



## Projeto de um reservatório criogénico de tipo V para a indústria aeroespacial

RUI JORGE CARVALHO FERNANDES

novembro de 2021

# PROJETO DE UM RESERVATÓRIO CRIOGÉNICO DE TIPO V PARA A INDÚSTRIA AEROESPACIAL

Rui Jorge Carvalho Fernandes

1160881

**2020/2021**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica





# PROJETO DE UM RESERVATÓRIO CRIOGÉNICO DE TIPO V PARA A INDÚSTRIA AEROESPACIAL

Rui Jorge Carvalho Fernandes

1160881

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação do Engenheiro Rui Bertão Patrício Martins Marques e do Engenheiro Bruno Rafael Coutinho Augusto.

**2020/2021**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica





# JÚRI

## **Presidente**

Doutor Luís Miguel Pereira Durão

Professor Coordenador, ISEP

## **Orientador**

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

## **Coorientador**

Engenheiro Rui Bertão Patrício Martins Marques

Gestor de Projetos, INEGI

Engenheiro Bruno Rafael Coutinho Augusto

Engenheiro de Produto e Processos, INEGI

## **Arguente**

Doutor Ricardo João Camilo Carbas

Investigador, FEUP



## AGRADECIMENTOS

A realização da minha dissertação de mestrado só foi possível devido ao apoio de todas as pessoas que, direta ou indiretamente, me acompanharam ao longo desta etapa. Gostaria de agradecer ao Instituto Superior de Engenharia do Porto e aos repetitivos engenheiros pelo acolhimento e conhecimento transmitidos desde a entrada no ensino superior, em especial, ao Engenheiro Raúl Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Orientador Científico, por todo o profissionalismo e empenho em ajudar que foi essencial para a realização desta dissertação.

Também gostaria de agradecer a toda a equipa do INEGI pela oportunidade de realizar este estágio. Também deixo um agradecimento ao Engenheiro Bruno Augusto que sempre se mostrou disponível para ajudar em qualquer dúvida, ao Engenheiro Jhonny Rodrigues que me acompanhou na criação do projeto e um especial agradecimento ao Engenheiro Rui Marques, que, desde o dia que me atribuiu o tema para dissertação, sempre se mostrou disponível para ajudar e aconselhar em qualquer problema que ocorresse.

Gostaria de deixar um agradecimento especial à minha família, particularmente aos meus pais, por sempre me incentivarem e apoiarem na concretização dos meus objetivos, acompanhando-me, não só em todos os momentos desta experiência, como também em todo o meu percurso académico e pessoal. Também gostaria de deixar um agradecimento ao meu irmão por estar sempre presente, ao meu tio, por ajudar sempre que apareceu algum problema, e aos meus avós pelo carinho e apoio dado desde sempre.

Por fim, um obrigado aos amigos e colegas que me ajudaram e acompanharam durante toda a jornada, desde o momento que entramos no ensino superior.



## PALAVRAS-CHAVE

Veículos aeroespaciais; Materiais compósitos; Projeto mecânico; Reservatório de pressão; Tipo V; Ensaio de permeabilidade.

## RESUMO

Os reservatórios de pressão são utilizados para armazenar um líquido ou um gás. A grande vantagem de utilizar um reservatório de pressão em material compósito em relação aos reservatórios em ligas metálicas e aos que têm um *liner*, é o seu reduzido peso. Na indústria aeroespacial, o peso é muito valorizado, visto que qualquer redução de peso se torna vantajosa no envio de satélites para a órbita.

Nesta dissertação, foi inicialmente realizada uma introdução aos veículos aeroespaciais que são construídos atualmente. Também foram abordados os materiais compósitos associados e processos de fabrico. Foram descritos os diversos reservatórios e os ensaios a que estes são sujeitos para poderem ser implementados num veículo aeroespacial. Durante a operação dos veículos aeroespaciais, o combustível não pode ser absorvido pelo reservatório, nem pode reagir com a matriz do material compósito. Assim sendo, devido à inexistência de um *liner*, um reservatório do tipo V terá de ser sujeito, entre outros, a ensaios de permeabilidade.

Durante este projeto foi desenvolvido um *setup* que determina a permeabilidade de uma amostra de material compósito representativo de reservatórios do tipo V. O *setup* baseia-se em colocar uma amostra do reservatório entre duas câmaras e compactar os três componentes. Posteriormente injeta-se o gás, que o reservatório irá armazenar, numa das câmaras do *setup*. Na outra câmara é medida a variação de pressão com o auxílio de um transdutor de pressão. Após obter os dados do transdutor de pressão da segunda câmara, é possível calcular a permeabilidade da amostra. Nesta dissertação, foram testados alguns materiais com boas características de permeabilidade, foram consideradas alternativas durante o projeto e foram apresentadas as justificações de cada característica que foi incluída no *setup*. Também foram realizados ensaios de permeabilidade e os resultados obtidos foram analisados.

Concluindo, os ensaios realizados tiveram sucesso, o *setup* foi criado conforme o previsto e está operacional. Os resultados obtidos a partir do *setup* foram comparados com os dados da literatura e mostraram serem semelhantes.



## KEYWORDS

Aerospace vehicles; Composite materials; Mechanical design; Pressure vessel; Type V; Permeability tests.

## ABSTRACT

Pressure vessels are used to store a liquid or a gas. The great advantage of using a pressure vessel made of composite material over pressure vessels made of metal alloys and those that have a liner, is its reduced weight. In the aerospace industry, weight is highly valued, as any reduction in weight is advantageous when sending satellites into orbit.

In this dissertation, an introduction was initially made to the aerospace vehicles that are currently built. The associated composite materials and manufacturing processes were also addressed. The various pressure vessels and the tests that they are subjected to be able to be implemented in an aerospace vehicle were described. During the operation of aerospace vehicles, fuel cannot be absorbed by the pressure vessel, nor can it react with the matrix of the composite material. Therefore, due to the lack of a liner, a type V reservoir will have to be subjected, among others, to permeability tests.

During this project, a *setup* was developed that determines the permeability of a sample of composite material representative of type V pressure vessels. The *setup* is based on placing a sample of the pressure vessel between two chambers and compacting the three components. Afterwards, the gas, which the pressure vessel will store, is injected into one of the *setup* chambers. In the other chamber, the pressure variation is measured with the aid of a pressure transducer. After obtaining the data from the second chamber pressure transducer, it is possible to calculate the permeability of the sample. In this dissertation, some materials with good permeability characteristics were tested, some alternatives were considered during the design, and the justifications of each characteristic that was included in the *setup* were presented. Permeability tests were also carried out and the results obtained were analyzed.

In conclusion, the tests performed were successful, the *setup* was created as planned and it is operational. The results obtained from the *setup* were compared with literature data and showed to be similar.



## LISTA DE ABREVIATURAS, UNIDADES E SÍMBOLOS

### Lista de Abreviaturas

AFP	<i>Automated fiber placement</i>
ATL	<i>Automated tape laying</i>
CNC	Controlados numericamente por computadores
DOPO	Diidroxafosfenantreno
E51	Resina epóxida bisfenol-A
EX48	Resina epóxida bromada
HDPE	Polietileno de alta densidade
HTPU	<i>Hydroxyl-terminated polyurethane</i>
LDPE	Polietileno de baixa densidade
MDPE	Polietileno de média densidade
PA	<i>Nylon</i>
PA11	<i>Nylon 11</i>
PA6	<i>Nylon 6</i>
PAN	<i>Poliacrilonitrila</i>
PBT	Polibutileno Tereftalato
PCTFE	Policlorotrifluoroetileno
PE	Polietileno
PEEK	Poli(éter-éter-cetona)
PET	Politereftalato de etileno
PFA	Perfluoroalcoxi

---

PP	Polipropileno
PTFE	Politetrafluoretileno
PVC	Policloreto de vinila
PVDF	Fluoreto de polivinilideno
RTM	<i>Resin transfer molding</i>

---

#### Lista de Unidades

---

°C	Grau Celsius
A	Ampere
Bar	Bar
cm	Centímetro
K	Kelvin
m	Metro
min	Minutos
mm	Milímetro
mol	Mol
N	Newton
Pa	Pascal
s	Segundo
scc	Centímetros cúbicos em condição padrão
W	Watt
μm	Micrómetro

---

---

## Lista de Símbolos

---

<b>D</b>	Diâmetro
<b>F</b>	Força
<b>RTG</b>	Rácio de transmissão do gás
<b>h</b>	Altura
<b>K</b>	Fator de momento torsor
<b>P</b>	Permeabilidade
<b>p</b>	Pressão
<b>r</b>	Raio
<b>T</b>	Temperatura
<b>T</b>	Momento torsor
<b>V</b>	Volume
<b>x</b>	Espessura
<b>π</b>	Pi
<b>σ</b>	Tensão

---



---

## GLOSSÁRIO DE TERMOS

---

<b>Permeabilidade</b>	Penetração de um líquido ou gás através de um sólido.
<b>Criogenia</b>	Produção e comportamento de materiais em temperaturas muito baixas.
<b>Setup</b>	Criar, organizar ou planejar projeto, construir uma estrutura ou colocá-la num certo lugar.
<b>Transdutor de pressão</b>	Um equipamento eletromecânico que consegue converter níveis de pressão em tensões por meio de cargas de alta impedância.

---



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Utilização relativa dos materiais ao longo dos anos [1].	3
Figura 2 - Edifício do INEGI [2].	6
Figura 3 - Percentagem de cada tipo de material num veículo aeroespacial [11].	10
Figura 4 - Processo do AFP [22].	12
Figura 5 - Braço articulado a realizar o processo AFP [23].	13
Figura 6 - Realização do processo de ATL [26].	14
Figura 7 - Processo de RTM [28].	15
Figura 8 - Molde da infusão a vácuo. (a) estado de compactação a seco e (b) descompactação durante a injeção de resina [31].	15
Figura 9 – Forma de utilizar infusão a vácuo [34].	16
Figura 10 - Processo de enrolamento filamentar [35].	17
Figura 11 - Comparação das propriedades dos diferentes tipos de fibras de carbono [39].	18
Figura 12 - Ensaio de tração [42].	23
Figura 13 - Diferença de um ensaio de flexão com 3 pontos e 4 pontos [44].	24
Figura 14 - Vários tipos de ensaio de impacto [45].	24
Figura 15 - Reservatórios do tipo I [51].	27
Figura 16 - Reservatórios do tipo III [52].	27
Figura 17 - Reservatórios do tipo IV [53].	28
Figura 18 - Reservatórios do tipo V [54].	28
Figura 19 - Tipo de rutura provocada pela pressão interna [57].	30
Figura 20 - Compartimento para realizar o ensaio de rutura [57].	30
Figura 21 - Método de determinação manométrica [59].	31
Figura 22 - Método de determinação volumétrica [59].	31
Figura 23 - Máquina para realizar ensaio à temperatura criogénica [60].	32
Figura 24 - Ensaio de compatibilidade de resina epóxida em diferentes tempos [61].	32
Figura 25 - Esquema dos blocos do <i>setup</i> [71].	42
Figura 26 - <i>Setup</i> de permeabilidade completo, modelo que utiliza um detetor de hélio [58].	43

---

Figura 27 - <i>Setup</i> de permeabilidade completo, modelo volumétrico [72].	44
Figura 28 - <i>Setup</i> que regista a variação de pressão [67].	45
Figura 29 - Modelo com 6 parafusos.	46
Figura 30 - Modelo com 4 parafusos.	46
Figura 31 - Modelo sem parafusos no bloco principal.	47
Figura 32 - Dois <i>o-rings</i> do mesmo diâmetro.	47
Figura 33 - Dois <i>o-rings</i> com diâmetros diferentes.	48
Figura 34 - Um <i>o-rings</i> e uma junta de vedação com diâmetros diferentes.	48
Figura 35 - Vista explodida do <i>setup</i> escolhido.	50
Figura 36 - <i>Setup</i> escolhido.	51
Figura 37 - Gráfico da pressão que permite determinar a permeabilidade [67].	55
Figura 38 - Vista da parte exterior da câmara superior.	56
Figura 39 - Vista da parte interior da câmara superior.	57
Figura 40 - Vista dos canais da câmara superior.	57
Figura 41 - Vista da parte interior da câmara inferior.	58
Figura 42 - Vista da parte exterior da câmara inferior.	58
Figura 43 - Componente para análise.	59
Figura 44 - Aplicação das condições fronteira.	60
Figura 45 - Esforço definido para a simulação.	61
Figura 46 - Contacto com o <i>o-ring</i> .	62
Figura 47 - Parâmetros utilizados na malha.	62
Figura 48 - Aspeto da malha na câmara superior.	63
Figura 49 - Tensões de von Mises obtidas através da simulação.	63
Figura 50 - Deslocamentos resultantes obtidos através da simulação.	64
Figura 51 - Câmaras do <i>setup</i> .	65
Figura 52 - Verificação da rosca das câmaras.	66
Figura 53 - Verificação das ranhuras para o <i>o-ring</i> e a junta de vedação.	66
Figura 54 - Verificação do posicionamento dos parafusos.	67
Figura 55 - Ligação do conector Y à válvula de entrada.	67
Figura 56 - Ligação do transdutor de 16 bar ao conector Y.	68

---

---

Figura 57 - Ligação da válvula de saída ao espaçador. ....	68
Figura 58 - Ligação do conector da mangueira à válvula de entrada. ....	69
Figura 59 - Ligação da válvula de saída ao adaptador da máquina de vácuo. ....	69
Figura 60 - Ligação de todos os componentes às câmaras. ....	70
Figura 61 - Ligação da mangueira ao conector de mangueira. ....	70
Figura 62 - Posicionamento do <i>o-ring</i> e da junta de vedação. ....	70
Figura 63 - Exemplo da amostra. ....	71
Figura 64 - <i>Setup</i> finalizado. ....	72
Figura 65 - Posição da amostra no <i>setup</i> . ....	72
Figura 66 - Valores do registador de dados antes do ensaio. ....	73
Figura 67 - Valores do registador de dados após realização do processo de vácuo nas câmaras. ....	73
Figura 68 - Valores do registador de dados no início do ensaio. ....	74
Figura 69 - Variação da pressão relativa das câmaras durante o ensaio de material compósito. ....	75
Figura 70 - Variação da pressão absoluta das câmaras durante o ensaio de material compósito. ....	75
Figura 71 - Mantas de teflon. ....	76
Figura 72 - Folha de cortiça. ....	77
Figura 73 - Posição relativa dos componentes da amostra. ....	77
Figura 74 - Amostra utilizada no segundo ensaio. ....	77
Figura 75 - Variação da pressão relativa das câmaras durante o ensaio utilizando a manta de teflon e cortiça. ....	78
Figura 76 - Variação da pressão absoluta das câmaras durante o ensaio utilizando a manta de teflon e cortiça. ....	78
Figura 77 - Variação da pressão relativa da câmara inferior durante o ensaio utilizando a manta de teflon e cortiça. ....	79
Figura 78 - Variação da pressão absoluta da câmara inferior durante o ensaio utilizando a manta de teflon e cortiça. ....	79
Figura 79 - Volume total da câmara. ....	80
Figura 80 - Variação da pressão relativa das câmaras durante o ensaio utilizando o gás hélio. ....	82
Figura 81 - Variação da pressão absoluta das câmaras durante o ensaio utilizando o hélio. ....	83



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades dos diferentes tipos de fibras de carbono [20]. .....	19
Tabela 2 - Propriedades dos diferentes tipos de fibras de vidro [20]. .....	19
Tabela 3 - Propriedades dos diferentes tipos de fibra de aramida [20]. .....	20
Tabela 4 - Propriedades das fibras de boro com várias espessuras [20]. .....	20
Tabela 5 - Objetos feitos em polímeros do quotidiano [40]. .....	21
Tabela 6 - Principais diferenças dos polímeros termoplásticos e termoendurecíveis [40]. .....	22
Tabela 7 - Estado da arte de processos de fabrico de materiais compósitos e respetivos métodos de ensaio. ....	25
Tabela 8 - Estado-da-arte de ensaios realizados em temperaturas criogénicas. ....	33
Tabela 9 - Diâmetro da molecular do hélio e do hidrogénio [67]. .....	39
Tabela 10 - Permeabilidade de vários polímeros [67]. .....	40
Tabela 11 - Permeabilidade duma resina epóxida e de alguns compósitos [67]. .....	40
Tabela 12 - Vantagens e desvantagens de cada modelo. ....	48
Tabela 13 - Componentes responsáveis pela vedação. ....	51
Tabela 14 - Componentes responsáveis pela regulação e medição do hélio. ....	52
Tabela 15 - Componentes responsáveis pelo transporte do hélio. ....	54
Tabela 16 - Propriedades do aço AISI 1020. ....	60
Tabela 17 - Apresentação dos dois pontos escolhidos. ....	79
Tabela 18 - Valores dos diâmetros de perímetro, das alturas e do volume da câmara e dos dois canais. ....	80
Tabela 19 - Materiais para comparar a permeabilidade [67]. .....	84



# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	3
1.1	Contextualização .....	3
1.2	Objetivos .....	4
1.3	Metodologia .....	4
1.4	Estrutura do relatório.....	5
1.5	Empresa de acolhimento .....	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Veículos aeroespaciais .....	9
2.1.1	Importância da indústria aeroespacial na economia mundial e nacional .....	9
2.1.2	Materiais e processos de fabrico utilizados .....	10
2.1.3	Requisitos de produto para a indústria aeroespacial.....	11
2.1.4	Utilização de materiais compósitos.....	11
2.2	Fabrico de componentes compósitos para a indústria aeroespacial.....	11
2.2.1	Processos de fabrico.....	12
2.2.1.1	<i>Automated fiber placement</i> .....	12
2.2.1.2	<i>Automated tape laying</i> .....	13
2.2.1.3	<i>Resin transfer molding</i> .....	14
2.2.1.4	Infusão a vácuo .....	15
2.2.1.5	Enrolamento filamentar.....	17
2.2.2	Materiais .....	17
2.2.2.1	Reforço.....	18
2.2.2.2	Matriz.....	21
2.2.3	Métodos de ensaio de materiais e componentes compósitos.....	22
2.2.4	Estado-da-arte de processos de fabrico e métodos de ensaio .....	24

---

2.3	Projeto de tanques e reservatórios.....	26
2.3.1	Caracterização dos diferentes tipos de tanque.....	26
2.3.2	Temperaturas criogénicas.....	28
2.3.3	Processos de fabrico e materiais comumente utilizados.....	29
2.3.4	Ensaio de materiais para tanques.....	29
2.3.4.1	Ensaio de resistência.....	29
2.3.4.2	Ensaio de rebentamento ( <i>burst</i> ).....	30
2.3.4.3	Ensaio de permeabilidade.....	30
2.3.4.4	Ensaio de temperatura.....	31
2.3.4.5	Ensaio de compatibilidade.....	32
2.3.4.6	Estado-da-arte no ensaio de materiais.....	33
3	DESENVOLVIMENTO.....	37
3.1	Objetivos do trabalho prático.....	37
3.1.1	Requisitos.....	37
3.1.2	Resultados pretendidos.....	38
3.2	Etapas do projeto.....	38
3.3	Material a testar.....	38
3.3.1	Materiais candidatos.....	39
3.3.2	Seleção do material da amostra.....	41
3.3.3	Definição do plano de ensaios.....	41
3.4	<i>Setup</i> de permeabilidade.....	41
3.4.1	Equipamentos disponíveis na literatura.....	42
3.4.2	Designs alternativos para o <i>setup</i> de permeabilidade.....	45
3.4.2.1	Sistema de aperto.....	45
3.4.2.2	Sistema de vedação.....	47
3.4.2.3	Vantagens e desvantagens de cada modelo.....	48
3.4.3	Seleção do <i>setup</i> para ensaio de permeabilidade.....	49
3.4.4	Equipamentos necessários.....	51

---

3.4.5	Cálculos preliminares .....	54
3.4.6	Detalhes construtivos do <i>setup</i> .....	56
3.4.7	Análise por MEF.....	59
3.5	Fabrico do <i>setup</i> para ensaio de permeabilidade.....	64
3.5.1	Componentes adquiridos .....	64
3.5.2	Verificação dos componentes não normalizados.....	65
3.5.3	Sequência de montagem.....	67
3.5.4	<i>Setup</i> final.....	71
3.6	Descrição e metodologia do ensaio .....	72
3.7	Ensaio realizados .....	74
3.7.1	Ensaio utilizando ar comprimido e compósito de fibra de carbono com PA6 .....	74
3.7.2	Ensaio utilizando ar comprimido e manta de teflon .....	76
3.7.3	Ensaio utilizando gás hélio e compósito de fibra de carbono com PA6 .....	82
3.8	Análise crítica dos resultados.....	83
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....	87
4.1	Conclusões .....	87
4.2	Propostas de trabalhos futuros.....	87
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	91
6	ANEXOS.....	99
6.1	Ficha técnica KM11 EN .....	99
6.2	Ficha técnica KX1 KXK EN .....	107
6.3	Catálogo <i>o-rings</i> da anyseals.....	110
6.4	Desenho conjunto .....	113
6.4.1	Desenho da câmara inferior .....	115
6.4.2	Desenho da câmara superior .....	117

---

6.5	Dados do registador de dados .....	119
6.5.1	Ensaio do material compósito (PA6 com fibras de carbono) com ar comprimido.....	119
6.5.2	Ensaio de duas mantas de teflon com ar comprimido .....	125
6.5.3	Ensaio do material compósito (PA6 com fibras de carbono) com hélio.....	131

# INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Metodologia
- 1.4 Estrutura do relatório
- 1.5 Empresa de acolhimento



# 1 INTRODUÇÃO

No âmbito da unidade curricular Dissertação/Projeto/Estágio, do Mestrado em Engenharia Mecânica, no ramo Construções Mecânicas pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), exibo a minha dissertação de mestrado, que teve início em novembro de 2020 e foi finalizada em setembro de 2021. A dissertação foi realizada com base no estágio proposto numa instituição de ciência e investigação, o INEGI. O projeto foi realizado em conjunto com o INEGI estes dez meses e sempre orientado pelo Sr. Eng. Rui Marques, que atribuiu o tema e auxiliou sempre que necessário.

## 1.1 Contextualização

Os materiais compósitos começaram a ser utilizados a partir dos anos 60 e 70, em reduzidas quantidades, em aviões militares e civis. Na década de 1980, os materiais compósitos começaram a ser aplicados em estruturas secundárias na indústria aeronáutica. No entanto, apenas nos aviões mais recentes, como o Airbus A380 e o Boeing 787, é que estes materiais começaram a fazer parte da estrutura principal. Na Figura 1 pode-se observar a utilização relativa dos materiais ao longo dos anos.

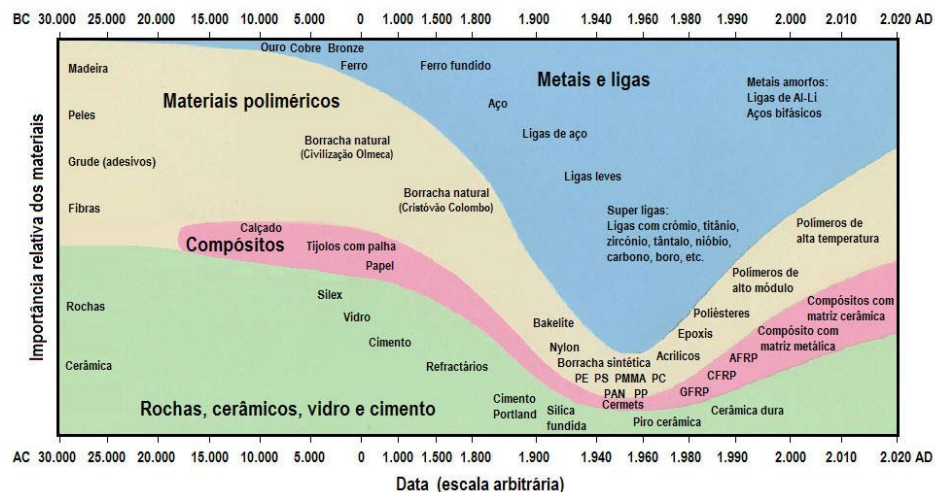


Figura 1 - Utilização relativa dos materiais ao longo dos anos [1].

Nos dias de hoje, os tanques feitos em materiais compósitos têm sido utilizados principalmente na indústria dos gases, porque conseguem-se criar tanques com um peso mais baixo em comparação com os tanques feitos em ligas metálicas. A diminuição de peso dos depósitos em materiais compósitos, em relação aos depósitos

feitos em liga metálica, permite a redução do consumo de combustível nos veículos de transporte, o que vai levar a uma diminuição dos custos, criando assim um interesse económico nos materiais compósitos fabrico destes tanques. Existe desta forma um grande interesse na indústria aeroespacial no estudo de um reservatório criogénico de tipo V. Assim sendo, o presente relatório pretende detalhar o atual estado da arte no tópico para possibilitar um estudo mais detalhado a ser realizado na dissertação.

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação consiste na criação de um o *setup* que permite determinar a permeabilidade de um material compósito. Para tal, será realizada uma pesquisa acerca dos *setups* disponíveis na literatura, com a finalidade de compreender as soluções construtivas dos *setups* existentes e assim projetar um modelo com as características e funcionalidades pretendidas. A realização desta dissertação também pretende descrever as diferentes etapas seguidas no projeto do *setup*, como a escolha do *design* do *setup*, a escolha dos componentes usados para criar o *setup* e o processo de montagem utilizado para o fabrico do *setup*. Além disto, são também apresentadas as etapas para a realização dos ensaios e discutidos os resultados retirados a partir do ensaio de várias amostras. Por fim, é apresentada a comparação dos resultados obtidos através do *setup* de permeabilidade criado com os valores encontrados na literatura, para verificar a credibilidade dos valores do ensaio e assim validar a solução proposta para o *setup*.

## 1.3 Metodologia

Inicialmente, antes da realização do trabalho proposto na presente dissertação, foi realizada uma revisão bibliográfica e análise do estado-da-arte dos tópicos considerados relevantes para o desenvolvimento do projeto.

O projeto e validação do *setup* para ensaios de permeabilidade começou por um estudo preliminar do material que seria escolhido para o ensaio e dos *setups* presentes na literatura, com o objetivo de criar um plano de ensaios com os materiais mais promissores para obter melhores resultados durante o ensaio de permeabilidade. Após análise dos diversos *setups* encontrados na literatura, foram desenvolvidos vários modelos para averiguar as vantagens e desvantagens de cada um deles. De seguida, realizou-se uma análise dos cálculos preliminares necessários para obter a permeabilidade a partir dos dados obtidos a partir do ensaio. Seguidamente desenvolveu-se um *design* de um *setup* para realizar o ensaio de permeabilidade. Após se decidir e concluir os pormenores do *design* que será fabricado, procedeu-se à obtenção dos componentes para fabricar o *setup*. Por fim, foram fabricadas as amostras que foram alvo do ensaio para efeitos de validação do dispositivo,

compararam-se os resultados com os dados encontrados na literatura, e aferiu-se a capacidade do *setup* criado.

#### 1.4 Estrutura do relatório

A estrutura do relatório é constituída por quatro capítulos principais, que estão divididos em vários subcapítulos.

O primeiro capítulo é destinado à introdução da presente dissertação e respetiva organização. Ainda neste capítulo são apresentados os objetivos propostos, a entidade acolhedora e um enquadramento da indústria aeroespacial, dos materiais compósitos e dos ensaios realizados em materiais compósitos para determinar se são qualificados para fabricar um reservatório.

No segundo capítulo é realizada a pesquisa bibliográfica sobre os veículos aeroespaciais e sobre os materiais compósitos. Serão ainda apresentados os processos de fabrico associados à criação de reservatórios de combustíveis sem nenhuma liga metálica nem *liner*, e os ensaios que devem ser aplicados aos reservatórios, como por exemplo os ensaios de permeabilidade que será desenvolvida durante a dissertação.

No terceiro capítulo são abordados os objetivos da dissertação, sendo o principal a criação de um *setup* que permita determinar a permeabilidade de um material compósito. Neste capítulo também são apresentadas as etapas do projeto de criação de um *setup* de permeabilidade, os materiais que iram ser ensaiados, o processo de seleção do *setup* a partir das várias pesquisas realizadas e a escolha dos modelos que serão utilizados como base para desenvolver o *setup* de permeabilidade. De seguida são apresentados todos os materiais adquiridos e as etapas de construção do *setup*. Por fim, é descrita a metodologia necessária para realizar o ensaio em segurança e são apresentados os ensaios realizados e respetivos resultados, assim como a comparação com os dados encontrados na literatura para efeitos de validação do *setup* projetado.

No quarto e último capítulo são apresentadas as conclusões retiradas dos ensaios e é concluído se o *setup* está operacional. Por último, são apresentadas as propostas para trabalhos futuros.

#### 1.5 Empresa de acolhimento

O Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI), foi criado em 1986 a partir do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec) e do Departamento de Engenharia e Gestão industrial (DEGI) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). O INEGI é um instituto destinado à investigação, inovação e transferência de tecnologia, consultadoria e serviços para vários mercados e setores da engenharia. Desde a sua criação, sempre desenvolveu

projetos com empresas e consórcios tanto nacionais como internacionais. O INEGI desenvolveu vários projetos como por exemplo, as garrafas de gás Pluma e também parcerias com a Agência Espacial Europeia (ESA) e a Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA), demonstrando a sua tradição de prestígio nas áreas dos materiais e estruturas compósitas.

O INEGI dedica-se a desenvolver materiais laminados em compósitos, betões poliméricos, fibras de vidro e carbono, visto que a leveza e a implementação de novas tecnologias de fabrico de materiais são fatores cruciais nos seus projetos.

As instalações deste instituto dispõem de vários laboratórios para fabrico destes materiais, assim como para os testar. Alguns ensaios realizados nestas instalações são ensaios de materiais, tais como reação dos materiais ao fumo e fogo, termomecânicos, envelhecimento, deformabilidade, dureza, fadiga, entre outros. Na Figura 2 encontra-se a instituição em questão.



Figura 2 - Edifício do INEGI [2].

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Veículos aeroespaciais
- 2.2 Fabrico de componentes compósitos para a indústria aeroespacial
- 2.3 Projeto de tanques e reservatórios



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Veículos aeroespaciais

Todos os veículos aeroespaciais incorporam um vasto leque de tecnologias modernas que envolvem aerodinâmica, propulsão, estruturas, materiais e processos de fabrico, telecomunicações, inteligência artificial, sistemas elétricos, entre muitos outros aspetos. Todas estas tecnologias estão organizadas de forma a seja possível o transporte de satélites ou pessoas até ao espaço de forma mais segura [3].

#### 2.1.1 Importância da indústria aeroespacial na economia mundial e nacional

O aumento de lançamentos de satélites para a órbita terrestre começou em 1957, com o lançamento do Sputnik. No dia 4 de outubro de 1957 a Rússia colocou o primeiro satélite em órbita [4]. Em dezembro de 2019, existiam mais de 2200 satélites a orbitar a Terra. Com o decorrer dos anos, estima-se que haja cada vez maior atividade no desenvolvimento e na utilização dos satélites [5].

Com a evolução das tecnologias no setor industrial destaca-se a indústria aeroespacial, cada vez mais desenvolvida. Dos países da europa, existem três que se destacaram na década de 1960, a França, Itália e o Reino Unido. Estas três nações colocaram em prática algumas políticas para auxiliar o crescimento do setor aeroespacial. A França foi país pioneiro a desenvolver as indústrias aeroespaciais, visto que adquiriu várias empresas como Sud Aviation e Nord Aviation. Enquanto essas empresas operavam na indústria aeronáutica, o governo controlava diretamente a pesquisa aeroespacial através de uma instituição científica nacional e agência espacial. A indústria aeroespacial em Itália era composta por algumas empresas privadas até o governo decidir nacionalizar em 1969 algumas empresas como FIAT Aviazione, uma subsidiária da Aeritalia, que originou a empresa aeroespacial Finmeccanica. No Reino Unido, a privatização e o estabelecimento de uma agência nacional no setor aeroespacial foram simultâneos durante a década de 1960. Atualmente, a BAE Systems é a maior empresa aeroespacial do Reino Unido e a segunda maior da Europa [6].

Em 2019, a europa superou 8,7 mil milhões de euros de vendas [7]. No entanto, os Estado Unidos da América são os líderes na indústria aeroespacial com 40% de todos os lançamentos e 41% de todos os veículos espaciais produzidos. A Europa encontra-se na quarta posição, depois dos Estados Unidos da América, da China e da Rússia, com 10% de todos os lançamentos e 11% de todos os veículos espaciais produzidos.

Entre as empresas da indústria aeroespacial europeia que mais emprego geraram destaca-se a GMV que fornece material aeroespacial para a Europa e já está em Portugal há mais de 20 anos. Em 2019, esta multinacional conseguiu aumentar em 30% a sua fatura em relação ao ano anterior, ultrapassando os 140 milhões de euros [7].

Em Portugal, prevê-se que os sectores aeroespacial e aeronáutico irão aumentar ao logo do século XXI devido a duas empresas que se tornaram parceiras de várias entidades. Segundo o Presidente do Instituto de Soldadura e Qualidade, Pedro Matias, *“Portugal e a indústria nacional têm vindo a subir cada vez mais na cadeia de valor da engenharia aeronáutica e aeroespacial e têm condições para afirmar esta área como uma área de excelência. Existem vários operadores privados a desenhar, fabricar e explorar sistemas de lançamento, aviões, satélites e outros sistemas e isso faz com que a procura de engenharia de excelência como a que é produzida por engenheiros portugueses seja cada vez mais procurada.”* [8].

### 2.1.2 Materiais e processos de fabrico utilizados

Os materiais compósitos tornaram-se imprescindíveis na fabricação de peças para os automóveis, veículos aeronáuticos e aeroespaciais. As aplicações destes materiais são eficazes devido ao seu reduzido custo e elevado desempenho mecânico. A redução do peso deve-se ao uso de plásticos reforçados com fibra visto que são mais leves do que os materiais metálicos [9].

Na década de 1970, o material dominante na indústria aeroespacial era a liga de alumínio. Cerca de 70% de um veículo aeroespacial era feito de liga de alumínio. Outros materiais como compósitos e vários tipos de ligas, como titânio, grafite e fibras de vidro, também eram usados, mas em quantidades bastantes reduzidas. Atualmente, com a evolução dos materiais compósitos e o desejo de diminuir o peso e melhorar a resistência mecânica, um veículo aeroespacial é constituído apenas com cerca de 30% de liga de alumínio [10]. Na Figura 3 está demonstrada percentagem de materiais presentes num veículo aeroespacial.

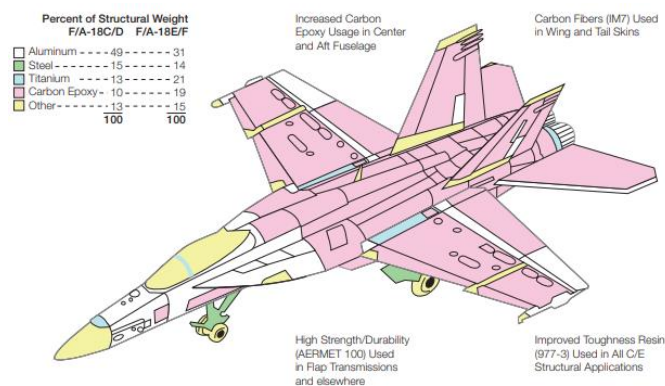


Figura 3 - Percentagem de cada tipo de material num veículo aeroespacial [11].

### 2.1.3 Requisitos de produto para a indústria aeroespacial

Os veículos aeroespaciais são projetados de forma a atingir determinados requisitos de rigidez, resistência, estabilidade e leveza quando cargas são aplicadas. Com estes objetivos é necessário reformular os materiais ao longo dos anos, de forma a serem mais leves, assim como os processos de fabrico desses materiais têm o objetivo de serem mais rápidos e económicos. Para concluir se esses materiais são eficazes, os processos de fabrico devem ser capazes de produzir componentes economicamente grandes com o mínimo de juntas possível [12]. O fabrico de materiais compósitos fora da autoclave abrange várias combinações de processos de fabrico e materiais compósitos mantendo-se em constante crescimento na indústria aeroespacial [13].

### 2.1.4 Utilização de materiais compósitos

A indústria aeroespacial, como todas as indústrias de veículos, estão em constante evolução para aumentar o desempenho das suas estruturas e diminuir o peso. Com o objetivo de fabricar partes estruturais de elevada resistência específica e peso reduzido, utilizam-se materiais compósitos de elevado desempenho mecânico. As ligas de alumínio foram um dos materiais mais revolucionários visto que era amplamente utilizado nas diversas indústrias. No entanto, com o aparecimento dos materiais compósitos, as ligas de alumínio começaram a ser substituídas, visto que possuem desempenho inferior aos materiais compósitos [14]. Além disto, o investimento usado para colocar uma estrutura em orbita é muito elevado. Por esta razão, qualquer diminuição de peso na estrutura poderá ser decisiva para a escolha do material. Outra grande vantagem do uso de materiais compósitos na indústria aeroespacial é o coeficiente de expansão térmica bastante reduzidos. Uma vez que as variações de temperaturas no espaço são elevadas, os compósitos como a grafite e o *kevlar* possuem vantagem em relações a outros materiais [15].

