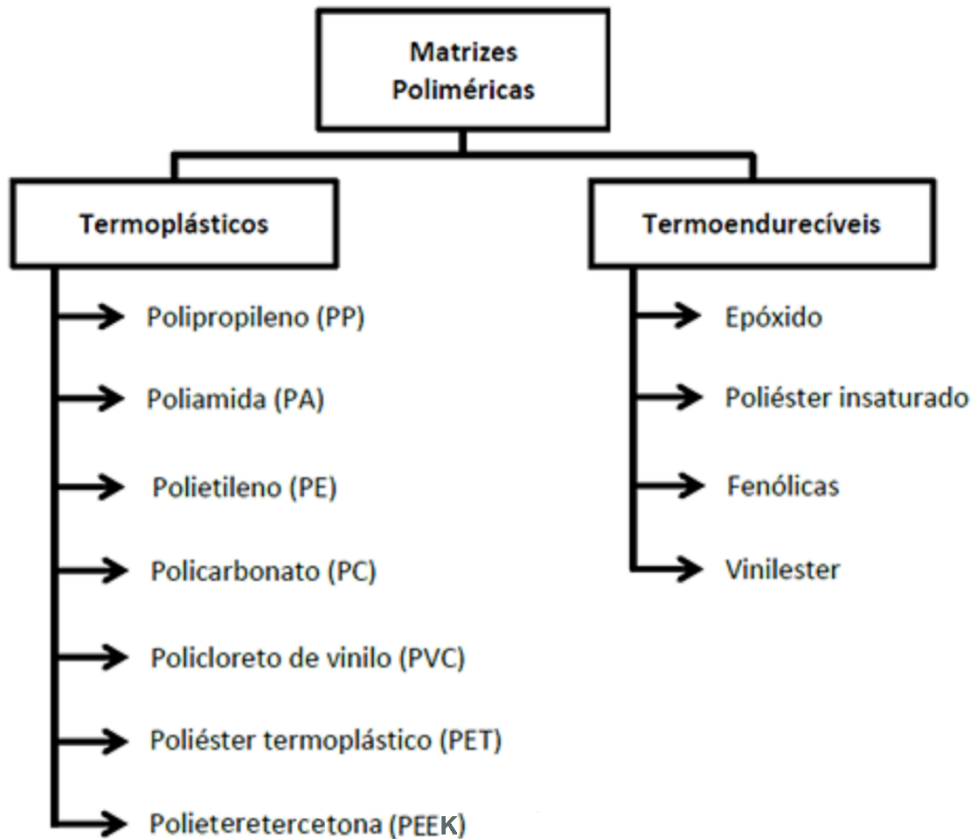


Figura 3- Tipos de Matrizes poliméricas [7]

Os termoendurecíveis são característicos por conseguir suportar temperaturas mais altas, quando comparados com os termoplásticos, possuindo também uma elevada rigidez e uma boa estabilidade térmica e dimensional. Estas resinas permitem uma fácil impregnação das fibras, mas, por outro lado, o processo de cura não é rápido, implicando um aumento do tempo de produção, sendo por vezes ainda necessário adicionar calor para completarem a cura. Para além das limitações anteriormente referidas os termoendurecíveis não podem ser facilmente reciclados devido à decomposição do material ocorrer antes da sua fusão.

No caso dos termoplásticos, as suas propriedades são dependentes do tamanho das cadeias moleculares, o que não acontecia nos termoendurecíveis. Os termoplásticos são característicos por poderem ser reciclados, reprocessados, possuindo uma maior tenacidade à fratura e podem ser processados rapidamente. No entanto, possuem uma grande desvantagem que é a elevada viscosidade, exigindo que o processamento se realize a temperaturas e pressões elevadas, resultando num custo maior e uma probabilidade maior de danificar as fibras.

A escolha do tipo de matriz polimérica a usar, depende muito das exigências que são feitas ao produto final. Para além dos fatores já mencionados anteriormente, o que influencia mais a escolha da matriz polimérica são o custo, desempenho térmico e o desempenho mecânico. [7]

Na Tabela 2, é possível ver dados qualitativos das propriedades de algumas resinas termoendurecíveis, sendo este grupo de resinas o mais utilizado no processo de enrolamento filamentar.

Tabela 2- Comparação qualitativa de algumas resinas [8]

<b>Resinas</b> <b>Propriedades</b>	<b>Poliéster saturado</b>	<b>Epóxico</b>	<b>Fenólica</b>	<b>Furamica</b>	<b>Melamina</b>	<b>Silicone</b>
<b>Pressões de moldação</b>	Muito baixas/média	Muito baixas/média	Baixa/ alta	Baixa/ alta	Média/ muito alta	Baixa/ alta
<b>Possibilidade de cores</b>	Muito boa	Boa	Limitada	Muito limitada	Muito boa	Boa
<b>Propriedades Mecânicas</b>	Muito boas	Excelentes	Muito boas	Boas	Muito boas	Razoáveis
<b>Propriedades elétricas</b>	Excelentes	Excelentes	Boas	Boas	Excelentes	Excelentes
<b>Resistência ao calor</b>	Boa	Razoável/boa	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
<b>Resistência à água</b>	Muito boa	Excelente	Muito boa	Muito boa	Razoável	Boa
<b>Flamabilidade</b>	Arde lentamente	Arde lentamente	Auto extingüível	Muito boa	Auto extingüível	Nula
<b>Preço</b>	Médio/baixo	Alto	Baixo	Médio/baixo	Médio/alto	Alto
<b>Maiores limitações</b>	Contração a cura	Custo alto	Necessidade de calor e pressão para cura	Cura difícil de controlar; baixa resistência	Custo alto; altas pressões para cura	Custo elevado; Propriedades mecânicas razoáveis/baixas
<b>Maiores vantagens</b>	Pode ser curada sem aplicação de calor ou pressão, sendo uma excelente resina de uso geral	Boas propriedades mecânicas e excelente resistência ao calor	Boas propriedades mecânicas e excelente resistência ao calor	Boa resistência química e ao calor	Muito boa resistência ao arco elétrico	Resistente ao calor e excelentes propriedades elétricas

### 2.1.3 Compatibilidade entre as fibras e a resina

É muito importante a existência de compatibilidade entre a resina e as fibras. Na produção da fibra esta é revestida com um revestimento superficial o que torna compatível com certos tipos de resina. É importante assegurar uma boa aderência entre os dois, de forma que as tensões sejam transferidas para as fibras. Por outro lado, se a adesão se a adesão for elevada o compósito torna-se frágil.

A resina também deve ser capaz de penetrar no conjunto de filamentos, distribuindo-se por cada fibra. Ao mesmo tempo, a viscosidade não deve ser muito baixa, isto porque não convém que a resina escorra do compósito antes da cura terminar. Também se deve ter em conta a temperatura durante a cura, de modo que o compósito não perda as suas propriedades. [9]

## 2.2 Impregnação

As fibras e a resina são unificadas por um processo chamado impregnação. Os tipos de impregnação mais comuns usam o *dry winding* (pré-impregnados) e o *wet winding* (*enrolamento húmido*).

O *dry winding* são *rovings* já pré-impregnados oferecendo um bom controlo do teor de resina e da largura de banda. Na maior parte das resinas de alto-desempenho podem ser pré-impregnados por processo especiais, como por exemplo o processo de derretimento a quente (*hot melt*). Este tipo de impregnação permite uma maior taxa de produção e adesão ao mandril, mas por outro lado necessitam de ser armazenados em zonas refrigeradas. Durante o processo são usados bastantes solventes ou conservantes de modo a prolongar o prazo de armazenamento, mas deve-se evitar um uso exagerado visto que podem dificultar o desenrolamento. Caso estes voláteis fiquem presos ao compósito durante a cura, estes podem baixar a resistência mecânica do produto final.

O *wet winding* pode ser obtido a partir de um banho das fibras em resina. Trata-se de um processo de baixo custo sendo muito usado em aplicações comerciais com resinas à base de poliéster insaturado. A penetração da resina nas fibras pode ser controlada através destes parâmetros: temperatura do banho de resina, aumento do tempo do banho.

Na Tabela 3, podemos ver uma comparação qualitativa entre os dois métodos.

Tabela 3 – Comparação qualitativa entre *Dry Winding* e *Wet Winding* [10]

<b>Processo de Impregnação / Parâmetro</b>	<b><i>Dry Winding</i></b>	<b><i>Wet Winding</i></b>
<b>Limpeza</b>	Melhor	Pior
<b>Disponibilidade de Fibra</b>	Pobre. Nem todas as fibras servem	Melhor. Qualquer fibra serve
<b>Controlo do Teor de Resina</b>	Melhor	Pior
<b>Qualidade</b>	Melhor	Pior
<b>Capacidade de Uso em Sistemas Complexos</b>	Boa	Difícil. Impregnadores complexos
<b>Fibras à base de Grafite Encapsuladas</b>	Sim	Não
<b>Dano à Fibra</b>	Depende do impregnador	Dano não provável
<b>Custo</b>	Elevado	Baixo
<b>Atravancamento do Roving</b>	Depende do impregnador	Qualquer
<b>Temperatura Ambiente para Cura</b>	Impossível	Possível
<b>Formulação de Resina Simples</b>	Possível	Necessária
<b>Velocidade de Enrolamento</b>	Pode ser elevada	Baixa
<b>Estabilidade em Trajet. Não-Geodésicas</b>	Altamente possível	Baixa

### 2.3 Fatores que afetam as propriedades dos compósitos

Existem muitos fatores que podem afetar as propriedades do compósito no enrolamento filamentar. D. Cohen estudou a influência de 50 parâmetros no processo, listando no final os 12 parâmetros com maior influência na Tabela 4, sendo contabilizado na tabela a influência de cada parâmetro em percentagem. [11]

Tabela 4- Influência das variáveis de fabrico na resistência e qualidade das peças fabricadas [11]

<b>Ranking</b>	<b>Variável</b>	<b>Percentagem</b>
1	Tensão de enrolamento	71
2	Variação da resistência à tração das fibras	62
3	Sequência das camadas	62
4	Tempo de resina no <i>B stage</i> (Tempo de enrolamento)	57
5	Dano causado na fibra no decorrer do enrolamento	57
6	Banho das Fibras	57
7	Gradiente da tensão de enrolamento	48
8	Componentes da resina	43
9	Tempo total de enrolamento	43
10	Tempo total de enrolamento entre camadas	43
11	Espessura da camada circunferencial	43
12	Cortar vs não cortar fibras helicoidais <sup>1</sup>	38

---

<sup>1</sup> Esta variável refere-se à forma como se fabricam alguns componentes (o que requer o corte de algumas camadas helicoidais durante a fabricação antes que a resina tenha gelificado completamente). Este processo de fabricação causa preocupação pois as camadas helicoidais podem se mover, causar rugas no compósito e degradar a resistência do reservatório.

No Gráfico 1, podemos ver a influência da fração volúmica da fibra, e como podemos ver o aumento da percentagem causa um aumento da resistência do reservatório o que era de se esperar, visto estarmos a aumentar a quantidade de fibra em relação a resina.

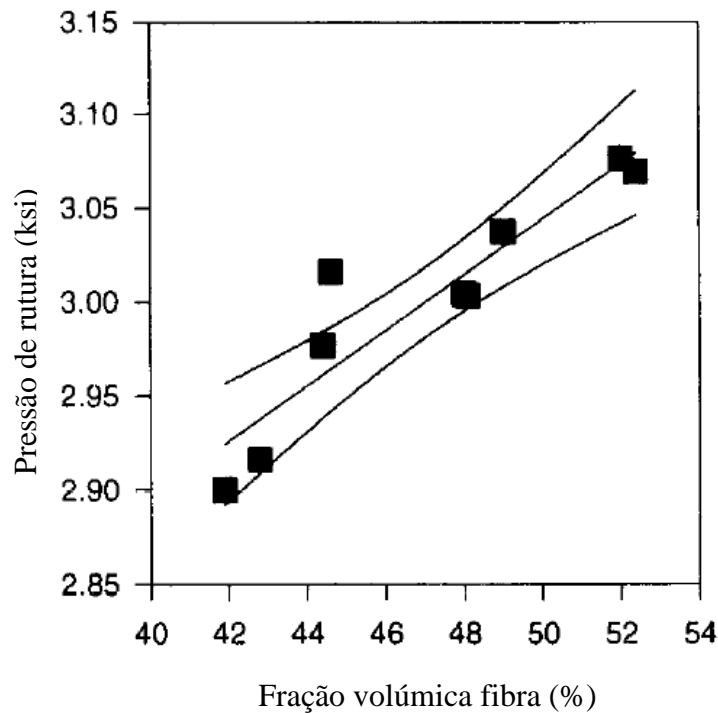


Gráfico 1--Influência da fração volúmica da fibra na pressão de arrebentamento [11]

## 2.4 Ângulo de enrolamento

O ângulo de enrolamento é um parâmetro importante na produção de reservatórios em compósitos, tendo efeitos significativos na sua estrutura. O modo de uso do angulo apropriado na produção dos reservatórios é muito importante. Na equação (1) podemos ver a equação que permite o cálculo do ângulo de enrolamento. O angulo  $\alpha$ , não tem de ser exatamente igual em todas a camadas, podendo-se assim obter um melhor desempenho. [12]

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{r_a + r_b}{L} \right) \quad (1)$$

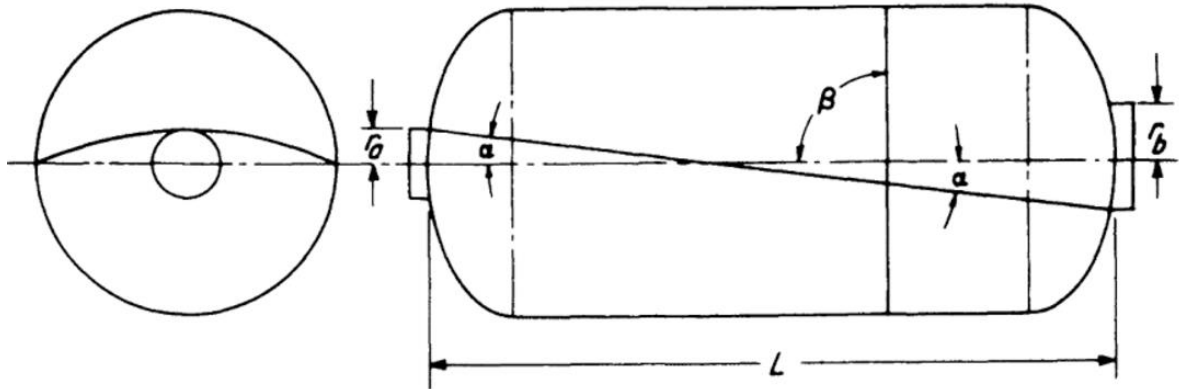


Figura 4 – ângulo de enrolamento num reservatório [12]

O ângulo de enrolamento nas camadas helicoidais não é uniforme ao longo da cúpula (parte esférica), ocorrendo uma variação dada pela seguinte equação:

$$\alpha(R) = \sin^{-1} \left( \frac{R_0}{R} \right) \mp \delta \left( \frac{R - R_0}{R_{tl} - R_0} \right)^n \quad (2)$$

onde  $R$  é a distância radial do eixo do reservatório até ao ponto atual da camada,  $R_0$  é a distância radial do eixo do reservatório até ao ponto de início da curvatura da cúpula,  $R_{tl}$  é o raio do cilindro na linha tangente da cúpula (ver Figura 5) e o por fim  $\delta$ , que é o parâmetro que controla o enrolamento geodésico. Se  $\delta$  escolhido for igual a zero (padrão de enrolamento sem atrito (enrolamento geodésico)), a equação (1) corresponde à formulação clássica de Clairaut [13]. A contabilização do atrito ( $\delta \neq 0$  (enrolamento não-geodésico)) permite escolher a localização do ponto de volta das fibras. O expoente  $n$  ajusta a influência do termo de atrito. E, por fim, a evolução da espessura da camada ao longo da cúpula também não é constante, sendo dada pela equação (3). [14]

$$t(R) = \frac{t_{tl} \times \cos(\alpha_{tl})}{\cos(\alpha_r)} \times \frac{R_{tl}}{R + BW \times \left( \frac{R - R_0}{R_{tl} - R_0} \right)^4} \quad (3)$$

onde  $BW$  é largura da banda e  $t_{tl}$  é a espessura da camada em  $R_{tl}$ .

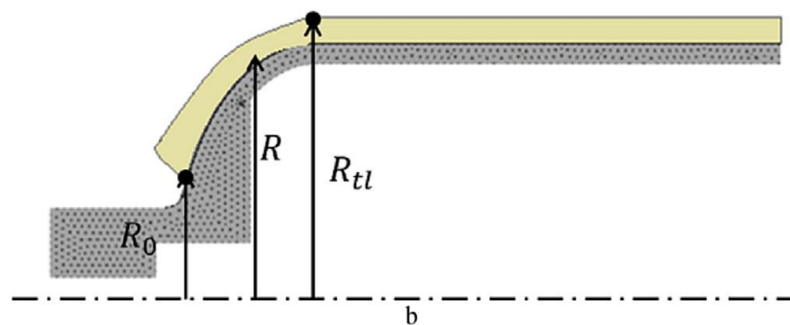


Figura 5- Constantes da equação (2) [14]



### 3 Reservatórios de pressão

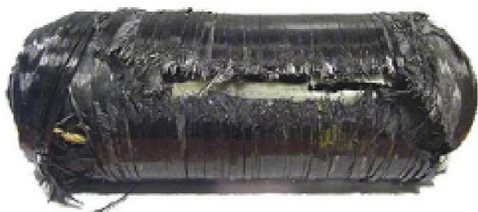
Um reservatório de pressão é um recipiente concebido para reter gases ou líquidos a uma pressão maior que a pressão ambiente.

O diferencial de pressão é perigoso, como tal o reservatório tem que respeitar as normas que podem depender do país. Por esta razão, um reservatório pode estar apto num país e noutro não. Os reservatórios são projetados com um fator de segurança tendo em conta vários fatores, tal como a pressão de serviço, corrosão e a temperatura de serviço e a sua variação. No final da sua construção, os reservatórios são sujeitos a ensaios não destrutivos, tais como ensaios ultrassónicos, radiografia e testes de pressão.

Típicas medidas de segurança adotadas pelo fabricante são, por exemplo, a aplicação do “*Leak before burst*”, ou seja, teoricamente o reservatório vai vazar antes do rebentamento impedindo acidentes, outra medida de segurança é o uso de uma válvula de segurança que não deixa a pressão interna transpor um valor predefinido e, por fim, é conceber a zona cilíndrica do reservatório menos resistente de modo a que o reservatório rebente antes pelos topos, causando assim uma maior segurança (Figura 6). [15] [16] [17]

Os reservatórios, teoricamente, podem assumir qualquer forma, mas as formas mais usadas são secções esféricas, cilíndricas ou cónicas. A forma mais usada é um cilindro com cabeças semielípticas. Teoricamente, um vaso de pressão esférico tem aproximadamente o dobro da resistência de um vaso de pressão cilíndrico com a mesma espessura de parede e é a forma ideal para manter a pressão interna. No entanto, uma forma esférica é difícil de fabricar e, por conseguinte, mais cara, pelo que a maioria dos recipientes sob pressão são cilíndricos com cabeças semielípticas. [18]

Existem muitas aplicações de reservatórios tais como garrafas de gás propano/butano, cilindro de água doméstico e carros de transporte de líquidos/gases. Em aplicações com alguma exigência usam-se reservatórios em compósito visto serem mais leves o que proporciona, por exemplo, uma poupança de combustível nos transportes ou até o facto do uso de um polímero no seu interior proporcionar um maior desempenho, por exemplo, em acumuladores térmicos e reservatórios de painéis solares. [19]



Modo seguro



Modo inseguro

Figura 6- Modos de rebentamento [14]

### 3.1 Tipos de reservatórios

Ao longo do tempo surgiu a necessidade da redução do peso dos reservatórios, como tal foram aparecendo vários tipos de reservatórios. Atualmente, existem 5 tipos de reservatórios abaixo designados [20]:

- **Tipo I:** Construção totalmente metálica, geralmente aço, custando cerca de 4.7€/litro para o produzir, sendo a classe mais pesada com cerca de 1.4 kg/litro (Figura 7);
- **Tipo II:** Reservatório constituído maioritariamente em metal, com um reforço de fibras apenas na parte cilíndrica do reservatório (Figura 8). Este tipo de reservatórios são cerca de 50% mais caros, mas por outro lado são 30 a 40% mais leves;
- **Tipo III:** Camada fina de metal (*liner*) completamente envolvida em compósitos, sendo o que suporta maior parte da carga do reservatório. Isto permite uma redução de peso ainda maior (0.3 a 0.45 kg/litro), mas fica 3.5 vezes mais caro que o Tipo I.
- **Tipo IV:** O reservatório tipo IV é idêntico ao tipo III, substituindo o *liner* de metal por um polimérico, tornando o reservatório um pouco mais leve. Contudo, os polímeros têm uma permeabilidade maior que os metais o que pode ser um problema. Quanto ao preço, este está na mesma ordem do tipo III (3.5 vezes mais caro que o Tipo I);
- **Tipo V:** Este tipo de reservatório é constituído apenas por compósitos, sendo necessário a produção de um mandril removível devido a inexistência de um *liner*, tornando-se assim o tipo de reservatório mais leve, mas por outro lado surge o problema da impermeabilidade, que antes era garantida pelo *liner*. Recentemente a empresa Composites Technology Development Inc. conseguiu projetar e construir um reservatório de gás argon (1.9L com uma pressão de serviço de 1.38MPa). [21]



Figura 7-Reservatório Tipo I [57]



Figura 8-Reservatório Tipo II [58]



Figura 9-Reservatório tipo III (*liner* de alumínio) [59]

### 3.2 Produção dos reservatórios

O modo de produção dos reservatórios vai mudando conforme o tipo de reservatório, sendo explicado na seguinte secção o processo para cada tipo de reservatório.

#### 3.2.1 Tipo I

Este tipo de reservatório é maioritariamente constituído em metal, sendo normalmente produzido pelos seguintes processos [22]:

- **Conformação** é usado para a fabricação das chapas de metal necessárias;
- **Metal spinning**, é o processo para a produção das cabeças do reservatório (Figura 10);
- **Curvatura** permite curvar as chapas para obtenção das formas pretendidas para o reservatório;
- **Soldadura** é usada para ligar as várias partes metálicas do reservatório de forma permanente;
- **Tratamento térmico** para melhorar as características no material;
- **Montagem** final das peças do reservatório;
- **Pintura** para uma melhor conservação da superfície.

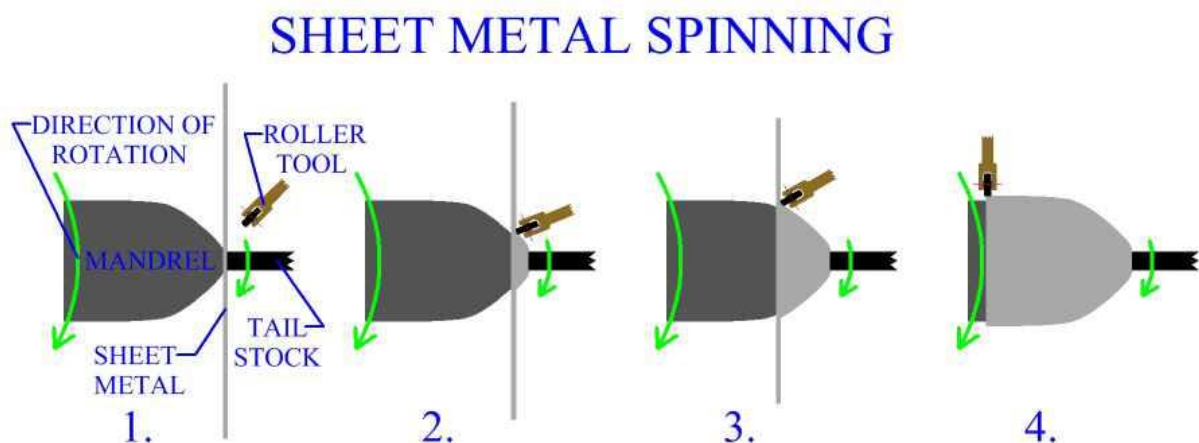


Figura 10-Metal spinning [23]

### 3.2.2 Tipo II

Os reservatórios tipo II são produzidos em duas partes: a parte em metal é produzida pelo mesmo processo que o reservatório tipo I e a segunda parte em compósitos que vai ser depositada em cima do reservatório em metal, usando o processo de enrolamento filamental.

### 3.2.3 Tipo III

No caso dos reservatórios tipo III, estes são produzidos igualmente em duas partes: o *liner* de metal e a camada compósito. O *liner* de metal é produzido pelos mesmos processos que um reservatório tipo I, só que com uma espessura muito mais baixa. A parte compósita do reservatório é depositada a partir do processo de enrolamento filamental.

### 3.2.4 Tipo IV

Este tipo é muito idêntico ao tipo III, só que o *liner* de metal é substituído por um em material polimérico. O *liner* polimérico pode ser produzido de várias maneiras, sendo referido nos tópicos abaixo.