Atualmente os reservatórios para armazenar hidrogénio utilizados na indústria aeroespacial são fabricados maioritariamente em ligas de titânio apesar de também existem alguns reservatórios feitos em alumínio [16]. O uso de materiais compósitos para este tipo de reservatórios ainda está em fase de testes, embora vários estudos revelem que estes materiais são bastante promissores [17].

## 2.2 Fabrico de componentes compósitos para a indústria aeroespacial

As aeronaves e veículos espaciais quando estão a ser projetados, os engenheiros procuram sempre estruturas mais leves e eficientes [18]. Desta forma, os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras tornaram-se o material substituto dos materiais metálicos convencionais pois têm elevado desempenho mecânico, elevada

rigidez e resistência específicas, elevada resistência à fratura e fadiga e melhor resistência à oxidação [19].

### 2.2.1 Processos de fabrico

A palavra processos está associada à obtenção ou modificação de componentes em materiais compósitos de matriz polimérica. Uma das grandes vantagens dos materiais compósitos é a possibilidade de criar peças utilizando diversos métodos, desde os manuais até os automatizados [20].

#### 2.2.1.1 Automated fiber placement

O *automated fiber placement* (AFP) é realizado camada por camada. Durante este processo, cada camada é colocada em cima das outras, sempre pressionadas, aquecidas e compactas por um rolo de consolidação que controla a pressão e temperatura. Normalmente estas máquinas são suportadas por uma estrutura de pórticos e são controladas numericamente por computadores (CNC). As máquinas AFP, comparando com as máquinas *automated tape laying* (ATL), utilizam rolos mais pequenos, pois este processo é destinado para realizar peças mais pequenas e detalhadas. Por essa razão, as máquinas AFP usam braços articulados que operam em vários eixos e permitem obter peças mais complexas [21]. Na Figura 4 está descrito o princípio de operação deste processo.

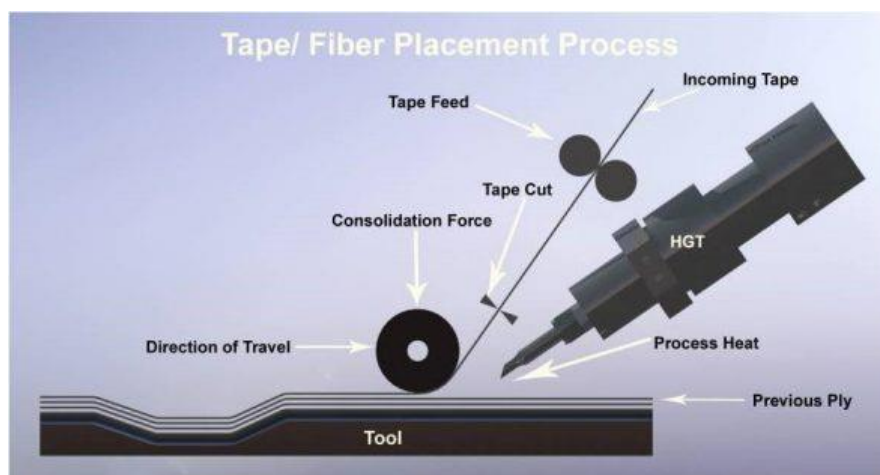


Figura 4 - Processo do AFP [22].

O AFP é utilizado num dos três métodos possíveis. No primeiro método, a cabeça do AFP está montada num braço articulado que se movimenta em múltiplos eixos, enquanto o impregnado é colocado sobre um molde fixo ou mandril fixo. No segundo método, a ferramenta com o impregnado é suportada por um braço articulado e a cabeça do AFP encontra-se fixa. No terceiro método, mais eficaz, tanto o molde como

a cabeça do AFP estão fixos em braços articulados, aumentando assim os eixos de utilização. Na Figura 5 apresenta-se um braço articulado controlado por CNC.

Para adquirir tais equipamentos, o investimento inicial é bastante elevado. No entanto, este processo torna-se rentável, uma vez que são necessários menos trabalhadores, geram-se menos desperdícios de matérias-primas e obtém-se melhor qualidade de produção, quer na eficácia de formar laminados, quer na possibilidade de fabrico em série. Uma grande vantagem do uso do AFP é a possibilidade de orientar as fibras conforme os parâmetros previamente definidos. Desta forma, os laminados podem ter propriedades mecânicas diferentes nas diversas partes da uma peça conforme o projeto, pois as fibras são alinhadas conforme se pretenda, controlando a resistência mecânica e a tenacidade. Outra vantagem do AFP é a sensibilidade da pressão que é exercida através do rolo de compactação. Este processo também diminui a criação de vazios e diminui a sobreposição de pré-impregnado. Quando se compara o processo de AFP com o manual, além de realizar todas as operações de corte necessárias, o produto final é mais perfeito [23].

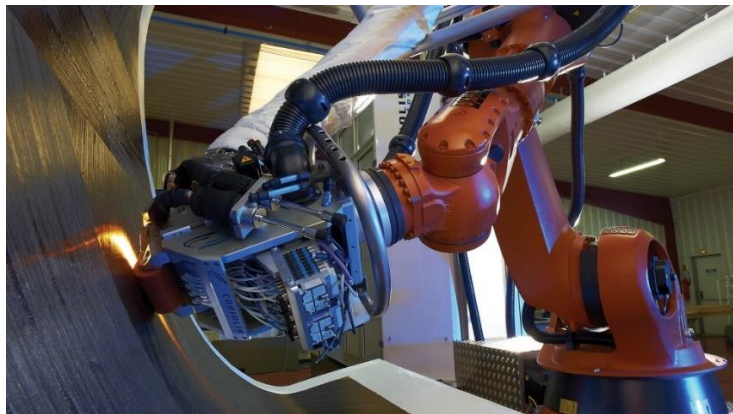


Figura 5 - Braço articulado a realizar o processo AFP [23].

O AFP revolucionou a indústria de compósitos e a única proposta para melhorar este método é tornar possível a utilização de vários *layup* em simultâneo [24].

#### 2.2.1.2 *Automated tape laying*

O processo *automated tape laying* (ATL) é semelhante ao processo AFP, na medida que ambos operam usando o mesmo método. No entanto, o ATL é utilizado em peças mais planas e mais simples, visto que utiliza rolos de compactação maiores [24].

Este processo facilitou a utilização dos materiais compósitos em várias áreas, como por exemplo no fabrico de veículos aeroespaciais que utilizam peças de grandes dimensões. Antes da utilização deste processo, os operários teriam de colocar camada por camada em áreas excessivamente grandes, o que tornava o procedimento bastante intensivo e demorado. Este método baseia-se no empilhamento de camadas

de pré-impregnado largas, entre 150 mm e 300 mm, que é ideal para criar peças com grande raio de curvatura ou planas [25].

A Figura 6 demonstra o processo de ATL e enorme dimensão das peças que são fabricadas utilizando este processo.

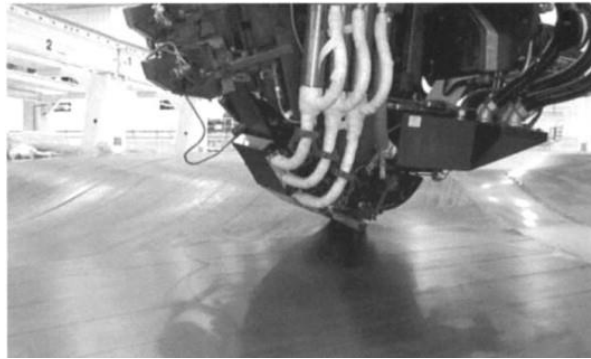


Figura 6 - Realização do processo de ATL [26].

O rolo que pressiona as camadas controla a velocidade de *layup*, a temperatura da fita e a pressão a que está sujeita. O processo ATL e o processo AFP são as duas principais tecnologias atualmente utilizadas para fabricar laminados compostos avançados a partir de pré-impregnados unidirecionais [27].

#### 2.2.1.3 *Resin transfer molding*

O processo de *resin transfer molding* (RTM) tem a vantagem de a peça ser fabricada no formato quase final, pois tem bom acabamento superficial, as tolerâncias dimensionais são reduzidas e as propriedades mecânicas são elevadas devido ao alto teor e concentração de fibras dentro do molde. No entanto, este processo também tem desvantagens, como a existência de vazios no molde, o elevado custo e o elevado tempo necessário para a compactação.

O processo de RTM é dividido em cinco etapas. A primeira é a sobreposição de camadas de tecido devidamente cortadas e orientadas. Depois colocam-se as fibras sobre a metade inferior do molde. De seguida compactam-se as fibras da parte inferior do molde com a parte superior do molde, fechando assim o molde. Após as fibras estarem compactas, injeta-se a resina líquida dentro do molde, criando uma diferença de pressão suficiente para preencher os espaços entre as fibras com resina. Por último, retira-se a peça do molde quando a cura estiver parcialmente completa ou completa. Este processo está demonstrado na Figura 7.

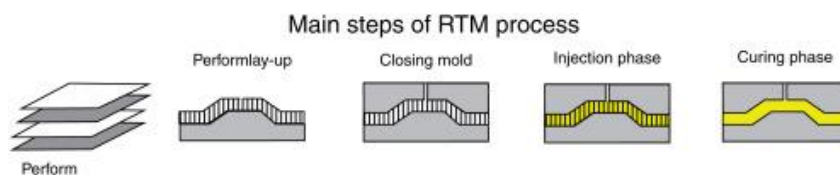


Figura 7 - Processo de RTM [28].

O molde para RTM é constituído por duas partes. A parte inferior do molde é normalmente feita em liga de alumínio e a parte superior geralmente feita em acrílico. No molde inferior existem vários orifícios roscados que são utilizados para diversos fins. Estes orifícios roscados podem ser utilizados como porta de injeção, como porta de ventilação ou para colocar um sensor. Se não for necessário nenhum componente, o buraco roscado é simplesmente fechado com um parafuso. O molde superior é feito de acrílico para permitir avaliar o fluxo da resina e assim evitar vazios [29].

O processo de RTM é um processo caro, pois este processo ainda não está automatizado e tem altos custos de investimento para adquirir o material, fazer o *setup* e criar o molde. A melhor forma de melhorar economicamente este processo é aumentar a estabilidade de processo e tornar a produção das peças mais rápida [30].

#### 2.2.1.4 Infusão a vácuo

À semelhança do RTM, no processo de infusão a vácuo, a pré-forma da fibra é sujeita à compactação. No entanto, enquanto no RTM a peça é compactada dentro de um molde, na infusão a vácuo, a peça encontra-se num molde dentro de um saco flexível, que fica sujeito a vácuo como se pode observar na Figura 8. A resina entra dentro do saco flexível devido à diferença de pressão criada pelo vácuo e esta etapa é crucial para a qualidade final da peça porque, durante a injeção do polímero, pode ocorrer a descompactação [31].

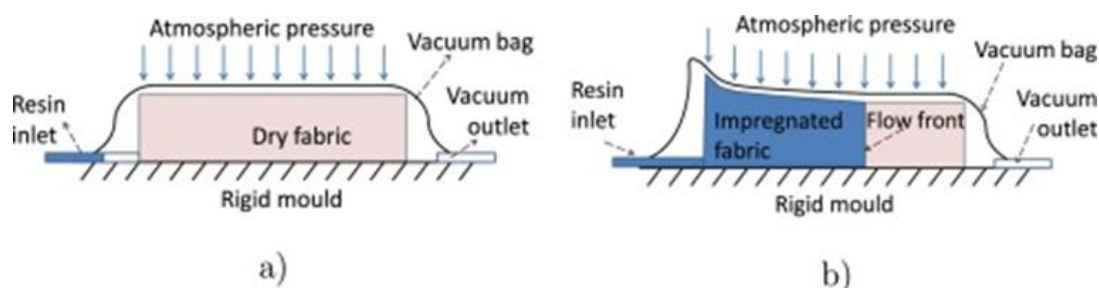


Figura 8 - Molde da infusão a vácuo. (a) estado de compactação a seco e (b) descompactação durante a injeção de resina [31].

O processo de injeção a vácuo está a ser mais adotado por diversas indústrias, como a aeroespacial e a marinha. Estas indústrias necessitam de grande precisão dos componentes fabricados e elevadas propriedades mecânicas. As propriedades finais

das peças produzidas pela injeção a vácuo são afetadas pela pressão a que a resina é injetada e pela resistência mecânica das fibras durante o processo [31].

A infusão a vácuo é adquirida em várias indústrias pois tem um baixo custo e adequa-se à produção de peças de grandes dimensões. No entanto, não é a melhor opção para produzir em série. O processo de infusão a vácuo tem vantagens como a ausência de emissão de gases no ambiente de trabalho, a baixa probabilidade de a peça ter vazios e a alta percentagem de fibras dentro da peça. O processo utiliza a diferença de pressão criada pelo vácuo para colocar a resina na pré-forma feita de fibras. Visto que é necessário retirar todo o ar do molde, a sua parte superior do molde é flexível. A complexidade do processo aumenta assim que aumenta a percentagem de fibra e respetiva permeabilidade, que determina a pressão e a velocidade a que a resina deve entrar no molde [32].

A infusão do fluido é regulada por um sistema de parafuso e porca com anilha. Antes da infusão, a porca e anilha impedem a resina de entrar. Ao girar a porca do parafuso, o fluxo pode ser controlado com precisão, sendo a quantidade de fluido infundido controlada pelo passo da rosca [33]. Na Figura 9 estão demonstrados os materiais necessários para realizar este processo.

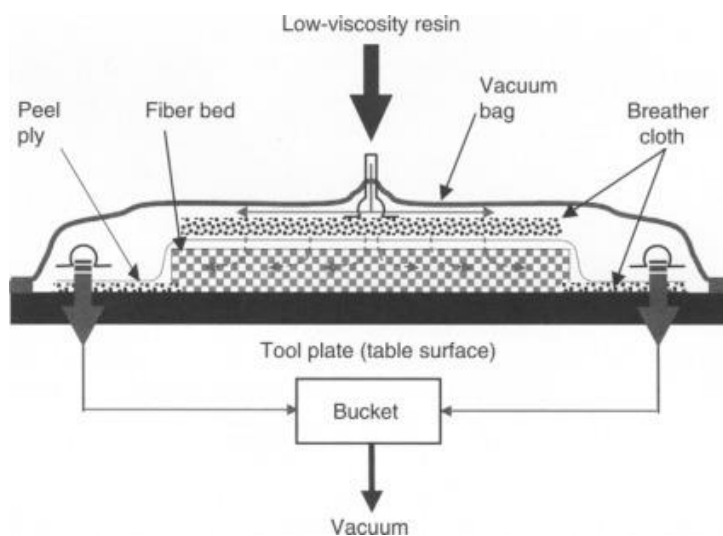


Figura 9 – Forma de utilizar infusão a vácuo [34].

A principal limitação de criar compósitos com resinas líquidas é a criação de vazios e aprisionamentos de ar durante a infusão. Os vazios são locais onde a resina não cobriu a fibra ou locais mal impregnados. Este acontecimento surge quando a resina chega à porta de saída sem preencher completamente todas as fibras. Estes defeitos reduzem as propriedades dos componentes. Embora os micro defeitos sejam vazios, estes, podem aparecer mesmo que a peça esteja completamente preenchida com resina. Estes defeitos aparecem pois o material compósito é feito por milhares de fibras

direcionadas de várias formas, criando assim micro porosidades, que é o espaço livre dentro das fibras [33].

### 2.2.1.5 Enrolamento filamentar

O enrolamento filamentar é utilizado em todas as estruturas ocas. Os cilindros são considerados estruturas abertas, enquanto os reservatórios e os tanques são considerados estruturas fechadas. Na Figura 10 está representado o processo de enrolamento filamentar [35].

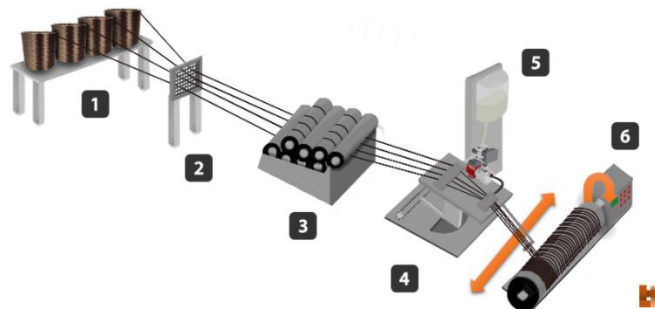


Figura 10 - Processo de enrolamento filamentar [35].

Este processo baseia-se no envolvimento de um mandril macho em rotação por filamentos sob pressão. As fibras para reforçar o material compósito estão enroladas em bobinas (1). As fibras são tracionadas pelo mandril (6), os filamentos atravessam um guia de fibras (2) com o objetivo de organizar os filamentos, retirar as tensões criadas nas bobinas e alinhar as fibras para estas atravessarem o sistema de tensionamento (3). Este sistema irá garantir que as fibras estarão esticadas ao máximo, para que, quando passarem pela carruagem e plataforma (4), estejam prontas para receber a resina do sistema de impregnação (5). A carruagem e plataforma normalmente são responsáveis por organizar as fibras impregnadas e o mandril é responsável pela tensão e por moldar o formato a que se pretende. No processo de cura, existem duas formas que são usadas mais frequentemente. Uma forma é colocar o mandril e o pré-impregnado já moldado no forno de cura ou colocar radiadores perto do mandril para, enquanto este está a girar, a cura ocorra ao mesmo tempo. Após a cura da resina, o mandril é retirado e o objeto criado fica oco.

### 2.2.2 Materiais

Um material é considerado compósito quando se combinam dois ou mais materiais. Os mais utilizados são os materiais fibrosos como as fibras de carbono e as fibras de vidro, que são envolvidas numa matriz feita de resina. Os materiais compósitos são utilizados há muitos séculos, como por exemplo os tijolos de argila reforçados com fibras de palha. Atualmente existem milhares materiais compósitos, desde o tradicional betão armado, até os materiais poliméricos reforçados com fibras contínuas de carbono [20].

### 2.2.2.1 Reforço

As fibras têm como principal função absorver a maior parte dos esforços transmitidos ao compósito. Como tal, é importante saber escolher que tipo de fibra se deve usar para cada aplicação. Atualmente existem muitas fibras utilizadas no mercado como as fibras carbono, fibras de vidro, fibras de boro, entre muitas outras. No entanto as fibras mais usadas na indústria são as fibras de vidro devido à sua boa relação preço/qualidade [36].

#### Fibras de carbono

As fibras de carbono têm cerca de 5 a 10 micrómetros de diâmetro. As fibras de carbono são dos materiais mais recentes utilizados em múltiplas aplicações de engenharia, desde automóveis a veículos espaciais. As fibras de carbono possuem elevada resistência mecânica, elevada resistência química e são mais leves do que metais [37]. Estas características são as principais vantagens que tornam as fibras de carbono tão requisitadas para elaborar diversos componentes de elevada resistência mecânica. As propriedades de uma peça de um compósito reforçado com fibras de carbono são semelhantes às do aço e o peso é idêntico ao plástico. Desta forma, a relação entre a resistência e o peso torna-se bastante superior a qualquer aço e a qualquer plástico [38]. Na Figura 11 estão comparadas as propriedades de várias fibras de carbono e alguns outros materiais.

Com base na composição dos materiais, as fibras de carbono são classificadas em:

- Fibras de carbono à base de *poliacrilonitrila* (PAN);
- Fibras de carbono à base de *pitch*;
- Fibras de carbono à base de *rayon*.

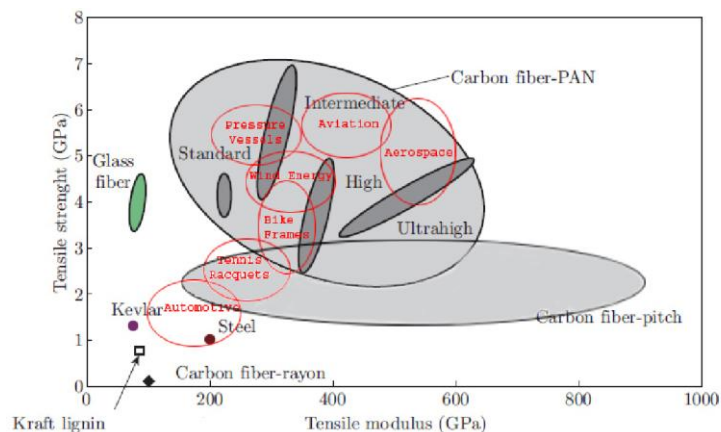


Figura 11 - Comparação das propriedades dos diferentes tipos de fibras de carbono [39].

As propriedades das diferentes composições do carbono encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades dos diferentes tipos de fibras de carbono [20].

Propriedade	PAN	Alcatrão “Pitch”	“Rayon fibers”
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1.8	2.0	1.7
Módulo de Young	200-400	300-700	415-680
Tensão de rotura (MPa)	2480-5600	1900-2200	2070-2760
Deformação na rotura	0.6-1.2	1-1.5	0.5-0.6
Coefficiente de expansão térmica axial (10 <sup>-6</sup> /°C)	-0.7 a -0.5	-1.6 a -0.9	-

### Fibras de vidro

As fibras de vidro constituem o tipo de reforço mais comum utilizado nos materiais compósitos. As fibras mais utilizadas são o vidro E, que contém aluminoborossilicato de cálcio na sua constituição, e o vidro S, que contém aluminossilicato de magnésio. As fibras do vidro S possuem melhores características dentro das fibras de vidro como a tensão de limite de tração e compressão superior, módulo superior e massa volúmica inferior. Na Tabela 2 apresentam-se as propriedades de alguns tipos de fibras de vidro.

Tabela 2 - Propriedades dos diferentes tipos de fibras de vidro [20].

Propriedade	Vidro E	Vidro S	Vidro R
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2.6	2.49	2.55
Módulo de Young	73.0	85.5	86.0
Tensão de rotura (MPa)	3400	4580	4400
Deformação na rotura	4.4	5.3	5.2
Coefficiente de expansão térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	5.0	2.9	4.0

### Fibras de aramida

As fibras de aramida possuem excelente resistência química devido à elevada resistência a solventes orgânicos, combustíveis lubrificantes e ácidos. A preferência do uso das fibras de aramida é derivada da ótima relação rigidez-peso, boa resistência ao impacto e à fadiga, e boa capacidade de amortecimento de vibrações. As principais desvantagens do uso desta fibra são a fraca ligação entre a matriz e as fibras e a baixa resistência à delaminação. Neste momento, os dois tipos de fibras mais usado na indústria são o *kevlar 29* e *twaron*. Para aplicações como cascos de barcos, estruturas de avião, coletes de proteção e capacetes, é utilizado o *kevlar 49* pois tem maior amortecimento ao impacto [20]. Na Tabela 3 destacam-se algumas características das fibras de aramida.

Tabela 3 - Propriedades dos diferentes tipos de fibra de aramida [20].

Propriedade	Kevlar®29	Kevlar®49	Twaron®
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1.44	1.45	1.44
Módulo de Young	60	129	60
Tensão de rotura (MPa)	3000	3000	2600
Deformação na rotura	3.6	1.9	3
Coefficiente de expansão térmica axial (10 <sup>-6</sup> /°C)	-2.0	-2.0	-

### Fibras de boro

As fibras de boro são produzidas a partir da deposição de boro sobre um fio de tungstênio ou carbono e podem apresentar diâmetro de 200 µm. A principal vantagem das fibras de boro é o elevado módulo de elasticidade, que pode ser cinco vezes superior ao módulo de elasticidade das fibras de vidro. No entanto as fibras de boro são mais pesadas [20]. A principal desvantagem é o elevado custo para produzir estas fibras. As propriedades mais comuns nas fibras de boro são indicadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades das fibras de boro com várias espessuras [20].

Propriedade	100µm	140µm	200µm
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2.61	2.47	2.39
Módulo de Young	400	400	400
Tensão de rotura (MPa)	3450	3450	3450
Deformação na rotura	0.7-0.9	0.7-0.9	0.7-0.9
Coefficiente de expansão térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	4.9	4.9	4.9

### Outras fibras

Existe uma enorme variedade de materiais que podem ser usados como reforço em compósitos com o objetivo de melhorar o desempenho dos materiais compósitos numa determinada função. Esses casos podem ser as fibras de amianto, sisal, poliamidas, poliéster, cerâmicas entre muitas outras.

As fibras cerâmicas salientam-se pelo bom desempenho a altas temperaturas e são obtidas através da decomposição química em fase de vapor. Este tipo de fibra possui uma elevada resistência mecânica, elevado módulo de elasticidade e resistência a elevadas temperaturas. Assim sendo, as fibras cerâmicas são muito apreciadas, sendo as mais utilizadas as fibras de alumina e de carboneto de silício [20].

### 2.2.2.2 Matriz

Os materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras são bastante utilizados devido às suas propriedades de rigidez, durabilidade e relação entre resistência e peso. As resinas podem ser termoplásticas ou termoendurecíveis. As resinas poliméricas estão presentes na rotina de todas as pessoas. Na Tabela 5 estão alguns exemplos de materiais utilizados pelas pessoas feitas em material polimérico.

Tabela 5 - Objetos feitos em polímeros do quotidiano [40].

Resina utilidade	Objeto
Politereftalato de etileno (PET)	Garrafas de água e refrigerantes
Polipropileno	Cadeiras de plástico e copos de plástico
Policarbonato	Lentes para óculos de segurança
Polibutileno Tereftalato (PBT)	Brinquedos de criança
Polietileno	Sacos de supermercado
Policloreto de vinila (PVC)	Tubo de água
Nylon	Calçados e roupas

Os polímeros termoplásticos amolecem com o calor e assim podem ser remodelados ou até reutilizados. Os materiais termoendurecíveis formam redes tridimensionais após a polimerização e desta forma não são reutilizados, como por exemplo as matrizes de poliéster, as matrizes fenólicas, as matrizes de epóxido e as matrizes de silicone. Uma desvantagem dos polímeros termoplásticos é a elevada viscosidade quando estão em estado líquido, sendo muito difícil e dispendioso trabalhar com estes polímeros na criação de materiais compósitos. As matrizes termoendurecíveis são menos viscosas, sendo possível criar materiais compósitos de forma mais económica [41]. Na Tabela 6 encontram-se as vantagens e as desvantagens dos polímeros termoplásticos e dos termoendurecíveis.

Tabela 6 - Principais diferenças dos polímeros termoplásticos e termoendurecíveis [40].

Termoplásticos		Termoendurecíveis	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
Possuem maior resistência ao impacto	Difícil impregnar com fibras de reforço	Maior resistência mecânica	Depois de curada, não se pode alterar
Podem ser sólidos ou maleáveis	Processos de impregnar bastante caro e complexo	Mantem-se líquido à temperatura ambiente	Difícil reciclagem
São reutilizados	Sensibilidade ao calor	Facilidade de fabricação de peças complexas	Difícil acabamento superficial depois da cura

### 2.2.3 Métodos de ensaio de materiais e componentes compósitos

Os ensaios em materiais compósitos têm a finalidade de prever os limites dos componentes a partir de amostras que representam o objeto. Assim sendo, os ensaios mais utilizados nas amostras de compósitos são o ensaio de tração, ensaio de flexão e ensaio de impacto.

#### Ensaio de tração

Os ensaios tração consistem na aplicação crescente de cargas axiais até à rutura de uma amostra. Os provetes, normalmente, possuem uma zona mais estreita, designada de parte útil, pois é a zona mais provável de acontecer a rutura. Os equipamentos específicos para esta finalidade aumentam as forças axiais lentamente, permitindo assim que as deformações sejam distribuídas uniformemente por toda a amostra até ao momento que a amostra não aguenta mais e parte. Estas máquinas permitem alongar a amostra de forma constante e registam o alongamento através de um extensómetro. O resultado deste resisto é apresentado num gráfico força-deslocamento e desta forma é possível mediar a resistência à tração e o módulo de deformação elasticidade. Os ensaios de tração de materiais compósitos são geralmente aplicados a amostras de material compósito com fibras unidireccionais. No entanto, as normas ASTM D 3039 e a ISO 527 preveem o ensaio em laminados com as

fibras em  $0^\circ$ , em  $90^\circ$  ou em várias direções [20]. Na Figura 12 está a ser realizado um ensaio de tração num material compósito.

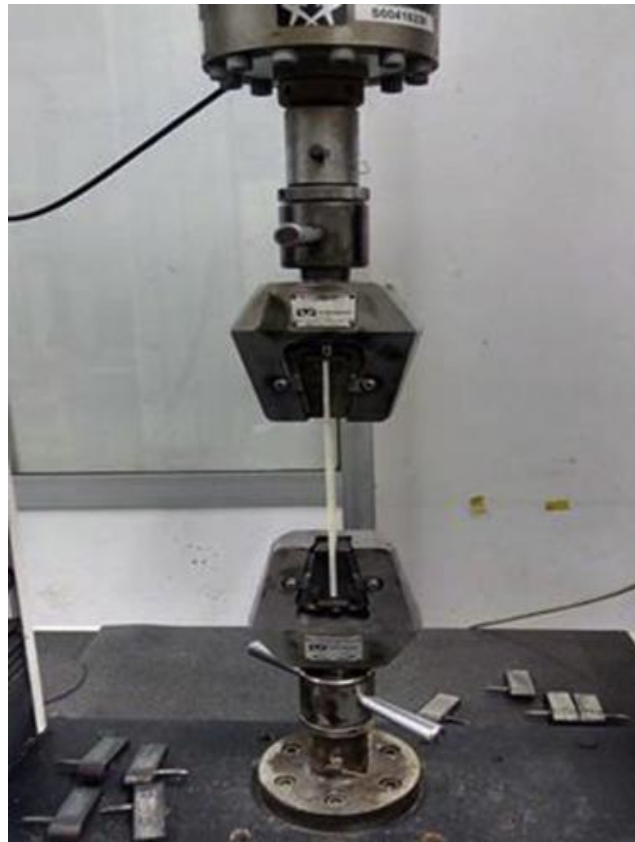


Figura 12 - Ensaio de tração [42].

### Ensaio de flexão

Os ensaios de flexão de um material compósito têm como objetivo obter o módulo de elasticidade na direção das fibras e a resistência longitudinal mínima. A partir destes resultados é possível avaliar o desempenho deste material compósito e assim fazer um melhor controlo de qualidade [43].

Estes ensaios são muito utilizados devido à sua simplicidade, pois não necessitam de custos de preparação e os equipamentos necessários são mais económicos do que os equipamentos para ensaio a tração. Existem dois tipos de ensaios, que se designam por flexão em 3 pontos e flexão em 4 pontos, conforme os pontos de carregamento. O ensaio de flexão em 4 pontos tem a vantagem de gerar uma zona considerável de momento fletor constante e sem corte transversal. No ensaio de flexão de 3 pontos, utiliza-se o deslocamento do cabeçote da máquina para saber o deslocamento máximo, enquanto no ensaio de 4 pontos, o deslocamento é medido por um transdutor de deslocamentos. Na prática, as vantagens do ensaio de flexão em 4 pontos não se revelam significativas, pelo que o ensaio de flexão em 3 pontos é muito

mais utilizado [20]. Na Figura 13 pode-se ver a diferença entre um ensaio de 3 pontos e um ensaio de 4 pontos.

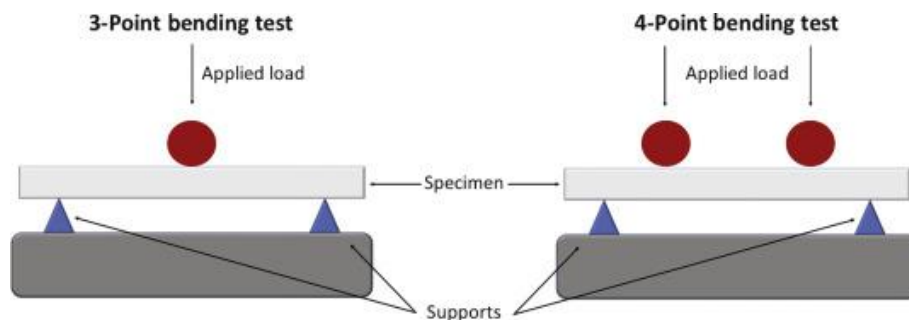


Figura 13 - Diferença de um ensaio de flexão com 3 pontos e 4 pontos [44].

### Ensaio de Impacto

O impacto é definido como a aplicação repentina de uma carga que leva à fratura do material. Os ensaios de impacto Izod ou Charpy são utilizados para determinar a resistência ao impacto. Para determinar a energia do impacto, a amostra é fraturada por um pêndulo, e assim é possível determinar as forças de impacto que dada estrutura pode sofrer. Por essa razão, este ensaio é de extrema importância para a escolha do material no início de qualquer projeto. Na Figura 14 pode-se ver os vários tipos de ensaio de impacto.

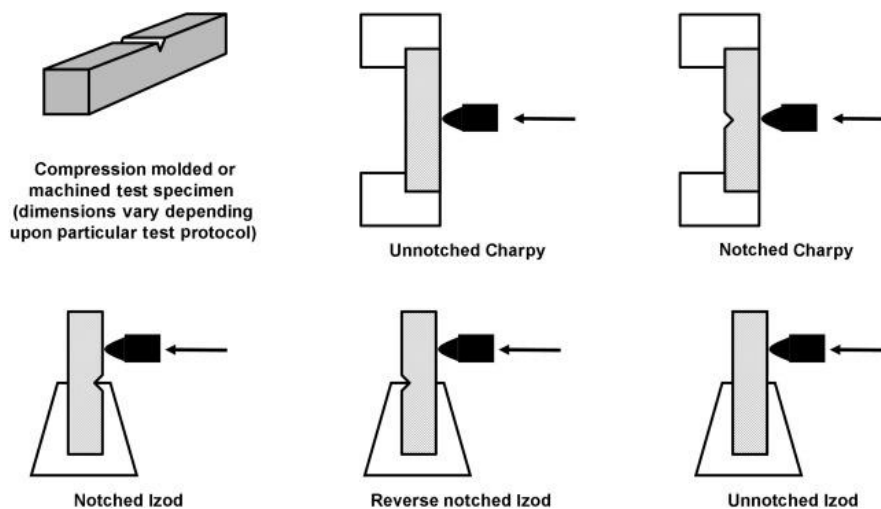


Figura 14 - Vários tipos de ensaio de impacto [45].

#### 2.2.4 Estado-da-arte de processos de fabrico e métodos de ensaio

Na Tabela 7 são descritos trabalhos recentes e relevantes que traduzem o estado da arte relativo a processos de fabrico e técnicas de ensaio de materiais compósitos.

Tabela 7 - Estado da arte de processos de fabrico de materiais compósitos e respetivos métodos de ensaio.

Referência do artigo	Descrição
Anbuezhian et al. [46]	<p>Neste trabalho, o processo estudado é o de modelação de deposição e o material compósito utilizado é o poliácido láctico reforçado com fibra de vidro E. Durante este estudo as variáveis estudadas foi a espessura da camada, a velocidade de alimentação e a temperatura de extrusão. Para isso foi feito ensaio utilizando três espessuras (0.1 mm, 0.2 mm e 0.3 mm), três velocidade de alimentação (60 mm/min, 70 mm/min e 80 mm/min) e três temperaturas de extrusão (190°C, 200°C e 210°C). ao concluir este estudo conclui-se que o processo ideal teria a espessura de camada de 0.1mm, velocidade de alimentação de 70 mm/min e temperatura de extrusão de 200°C.</p>
Chandradass et al. [47]	<p>O objetivo deste trabalho é preparar um material compósito com matriz de magnésio metálico de forma a melhorar as propriedades mecânicas e aumentar a resistência de desgaste. Para esta finalidade, foram realizados ensaios de resistência mecânica utilizando materiais compósitos de magnésio metálico misturado com diferentes percentagens de carboneto de silício. Desta forma, concluiu-se que os compósitos de liga de magnésio contendo 5% de carboneto de silício demonstram elevada resistência mecânica, elevada resistência ao desgaste e elevado coeficiente de atrito em relação aos outros ensaios.</p>
Yousefi et al. [48]	<p>Neste estudo foi realizado uma mistura em temperaturas elevadas de componentes sólidos de resina epóxida, de endurecedor e de aceleradores de forma a criar uma resina termoendurecida. Esta mistura foi moída e reforçada com fibra de carbono. Após o material compósito estar pronto, foi realizada a cura em vácuo. Os ensaios de flexão foram realizados e concluiu-se que os materiais compósitos com acelerador apresentam piores propriedades de flexão comparativamente com a resina epóxida normalmente utilizada.</p>

Loutas et al. [49]

Este artigo foi realizado com base no processo de remoção automática de materiais realizado por um laser pulsado com o objetivo de reparar um material compósito reforçado com fibra de carbono. Os parâmetros analisados foram a velocidade do processo, a frequência do pulso do laser e a distância a realizar o procedimento.