#### 3.2.4.1 Moldação rotacional

A moldação rotacional passa pela colocação de uma carga num molde, que vai aquecer e rodar em torno de dois eixos, fazendo com que o material se disperse e fique espalhado na parede. Após o material estar uniformemente disperso na parede do molde, é arrefecido, sendo depois retirado a peça final (Figura 11). [24]

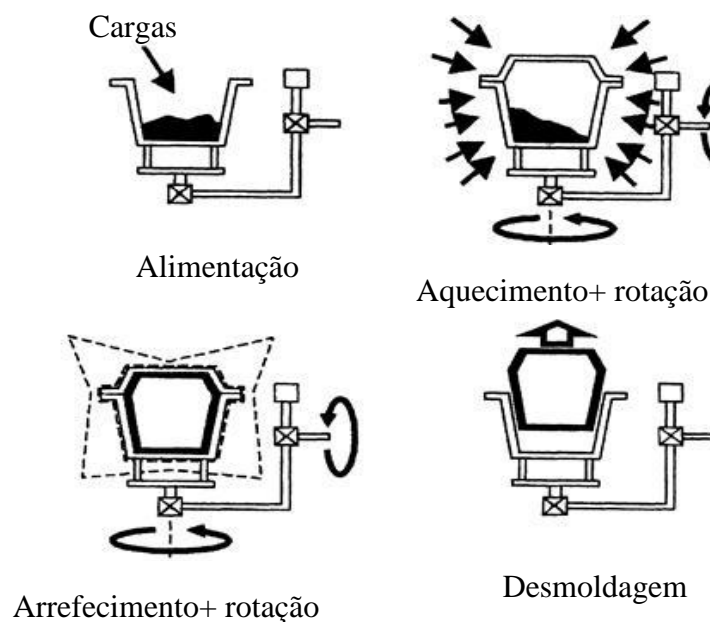


Figura 11 – Moldação rotacional [25]

Atualmente, mais de 80% de todo material usado é da família do polietileno, seguindo estes quatro materiais pela ordem indicada: polipropileno, policloreto de vinilo, poliamida NYLON® e policarbonato. [25]

#### **Vantagens [26]**

- Consegue-se fazer projetar e fazer os moldes muito mais rapidamente que em outros tipos de projetos;
- Pode-se construir peças numa só peça sem linhas de solda ou juntas;
- Pode-se considerar que a peça final está livre de tensões residuais;
- Em projetos de pequena escala, consegue ser mais económico que a moldação a sopro;
- Consegue-se obter espessuras uniformes, o que torna possível a fabricação de peças de paredes finas;
- Não se obtém praticamente nenhum desperdício na produção.

#### **Desvantagens**

- Processo realizado a baixa pressão, sendo difícil o material chegar a alguns locais;
- Ao contrário de outros processos em que apenas o produto precisa de ser arrefecido, neste processo o molde também tem que estar arrefecido;
- Processo lento quando comparado com outros processos tipo injeção;
- O material escolhido deve conseguir fluir facilmente através das cavidades do molde, possuir antioxidantes de modo a evitar oxidação devido ao contacto com oxigénio no interior do molde e deve ser resistente às altas temperaturas dentro do molde.

### 3.2.4.2 Moldação por injeção

A moldação por injeção é o método moderno muito comum de fabricação de peças poliméricas em serie, não sendo muito utilizado para pequenas séries devido ao alto custo do molde. No Gráfico 2, podemos ver a evolução dos custos por peça de vários processos com o aumento do numero de peças fabricadas.

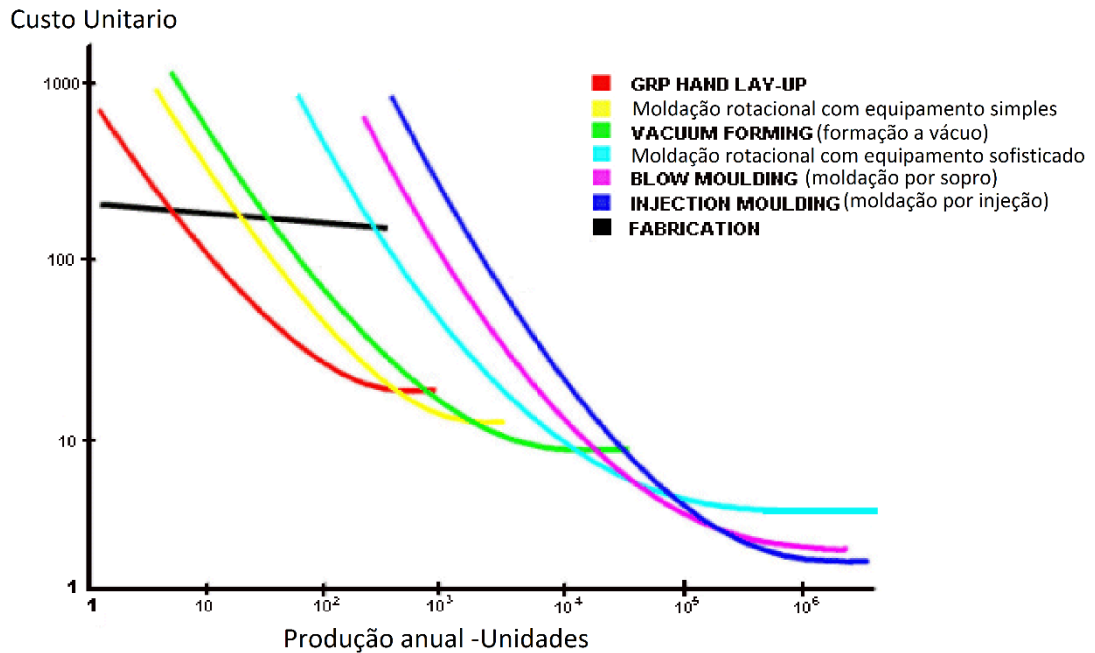


Gráfico 2- Evolução dos preços com o aumento da produção [60]

A moldação por injeção é um processo de fabrico utilizado para a produção de peças por injeção de um material no molde. O material de injeção é aquecido, misturado e injetado para dentro do molde, sendo depois arrefecido e removido do molde, obtendo-se assim a peça final (Figura 12).

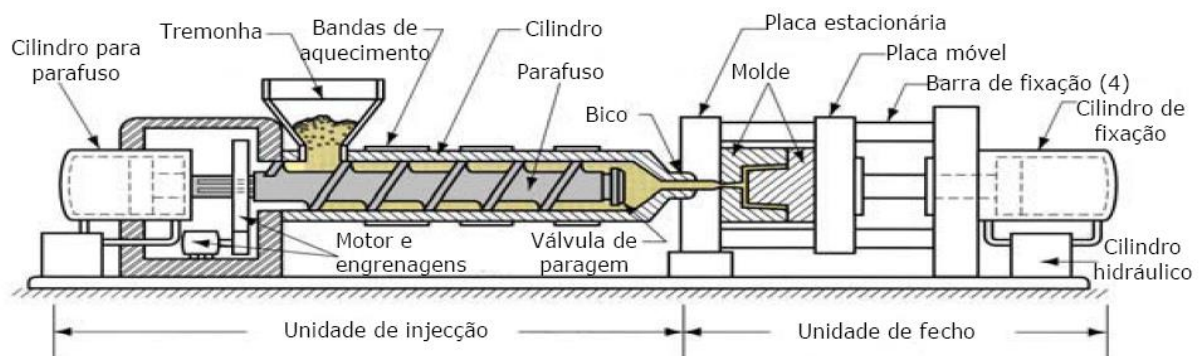


Figura 12 – Moldação por injeção [27]

Abaixo, podemos ver algumas vantagens e desvantagens deste processo [28]:

#### **Vantagens**

- Produção rápida;
- Possui uma boa flexibilidade de formatos;
- Preço baixo por peça para grandes produções;
- Pouco desperdício de material.

#### **Desvantagens**

- Algumas limitações em relação ao design como cantos afiados e mudanças bruscas de espessura [29];
- Alto custo das máquinas e dos moldes;
- Pequenas séries ficam muito caro;
- Possui limites de tamanhos e volume.

Para a produção do *liner* a partir deste processo seria necessário produzir duas metades e depois soldar estas duas partes, o que não é muito bom pois pode diminuir a impermeabilidade do *liner*. Em relação a espessura máxima que se pode usar na injeção varia de acordo com o material, por exemplo o polietileno tem uma espessura máxima recomendada de 5mm (0.2 inches). [30]

#### **3.2.4.3 Moldação por sopro**

A moldação por sopro é um processo de fabrico pelo qual peças ocas são produzidas como por exemplo garrafas de água. De um modo geral, existem três tipos de moldação: moldação sopro por extrusão, moldação sopro por injeção e moldação sopro por estiramento. [31]

#### **Moldação sopro por extrusão**

Neste processo uma extrusora empurra o plástico fundido através de uma cabeça, formando um tubo oco. Numa segunda fase a extrusora para e o molde fecha e o ar é soprado, deixando então o plástico arrefecer, ocorrendo por fim abertura do molde e a remoção da peça final (Figura 13).

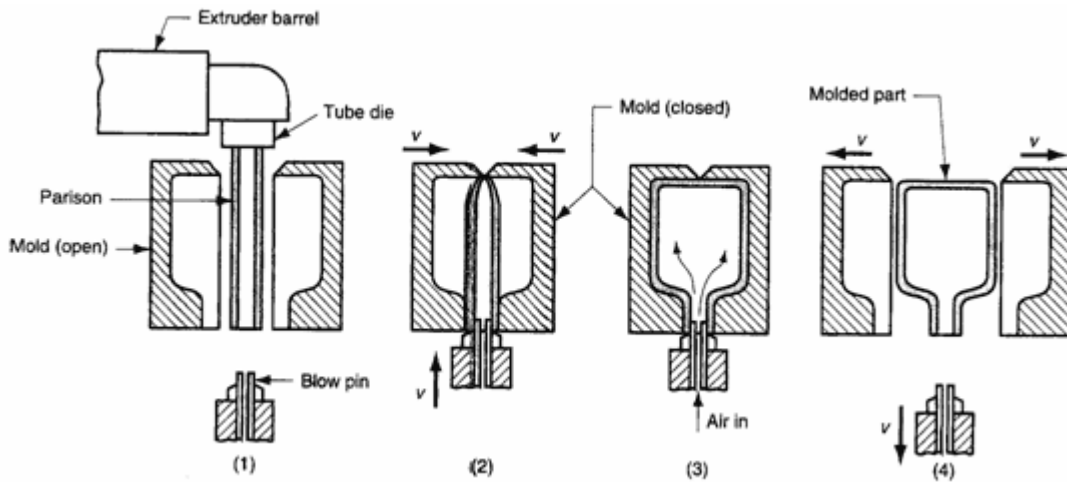


Figura 13 - Moldação sopro por extrusão [32]

### Moldação sopro por injeção

O plástico derretido é primeiramente injetado num molde em torno da haste de sopro (*blowing rod*), sendo depois colocado num segundo molde (*blow mold*) onde o ar é soprado. No final do plástico arrefecer, o molde abre ocorrendo a remoção da haste de sopro e da peça final (Figura 14).

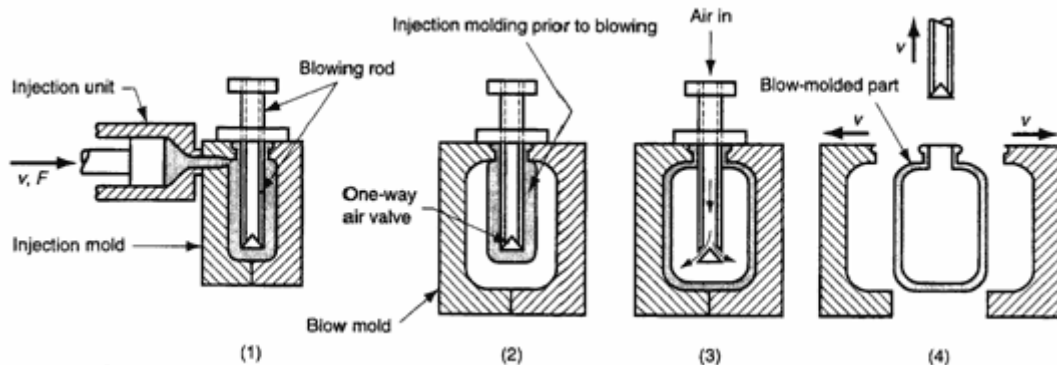


Figura 14 - Moldação sopro por injeção [32]

### Moldação sopro por estiramento

Este tipo de moldação é muito idêntico à moldação sopro por injeção, só que antes do plástico ser soprado este é aquecido e puxado para baixo (Figura 15). Este tipo de moldação por sopro é normalmente usado para criar produtos tais como garrafas de refrigerantes devido a sua grande durabilidade. [33]

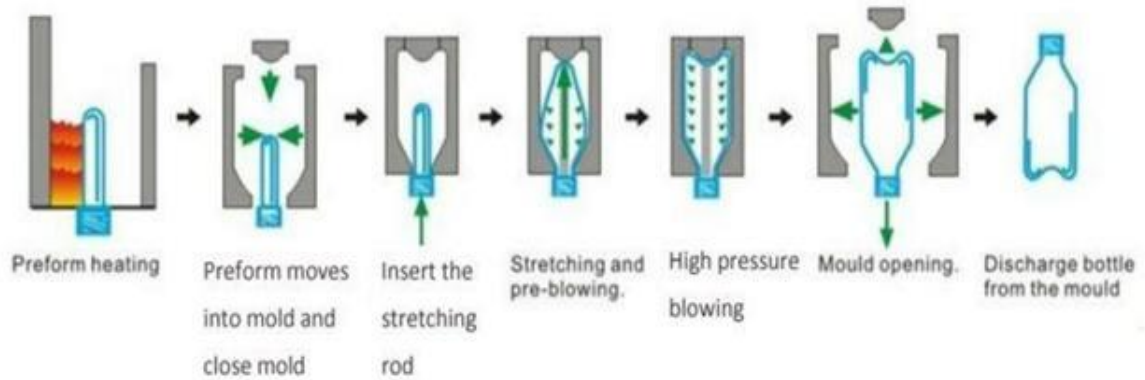


Figura 15- Moldação sopro por estiramento [34]

### Vantagens e desvantagens

A grande vantagem do processo de sopro é que as ferramentas são mais baratas quando compradas com o processo de injeção, por exemplo. O molde normalmente é simples, não precisando de muitos cálculos para ser projetado.

A maior desvantagem deste processo é a dificuldade de controlo da espessura da peça final. [35]

### 3.2.5 Tipo V

Os reservatórios tipo V, são reservatórios constituídos só por compósitos, não contendo nenhum tipo de *liner*. Este tipo de reservatórios é produzido a partir de um *mandril* removível, havendo atualmente dois tipos de mandril: *mandril* removível e *mandril* descartável.

#### **Mandril removível**

Na Figura 16 podemos ver o processo de produção de reservatório tipo V. Este processo consiste em um *mandril* composto por um balão de silicone e uma espuma que contrai e expande conforme a temperatura, permitindo que este seja removível no final.

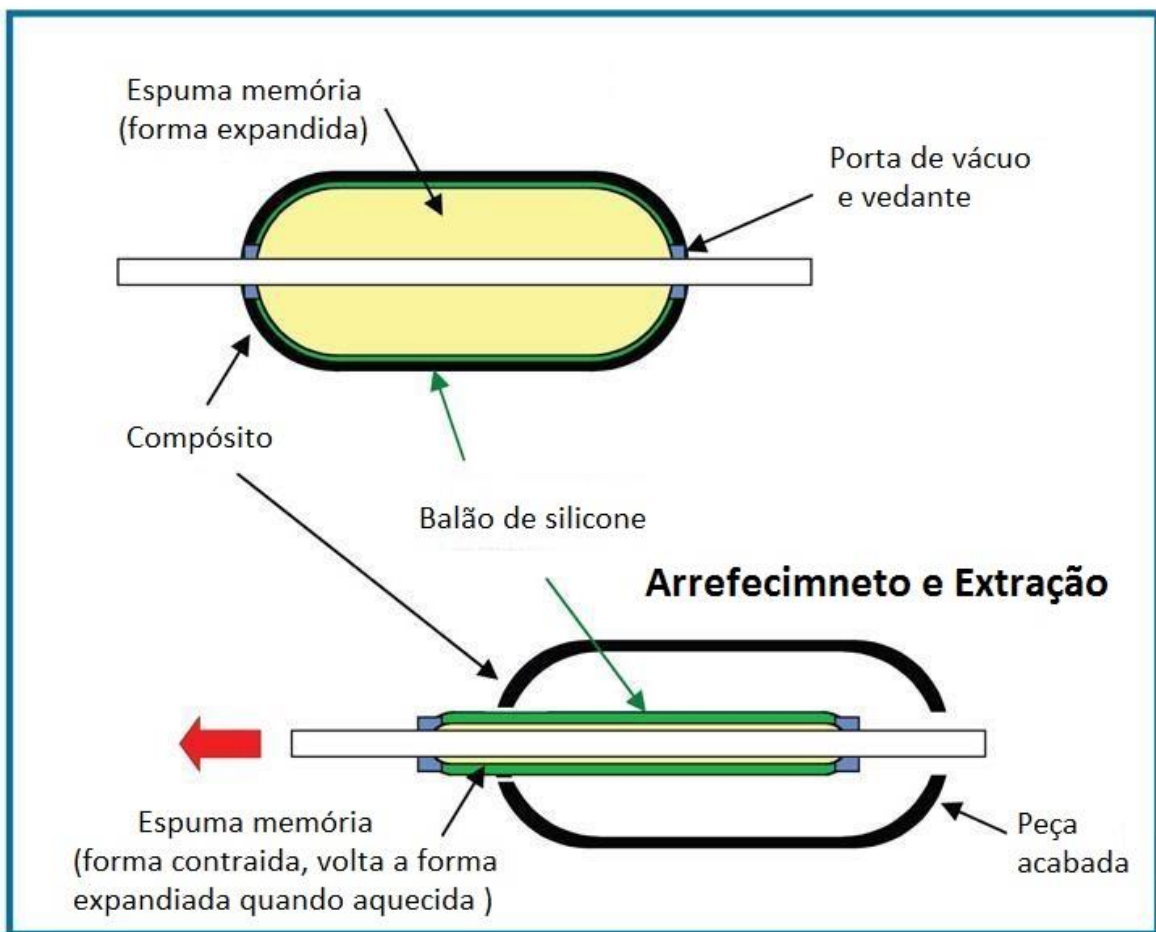


Figura 16- Processo de produção e reservatórios com o *mandril* removível [20]

#### **Mandril descartável**

Este tipo de *mandril* é característico por se desfazer no final da cura do compósito. Na Figura 17 e Figura 18 podemos ver duas maneiras possíveis de fazer este tipo de mandril. Na primeira imagem este é feito de areia, sendo depois removível com ferramentas, enquanto na segunda figura este é feito de um material *aquapour*, sendo depois removível com água. Este tipo de mandril é característico por se ter que fazer um *mandril* por cada reservatório produzido.

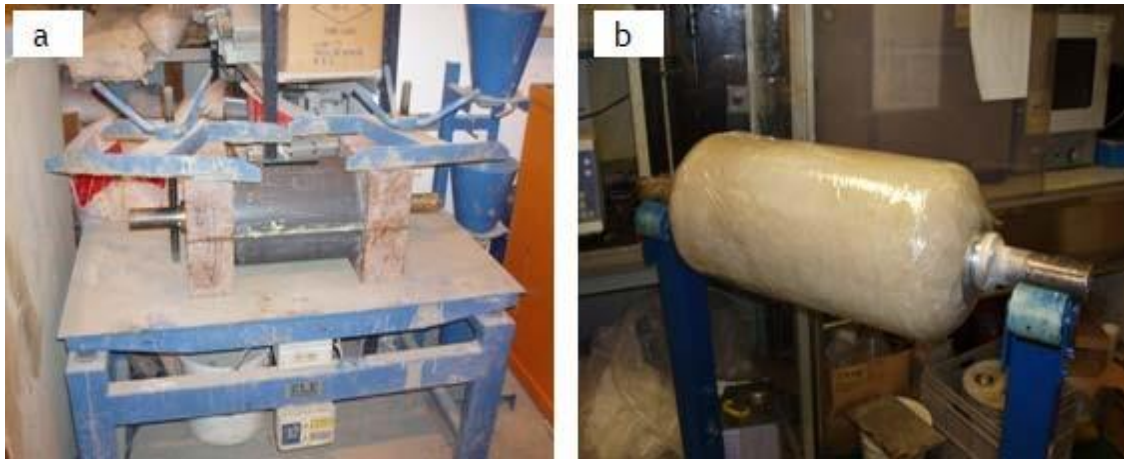


Figura 17- Fabricação de um mandril de areia [36]

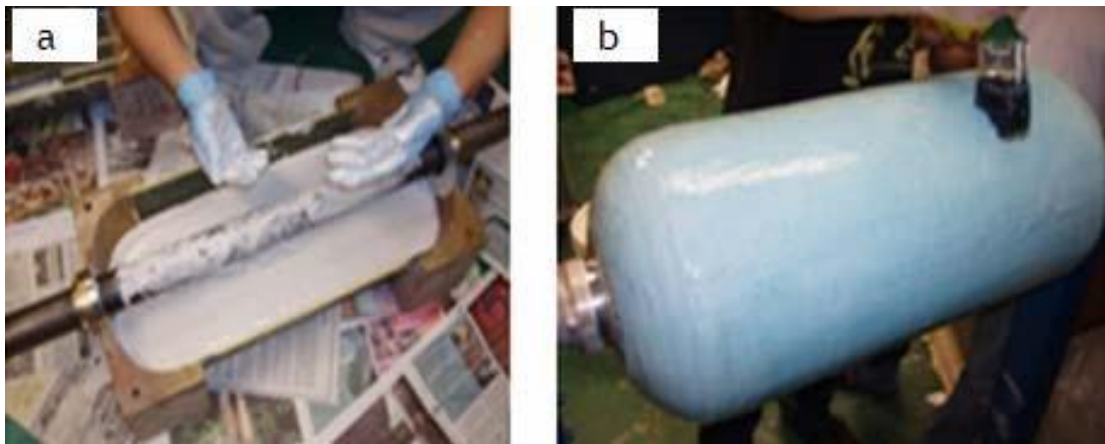


Figura 18- Fabricação de um mandril de *Aquapour* [36]



## 4 Permeabilidade

A permeabilidade é uma propriedade que os materiais possuem de permitir a passagem de gases ou vapores através de sua estrutura. A permeabilidade em materiais plásticos é de suma importância na indústria de embalagens. Nenhum material plástico barra completamente a difusão de moléculas, devido a imperfeições superficiais, porosidades e espaços intermoleculares. No caso dos metais, estes possuem uma baixa permeabilidade quando comparados com os plásticos, devendo então ter-se mais atenção na escolha do material e dimensionamento no caso dos polímeros que no caso dos metais. [37] [38]

No Gráfico 3, podemos ver a variação da permeabilidade de vários polímeros em relação ao hidrogénio, que é um gás difícil de se conter num recipiente devido ao pequeno tamanho das moléculas. Como podemos ver, existe um aumento da permeabilidade com a temperatura, o que quer dizer que convém ter em atenção a temperatura quando se vai dimensionar um reservatório.

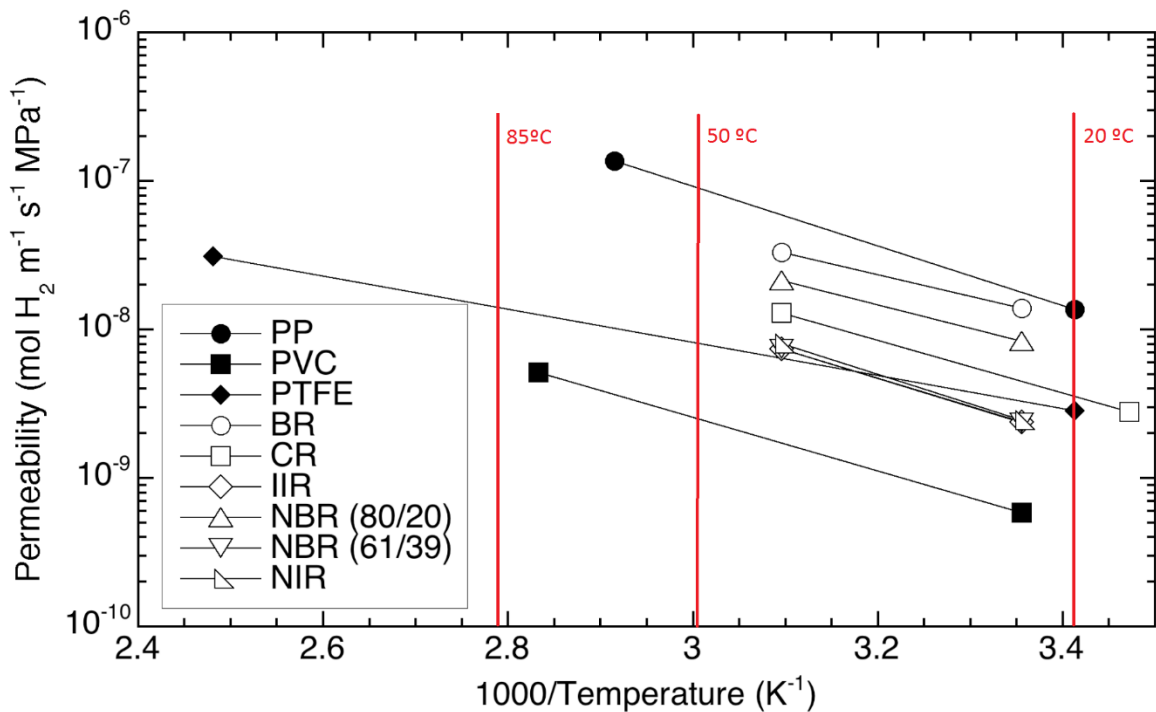


Gráfico 3- Permeabilidade de vários polímeros [63]

Outro fator importante na escolha do material do *liner* é a pressão de serviço, isto porque o aumento da pressão causa um aumento da passagem de gases ou vapores através do *liner* e causa similarmente um aumento das tensões instaladas no *liner*.