Após vários ensaios a diferentes velocidades, diferentes frequências de pulso e diferentes distâncias, concluiu-se que a velocidade ideal é 3613 milímetros por minuto, a frequência do pulso ideal é a máxima permitida e a distância ideal é 129 micrómetros.

### 2.3 Projeto de tanques e reservatórios

Os recipientes de elevada pressão fabricados em materiais compósitos estão em rápido crescimento, particularmente os depósitos feitos por enrolamento filamentar de fibra de carbono. Vários depósitos que utilizam estes procedimentos são os tanques de oxigénio para aparelhos de respiração, para depósitos de combustível em veículos aeroespaciais e principalmente para o transporte de produtos de gás natural comprimido e depósitos de combustíveis em transportes pesados, tanto de passageiros como de mercadorias [50].

#### 2.3.1 Caracterização dos diferentes tipos de tanque

Na década de 1990, os reservatórios de alta pressão eram todos feitos em material metálico pois é muito eficaz e bastante confiável. Estas características são de extrema importância em reservatórios porque estão projetados para transportar combustíveis ou materiais perigosos. Em meados do século XX, a utilização de materiais compósitos através do processo de enrolamento filamentar, permitiram criar recipientes de pressão mais facilmente.

Os reservatórios estão divididos em cinco grupos conforme os materiais usados na sua estrutura durante o seu fabrico[50]:

#### **Tipo I**

As construções da estrutura dos tanques são feitas totalmente com materiais metálicos e o mais utilizado é o aço. Na Figura 15 estão demonstrados vários reservatórios do tipo I.



Figura 15 - Reservatórios do tipo I [51].

### Tipo II

A estrutura é composta por duas partes. A interior é feita em metal e a segunda parte é feita em material compósito. Após o tanque ser feito em aço ou alumínio, é criado um reforço em material compósito através do processo de enrolamento filamentar de forma a reforçar a zona circunferencial.

### Tipo III

A estrutura do tipo III é muito semelhante às estruturas do tipo II. O reservatório também é composto por duas partes, a parte interior do reservatório feita em material metálico e a parte exterior do reservatório feita em material compósito. A grande diferença entre os reservatórios do tipo II e do tipo III é a espessura da parte metálica e onde é colocado o material compósito. No reservatório do tipo III a parte metálica é muito fina e a parte exterior feita em material compósito é responsável por suportar todo o tipo de cargas aplicadas à estrutura, visto que é aplicada em toda a superfície do reservatório. A parte do reservatório bastante fina é denominada por *liner* e é possível ver perfeitamente na Figura 16 a diferença do *liner* e do material compósito.



Figura 16 - Reservatórios do tipo III [52].

### Tipo IV

Na construção do reservatório do tipo IV, não é utilizado nenhum material metálico que contribuía para a resistência do reservatório. Em alguns reservatórios deste tipo são colocadas peças em liga metálica, denominados *fitting*, de forma a facilitar o



### 2.3.3 Processos de fabrico e materiais comumente utilizados

Os tanques de combustíveis de grande volume são feitos em alumínio de alta resistência e um dos métodos que tem sido amplamente adotado para o seu fabrico é a soldadura por fricção, pois diminui os defeitos das peças finais e as propriedades mecânicas das juntas são excepcionais. Estas estruturas estão sujeitas a elevadas pressões internas, externas e a forças de torção durante o seu período de vida. Por esta razão, a soldagem por fusão convencional não é mais indicada para atender aos requisitos de tanques para combustível de forma eficaz e segura. A soldadura por fricção é um processo de união de estado sólido e atraiu um grande interesse na indústria aeroespacial devido às suas vantagens, incluindo menos defeitos, baixa distorção e excelente desempenho das juntas. Este método tornou-se uma técnica bastante útil para unir grandes estruturas aeroespaciais fabricadas em ligas de alumínio de alta resistência [16].

### 2.3.4 Ensaios de materiais para tanques

No ensaio de reservatórios para combustíveis do tipo V, é necessário considerar vários aspetos que geralmente são desprezados devido à existência de um *liner*. Visto que neste tipo de reservatórios não existe nenhuma camada interior fina de metal ou de polímero, é necessário fazer um ensaio de permeabilidade, de forma a estudar se a resina permite ou não a absorção do combustível, e um ensaio de compatibilidade, de forma a garantir que a resina e o combustível não reagem entre si. Como este tipo de reservatórios pode ser usado para armazenar oxigénio líquido, é necessário ter em consideração a enorme diferença de temperatura entre o interior do reservatório, que se encontra em temperatura criogénica, e o exterior, que se encontra à temperatura ambiente [56]. Para o efeito, devem também ser realizados ensaios de temperatura. Além destes ensaios, deveram ser realizados os ensaios mais comum em reservatórios, como os ensaios de resistência e de fratura.

#### 2.3.4.1 Ensaios de resistência

As propriedades dos polímeros como o módulo de Young e a resistência mecânica, tem a tendência de aumentar com a diminuição da temperatura. Assim sendo, em temperaturas criogénicas, a força de ligação entre as moléculas homogéneas da resina aumenta, deixando assim o material mais rijo. O mesmo não acontece nas fibras do reforço pois a sua estrutura molecular não é homogénea. Nas fibras de vidro, a temperaturas criogénicas, o aumento do módulo de Young é pouco significativo pois as fibras sofrem um tratamento térmico a alta temperatura durante a seu fabrico, o que lhes confere uma cristalinidade e uma orientação molecular próximo do ideal. A resistência individual das fibras de carbono, devido à sua superfície, diminui com a diminuição de temperatura. Os materiais compósitos quando sujeitos a esforços de

cisalhamento, o seu comportamento é principalmente controlado pela matriz. À semelhança dos ensaios de tração, a rigidez da resina aumenta com a diminuição da temperatura. Assim sendo, em condições de criogenia, os compósitos são mais resistentes a esforços de cisalhamento [55].

#### 2.3.4.2 Ensaio de rebentamento (*burst*)

O ensaio de rebentamento ou fratura permite caracterizar a pressão limite do reservatório porque durante o ensaio, a pressão interna é aumentada gradualmente até criar uma rutura no reservatório. Um exemplo de rutura de um reservatório está demonstrado na Figura 19.



Figura 19 - Tipo de rutura provocada pela pressão interna [57].

Os ensaios de fratura são realizados num compartimento fechado de acrílico de forma ao operário poder controlar o ensaio de forma segura. Na Figura 20 mostra um compartimento próprio para a realização deste tipo de ensaios.



Figura 20 - Compartimento para realizar o ensaio de rutura [57].

#### 2.3.4.3 Ensaio de permeabilidade

Permeabilidade é a propriedade que os materiais possuem de permitir a passagem de gases ou vapores através da sua estrutura. Nenhum polímero é perfeitamente impermeável visto que existem três características estruturais dos materiais que permitem a difusão molecular de vapor. As características são as imperfeições

superficiais, as porosidades e os espaços intermoleculares [58]. O ensaio de permeabilidade utiliza dois métodos experimentais, o método de determinação manométrica e o método de determinação volumétrica [59].

No método de determinação manométrica, o tubo de ensaio é exposto a vácuo e o aumento de pressão no tubo indica a permeabilidade do provete, como está demonstrado na Figura 21.

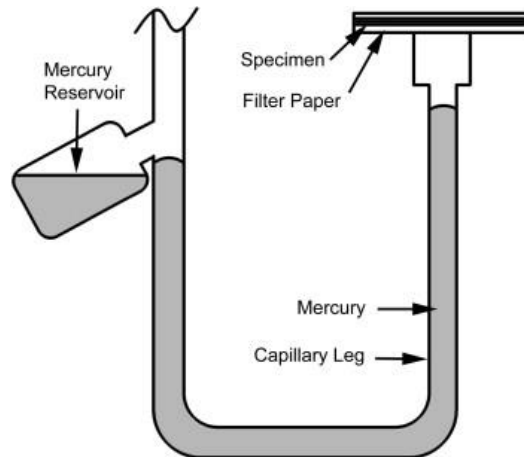


Figura 21 - Método de determinação manométrica [59].

No ensaio que usa o método de determinação volumétrica, o compartimento inferior encontra-se à pressão atmosférica e a passagem de gás pelo provete é detetada pela deslocação do líquido no tubo, conforme mostra a Figura 22.

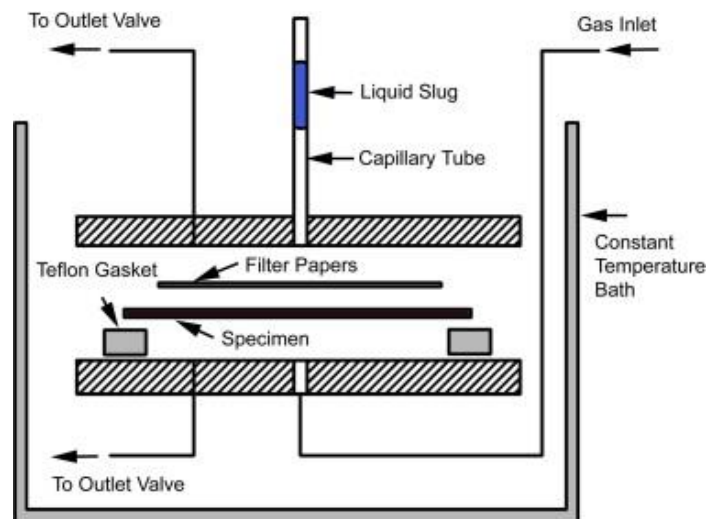


Figura 22 - Método de determinação volumétrica [59].

#### 2.3.4.4 Ensaios de temperatura

O ensaio de temperatura tem o objetivo de concluir se um dado material mantém as propriedades e não cria fissuras após variação da temperatura. Os ensaios de

temperatura criogénicas são realizadas num compartimento isolado com apenas o provete, um termómetro e uma mangueira para injetar o nitrogénio líquido. Após injetar o nitrogénio líquido dentro do compartimento, o termómetro controla a temperatura, e o provete passa a ficar em condições de criogenia [60]. Na Figura 23 pode-se observar o esquema duma máquina de fazer ensaios à temperatura.

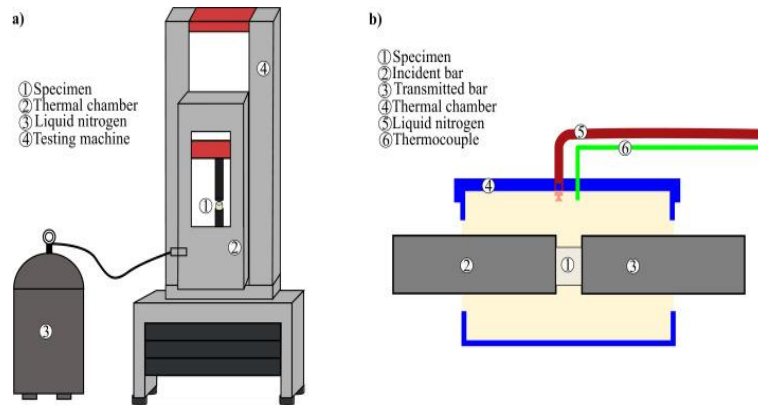


Figura 23 - Máquina para realizar ensaio à temperatura criogénica [60].

#### 2.3.4.5 Ensaios de compatibilidade

Os tanques de combustíveis feitos em material compósito são duradouros e leves. No entanto, nos tanques do tipo V é necessário estudar se o combustível armazenado e a matriz do material compósito reagem ou não entre si. Visto que este tipo de reservatórios não possuem nenhum *liner*, o produto que transporta vai estar em contacto com a resina. Neste tipo de ensaios, vários provetes feitos com resina são imersos durante diferentes tempos em oxigénio líquido. Na Figura 24 é possível ver o desgaste que uma resina sofreu, quando exposta ao oxigénio líquido ao longo de diferentes tempos [61]. Na imagem a) é o provete de controlo, o provete b) foi submerso em oxigénio líquido durante 5 horas, o provete c) durante 20 horas, o provete d) durante 40 horas e o provete e) durante 80 horas.

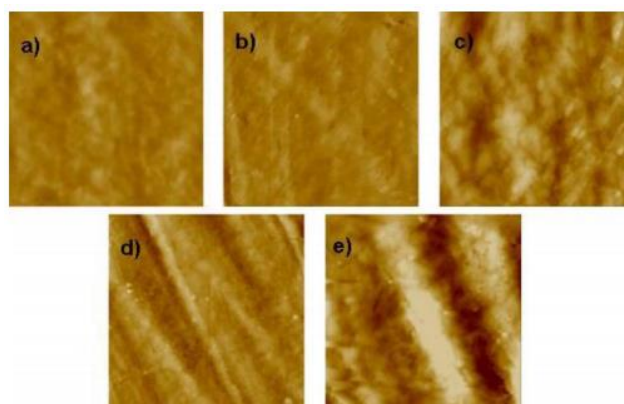


Figura 24 - Ensaio de compatibilidade de resina epóxida em diferentes tempos [61].

Os poucos polímeros que são compatíveis com o oxigénio líquido são alguns fluorocarbonetos, como politetrafluoroetileno, poliquilrotrifloroetileno e fluoroetileno. Estes polímeros são usados para vedar juntas ou lubrificar componentes quando existe a presença de oxigénio líquido, apesar não são serem as matrizes mais adequadas para criar um tanque em material compósito [62].

#### 2.3.4.6 Estado-da-arte no ensaio de materiais

Neste capítulo serão apresentados na Tabela 8 alguns trabalhos que de alguma forma, utilizaram materiais acoplados aos compósitos para melhorar as suas características especialmente em ambientes criogénicos.

Tabela 8 - Estado-da-arte de ensaios realizados em temperaturas criogénicas.

Referência do artigo	Descrição
Qu et al. [63]	Neste artigo foi realizado o estudo de 2 tipos de endurecedor <i>hydroxyl-terminated polyurethane</i> (HTPU), o HTPU1 e o HTPU2. O compósito utilizado nos ensaios foi resina epóxida reforçado com fibras de carbono. Durante os ensaios foram utilizados três provetes, o primeiro apenas tinha fibra de carbono e resina epóxida, e foi usado como o ensaio de controlo. O segundo provete continha endurecedor HTPU1 e no terceiro provete foi utilizado HTPU2. Os ensaios utilizados foram os ensaios de tração e flexão, tanto à temperatura ambiente como em temperatura criogénica. Desta forma, durante a análise dos resultados dos ensaios, conclui-se que os provetes que possuíam endurecedores apresentaram melhores propriedades mecânicas do que o provete de controlo, em temperaturas criogénicas.
Li et al. [64]	Neste trabalho, foi utilizado um polímero flexível, o polissiloxano, também conhecido como silicone, com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas da matriz, de um compósito feito de resina epóxida reforçado com fibra de carbono. De forma a concluir que o polissiloxano melhora as propriedades deste compósito, foi realizado ensaios de tração, e de flexão, à temperatura ambiente e à temperatura criogenia. Após análise dos resultados dos ensaios, conclui se que o polissiloxano melhora as propriedades da matriz em temperaturas criogénicas.

---

Zhou et al. [65]	<p>Neste trabalho foram criados provetes de resina epóxida bisfenol-A (E51) misturada com resina epóxida bromada (EX48) e provetes de E51 misturado com o retardador de chama de fósforo diidrooxafosfenantreno (DOPO). Para estudar a influencia do DOPO e do EX48 nas propriedades mecânicas, foram realizados ensaios de tração e de flexão.</p> <p>Após os ensaios, concluiu se que a resina E51, apresentou melhores propriedades mecânicas. Além disto, a temperatura de transição vítrea é reduzida com a incorporação de DOPO e EX48, devido à diminuição da densidade e à reduzida estabilidade de ligação de fósforo.</p>
Sandeep et al. [66]	<p>Neste artigo foi investigada a tenacidade à fratura de fibras de vidro e compósitos híbridos de fibras de vidro e alumina. Deste modo, foi concluído, através de ensaios de tração, que os compósitos que possuem alumina possuem melhores propriedades mecânicas que as fibras de vidro. O ensaio de tração em temperaturas criogénicas permitiu concluir que a utilização de alumina melhora as propriedades do compósito pois a melhor combinação das fibras e da matriz aumento o enrijecimento das cadeias poliméricas, e desta forma melhorou a tenacidade à fratura.</p>

---

# DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Objetivos do trabalho prático
- 3.2 Etapas do projeto
- 3.3 Material a testar
- 3.4 *Setup* de permeabilidade
- 3.5 Fabrico do *setup* para ensaio de permeabilidade
- 3.6 Descrição e metodologia do ensaio
- 3.7 Ensaio realizados
- 3.8 Análise crítica dos resultados



## 3 DESENVOLVIMENTO

### 3.1 Objetivos do trabalho prático

O projeto de veículos aeroespaciais tem como objetivo melhorar alguns requisitos como a rigidez da estrutura, a estabilidade e a leveza de forma a obter melhores resultados. Este trabalho prático é relativo à diminuição do peso dos reservatórios de combustíveis com recurso aos materiais compósitos. Os problemas mais encontrados em reservatórios de materiais compósitos são a permeabilidade e a compatibilidade entre o material que constitui o reservatório e o combustível armazenado. Um reservatório não pode permitir fugas de combustível nem pode haver reações químicas entre o material do reservatório e o combustível para não alterar as propriedades do fluido armazenado. Este estudo baseia-se na determinação da permeabilidade dos materiais compósitos e durante a realização deste projeto pretende-se atingir os seguintes objetivos:

- Desenvolver um *setup* que permita determinar a permeabilidade de materiais compósitos;
- Determinar a permeabilidade de amostras de material compósito em temperatura ambiente e temperaturas criogénicas.

#### 3.1.1 Requisitos

O objetivo principal deste projeto é criar um *setup* para realizar ensaios de permeabilidade em materiais compósitos. Assim sendo, foram definidas as seguintes etapas a seguir, por ordem de conclusão:

1. Seleção de materiais com baixa permeabilidade em temperaturas criogénicas entre as resinas e os pré-impregnados;
2. Realizar o design e o projeto de um *setup* de ensaio de permeabilidade para ser realizado em temperatura criogénica;
3. Adquirir os materiais e fabricar os provetes;
4. Determinar a permeabilidade de materiais compósitos à temperatura ambiente,
5. Aferir acerca do alcance dos objetivos propostos e discussão de ideias de melhorias, quer no *setup*, quer na escolha dos materiais da amostra.

### 3.1.2 Resultados pretendidos

Neste projeto será selecionada uma matriz com baixa permeabilidade para criar os provetes que serão ensaiados. De forma a conseguir determinar se a matriz é indicada para criar os reservatórios, foi determinado o limite máximo de gás hélio que poderá atravessar a amostra. O volume máximo de perda aceitável é 0,25% do volume total. Assim sendo, o resultado pretendido é que no máximo, 0,25% de todo o gás colocado no ensaio, consiga atravessar a amostra.

## 3.2 Etapas do projeto

Este processo foi dividido em três grandes etapas. Em cada etapa estão predefinidas várias tarefas que se deve realizar.

### **Estudo preliminar**

Esta primeira etapa está dedicada ao estudo preliminar dos materiais que seriam escolhidos e dos *setup* existentes na bibliografia de forma a poder criar um plano de ensaios com os materiais mais promissores a apresentarem melhores resultados no ensaio de permeabilidade.

### **Desenvolvimento básico**

Nesta segunda etapa será realizado o estudo dos cálculos preliminares necessários para calcular a permeabilidade a partir dos dados fornecidos pelo ensaio. Durante esta etapa também deve ser desenvolvido um design do *setup* para realizar o ensaio de permeabilidade. Por fim, pretende-se adquirir os materiais para desenvolver o *setup* e fabricar as amostras.

### **Desenvolvimento avançado**

Nesta terceira e última etapa serão fabricados os provetes e será desenvolvido e fabricado o *setup* experimental. Por fim, realizar-se-ão os ensaios de permeabilidade à temperatura ambiente e caracterizar-se-ão os provetes quanto à sua permeabilidade. Concluída a caracterização, será concluído se as matrizes são apropriadas para criar um reservatório ou se a permeabilidade é demasiada alta e a matriz não é apropriada para criar um reservatório.

## 3.3 Material a testar

Para desenvolver um reservatório que armazenará um gás é necessário que este não permita que o gás atravesse o material de fabrico do reservatório e assim impedir fugas de gás. Para tal, durante o desenvolvimento deste projeto é necessário escolher uma matriz que não permita que o gás armazenado atravesse a amostra, com o

objetivo de fabricar um reservatório de material compósito que não tenha perdas de gás pela estrutura.

Em relação ao gás utilizado, foi ponderado o uso de hélio ou de hidrogénio. O hidrogénio é um gás facilmente inflamável e é preciso ter muito cuidado quando é utilizado pois facilmente pode se provocar uma explosão quando em contacto com o ar atmosférico. A utilização do gás hidrogénio é muito perigosa e nos ensaios de permeabilidade que utilizam o hélio e o hidrogénio na mesma amostra são obtidos resultados semelhantes [67]. Além do perigo, os ensaios que utilizam o hélio como gás originam valores de permeabilidade mais elevados do que os ensaios que utilizam o hidrogénio devido ao diâmetro molecular do hélio ser ligeiramente inferior ao diâmetro molecular do hidrogénio, como se pode ver na Tabela 9. Assim sendo, foi escolhida a utilização do hélio em vez do hidrogénio.

Tabela 9 - Diâmetro da molecular do hélio e do hidrogénio [67].

Tipo de gás	Diâmetro molecular determinado a partir da viscosidade
Hélio	$2,9 \times 10^{-8}$ cm
Hidrogénio	$2,4 \times 10^{-8}$ cm

### 3.3.1 Materiais candidatos

Os materiais que constituem os melhores candidatos são os compósitos cujas matrizes são fabricadas a partir de polímeros termoplásticos, pois apresentam valores de permeabilidade bastante baixos, mesmo à temperatura ambiente. A Tabela 10 compara a permeabilidade dos seguintes materiais termoplásticos: polietileno de alta densidade (HDPE), polietileno (PE), *nylon* 11 (PA11), polipropileno (PP), policlorotrifluoroetileno (PCTFE), politetrafluoretileno (PTFE) e *nylon* (PA).

Os materiais termoplásticos são um ótimo candidato para ser a matriz do material compósito no fabrico de reservatórios devido a ter boa resistência mecânica e ser pouco permeável aos gases. No entanto, o processo de fabrico destes polímeros é bastante complexo devido a ser muito viscosos, ou seja, é muito difícil utilizar este material durante o processo de fabrico de enrolamento filamentar, visto que não adere facilmente à fibra do reforço.

Tabela 10 - Permeabilidade de vários polímeros [67].

Material	$\phi \times 10^{-9} \frac{\text{mol H}_2}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{MPa}}$
HDPE	0,89
PE	2,4
PA	0,14
PA11	0,36
PP	3,1
PCTFE	0,31
PTFE	3,2

A resina epóxida também foi considerada uma boa candidata por apresentar propriedades mecânicas igualmente elevadas, comparativamente com os polímeros termoplásticos. A grande vantagem da resina epóxida é o processo de fabrico ser bastante mais simples. Na Tabela 11 está representada a permeabilidade de uma resina epóxida e dois compósitos fabricados com essa mesma resina epóxida.

Tabela 11 - Permeabilidade duma resina epóxida e de alguns compósitos [67].

Material	Descrição	$\phi \times 10^{-9} \frac{\text{mol H}_2}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{MPa}}$
Resina epóxida	LY556/HY917	0,57
GFEP-56	Fibra de vidro + LY556/HY917	0,13
CFEP-60	Fibra de carbono <i>toho</i> + LY556/HY917	0,18

Outras opções foram procuradas, como por exemplo, a modificação das resinas epóxidas com segmentos poliméricos, pois estes melhoram as propriedades mecânicas do compósito [68]. A resina cianato-éster pertence a este tipo de resinas e tem a vantagem de possuir maior tenacidade do que as resinas epóxidas puras. A desvantagem da adição destes componentes é o aumento da dificuldade do processo de fabrico e os resultados esperados podem não ser atingidos.

As matrizes poliimidadas também foram consideradas uma alternativa porque têm excelentes propriedades de reação ao fogo, a principal propriedade para reservatórios de combustíveis, além das propriedades de permeabilidade.

### 3.3.2 Seleção do material da amostra

O material selecionado foi policaprolactona, também denominado por *nylon 6*, (PA6). Esta matriz é uma poliamida semicristalina e é conhecida pela alta resistência à tração, por ter excelente resistência ao desgaste, por ser flexível e por ter boa estabilidade térmica [69]. A viscosidade desta matriz é bastante baixa, o que facilita o processo de envolver a fibra de carbono com o PA6, o que facilita o fabrico do material compósito. O PA6 também tem bom processamento e facilidade de adesão às fibras de carbono em comparação com os polímeros referidos anteriormente, as resinas cianato-éster e as matrizes termoendurecíveis. A permeabilidade da PA6 é  $5,94 \times 10^{-10} \frac{\text{mol H}_2}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{MPa}}$  [70].

A amostra utilizada foi criada a partir de laminados compósitos de fibras de carbono unidirecionais com a espessura de camada de 0,16 mm. Estas camadas foram sobrepostas em orientações alternadas de 0° e 90°, ou seja, cada camada unidirecional era sobreposta no sentido perpendicular do sentido da camada anterior. De forma a atingir os 2 mm de espessura foram sobrepostas 14 camadas de laminado simétrico e balanceado. A quantidade de resina aconselhada é de 40% do peso total do compósito e a densidade do material compósito é 1,45 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.3.3 Definição do plano de ensaios

Os ensaios de permeabilidade foram realizados à temperatura ambiente e serão realizados em dois provetes diferentes. As amostras utilizadas serão compostas por PA6 reforçadas com fibra de carbono unidirecionais. A orientação das fibras de carbono utilizada é 0°/90°, porque é uma sobreposição que é provável ser feita na zona lateral dos reservatórios utilizando o enrolamento filamentar. As amostras são quadradas com 95 mm de lado e a espessura é 2 mm.

## 3.4 Setup de permeabilidade

Para fabricar um *setup* de permeabilidade foram realizadas várias etapas para concluir o projeto com sucesso. Neste capítulo foram apresentadas as várias etapas para criar o *setup* de permeabilidade, desde a pesquisa na literatura, de forma a saber o que já havia sido criado em relação a ensaios de permeabilidade, criar vários tipos de alternativas para o *setup*, selecionar os equipamentos para o fabrico do *setup* e pesquisar os cálculos que se deveriam realizar para determinar a permeabilidade.

### 3.4.1 Equipamentos disponíveis na literatura

De forma a procurar uma melhor solução para criar um *setup* de permeabilidade, realizou-se um trabalho de pesquisa com o objetivo de analisar os *setup* criados para outros estudos, de forma a adquirir conhecimento crítico acerca das soluções disponíveis e respetivas potencialidades e limitações, para possibilitar a criação de um conceito inovador que permite responder aos requisitos impostos.

Foram encontrados alguns esboços de *setups* de permeabilidade na literatura e o princípio de funcionamento é semelhante em todos. Uma amostra é colocada entre duas câmaras e um gás é forçado a atravessar a amostra devido à diferença de pressão. No entanto, as diferenças entre estes ensaios são relativas aos métodos de determinar a quantidade de gás que atravessa a amostra. Existem vários métodos utilizados, tais como, o método manométrico que determina a quantidade de hélio que atravessa a amostra através da medição do aumento de pressão na segunda câmara, previamente evacuada; o método volumétrico que tem como finalidade a utilização de um tubo capilar que regista as variações de volume que chega à segunda câmara; o método que utiliza transdutores de pressão para registar as variações de pressão dentro das câmaras e o método que utiliza um detetor de fugas de hélio, que determina a quantidade de hélio que atravessa a amostra.

O *setup* de permeabilidade da Figura 25 baseia-se numa amostra plana (b) pressionada por duas câmaras feitas de aço (c), a câmara superior e a câmara inferior. De forma que o ensaio não tenha fugas de gás, são utilizados dois *o-ring* (a), um localiza-se entre a câmara superior e a amostra e o outro entre a amostra e a câmara inferior. Neste caso, o gás hélio é pressionado na câmara superior e a quantidade que atravessou a amostra é medida quando sai da câmara inferior.

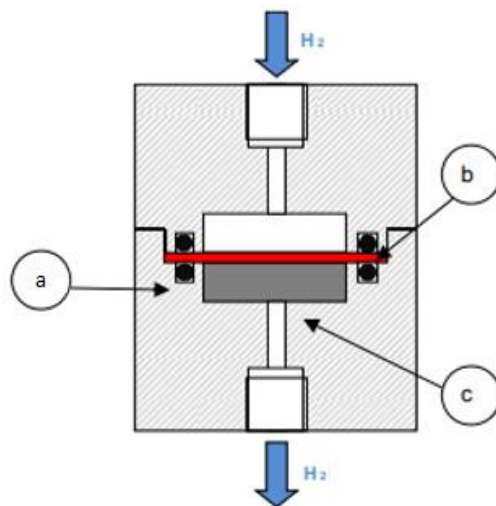


Figura 25 - Esquema dos blocos do *setup* [71].

No *setup* que se apresenta de seguida na Figura 26, além dos blocos que pressionam a amostra, estão representadas as ligações entre os vários componentes. É possível visualizar a bomba de vácuo para retirar o ar atmosférico da câmara do *setup* e as válvulas e tubos necessários para conduzir o hélio desde o reservatório de armazenamento até ao *setup* de permeabilidade. Após o hélio passar pela amostra, este é detetado pelo detetor de hélio, que regista a quantidade que atravessou a amostra. Neste caso, o *setup* representado na Figura 26 é um ensaio de permeabilidade com recurso a um detetor de hélio.

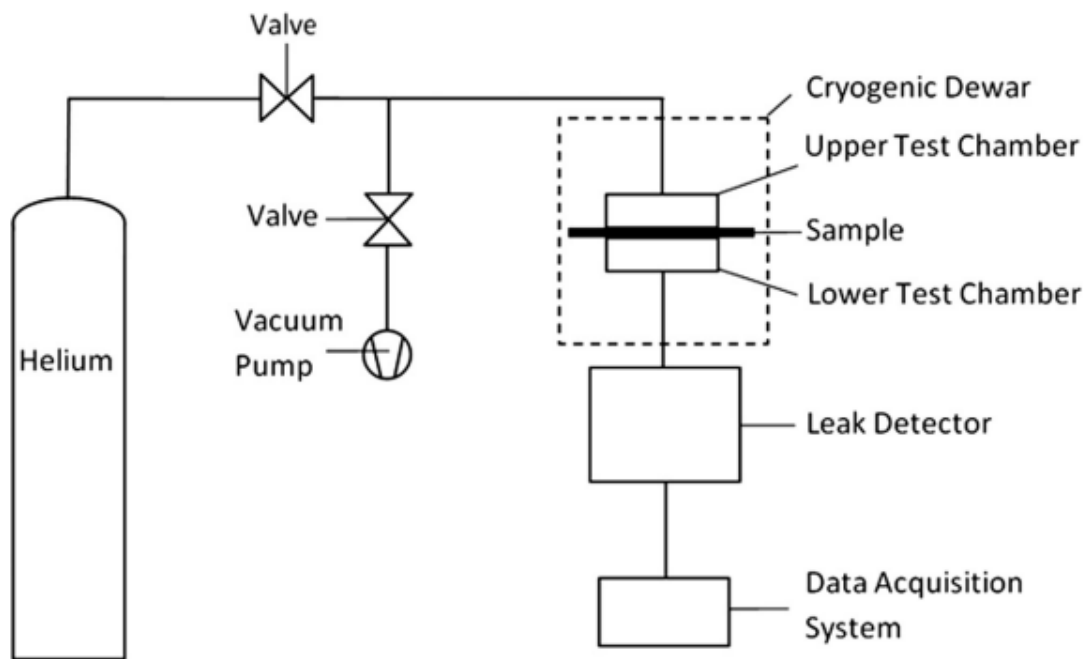


Figura 26 - *Setup* de permeabilidade completo, modelo que utiliza um detetor de hélio [58].

No *setup* representado na Figura 27 também é possível observar uma amostra, pressionada em duas câmaras e a utilização de um componente para impedir fugas de gás, neste caso é uma fita de teflon. O que o *setup* apresentado na Figura 27 acrescenta ao *setup* apresentado na Figura 25 são os restantes componentes para realizar o ensaio, a disposição das válvulas e dos tubos, os componentes para regular o gás e um tubo capilar que registará as variações de volume. Além dos componentes, este *setup* também se encontra dentro de um compartimento o que permite que o *setup* seja realizado a diferentes temperaturas.

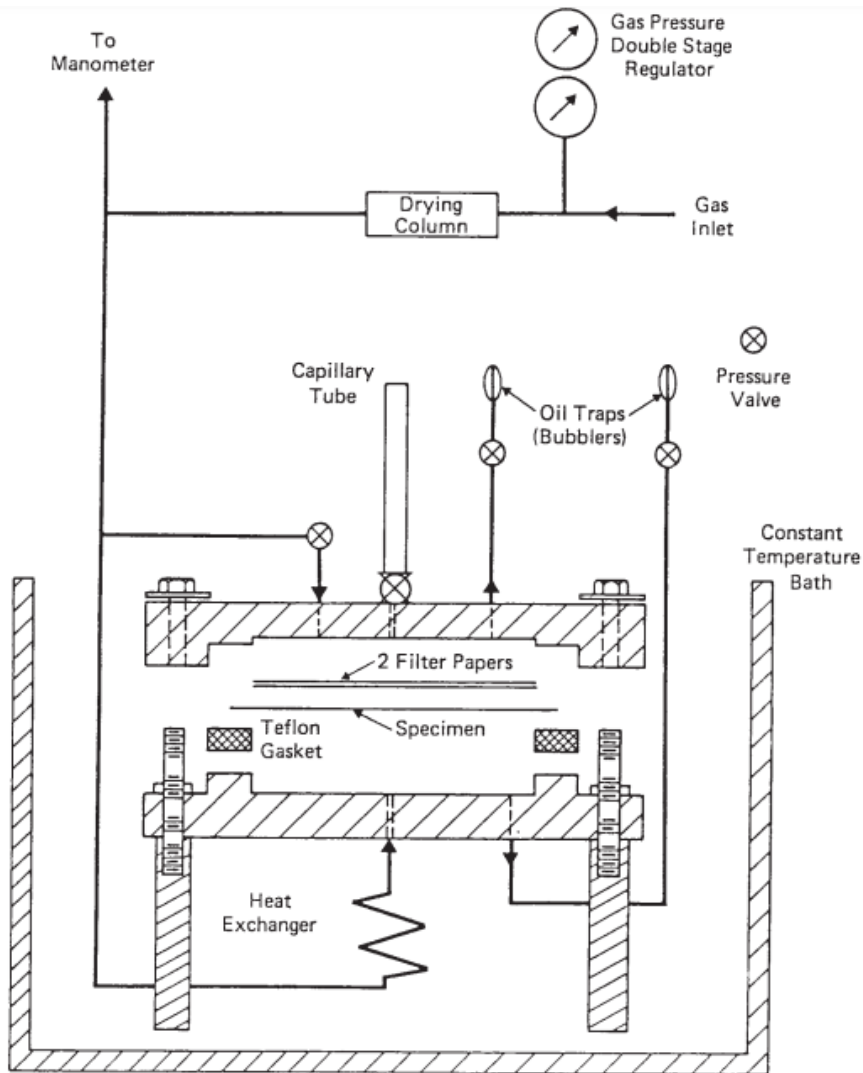


Figura 27 - *Setup* de permeabilidade completo, modelo volumétrico [72].

O *setup* da Figura 28 foi escolhido como ponto de partida para desenvolver o *setup* deste projeto. Este *setup* tem o mesmo princípio de funcionamento dos *setups* anteriormente apresentados. A amostra utilizada é colocada entre as duas câmaras utilizando um *o-ring* e uma junta de borracha para evitar fugas de gás e o gás é forçado a atravessar a amostra devido a diferença de pressão das duas câmaras. A grande diferença entre o *setup* demonstrado na Figura 28 e o demonstrado na Figura 27, é que a variável medida é a pressão do gás e não o volume. Assim sendo, em vez da utilização de um tubo capilar, é utilizado um transdutor de pressão em cada câmara, na câmara superior com o objetivo de determinar a pressão a que o gás é forçado a atravessar a amostra e na câmara inferior para registar o aumento de pressão na câmara inferior e assim é possível determinar a permeabilidade com auxílio da expressão da lei dos gases ideais.