Na Tabela 5 pode-se ver a permeabilidade de hidrogénio de vários termoplásticos. A partir da tabela abaixo pode-se dizer que a poliamida (PA) possui uma excelente permeabilidade, mas por outro lado existem polímeros como o HDPE que possuem um preço menor, podendo recompensar o seu uso na vez de PA dependendo da aplicação.

Tabela 5-Permeabilidade do hidrogénio de vários termoplásticos [39]

Material	Temp. (K)	$\Phi \times 10^9$ $\frac{mol H_2}{m \cdot s \cdot MPa}$
HDPE	293	0.82
HDPE	293	0.89
PE	293	2.4
PA	293	0.14
PA11	293	0.40
PA11	293	0.36
PP	293	3.1
PCTFE	293	0.31
PTFE	298	3.2

Recentemente surgiu outra possibilidade para melhorar a permeabilidade que é o uso do EOVB. Com este tipo de barreira, quando comparada com outros termoplásticos acima mencionados, consegue-se reduzir bastante a permeabilidade. Por exemplo, como podemos ver no Gráfico 4, quando comparamos com o uso de EOVB (M100 e F101) com o HDPE e PA6, este tipo de barreira representa uma excelente melhoria.

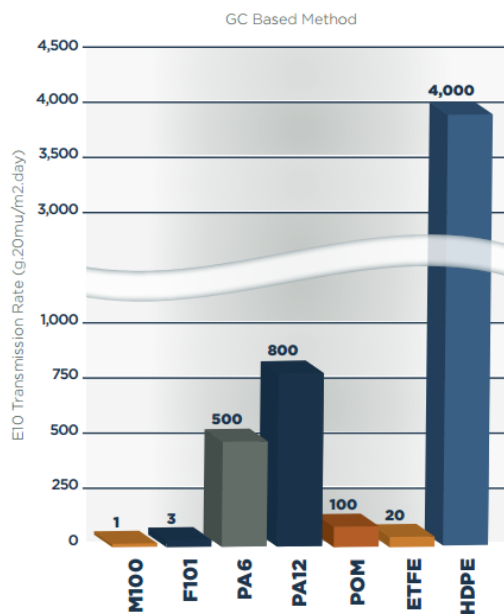


Gráfico 4- Permeabilidade de vários tipos de materiais [40]

A aplicação de EOVB é normalmente feita a partir de aplicação de multicamadas. Por exemplo na empresa EVAL EUROPE, a barreira é constituída por 6 camadas. Na Figura 19, podemos ver uma típica constituição da barreira EOVB fabricada pela EVAL EUROPE.

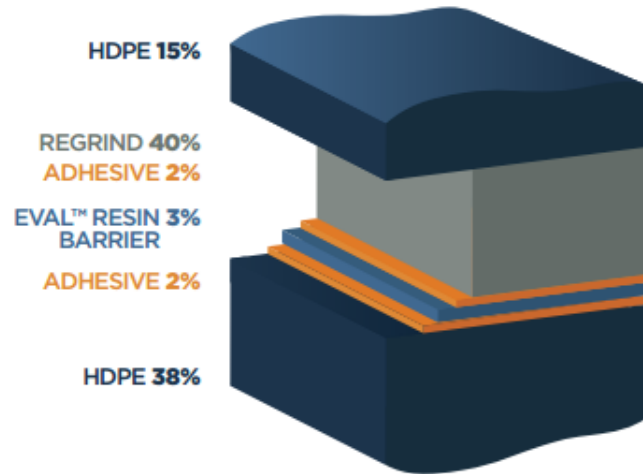


Figura 19- Típico uso do EOVB [40]

#### 4.1 Cálculo da permeabilidade

Para se obter a permeabilidade de um material existem três formas possíveis: determinação experimental, uso de um software e o cálculo através de fórmulas teóricas.

Uma fórmula possível para o cálculo do fluxo de material que atravessa o permeado (*liner*) é a equação (4) [41]

$$\dot{Q} = D * S' \frac{(p1 - p2)}{L} \quad (4)$$

Sendo D a difusividade, S a solubilidade, p1 a pressão interna, p2 a pressão externa e L a espessura do permeado.

Sendo S' dado por:

$$S' = S(T) + S(p) = S_0 * e^{\frac{-\Delta H_s}{R*T}} + \frac{C'_H * b}{1 + b * p} \quad (5)$$

Sendo D dado por

$$D = D(T) = D_0 * e^{\frac{-E_D}{R*T}} \quad (6)$$

A difusividade e a solubilidade dependem de várias características: material do permeante e permeado e a temperatura do permeante/permeado. Para além das dependências anteriormente mencionadas a solubilidade depende da pressão, enquanto a difusividade possui uma dependência da espessura do permeante até um certo ponto.

Para o cálculo do caudal de hidrogénio que atravessa o permeado basta multiplicar o fluxo obtido pela área do permeado.



## 5 Inspeção de reservatórios em compósitos e os principais modos de rotura

### 5.1 Inspeção dos reservatórios

Um controlo da qualidade do reservatório é necessário e obrigatório, isto porque um acidente com reservatórios em alta pressão pode causar mortes e danos ao ambiente. Por isso, existem regras que se têm que seguir. Atualmente a segurança tem vindo a aumentar, por exemplo na Europa o reservatório em compósitos tem que respeitar a norma ISO 11119-3.

Quando a produção começa, o primeiro reservatório é sujeito ao teste de explosão, sendo que deve ser realizado um novo teste a cada 200 reservatórios produzidos, ou um teste a cada ano no caso de não serem produzidos 200. Também deve ser realizado um teste de pressão cíclico a cada 200 reservatórios com as mesmas regras que o teste de explosão [42].

Se o teste falhar deve ser investigado porquê, mas se houver indícios que o teste não foi bem efetuado, este pode ser repetido. Depois de encontrar a razão da falha, esta deve ser corrigida, podendo ser necessário a recolha dos reservatórios que possam ter defeitos.

Para aprovação de um novo projeto de reservatório este deve ser sujeito aos seguintes testes [42]:

1. Teste de pressão hidrostática. A pressão de serviço máxima é aumentada 1.25 vezes, e é mantido por 30 minutos. Isto confirma se existe fugas e deformações permanentes no reservatório.
2. Teste de Expansão Volumétrica. A pressão é aumentada para 1.25 vezes a pressão de serviço. A expansão elástica é medida entre o teste 0.10 e 1.25 vezes a pressão de serviço. O reservatório é rejeitado se a expansão é maior que 110% do teste anterior ou do teste de explosão. Este teste confirma a quantidade de fibra no reservatório. No caso de uma perda de 4% de fibra o reservatório expandiria aproximadamente mais 12% do que o teste com a correta quantidade de fibra.
3. Teste de Explosão. O reservatório é sujeito a um teste destrutivo. A pressão vai aumentando 0.5MPa/s até rebentar. A pressão máxima deve ser 3.5 vezes a pressão de serviço para as fibras de vidro e 2.25 vezes no caso das fibras de carbono.
4. Teste de fadiga. O reservatório é sujeito a uma pressão cíclica entre 0.1 e 1 vezes a pressão de serviço. O número de ciclos a que o reservatório é sujeito depende do número de ciclos (N) para o qual foi projetado e de quantos reservatórios forem sujeitos ao teste (2 reservatórios= 4xN; 3 reservatórios= 3.5xN; 4 reservatórios= 3xN; 5 reservatórios= 2.6xN;) O número de ciclos para o qual for projetado deve estar nas especificações do reservatório.
5. Teste da fluência com a temperatura. Dois reservatórios são sujeitos 1.25 vezes a pressão de serviço durante 2000h. O teste é efetuado a 85°C e uma humidade relativa de 50% ou menos. Os reservatórios não podem deformar durante o teste. No caso de ser conveniente, o comprimento do reservatório pode ser menor. Este teste assegura que o reservatório aguenta temperaturas extremas em serviço.
6. Teste do corte. Dois reservatórios são cortados superficialmente. Dois cortes são feitos em cada reservatório, um corte é feito longitudinalmente e outro circunferencialmente. Os cortes estão na mesma posição longitudinal, mas estão a 120 graus de distância na circunferência. Os cortes devem ser pelo menos 1.3 mm de profundidade e o comprimento deve ser cinco vezes a profundidade. A profundidade pode variar de acordo com as especificações do fabricante. No caso de ser conveniente, o comprimento do reservatório pode ser menor. Um reservatório é sujeito a teste de explosão, não podendo ocorrer a rutura antes de atingir 2 vezes a pressão de serviço. O outro reservatório ao teste de fadiga. A rutura só pode ocorrer após 5000 ciclos e as fugas após 1000 ciclos.

7. Teste de permeabilidade. Este teste tem que ser feito para depósitos com *liner* não metálico ou *liner* metálico soldado. O encaixe é submetido a duas vezes o binário especificado, sendo depois sujeito à pressão de serviço com uma mistura de 5% de hidrogénio e 95% de azoto por 500 horas. A taxa de permeabilidade desta mistura não deve ultrapassar os  $0,15 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{l}^{-1}$ . A fração da mistura foi escolhida de modo a que não fosse uma mistura inflamável. A taxa de permeabilidade é  $0.15 \text{ cc} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{l}^{-1}$  porque no caso de ser colocado 100% hidrogénio no reservatório, esta permeabilidade permitia o seu uso sem riscos de combustão. Por exemplo, numa garagem ventilada a permeabilidade entre  $1-2 \text{ cc} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{l}^{-1}$  é segura.
8. Teste de vazamento. Existem vários métodos aceitáveis para este ensaio, podendo ser usado o *bubble testing* utilizando ar seco ou gás, ou a medição de vestígios de gases utilizando um espectrómetro de massa. Estes testes confirmam existência de defeitos naquele reservatório o que resultaria em fugas.
9. Teste do binário. O reservatório é fixo para que este não gire durante o teste. A válvula é colocada usando 150% do binário máximo recomendado, então removido e instalado novamente com o mesmo binário. O reservatório testado pode ter comprimento encurtado. As roscas e a saliência não devem apresentar nenhuma deformação significativa e permanecer dentro das tolerâncias de desenho. O reservatório não pode vaziar ou exceder a exigência de permeação. Neste teste é garantido que as roscas, a saliência e a interface saliência/rebordo não são danificadas durante a instalação da válvula quando são usados binários maiores que o esperado.
10. Teste de penetração. O reservatório é cheio com nitrogénio a pressão de serviço, sendo depois disparada uma bala de 7.62mm com um ângulo de 45 graus. O cilindro não pode romper durante o teste. Este ensaio destina-se a demonstrar a resistência do recipiente no caso de o reservatório ser penetrado durante um impacto.
11. Teste do meio ambiente. Um reservatório é testado, sendo incluído o revestimento e camada de proteção, caso seja aplicável. A superfície superior do reservatório é sujeita a um impacto controlado em cinco locais, com cada área exposta a um fluido diferente (ácido sulfúrico, hidróxido de sódio, metanol / gasolina, nitrato de amônio e fluido de lavagem de para-brisa (álcool metílico e água)). Depois deste teste, o reservatório é sujeito 3000 ciclos a uma pressão de 1.25 vezes a pressão de serviço projetada, depois a pressão é segurada durante 48 horas. O reservatório não pode romper durante este teste.

## 5.2 Principais modos de fratura de reservatório em compósitos

Após um estudo na NASA efetuado por Scott Forth, foram identificados quatro modos de rutura [43]:

- Explosão por sobre pressurização: A probabilidade de explosão de um reservatório pode ser diminuída através da certificação dos materiais, dimensionamento do reservatório com um bom coeficiente de segurança e a efetuação de ensaios não destrutivos antes de sua colocação em serviço. A pressão no reservatório também deve ser controlada de modo a que esta não ultrapasse a pressão projetada.
- Fadiga do liner: A falha por fadiga pode ser atenuada por inspeção e teste. A realização de uma inspeção não destrutiva durante o fabrico do *liner* permite que as falhas sejam detetadas obtendo-se assim uma maior segurança. Um protótipo deve ser testado, efetuado um teste fadiga do liner com uma pressurização cíclica superior a do dimensionamento, de modo a assegurar que o liner está dentro dos parâmetros para que foi projetado.
- Explosão resultante do dano do liner ou do compósito: Esta falha pode ser reduzida através de uma proteção adequada ao dano. Através da inspeção visual pode-se identificar danos na camada superfície, mas não é facilmente observado o dano nas camadas abaixo.
- Rotura das fibras por fadiga: Esta situação ocorre devido degradação do compósito ao longo do tempo. Esta degradação causa uma falha repentina do reservatório, causando um vazamento rápido do conteúdo do reservatório podendo ocorrer acidentes graves e danos ao ambiente.



## 6 Critérios de dimensionamento de reservatórios

Atualmente existem muitos métodos para o dimensionamento dos reservatórios, podendo variar um pouco dependendo do tipo de reservatório. No caso de reservatórios tipo I as propriedades mecânicas são iguais em todas as direções, enquanto que nos restantes tipos de reservatórios as propriedades mecânicas dependem da direção das fibras. Nos próximos tópicos serão apresentados vários métodos de acordo com o tipo de reservatório.

### 6.1 Reservatório de material isotrópico (Tipo I)

O dimensionamento vai depender da espessura da parede do reservatório, pois no caso de ser considerado um reservatório de parede fina (raio/espessura  $\geq 10$ ) as tensões segundo a direção radial são desprezáveis em relação à direção longitudinal e circunferencial. A espessura de um reservatório depende nomeadamente da pressão interna do reservatório e do coeficiente de segurança usado.

A maior parte dos reservatórios do tipo I são feitos de metal por construção soldada, sendo nesse caso necessário considerar um coeficiente de segurança adicional  $S$  para além do considerado normalmente que vai depender do tipo de inspeção feita: 1 no caso de os cordões ser completamente radiografados, 0.75 se for radiografado por pontos e 0.7 se não for radiografado [44].

$$\sigma_{adm} = \sigma_{ced} S \quad (7)$$

#### 6.1.1 Reservatório de parede fina ( $r/t \geq 10$ )

Considerando um reservatório cilíndrico de parede fina ( $r/t \geq 10$ ) com os topos esféricos de raio  $r$  e espessura  $t$ . Nesta condição podemos dizer que a tensão se distribui uniformemente ao longo da espessura visto que a tensão radial pode ser ignorada, visto esta ser de 5 a 10 vezes menor que a circunferencial e a longitudinal [45].

Considerando-se uma pequena fatia do cilindro  $\Delta x$  (Figura 20), podemos dizer que o equilíbrio estático do cilindro devido a uma pressão interna  $p$  é igual á equação (8), manipulando a equação matematicamente podemos chegar à equação (9).

$$2\sigma_1 \Delta x t = p 2r \Delta x \quad (8)$$

$$\sigma_1 = \sigma_t = \frac{p r}{t} \quad (9)$$

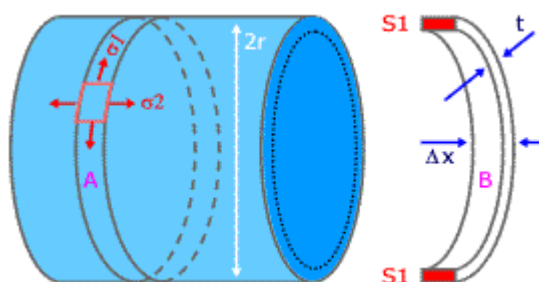


Figura 20-Parte cilíndrica do reservatório [45]

Considerando os topos do reservatório (Figura 21) e impondo a condição de equilíbrio estático (equação (10)) podemos obter a equação (11).

$$\sigma_2 2\pi r t = p \pi r^2 \quad (10)$$

$$\sigma_2 = \sigma_l = \frac{pr}{2t} \quad (11)$$

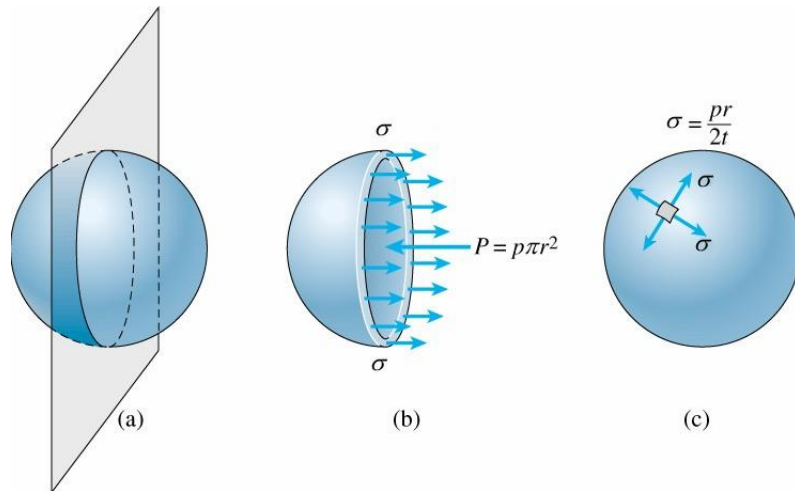


Figura 21 – Topos do reservatório [46]

A partir das equações (9) e (11), pode-se calcular as tensões para qualquer material isotrópico, com a restrição de que o reservatório deve possuir paredes finas, caso não o seja as tensões têm que ser calculadas pelas equações mencionadas no tópico seguinte.

Considerando a norma do código francês para equipamentos de pressão admite que  $\sigma_r = -\frac{p}{2}$ , e usando o critério de Tresca [47]

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{equiv} = \sigma_{ced} \quad (12)$$

Onde  $\sigma_{ced}$  é a tensão de cedência, resultando nas seguintes equações

$$\frac{pr}{t} + \frac{p}{2} = \frac{\sigma_{ced}}{N} \quad (13)$$

$$t = \frac{pr}{\frac{\sigma_{ced}}{N} - 0.5p} \quad (14)$$

Onde N é coeficiente de segurança

### 6.1.2 Reservatório de parede espessa ( $r/t < 10$ )

No caso dos reservatórios de parede espessa a tensão radial não pode ser ignorada, sendo considerado os princípios de elasticidade. O cálculo das tensões circunferências e radiais é feito com base na hipótese de que a deformação axial não varia ao longo do raio, isto é, as secções mantêm-se planas depois da aplicação da pressão [47].

Na Figura 22 podemos ver um cilindro de raio interior  $a$  e raio exterior  $b$ , sendo aplicada uma pressão interna ( $p_i$ ) e uma pressão externa ( $p_0$ ).

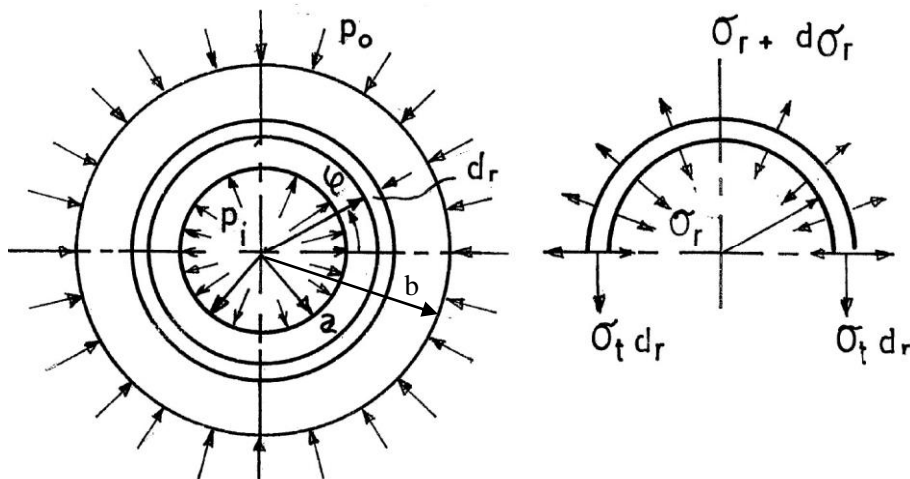


Figura 22- Cilindro de parede espessa, de raio interior  $a$  e exterior  $b$ . [46]

A tensão longitudinal é constante e independente do raio, sendo igual a

$$\sigma_l = \frac{p_i a^2}{b^2 - a^2} \quad (15)$$

Considerando o elemento anelar na Figura 22, estabeleceu-se a equação de diferencial de equilíbrio de forças, sendo dado por:

$$2 \sigma_t dr + 2 \sigma_r r - 2(\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr) = 0 \quad (16)$$

Desprezando os termos de segunda ordem da equação (16)

$$\sigma_t - \sigma_r - \frac{d\sigma_r}{dr} = 0 \quad (17)$$

Considerando a deformação longitudinal constante e aplicando a lei de Hooke generalizada (equação (18)), obtemos a equação (19), onde  $C_1$  é uma constante

$$\varepsilon_l = \frac{1}{E} [\sigma_l - \nu(\sigma_r + \sigma_t)] \quad (18)$$

$$\sigma_r + \sigma_t = 2C_1 \quad (19)$$

Usando a equação (17) e (19) obtemos:

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + 2\sigma_r = 2C_1 \quad (20)$$

$$r^2 \frac{d\sigma_r}{dr} + 2r\sigma_r = 2rC_1 = \frac{d}{dr}(r^2\sigma_r) \quad (21)$$

Integrando

$$r^2\sigma_r = r^2C_1 + C_2 \quad (22)$$

$$\sigma_r = C_1 + \frac{C_2}{r^2} \quad (23)$$

Usando a equação (19)

$$\sigma_t = C_1 + \frac{C_2}{r^2} \quad (24)$$

Considerando as seguintes condições de fronteira:  $\sigma_r = -p_i$  para  $r=a$  e  $\sigma_r = 0$  para  $r=b$ , obtemos as seguintes equações

$$\sigma_t = \frac{a^2 p_i}{b^2 - a^2} \left( 1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (25)$$

$$\sigma_r = \frac{a^2 p_i}{b^2 - a^2} \left( 1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (26)$$

Na Figura 23 podemos ver a distribuição da tensão radial e tangencial para um cilindro com pressão interna  $p_i$  [47].

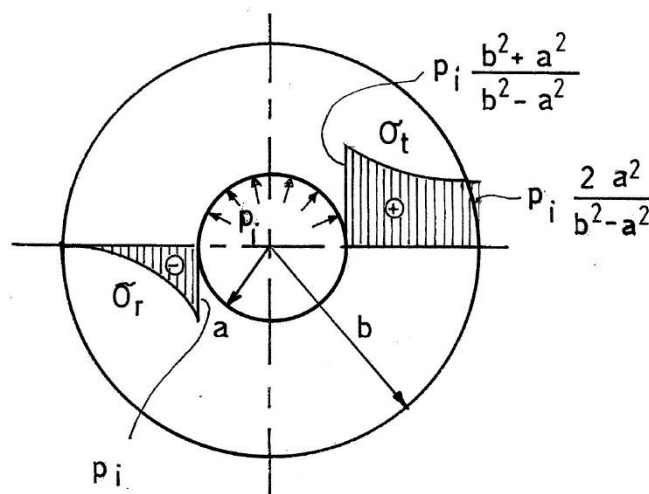


Figura 23- Distribuição de tensões para um cilindro sujeito a pressão interna [46]

## 6.2 Reservatório em compósitos

Os reservatórios em compósitos são normalmente constituídos por duas partes: o *liner* (Tipo III e IV) e uma parte em compósitos. O *liner* é dimensionado de forma restringir líquido/gás no reservatório, não contribuindo muito para aguentar os esforços, podendo por vezes ser ignorado no cálculo da espessura da parte compósita.

Nos seguintes pontos vou falar de várias teorias que podem ser usadas no dimensionamento da parte compósita do reservatório.

### 6.2.1 Teoria *Netting Analysis*

A teoria *Netting Analysis* pressupõe que as fibras são as únicas responsáveis por aguentar os esforços. Esta suposição é conservadora, visto estar a desprezar a resina. Esta teoria permite também um cálculo rápido da espessura do compósito no caso da contribuição do liner for considerado desprezável.

Para ilustrar os princípios da teoria *Netting Analysis*, consideraremos um reservatório de raio  $r$  com uma pressão interna  $p_i$ . Assumindo que o reservatório só possui fibras helicoidais com um ângulo de enrolamento  $\alpha$ , uma tensão máxima de fibras de  $\sigma_f$  e uma espessura  $t_{f\phi}$ . A Figura 24 ilustra as forças que atuam nas fibras helicoidais, sendo  $N_\phi$  a força por unidade de comprimento na direção longitudinal

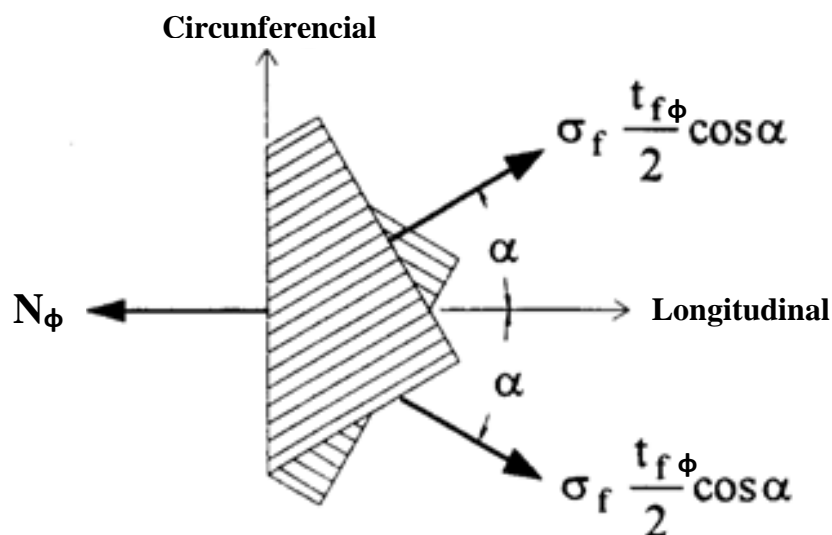


Figura 24- Equilíbrio forças das camadas helicoidais - sentido longitudinal. [62]

Fazendo o equilíbrio estático na direção longitudinal

$$N_{\phi} = \frac{p_i R}{2} = \sigma_f t_{f\phi} \cos^2(\alpha) \quad (27)$$

Colocando em ordem de  $t_{f\phi}$ , obtemos a expressão para ao calculo da espessura das camadas de fibras helicoidais.

$$t_{f\phi} = \frac{p_i r}{2\sigma_f \cos^2(\alpha)} \quad (28)$$

A tensão circunferencial na região cilíndrica é sustentada pelas fibras helicoidais e pelas fibras circunferenciais, sendo que a parte suportada pelas fibras helicoidais dada por:

$$N_{h\theta} = \frac{p_i r}{2 \cos^2(\alpha)} \sin^2(\alpha) = \frac{p_i r}{2} \tan^2(\alpha) \quad (29)$$

A carga circunferencial total num reservatório é dada por:

$$N_{\theta total} = p_i r \quad (30)$$

Concluindo, carga total suportada pelas fibras circunferenciais é dado por

$$N_{\theta} = N_{\theta total} - N_{h\theta} \quad (31)$$

$$N_{\theta} = p_i r - \frac{p_i r}{2} \tan^2(\alpha) \quad (32)$$

$$N_{\theta} = \frac{p_i r}{2} (2 - \tan^2(\alpha)) \quad (33)$$

Dividindo os termos por  $t_{f\theta}$

$$\frac{N_{\theta}}{t_{f\theta}} = \sigma_f = \frac{p_i r}{2 t_{f\theta}} (2 - \tan^2(\alpha)) \quad (34)$$

$$t_{f\theta} = \frac{p_i r}{2 \sigma_f} (2 - \tan^2(\alpha)) \quad (35)$$

A partir das equações (35) e (28) é possível determinar a espessura das camadas helicoidais e circunferenciais, mas tem-se que ter sempre em atenção aos três parâmetros: o coeficiente de segurança usado deve ser no mínimo 2.25 para as fibras de carbono e 3.5 para as fibras de vidro, muito dificilmente se consegue a espessura desejada, visto que a cada camada de fibras corresponde uma espessura e, por fim, tem-se que ter em conta que o compósito não é 100% fibra como tal tem-se que dividir o valor obtido pela fração volúmica (ver Tabela 6). [42]

Tabela 6- Fração volúmica de fibras [48].

<b>Tipo de fibra</b>	<b>Helicoidal</b>	<b>Circunferencial</b>
<b>Vidro</b>	0.55-0.60	0.65-0.70
<b>Kevlar</b>	0.55-0.60	0.65-0.70
<b>Grafite</b>	0.50-0.55	0.60-0.65

### 6.2.2 Teoria clássica dos laminados compósitos

Um laminado compósito é uma combinação de fibras orientadas numa única direção envolvidas em resina. Nesta teoria, as várias camadas de um compósito são tratadas como laminados de compósitos empilhados, comportando-se como um material ortotrópico.

Para o uso desta teoria é necessário o conhecimento das propriedades do laminado a analisar, por exemplo as propriedades mecânicas como módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson nas várias direções, visto que um compósito não é material isotrópico.

A deformação de um material ortotrópico pode ser descrita pela expressão abaixo.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{Bmatrix} \quad (36)$$

No caso do processo de enrolamento filamentar, este é tratado como um elemento axissimétrico, tendo que neste caso ser feita uma transformação de coordenadas baseado no processo de fabrico.

### 6.2.3 Modelação em ABAQUS® (software)

O ABAQUS® é um programa de elementos finitos que permite simular praticamente qualquer peça. No caso de reservatório de pressão em compósitos, o programa com a ajuda de um *plugin* simula as várias camadas helicoidais e circunferenciais que envolvem o liner, podendo-se então obter os deslocamentos e tensões resultantes da pressão interna em qualquer ponto do reservatório (ver exemplo Figura 25). Neste caso o programa tem várias vantagens em relação a outros métodos, como por exemplo em relação a Teoria *Netting Analysis* este permite simular as peças metálicas e a parte polimérica (*liner*) do reservatório e, por outro lado, também se consegue observar o surgimento de pontos de concentração de tensão.

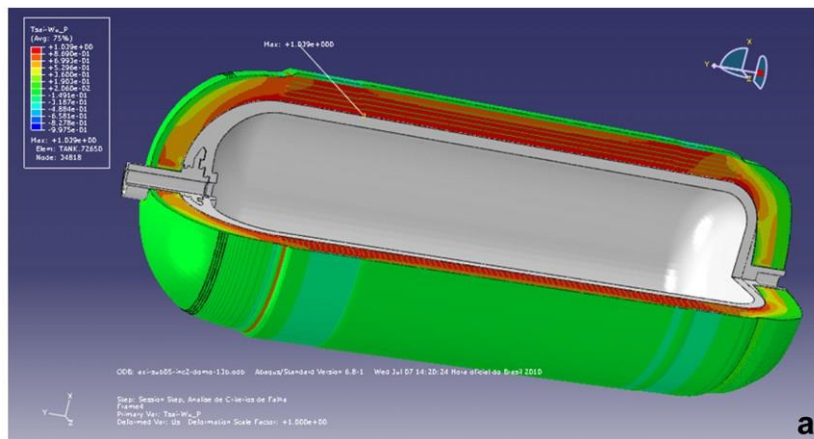


Figura 25- Simulação de um reservatório em ABAQUS® [49]

## 7 Especificações/design do reservatório

### 7.1 Especificações

O reservatório desenvolvido é um reservatório do tipo IV com uma capacidade 24 litros, preparado para aguentar hidrogénio a uma pressão de serviço de 30 MPa (300 bar), possuindo um coeficiente de segurança de 3, sendo sempre pré testado a uma pressão de 45MPa (450 bar) antes de ser vendido ao cliente.

### 7.2 Design

O Design do reservatório/dimensões foi baseado num reservatório produzido pela AMROL ALFA (Figura 26). No entanto, foram feitas mudanças ao design, acrescentando uma peça metálica no fundo para servir de apoio na produção do reservatório e também houve uma mudança na parte metálica superior isto porque como o *liner* é polimérico não pode ser soldado como no caso dos reservatórios tipo III. Na Figura 27, podemos ver o design em que me baseei para a produção das partes metálicas.

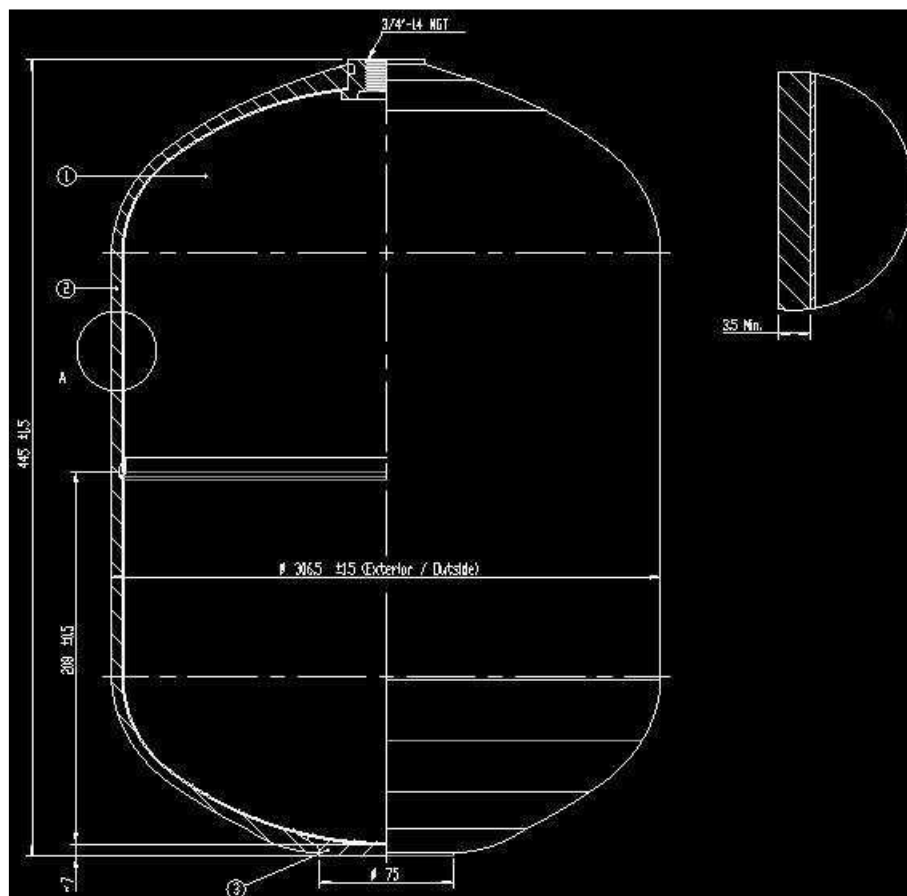


Figura 26-Desenho de um reservatório Tipo III da AMTROL ALFA [50]

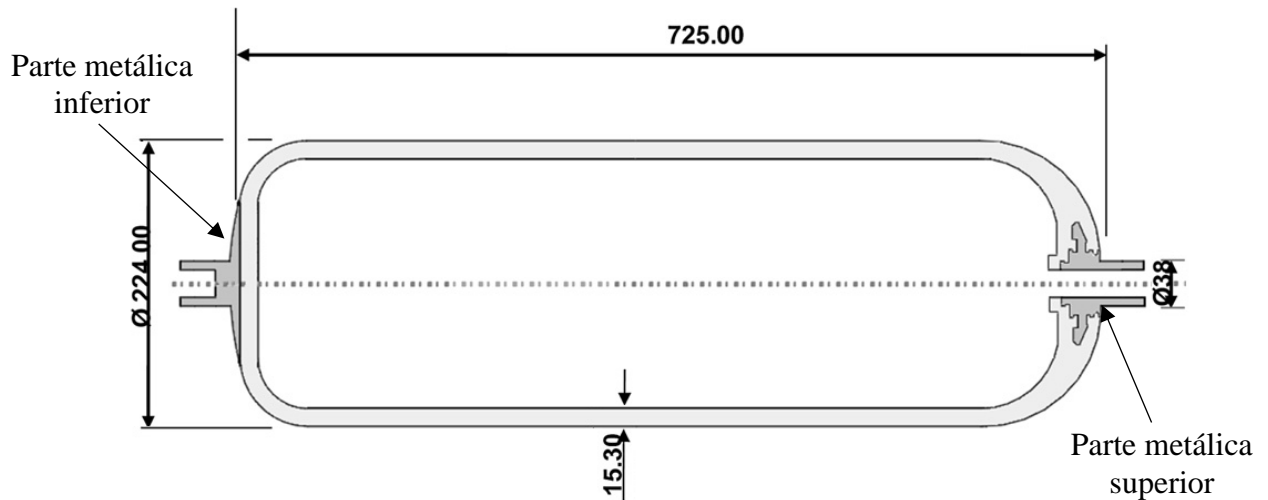


Figura 27 – Desing base das partes metálicas [49]

## 7.3 Materiais

### 7.3.1 Liner

O material decidido para *liner* foi a PA6, isto porque, como estamos a trabalhar em altas pressões, a permeabilidade do *liner* deve ser baixa. Outra hipótese seria o uso do EOVI, mas como não se sabe muito sobre a sua aplicação devido ainda ser bastante recente, foi colocado de lado. Contudo uma hipótese seria deixar a produção para uma empresa que o soubesse aplicar, tipo a EAVL Europe. Na Tabela 7 podemos ver as propriedades do Nylon 6 (PA6).

Tabela 7- Propriedades do PA6 para moldação e extrusão [51] (valores médios)

Módulo de Young	1.062 GPa
Coefficiente de Posion	0.35
Tensão de cedência	43.4 MPa
Tensão de rotura	36.55 MPa
Deformação à cedência	21.15%
Deformação à rotura	50%
Massa específica	1.14g/cm <sup>3</sup>
Preço	2.41€/kg

### 7.3.2 Compósito

O compósito escolhido para o reservatório é o T300/914, sendo constituído por fibras de carbono T300 (60%) e resina de epóxico 914 (40%). Na Tabela 8 são apresentadas as propriedades do compósito.

No caso de se desejar um peso mais reduzido, podia-se recorrer a outras fibras de carbono mais resistentes, como por exemplo as fibras de carbono T800 que são normalmente usadas na indústria aeroespacial, mas por causa do seu preço mais elevado resolveu-se recorrer as fibras T300.

Tabela 8-Propriedades do compósito T300/914 [52]

<b>Módulos de elasticidade</b>	<b>E<sub>1</sub></b>	<b>E<sub>2</sub>, E<sub>3</sub></b>	<b>G<sub>12</sub>, G<sub>13</sub></b>	<b>G<sub>23</sub></b>	<b>v<sub>12</sub>, v<sub>13</sub></b>	<b>v<sub>23</sub></b>
	129 GPa	9.5 GPa	4.7 GPa	3.2 GPa	0.35	0.52
<b>Resistência mecânica</b>	<b>X<sub>T</sub></b>	<b>X<sub>C</sub></b>	<b>Y<sub>T</sub></b>	<b>Y<sub>C</sub></b>	<b>R, S, T</b>	
	1439 MPa	1318 MPa	98 MPa	125 MPa	79 MPa	
<b>Massa específica</b>		1.572g/cm <sup>3</sup>				

### 7.3.3 Partes metálicas

Para as partes metálicas superior e inferior (Figura 27) foi escolhido o alumínio 2014-T6, devido a dois fatores: possuir uma alta tensão de cedência e também por possuir uma baixa massa específica. O preço deste alumínio não é muito caro, ficando por cerca de 1.95€/Kg. Caso consideramos que as peças metálicas são fabricadas pelo processo de torneamento, seria necessário cerca de 1.7kg de alumínio por reservatório, o que ficaria por 3.32€ o que é um preço razoável. [51]

Na Tabela 9, podemos ver as propriedades do alumínio acima mencionado.

Tabela 9-Propriedades do alumínio 2014-T6 [53]

Tensão de cedência	414 MPa
Tensão de rotura	483 MPa
Modulo de elasticidade	73.1 GPa
Coefficiente de Posion	0.33
Massa específica	2.8g/cm <sup>3</sup>

Mas caso fosse necessário podíamos sempre usar um alumínio com melhores propriedades, como por o exemplo o 7075-T6 (ver Tabela 10), mas ao fazê-lo estar-se-ia a encarecer o produto final, visto este alumínio ser 80% mais caro.

Tabela 10- Propriedades do alumínio 7075-T6 [54]

Tensão de cedência	503 MPa
Tensão de rotura	572 MPa
Módulo de elasticidade	71.7 GPa
Coefficiente de Poisson	0.33
Massa específica	2.81g/cm <sup>3</sup>
Preço	3.51€/kg

## 8 Dimensionamento do reservatório

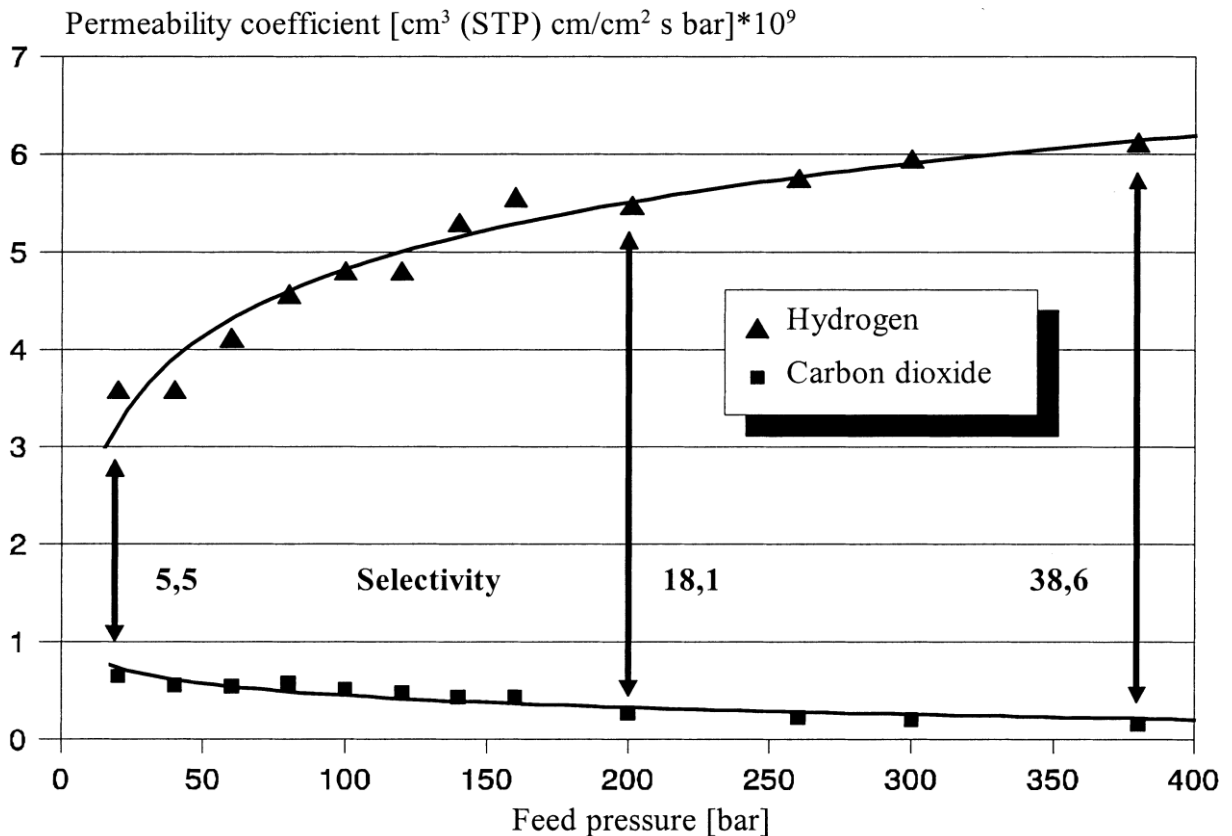
### 8.1 Dimensionamento do *liner* (permeabilidade).

O dimensionamento do *liner* quanto a permeabilidade, foi feito através de um gráfico de um artigo obtido através na internet, onde se demonstra a dependência da permeabilidade com o aumento da pressão. Ao ser usado esse gráfico, está-se a fazer uma aproximação, isto porque a permeabilidade varia até um certo ponto com a espessura do permeado, e como a espessura da amostra usada é de 12µm, estamos a cometer um erro.

Assim sendo, foi feito o dimensionamento do *liner* a partir do Gráfico 5 e da equação (37), sendo imposto o limite de 2cm<sup>3</sup>/h/l dado pela norma ISO 11119-3\_2013 para o caso do hidrogénio num reservatório em um *liner* não metálico.

$$X = \Phi * \frac{A * (p1 - p2)}{L * C} * \quad (37)$$

Sendo  $\Phi$  a permeabilidade, A a área do *liner*, L a espessura do *liner*, p1 a pressão interna, p2 a pressão externa e C a capacidade do reservatório.



Temperature: 35°C      Membrane: PA6, 12µm

Gráfico 5 Variação da permeabilidade do PA6 com a pressão [55]

Sendo  $X=2/3600 \text{ cm}^3/\text{s}/l$ ,  $\Phi=5.9 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ cm}/\text{cm}^2 \text{ s bar}$  (retirado do Gráfico 5 (300 bar)),  $A=4242.3 \text{ cm}^2$  (cálculo a partir do solidworks),  $p_1=300 \text{ bar}$ ,  $p_2=0 \text{ bar}$  e  $c=24l$ .

$$2/3600 = 5.9 \cdot 10^{-9} \frac{4242.3 \cdot (300 - 0)}{L \cdot 24} * \quad (38)$$

$$L = 0.56 \text{ cm} \approx 6 \text{ mm} \quad (39)$$

Após o cálculo da espessura do *liner* a partir da equação (38), foi decidido usar 6mm de PA6, ficando assim com uma margem de segurança, mas mesmo assim no final do projeto devia-se fazer um teste de permeabilidade para verificar se esta não ultrapassa o valor permitido.

Durante o teste de permeabilidade poderá surgir problemas na interface *liner*/peça metálica superior, tendo-se que efetuar mais tarde alterações no seu design. Uma sugestão seria o *liner* envolver a peça metálica superior por dentro, permitindo a vedação do reservatório através do *liner* (ver exemplo na Figura 28 (*liner* a amarelo)).

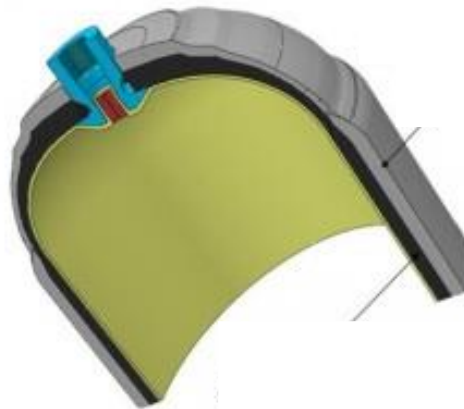


Figura 28 – Alternativa para melhor a permeabilidade do reservatório [56].

Outro método para o dimensionamento do *liner*, seria o uso da equação (4), mas como não conseguiu encontrar todos os dados necessários para o seu uso, essa possibilidade foi descartada.

Para a produção do *liner* foi decidido usar o processo de moldação por injeção, isto porque este processo possui um grande controlo da espessura do *liner* e também porque melhora a aderência das peças metálicas ao *liner*, devido as estas serem colocadas no molde antes de o processo de injeção ocorrer.

## 8.2 Dimensionamento do compósito

Para o dimensionamento do compósito, foi usado a teoria *Netting Analysis* para o cálculo de um primeiro valor, sendo depois ajustado através do programa ABAQUS®.

### 8.2.1 Cálculo espessura do compósito (teoria *Netting Analysis*)

Primeiro começou-se por calcular o ângulo alfa a partir da equação (1), para um valor mais correto adicionei a largura da banda do compósito (30mm).

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{24 + 24 + 30}{441}\right) = 10.03 \approx 10^\circ \quad (40)$$

Calculando a espessura das duas camadas a partir das equações (28) e (35) e considerando a pressão interna a pressão de rebentamento (90 MPa).

$$t_{f\phi} = \frac{90 * 149}{2 * 1439 * \cos^2(10)} = 4.80mm \quad (41)$$

$$t_{f\theta} = \frac{90 * 149}{2 * 1439} (2 - \tan^2(10)) = 9.17mm \quad (42)$$

Após o cálculo teórico pode-se concluir que a espessura das fibras helicoidais é de 4.8 mm, enquanto que a espessura das fibras circunferenciais é de 9.17 mm.

### 8.2.2 Dimensionamento do compósito a partir do ABAQUS®

Com os cálculos teóricos anteriormente feitos, passou-se para a validação com o programa ABAQUS® 2017. Neste caso foi usada a formulação 2D, isto para tonar a simulação mais simples e rápida.