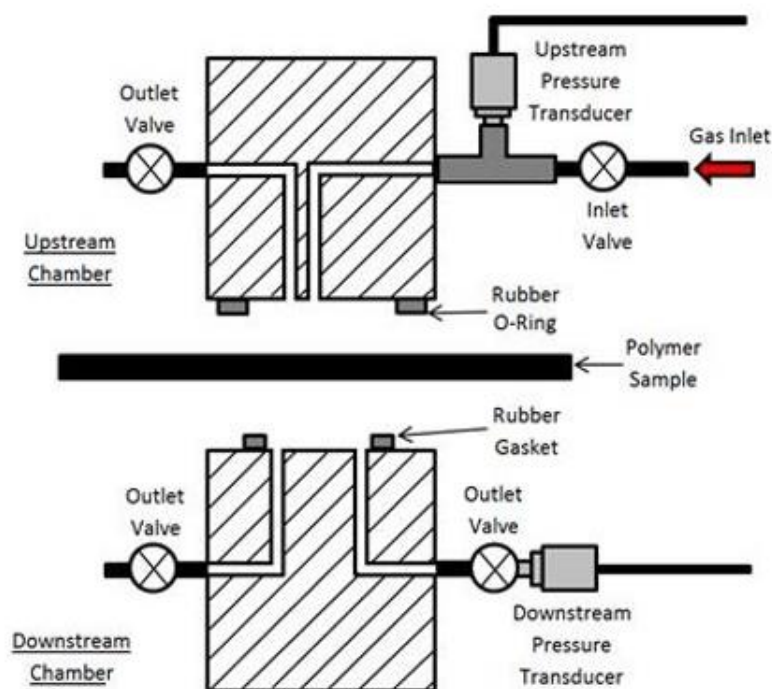


Figura 28 - Setup que regista a variação de pressão [67].

### 3.4.2 Designs alternativos para o setup de permeabilidade

Neste subcapítulo irão ser apresentadas algumas alternativas que foram ponderadas no início da criação deste setup de permeabilidade. Os sistemas em que surgiram alternativas foram no sistema de aperto e no sistema de vedação.

#### 3.4.2.1 Sistema de aperto

Para criar a pressão necessária sobre a amostra, é promovido o contacto e criação de pressão entre as duas câmaras do setup por ligação aparafusada do tipo porca/parafuso. No entanto, foram ponderadas várias alternativas em relação ao número de parafusos e respetivo posicionamento. As alternativas que surgiram foram as seguintes:

##### **Modelo com 6 parafusos**

Este modelo foi ponderado com o objetivo de distribuir uniformemente a pressão sobre a amostra exercida pelos parafusos. Na Figura 29 pode-se ver a distribuição dos parafusos e o formato redondo da amostra.

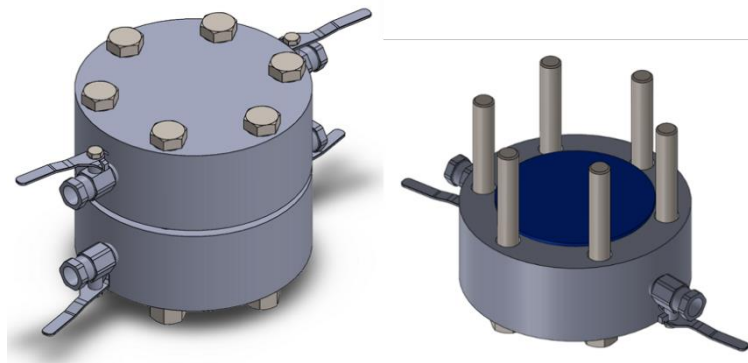


Figura 29 - Modelo com 6 parafusos.

### Modelo com 4 parafusos

Este modelo foi criado porque o modelo de 6 parafusos não permite utilizar amostras quadradas. Como se pode visualizar na Figura 29, se for utilizado o modelo de 6 parafusos, a amostra terá de ser cortada de forma circular, caso contrário, iria interferir com os parafusos. De facto, cortar uma amostra de um material composto em forma de um círculo é bastante mais complexo do que cortar em forma de um quadrado, pelo que este modelo com 4 parafusos permite simplificar o processo de preparação da amostra. Neste modelo, é possível colocar o meio da aresta alinhada com o parafuso e assim não há interferência da amostra com os parafusos. Na Figura 30 pode-se observar o posicionamento da amostra em relação aos parafusos.

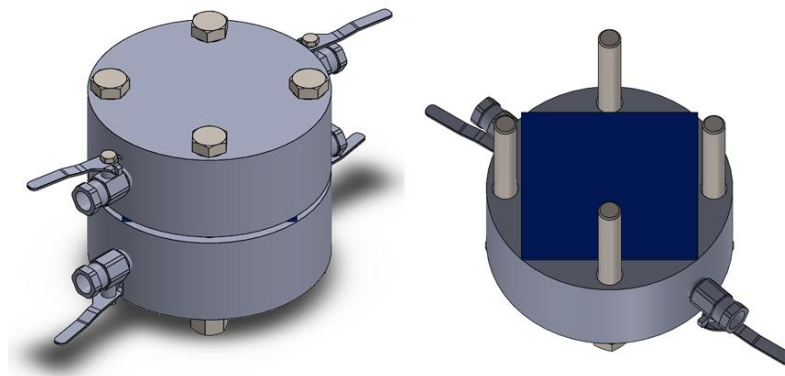


Figura 30 - Modelo com 4 parafusos.

### Modelo sem parafusos no bloco principal

Neste modelo foram utilizadas duas chapas mais largas que os blocos principais para promover o fecho e criação de pressão entre as duas câmaras do *setup*. Como se pode ver na Figura 31, este modelo utilizar 6 parafusos com o objetivo de distribuir uniformemente a pressão exercida na amostra e a amostra pode manter o formato de um quadrado.

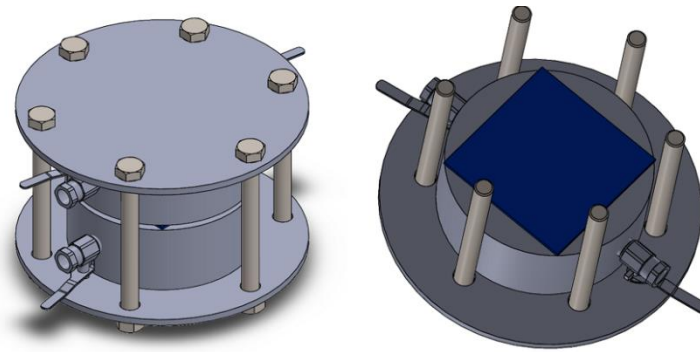


Figura 31 - Modelo sem parafusos no bloco principal.

### 3.4.2.2 Sistema de vedação

O sistema de vedação do dispositivo carece também de uma análise detalhada no sentido de definir alternativas para impedir que o *setup* tenha fugas. As alternativas ponderadas foram as seguintes:

#### **Modelo com dois *o-rings* do mesmo diâmetro**

Este modelo tem o objetivo de vedar o hélio da forma mais simples. Como se observa na Figura 32, os *o-rings* têm o mesmo alinhamento em relação à amostra (representada a azul).



Figura 32 - Dois *o-rings* do mesmo diâmetro.

#### **Modelo com dois *o-rings* com diâmetros diferentes**

Esta alternativa foi ponderada com o objetivo de assegurar que todo o gás permeado pela amostra, seja registado pelo tradutor na segunda câmara, ou seja, a área de contacto da amostra com o gás na câmara superior é menor que a área de contacto da amostra com o gás na câmara inferior para que todo o gás que entra na amostra através da câmara de cima, consiga atingir a câmara de baixo com mais facilidade. Outra razão pela escolha deste modelo foi para estabilizar a posição da amostra. Visto que a borracha é um material que se deforma facilmente, esta alternativa foi bastante importante para manter a amostra na posição horizontal. Como os *o-rings* têm diferentes diâmetros de perímetro, como está demonstrado na Figura 33, é mais fácil a amostra manter-se na posição horizontal.



Figura 33 - Dois *o-rings* com diâmetros diferentes.

### Modelo com um *o-ring* e uma junta de vedação

A alternativa de utilizar uma junta de vedação tem como objetivo aumentar a área de contacto com a amostra de forma a tornar a força aplicada mais distribuída pelo menos em um dos lados da amostra. Como se observa na Figura 34, o lado inferior da amostra sofre menos pressão pois a área de contacto é superior. Apesar dos diâmetros do perímetro serem diferentes, a diferença é mínima para evitar a flexão da amostra.



Figura 34 - Um *o-rings* e uma junta de vedação com diâmetros diferentes.

#### 3.4.2.3 Vantagens e desvantagens de cada modelo

De forma a resumir as vantagens e as desvantagens de cada modelo, na Tabela 12 são apresentadas de forma resumida as razões pelas quais estes modelos foram ponderados e as desvantagens de cada modelo.

Tabela 12 - Vantagens e desvantagens de cada modelo.

Sistema	Modelo	Vantagens	Desvantagens
	Modelo com 6 parafusos	Pressão mais uniforme na amostra	Só permite o formato circular ou hexagonal da amostra
Sistema de aperto	Modelo com 4 parafusos	Permite o formato quadrado da amostra	Pressão menos uniforme sobre a amostra
	Modelo sem parafusos no bloco principal	Permite o formato quadrado e a pressão uniforme	Sistema muito complexo e mais componentes

	Modelo com dois <i>o-rings</i> do mesmo diâmetro	Bastante simples	Instabilidade da posição horizontal, pressão sobre a amostra não distribuída
Sistema de vedação	Modelo com dois <i>o-rings</i> com diâmetros diferentes	Permite que todo o fluxo de gás permeado seja registado na segunda câmara e permite a estabilidade da posição horizontal.	Possibilidade de haver flexão da amostra após aperto das câmaras e a pressão sobre a amostra não é distribuída
	Modelo com um <i>o-ring</i> e uma junta de vedação	Permite que todo o fluxo de gás permeado seja registado na segunda câmara, permite a estabilidade da posição horizontal e a pressão sobre a amostra é mais distribuída	Possibilidade de haver flexão da amostra após aperto das câmaras e o sistema é mais complexo

### 3.4.3 Seleção do *setup* para ensaio de permeabilidade

O *setup* escolhido para os ensaios de permeabilidade encontra-se representado na Figura 35. A escolha deste *setup* foi ponderada tendo em conta a facilidade de aquisição dos componentes, o rigor dos ensaios e os custos que o projeto terá. Foi decidido que a variável a controlar deve ser a pressão a que se encontram as câmaras, conducente à variação da pressão entre as mesmas. A escolha deste método para determinar a permeabilidade deve-se ao facto de a medição da variação de pressão com transdutores de pressão ser mais rigorosa do que a medição do volume através de um tubo capilar. Este método também é vantajoso em relação ao método que recorre a um detetor de fuga de hélio visto que, neste último caso, a compra ou o aluguer do equipamento associado se tornariam muito dispendiosos. A opção tomada em relação ao sistema de aperto consistiu no modelo que utiliza 4 parafusos. A grande desvantagem aparente deste modelo é a pressão aplicada sobre a amostra não ser

distribuída. No entanto, visto que as câmaras são construídas em aço, a pressão irá ficar distribuída de forma relativamente uniforme, mesmo com apenas 4 parafusos, ao mesmo tempo garantindo a reduzida deformabilidade do *setup*. Uma vez que se aderiu ao modelo de 4 parafusos, a amostra necessita de ser quadrada para facilitar a criação de provetes para fazer os ensaios. Em contacto com esta amostra considera-se a existência de um *o-ring* na face superior e uma junta de vedação na face inferior. Estes dois componentes devem apresentar diferentes diâmetros, de forma a que todo o gás seja permeado. O *o-ring* deve ter o diâmetro do perímetro menor, enquanto a junta de vedação terá o diâmetro de perímetro maior, de forma a que todo o gás que entre amostra pela câmara superior seja medido quando sair pela câmara inferior. Apesar da diferença de diâmetros de perímetros entre o *o-ring* e a junta de vedação, a flexão da amostra é minimizada devido ao facto de esta diferença ser bastante reduzida.

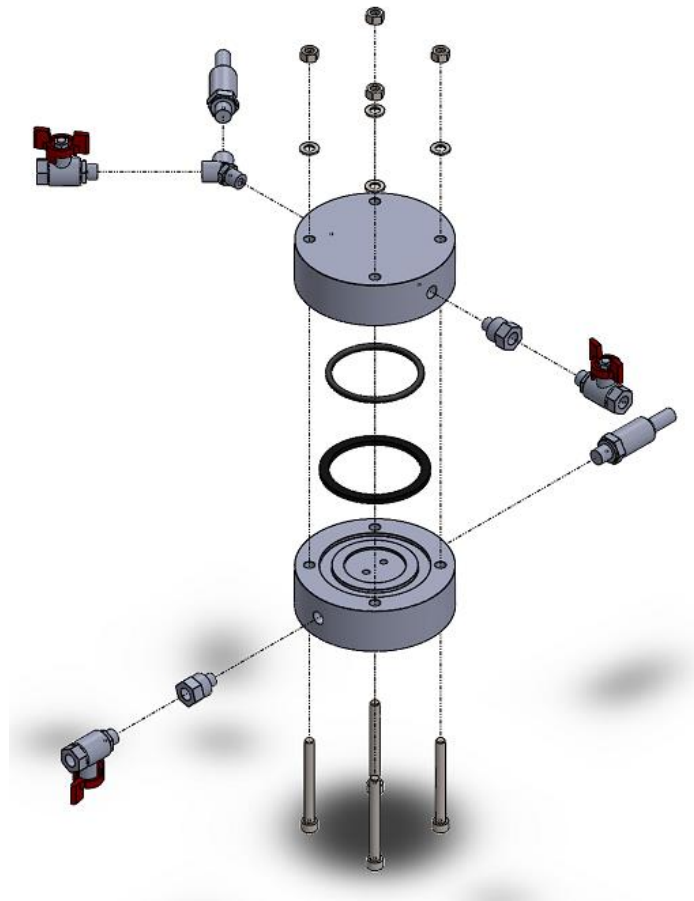


Figura 35 - Vista explodida do *setup* escolhido.

Outra característica necessária era a base ser plana de forma a apoiar o *setup* numa superfície. Como se pode observar na Figura 36, foram criadas caixas para as cabeças dos parafusos de cabeça cilíndrica, de forma que a base ficasse plana.

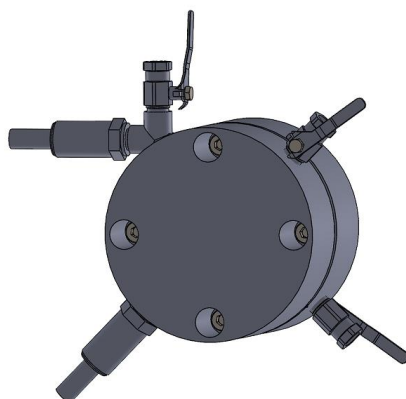


Figura 36 - Setup escolhido.

### 3.4.4 Equipamentos necessários

Neste projeto são utilizados um *o-ring* e uma junta de vedação para vedar o *setup* e evitar fugas de gás. Na Tabela 13 são apresentadas algumas características destes componentes, assim como os fabricantes escolhidos.




Tabela 13 - Componentes responsáveis pela vedação.


Componente	Imagem	Fabricante	Características
<i>O-ring</i>		Vedantes do Porto	Diâmetro do perímetro interior – 70 mm Diâmetro de secção – 5 mm
Junta de vedação		Plastiborracha	Referência – ANDV09000/12 Diâmetro do perímetro interior – 75 mm Diâmetro do perímetro exterior – 90 mm Espessura – 4 mm

Os componentes que serão conectados à câmara são as duas válvulas de saída, uma em cada câmara, para controlar a saída do gás quando concluído o ensaio, e um “Y” de derivação, devido à necessidade de conectar uma válvula de entrada, para controlar a entrada de gás na câmara superior, e um transdutor de pressão de 16 bar (Ashcroft KM11; anexo 6.1), para verificar a pressão a que o gás se encontra na câmara superior. A pressão da câmara não deve exceder os 10 bar, pelo que foi escolhido o transdutor

apresentado, pois este apresenta a pressão máxima mais próxima por excesso dos 10 bar. Na câmara inferior também é conectado um tradutor de pressão de 2,5 bar (Ashcroft KX1; anexo 6.2), que regista a pressão a que o gás que atravessou a amostra se encontra. Uma vez que os transdutores com menor alcance são mais sensíveis à pressão, e como a câmara inferior nunca atinge a pressão colocada na superior câmara, foi escolhido um transdutor com menor alcance para ter maior precisão. Entre as válvulas e as câmaras, são colocados espaçadores para evitar que as válvulas interfiram com as câmaras durante a abertura ou fecho do *setup*. Para se visualizar os dados retirados pelos transdutores, é necessário um registador de dados. Os transdutores de pressão necessitam de energia elétrica de baixa tensão, por isso também é necessária uma fonte de alimentação. A Tabela 14 identifica estes componentes e apresenta os fabricantes solicitados.

Tabela 14 - Componentes responsáveis pela regulação e medição do hélio.

Componente	Imagem	Fabricante	Características
Válvulas esféricas		RS	Tipo de conexão – roscado, 1/4 de polegada Material do corpo – Latão Pressão máxima – 40 bar
Elementos Y		Leroy Merlin	Material do corpo – Latão Tipo de conexão – roscado, 1/4 de polegada Pressão máxima – 16 bar
Espaçador		Leroy Merlin	DEXTER F 1/4 - M 1/4 Material do corpo – Latão Pressão máxima – 16 bar
Transdutor de 16 bar		Ashcroft	Alcance máximo – 16 bar Precisão – 0,50% Tipo de rosca - G 1/4 de polegada Sinal de saída - 42 (4-20 mA (2wire)) Ligação elétrica – Cabo integrado

Transdutor de 2,5 bar		Ashcroft	<p>Alcance máximo – 2,5 bar</p> <p>Precisão – 0,50%</p> <p>Tipo de rosca - G 1/4 de polegada</p> <p>Sinal de saída - 42 (4-20 mA (2wire))</p> <p>Ligação elétrica – Hirschman EN 175301-803 Forma C</p>
Registrador de dados portátil de 8 canais		Omega	<p>Solução tudo-em-um que não requer um PC</p> <p>Tela sensível ao toque de 5 polegadas com display colorido</p> <p>8 canais de entrada medem simultaneamente corrente, tensão, temperatura e pulso</p> <p>Os dados em tempo real são gerados automaticamente em gráficos para análise imediata</p>
Fonte de alimentação		aquário eletrônica	<p>Voltagem de saída: 24 Volts <math>\pm</math> 1%</p> <p>Corrente de saída: 0,0~4,25 A</p>

O fluido utilizado neste *setup* é o hélio e por isso uma garrafa de hélio comprimido é um componente essencial. De forma que a que o ar atmosférico não interfira com o hélio, é utilizado uma máquina de vácuo emprestada pela empresa que está a desenvolver este projeto, o INEGI. Para conduzir o gás desde a garrafa até ao *setup*, são usadas mangueiras com diâmetro de perímetro externo de 6 mm. Como tal é necessário o uso de conectores, que garantam a fixação entre a mangueira de um lado, e que sejam roscados do outro lado para fixação ao equipamento. Estes três componentes são responsáveis pelo fornecimento de hélio ao *setup* e estão apresentados na Tabela 15, assim como o fabricante de cada componente.

Tabela 15 - Componentes responsáveis pelo transporte do hélio.

Componente	Imagem	Fabricante	Características
Máquina de vácuo		INEGI	Pressão mínima – 0,99 bar Potência – 1,5 kW
Garrafa de hélio		Linde	Designação Hélio Balão – 3,6 m <sup>3</sup> Capacidade geométrica: 20 litros Pressão da garrafa – 300 bar
Conector de mangueira		RS	Série do fabricante – QS Material do corpo – Latão Tipo de conexão – roscado, 1/4 de polegada e ligação rápida a mangueira de 6 mm Pressão máxima – 14 bar

### 3.4.5 Cálculos preliminares

Os cálculos deste estudo basearam-se na lei dos gases ideais [66], como está descrita na equação (1),

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T. \quad (1)$$

p – Pressão (Pa);

V – Volume (m<sup>3</sup>);

n – Número de mol do gás (mol);

R – Contante universal dos gases (Pa.m<sup>3</sup>.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>);

T – Temperatura (K).

Com base na equação (1), pode-se obter a relação da pressão, do volume e da temperatura entre dois pontos através da equação (2),

$$\frac{p_a \cdot V_a}{T_a} = \frac{p_b \cdot V_b}{T_b}. \quad (2)$$

$p_a$  – Pressão inicial;  
 $V_a$  – Volume inicial;  
 $T_a$  – Temperatura inicial;  
 $P_b$  – Pressão final;  
 $V_b$  – Volume final;  
 $T_b$  – Temperatura final.

Para o cálculo da permeabilidade são definidos 2 pontos do gráfico registado pelo transdutor de pressão que regista a pressão da câmara inferior do *setup*.

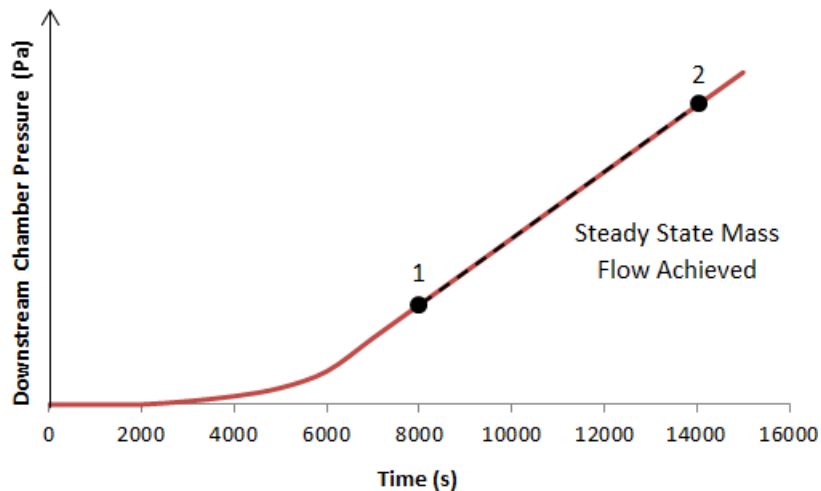


Figura 37 - Gráfico da pressão que permite determinar a permeabilidade [67].

Os dois pontos são retirados da reta do gráfico (similar à Figura 37), pois esta reta simboliza que o ensaio está na fase constante. Após definir os valores da pressão,  $p_1$  e  $p_2$ , é necessário utilizar as temperaturas correspondentes,  $T_1$  e  $T_2$ , assim como o volume interno da câmara,  $V$ . O valor de referência da pressão,  $p_{ref}$ , é 100 kPa e o valor de referência da temperatura,  $T_{ref}$ , é 273,15 K.

Assim sendo, usando a expressão (3), é possível determinar o volume equivalente nas condições padrão,

$$V_1 = \frac{p_1 V T_{ref}}{p_{ref} T_1}. \quad (3)$$

Após calcular  $V_1$ , calcula-se o caudal mássico, assumindo que  $V_1$  é o volume inicial. Assim sendo, repete-se o mesmo processo de calcular o volume a partir da pressão para o segundo ponto, calculando assim  $V_2$ ,

$$V_2 = \frac{p_2 V T_{ref}}{p_{ref} T_2}. \quad (4)$$

De seguida retira-se o volume do primeiro ponto ao volume do segundo ponto e determina-se o aumento volumétrico,  $\Delta V$ ,

$$\Delta V = V_2 - V_1. \quad (5)$$

Após calculado  $\Delta V$ , divide-se o aumento volúmico pelo tempo entre os dois pontos,  $t$ , e pela área da amostra onde ocorreu a permeação,  $A$ , o que permite obter rácio de transmissão do gás, RTG,

$$RTG = \frac{\Delta V}{t \cdot A}. \quad (6)$$

Por último, para calcular a permeabilidade da amostra,  $P$ , divide-se o rácio de transmissão do gás pela diferença da pressão entre as duas câmaras,  $p_{C.cima} - p_{C.baixo}$ , e multiplica-se pela espessura da amostra,  $x$ ,

$$P = \frac{RTG}{p_{C.cima} - p_{C.baixo}} \times x. \quad (7)$$

#### 3.4.6 Detalhes construtivos do setup

Neste capítulo, são apresentados alguns detalhes dos componentes que não são normalizados, nomeadamente a câmara superior e a câmara inferior, e que por isso devem ser fabricados por maquinagem. A câmara superior tem um formato de cilindro e tem quatro furos, como se pode visualizar na Figura 38, que permitem que os parafusos CHC ISO 4762 M8x80 atravessem o componente e promovam a pressão entre as duas câmaras, uma contra a outra, através da ligação aparafusada do tipo porca/parafuso.

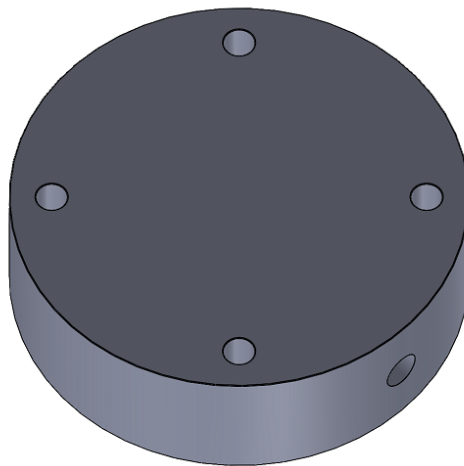


Figura 38 - Vista da parte exterior da câmara superior.

Uma das faces da câmara superior fica plana, como se observa na Figura 38, enquanto na outra face é feito um rebaixo com geometria circular, como está perceptível na Figura 39, de forma a criar uma pequena câmara para facilitar os cálculos à posteriori. De seguida, é criada uma ranhura para alojar um *o-ring*, que é responsável por impedir as fugas de gás. A ranhura foi selecionada a partir do catálogo da Anyseals que se encontra no anexo 6.3.

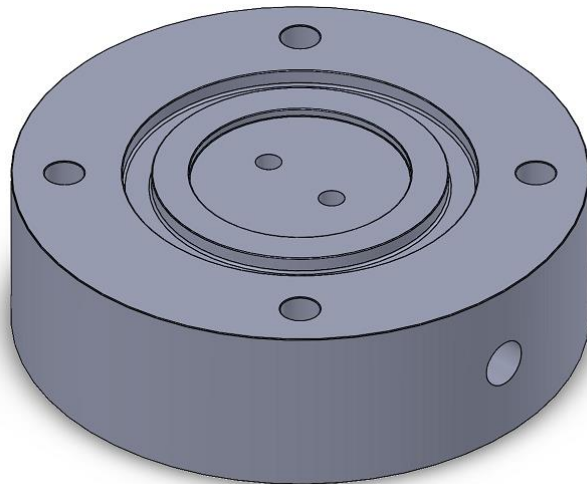


Figura 39 - Vista da parte interior da câmara superior.

Concluída a ranhura, são feitos dois canais dentro do cilindro, um para conduzir a entrada de gás e o outro para conduzir a saída de gás e funcionar como uma purga. Na Figura 40 pode-se observar os canais feitos entre a face feita pelo rebaixo e a face lateral do cilindro. Na extremidade lateral dos canais, são criadas duas roscas de 1/4 de polegada para se colocar uma válvula de forma a controlar a entrada e a saída de gás.

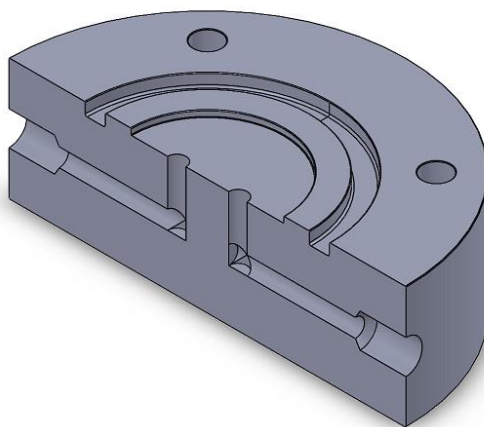


Figura 40 - Vista dos canais da câmara superior.

A câmara inferior é muito semelhante à câmara superior, na medida em que é um bloco de aço em formato cilíndrico e tem quatro furos passantes nas mesmas posições dos furos da câmara superior, como está demonstrado na Figura 41.

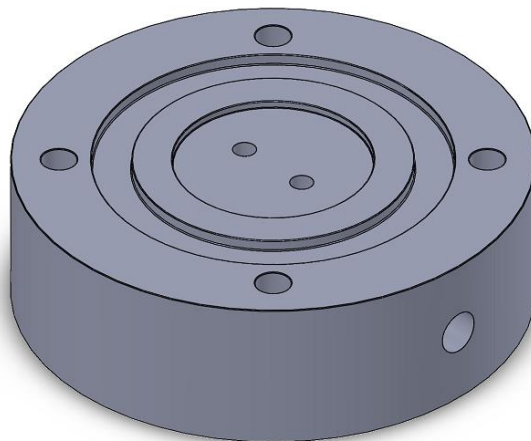


Figura 41 - Vista da parte interior da câmara inferior.

À semelhança da câmara superior, a câmara inferior também tem um pequeno rebaixo numa das faces, como representado na Figura 41, com o objetivo de criar um pequeno espaço vazio entre a amostra e a câmara e impedir que a amostra obstrua a saída de gás, no caso de esta fletir. A câmara inferior também possui uma ranhura, como se pode visualizar na Figura 41. No entanto, esta tem como função alojar uma junta de vedação com uma função semelhante à do *o-ring* da câmara superior, ou seja, vedar e evitar fugas de gás. A grande diferença entre estas duas câmaras é a caixa para os parafusos de cabeça cilíndrica na câmara inferior. Este pormenor foi colocado com o objetivo de o *setup* manter uma superfície plana depois de ser montado. Para tal, colocaram-se caixas para os parafusos conforme representado na Figura 42, de forma a que os parafusos fiquem embebidos na câmara inferior.

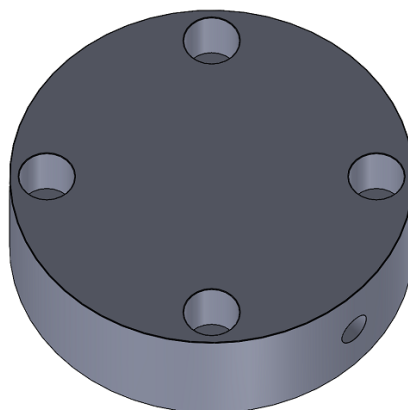


Figura 42 - Vista da parte exterior da câmara inferior.

### 3.4.7 Análise por MEF

Neste projeto existem dois componentes principais, a câmara superior e a câmara inferior do *setup*, que não são normalizados, e como são adquiridos externamente a uma empresa de serviços de maquinagem. Assim sendo, realizou-se uma simulação no SolidWorks para prever os campos de tensão e deformação, bem como identificar as zonas mais solicitadas e aferir o bom funcionamento em serviço.

Primeiramente, determinou-se qual o momento mais crítico para as câmaras e considerou-se que a situação mais crítica era durante o ensaio, no momento em que o gás era pressionado para atravessar a amostra. Após conclusão da situação crítica, determinou-se que a câmara superior estaria em condições mais adversas do que a câmara inferior pois teria de suportar uma pressão de 10 bar, enquanto a câmara inferior apenas suportaria a pressão exercida pelo hélio que atravessou a amostra, que nunca seria superior ou igual a 10 bar. Assim sendo, a simulação no SolidWorks que foi realizada é do tipo estática linear e o componente analisado foi a câmara superior. A Figura 43 demonstra a câmara superior, o componente que será analisado.

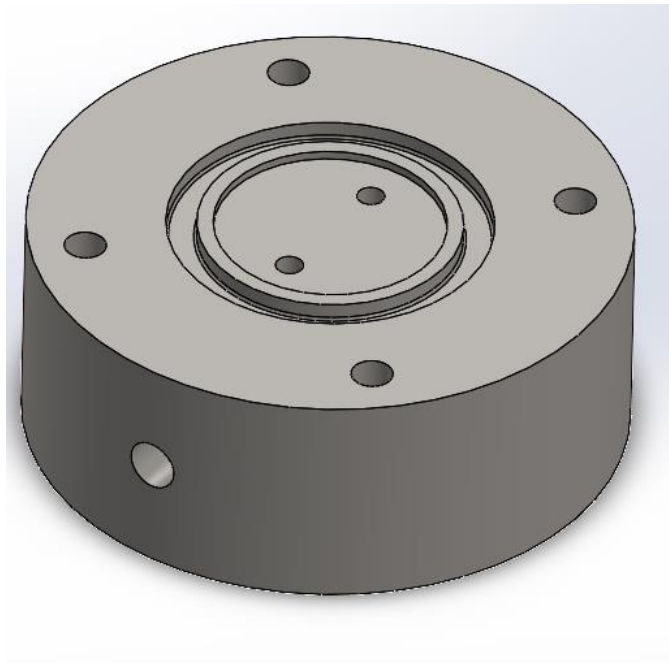


Figura 43 - Componente para análise.

O material utilizado para fabricar este componente é o aço, AISI 1020, e as respetivas propriedades encontram-se demonstradas na Tabela 16.

Tabela 16 - Propriedades do aço AISI 1020.

Property	Value	Units
Elastic Modulus	2e+11	N/m <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.29	N/A
Shear Modulus	7.7e+10	N/m <sup>2</sup>
Mass Density	7900	kg/m <sup>3</sup>
Tensile Strength	420507000	N/m <sup>2</sup>
Compressive Strength		N/m <sup>2</sup>
Yield Strength	351571000	N/m <sup>2</sup>
Thermal Expansion Coefficient	1.5e-05	/K
Thermal Conductivity	47	W/(m·K)
Specific Heat	420	J/(kg·K)
Material Damping Ratio		N/A

Escolhido o componente que vai ser analisado, foram definidas as condições fronteira. Os pontos que se mantêm fixos durante todo o processo consistem na área de contacto entre as anilhas e a superfície superior da câmara, como se pode visualizar na Figura 44. Estas condições fronteira foram consideradas encastradas pois a ligação parafuso/porca impede o movimento em qualquer direção entre as anilhas e a câmara.

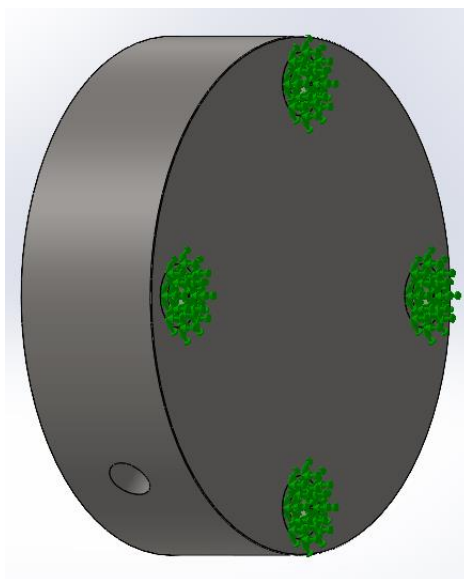


Figura 44 - Aplicação das condições fronteira.

Para simular a pressão exercida pelo gás hélio sobre a câmara, é definida uma carga distribuída sobre a câmara, como se representa na Figura 45. A carga apresentada a vermelho na Figura 45 tem valor de 10 bar e é aplicada em todas as faces que se encontram do lado interior do *o-ring* e nos furos que guiam o gás, desde a saída da mangueira até à amostra.

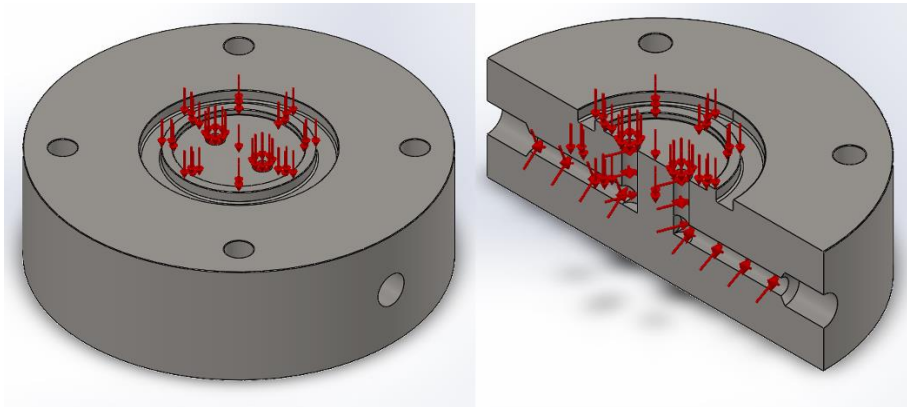


Figura 45 - Esforço definido para a simulação.