Uma coisa a ter em atenção, é que uma simulação feita com um *software* é uma aproximação da realidade, como tal existem sempre erros. Sendo que aproximação dependendo da aproximação dos parâmetros usados na simulação durante a simulação, como por exemplo, o tipo e o numero de elementos finitos usados. Nas simulações executadas foram usados bastantes elementos finitos, o que é bom, mas por outro lado usei uma aproximação na interface *liner*/parte compósita/peças metálicas, pois considerei que estas estavam completamente soldadas uma às outras, o que não é verdade, pois na realidade a parte compósita pode-se desprender das partes metálicas, o que não é possível na simulação executada. Outra aproximação possível, seria o uso de um coeficiente de atrito na interface *liner*/parte compósita/peças metálicas, o que acaba por ser também uma aproximação, pois a parte compósita na realidade adere às peças metálicas/*liner*.

Durante a simulação foi definido um valor fixo para a espessura das camadas, tendo-se definido 0.4mm para as camadas circunferenciais e 1.3mm para as camadas helicoidais, este facto baseou-se num valor médio das espessuras usadas na indústria, para um valor mais preciso deveria.se consultar o fornecedor da fibra pré-impregnada.

Na Figura 29 podemos ver a primeira simulação corrida no ABAQUS® com as espessuras calculadas anteriormente, e como podemos ver os valores máximos de tensão passam bastante da tensão de cedência máxima (1439 MPa). Se formos a analisar a Figura 29 da direita, podemos ver os locais onde a tensão de cedência ultrapassa o limite máximo, o que acontece em vários locais do reservatório, sendo perto das peças metálicas que ocorre o local mais crítico. Como conclusão, podemos dizer que não nos podemos guiar muito pela teoria *Netting Analysis*, isto porque esta não prevê o aparecimento das concentrações de tensões, o que induz num grande erro.

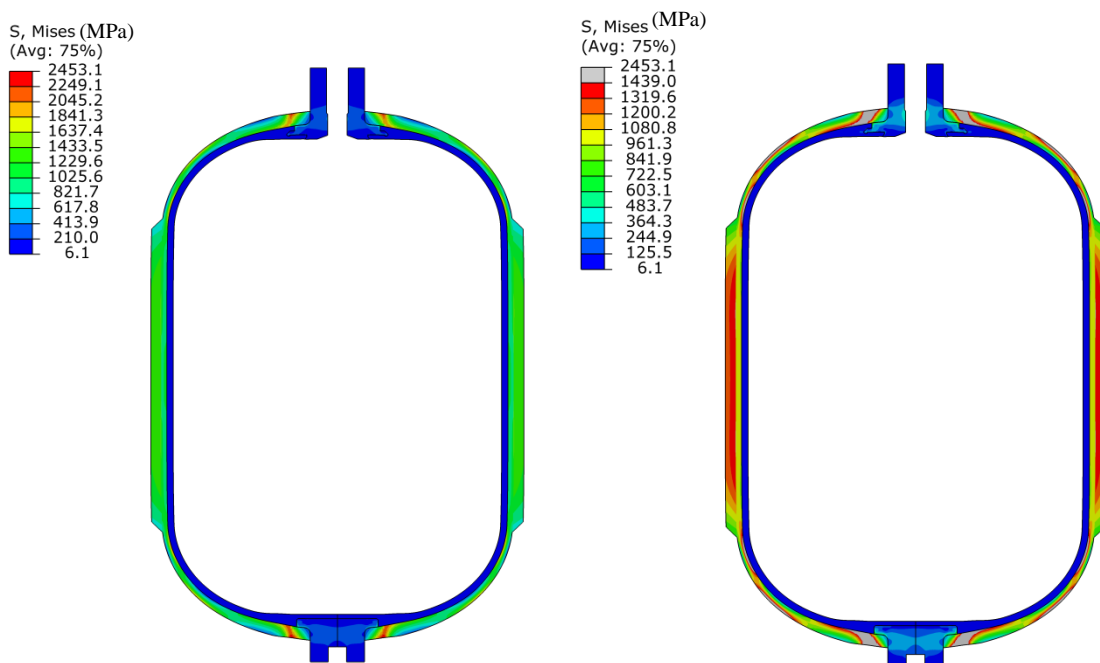


Figura 29-Distribuição das tensões no reservatório com a espessura calculada pela teoria *Netting Analysis* (90MPa)

O passo seguinte passou por ir aumentando a espessura das várias camadas do compósito até o reservatório conseguir aguentar uma pressão 90 MPa (pressão de rebentamento). Como aproximação usei que o rebentamento do reservatório, só ocorria quando 10% do compósito numa qualquer localização da parte compósita do reservatório, ultrapassasse a tensão de cedência. Este facto foi baseado na experiência de um engenheiro da AMTROL ALFA.

Em seguida serão apresentadas as duas soluções encontradas para o reservatório de pressão solicitado.

### 8.2.2.1 Solução 1

Esta solução tem como base o uso do mesmo ângulo de enrolamento ( $\alpha$ ) para todas as camadas helicoidais (10 graus), nesta solução foi-se aumentado camada a camada até a rotura o reservatório ocorrer a 90 MPa. Na Tabela 11 é apresentada a configuração das camadas usadas nesta solução, sendo por sua vez, apresentado na Tabela 12 os tipos e número de elementos usadas na simulação desta solução.

Tabela 11- Configuração das camadas na solução 1

<b>Tipo de camada(s)</b>	<b>Nº de camadas</b>	<b>Ângulo (<math>\alpha</math>).</b>	<b>Espessura</b>	<b>Largura da banda</b>
Helicoidal	8	10°	1.3 mm	30 mm
Circunferencial	22	90°	0.4 mm	30 mm

Tabela 12-Tipos/número de elementos usados na solução 1

	<b>CAX4R(quad.)</b>	<b>CAX4(quad.)</b>	<b>CAX3(triang.)</b>	<b>Total</b>
Peça metálica superior	1567	0	50	1617
Peça metálica inferior	1406	0	37	1513
<i>Liner</i>	9247	0	241	9488
Parte compósita	0	35198	4	42062

### Simulação do reservatório a 30MPa (pressão de serviço)

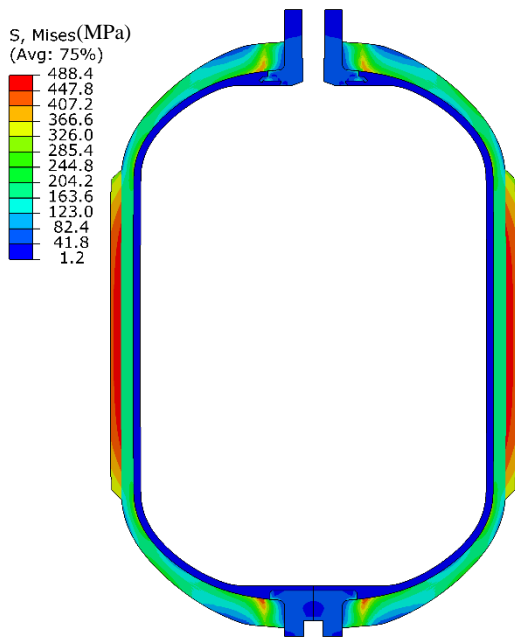


Figura 30- Simulação reservatório (30 MPa-solução 1)

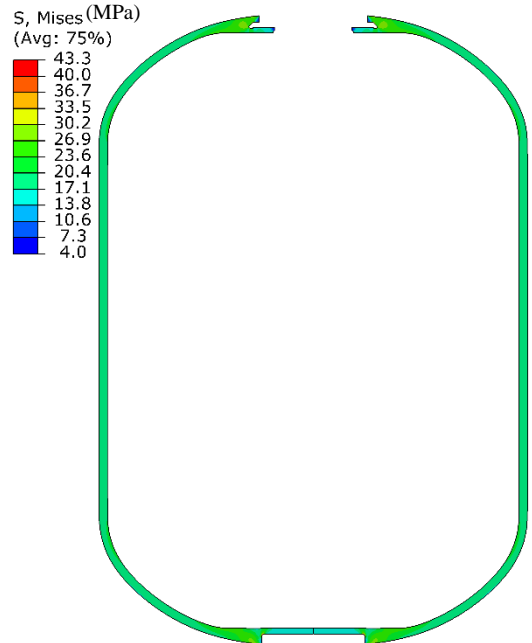


Figura 31- Simulação *liner* (30 MPa-solução 1)

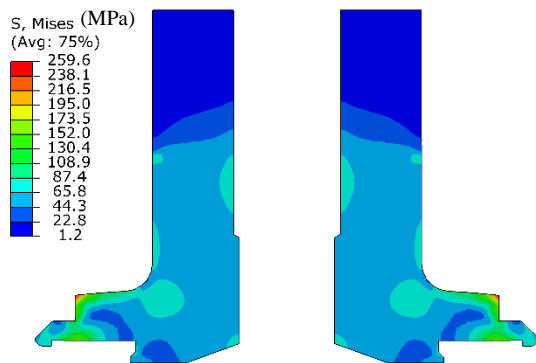


Figura 32- Simulação peça metálica superior (30 MPa-solução 1)

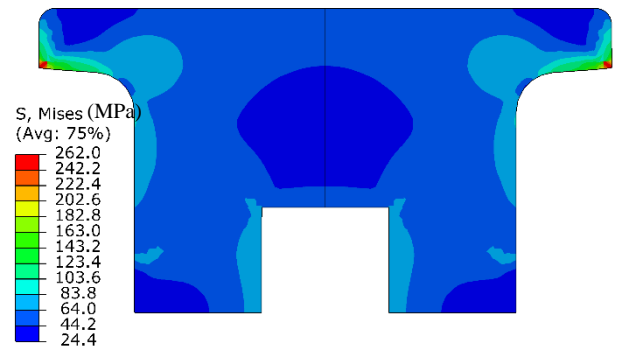


Figura 33- Simulação peça metálica inferior (30 MPa-solução 1)

Nas quatro imagens acima, podemos ver a simulação corrida para várias partes do reservatório à pressão de serviço (30 MPa). A partir da Figura 30 podemos verificar que a parte compósita possui duas zonas de concentrações de tensões, uma zona perto das peças metálicas e a outra nas fibras circunferenciais. Quanto ao *liner*, podemos dizer que este está prestes a entrar em plastificação (plastifica a 43.4 MPa), o que poderá conduzir a uma maior permeabilidade. E por fim, nas peças metálicas (superior e inferior) existe uma zona de concentração de tensões, mas como está longe da tensão de cedência não irá provocar problemas.

### Simulação do reservatório a 45MPa (pressão de teste)

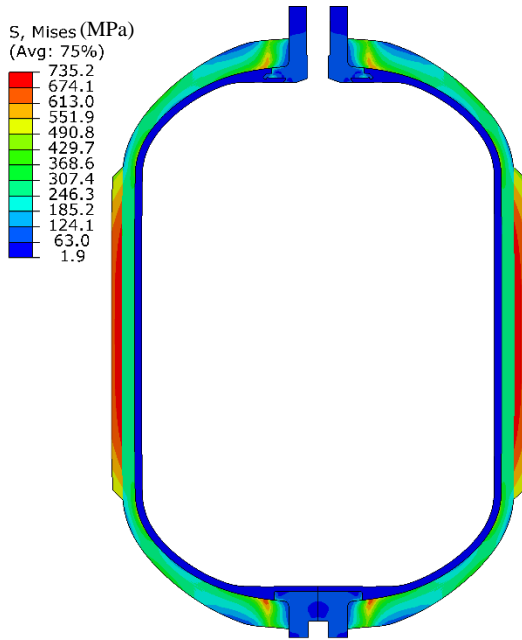


Figura 34- Simulação reservatório (45 MPa-solução1)

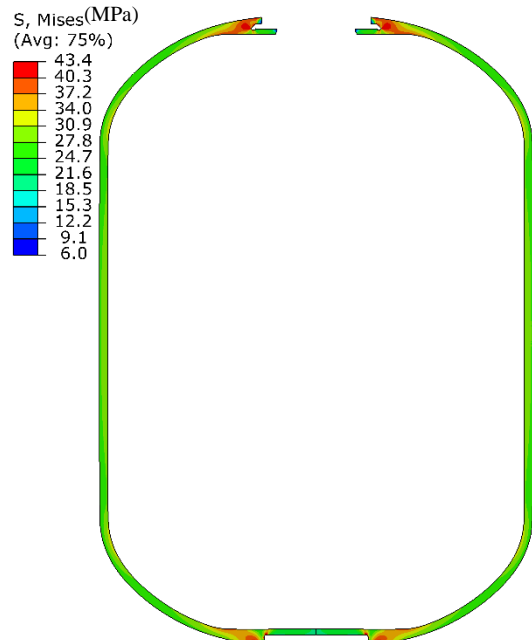


Figura 35- Simulação *liner* (45 MPa-solução1)

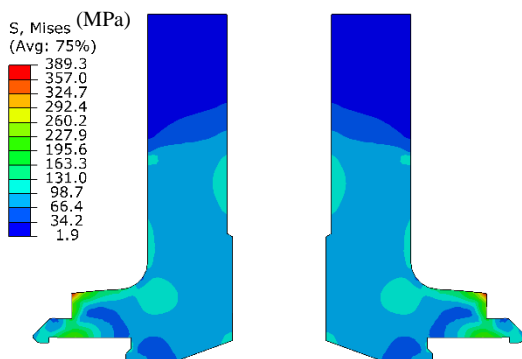


Figura 36- Simulação peça metálica superior (45 MPa-solução1)

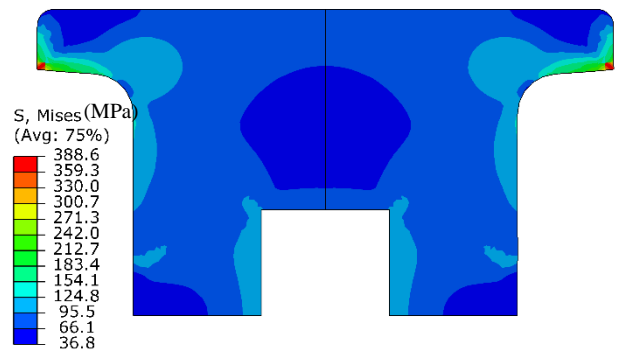


Figura 37- Simulação peça metálica inferior (45 MPa-solução1)

Ao atingir a pressão de teste, surge um problema no *liner*, pois aparece uma pequena plastificação<sup>2</sup> junto as peças metálicas, e como estamos a falar na pressão de teste do reservatório, isso implica que os reservatórios comercializados já vão possuir essa plastificação, mas não deverá afetar muito a permeabilidade do reservatório. Uma maneira de reduzir a zona plastificada caso se verificasse um problema, seria aumentar a espessura total das camadas helicoidais.

<sup>2</sup> Como aproximação considerei que a zona a vermelho estaria plastificada, pois como a tensão de rotura é menor que a tensão de cedência não dá para ver bem a zona plastificada.

### Simulação do reservatório a 90MPa (pressão de rebentamento)

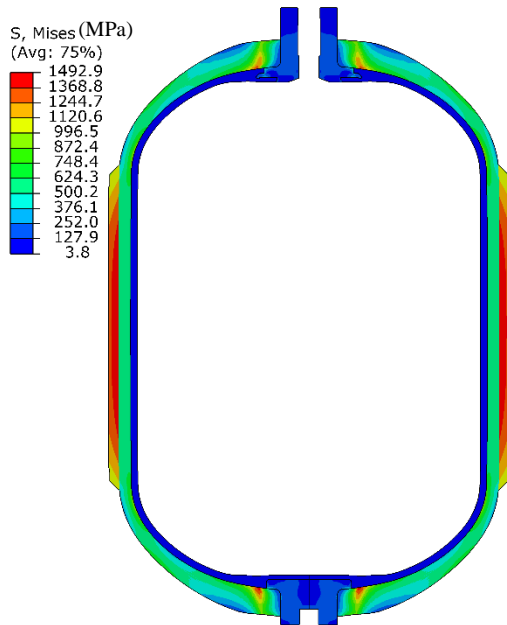


Figura 38- Simulação reservatório (90 MPa-solução1)

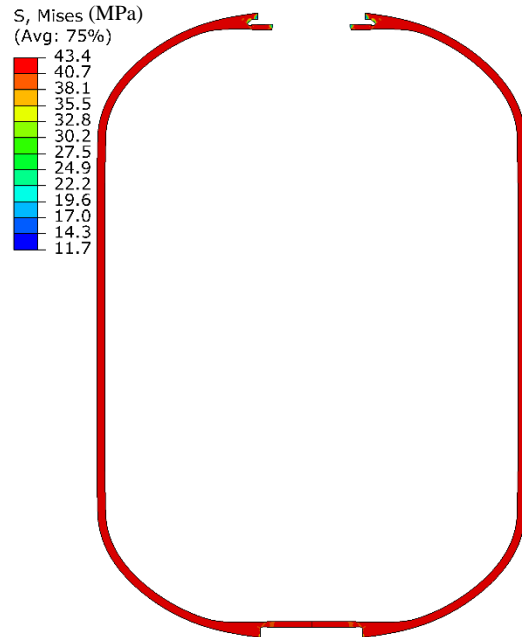


Figura 39- Simulação *liner* (90 MPa-solução1)

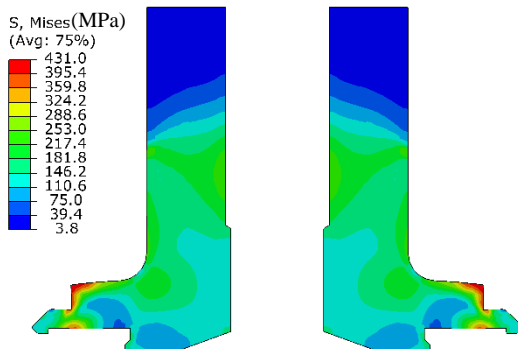


Figura 40- Simulação peça metálica superior (90 MPa-solução1)

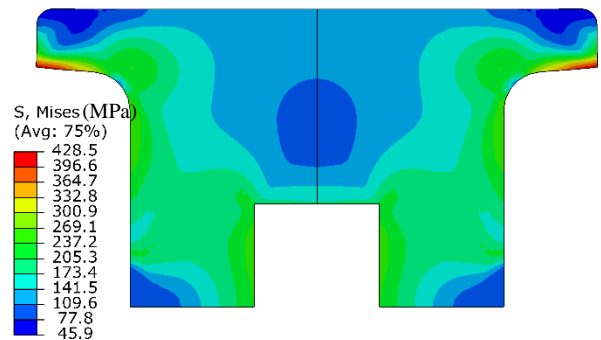


Figura 41- Simulação peça metálica inferior (90 MPa-solução1)

Ao chegar a pressão de rebentamento, o reservatório apresenta grandes deformações plásticas o que vai comprometer o seu funcionamento normal. O *liner* pode-se considerar que plastificou completamente, ambas peças metálicas já apresentam deformação plástica ( $\sigma_c=414\text{MPa}$ /  $\sigma_r=483\text{MPa}$ ), apesar de ainda estarem longe da tensão de rotura. E, por fim, a tensão de rotura das fibras é ultrapassada, o que causará o rebentamento do reservatório.

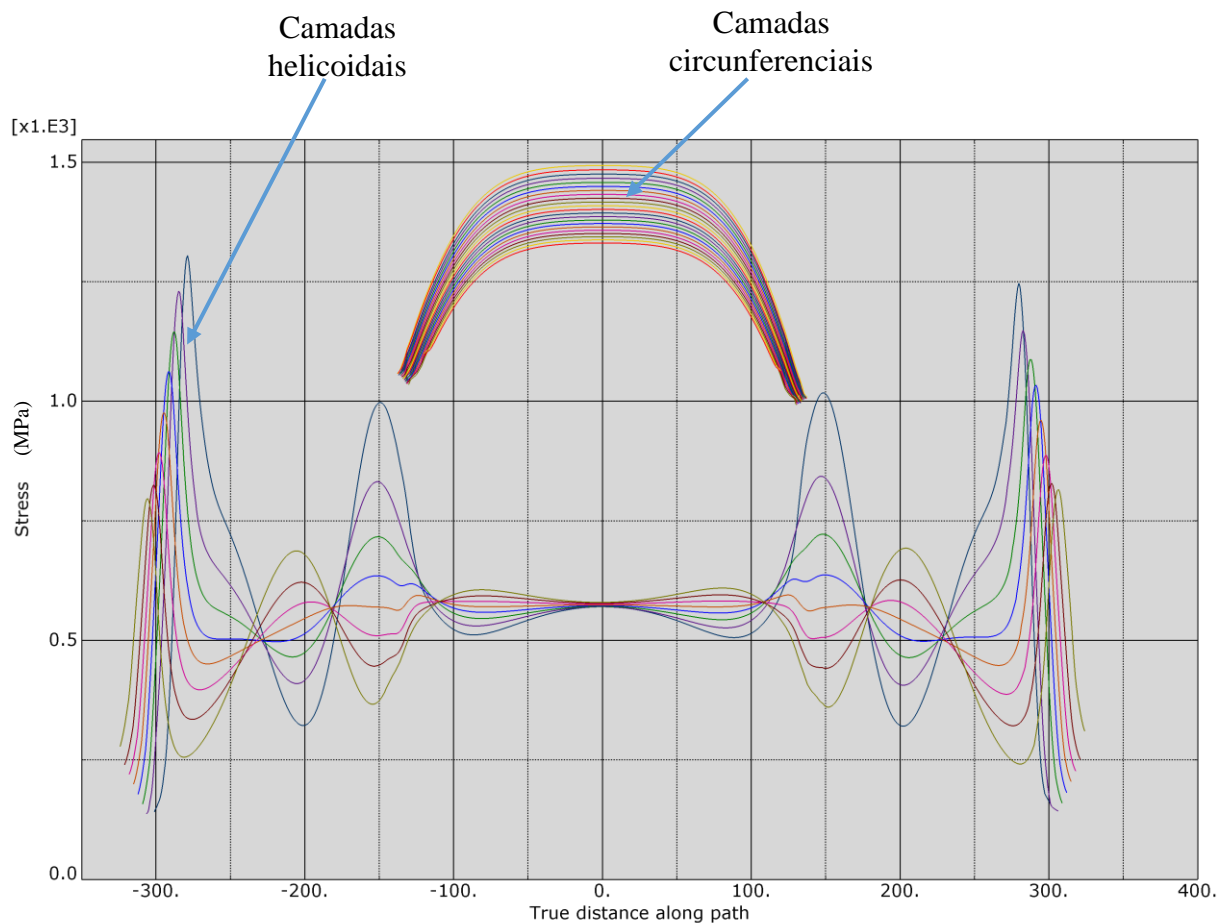


Gráfico 6- Evolução da tensão de Von Mises nas camadas compósitas ao longo do comprimento do reservatório (solução 1- 90 MPa)

Analisando o Gráfico 6, podemos dizer que a zona crítica do cilindro ocorre nas camadas circunferenciais, sendo esse o local de maior tensão. Também podemos observar que uma segunda zona mais crítica (topos), onde a tensão máxima está um pouco abaixo da tensão nas camadas circunferenciais, sendo essa a zona que vai ditar a espessura das camadas helicoidais. A partir do gráfico anterior, podemos dizer que o rebentamento vai ocorrer na zona cilíndrica causando assim uma maior segurança, pois este local deve ocorrer o rebentamento.

Como otimização desta solução, poder-se-ia tentar igualar ou reduzir a tensão na zona crítica das várias camadas helicoidais, podendo ser feito a partir da distribuição uniforme da tensão pelas várias camadas modificando os parâmetros das camadas helicoidais ou então simplesmente alterando o design do *liner*.

No Gráfico 7, podemos ver o deslocamento radial, onde se pode observar o efeito esperado das camadas circunferenciais (deslocamento relativo praticamente nulo no centro e o aparecimento de dois máximos secundários devido a perda de rigidez radial).

No caso do deslocamento longitudinal (Gráfico 8), podemos observar que na zona cilíndrica do reservatório existe um aumento constante do deslocamento, enquanto nos topos não existe uma variação de deslocamento constante, devido à variação do ângulo de enrolamento com a diminuição raio.

Na Tabela 13, podemos ver a massa das várias partes do reservatório, sendo a parte compósita é a mais pesada (78% do peso total), o que era de esperar, visto ser essa parte que atribui a rigidez ao reservatório.