De seguida foi considerada a força que os parafusos exerciam nas câmaras com o objetivo de determinar a força que o *o-ring* exerce sobre a câmara. O tipo de parafuso utilizado é CHC ISO 4762 M8x80 - 8.8. e foram apertados utilizando um momento torsor de 1 N.m. De forma a calcular a força tração exercida por cada parafuso,  $F$ , utilizando o momento torsor aplicado a cada parafuso,  $T$ , o diâmetro da rosca dos parafusos,  $D$ , e o fator de momento torsor,  $K$ , foi aplicada a expressão (8). O fator  $K$  é influenciado pela existência ou não de lubrificação no parafuso. Se for utilizado lubrificante, o valor do fator  $K$  é 0,15, enquanto no caso de não ser utilizado lubrificante, que é o caso deste ensaio, o valor do fator  $K$  é 0,20 [73],

$$T = D \times K \times F \quad (8)$$

$$1 = 0,008 \times 0,20 \times F \leftrightarrow F = 625N .$$

Visto que são utilizados 4 parafusos, é necessário multiplicar a força por quatro, para obter a força total exercida pelos parafusos,  $F_{\text{Parafusos}}$ ,

$$F_{\text{Parafusos}} = 4 \times F \quad (9)$$

$$F_{\text{Parafusos}} = 4 \times 625 = 2500N .$$

A força que o *o-ring* aplica na câmara é dada pela força de compressão exercida pelos parafusos,  $F_{\text{parafusos}}$ , subtraída da força criada pela pressão do gás hélio,  $F_{\text{Hélio}}$ ,

$$F_{\text{o-ring}} = F_{\text{Parafusos}} - F_{\text{Hélio}} . \quad (10)$$

A força que o hélio exerce na câmara pode ser calculada a partir da pressão a que o gás se encontra dentro da câmara ( $10^6 \text{ N/m}^2$ ) e da área de aplicação da mesma, retirada do SolidWorks ( $876,16 \text{ mm}^2$ ).

Assim sendo, a expressão (11) permite calcular a força que o hélio exerce na câmara superior,

$$F_{\text{Hélio}} = p \times A \quad (11)$$

$$F_{\text{Hélio}} = 10^6 \times 876,16 \times 10^{-6} = 876,16 \text{ N} .$$

Após calculada a força que o hélio exerce, calcula-se a força que o *o-ring* faz, utilizando a expressão (10),

$$F_{\text{o-ring}} = 2500 - 876,16 = 1623,84 \text{ N} .$$

O contacto que o *o-ring* faz com a câmara está representada com setas roxas na Figura 46. Esta força é aplicada sobre a ranhura em que o *o-ring* se encontra e apresenta uma magnitude de 1623,84 N.

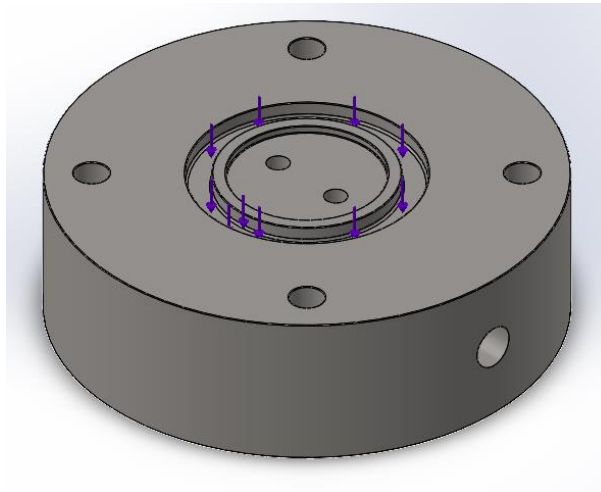


Figura 46 - Contacto com o *o-ring*.

Após concluídas as restrições sobre o componente, definiu-se a malha que será utilizada na simulação. Os elementos utilizados na malha são triângulos e os parâmetros e a malha encontram-se representados na Figura 47 e na Figura 48, respetivamente.

Mesh Details	
Study name	Static 1 (-Default-)
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Curvature-based mesh
Jacobian points for High quality mesh	16 points
Max Element Size	8 mm
Min Element Size	1,6 mm
Mesh quality	High
Total nodes	184732
Total elements	124791

Figura 47 - Parâmetros utilizados na malha.

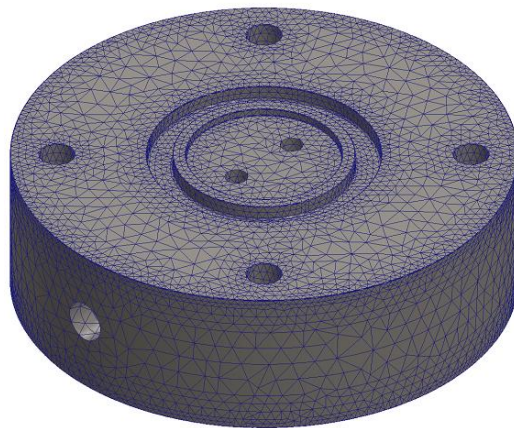


Figura 48 - Aspeto da malha na câmara superior.

Após concluída a definição da malha, foi realizada a simulação no SolidWorks. Na Figura 49 estão representadas as tensões de von Mises na câmara superior, utilizando uma escala de 1:21438, sob ação das solicitações anteriormente descritas. Após uma análise à Figura 49, pode-se verificar que as tensões estão concentradas na superfície plana da câmara, no local onde se encontram as anilhas que fazem a pressão para fechar o *setup*.

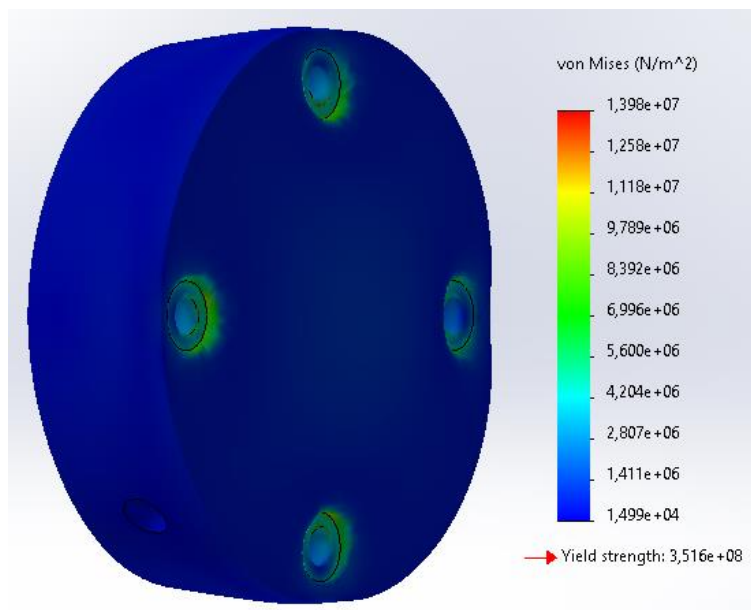


Figura 49 - Tensões de von Mises obtidas através da simulação.

Após saber a tensão máxima exercida na câmara, é possível calcular o coeficiente de segurança,  $c_s$ , através da equação (12) usando a tensão de cedência do aço,  $\sigma_{ced}$ , e a tensão máxima determinada pela simulação,  $\sigma_{máx}$ ,

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_{ced}}{CS} \Leftrightarrow CS = \frac{\sigma_{ced}}{\sigma_{\max}} \quad (12)$$

$$CS = \frac{351,6}{13,98} = 25,15.$$

O coeficiente de segurança mínimo é de 25,15, o que demonstra que a estrutura não cede sob as pressões utilizadas. Na Figura 50 é possível encontrar os deslocamentos resultantes na câmara superior, utilizando uma escala de 1:21438, quando sujeita aos esforços de serviço. Após uma análise da simulação de deslocamentos, verifica-se que o centro da peça é o local que apresenta maior deslocamento com a pressão aplicada.

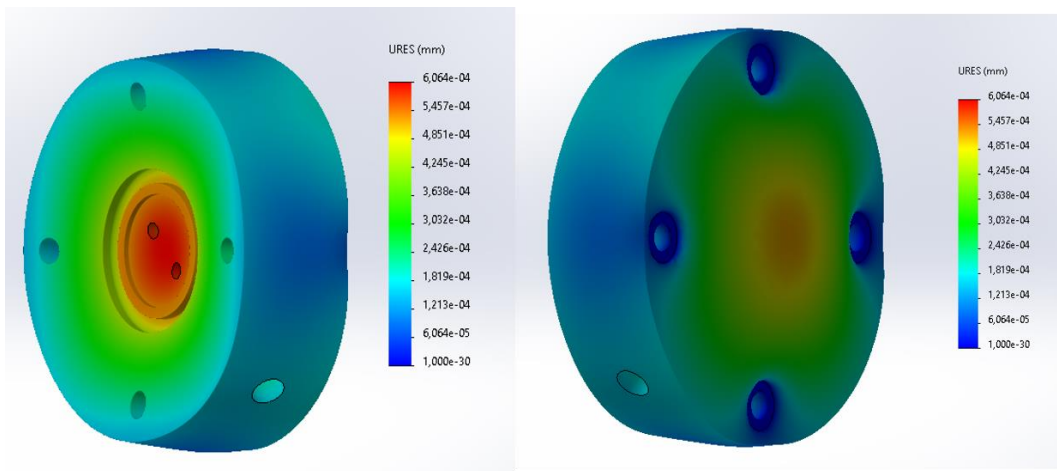


Figura 50 - Deslocamentos resultantes obtidos através da simulação.

O deslocamento máximo durante o ensaio foi  $6,064 \times 10^{-4}$  mm, o que demonstra que o deslocamento não é suficiente para que a câmara superior consiga interferir com os restantes componentes do *setup* nem prejudicar o ensaio.

### 3.5 Fabrico do *setup* para ensaio de permeabilidade

Durante a criação do *setup*, é necessário adquirir os componentes, verificar se as características dos mesmos são as desejadas e montar o *setup*, fixando todos os componentes conforme o desejado. Neste capítulo são apresentados todos os passos para a criação do *setup*, desde a aquisição dos componentes até a apresentação do *setup* final montado.

#### 3.5.1 Componentes adquiridos

Os componentes adquiridos para desenvolver este projeto foram adquiridos e cedidos pela entidade parceira deste estudo, o INEGI. Entre os componentes que foram cedidos utilizou-se a mangueira, o teflon, que ajuda a evitar fugas nas ligações

roscadas, e uma máquina de vácuo, essencial para retirar o ar atmosférico das câmaras, para que este não interfira com a passagem do hélio através da amostra. Os restantes componentes foram todos adquiridos a entidades externas. As válvulas, os espaçadores, os conectores de rosca e encaixe de mangueira, a ligação em Y, o *o-ring*, a junta de vedação, e o registador de dados foram de fácil acesso. Os componentes mais difíceis de adquirir foram as câmaras, porque foram fabricadas a partir dos desenhos desenvolvidos em conjunto com a equipa do INEGI, os transdutores, pois existe uma grande variedade, com diversas características e a garrafa de gás hélio comprimido com o regulador de pressão acoplado, porque a quantidade prevista de gás hélio a utilizar nos ensaios teria de ser calculada. Os desenhos detalhados das câmaras, a partir dos quais a entidade externa realizou os seus fabricos, encontram-se no anexo 6.4. Para criar estes componentes foi, primeiramente, utilizado um torno mecânico, com o objetivo de tornar a peça com o formato circular com o diâmetro pretendido, realizar os rasgos para colocar os vedantes e para criar os espaços vazios e para alisar as faces das câmaras com a rugosidade pretendida. De seguida foi utilizada uma CNC para realizar os furos nas peças, com o diâmetro predefinido nos desenhos.

### 3.5.2 Verificação dos componentes não normalizados

Os componentes não normalizados que foram adquiridos, foram as duas câmaras como é possível observar na Figura 51. No lado esquerdo encontra-se a câmara superior e do lado direito encontra-se a câmara inferior.



Figura 51 - Câmaras do setup.

Após receber os componentes, foi realizada uma comparação com os desenhos feitos em SolidWorks com o objetivo de ter a certeza se estariam todas as medidas de acordo com o pedido, e verificou-se se os restantes componentes encaixavam nas câmaras. Primeiro, verificou-se se as roscas das câmaras estavam compatíveis com as roscas dos componentes que iriam ligar à câmara. Como se pode ver na Figura 52, as roscas estão bem feitas, porque tanto a ligação em Y como os espaçadores e o transdutor de pressão de 2,5 bar encaixaram perfeitamente nas câmaras.



Figura 52 - Verificação da rosca das câmaras.

A segunda verificação foi relativa às ranhuras onde serão colocados o *o-ring* e a junta de vedação. Como é possível observar na Figura 53, as ranhuras estão feitas conforme o planeado, visto que o *o-ring* e a junta de vedação entram sem folgas.



Figura 53 - Verificação das ranhuras para o *o-ring* e a junta de vedação.

Em terceiro lugar testou-se a capacidade de aperto dos parafusos CHC ISO 4762 M8 x 80 entre as duas câmaras, e se não haveria nenhum furo mal posicionado. Na Figura 54 é possível concluir que os orifícios estão todos bem colocados, uma vez que os parafusos conseguem atravessar as câmaras e proporcionar a pressão desejada, conforme o previsto.



Figura 54 - Verificação do posicionamento dos parafusos.

Por último, pressurizaram-se as câmaras para verificar se não havia fugas de ar em nenhuma ligação entre a câmara e outro componente. Visto que a pressão registada pelos transdutores se manteve, após se desconectar do compressor, concluiu-se que as câmaras foram feitas conforme o projetado e garantem a estanquidade da zona pressurizada.

### 3.5.3 Sequência de montagem

Após a aquisição e verificação dos componentes, foi realizada a montagem do *setup*. Primeiro, ligou-se o conector em Y à válvula de entrada, como demostra a Figura 55.



Figura 55 - Ligação do conector Y à válvula de entrada.

Depois da junção do conector em forma de Y com a câmara, juntou-se o transdutor de pressão de 16 bar, como está demonstrado na Figura 56, que registará a pressão da entrada de gás na câmara.



Figura 56 - Ligação do transdutor de 16 bar ao conector Y.

Nas outras duas válvulas foram colocados espaçadores, de forma que a asa da válvula não entre em contacto com a câmara durante o ensaio, conforme está demonstrado na Figura 57.



Figura 57 - Ligação da válvula de saída ao espaçador.

De seguida, foi realizada a instalação elétrica dos transdutores. Ligou-se o transdutor a uma fonte elétrica e a um registador de dados, que irá receber os dados recebidos pelo transdutor, e criará um gráfico pressão-tempo durante todo o ensaio. Após concluída a instalação elétrica, foram colocados os conectores de mangueira, tanto na

válvula de entrada que irá receber o hélio, como no regulador de pressão que está acoplado na garrafa de hélio comprimido, conforme está demonstrado na Figura 58.



Figura 58 - Ligação do conector da mangueira à válvula de entrada.

Nas válvulas de saída é colocado um adaptador para ligar a máquina de vácuo, conforme mostra a Figura 59.



Figura 59 - Ligação da válvula de saída ao adaptador da máquina de vácuo.

Posteriormente, todos os conjuntos são acoplados nas câmaras, incluindo o conjunto da ligação em Y, a válvula com o espaçador e o transdutor de 2,5 bar. O conjunto da ligação em Y e uma válvula são colocadas na câmara superior, enquanto a outra válvula e o transdutor de 2,5 bar são colocados na câmara inferior. Em todas as ligações é utilizada uma rosca de 1/4 polegadas. Na Figura 60 é possível ver as câmaras com os componentes acoplados e as respetivas posições relativas.



Figura 60 - Ligação de todos os componentes às câmaras.

Seguidamente, colocou-se a mangueira no conector da mangueira, de forma que seja possível conduzir o gás hélio ao *setup*, como demonstra a Figura 61.



Figura 61 - Ligação da mangueira ao conector de mangueira.

Na Figura 62 é possível observar que o *o-ring* e a junta de vedação são montados nas câmaras, nas respetivas ranhuras.



Figura 62 - Posicionamento do *o-ring* e da junta de vedação.

Por último, coloca-se a amostra entre o *o-ring* e a junta de vedação e apertam-se os parafusos até estes começarem a fazer um pouco de pressão. Seguidamente começam-se a apertar todos os parafusos em forma de cruz para que a pressão seja uniforme em toda a área dos vedantes. O processo de apertar os parafusos é bastante simples, e consiste em dar duas voltas a um parafuso, seguido do mesmo procedimento para o parafuso que se encontra na diagonal, e assim sucessivamente. Desta forma, todos os parafusos irão criar uma pressão distribuída entre as câmaras, as borrachas e a amostra, visto que ao apertar os parafusos na diagonal e um pouco de cada vez garante-se que a pressão é aumentada uniformemente e progressivamente em todo o *setup*. Concluído este passo, o *setup* está pronto a ser utilizado. A amostra utilizada deve ser um quadrado com 95 mm de lado, como por exemplo a amostra representada na Figura 63.

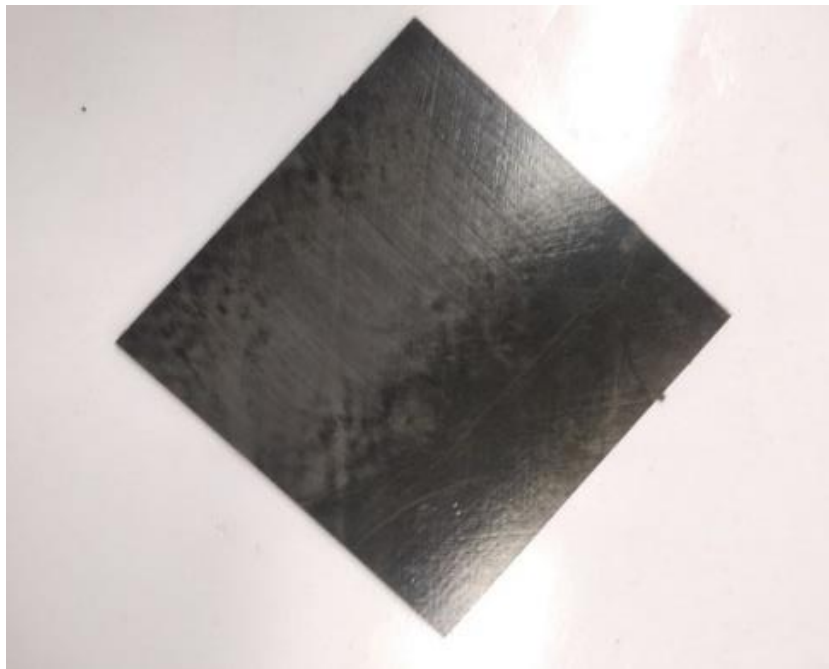


Figura 63 - Exemplo da amostra.

#### 3.5.4 *Setup* final

Após todos os componentes acomodados o *setup* está finalizado e pronto para ser utilizado em ensaios. Na Figura 64 pode-se observar o *setup* completo. Para ser possível fazer os ensaios, só é necessário colocar a amostra quadrada de 95 mm de lado, que será analisada, entre as câmaras, apertar os parafusos, ligar os transdutores de pressão à corrente e programar o registador de dados para gravar o ensaio.



Figura 64 - Setup finalizado.

### 3.6 Descrição e metodologia do ensaio

Para realizar o ensaio de permeabilidade, é necessário abrir todas as válvulas das câmaras para não criar nenhuma pressão dentro das câmaras durante o aperto dos parafusos e verificar se a válvula da saída de gás hélio da garrafa está fechada. De seguida, coloca-se a amostra entre os vedantes na mesma posição mostrada na Figura 65 e apertam-se os parafusos para que não haja fugas entre a amostra e as câmaras.

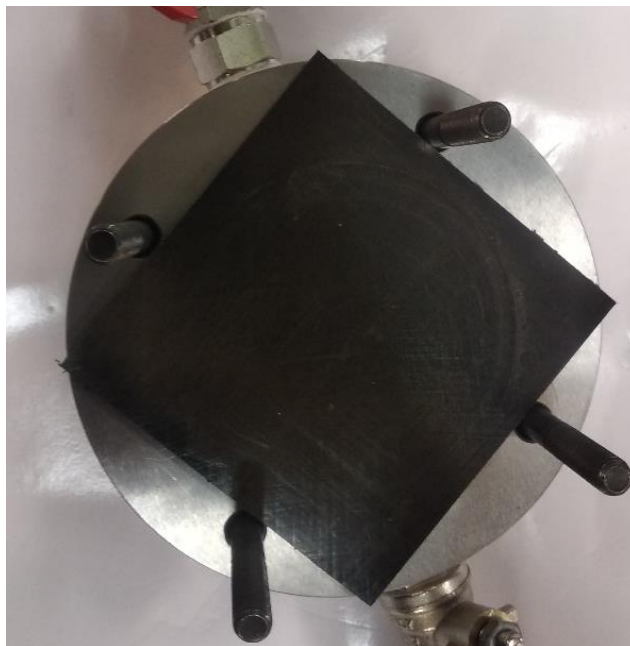


Figura 65 - Posição da amostra no setup.

De seguida, ligam-se os transdutores de pressão à corrente elétrica e liga-se o registador de dados para começar a fazer as leituras da pressão, neste caso a pressão atmosférica, como se pode ver na Figura 66.



Figura 66 - Valores do registador de dados antes do ensaio.

De seguida, abrem-se as válvulas de saída das câmaras e inicia-se o processo de retirar o ar atmosférico, usando a máquina de vácuo. Neste passo, grande parte do ar atmosférico é retirado de forma que este não interfira com o hélio durante o ensaio. Após se verificar no registador de dados que a pressão relativa nas câmaras está negativa, como está demonstrado na Figura 67, as válvulas de saída são fechadas. O valor deveria ser aproximadamente -1, no entanto os alcances negativos dos transdutores são limitados com os valores apresentados na Figura 67.

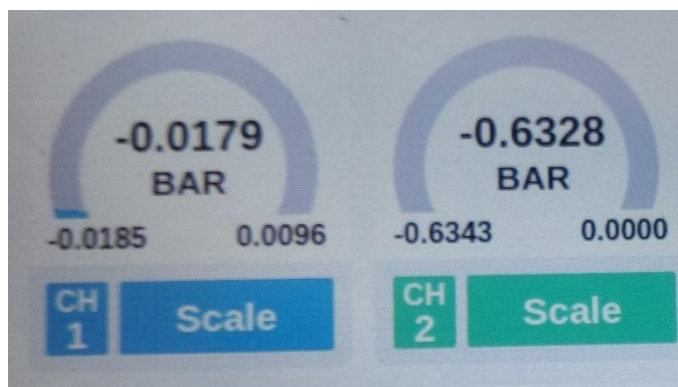


Figura 67 - Valores do registador de dados após realização do processo de vácuo nas câmaras

Ainda neste passo, deve-se verificar o registador de dados para ver se a pressão se mantém baixa, de forma a confirmar se a vedação está bem feita e se não há entrada de ar atmosférico para as câmaras através do *o-ring* ou da junta de vedação. De seguida, utiliza-se o regulador de pressão para debitar alta pressão e abre-se a saída de gás da garrafa de hélio comprimido. Após o hélio ter preenchido as tubagens, abre-se a válvula de entrada de gás da câmara superior e começa-se a realizar o ensaio. No início do ensaio a pressão medida pelos dos dois transdutores deve apresentar uma grande diferença, como demonstrado na Figura 68.



Figura 68 - Valores do registador de dados no início do ensaio.

Passado algum tempo, tempo esse que varia com o gás utilizado e o material da amostra, quando a subida da pressão da câmara inferior for constante, o ensaio está concluído. O tempo de ensaio pode ser alguns minutos, no caso de a amostra ser bastante permeável e o fluxo de gás que atravessa a amostra fique rapidamente constante, ou pode demorar horas, no caso da amostra ser muito pouco permeável e o fluxo de gás que atravessa a amostra demore a ficar constante. Concluído o ensaio, os dados registados pelo registador de dados são transferidos e utiliza-se o procedimento apresentado no capítulo 3.4.5 para calcular a permeabilidade. Por fim, deve-se fechar a garrafa de gás hélio, e abrir as válvulas de saída de gás das câmaras, bastante devagar de forma a diminuir a pressão de forma progressiva. Por último, desaperta-se os parafusos e retira-se a amostra, estando assim o *setup* preparado para o próximo ensaio. A amostra é guardada e pode voltar a ser utilizada uma vez o ensaio não é destrutivo e a amostra no final do ensaio é igual ao início.

### 3.7 Ensaios realizados

Os ensaios foram realizados após concluído o fabrico do *setup* e definido o procedimento que se iria utilizar durante os ensaios. Foram realizados três ensaios utilizando diferentes tipos de gases e diferentes tipos de amostra para tirar maior proveito do *setup*.

#### 3.7.1 Ensaio utilizando ar comprimido e compósito de fibra de carbono com PA6

Uma vez que ainda não se tinha realizado nenhum ensaio utilizando este *setup*, optou-se por utilizar ar comprimido no primeiro ensaio, em vez do hélio, para o caso hipotético de haver fugas durante o ensaio, não seria desperdiçado gás hélio. Assim sendo, optou-se por usar o gás hélio apenas para o ensaio final, quando se tiver a certeza de que o *setup* está totalmente operacional de forma a evitar quaisquer desperdícios desnecessários. O procedimento e a metodologia foram muito semelhantes à descrita anteriormente. No entanto, não foi utilizada a garrafa de hélio,

nem a máquina de vácuo. Visto que a utilização da máquina de vácuo serviria para não haver interferência entre o ar atmosférico e o hélio, a sua utilização não foi necessária nestes primeiros ensaios.

Durante o primeiro ensaio, foi utilizada a amostra escolhida para o ensaio previsto, ou seja, uma amostra de PA6 reforçada com fibras de carbono unidirecional sobrepostas utilizando a sequência 0°/90°. Após concluir os ensaios, os dados recolhidos pelo registador de dados foram analisados a fim de obter uma tabela. A medição registada pelo registador de dados pode ser consultada no anexo 6.5.1. A partir da tabela registada pelo transdutor de pressão das duas câmaras foi criado um gráfico de pressão/tempo conforme é possível visualizar na Figura 69 e na Figura 70, que demonstra como varia a pressão relativa e a pressão absoluta, respetivamente, nas duas câmaras ao longo do primeiro ensaio.

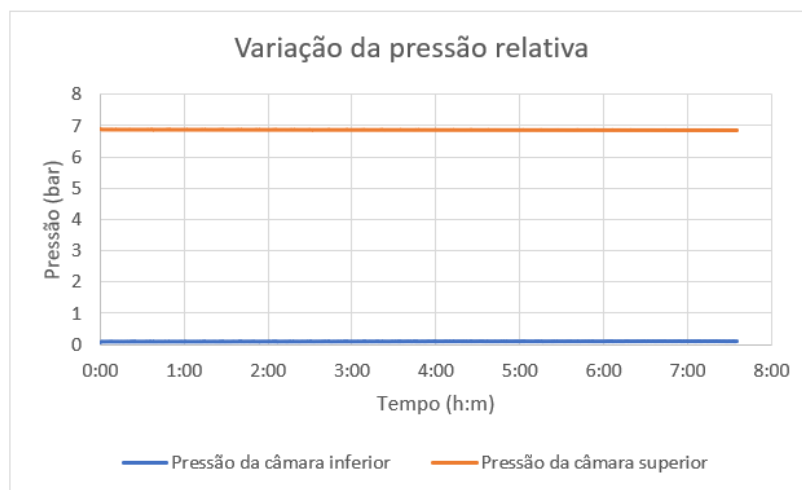


Figura 69 - Variação da pressão relativa das câmaras durante o ensaio de material compósito.

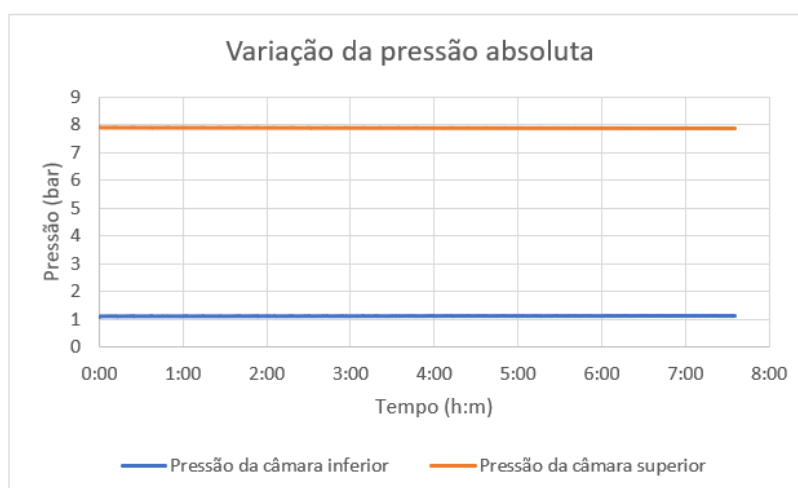


Figura 70 - Variação da pressão absoluta das câmaras durante o ensaio de material compósito.

Após análise do gráfico apresentado na Figura 69 e na Figura 70, é possível concluir que o material compósito, que foi utilizado, não era permeável ao ar comprimido, mesmo depois de mais de sete horas de ensaio. No entanto foi possível concluir que o *setup* está operacional e que a amostra utilizada não é permeável ao ar atmosférico.

### 3.7.2 Ensaio utilizando ar comprimido e manta de teflon

Visto que a finalidade do *setup* é calcular a permeabilidade e não foi possível chegar a este objetivo utilizando a amostra de PA6 reforçado com fibra de carbono, foi realizado um segundo ensaio utilizando uma amostra que já se sabia que à partida era permeável, e assim determinada a sua permeabilidade. Na escolha do material foram considerados vários materiais. No entanto, o material escolhido foram duas mantas de teflon para prensa térmica, como as demonstradas na Figura 71.

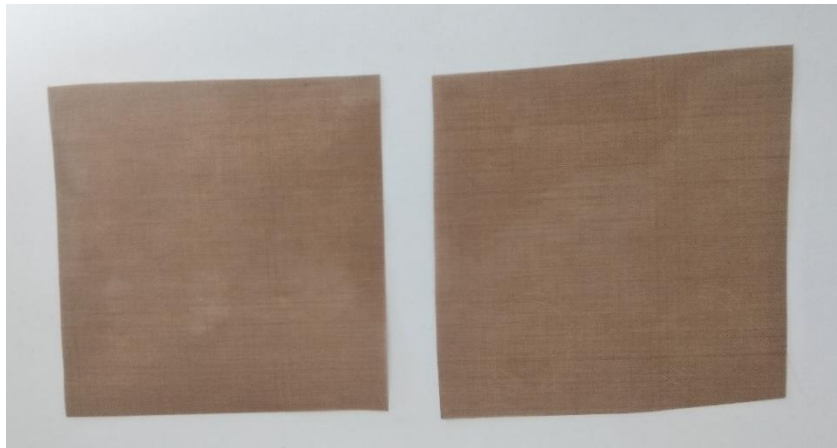


Figura 71 - Mantas de teflon.

Visto que este material é muito flexível, uma vez que só tem 0,15 mm de espessura, utilizou-se uma folha de cortiça para dar consistência à amostra, semelhante à apresentada na Figura 72. Escolheu-se a cortiça por ser um material muito permeável e não oferecer resistência à passagem de ar. Para criar a amostra, cortou-se um quadrado de 95 mm de lado de cortiça com 2 mm de espessura e dois quadrados semelhantes de teflon. De seguida colou-se os 3 componentes, ficando assim a amostra pronta para realizar o ensaio. Para o cálculo, a espessura da amostra é igual a 0,30 mm, uma vez que em cada face da amostra foi colada uma manta de teflon, cuja espessura é 0,15 mm.



Figura 72 - Folha de cortiça.

A Figura 73 está demonstrada a posição relativa dos componentes da amostra utilizada e na Figura 74 é possível observar a imagem final da amostra que foi sujeita ao ensaio de permeabilidade.



Figura 73 - Posição relativa dos componentes da amostra.

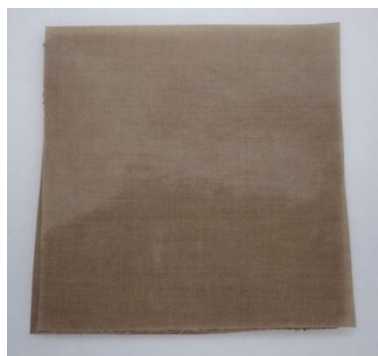


Figura 74 -Amostra utilizada no segundo ensaio.

No segundo ensaio, para determinar a permeabilidade da manta de teflon, também foi utilizado o ar comprimido como o gás para realizar o ensaio. À semelhança do primeiro ensaio, também se realizaram todos os passos indicados na descrição e metodologia do ensaio, exceto os que envolviam a máquina de vácuo e o hélio, visto que o hélio foi substituído pelo ar atmosférico. Terminado o segundo ensaio, os dados registados

foram recolhidos e podem ser consultadas no anexo 6.5.2. Com base na tabela das pressões, foi criado um gráfico pressão/tempo, como se pode ver na Figura 75 a pressão relativa e na Figura 76 a pressão absoluta.

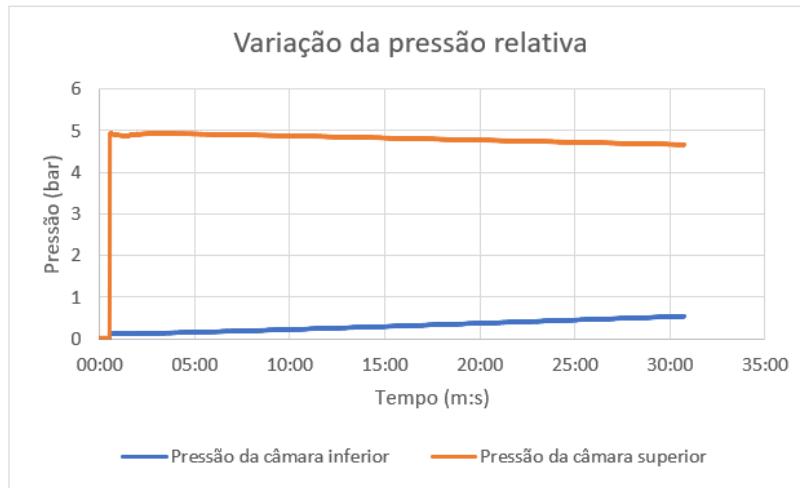


Figura 75 - Variação da pressão relativa das câmaras durante o ensaio utilizando a manta de teflon e cortiça.

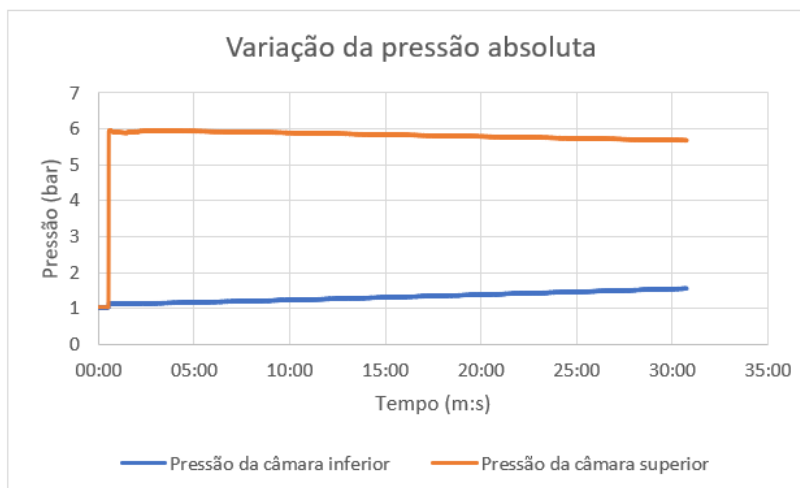


Figura 76 - Variação da pressão absoluta das câmaras durante o ensaio utilizando a manta de teflon e cortiça.

Neste gráfico é possível concluir que a amostra é permeável e o ar colocado na câmara superior estava a passar em pequenas quantidades para a câmara inferior. Na Figura 77 e na Figura 78 estão demonstrados os gráficos da pressão relativa e da pressão absoluta, respetivamente, da câmara inferior com mais pormenor. É possível observar o comportamento linear entre o minuto oito e o final do ensaio. Esta reta representa que a permeabilidade se tornou contante e o ensaio foi concluído com sucesso.

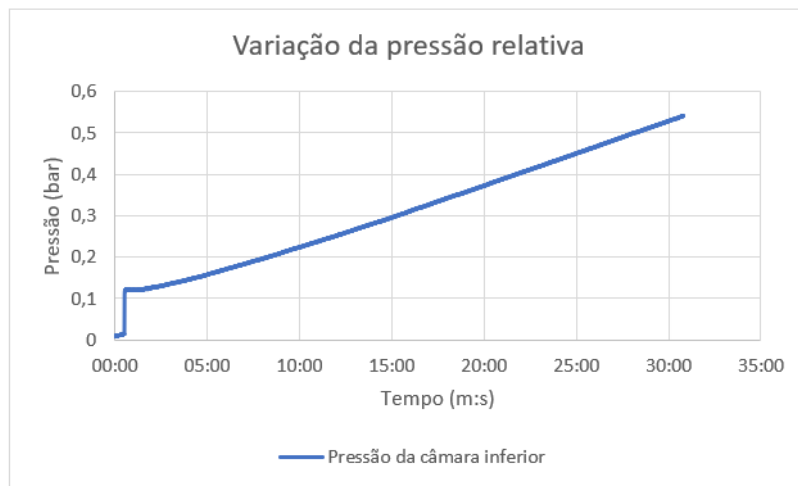


Figura 77 - Variação da pressão relativa da câmara inferior durante o ensaio utilizando a manta de teflon e cortiça.