Tabela 13-Massa das peças do reservatório (solução 1)

	<b>Massa (Kg)</b>
Peça metálica superior	0.36
Peça metálica inferior	0.24
<i>Liner</i>	3.06
Parte compósita	13.07
<b>Total</b>	<b>16.73</b>

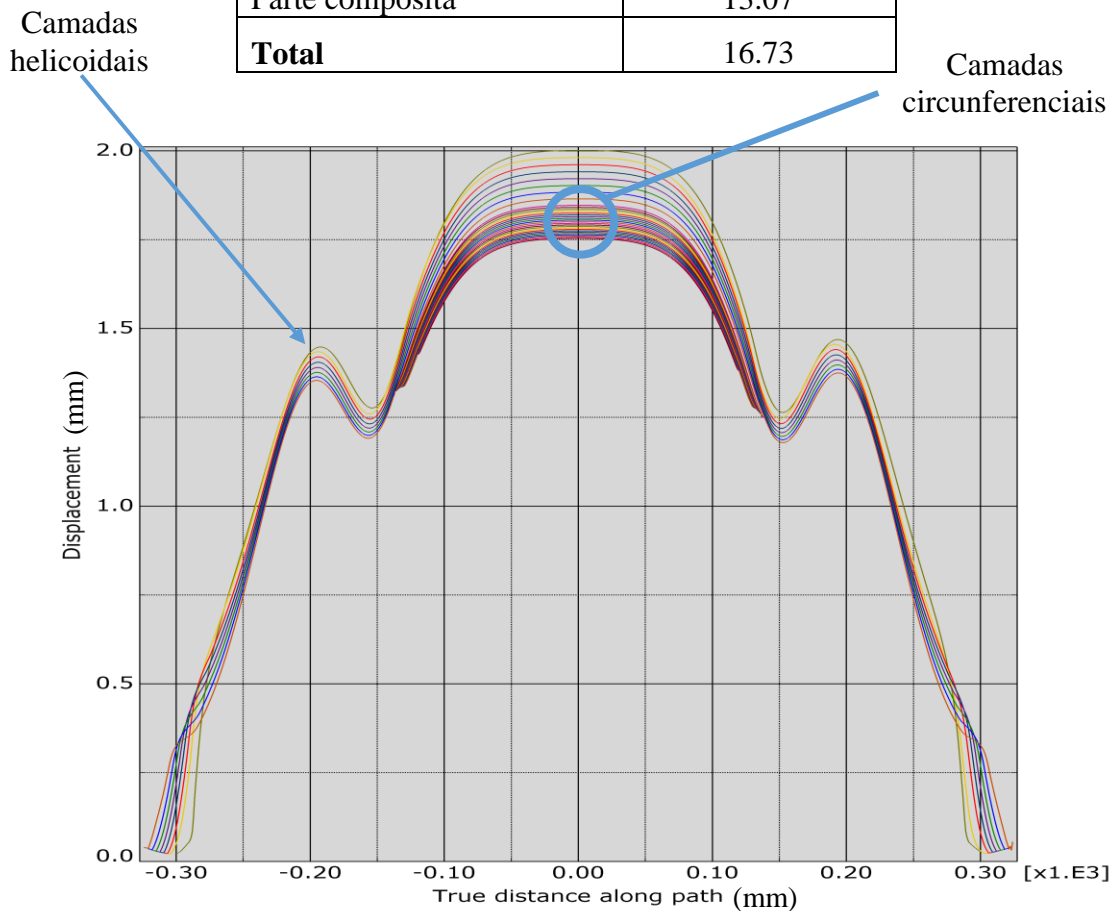


Gráfico 7- Deslocamento radial (solução 1- 90 MPa)

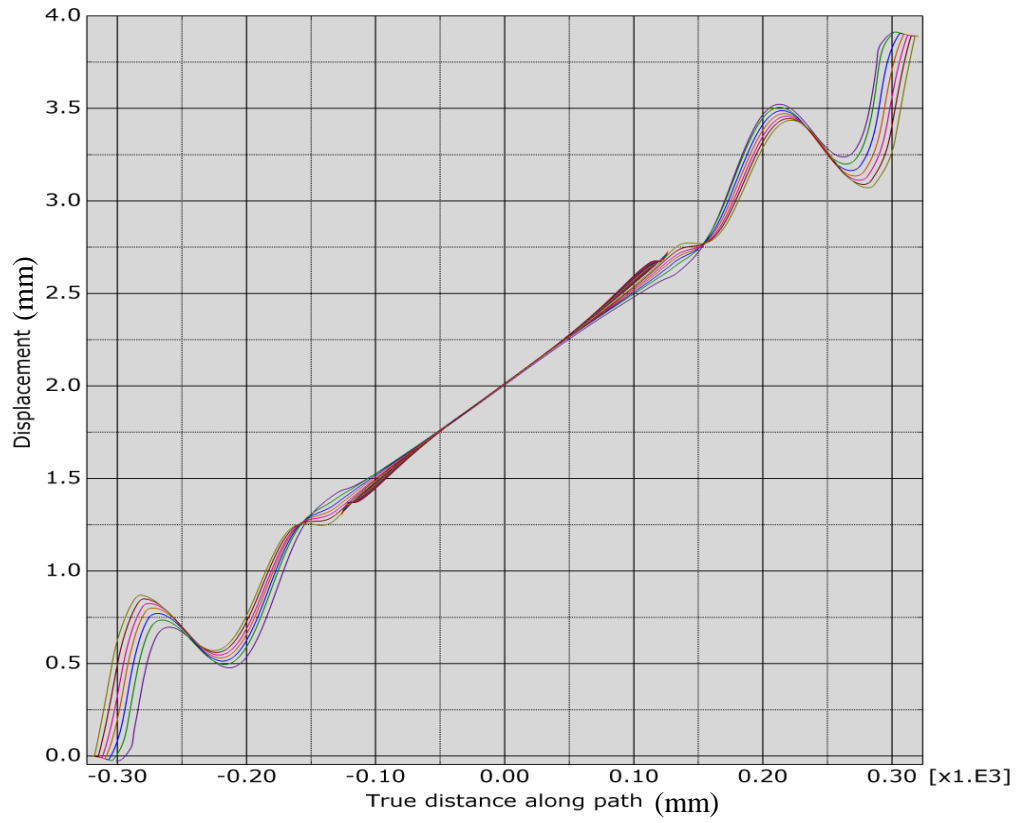


Gráfico 8-Deslocamento longitudinal (solução 1- 90 MPa)

### 8.2.2.2 Solução 2

Nesta solução houve um ajuste do ângulo de enrolamento de todas as camadas, de forma a reduzir a tensão em todos os componentes do reservatório, nesta simulação também houve um ajuste no design do *liner* de forma a tentar reduzir ainda mais as tensões no reservatório. Na Tabela 14 é apresentada a configuração das camadas usadas nesta solução, sendo também apresentado na Tabela 15, os tipos e número de elementos usadas na simulação deste caso.

Tabela 14- Configuração das camadas na solução 2

<b>Tipo de camada(s)</b>	<b>Nº de camadas</b>	<b>Ângulo (<math>\alpha</math>).</b>	<b>Espessura</b>	<b>Largura da banda</b>
Helicoidal	1	30°	1.3 mm	30 mm
Helicoidal	1	10	1.3 mm	30 mm
Helicoidal	1	26	1.3 mm	30 mm
Helicoidal	1	40	1.3 mm	30 mm
Helicoidal	1	13	1.3 mm	30 mm
Helicoidal	1	26	1.3 mm	30 mm
Helicoidal	1	40	1.3 mm	30 mm
Circunferencial	19	90°	0.4 mm	30 mm

Tabela 15- Tipos/número de elementos usados na solução 2

	<b>CAX4R (quad.)</b>	<b>CAX4(quad.)</b>	<b>CAX3 (triang.)</b>	<b>Total</b>
Peça metálica superior	1567	0	50	1617
Peça metálica inferior	1406	0	37	1513
<i>Liner</i>	9247	0	241	9488
Parte compósita	0	35198	1	35199

### Simulação do reservatório a 30MPa (pressão de serviço)

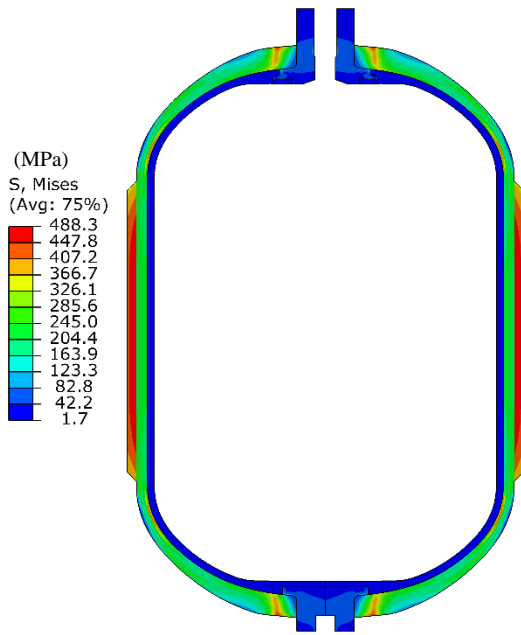


Figura 42- Simulação reservatório (30 MPa-solução 2)

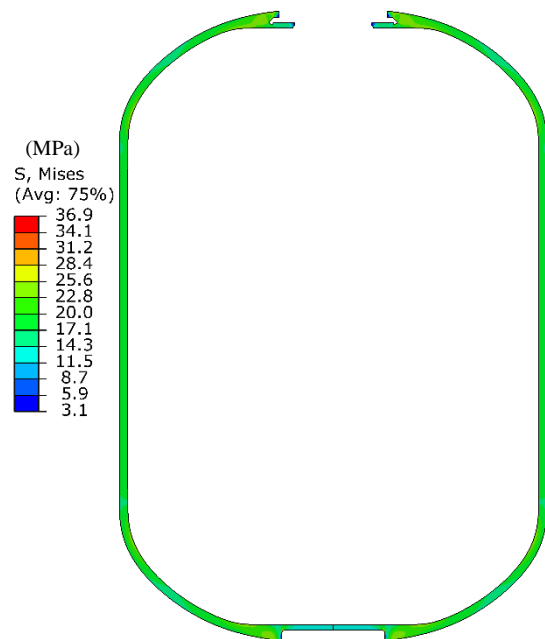


Figura 43- Simulação *liner* (30 MPa-solução 2)

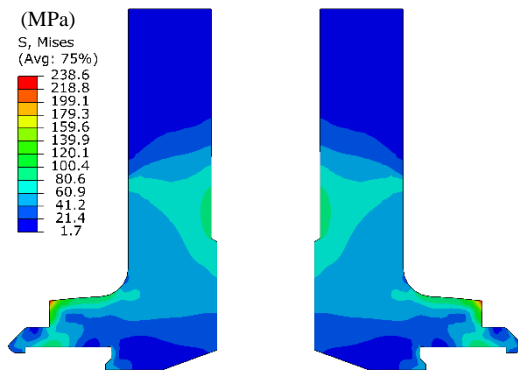


Figura 44- Simulação peça metálica superior (30 MPa-solução 2)

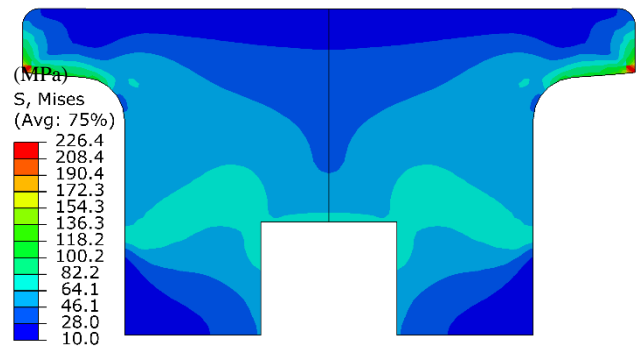


Figura 45- Simulação peça metálica inferior (30 MPa-solução 2)

Nas figuras acima podemos ver a simulação corrida para várias peças do reservatório à pressão de serviço (30 MPa). A partir da Figura 42 podemos verificar que a parte compósita possui três zonas de concentrações de tensões, uma zona perto das peças metálicas, outra nas fibras circunferenciais e por fim podemos ver uma pequena concentração de tensões junto ao início da curvatura do reservatório (esta zona poderia ser diminuída com o aumento das camadas circunferências).

## Simulação do reservatório a 45MPa (pressão de teste)

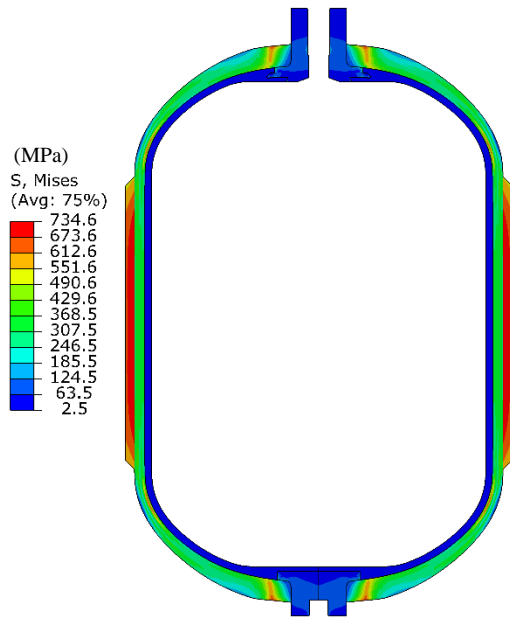


Figura 46- Simulação reservatório (45 MPa-solução 2)

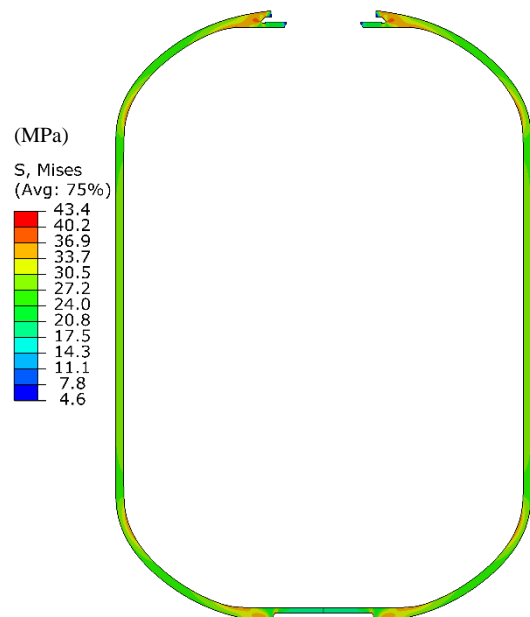


Figura 47- Simulação *liner* (45 MPa-solução 2)

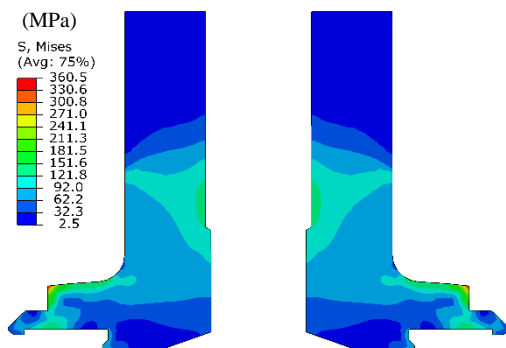


Figura 48- Simulação peça metálica superior (45 MPa-solução 2)

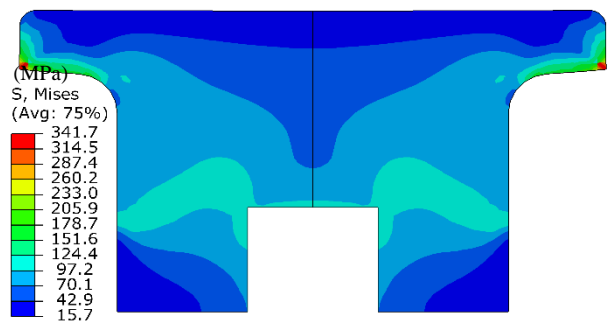


Figura 49- Simulação peça metálica inferior (45 MPa-solução 2)

Ao aumentar a pressão até atingir a pressão de teste, surge uma plastificação<sup>3</sup> no *liner* muito pequena que pode ser ignorada. Quanto às peças metálicas ou parte compósita, estes conseguem suportar sem problemas a pressão de teste (45 MPa).

<sup>3</sup> Como aproximação considerei que a zona a vermelho estaria plastificada, pois como a tensão de rotura é menor que a tensão de cedência não dá para ver bem a zona plastificada.

### Simulação do reservatório a 90MPa (pressão de rebentamento)

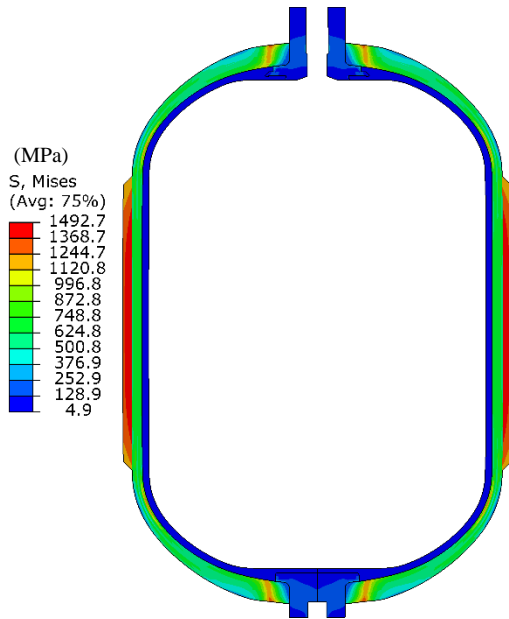


Figura 50- Simulação reservatório (90 MPa-solução 2)

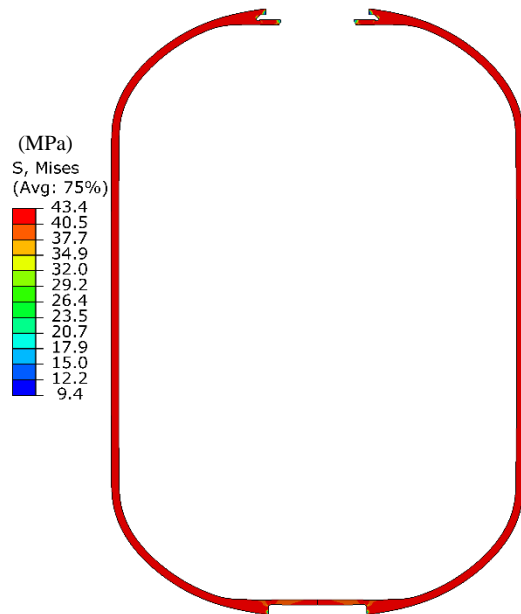


Figura 51- Simulação *liner* (90 MPa-solução 2)

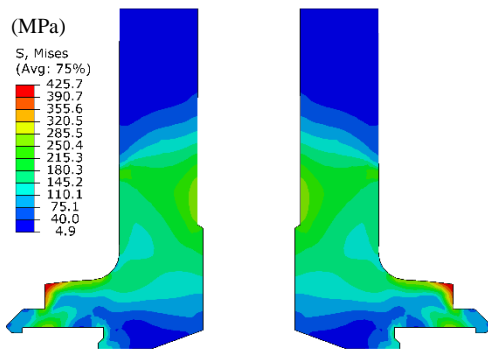


Figura 52- Simulação peça metálica superior (90 MPa-solução 2)

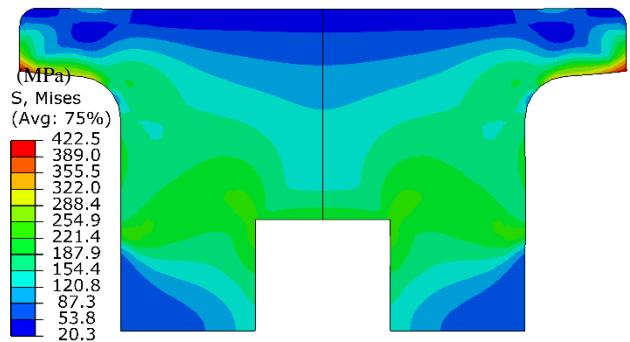


Figura 53- Simulação peça metálica inferior (90 MPa-solução 2)

Aos 90 MPa, o reservatório apresenta deformações irreversíveis quer nas peças metálicas ou no *liner*. No caso do *liner* é ainda mais grave, visto ocorrer uma plastificação total, mas como estamos a falar de uma pressão bastante superior à pressão de serviço, o problema do aumento da permeabilidade não se põe em causa.

No Gráfico 9, podemos verificar que o rebentamento vai ocorrer na parte cilíndrica do reservatório, o que foi desejado, visto assim fornecer uma maior segurança no caso de ser ultrapassado a pressão de rebentamento. Também se pode dizer que a tensão ficou bem distribuída pelas várias camadas, conseguindo-se assim reduzir a espessura.

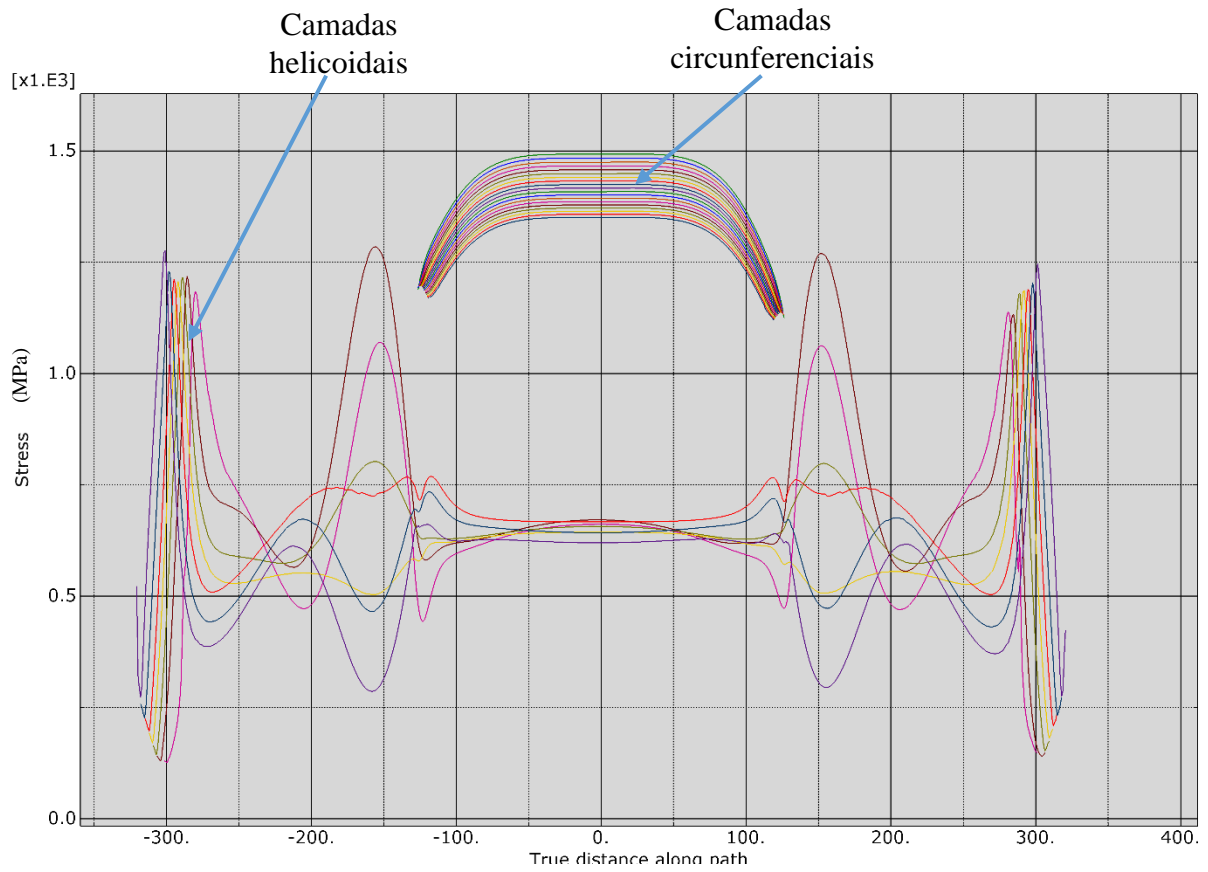


Gráfico 9- Evolução da tensão de Von Mises nas camadas compostas ao longo do comprimento do reservatório (solução 2- 90 MPa)

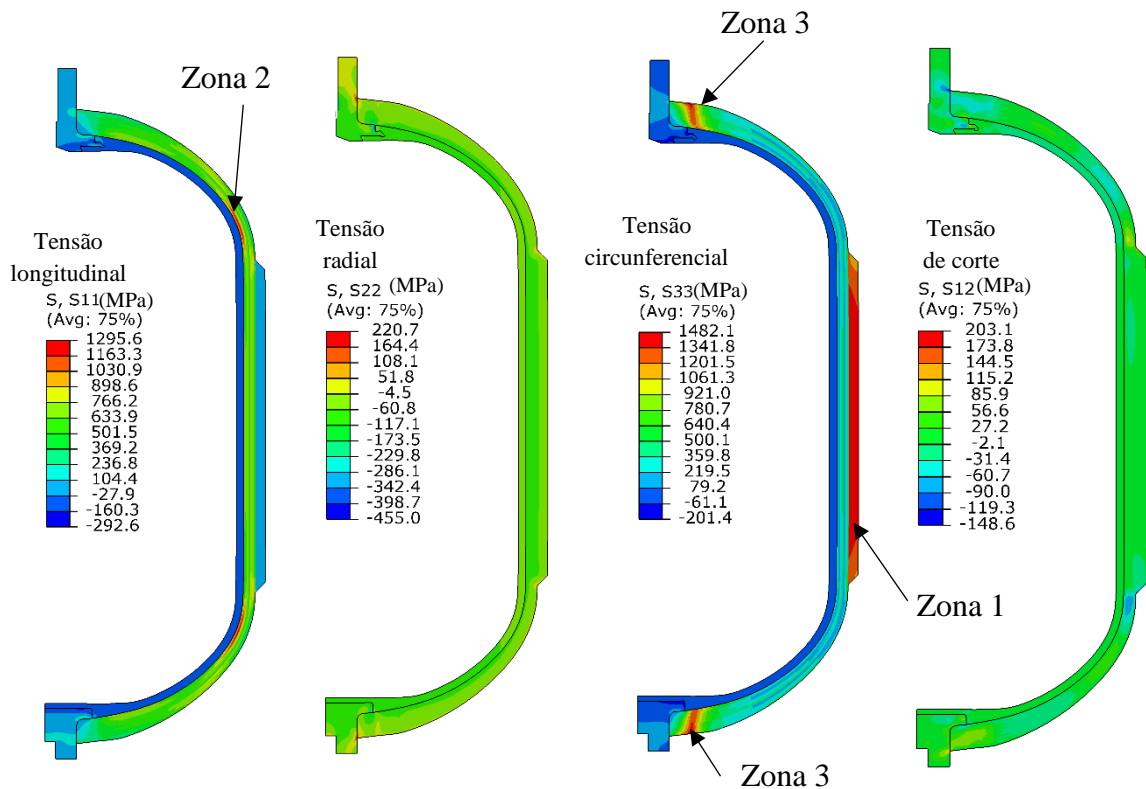


Figura 54-Tensão radial, longitudinal, circunferencial e de corte no reservatório ((solução 2- 90 MPa))

Analisando a Figura 54, podemos identificar qual é a direção da tensão que provoca cada zona crítica. A tensão na zona 1 é provocada pela tensão circunferencial o que era de se esperar, visto que essas camadas de compósito foram produzidas para suportar esse tipo esforço. No caso da zona crítica 2 a tensão dominante é a tensão longitudinal, que é provocada pelo início da curvatura do reservatório. Por fim na zona 3, a tensão preponderante é a circunferencial, isto acontece devido à variação acentuada do ângulo de enrolamento nessa zona.

No Gráfico 11, podemos ver o deslocamento radial, onde se pode observar o efeito esperado das camadas circunferências (deslocamento relativo praticamente nulo no centro e o aparecimento de dois máximos secundários devido a perda de rigidez radial).

No caso do deslocamento longitudinal (Gráfico 10), podemos observar que na zona cilíndrica do reservatório, existe um aumento constante do deslocamento, enquanto nos topos não existe uma variação deslocamento constante, devido à variação do angulo de enrolamento com a diminuição raio.

Na Tabela 16, podemos ver a distribuição da massa no reservatório, podendo ser observado que a parte compósita é a mais pesada (68% do peso total), o que era de esperar, visto ser essa parte que atribui a rigidez ao reservatório.

Tabela 16-Massa das peças do reservatório (solução 2)

	<b>Massa (Kg)</b>
Peça metálica superior	0.36
Peça metálica inferior	0.24
<i>Liner</i>	3.06
Parte compósita	7.88
<b>Total</b>	11.54

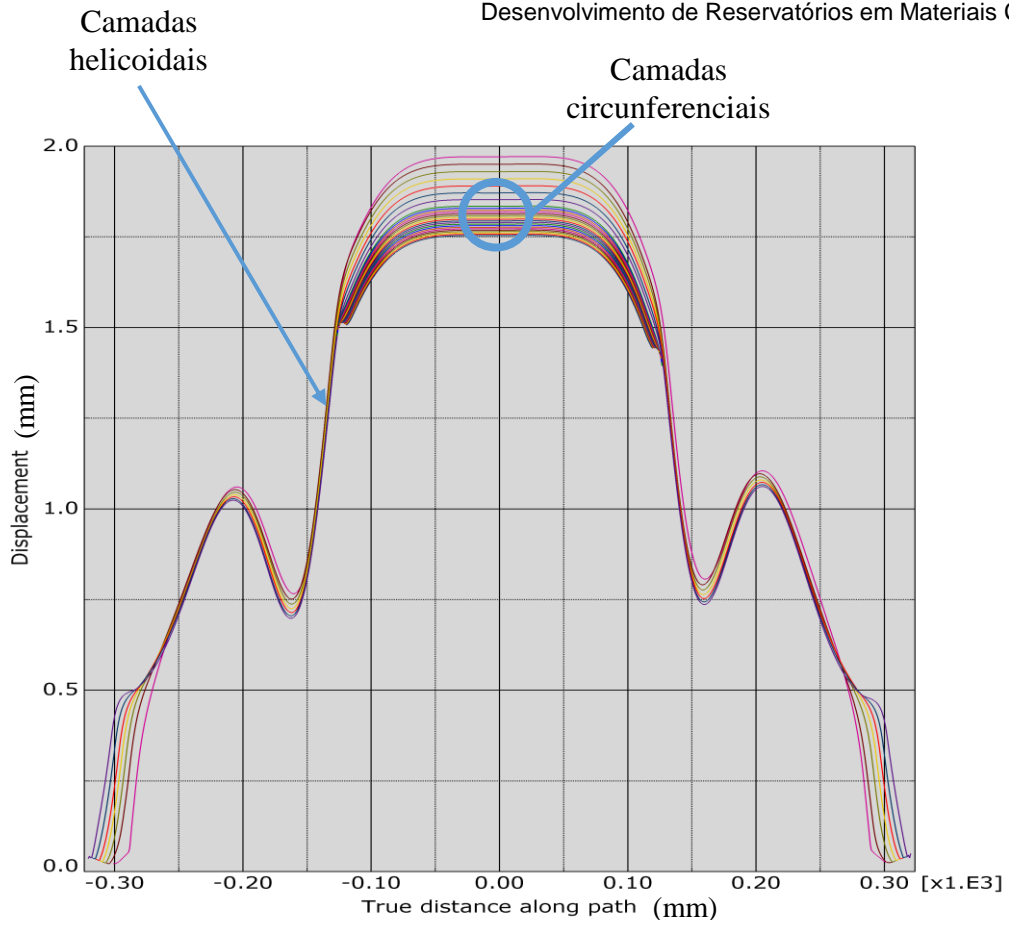


Gráfico 11-Deslocamento radial (solução 2- 90 MPa)

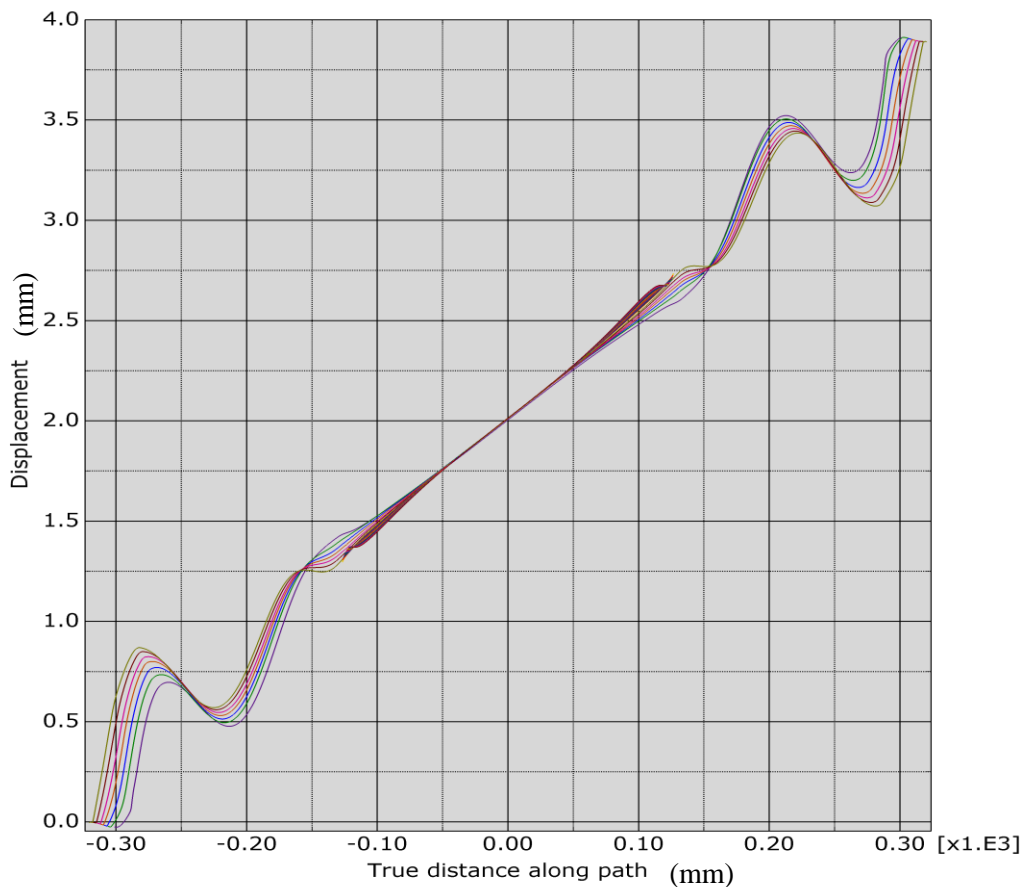


Gráfico 10- Deslocamento longitudinal (solução 2- 90 MPa)

### 8.3 Discussão dos resultados

Com a simulação corrida para as duas soluções encontradas, vai-se agora proceder a comparação. Observando a tensão máxima nas várias partes do reservatório na Tabela 17, podemos dizer que a solução 2 (S2) possui tensões máximas um pouco mais reduzidas, e como esta solução contém a espessura total mais reduzida (Tabela 18), podemos afirmar que esta é a melhor solução.

Outra melhoria existente na solução 2 é que a área de plastificação do *liner* ser menor durante à pressão de teste, o que contribui para uma melhoria da permeabilidade do reservatório.

Essa melhoria foi conseguida através da variação do ângulo de enrolamento das camadas helicoidais, pois com a variação do angulo das várias camadas conseguiu-se distribuir uniformemente a tensão nas zonas críticas pelas várias camadas helicoidais e por sua vez com aumento do ângulo de enrolamento, o esforço nas camadas circunferenciais diminuiu o que permitiu reduzi-las. Mas não podemos dizer que a solução 2 só tem benefícios, pois nesta solução existe uma concentração de tensões maior no início da curvatura do reservatório, atingindo a segunda maior tensão no reservatório, mas como tensão é muito próxima à da zona crítica dos topos, acaba por não haver problemas.

Tabela 17-Tensões máximas nas várias partes do reservatório (tensões em MPa).

	<b>30 MPa</b>	<b>30 MPa</b>	<b>45 MPa</b>	<b>45 MPa</b>	<b>90 MPa</b>	<b>90 MPa</b>
	<b>(S1)</b>	<b>(S2)</b>	<b>(S1)</b>	<b>(S2)</b>	<b>(S1)</b>	<b>(S2)</b>
<b>Peça metálica superior</b>	259.6	238.6	389.3	360.5	431.0	425.7
<b>Peça metálica inferior</b>	262.0	226.4	388.6	341.7	428.5	422.5
<b>Liner</b>	43.3	36.9	43.4	43.4	43.4	43.4
<b>Parte compósita</b>	488.4	488.3	735.2	734.6	1492.9	1492.7

Tabela 18 – Comparação da espessura das duas soluções encontradas

	<b>Massa (Kg)</b>	<b>Nº camadas helicoidais</b>	<b>Nº camadas</b>
	<b>Total/compósito</b>	<b>(1.3mm)</b>	<b>circunferenciais (0.4 mm)</b>
Solução 1	16.73/13.07	8	22
Solução 2	11.54/7.88	7	19

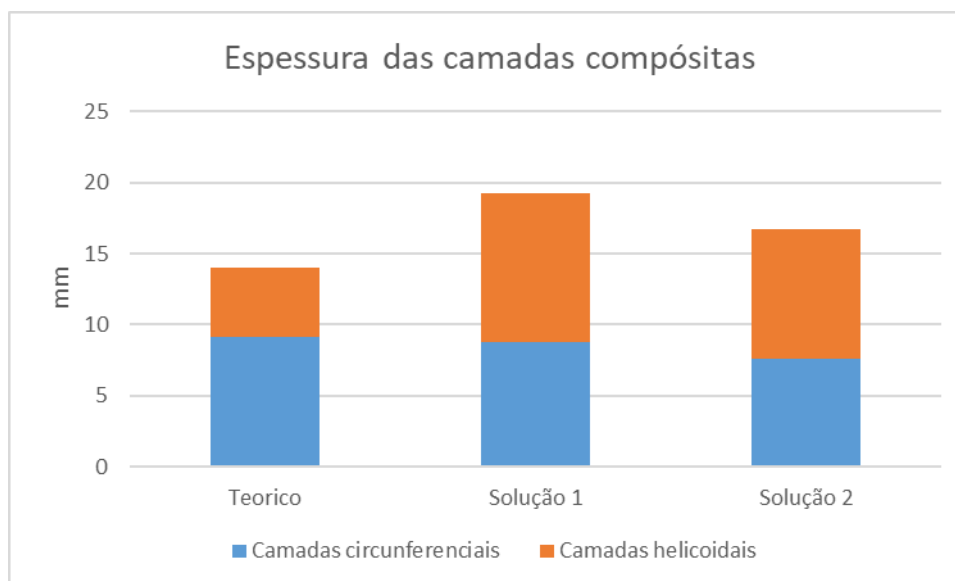


Gráfico 12-Distribuição da espessura das camadas compósitas

Como podemos ver Gráfico 12 houve um aumento da espessura em ambas soluções ao que se tinha inicialmente calculado, isto acontece por causa da necessidade de aumentar as camadas helicoidais, devido às concentrações de tensões existentes. Para se tentar melhorar a solução, poder-se-ia tentar ver a influência da curvatura dos topos do reservatório, mas no caso de um aumento de curvatura, um inconveniente acontece, que é o aumento do espaço necessário para colocar o reservatório.

Quanto ao preço final do reservatório, podemos dizer que a solução 2 é mais barata, isto porque a única variação entre as duas soluções é a parte compósita, e como a solução 2 pesa menos 40% que a solução 1, podemos então considerar a solução 1 mais cara.

Como comparação da melhor solução encontrada usarei um trabalho de um colega antigo da FEUP (Ricardo Castro) [50], que simulou um reservatório com o mesmo tipo de fibra, mas antes de fazer uma comparação tenho que alertar que existem algumas diferenças no design do reservatório, pois no reservatório produzido pelo Ricardo Castro tem os topos mais arredondados, tem um comprimento do *liner* 10% maior e o diâmetro 7% maior, mas só consegue armazenar mais 2 litros.

Sendo assim, no caso de querer igualar a quantidade a armazenar só teria que aumentar 6mm ao raio, mantendo as restantes dimensões, ou seja seria um aumento de 4%. Tendo já falado das diferenças, vamos comparar os resultados obtidos. Na solução simulada foi conseguido uma massa total de 11.54 Kg, enquanto Ricardo Castro [50] obteve um peso de 22.5 Kg, comprovando-se assim que se obteve uma boa simulação, pois apesar de possuir menos 2 litros, foi conseguido quase metade do peso, e ainda por cima o reservatório do Ricardo só aguenta 76.65 MPa sem rebentar, enquanto que no caso da solução 2 aguenta 90 MPa.

## 9 Conclusões e trabalhos futuros

### 9.1 Conclusões

Neste trabalho foram trabalhados vários conhecimentos sobre reservatórios, nomeadamente as várias fases até este chegar ao consumidor final: projeto, fabrico e testes/ensaios. Também foi apresentado uma metodologia para o dimensionamento de um reservatório Tipo V para altas pressões.

Na segunda parte do trabalho foi feita a escolha dos materiais para o compósito tendo sempre em vista o preço e o seu desempenho.

Para o *liner* foi selecionada a poliamida 6 (PA6), isto porque como estávamos a falar de altas pressões (30 MPa), o *liner* teria que conseguir suportar a pressão interna e igualmente conseguir conter o hidrogénio no reservatório, o que dificulta com o aumento da pressão. Outra hipótese seria a escolha do HDPE, mas devido a sua alta permeabilidade quando comparado com o PA6, a sua espessura teria que ser muito maior, o que aumentaria o peso e reduziria desempenho do reservatório

Quanto a seleção do compósito, foi escolhido o T300/914, isto porque possui um bom preço e desempenho, mas no caso de se precisar de diminuir ainda mais o peso do reservatório, podia-se escolher outra fibra melhor como a T700.

Na escolha do material para as partes metálicas baseou-se na seleção de um material leve com uma tensão de cedência alta, como tal o material escolhido foi o Alumínio2014-T6.

Escolhido os materiais, procedeu-se ao cálculo da espessura da parte compósita usando a teoria *Netting Analysis*, procedendo-se mais tarde ao ajusto final do modelo calculado, através do uso do programa ABAQUS®, que com a ajuda de um *plugin* chamado *wound composite modeler* que modela a variação da espessura e propriedades do compósito ao longo do comprimento do reservatório.

O validamento/dimensionamento final do reservatório foi conseguido através do programa de elemento finito chamado ABAQUS®, com este programa o reservatório foi otimizado, de forma a se conseguir o menor peso possível. Como aproximação, usei que o rebentamento do reservatório só ocorreria, quando 10% do material num certo local passava a tensão de cedência, conseguindo assim acertar mais precisão na pressão de rebentamento real do reservatório.

A partir do ABAQUS® foi possível obter duas soluções: a primeira solução era composta por dois ângulos de enrolando (10° e 90°), enquanto que a solução 2 era composta por vários graus de enrolamento, conseguindo-se reduzir bastante o peso do reservatório de 16.73Kg para 11.54Kg, conseguindo suportar a mesma pressão de 90 MPa que a solução 1.

Como este trabalho, conseguiu-se verificar que os reservatórios de Tipo IV, não conseguem aguentar pressões muito altas, isto que no caso de se considerar os 30 MPa e 45MPa o *liner* ainda consegue aguentar a pressão de teste, mas no caso de uma pressão de serviço maior com por exemplo 40 MPa o *liner* não deve conseguir aguentar uma pressão de serviço de 60MPa, o que implicaria a necessidade do uso de um reservatório tipo III, isto porque o *liner* não retém o gás/liquido à pressão desejada.

Durante a simulação, também foi possível se verificar, que por vezes, deve-se variar o ângulo de enrolamento, pois pode-se conseguir melhorar o desempenho do reservatório, reduzindo o seu peso total.

## 9.2 Trabalhos Futuros

Nesta tese é feito o dimensionamento de um reservatório de pressão do tipo IV. Tendo em vista o trabalho já realizado, podia-se tentar melhorar os seguintes aspectos:

Analisar profundamente, a influência da curvatura do reservatório, de modo a avaliar a sua influência da espessura das camadas helicoidais.

Dimensionar o reservatório à fadiga e a quedas, sendo possível fazê-lo através de um software como o ABAQUS®.

Produzir o reservatório e fazer ensaios, como por exemplo o ensaio de permeabilidade e o ensaio de rebentamento. No caso do ensaio de permeabilidade, seria interessante fazê-lo, para poder verificar se existe a passagem do gás pela interface das peças metálicas/*liner*.

## 10 Referências

- [1] 18 Junho 2012. [Online]. Available: <http://fabricacaodecompositos.blogspot.pt/2012/06/compositos-uma-breve-introducao.html>. [Acedido em 5 Maio 2017].
- [2] D. K. Roylance, “Netting analysis for filament wound pressure vessels,” pp. 1-9, Agosto 1976.
- [3] “Addax,” [Online]. Available: [http://www.addax.com/technology/filament\\_winding.aspx](http://www.addax.com/technology/filament_winding.aspx). [Acedido em 24 Fevereiro 2017].
- [4] “.basaltft,” [Online]. Available: <http://www.basaltft.com/app/fw.htm>. [Acedido em 24 Fevereiro 2017].
- [5] “Wikipedia,” [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Filament\\_winding#Process](https://en.wikipedia.org/wiki/Filament_winding#Process). [Acedido em 21 Fevereiro 2017].
- [6] “Core Composites,” [Online]. Available: <http://www.corecomposites.com/products/reinforcements.html>. [Acedido em 22 Fevereiro 2017].
- [7] B. F. Castro, “Estudo e Caracterização Mecânica de Compósitos Reforçados com Fibras Naturais,” Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2013.
- [8] G. Castro, “Ciência e Tecnologia dos Materiais,” UTAD, 1988.
- [9] J. L. Clarke, *Structural Design of Polymer Composites*, London: E & FN SPON, 1996.
- [10] F. Macedo, “Análise e Otimização de Reservatórios obtidos por Enrolamento Filamentar,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [11] D. Cohen, “Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, pp. 1035-1047, 1997.
- [12] Fryer, D. M, Harvey e J. F, *High Pressure Vessels*, Springer, 1997.
- [13] R. Wang, W. Jiao, W. Liu e F. Yang, “A new method for predicting dome thickness of composite pressure vessels,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2010.
- [14] J. P. Ramirez, D. Halm e J.-C. Grandidier, “700 bar type IV high pressure hydrogen storage vessel burst e Simulation and experimental validation,” *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015.
- [15] “Wikipedia,” [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Pressure\\_vessel#Leak\\_before\\_burst](https://en.wikipedia.org/wiki/Pressure_vessel#Leak_before_burst). [Acedido em 17 Fevereiro 2017].
- [16] M. Bertin, “One year OSIRHYS IV project synthesis: mechanical behaviour of 700 bar type iv high pressure vessel code qualification,” em *ECCM15 - 15TH EUROPEAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS*, Venice, 2012.

- [17] M. Musthak, P. M. Valli e S. N. Rao, “Prediction of Transverse Directional Strains and Stresses of Filament Wound Composite Pressure Vessel by Using Higher Order Shear Deformation Theories,” *International Journal of Composite Materials*, 2016.
- [18] “Reformadora Alves,” [Online]. Available: [http://www.reformadoraalves.com.br/index\\_arquivos/Page1490.htm](http://www.reformadoraalves.com.br/index_arquivos/Page1490.htm). [Acedido em 5 Maio 2017].
- [19] L. Oliveira, J. P. Nunes e J. F. Silva, “Composite pressure vessels for commercial applications,” em *The 19th international conference on composite materials*, Amsterdam, 2017.
- [20] Compositeworld, “The markets: Pressure vessels,” *Composite world*, 1 Fevereiro 2014.
- [21] M. Legaut, “Next-generation pressure vessels,” *Composites world*, 7 Fevereiro 2012.
- [22] 20 Agosto 2011. [Online]. Available: <http://www.slideshare.net/physics101/pressure-vessel-manufacturing>.
- [23] “The library of manufacturing,” [Online]. Available: <http://thelibraryofmanufacturing.com/spinning.html>. [Acedido em 24 Fevereiro 2017].
- [24] “Wikipedia,” [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Rotational\\_molding](https://en.wikipedia.org/wiki/Rotational_molding). [Acedido em 24 Fevereiro 2017].
- [25] “Wikipedia,” [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Rotational\\_molding](https://en.wikipedia.org/wiki/Rotational_molding). [Acedido em 24 Fevereiro 2017].
- [26] “Kiel industries,” [Online]. Available: <http://www.kielindustries.com.au/about-custom-moulding.html>. [Acedido em 24 Fevereiro 2017].
- [27] R. Vadher, “Things "Coisas”,” 12 Fevereiro 2013. [Online]. Available: [https://rishivadher.blogspot.pt/2013/02/manufactura-em-escala-atraves-de\\_12.html](https://rishivadher.blogspot.pt/2013/02/manufactura-em-escala-atraves-de_12.html). [Acedido em 22 Março 2017].
- [28] T. Hunsaker, “Slideshare,” 6 Julho 2015. [Online]. Available: <https://pt.slideshare.net/TaylorHunsaker/advantages-and-disadvantages-of-injection-molding>.
- [29] “Custompartnet,” [Online]. Available: <http://www.custompartnet.com/wu/InjectionMolding>. [Acedido em 1 Março 2017].
- [30] “Protolabs,” [Online]. Available: <https://www.protolabs.com/injection-molding/fundamentals-of-molding/wall-thickness-recommended>. [Acedido em 1 Março 2017].
- [31] “Wikipedia,” [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Blow\\_molding](https://en.wikipedia.org/wiki/Blow_molding). [Acedido em 1 Março 2017].
- [32] “Sinotech,” [Online]. Available: <https://www.sinotech.com/resources/tutorials/blow-rotational-molding/>. [Acedido em 1 Março 2017].
- [33] F. Alves, “Industria Hoje,” 8 setembro 2013. [Online]. Available: <http://www.industriahoje.com.br/moldagem-sopro>. [Acedido em 10 Maio 2017].
- [34] C. Rosales, “Monografias,” [Online]. Available: <http://www.monografias.com/trabajos-pdf5/buenas-practicas-manufacturas-pet/buenas-practicas-manufacturas-pet.shtml>. [Acedido em 1 Março 2017].