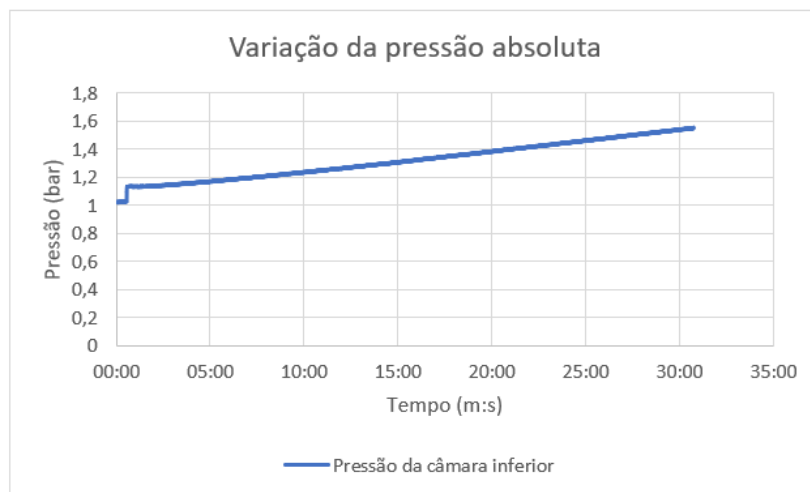


Figura 78 - Variação da pressão absoluta da câmara inferior durante o ensaio utilizando a manta de teflon e cortiça.

A permeabilidade é calculada a partir da reta representada no gráfico. Conforme está descrito nos cálculos preliminares apresentados no capítulo 3.4.5, é necessário escolher dois pontos da reta para determinar os volumes equivalentes em condição padrão. Os pontos escolhidos estão representados na Tabela 17.

Tabela 17 - Apresentação dos dois pontos escolhidos.

Ponto	Tempo		Pressão absoluta da câmara superior		Pressão absoluta da câmara inferior	
	minutos	segundos	Bar	kPa	Bar	kPa
1	15	900	5,83815	583,815	1,30865	130,865
2	30	1800	4,68465	468,465	1,54335	154,335

Para o cálculo do volume padrão é necessário saber o valor do volume de gás que as câmaras têm, e para tal calculou-se o volume das zonas a vermelho apresentadas na Figura 79.

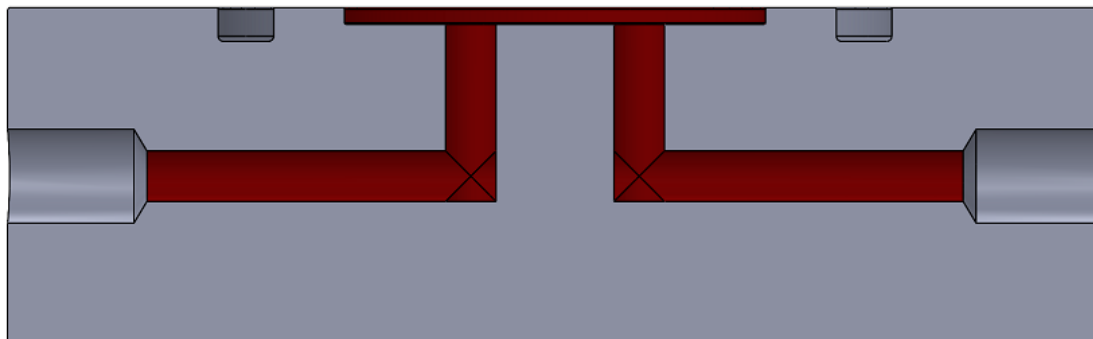


Figura 79 - Volume total da câmara.

O volume total foi dividido em três volumes, o volume da câmara, o volume do canal vertical e o volume do canal horizontal. Na Tabela 18 estão apresentados os valores dos diâmetros de perímetro, das alturas e do volume, quer da câmara quer dos dois canais. O volume apresentado é calculado através da expressão (13),

$$V = \pi \times \frac{D^2}{4} \times h \quad (13)$$

Tabela 18 - Valores dos diâmetros de perímetro, das alturas e do volume da câmara e dos dois canais.

	D – Diâmetro (cm)	h – Altura (cm)	V – Volume (cm <sup>3</sup> )
Câmara	5	0,2	3,92699
Canal vertical	0,6	2,1	0,59376
Canal horizontal	0,6	3,546	1,0026

O Volume total é calculado com o auxílio da expressão (14),

$$V_{total} = V_{Câmara} + 2 \times V_{CanalVertical} + 2 \times V_{CanalHorizontal} \quad (14)$$

$$V_{total} = 3,92699 + 2 \times 0,59376 + 2 \times 1,0026 = 7,1197 \text{ cm}^3.$$

Após escolhidos os dois pontos e determinado o volume da câmara inferior, de 1779,93 mm<sup>3</sup>, é utilizado a expressão (3) para calcular o volume padrão da câmara inferior no primeiro ponto escolhido. A temperatura utilizada será a temperatura a que se encontrava a sala durante o ensaio, 18,5 °C,

$$V_1 = \frac{130,865 \times 7,1197 \times 273,15}{100 \times (18,5 + 273,15)}$$

$$V_1 = 8,7262 \text{ scc.}$$

De seguida, calcula-se o volume padrão da câmara inferior no segundo ponto utilizando a expressão (4). O valor da temperatura é igual, 18,5 °C,

$$V_2 = \frac{154,335 \times 7,1197 \times 273,15}{100 \times (18,5 + 273,15)}$$

$$V_2 = 10,2912 \text{ scc.}$$

Concluído o cálculo do volume padrão de ambas as câmaras, determina-se o aumento volumétrico da câmara inferior utilizando a expressão (5),

$$\Delta V = 10,2912 - 8,7262$$

$$\Delta V = 1,565 \text{ scc.}$$

Para o cálculo do rácio de transmissão do gás será necessário utilizar a área útil da amostra. Visto que o *o-ring* é o vedante com o diâmetro de perímetro menor, este componente é que vai ser o maior limitador de área. Uma vez que o diâmetro de perímetro interior do *o-ring* é de 0,07 m, este será o valor a partir do qual se calculará a área útil. Para calcular a área será utilizado a equação (15),

$$A = \pi \times \frac{D^2}{4} \quad (15)$$

$$A = \pi \times \frac{0,07^2}{4}$$

$$A = 0,003848 \text{ m}^2.$$

De seguida, utiliza-se o aumento volumétrico calculado, o tempo entre os dois pontos escolhidos, 900 s, e a área onde ocorreu a permeação e com o auxílio da expressão (6), determina-se o rácio de transmissão do gás,

$$RTG = \frac{1,565}{900 \times 0,003848}$$

$$RTG = 0,4519 \frac{\text{scc}}{\text{m}^2 \times \text{s}}$$

Por fim, determina-se a permeabilidade da manta de teflon, com o auxílio da expressão (7),

$$P = \frac{0,4519}{5,83815 - 1,30865} \times 0,3 \times 10^{-3}$$

$$P = 2,99305 \times 10^{-5} \frac{\text{scc}}{\text{m} \times \text{s} \cdot \text{Bar}}$$

Assim sendo, finalizou-se o processo para determinar a permeabilidade de duas mantas de teflon, que é  $2,99305 \times 10^{-5} \frac{\text{scc}}{\text{m} \times \text{s} \cdot \text{Bar}}$ , e concluiu-se que o *setup* de permeabilidade está funcional.

### 3.7.3 Ensaio utilizando gás hélio e compósito de fibra de carbono com PA6

Neste terceiro e último ensaio foi utilizada uma amostra de material compósito igual ao selecionado, descrito anteriormente no capítulo 3.3.2, e igual à amostra utilizada no primeiro ensaio. No entanto, neste ensaio o gás utilizado foi o hélio uma vez que é um gás que tem as moléculas mais pequenas do que o ar comprimido. O procedimento utilizado foi exatamente igual ao descrito no capítulo 3.6, com exceção da pressão do hélio na câmara superior, que foi utilizado aproximadamente nove bar, em vez dos 10 bar descritos anteriormente. Concluído o último ensaio, os dados registados foram organizados numa tabela e podem ser consultadas no anexo 6.5.3. A tabela onde estão registadas as pressões foi utilizada para criar um gráfico pressão/tempo, como se pode ver na Figura 80, que representa a variação da pressão relativa em função do tempo. O gráfico da Figura 81 foi criado a partir da Figura 80 e representa a pressão absoluta, em função do tempo.

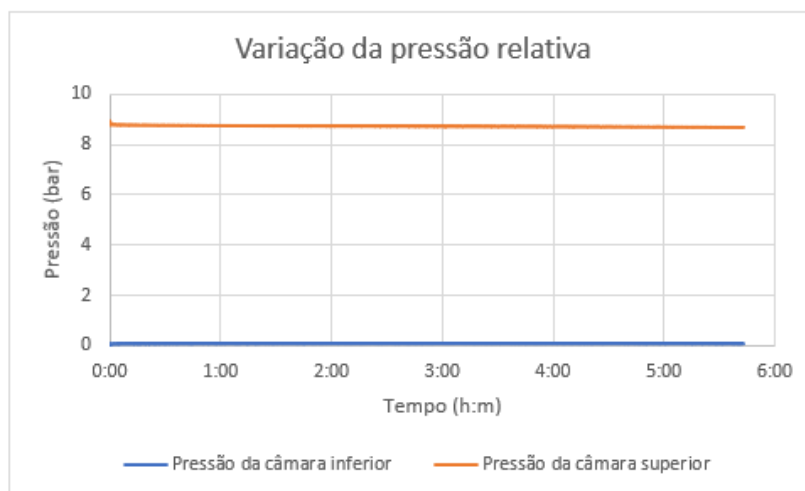


Figura 80 - Variação da pressão relativa das câmaras durante o ensaio utilizando o gás hélio.

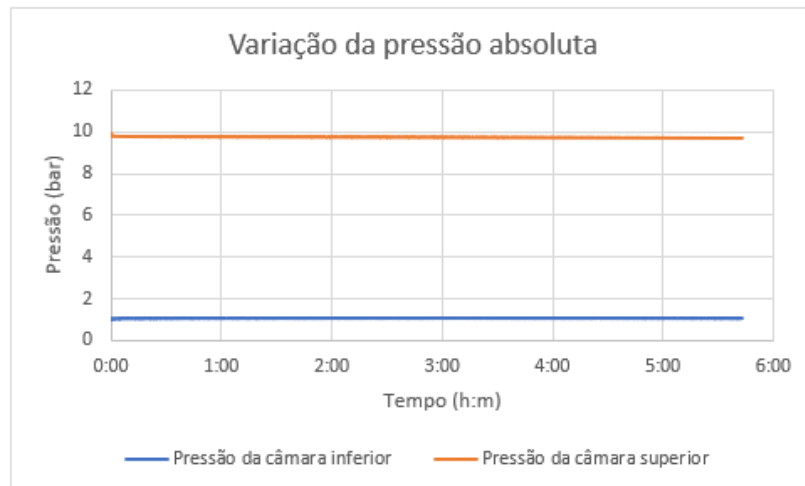


Figura 81 - Variação da pressão absoluta das câmaras durante o ensaio utilizando o hélio.

Após análise do gráfico apresentado na Figura 80, é possível concluir que o material compósito que foi utilizado, não se mostrou permeável ao hélio ao fim de quase 6 horas de ensaio.

### 3.8 Análise crítica dos resultados

Após finalizar todos os ensaios, é possível concluir que uma amostra de um material de 2 mm de espessura, fabricada a partir de PA6 reforçada com fibra de carbono unidirecional, é impermeável ao ar atmosférico, mesmo estando sob pressão de 7 bar. No primeiro ensaio, a pressão exercida pelo ar comprimido sobre as câmaras manteve-se durante várias horas, permitindo assim concluir que o material é impermeável ao ar atmosférico, pelo menos estando sete horas sob uma pressão de 7 bar, e que o *setup* é estanque como idealizado. No entanto, se o ensaio fosse realizado durante vários dias, há a possibilidade de os resultados poderem ser diferentes. No terceiro ensaio, com a mesma amostra e o gás hélio, também se observou que a amostra não deixou atravessar hélio de uma câmara para a outra, o que permitiu concluir que o compósito de PA6 reforçado com fibra de carbono é impermeável ao hélio durante 6 horas.

Relativamente ao segundo ensaio, a amostra criada a partir de uma placa de cortiça e duas mantas de teflon era bastante permeável ao ar atmosférico. As mantas de teflon, que normalmente são utilizadas em prensas térmicas, são um material bastante permeável quando sujeitas à ação de ar comprimido. A velocidade que o ar atmosférico atravessou a amostra era lento o suficiente para garantir o tempo necessário para formar um ensaio válido, ou seja, se a amostra fosse feita apenas de cortiça, a mesma que foi utilizada para dar estrutura às mantas de teflon, o ar da câmara superior atravessava a amostra tão rápido que seria impossível registar dados, o que impossibilitaria o cálculo da permeabilidade da amostra.

Para efeitos de validação do *setup* do ensaio de permeabilidade e respetiva validação dos resultados, foi pesquisada na literatura a permeabilidade de vários materiais. Na Tabela 19 estão identificadas as permeabilidades ao gás hélio dos seguintes materiais: polietileno de baixa densidade (LDPE), polietileno de média densidade (MDPE), polietileno de alta densidade (HDPE), *nylon* 11 (PA11) e fluoreto de polivinilideno (PVDF). Também na Tabela 19 estão identificadas as permeabilidades ao gás hidrogénio dos seguintes materiais: perfluoroalcoxi (PFA), perfluoroalcoxi /politetrafluoroetileno (PFA/PTFE) e poli(éter-éter-cetona) (PEEK).

Tabela 19 - Materiais para comparar a permeabilidade [67].

Material	Gas	Temp. (°C)	Pressure (bar)	Thickness (mm)	P (10 <sup>-7</sup> scc/m.s.bar)
LDPE	He	41	40	1.81	64
MDPE	He	41	100	1.93	28
HDPE	He	40	100	2.11	19
PA11	He	41	40	1.87	21
PVDF	He	41	100	2.1	14
PFA	H <sub>2</sub>	25	2-6	0.13	920
PFA/PTFE	H <sub>2</sub>	25	2-6	0.13	510-1200
PEEK	H <sub>2</sub>	25	2-6	0.13	87-102

Neste caso, utilizando os dados da Tabela 19, a permeabilidade das mantas de teflon é  $299,305 \times 10^{-7} \frac{\text{scc}}{\text{m} \times \text{s} \times \text{bar}}$ , o que significa as mantas de teflon são menos permeáveis ao ar comprimido do que o PFA é permeável ao hidrogénio e mais permeáveis ao ar comprimido do que o PVDF ao hélio. Este resultado deve-se ao facto do gás utilizado no ensaio das mantas de teflon ser o ar comprimido e no ensaio da Tabela 19 ser o hélio e o hidrogénio, gases que têm as moléculas muito mais pequenas do que o ar atmosférico. Este facto deve-se ao ar atmosférico ser um conjunto de gases como o azoto, o oxigénio entre outros e todos eles apresentam moléculas maiores do que a molécula do hélio [74].

# CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

- 4.1 Conclusões
- 4.2 Propostas de trabalhos futuros



## 4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

### 4.1 Conclusões

A presente tese consiste no projeto de um *setup* de permeabilidade que permita determinar a permeabilidade de uma amostra a partir da pressão. Nesta parte do relatório também foram identificadas algumas ideias iniciais do projeto, como por exemplo os modelos de 6 parafusos, o modelo da utilização de dois *o-rings* com o mesmo diâmetro de perímetro e a justificação de optar pelo modelo de 4 parafusos utilizando um *o-ring* e uma junta de vedação de diâmetros diferentes. Os componentes utilizados estão identificados assim como as suas características e os locais onde foram adquiridos. Todas as etapas da montagem do *setup* foram descritas como também a metodologia para utilizar o *setup* de forma a obter valores credíveis. Em relação ao projeto, foi possível concluir que o *setup* está operacional e a funcionar conforme o pretendido, visto que foi possível provar a impermeabilidade ao ar comprimido e ao hélio de uma placa de PA6 reforçado com fibra de carbono unidirecional, realizando um ensaio de sete horas para o ar comprimido e um ensaio de quase 6 horas para o gás hélio. Com estes ensaios, foi ainda possível calcular a permeabilidade de duas mantas de teflon usando ar comprimido utilizando os dados obtidos através do ensaio. Após concluídos os ensaios e os cálculos, comparou-se os valores calculados com os dados encontrados na literatura de forma a comparar a permeabilidade da amostra utilizada com a permeabilidade de outras amostras encontrada na literatura.

Em suma, o *setup* passou por várias alterações durante a sua criação, no entanto, quando concluído e construído, o *setup* está operacional para determinar a permeabilidade de uma amostra quadrada de 95 mm de lado.

### 4.2 Propostas de trabalhos futuros

Após a realização da presente dissertação, concluiu-se que este projeto ainda pode ser bastante explorado. Visto que é um *setup* relativamente pequeno, uma proposta seria colocá-lo dentro de uma câmara e assim realizar ensaios em temperaturas diferentes da temperatura ambiente, ou seja, ensaios em altas temperaturas ou em temperaturas criogénicas com o objetivo de aproximar os ensaios das condições de temperatura a que se podem encontrar. Estes ensaios serão úteis para escolher os materiais dos

veículos aeroespaciais pois precisam de ser testados em altas temperaturas para simular a sair da atmosfera e a temperaturas criogénicas para simular a temperatura fora da atmosfera.

Outra proposta consiste na utilização de componentes mais resistentes à pressão, como por exemplo as ligações das mangueiras e as válvulas, de forma que seja possível utilizar maiores pressões durante o ensaio.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES  
DE INFORMAÇÃO**



## 5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Caetano, M. *Imporância Relativa dos Materiais* 2010. Acedido em Janeiro 2021; Disponível em: <https://www.ctborrachacom/materiais-de-engenharia/importancia-relativa-dos-materiais/>.
2. Sousa, D. *INEGI reúne líderes para debater o futuro em matéria de inovação*. 2016. Acedido em Janeiro 2021; Disponível em: <https://noticias.up.pt/inegi-reune-lideres-para-debater-o-futuro-em-materia-de-inovacao/>.
3. Lisboa, T. *Mestrado integrado em engenharia aeroespacial*. 2020. Acedido em Janeiro 2021; Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/cursos/meaer/descricao>.
4. Caetano, L. *Sputnik, uma aposta Russa para ganhar o espaço*. 2007. Acedido em Dezembro 2020; Disponível em: <https://ensina.rtp.pt/artigo/sputnik-uma-aposta-russa-para-ganhar-o-espaco/>.
5. Park, J.H., H. Jung, C.H. Lim, e T. Chang, *The economic impact analysis of satellite development and its application in Korea*. Acta Astronautica, 2020. **177**: p. 9-14.
6. Landoni, M., *Convergence of innovation policies in the European aerospace industry (1960–2000)*. Technological Forecasting and Social Change, 2019. **147**: p. 174-184.
7. Andrade, F. *Europa é a quarta potência espacial. Indústria do Espaço gerou mais de 8.7 mil milhões de euros em 2019*. 2020. Acedido em Dezembro 2020; Disponível em: <https://tek.sapo.pt/noticias/negocios/artigos/europa-e-a-quarta-potencia-espacial-industria-do-espaco-gerou-mais-de-8-7-mil-milhoes-de-euros-em-2019>.
8. Matias, P. *Aeronáutica / Aeroespacial*. 2017. Acedido em Dezembro 2020; Disponível em: <https://www.isq.pt/tema/aeronautica-aeroespacial/>.
9. Muhammad, A., M.R. Rahman, R. Bains, e M.K. Bin Bakri, *8 - Applications of sustainable polymer composites in automobile and aerospace industry*, in *Advances in Sustainable Polymer Composites*, M.R. Rahman, Editor. 2021, Woodhead Publishing. p. 185-207.
10. Strandridge, M., *Aerospace Materials—Past, Present and Future*. Aerospace Manufacturing and Design, 2014. **13**.
11. Quilter, A., *Composites in aerospace applications*. IHS White Paper, 2001. **444**(1).
12. McIlhagger, A., E. Archer, e R. McIlhagger, *3 - Manufacturing processes for composite materials and components for aerospace applications*, in *Polymer Composites in the Aerospace Industry*, P.E. Irving and C. Soutis, Editors. 2015, Woodhead Publishing. p. 53-75.
13. CompositesWord. *The market for OOA aerocomposites, 2013-2022*. 2014. Acedido em Dezembro 2020; Disponível em:

<https://www.compositesworld.com/articles/the-market-for-ooa-aerocomposites-2013-2022>.

14. Williamson, A. e N. Padmapriya, *Cost of alternative techniques for manufacturing composite aerospace designs*, in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 2016, Elsevier.
15. Tekin, E. e Ö. Kapan, *Composite Manufacturing Data Management in Aerospace Industry*. Procedia CIRP, 2016. **41**: p. 1039-1042.
16. Wang, G., Y. Zhao, e Y. Hao, *Friction stir welding of high-strength aerospace aluminum alloy and application in rocket tank manufacturing*. Journal of Materials Science & Technology, 2018. **34**(1): p. 73-91.
17. MOSER, D. e E. KEITH. *Composite propellant tank study for very low cost space transportation*. in *28th Joint Propulsion Conference and Exhibit*. 1992.
18. Wang, C., J. Zhu, M. Wu, J. Hou, H. Zhou, L. Meng, C. Li, e W. Zhang, *Multi-scale design and optimization for solid-lattice hybrid structures and their application to aerospace vehicle components*. Chinese Journal of Aeronautics, 2020.
19. Das, M., S. Sahu, e D.R. Parhi, *Composite materials and their damage detection using AI techniques for aerospace application: A brief review*. Materials Today: Proceedings, 2020.
20. Morais, A.B., M.F.S.F. Moura, e A.G. Magalhães, *Materiais compósitos - materiais, fabrico e comportamento mecânico*. 2010, porto: Publindústria.
21. Nguyen, M.H., A.A. Vijayachandran, P. Davidson, D. Call, D. Lee, e A.M. Waas, *Effect of automated fiber placement (AFP) manufacturing signature on mechanical performance of composite structures*. Composite Structures, 2019. **228**: p. 111335.
22. Ostrander, G. e J. Michasiow. *Recent Developments in Automated Fiber Placement of Thermoplastic Composites*. 2014.
23. Marsh, G., *Automating aerospace composites production with fibre placement*. Reinforced Plastics, 2011. **55**(3): p. 32-37.
24. Dhinakaran, V., K.V. Surendar, M.S. Hasunfur Riyaz, e M. Ravichandran, *Review on study of thermosetting and thermoplastic materials in the automated fiber placement process*. Materials Today: Proceedings, 2020. **27**: p. 812-815.
25. Beakou, A., M. Cano, J.B. Le Cam, e V. Verney, *Modelling slit tape buckling during automated prepreg manufacturing: A local approach*. Composite Structures, 2011. **93**(10): p. 2628-2635.
26. Campbell, F.C., *Chapter 5 - Ply Collation: A Major Cost Driver*, in *Manufacturing Processes for Advanced Composites*, F.C. Campbell, Editor. 2004, Elsevier Science: Amsterdam. p. 131-173.
27. Lukaszewicz, D.H.J.A., C. Ward, e K.D. Potter, *The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future*. Composites Part B: Engineering, 2012. **43**(3): p. 997-1009.
28. Hasan, Z., *Chapter 5 - Manufacturing and quality*, in *Tooling for Composite Aerospace Structures*, Z. Hasan, Editor. 2020, Butterworth-Heinemann. p. 105-160.
29. Danisman, M., G. Tuncol, A. Kaynar, e E.M. Sozer, *Monitoring of resin flow in the resin transfer molding (RTM) process using point-voltage sensors*. Composites Science and Technology, 2007. **67**(3): p. 367-379.

30. Magagnato, D., J. Seuffert, A. Bernath, L. Kärger, e F. Henning, *Experimental and numerical study of the influence of integrated load transmission elements on filling behavior in resin transfer molding*. *Composite Structures*, 2018. **198**: p. 135-143.
31. Goncharova, G., B. Cosson, e M. Deléglise Lagardère, *Analytical modeling of composite manufacturing by vacuum assisted infusion with minimal experimental characterization of random fabrics*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015. **219**: p. 173-180.
32. Modi, D., M. Johnson, A. Long, e C. Rudd, *Analysis of pressure profile and flow progression in the vacuum infusion process*. *Composites Science and Technology*, 2009. **69**(9): p. 1458-1464.
33. Vilà, J., F. Sket, F. Wilde, G. Requena, C. González, e J. Llorca, *An in situ investigation of microscopic infusion and void transport during vacuum-assisted infiltration by means of X-ray computed tomography*. *Composites Science and Technology*, 2015. **119**: p. 12-19.
34. Wool, R.P., *13 - HURRICANE-RESISTANT HOUSES FROM SOYBEAN OIL AND NATURAL FIBERS*, in *Bio-Based Polymers and Composites*, R.P. Wool and X.S. Sun, Editors. 2005, Academic Press: Burlington. p. 448-482.
35. Tech, B.F. *FILAMENT WINDING*. 2015. Acedido em Janeiro 2021; Disponível em: <http://www.basaltft.com/app/fw.htm>.
36. CoreComposites. *Fiber selection*. 2019. Acedido em Dezembro 2020; Disponível em: <https://www.corecomposites.com/products/reinforcements.html>.
37. Aldosari, S.M., M. Khan, e S. Rahatekar, *Manufacturing carbon fibres from pitch and polyethylene blend precursors: a review*. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020. **9**(4): p. 7786-7806.
38. Bhatt, P. e A. Goe, *Carbon fibres: production, properties and potential use*. *Material Science Research India*, 2017. **14**: p. 52-57.
39. Milbrandt, A. e S. Booth, *Carbon Fiber from Biomass*. 2016.
40. Johnson, T. *Thermoplastic vs. Thermoset Resins*. 2020. Acedido em Dezembro 2020; Disponível em: <https://www.thoughtco.com/thermoplastic-vs-thermoset-resins-820405>.
41. Obande, W., D. Mamalis, D. Ray, L. Yang, e C.M. Ó Brádaigh, *Mechanical and thermomechanical characterisation of vacuum-infused thermoplastic- and thermoset-based composites*. *Materials & Design*, 2019. **175**: p. 107828.
42. Hafizal Hamidon, M., M.T.H. Sultan, e A. Hamdan Ariffin, *7 - Investigation of mechanical testing on hybrid composite materials*, in *Failure Analysis in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, M. Jawaid, M. Thariq, and N. Saba, Editors. 2019, Woodhead Publishing. p. 133-156.
43. Afinko. *Ensaio de flexão*. 2017. Acedido em Janeiro 2021; Disponível em: <https://afinkopolimeros.com.br/servicos/ensaios-laboratoriais/ensaios-mecanicos/>.
44. Khan, Y., *Characterizing the Properties of Tissue Constructs for Regenerative Engineering*, in *Encyclopedia of Biomedical Engineering*, R. Narayan, Editor. 2019, Elsevier: Oxford. p. 537-545.
45. McKeen, L.W., *1 - Introduction to Plastics, Polymers, and Their Properties, in The Effect of Temperature and other Factors on Plastics and Elastomers (Third*

- Edition*), L.W. McKeen, Editor. 2014, William Andrew Publishing: Oxford. p. 1-45.
46. Anbuhezian, N., T. Velmurugan, e G. Suganya priyadharshini, *Mechanical testing and evaluation of the composite developed through fused deposition modelling*. Materials Today: Proceedings, 2020.
47. Chandradass, J., T. Thirugnanasambandham, e P. Baskara Sethupathi, *Liquid state stir cast processing and characteristics study of AZ91D/SiCp composites*. Materials Today: Proceedings, 2020.
48. Yousefi, N., A.D. Evans, L.T. Harper, H.A. Maples, T. James, e A. Bismarck, *Solid epoxy resin systems for automated composite manufacturing*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021. **142**: p. 106205.
49. Loutas, T.H., G. Sotiriadis, E. Tsonos, S. Psarras, e V. Kostopoulos, *Investigation of a pulsed laser ablation process for bonded repair purposes of CFRP composites via peel testing and a design-of-experiments approach*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2019. **95**: p. 102407.
50. CompositesWorld. *The markets: Pressure vessels (2020)*. 2019. Acedido em Dezembro 2020; Disponível em: <https://www.compositesworld.com/articles/the-markets-pressure-vessels>.
51. Barker, G., *Chapter 15 - Storage tanks*, in *The Engineer's Guide to Plant Layout and Piping Design for the Oil and Gas Industries*, G. Barker, Editor. 2018, Gulf Professional Publishing. p. 361-380.
52. Comond, O., D. Perreux, F. Thiebaud, e M. Weber, *Methodology to improve the lifetime of type III HP tank with a steel liner*. International Journal of Hydrogen Energy, 2009. **34**(7): p. 3077-3090.
53. Baetcke, L. e M. Kaltschmitt, *Chapter 5 - Hydrogen Storage for Mobile Application: Technologies and Their Assessment*, in *Hydrogen Supply Chains*, C. Azzaro-Pantel, Editor. 2018, Academic Press. p. 167-206.
54. *Chapter 5.2 - Hydrogen Storage and Transport Technologies*, in *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies*, P.E.V. de Miranda, Editor. 2019, Academic Press. p. 221-228.
55. Sápi, Z. e R. Butler, *Properties of cryogenic and low temperature composite materials – A review*. Cryogenics, 2020. **111**: p. 103190.
56. Islam, M.S., E. Melendez-Soto, A.G. Castellanos, e P. Prabhakar, *Investigation of woven composites as potential cryogenic tank materials*. Cryogenics, 2015. **72**: p. 82-89.
57. Alam, S., G.R. Yandek, R.C. Lee, e J.M. Mabry, *Design and development of a filament wound composite overwrapped pressure vessel*. Composites Part C: Open Access, 2020. **2**: p. 100045.
58. Flanagan, M., D.M. Grogan, J. Goggins, S. Appel, K. Doyle, S.B. Leen, e C.M. Ó Brádaigh, *Permeability of carbon fibre PEEK composites for cryogenic storage tanks of future space launchers*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017. **101**: p. 173-184.
59. Choi, S. e B.V. Sankar, *Gas permeability of various graphite/epoxy composite laminates for cryogenic storage systems*. Composites Part B: Engineering, 2008. **39**(5): p. 782-791.
60. Garcia-Gonzalez, D., S. Garzon-Hernandez, A. Rusinek, R. Bernier, e A. Arias, *Low temperature mechanical behaviour of PVDF: cryogenic pre-treatment*,

- quasi-static, cyclic and dynamic experimental testing and modelling*. *Mechanics of Materials*, 2020. **147**: p. 103436.
61. Sun, T., H. Fan, e Z. Wu, *The study on the compatibility of epoxy resin with liquid oxygen*. *High Performance Polymers*, 2014. **26**: p. 319-325.
  62. Wang, G., X. Li, R. Yan, e S. Xing, *The study on compatibility of polymer matrix resins with liquid oxygen*. *Materials Science and Engineering: B*, 2006. **132**(1): p. 70-73.
  63. Qu, C.B., T. Wu, G.W. Huang, N. Li, M. Li, J.L. Ma, Y. Liu, e H.M. Xiao, *Improving cryogenic mechanical properties of carbon fiber reinforced composites based on epoxy resin toughened by hydroxyl-terminated polyurethane*. *Composites Part B: Engineering*, 2021: p. 108569.
  64. Li, S., D. Chen, Y. Yuan, C. Gao, Y. Cui, H. Wang, X. Liu, M. Liu, e Z. Wu, *Influence of flexible molecular structure on the cryogenic mechanical properties of epoxy matrix and carbon fiber/epoxy composite laminate*. *Materials & Design*, 2020. **195**: p. 109028.
  65. Zhou, Z., J. Qian, J. Zhang, Y. Cui, Y. Li, D. Tan, J. Long, H. Wu, Q. Liu, F. Guo, B. Sun, H. Shi, N. Hu, e S. Fu, *Phosphorus and bromine modified epoxy resin with enhanced cryogenic mechanical properties and liquid oxygen compatibility simultaneously*. *Polymer Testing*, 2021. **94**: p. 107051.
  66. Sandeep, B., B. Suresha, e H.N. Divakar, *Fracture toughness of alumina filler filled glass fabric reinforced epoxy composites*. *Materials Today: Proceedings*, 2020.
  67. Murray, B., *Characterisation of rotationally moulded polymer liners for low permeability cryogenic applications in composite overwrapped pressure vessels*. National University of Ireland Galway, Galway, Ireland, 2016.
  68. Rocha, R., J. Rocco, K. Iha, e M. Silva, *Revestimentos de alta camada obtidos com a modificação de resinas epóxi novolaca pela reação com organo-siloxano e catálise ácida*. *Química Nova*, 2016. **40**.
  69. Nimbekar, A.A., P.G. Bhatia, e R.R. Deshmukh, *Ammonia sensors manufactured by plasma enhanced grafting of conducting polymers on nylon-6 fabrics*. *Synthetic Metals*, 2021. **279**: p. 116840.
  70. Sun, Y., H. Lv, W. Zhou, e C. Zhang, *Research on hydrogen permeability of polyamide 6 as the liner material for type IV hydrogen storage tank*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020. **45**(46): p. 24980-24990.
  71. Bayle, J., D. Perreux, D. Chapelle, e F. Thiébaud. *A model to predict the permeation of type IV hydrogen tanks*. in *WHEC2010, 18th World Hydrogen Energy Conference*. 2010. Essen, Alemanha.
  72. ASTM, *ASTM D1434-82. Standard test method for determining gas permeability characteristics of plastic film and sheeting*. 1998, ASTM International: West Conshohocken, EUA.
  73. Schwartz, R., *Tabela de torque de parafusos*. 2020, Ciser Blog: Brasil.
  74. Scholes, C., S. Kentish, e G. Stevens, *Carbon Dioxide Separation through Polymeric Membrane Systems for Flue Gas Applications*. *Recent Patents on Chemical Engineering*, 2010. **1**.