- [35] “Tudosobreplasticos,” [Online]. Available: <http://www.tudosobreplasticos.com/processo/sopro.asp>. [Acedido em 01 Março 2017].
- [36] I. Kosar, “Development of a Liner-less Composite CNG Cylinder and Improved Mechanical Properties of Cylinder Materials,” Hong Kong, 2008.
- [37] “blog da injecao plastica,” [Online]. Available: <http://blogdainjecao plastica.blogspot.pt/2015/09/o-que-e-permeabilidade-gases.html>. [Acedido em 2 Março 2017].
- [38] “offshorecenter,” [Online]. Available: [http://www.offshorecenter.dk/log/filer/1\\_5%20PCD.pdf](http://www.offshorecenter.dk/log/filer/1_5%20PCD.pdf). [Acedido em 2 Março 2017].
- [39] B. R., S. L. e S. M. C., “Polymers for Hydrogen Infrastructure and Vehicle Fuel Systems: Applications, Properties, and Gap Analysis,” Sandia Corporation, 2013.
- [40] kuraray, “EVALEOVH,” [Online]. Available: [http://www.evalevoh.com/media/81769/us\\_automotive.pdf](http://www.evalevoh.com/media/81769/us_automotive.pdf). [Acedido em 15 Maio 2017].
- [41] P. Vieira, “Permeabilidade,” Amtrol-Alfa apresentação interna, [Acedido em 01 junho 2017].
- [42] N. L. Newhouse e G. B. Rawls, “Development of ASME Section X Code Rules for High Pressure Composite Hydrogen Pressure Vessels With Nonload Sharing Liners,” *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2012.
- [43] M. Pat B. e S. C. Forth, “Composite Overwrapped Pressure Vessels, A Primer,” National Aeronautics and Space Administration, Houston, TX 77058, 2011.
- [44] “Inspection for industry,” [Online]. Available: <http://www.inspection-for-industry.com/asme-pressure-vessel-joint-efficiencies.html>. [Acedido em 8 Março 2017].
- [45] “MSPC,” [Online]. Available: <http://www.mspc.eng.br/matr/resmat0150.shtml>. [Acedido em 08 Março 2017].
- [46] “Professores,” [Online]. Available: <http://www.professores.uff.br/salete/res1/aula15.pdf>. [Acedido em 08 Março 2017].
- [47] *Tensões em Peças Cilíndricas, Órgãos de Máquinas – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, 2016.
- [48] “Process research,” [Online]. Available: <http://www.process-research.com/Netting.pdf>. [Acedido em 09 Março 2017].
- [49] E. Barboza Neto, M. C. R. P.B., J. Fonseca, S. Amico e C. Ferreira, “Experimental and numerical analysis of a LLDPE/HDPE liner for a composite pressure vessel,” *Science Direct*, 2011.
- [50] R. Castro, “Desenvolvimento de reservatorios de pressão em sistema de compósitos,” FEUP, Porto, 2016.
- [51] *CES EduPack 2017*, UK: GARNTA.
- [52] T. L. G. T. V. S. X. Tay, “Progressive Failure Analysis of Composites,” *Jornal of Cposites Materials*, pp. 1921-1966, 2008.

- [53] “ASM,” [Online]. Available: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA2014T6>. [Acedido em 17 Maio 2017].
- [54] “ASM Aerospace Specification Metals Inc.,” [Online]. Available: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7075T6>. [Acedido em 06 Junho 2017].
- [55] G. Härtel e T. Püschel, “Permselectivity of a PA6 membrane for the separation of a compressed CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> gas mixture at elevated pressures,” *Journal of Membrane Science*, pp. 1-8, 199.
- [56] “Musikmu,” [Online]. Available: <http://musikmu.info/composite-tanks/>. [Acedido em 06 Junho 2017].
- [57] A. M. Lima e J. V. Girão, “ebah,” Novembro 2008. [Online]. Available: <http://www.ebah.pt/content/ABAAAAJvwAA/introducao-a-compositos>.
- [58] “ESPA,” [Online]. Available: <http://www.espa-pumps.co.uk/product/pressure-vessels-2/>. [Acedido em 24 Fevereiro 2017].
- [59] ecvv, [Online]. Available: <http://www.ecvv.com/product/2926745.html>. [Acedido em 23 Fevereiro 2017].
- [60] “CNG United,” [Online]. Available: <http://www.cngschool.com/cng-tanks>. [Acedido em 24 Fevereiro 2017].
- [61] “BPF,” [Online]. Available: [http://www.bpf.co.uk/plastipedia/processes/injection\\_moulding.aspx](http://www.bpf.co.uk/plastipedia/processes/injection_moulding.aspx). [Acedido em 24 Fevereiro 2017].
- [62] “slideshare,” [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/siavoshani/59a1-polymer-matrix-composites/57>. [Acedido em 22 Março 2017].
- [63] “eng.lbl,” [Online]. Available: [http://www-eng.lbl.gov/~ecanderssen/Composite\\_Design/Laminate\\_Design.pdf](http://www-eng.lbl.gov/~ecanderssen/Composite_Design/Laminate_Design.pdf). [Acedido em 1 Maio 2017].
- [64] C. S. Marchi, “Technical Reference on Hydrogen Compatibility of Materials,” 1 Maio 2017.

## ANEXO A: Modificações feitas ao longo do projeto

Durante as simulações surgiram vários problemas, tendo estes sido resolvidos. Nas simulações inicialmente obtidas apareciam grandes tensões na interface das partes metálicas/*liner*, tendo-se que alterar o design das peças metálicas de forma a diminuir as tensões. Na Figura 55, podemos ver algumas das modificações feitas nas peças metálicas antes de chegar ao modelo final.

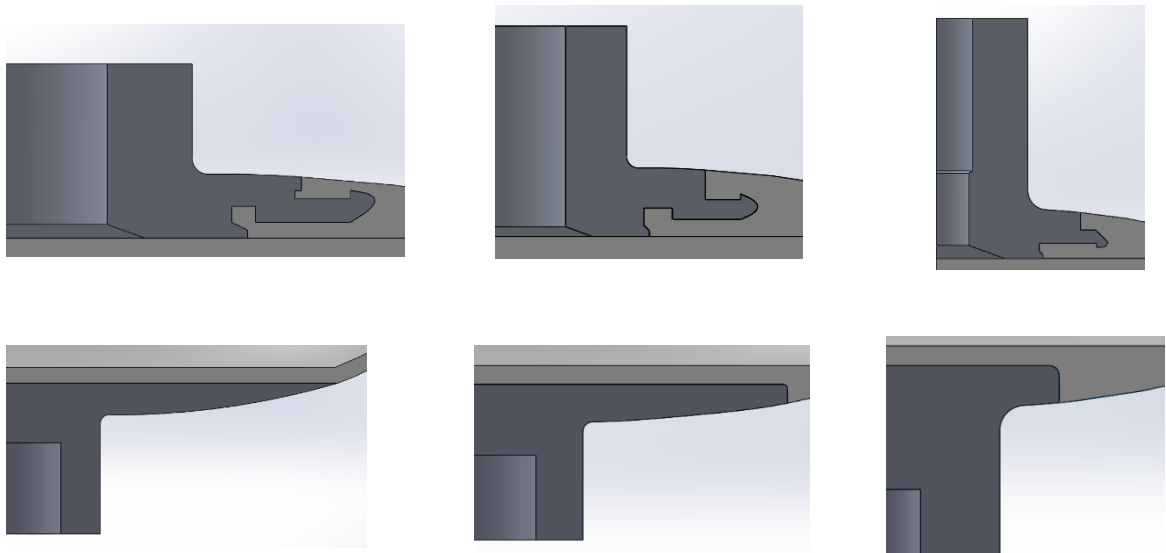
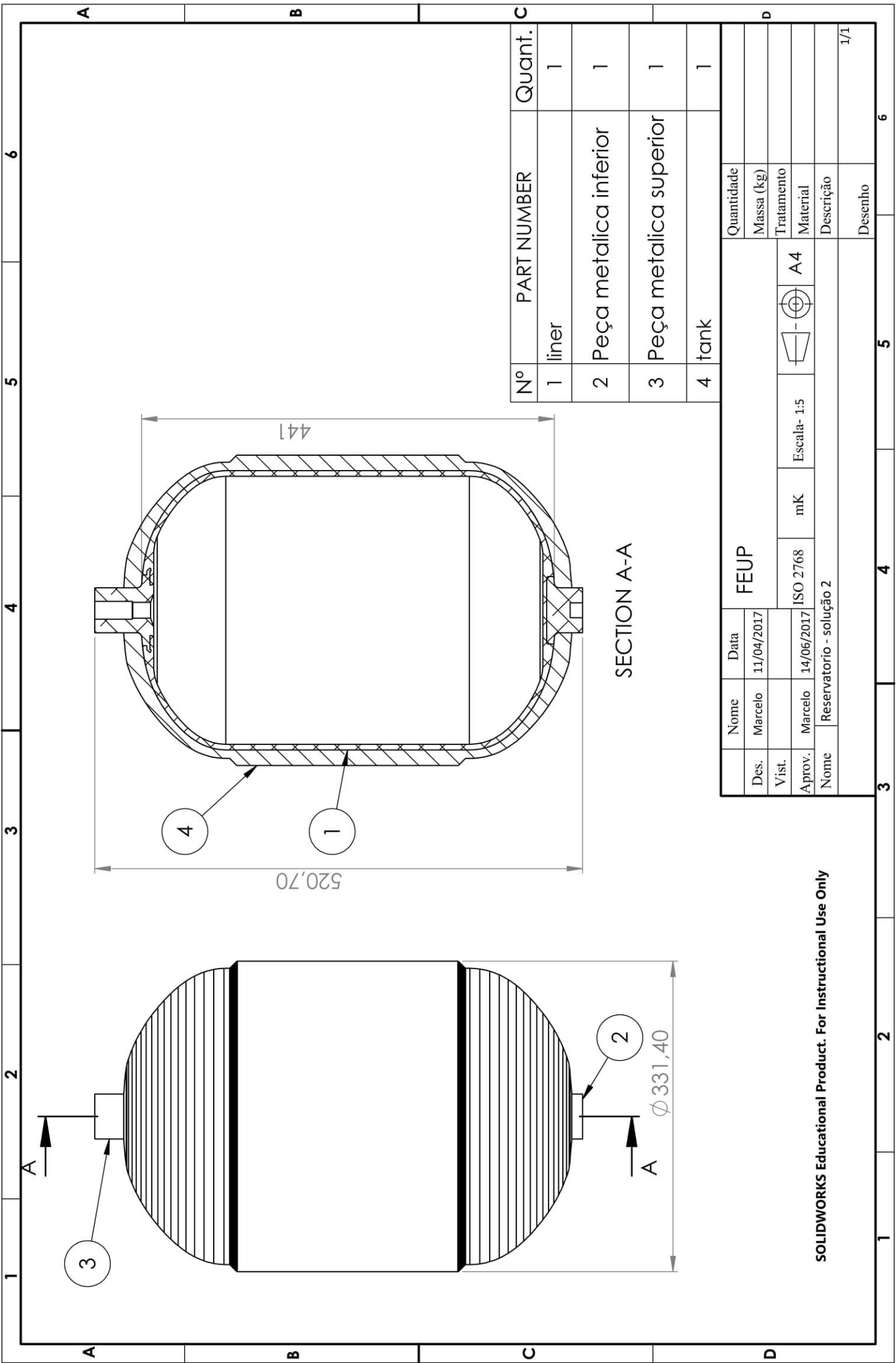


Figura 55- Algumas mudanças feitas nas peças metálicas



## **ANEXO B: Desenhos 2D**





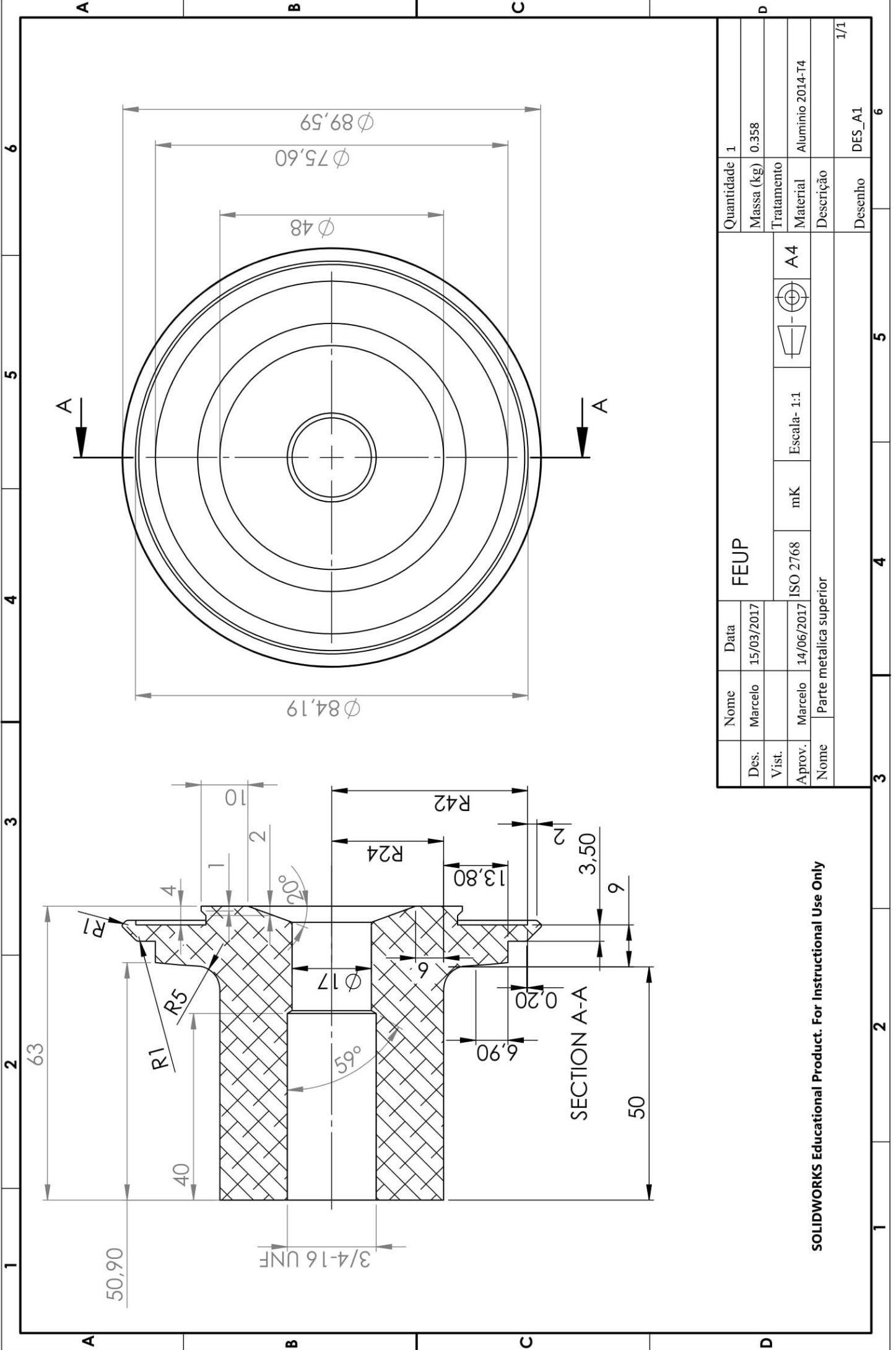
SECTION A-A

Nº	PART NUMBER	Quant.
1	liner	1
2	Peça metálica inferior	1
3	Peça metálica superior	1
4	tank	1

Nome		Data		FEUP		Quantidade	
Des.	Marcelo	11/04/2017		Massa (kg)			
Vist.				Tratamento			
Aprov.	Marcelo	14/06/2017	ISO 2768	Material	A4		
Nome	Reservatório - solução 2			Descrição			1/1
				Desenho			6

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only

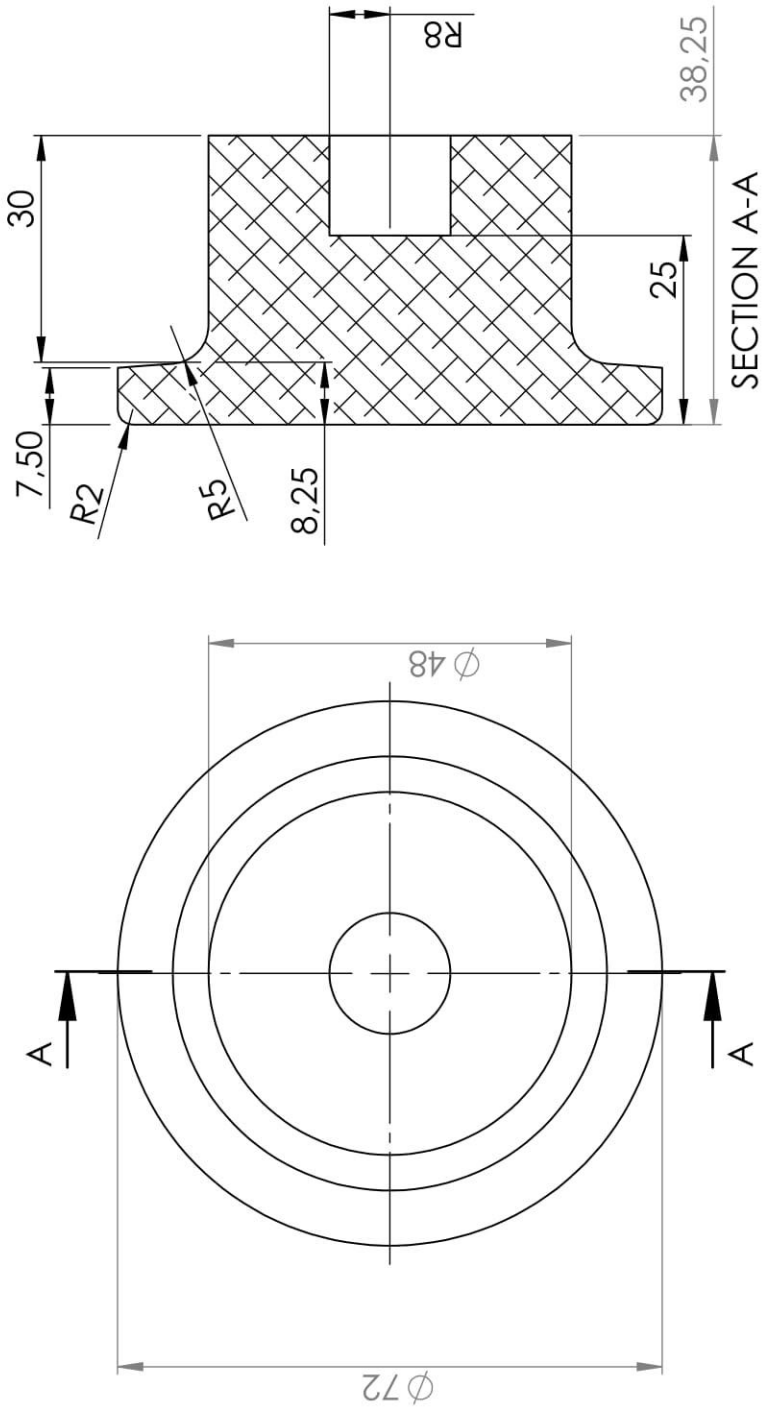




Nome		Data		FEUP		Quantidade 1	
Des.	Marcelo	15/03/2017				Massa (kg)	0.358
Vist.						Tratamento	
Aprov.	Marcelo	14/06/2017	ISO 2768	mK	Escala- 1:1	Material	Aluminio 2014-T4
Nome	Parte metalica superior					Descrição	
						Desenho	DES_A1
							1/1

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only

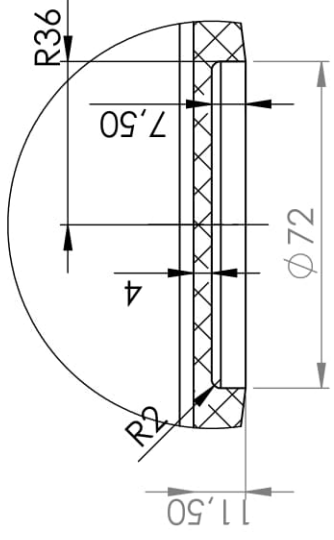
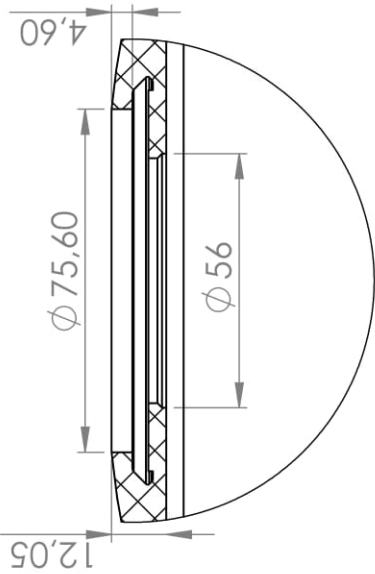
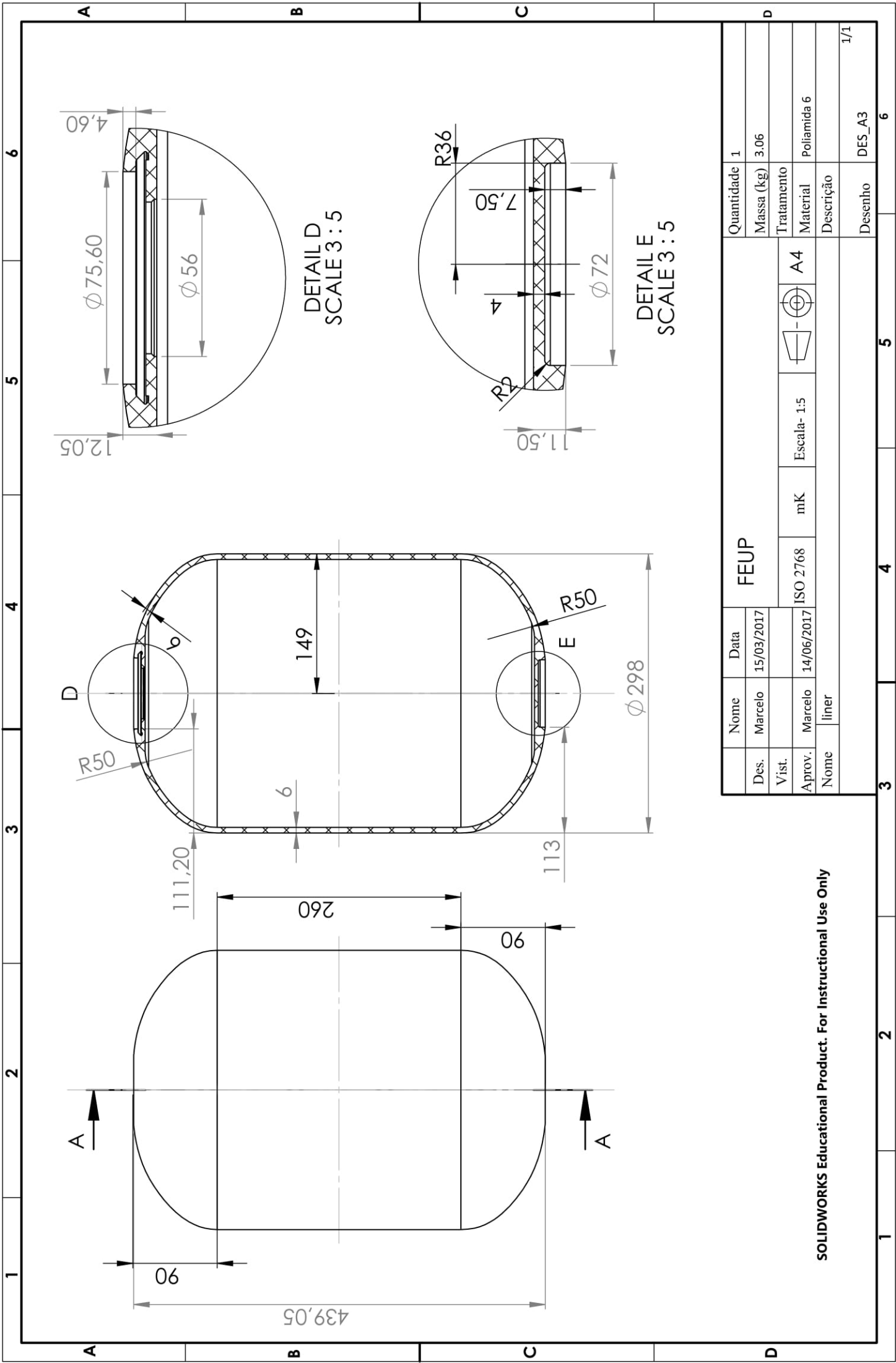




Nome		Data		FEUP		Quantidade 1	
Des.	Marcelo	11/04/2017				Massa (kg)	0.238
Vist.						Tratamento	
Aprov.	Marcelo	14/06/2017		ISO 2768	mK	Material	Aluminio 2014-T6
Nome	Peça metálica inferior					Descrição	
						Desenho	DES_A2
							1/1

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only





Nome		Data		FEUP		Quantidade		1	
Des.	Marcelo	15/03/2017					Massa (kg)	3.06	
Vist.							Tratamento		
Aprov.	Marcelo	14/06/2017		ISO 2768	mK	Escala- 1:5	Material	Poliamida 6	
Nome	liner						Descrição		
							Desenho	DES_A3	
								1/1	

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only