# ANEXOS

- 6.1 Ficha técnica KM11 EN
- 6.2 Ficha técnica KX1 KXK EN
- 6.3 Catálogo *o-rings* da anyseals
- 6.4 Desenho conjunto
- 6.5 Dados do registador de dados



## 6 ANEXOS

### 6.1 Ficha técnica KM11 EN

## KM11 Pressure Transducer

### FEATURES

- Broad temperature capability
- All-welded pressure construction
- Stainless steel housing
- High EMI/RFI rating
- Ranges 1 bar through 2000 bar
- IP67 Ingress rating (IP69K available)
- Explosion proof (intrinsically safe) for zone 1 and 2 acc. ATEX

### APPLICATIONS

- Off-Road equipment
- Construction machinery
- Compressor control
- Pump monitoring
- Agricultural/irrigation equipment
- Diagnostic kits
- Engine monitoring
- Process automation & controls
- Hydraulic and pneumatic sensing

### PERFORMANCE SPECIFICATIONS

Reference Temperature:	21 °C ±2 °C (70 °F ±2 °F)
Static Accuracy:	±0,5 % of span, optional 0,25 % of span Terminal Point Method includes: hysteresis, linearity, repeatability, offset and span
Durability:	> 10,000,000 cycles
Stability:	≤ ±0.25 % of span/year at reference conditions

### MECHANICAL SPECIFICATIONS

Process Connection:	G ¼ A Male acc. DIN 3852 Part 11 Form E (≤ 1000 bar) ¼ NPT Male acc. ASME B1.20.1 (≤ 1000 bar) M18x1,5 Male High pressure connection
Weather Protection:	IP67, up to IP69K (depending on electrical connection & mating)

### ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS

Thermal Coefficients:	Compensated Range -20 to 85 °C Mean TC offset % of the range 0,15 / 10 K Mean TC range % of the range 0,15 / 10 K
Total error % of the range:	2 % at -40 °C 2 % at 105 °C
Temperature Limits:	Storage: -40 °C to 125 °C (-40 °F to 257 °F) Ambient: -40 °C to 105 °C (-40 °F to 221 °F) Media: -40 °C to 125 °C (-40 °F to 257 °F) ATEX (Ambient): -40 °C to 85 °C (-40 °F to 185 °F) ATEX (Media): -40 °C to 85 °C (-40 °F to 185 °F)
Humidity:	0-100 % R.H. (non-condensing)

### FUNCTIONAL SPECIFICATIONS

Response Time (Output):	< 1ms (voltage outputs) / < 2ms (4-20 mA outputs)
Gauge/Compound Pressure Ranges:	-1 to 2000 bar Vacuum to 30,000 psig (see Table 6 at page 7)
Shock:	Drop: 1000 g acc. to DIN EN 60068-2-32 – free fall Constant: 50 g acc. to DIN EN 60068-2-27 – shock
Vibration:	20 g in all directions acc. to DIN EN 60068-2-6 – vibration sinusoidal
Overload:	See table 1 at page 2
Pressure (ATEX):	See table 1 at page 2



KM11  
Pressure Transducer



### KEY BENEFITS

- Wide selection of electrical and process connections available
- Customizable configurations

### ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Connection:	Shielded cable Hirschman EN 175301-803 Form A or C M12 or M18 round connector type S763 or S714-4 others see coding table at page 3
Max. Loop-resistance:	≤ (U <sub>B</sub> - 10 V) / 0,02 A
Insulation: (Case/Connection)	> 100 MΩ at 50 Vdc
Withstand/Breakdown:	50 Vdc, optional 500/710 Vdc
Supply Current:	≤ 10 mA

### ELECTRICAL SPECIFICATIONS

VOLTAGE OUTPUT	EXCITATION	MAX. SUPPLY CURRENT
0-5 Vdc (3 Wire)	0-5 Vdc	10 mA
0-10 Vdc (3 Wire)	12-32 Vdc	10 mA
1-5 Vdc (3 Wire)	8-32 Vdc	10 mA
0-20 mA (3 Wire)	9-30 Vdc	40 mA
4-20 mA (2 Wire)	10-32 Vdc	23 mA
4-20 mA (2 Wire); ATEX ia	12-24 Vdc	23 mA
4-20 mA (3 Wire)	9-30 Vdc	23 mA
0,5-4,5 Vdc (3 Wire); ratiometric	5 Vdc ± 10 %	7,5 mA

## KM11 Pressure Transducer

### WETTED MATERIAL

Process Connection: Stainless steel 304 (1.4301)  
 Sensor: Stainless steel 17-4H (1.4542/1.4548)  
 with a polysilicon cell

### NON-WETTED MATERIAL

Case: Stainless steel 304 (1.4301)

### APPROVALS

**ATEX** Declaration of Conformity  
 TÜV 06 ATEX 2975  
**CE** 0044  II 2G Ex ia IIC T4 Gb  
 Ta = -40 °C to +85 °C  
 (File No. 15203167374 at notified body 0044, TÜV  
 NORD CERT)  
 Used harmonized standards:  
 EN 61000-6-3:2002  
 "Electro Magnetic Compatibility (EMC)"  
 EN 61326-1:2013  
 EN 61326-2-3:2013

**CE** 2014/35/EU  
 "Electrical equipment designed for use within  
 certain voltage limits"  
 EN 61010-1:2011-07  
 2014/30/EU  
 CISPR11:2009  
 EN 61000-4-2:2009  
 EN 61000-4-3:2011  
 EN 61000-4-4:2013  
 EN 61000-4-5:2015  
 EN 61000-4-6:2014  
 EN 61000-4-8:2010  
 2011/65/EU  
 "Directive for the restriction of the use of certain  
 hazardous substances in electrical and electronic  
 equipment"  
 2014/68/EU  
 "Pressure Equipment Directive (PED)"

**SIL** Safety Integrated Level or Performance Level SIL 2,  
 PL: d

### TABLE 1: PROOF & BURST PRESSURE

Sensor Range in bar	Code	Sensor - 17-4PH Stainless steel	
		Proof in bar	Burst in bar
1	1BR	6	9
1,6	1P6BR	6	9
2	2BR	6	9
2,5	2P5BR	6	9
4	4BR	10	15
6	6BR	20	30
10	10BR	20	30
16	16BR	40	60
20	20BR	40	60
25	25BR	100	150
40	40BR	100	150
60	60BR	200	300
100	100BR	200	300
160	160BR	400	600
200	200BR	400	600
250	250BR	750	1000
400	400BR	750	1000
600	600BR	840	1050
1000	1000BR	1200	1500
1600	1600BR	2400	3000
2000	2000BR	2400	3000



## KM11 Pressure Transducer

ORDERING CODE		EXAMPLE:	KM11	025	MG2	42	HM	4BR	G	XNH
<b>Model</b>										
KM11	Stainless steel pressure transducer									
<b>Accuracy</b>										
025	0,25 % of full span									
050	0,50 % of full span									
<b>Connection Size</b>										
F09	9/16-18 UNF-2B Aminco									
M02	¼ NPT male (only for ranges ≤ 1000 bar)									
M04	½ NPT male (only for ranges ≤ 1000 bar)									
MG2	G ¼ B male acc. to EN 837-1(only for ranges ≤ 1000 bar)									
MG4	G ½ B male acc. to EN 837-1 (only for ranges ≤ 1000 bar)									
MG9	G ¼ A male acc. DIN 3852 part 11 form E (only for ranges ≤ 600 bar)									
MM18HP	M18x1,5 male high pressure with sealing cone gasket									
<b>Output Signal</b>										
05	0-5 Vdc (3 Wire)									
10	0-10 Vdc (3 Wire)									
15	1-5 Vdc (3 Wire)									
20	0-20 mA (3 Wire)									
42	4-20 mA (2 Wire)									
42-3L	4-20 mA (3 Wire)									
RM	0,5-4,5 Vdc (3 Wire); ratiometric									
<b>Electrical Connection</b>										
A50	Amphenol 5 PIN connector (Not available for ATEX execution)									
DT	Deutsch DT Series DT04-3P, no mating connector									
F2	Shielded cable (Length customizable)									
HM	Hirschman EN 175301-803 Form C									
M1	Hirschman EN 175301-803 Form A									
M12	M12x1 round connector, Type S763									
M18	M18x1 round connector, Binder type S714-4									
<b>Range (coding example only, see range table on page 2 for all standard ranges)</b>										
4BR	4 bar									
<b>Pressure Type</b>										
G	Gauge pressure									
A	Absolute pressure (ranges 1 to 35 bar only)									

Continued at page 4



## KM11 Pressure Transducer

**ORDERING CODE**      **EXAMPLE:** **KM11** **025** **MG2** **42** **HM** **4BR** **G** **XNH**

Options (If choosing an option(s) must include a "X")

**Approval**

ATEXG    ATEX approval Ex II 2G Ex ia IIC T4 Gb  
 (only available for gauge pressure type)

SIL       Safety Integrated Level or Performance Level SIL 2, PL: d (only available for 4...20 mA and Non-ATEX execution)

**Cable length**

0            Without cable

0,5...101    Cable length in 0,1 m steps

**Case**

IP69K      Ingress protection IP69K

**Calibration**

CL         Calibration according customer specification

HD1       Advanced overpressure

**Dampening**

TU         Throttle plug

**Cleaning**

6B         Cleaned for oxygen service

6W         Cleaned for oxidizing processes

**Marking/Tagging**

NH         Stainless steel tag, wired to case

**Testing/Certificates**

CD2       Material test report according to EN 10204 / 2.2

C4         Individual calibration chart

ML         Mass spectrometer leak test

HY         Hydrostatic testing



## KM11 Pressure Transducer

**TABLE 3 - PRESSURE CONNECTION DIMENSIONS IN MM [INCH]**

<b>G ¼ B MALE EN837-1</b>	<b>G ½ B MALE EN837-1</b>	<b>G ¼ A MALE DIN 3852 PT. 11 TYPE E</b>	<b>¼ NPT MALE</b>	<b>9/16-18 UNF-2B FEMALE</b>
<b>Code: MG2</b>	<b>Code: MG4</b>	<b>Code: MG9</b>	<b>Code: M02</b>	<b>Code: F09</b>
MAWP:1000 bar / 14,000 psi	MAWP:1000 bar / 14,000 psi	MAWP:1000 bar / 14,000 psi	MAWP:1000 bar / 14,000 psi	MAWP: 2000 bar / 30,000 psi

**TABLE 4 - ELECTRICAL CONNECTION DIMENSIONS IN MM [INCH]**

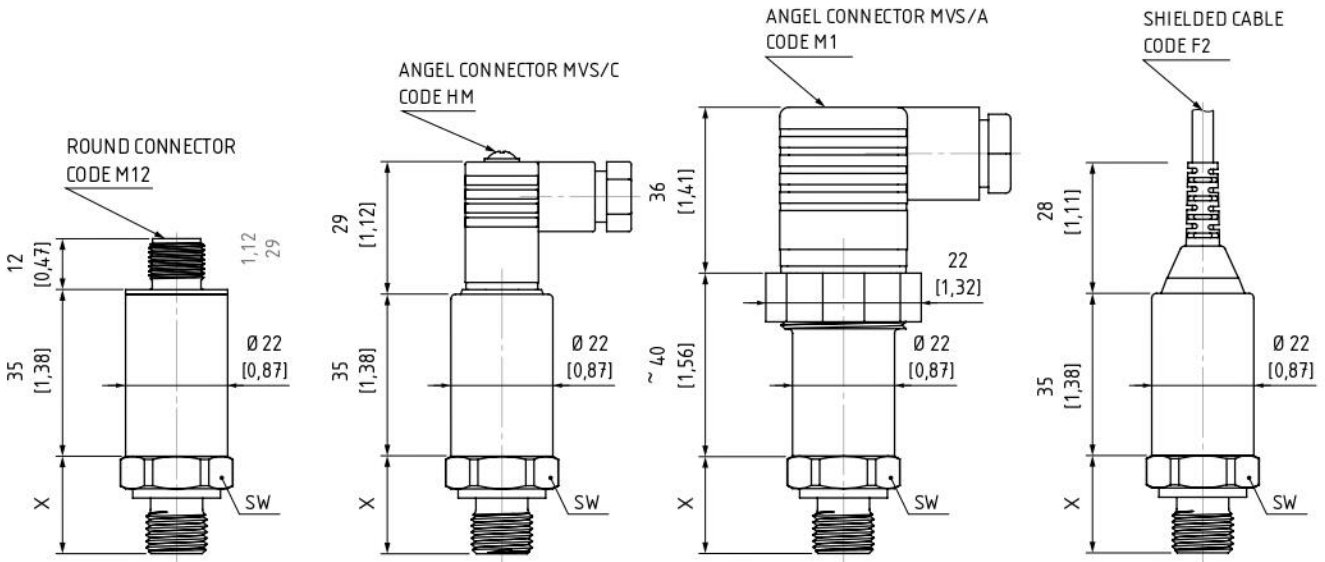
<b>HIRSCHMAN EN 175301-803 FORM A</b>	<b>HIRSCHMAN EN 175301-803 FORM C</b>	<b>M12 4-PIN</b>	<b>DEUTSCH DT04 3-PIN</b>
<b>Code: M1 – IP66 (NEMA 4X)</b>	<b>Code: HM – IP66 (NEMA 4X)</b>	<b>Code: M12 – IP66 (NEMA 4X)</b>	<b>Code: DT – IP66 (NEMA 4X)</b>
-40 °C to 85 °C (-40 °F to 185 °F)	-40 °C to 85 °C (-40 °F to 185 °F)	-40 °C to 85 °C (-40 °F to 185 °F)	-40 °C to 85 °C (-40 °F to 185 °F)



## KM11 Pressure Transducer

### DIMENSIONS IN MM [INCH]

For reference only, consult Ashcroft for specific dimensional drawings

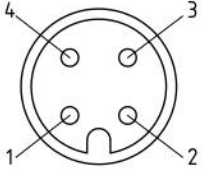
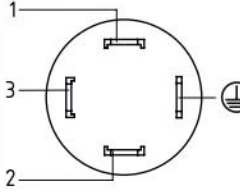
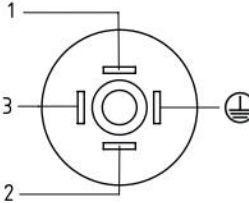


Find dimension "X" and "SW" on page 2 at table 3 "PRESSURE CONNECTION DIMENSION"



## KM11 Pressure Transducer

### ELECTRICAL CONNECTION

PLUG M12X1 TYPE S763	CABLE	HIRSCHMANN EN 175301-803 FORM A	HIRSCHMANN EN 175301-803 FORM C ("MINI")
			
2-WIRE CONFIGURATION			
1: UB+ 2: nc 3: out 4: nc	red: UB+ black: nc white: out	1: UB+ 2: out 3: nc Ⓧ: nc	1: UB+ 2: out 3: nc Ⓧ: nc
3-WIRE CONFIGURATION			
1: UB+ 2: nc 3: UB- 4: out	red: UB+ black: UB- white: out	1: UB+ 2: UB- 3: out Ⓧ: nc	1: UB+ 2: UB- 3: out Ⓧ: nc



## 6.2 Ficha técnica KX1 KXK EN

# Pressure transducer model KX1 and KXK

Complete stainless steel thin film sensor without internal liquid filling  
Accuracy 0,25 %, 0,5 % and 1 % F.S.

## Features

- Rugged stainless steel construction
- High overpressure limits
- High shock and vibration stability
- Excellent long term stability
- Protection IP65, IP67 and IP68

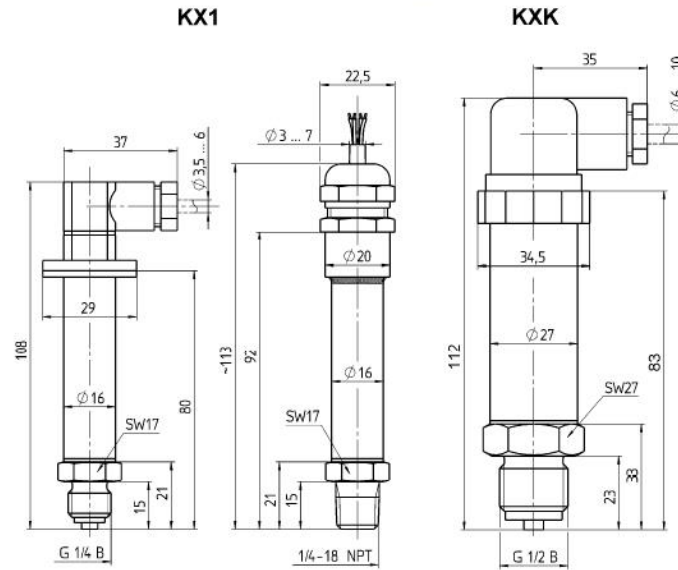
## Ranges

-1 ... 0 bar up to 0 ... 1400 bar  
-30 in. Hg ... 0 psi up to 0 ... 20.000 psi



Technical specifications	KX1	KXK
Measuring principle	Polysilicon thin film technology	
Range in bar	1 1,6 2,5 4 6 10 16 25 40 60 100 160 250 400 600 1000 1400	
Overpressure limit in bar	6 6 6 10 14 20 40 70 100 138 200 304 525 640 900 1200 1680	
Pressure type	Gauge, vacuum and compound	
Process connection	G 1/4 B male according EN 837-1 1/4 NPT male according ANSI/ASME B1.20.1/EN 837-1 9/16-18 UNF-2B Aminco (high pressure)  Others on request (for pressure limitations see order information)	G 1/2 B male according EN 837-1 1/2 NPT male according ANSI/ASME B1.20.1
Material		
Process connection	Stainless steel 316Ti (1.4571)	
Sensor	Stainless steel 1.4542/1.4548 (17-4PH) with polysilicon cell	
Case	Stainless steel 304L (1.4306)	Stainless steel 304 (1.4301)
Power supply	12 ... 30 VDC	10 ... 30VDC
Output signal	4 ... 20 mA, 2-wire	0 ... 10 VDC, 3-wire 0 ... 5 VDC, 3-wire 1 ... 5/6 VDC, 3-wire
Maximum loop resistance for 4 ... 20 mA	$\leq (U_B - 9,5 V) / 0,02 A$	$\leq (U_B - 9 V) / 0,02 A$
Isolation between case and electrical connection	> 1 M $\Omega$ at 50 VDC	
Isolation voltage	350 VAC	
Supply current	Max. 5 mA for VDC output, 20 mA for 4 ... 20 mA output signal	
Accuracy according DIN 16 086 (terminal point)	0,5 % F.S. <sup>1)</sup> 0,25 % F.S. <sup>1)2)</sup> <sup>1)</sup> not for range 1 bar, 1,6 bar, 2,5 bar, 600 bar, 1000 bar and 1400 bar <sup>2)</sup> not for option HD1	1 % F.S.
Repeatability	$\leq \pm 0,03$ % F.S.	
Response time (10 ... 90 %)	$\leq 1$ ms	
Permissible		
Operation temperature	-30 ... 85 °C	
Medium temperature	-30 ... 100 °C	
Storage temperature	-40 ... 100 °C	
Compensated temperature	-20 ... 70 °C	
Temperature influence	$\pm 0,3$ % / 10 K from 0 ... 50 °C (ref. 20 °C)	
Shock resistance	At 100 g / 20 ms $\leq 0,05$ % F.S.	
Vibration	$\leq 0,1$ % F.S. for 0 ... 2000 Hz, 20 g in all directions according IEC 770	
Noise of output signal	$\leq 0,02$ % F.S.	
CE-mark/EMC	Emission according EN 50 081-1 (March 1993), immunity according EN 50 082-2 (March 1995)	
Electrical connection	4 PIN angle connector series M Cable connection Bendix 4 PIN, Amphenol 4 PIN	4 PIN angle connector according DIN EN 175301-803 Cable connection
Protection according EN 60 529/IEC 529	IP65, IP67 for KX1 with Bendix 4 PIN, optional IP68	
Weight in kg	0,1	0,2
Accessories, options	Diaphragm seals, manifolds, digital panel meter	

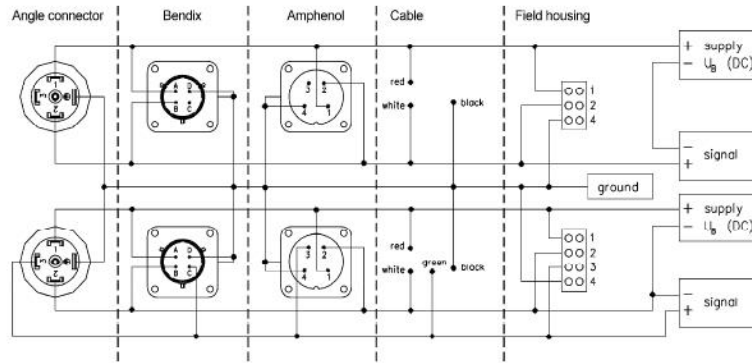
### General dimensions in mm



### Electrical connection

#### 2-wire

#### 3-wire



### Order information

Type	Output signal	Accuracy	Range	Engineering units	Protection	Process connection	Electrical connection	Options								
X1	(42) 4/20 mA	(025) 0,25 % <sup>1)</sup>	-1/ 0 <sup>1)</sup>	BAR	(=) IP65	(MG2)* G 1/4 B male <sup>1)</sup>	(HM) Angle connector series M	(NH) Tagging wired								
		(050) 0,50 % <sup>1)</sup>	-1/ 1,5 <sup>1)</sup>													
XK	(10) 0/10 VDC (05) 0/5 VDC (15) 1/5 VDC (16) 1/6 VDC (42) 4/20 mA	(100) 1,0 %	-1/ 3	psi and others on request	(IP68) IP68 (only with cable connection)	(MG4) G 1/2 B male <sup>1)</sup>	(F2) Cable connection	(6B) Cleaned for Oxygen								
			-1/ 5													
			0/ 1 <sup>1)</sup>						(M02)* 1/4 NPT male <sup>1)</sup>	(A4) Amphenol 4 PIN						
		others on request	0/ 1,6 <sup>1)</sup>													
			0/ 2,5 <sup>1)</sup>								(M04) 1/2 NPT male <sup>1)</sup>	(HD1) Optional overpressure				
			0/ 4													
			0/ 6										(F09) 9/16-18 UNF-2B Aminco (high pressure)	Specify cable lengths in m (e.g. F2-1)		
			0/ 10													
			0/ 16												Specify cable lengths in m (e.g. F2-1)	
			0/ 25													
			0/ 40													(M1) Angle connector according DIN EN 175301-803
			0/ 60													
	0/ 100	(F2) Cable connection														
	0/ 160															
	0/ 250		(A4) Amphenol 4 PIN													
	0/ 400															
	0/ 600 <sup>1)</sup>			Specify cable lengths in m (e.g. F2-1)												
	0/ 1000 <sup>1)</sup>															
	0/1400 <sup>1)</sup>															
					others on request											
					* standard connection for KX1											
					<sup>1)</sup> max. 1000 bar											

### Order example

Series	Type	Output signal	Accuracy	Range	Engineering units	Protection	Process connection	Electrical connection	Options
K	X1	42	050	0/10	BAR	=	MG2	HM	NH

### Ashcroft Instruments GmbH

Germany  
Max-Planck-Str. 1, D-52499 Baesweiler  
P.O. Box 11 20, D-52490 Baesweiler  
Tel.: +49 (0) 2401 808-0, Fax: +49 (0) 2401 808-125

France  
„206“ ZA du Mandinet, 1/3 Rue des Campanules  
F-77185 Lognes  
Tel.: +33 (0) 1 60 37 25 30, Fax: +33 (0) 1 60 37 25 39

Website: [www.ashcroft.eu](http://www.ashcroft.eu)

e-Mail: [sales@ashcroft.com](mailto:sales@ashcroft.com)

United Kingdom  
Unit 5 William James House  
Cowley Road, Cambridge CB4 0WX  
Tel.: +44 (0) 12 23 39 55 00, Fax: +44 (0) 12 23 39 55 01

### 6.3 Catálogo *o-rings* da anyseals

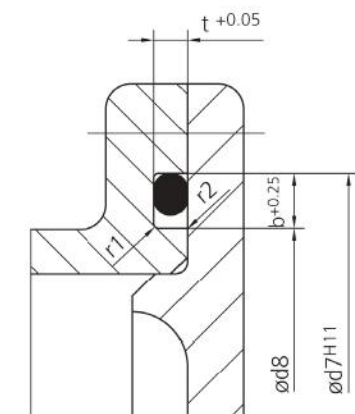
## Static sealing, axial compression

With this type of installation, the cross section of the O-ring is compressed in axial direction.

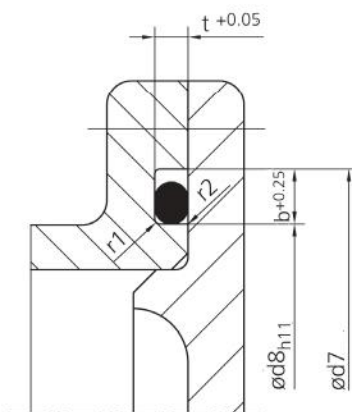
If pressure acts from inside, the O-ring should make contact at the outer diameter of the groove and be slightly compressed about 1% to maximum 3%.

If pressure acts from outside, the O-ring should make contact at the inner diameter of the groove and be stretched slightly (up to max. 6%).

static, axial pressure from inside



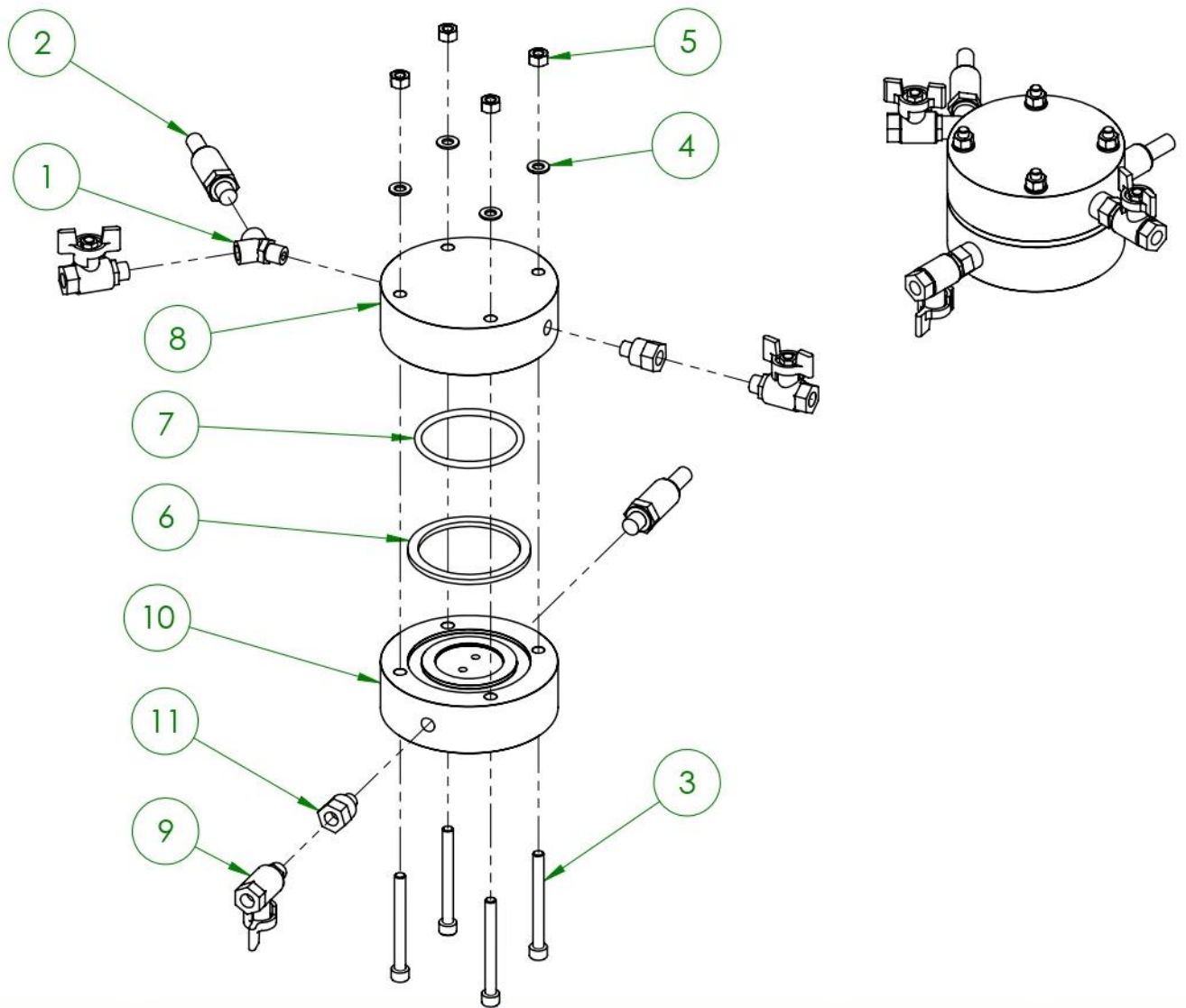
static, axial, pressure from outside



$d_2$	$t +0.05$	$b +0.25$	$r_1$	$r_2$
0.50	0.35	0.70	0.3	0.1
0.74	0.50	1.10	0.3	0.1
1.00	0.70	1.40	0.3	0.1
1.02	0.75	1.40	0.3	0.1
1.20	0.85	1.70	0.3	0.1
1.25	0.90	1.70	0.3	0.1
1.27	0.90	1.80	0.3	0.1
1.30	0.95	1.80	0.3	0.1
1.42	1.05	1.90	0.3	0.1
1.50	1.10	2.10	0.3	0.1
1.52	1.10	2.10	0.3	0.1
1.60	1.20	2.20	0.3	0.1
1.63	1.20	2.20	0.3	0.1
1.78	1.30	2.60	0.3	0.2
1.80	1.30	2.60	0.3	0.2
1.83	1.35	2.60	0.3	0.2
1.90	1.40	2.70	0.3	0.2
1.98	1.50	2.80	0.3	0.2
2.00	1.50	2.80	0.3	0.2
2.08	1.55	2.90	0.3	0.2
2.10	1.55	2.90	0.3	0.2
2.20	1.60	3.10	0.3	0.2
2.26	1.70	3.10	0.3	0.2
2.30	1.75	3.10	0.3	0.2
2.34	1.75	3.10	0.3	0.2
2.40	1.80	3.30	0.3	0.2
2.46	1.85	3.40	0.3	0.2
2.50	1.90	3.40	0.3	0.2
2.60	2.00	3.50	0.3	0.2
2.62	2.00	3.60	0.3	0.2
2.65	2.00	3.70	0.3	0.2
2.70	2.05	3.70	0.3	0.2
2.80	2.10	3.90	0.3	0.2
2.92	2.20	4.00	0.3	0.2
2.95	2.20	4.00	0.3	0.2
3.00	2.30	4.00	0.3	0.2
3.10	2.40	4.10	0.6	0.2
3.50	2.70	4.80	0.6	0.2
3.53	2.70	4.80	0.6	0.2
3.55	2.70	4.90	0.6	0.2
3.60	2.80	5.00	0.6	0.2
3.70	2.90	5.10	0.6	0.2
4.00	3.10	5.40	0.6	0.2
4.30	3.40	5.80	0.6	0.2

<b>d<sub>2</sub></b>	<b>t +0.05</b>	<b>b +0.25</b>	<b>r<sub>1</sub></b>	<b>r<sub>2</sub></b>
4.50	3.50	6.00	0.6	0.2
5.00	4.00	6.60	0.6	0.2
5.30	4.30	7.10	0.6	0.2
5.33	4.30	7.10	0.6	0.2
5.50	4.40	7.40	0.6	0.2
5.70	4.60	7.50	0.6	0.2
6.00	4.90	7.80	0.6	0.2
6.50	5.30	8.50	1.0	0.2
6.99	5.70	9.60	1.0	0.2
7.00	5.70	9.60	1.0	0.2
7.50	6.20	10.10	1.0	0.2
8.00	6.60	10.70	1.0	0.2
8.40	7.00	11.10	1.0	0.2
8.50	7.10	11.30	1.0	0.2
9.00	7.60	11.80	1.0	0.2
9.50	8.10	12.40	1.0	0.2
10.00	8.50	13.10	1.0	0.2
10.50	8.90	13.70	1.0	0.2
11.00	9.40	14.30	1.0	0.2
11.50	9.90	14.80	1.0	0.2
12.00	10.40	15.40	1.0	0.2
12.50	10.80	16.00	1.5	0.2
13.00	11.30	16.60	1.5	0.2
13.50	11.80	17.20	1.5	0.2
14.00	12.20	17.80	1.5	0.2
14.50	12.70	18.40	1.5	0.2
15.00	13.20	19.10	1.5	0.2
13.50	11.80	17.20	1.5	0.2
14.00	12.20	17.80	1.5	0.2
14.50	12.70	18.40	1.5	0.2
15.00	13.20	19.10	1.5	0.2

## 6.4 Desenho conjunto



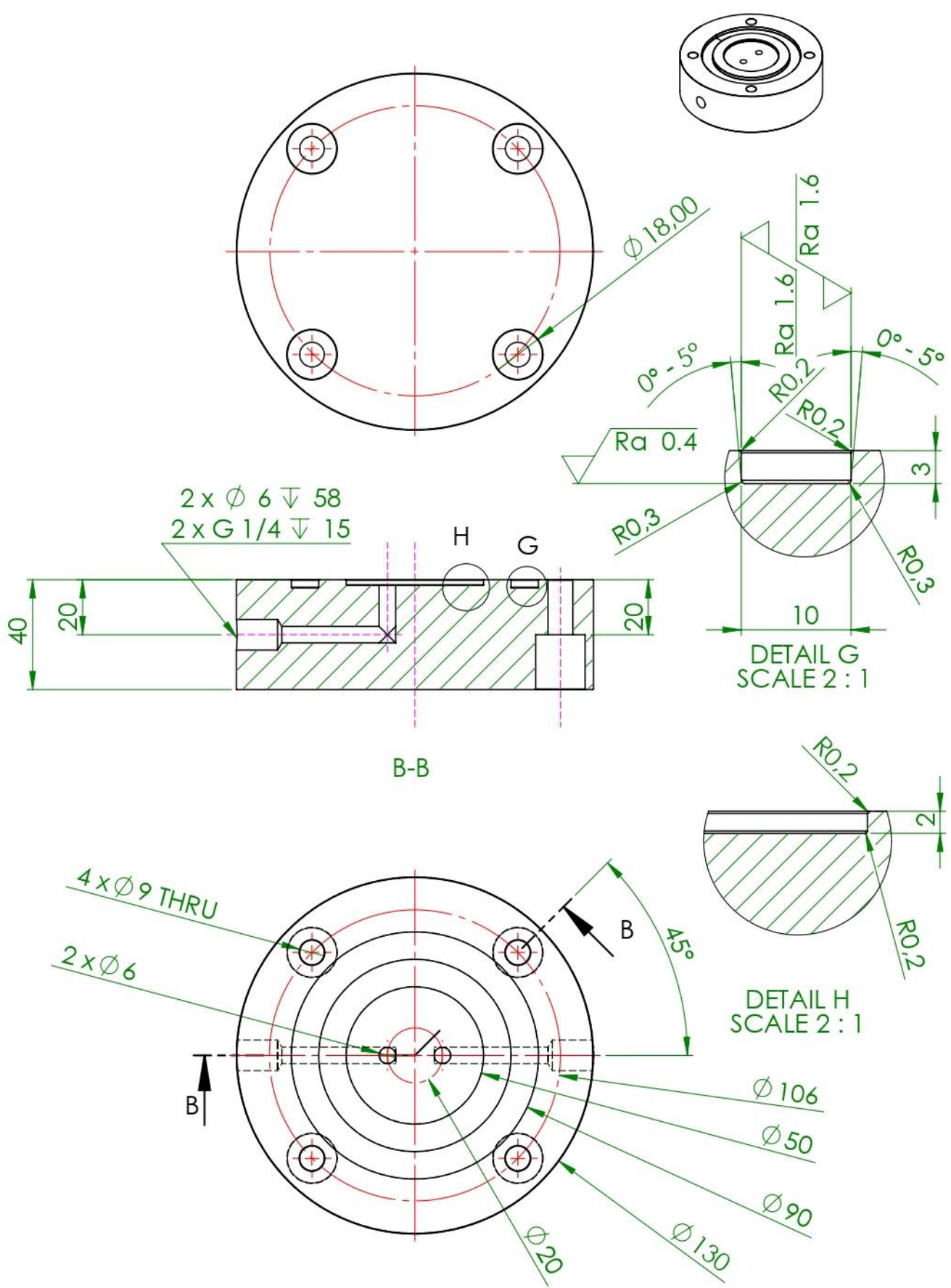
ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Y de ligação		1
2	Transdutor de pressão		2
3	Parafuso CHC ISO 4762 M8 x 80 - 8.8		4
4	Anilha ISO 7089 - 8		4
5	Porca hexagonal ISO - 4034 - M8 - N		4
6	Junta de vedação plana de borracha 90 x 75 x 4		1
7	O-ring 70 x 5 mm		1
8	Câmara superior		1
9	Válvulas		3
10	Câmara inferior		1
11	Espaçador		2

ESCALA  
1:5

Toleranciamento:  
Tolerâncias gerais:  
Rugosidades gerais:

Pessoa responsável Rui Fernandes	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento	Estado do documento			
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Título Setup de permeabilidade	Número 1			
			Revisão	Data de edição	Lingua PT	Folha 1/1

#### 6.4.1 Desenho da câmara inferior



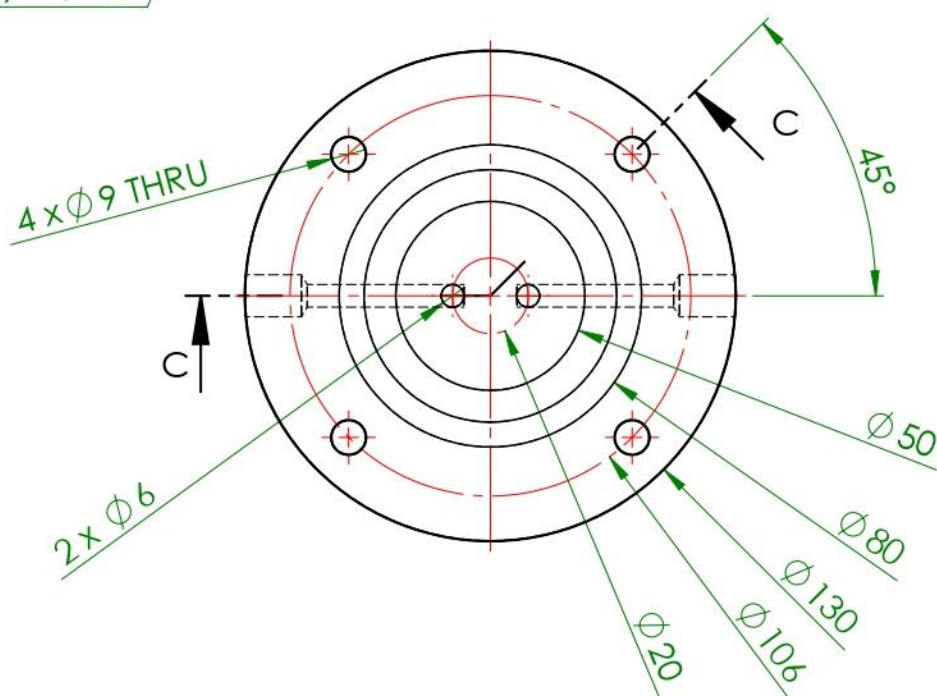
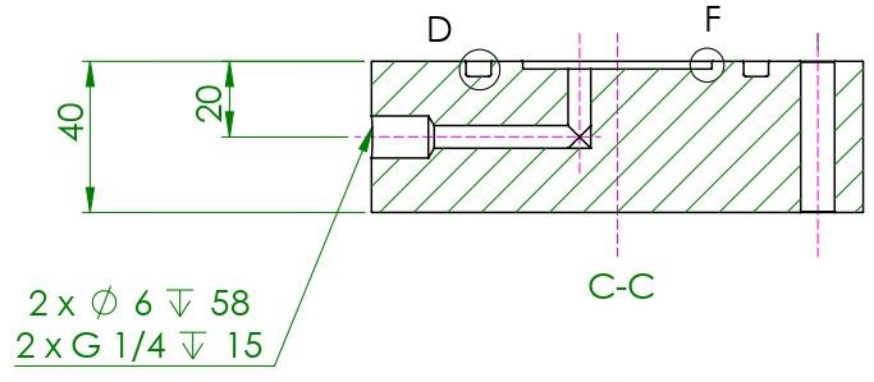
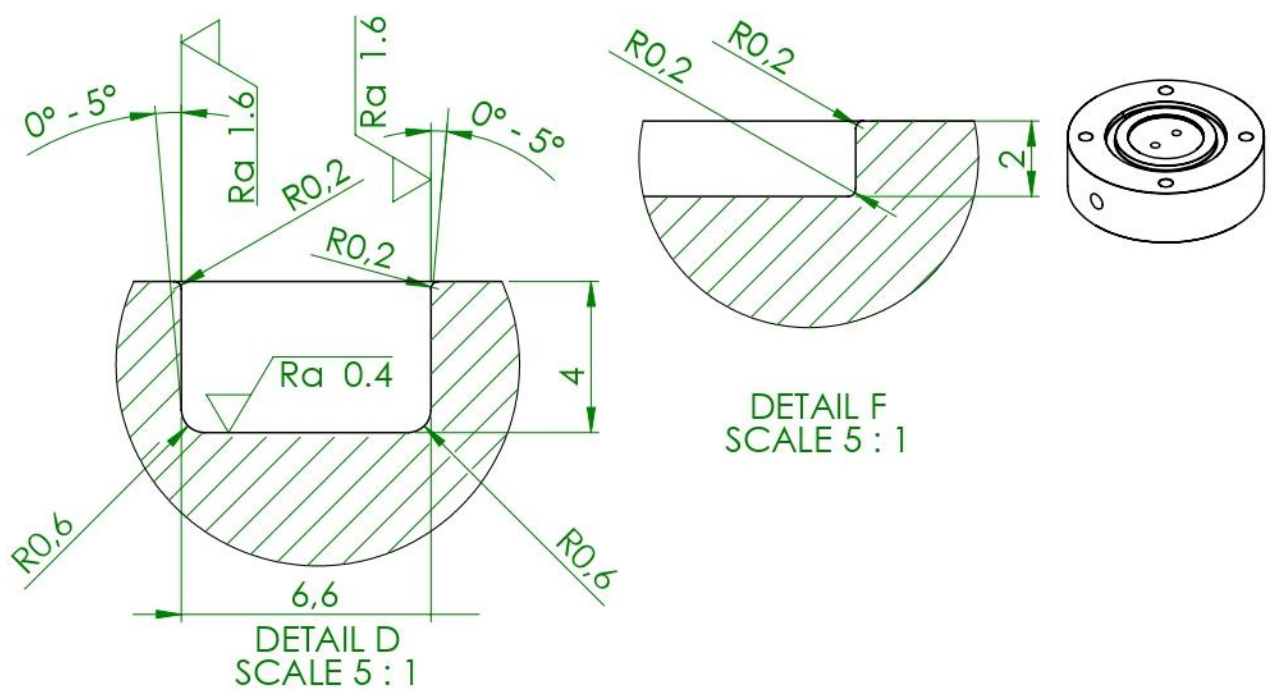
ESCALA  
1:2

Os furos horizontais e verticais na secção B encontram-se  
As arestas são todas quebradas  
A medida G 1/4 é roscado

Toleranciamento: ISO 8015  
Tolerâncias gerais: ISO 2768-m K  
Rugosidades gerais: ISO 1302

Pessoa responsável Rui Fernandes	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento		Estado do documento			
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Título Câmara inferior		Número 2			
Material AÇO		Quantidade 1	Revisão	Data de edição	Língua PT	Folha 1/1	

#### 6.4.2 Desenho da câmara superior



ESCALA  
1:2

Os furos horizontais e verticais na secção C encontram-se  
As arestas são todas quebradas  
A medida G 1/4 é roscado

Toleranciamento: ISO 8015  
Tolerâncias gerais: ISO 2768-m K  
Rugosidades gerais: ISO 1302

Pessoa responsável Rui Fernandes	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento		Estado do documento			
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Título Câmara superior		Número			
Material AÇO		Quantidade 1		Revisão	Data de edição	Lingua PT	Folha 1/1

## 6.5 Dados do registador de dados

### 6.5.1 Ensaio do material compósito (PA6 com fibras de carbono) com ar comprimido

Tempo (hh:mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)	Tempo (hh:mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)
00:00:00	0,0854	6,8987	00:52:00	0,0938	6,8702
00:01:00	0,093	6,8778	00:53:00	0,0937	6,8705
00:02:00	0,0933	6,8766	00:54:00	0,0938	6,8705
00:03:00	0,0927	6,8765	00:55:00	0,0935	6,8703
00:04:00	0,0933	6,8765	00:56:00	0,0936	6,8699
00:05:00	0,0935	6,8761	00:57:00	0,0938	6,8699
00:06:00	0,0935	6,8752	00:58:00	0,0933	6,8705
00:07:00	0,0937	6,8753	00:59:00	0,0935	6,8705
00:08:00	0,0936	6,8743	01:00:00	0,0933	6,8702
00:09:00	0,0934	6,8744	01:01:00	0,0936	6,8702
00:10:00	0,0936	6,8741	01:02:00	0,0936	6,8702
00:11:00	0,0932	6,8743	01:03:00	0,0939	6,8699
00:12:00	0,0936	6,8745	01:04:00	0,0937	6,8702
00:13:00	0,0934	6,8744	01:05:00	0,0937	6,87
00:14:00	0,0931	6,8741	01:06:00	0,0936	6,8698
00:15:00	0,0937	6,8736	01:07:00	0,094	6,8696
00:16:00	0,0933	6,8733	01:08:00	0,0935	6,8694
00:17:00	0,0932	6,8739	01:09:00	0,0937	6,8694
00:18:00	0,0938	6,8737	01:10:00	0,0937	6,8697
00:19:00	0,0935	6,8732	01:11:00	0,0936	6,8693
00:20:00	0,0934	6,8735	01:12:00	0,0935	6,8692
00:21:00	0,0934	6,873	01:13:00	0,0936	6,8689
00:22:00	0,0937	6,8727	01:14:00	0,0941	6,8697
00:23:00	0,0936	6,8729	01:15:00	0,0941	6,869
00:24:00	0,0935	6,8729	01:16:00	0,0937	6,869
00:25:00	0,0935	6,8727	01:17:00	0,0938	6,8687
00:26:00	0,0937	6,8727	01:18:00	0,0941	6,8684
00:27:00	0,0936	6,8725	01:19:00	0,0937	6,8689
00:28:00	0,0935	6,8729	01:20:00	0,094	6,8686
00:29:00	0,0936	6,8723	01:21:00	0,0942	6,8679
00:30:00	0,0934	6,8728	01:22:00	0,0937	6,8684
00:31:00	0,0937	6,8716	01:23:00	0,0934	6,868
00:32:00	0,0935	6,8722	01:24:00	0,0938	6,8684
00:33:00	0,0935	6,8724	01:25:00	0,0934	6,8684
00:34:00	0,0938	6,8719	01:26:00	0,0935	6,8681
00:35:00	0,0935	6,8722	01:27:00	0,0938	6,8682
00:36:00	0,0935	6,8716	01:28:00	0,0939	6,8678
00:37:00	0,0936	6,8714	01:29:00	0,0935	6,8679
00:38:00	0,0933	6,872	01:30:00	0,0936	6,8678
00:39:00	0,0935	6,8714	01:31:00	0,0939	6,8683
00:40:00	0,0933	6,871	01:32:00	0,0937	6,8675
00:41:00	0,0935	6,8715	01:33:00	0,0938	6,8677
00:42:00	0,0938	6,8713	01:34:00	0,0938	6,8684
00:43:00	0,0935	6,8716	01:35:00	0,0943	6,8676
00:44:00	0,0934	6,8707	01:36:00	0,0941	6,8676
00:45:00	0,0934	6,871	01:37:00	0,0943	6,8676
00:46:00	0,0935	6,8713	01:38:00	0,094	6,8684
00:47:00	0,0937	6,871	01:39:00	0,0944	6,8677
00:48:00	0,0935	6,8718	01:40:00	0,0947	6,8677
00:49:00	0,0937	6,8708	01:41:00	0,0942	6,8678
00:50:00	0,0936	6,8706	01:42:00	0,0945	6,8672
00:51:00	0,0937	6,8701	01:43:00	0,094	6,8671

Tempo (hh:mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)	Tempo (hh:mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)
01:44:00	0,0944	6,8671	02:36:00	0,0946	6,8638
01:45:00	0,0945	6,8669	02:37:00	0,0951	6,8639
01:46:00	0,0946	6,867	02:38:00	0,0945	6,8634
01:47:00	0,0938	6,8669	02:39:00	0,0946	6,864
01:48:00	0,0942	6,8669	02:40:00	0,0949	6,8644
01:49:00	0,0945	6,8666	02:41:00	0,095	6,8639
01:50:00	0,0944	6,8671	02:42:00	0,0953	6,8642
01:51:00	0,0941	6,8667	02:43:00	0,095	6,8637
01:52:00	0,0943	6,8665	02:44:00	0,0949	6,8639
01:53:00	0,094	6,8665	02:45:00	0,0944	6,8635
01:54:00	0,0944	6,8663	02:46:00	0,0941	6,8635
01:55:00	0,0942	6,8663	02:47:00	0,095	6,8634
01:56:00	0,0945	6,867	02:48:00	0,0945	6,8632
01:57:00	0,0945	6,8664	02:49:00	0,0947	6,8634
01:58:00	0,0947	6,867	02:50:00	0,0949	6,8631
01:59:00	0,0943	6,8663	02:51:00	0,095	6,8633
02:00:00	0,0944	6,866	02:52:00	0,0947	6,863
02:01:00	0,0949	6,8659	02:53:00	0,0945	6,8632
02:02:00	0,0937	6,8664	02:54:00	0,0948	6,8631
02:03:00	0,0947	6,8662	02:55:00	0,095	6,8633
02:04:00	0,0945	6,8661	02:56:00	0,0946	6,8631
02:05:00	0,0942	6,8661	02:57:00	0,0947	6,8634
02:06:00	0,0941	6,8665	02:58:00	0,0949	6,8629
02:07:00	0,0948	6,8663	02:59:00	0,0946	6,8632
02:08:00	0,0942	6,866	03:00:00	0,095	6,8626
02:09:00	0,094	6,8661	03:01:00	0,0946	6,8621
02:10:00	0,0943	6,8658	03:02:00	0,095	6,8623
02:11:00	0,0943	6,8661	03:03:00	0,0946	6,8626
02:12:00	0,0946	6,8665	03:04:00	0,095	6,863
02:13:00	0,0937	6,8656	03:05:00	0,0947	6,8623
02:14:00	0,0936	6,8655	03:06:00	0,0951	6,8633
02:15:00	0,0943	6,866	03:07:00	0,0947	6,862
02:16:00	0,0945	6,8657	03:08:00	0,0951	6,8621
02:17:00	0,0942	6,8654	03:09:00	0,0951	6,8623
02:18:00	0,0944	6,8649	03:10:00	0,0948	6,8624
02:19:00	0,0946	6,8653	03:11:00	0,0951	6,8626
02:20:00	0,0943	6,8655	03:12:00	0,0949	6,8617
02:21:00	0,0945	6,8656	03:13:00	0,0959	6,8623
02:22:00	0,0942	6,8651	03:14:00	0,095	6,8622
02:23:00	0,094	6,8653	03:15:00	0,0951	6,8622
02:24:00	0,0949	6,865	03:16:00	0,0953	6,862
02:25:00	0,0945	6,865	03:17:00	0,0951	6,8623
02:26:00	0,0949	6,8647	03:18:00	0,0959	6,8616
02:27:00	0,0945	6,8649	03:19:00	0,0949	6,8614
02:28:00	0,0948	6,8641	03:20:00	0,0952	6,862
02:29:00	0,095	6,8645	03:21:00	0,0947	6,8629
02:30:00	0,0948	6,8647	03:22:00	0,0952	6,8626
02:31:00	0,0945	6,8635	03:23:00	0,095	6,8616
02:32:00	0,0946	6,8646	03:24:00	0,0952	6,861
02:33:00	0,0943	6,8637	03:25:00	0,0949	6,8621
02:34:00	0,0945	6,8637	03:26:00	0,095	6,8618
02:35:00	0,095	6,8636	03:27:00	0,0948	6,8618

Tempo (hh:mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)	Tempo (hh:mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)
03:28:00	0,0952	6,8616	04:20:00	0,0963	6,8586
03:29:00	0,0956	6,8615	04:21:00	0,0966	6,8584
03:30:00	0,0955	6,8612	04:22:00	0,0962	6,8582
03:31:00	0,0955	6,8613	04:23:00	0,0963	6,8589
03:32:00	0,0958	6,8612	04:24:00	0,0963	6,8589
03:33:00	0,0954	6,8612	04:25:00	0,0964	6,8587
03:34:00	0,0951	6,8612	04:26:00	0,096	6,858
03:35:00	0,0951	6,8615	04:27:00	0,0965	6,8583
03:36:00	0,096	6,8616	04:28:00	0,0962	6,8584
03:37:00	0,0956	6,8613	04:29:00	0,0965	6,8579
03:38:00	0,0959	6,861	04:30:00	0,0965	6,8581
03:39:00	0,096	6,8609	04:31:00	0,0966	6,8581
03:40:00	0,0962	6,8611	04:32:00	0,0968	6,8579
03:41:00	0,0961	6,861	04:33:00	0,0968	6,8577
03:42:00	0,0963	6,8611	04:34:00	0,0963	6,8578
03:43:00	0,095	6,8612	04:35:00	0,0964	6,8573
03:44:00	0,0962	6,8609	04:36:00	0,0961	6,8577
03:45:00	0,0962	6,8603	04:37:00	0,0962	6,858
03:46:00	0,0953	6,8605	04:38:00	0,0965	6,8576
03:47:00	0,0954	6,861	04:39:00	0,0961	6,8576
03:48:00	0,0954	6,8607	04:40:00	0,0962	6,8574
03:49:00	0,0953	6,8614	04:41:00	0,096	6,8573
03:50:00	0,0959	6,8602	04:42:00	0,0963	6,8575
03:51:00	0,0961	6,8605	04:43:00	0,0964	6,8577
03:52:00	0,0954	6,8612	04:44:00	0,0962	6,8571
03:53:00	0,0954	6,8608	04:45:00	0,0961	6,8572
03:54:00	0,096	6,8605	04:46:00	0,0964	6,8576
03:55:00	0,0963	6,8606	04:47:00	0,0964	6,8565
03:56:00	0,0965	6,8604	04:48:00	0,0967	6,8564
03:57:00	0,0961	6,8602	04:49:00	0,0964	6,8563
03:58:00	0,0967	6,8598	04:50:00	0,0964	6,8564
03:59:00	0,0964	6,8603	04:51:00	0,0961	6,8564
04:00:00	0,0955	6,8598	04:52:00	0,0966	6,8565
04:01:00	0,0966	6,8594	04:53:00	0,0963	6,8562
04:02:00	0,0959	6,8601	04:54:00	0,0967	6,8569
04:03:00	0,0964	6,8598	04:55:00	0,0963	6,8566
04:04:00	0,0962	6,8591	04:56:00	0,0963	6,8563
04:05:00	0,0962	6,8594	04:57:00	0,0965	6,8565
04:06:00	0,0958	6,8598	04:58:00	0,0967	6,8563
04:07:00	0,0968	6,8595	04:59:00	0,0959	6,8561
04:08:00	0,0962	6,8595	05:00:00	0,0964	6,8564
04:09:00	0,0963	6,859	05:01:00	0,0959	6,8564
04:10:00	0,0964	6,8593	05:02:00	0,0965	6,8572
04:11:00	0,0965	6,8595	05:03:00	0,0962	6,8563
04:12:00	0,0964	6,8594	05:04:00	0,0963	6,8557
04:13:00	0,0966	6,8594	05:05:00	0,0968	6,8558
04:14:00	0,0965	6,8592	05:06:00	0,0964	6,8564
04:15:00	0,0964	6,8594	05:07:00	0,0966	6,856
04:16:00	0,0967	6,8589	05:08:00	0,0962	6,8559
04:17:00	0,0966	6,8595	05:09:00	0,0962	6,8561
04:18:00	0,0967	6,8587	05:10:00	0,0962	6,856
04:19:00	0,0961	6,8585	05:11:00	0,0963	6,8564

Tempo (hh:mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)	Tempo (hh:mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)
05:12:00	0,0965	6,8558	06:04:00	0,0965	6,8528
05:13:00	0,096	6,8554	06:05:00	0,0969	6,8529
05:14:00	0,0963	6,8561	06:06:00	0,0971	6,8532
05:15:00	0,0965	6,8557	06:07:00	0,0965	6,8528
05:16:00	0,0963	6,8549	06:08:00	0,0967	6,8522
05:17:00	0,0964	6,8554	06:09:00	0,0972	6,8525
05:18:00	0,0961	6,8552	06:10:00	0,0966	6,8528
05:19:00	0,0963	6,8556	06:11:00	0,0974	6,8529
05:20:00	0,0961	6,8553	06:12:00	0,0968	6,8535
05:21:00	0,0964	6,8549	06:13:00	0,0967	6,8526
05:22:00	0,0964	6,855	06:14:00	0,0966	6,8524
05:23:00	0,0963	6,8553	06:15:00	0,0966	6,8525
05:24:00	0,0957	6,8549	06:16:00	0,0972	6,8524
05:25:00	0,0965	6,8547	06:17:00	0,0977	6,8518
05:26:00	0,0964	6,8553	06:18:00	0,0968	6,8516
05:27:00	0,0965	6,8551	06:19:00	0,0974	6,852
05:28:00	0,0966	6,8546	06:20:00	0,0969	6,8519
05:29:00	0,0966	6,855	06:21:00	0,0971	6,8519
05:30:00	0,0965	6,8545	06:22:00	0,0972	6,8523
05:31:00	0,0968	6,855	06:23:00	0,0971	6,8517
05:32:00	0,0963	6,8547	06:24:00	0,0972	6,8514
05:33:00	0,0964	6,8545	06:25:00	0,0974	6,8516
05:34:00	0,0965	6,8543	06:26:00	0,0972	6,852
05:35:00	0,0968	6,854	06:27:00	0,0973	6,8522
05:36:00	0,0964	6,8546	06:28:00	0,097	6,8519
05:37:00	0,0966	6,854	06:29:00	0,0975	6,8517
05:38:00	0,0966	6,8544	06:30:00	0,0977	6,852
05:39:00	0,0966	6,8535	06:31:00	0,0971	6,8516
05:40:00	0,0967	6,8538	06:32:00	0,0975	6,8514
05:41:00	0,0966	6,8539	06:33:00	0,0977	6,8518
05:42:00	0,0965	6,8541	06:34:00	0,0975	6,8519
05:43:00	0,0968	6,8545	06:35:00	0,0972	6,8517
05:44:00	0,0962	6,8544	06:36:00	0,098	6,8511
05:45:00	0,0969	6,8535	06:37:00	0,0971	6,8516
05:46:00	0,0966	6,8539	06:38:00	0,0972	6,8506
05:47:00	0,0969	6,8541	06:39:00	0,0974	6,851
05:48:00	0,0968	6,8543	06:40:00	0,0975	6,8507
05:49:00	0,0968	6,8537	06:41:00	0,0975	6,8512
05:50:00	0,0966	6,8546	06:42:00	0,0974	6,8512
05:51:00	0,0966	6,854	06:43:00	0,097	6,8507
05:52:00	0,0966	6,8539	06:44:00	0,0978	6,8509
05:53:00	0,0964	6,8538	06:45:00	0,0974	6,8505
05:54:00	0,0964	6,8537	06:46:00	0,0973	6,8506
05:55:00	0,0964	6,8536	06:47:00	0,0973	6,8499
05:56:00	0,0965	6,8536	06:48:00	0,0976	6,8508
05:57:00	0,0965	6,8534	06:49:00	0,0974	6,8501
05:58:00	0,0965	6,8531	06:50:00	0,097	6,8508
05:59:00	0,0964	6,8528	06:51:00	0,0976	6,8508
06:00:00	0,0965	6,8524	06:52:00	0,0973	6,8499
06:01:00	0,0963	6,8533	06:53:00	0,097	6,85
06:02:00	0,0962	6,8536	06:54:00	0,0979	6,85
06:03:00	0,0973	6,8528	06:55:00	0,0977	6,8502

Tempo (hh:mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)	Tempo (hh:mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)
06:56:00	0,0968	6,8499	07:17:00	0,0975	6,8486
06:57:00	0,0971	6,8501	07:18:00	0,0976	6,8486
06:58:00	0,097	6,85	07:19:00	0,0978	6,8491
06:59:00	0,0972	6,85	07:20:00	0,0974	6,8487
07:00:00	0,0979	6,8499	07:21:00	0,0978	6,8488
07:01:00	0,0974	6,8496	07:22:00	0,0978	6,8486
07:02:00	0,0972	6,8501	07:23:00	0,0975	6,8484
07:03:00	0,0974	6,85	07:24:00	0,0977	6,8482
07:04:00	0,0975	6,8492	07:25:00	0,0971	6,8486
07:05:00	0,0974	6,8495	07:26:00	0,0975	6,8487
07:06:00	0,097	6,8502	07:27:00	0,0973	6,8477
07:07:00	0,097	6,8494	07:28:00	0,0969	6,848
07:08:00	0,0977	6,8493	07:29:00	0,0968	6,8484
07:09:00	0,0974	6,85	07:30:00	0,0971	6,8482
07:10:00	0,0971	6,8494	07:31:00	0,0973	6,8477
07:11:00	0,0971	6,8497	07:32:00	0,0968	6,848
07:12:00	0,0976	6,8488	07:33:00	0,0974	6,8476
07:13:00	0,0976	6,8489	07:34:00	0,0965	6,8473
07:14:00	0,0977	6,8488	07:35:00	0,0967	6,8471
07:15:00	0,097	6,8494	07:36:00	0,0967	6,8473
07:16:00	0,0976	6,8493			

## 6.5.2 Ensaio de duas mantas de teflon com ar comprimido

Tempo (mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)	Tempo (hh:mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)
00:00	0,0077	0,0258	03:28	0,1391	4,9269
00:04	0,0075	0,0258	03:32	0,1397	4,9266
00:08	0,0068	0,0258	03:36	0,1408	4,927
00:12	0,009	0,0258	03:40	0,1413	4,9264
00:16	0,0095	0,0258	03:44	0,142	4,9264
00:20	0,011	0,0258	03:48	0,1429	4,9264
00:24	0,0112	0,0258	03:52	0,1434	4,9259
00:28	0,0121	0,0258	03:56	0,1441	4,9255
00:32	0,0797	2,1006	04:00	0,1446	4,9253
00:36	0,1192	4,9356	04:04	0,146	4,9255
00:40	0,1197	4,9228	04:08	0,1461	4,9256
00:44	0,1206	4,9115	04:12	0,1477	4,9242
00:48	0,1201	4,9039	04:16	0,148	4,924
00:52	0,1198	4,8989	04:20	0,1489	4,9237
00:56	0,1192	4,8949	04:24	0,1499	4,9239
01:00	0,1199	4,8912	04:28	0,1498	4,9237
01:04	0,1202	4,8881	04:32	0,1514	4,9231
01:08	0,1193	4,8848	04:36	0,1514	4,9225
01:12	0,1191	4,8825	04:40	0,1516	4,9218
01:16	0,1201	4,8805	04:44	0,1531	4,9221
01:20	0,1202	4,8787	04:48	0,1546	4,9219
01:24	0,1206	4,8761	04:52	0,1549	4,9214
01:28	0,1196	4,8775	04:56	0,1554	4,9204
01:32	0,1202	4,8819	05:00	0,1566	4,9199
01:36	0,1206	4,8933	05:04	0,1572	4,9197
01:40	0,1217	4,9008	05:08	0,1582	4,9191
01:44	0,1217	4,9026	05:12	0,1596	4,9182
01:48	0,1215	4,905	05:16	0,1599	4,918
01:52	0,1221	4,9062	05:20	0,161	4,9171
01:56	0,1237	4,9076	05:24	0,1615	4,9168
02:00	0,1244	4,9077	05:28	0,163	4,9161
02:04	0,1249	4,9096	05:32	0,1635	4,9165
02:08	0,1249	4,9162	05:36	0,1642	4,9158
02:12	0,1263	4,9171	05:40	0,165	4,915
02:16	0,1272	4,9188	05:44	0,1662	4,9148
02:20	0,1274	4,9205	05:48	0,1669	4,9136
02:24	0,1285	4,9204	05:52	0,168	4,9138
02:28	0,1292	4,9221	05:56	0,1684	4,912
02:32	0,1292	4,9227	06:00	0,1696	4,9124
02:36	0,1301	4,9245	06:04	0,1698	4,9124
02:40	0,131	4,924	06:08	0,1716	4,9115
02:44	0,1317	4,9255	06:12	0,1718	4,9109
02:48	0,1326	4,9252	06:16	0,1732	4,91
02:52	0,1326	4,9259	06:20	0,1738	4,9099
02:56	0,1337	4,9265	06:24	0,1749	4,9085
03:00	0,1346	4,9263	06:28	0,175	4,9079
03:04	0,1348	4,926	06:32	0,1765	4,9071
03:08	0,1359	4,926	06:36	0,1767	4,9069
03:12	0,1359	4,9261	06:40	0,1781	4,9062
03:16	0,1373	4,9266	06:44	0,179	4,9056
03:20	0,1376	4,9264	06:48	0,1801	4,9056
03:24	0,1386	4,9263	06:52	0,1804	4,9042

Tempo (mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)	Tempo (hh:mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)
06:56	0,1815	4,9037	10:24	0,2283	4,8717
07:00	0,182	4,9044	10:28	0,23	4,8708
07:04	0,1837	4,9031	10:32	0,2305	4,8702
07:08	0,1842	4,9026	10:36	0,2317	4,8693
07:12	0,1852	4,9023	10:40	0,2325	4,8689
07:16	0,1855	4,9019	10:44	0,2331	4,8684
07:20	0,1869	4,9007	10:48	0,2347	4,8674
07:24	0,1881	4,8998	10:52	0,2347	4,8665
07:28	0,1883	4,8991	10:56	0,2366	4,8667
07:32	0,1898	4,8989	11:00	0,2369	4,8655
07:36	0,1903	4,8981	11:04	0,2384	4,8645
07:40	0,191	4,8976	11:08	0,239	4,8642
07:44	0,192	4,8971	11:12	0,2403	4,8629
07:48	0,1922	4,8964	11:16	0,2419	4,8629
07:52	0,1939	4,8954	11:20	0,2423	4,8624
07:56	0,1944	4,8944	11:24	0,2433	4,8615
08:00	0,1955	4,8941	11:28	0,2439	4,8606
08:04	0,1962	4,8933	11:32	0,2443	4,8598
08:08	0,1974	4,8935	11:36	0,2447	4,8595
08:12	0,1977	4,8925	11:40	0,246	4,859
08:16	0,1986	4,8917	11:44	0,2468	4,8579
08:20	0,1996	4,8912	11:48	0,2483	4,8574
08:24	0,2003	4,8906	11:52	0,2489	4,8568
08:28	0,2018	4,8903	11:56	0,2502	4,8558
08:32	0,2024	4,8888	12:00	0,2505	4,8556
08:36	0,2036	4,8888	12:04	0,2532	4,8559
08:40	0,2041	4,8882	12:08	0,2538	4,854
08:44	0,2058	4,8879	12:12	0,2538	4,8536
08:48	0,2062	4,8867	12:16	0,2549	4,8528
08:52	0,2075	4,8871	12:20	0,2558	4,8516
08:56	0,2083	4,8861	12:24	0,2567	4,8513
09:00	0,2093	4,8852	12:28	0,2586	4,8512
09:04	0,2099	4,8847	12:32	0,2591	4,8497
09:08	0,2109	4,8839	12:36	0,2606	4,8494
09:12	0,2117	4,8835	12:40	0,2613	4,8488
09:16	0,2131	4,8823	12:44	0,2621	4,8483
09:20	0,2131	4,8818	12:48	0,2633	4,8471
09:24	0,2153	4,8813	12:52	0,2643	4,8469
09:28	0,2159	4,8807	12:56	0,2654	4,8457
09:32	0,2169	4,8794	13:00	0,2662	4,845
09:36	0,2182	4,8794	13:04	0,2671	4,8443
09:40	0,2193	4,8784	13:08	0,268	4,844
09:44	0,2201	4,8781	13:12	0,2689	4,8432
09:48	0,221	4,8782	13:16	0,2696	4,8423
09:52	0,2215	4,8768	13:20	0,2716	4,8415
09:56	0,2225	4,8761	13:24	0,2719	4,8409
10:00	0,2224	4,8751	13:28	0,2731	4,8403
10:04	0,224	4,8757	13:32	0,274	4,8399
10:08	0,2244	4,8741	13:36	0,275	4,8395
10:12	0,2256	4,8736	13:40	0,2764	4,8392
10:16	0,2269	4,8725	13:44	0,2773	4,8382
10:20	0,2276	4,8717	13:48	0,278	4,837

Tempo (mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)	Tempo (hh:mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)
13:52	0,2782	4,8365	17:20	0,3321	4,8007
13:56	0,2795	4,8362	17:24	0,3333	4,8002
14:00	0,2805	4,8354	17:28	0,3341	4,7998
14:04	0,2823	4,8346	17:32	0,3354	4,7988
14:08	0,2824	4,8335	17:36	0,3359	4,7975
14:12	0,2836	4,8326	17:40	0,3371	4,7973
14:16	0,2849	4,8324	17:44	0,338	4,7961
14:20	0,2855	4,8307	17:48	0,3391	4,7959
14:24	0,2858	4,8307	17:52	0,3404	4,7945
14:28	0,2873	4,8298	17:56	0,3411	4,7946
14:32	0,2876	4,8294	18:00	0,3426	4,7935
14:36	0,2893	4,8288	18:04	0,343	4,793
14:40	0,29	4,8285	18:08	0,3442	4,7919
14:44	0,291	4,8275	18:12	0,3455	4,7912
14:48	0,2922	4,827	18:16	0,3466	4,7908
14:52	0,293	4,8266	18:20	0,3477	4,7898
14:56	0,2943	4,8256	18:24	0,349	4,7894
15:00	0,2954	4,8249	18:28	0,3494	4,7886
15:04	0,2964	4,8241	18:32	0,351	4,788
15:08	0,297	4,8235	18:36	0,3514	4,7872
15:12	0,298	4,8228	18:40	0,3522	4,7866
15:16	0,2995	4,8228	18:44	0,3532	4,7863
15:20	0,3001	4,8214	18:48	0,3544	4,7853
15:24	0,3015	4,8214	18:52	0,3546	4,7851
15:28	0,3031	4,8205	18:56	0,3564	4,7842
15:32	0,3033	4,8195	19:00	0,3569	4,7834
15:36	0,3047	4,8183	19:04	0,3583	4,783
15:40	0,3052	4,8184	19:08	0,3598	4,7824
15:44	0,306	4,8171	19:12	0,3603	4,7809
15:48	0,3078	4,8166	19:16	0,3617	4,7809
15:52	0,3094	4,8161	19:20	0,362	4,78
15:56	0,31	4,8153	19:24	0,3634	4,7801
16:00	0,3111	4,8145	19:28	0,3648	4,7789
16:04	0,3115	4,8135	19:32	0,3653	4,7779
16:08	0,3136	4,8132	19:36	0,3669	4,7775
16:12	0,3145	4,8122	19:40	0,3677	4,7758
16:16	0,3153	4,8117	19:44	0,3683	4,7755
16:20	0,3171	4,811	19:48	0,37	4,7751
16:24	0,3181	4,8097	19:52	0,3705	4,7739
16:28	0,3188	4,8097	19:56	0,3718	4,7742
16:32	0,319	4,8087	20:00	0,3733	4,773
16:36	0,3203	4,808	20:04	0,3735	4,7722
16:40	0,321	4,8075	20:08	0,375	4,7718
16:44	0,3221	4,8073	20:12	0,3755	4,7709
16:48	0,3232	4,8057	20:16	0,3769	4,7703
16:52	0,325	4,8058	20:20	0,3789	4,7699
16:56	0,3251	4,805	20:24	0,3796	4,7691
17:00	0,3267	4,8045	20:28	0,3805	4,7683
17:04	0,3275	4,8035	20:32	0,3818	4,7674
17:08	0,3285	4,8028	20:36	0,383	4,7667
17:12	0,3289	4,8019	20:40	0,3834	4,7659
17:16	0,3311	4,8014	20:44	0,3843	4,765

Tempo (mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)	Tempo (hh:mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)
20:48	0,3855	4,7647	24:16	0,4396	4,7296
20:52	0,3865	4,7644	24:20	0,4406	4,7291
20:56	0,3882	4,7639	24:24	0,4418	4,7286
21:00	0,3887	4,7627	24:28	0,4432	4,7273
21:04	0,3902	4,7625	24:32	0,4434	4,7276
21:08	0,3909	4,7612	24:36	0,4452	4,7262
21:12	0,3918	4,7604	24:40	0,4463	4,7256
21:16	0,3928	4,7605	24:44	0,4469	4,725
21:20	0,3937	4,7601	24:48	0,448	4,7243
21:24	0,3951	4,759	24:52	0,4486	4,7236
21:28	0,3956	4,7581	24:56	0,4501	4,7228
21:32	0,3971	4,7565	25:00	0,4517	4,7219
21:36	0,3977	4,7565	25:04	0,452	4,7212
21:40	0,3989	4,7559	25:08	0,4534	4,7212
21:44	0,4002	4,7554	25:12	0,4541	4,7204
21:48	0,4007	4,7548	25:16	0,4553	4,7195
21:52	0,4023	4,7541	25:20	0,4561	4,7191
21:56	0,4034	4,7531	25:24	0,4569	4,7178
22:00	0,4042	4,7524	25:28	0,4586	4,7173
22:04	0,4058	4,7522	25:32	0,4595	4,7164
22:08	0,4066	4,7514	25:36	0,4606	4,7158
22:12	0,4075	4,7508	25:40	0,462	4,715
22:16	0,4086	4,7492	25:44	0,4636	4,7142
22:20	0,4098	4,7498	25:48	0,4635	4,7144
22:24	0,4104	4,7481	25:52	0,4641	4,7136
22:28	0,411	4,7476	25:56	0,4653	4,7129
22:32	0,4127	4,7475	26:00	0,4668	4,7118
22:36	0,4139	4,747	26:04	0,4676	4,7116
22:40	0,4146	4,7464	26:08	0,4684	4,7106
22:44	0,4161	4,7455	26:12	0,4707	4,7099
22:48	0,4172	4,7448	26:16	0,4711	4,7092
22:52	0,4179	4,7443	26:20	0,4725	4,709
22:56	0,4185	4,7432	26:24	0,4737	4,7076
23:00	0,4195	4,7426	26:28	0,474	4,7071
23:04	0,4205	4,7425	26:32	0,4755	4,7067
23:08	0,4214	4,7409	26:36	0,4759	4,7055
23:12	0,4226	4,74	26:40	0,4776	4,7047
23:16	0,4238	4,7401	26:44	0,4783	4,7045
23:20	0,4245	4,7391	26:48	0,4795	4,7032
23:24	0,426	4,7383	26:52	0,4808	4,7034
23:28	0,427	4,7377	26:56	0,4824	4,7018
23:32	0,428	4,7369	27:00	0,4829	4,7015
23:36	0,4296	4,7361	27:04	0,4839	4,7011
23:40	0,4302	4,7357	27:08	0,4847	4,7004
23:44	0,4313	4,7349	27:12	0,4861	4,6995
23:48	0,4326	4,734	27:16	0,4868	4,6996
23:52	0,4331	4,7333	27:20	0,4881	4,6983
23:56	0,4341	4,7326	27:24	0,4893	4,6973
24:00	0,4349	4,7323	27:28	0,4897	4,6972
24:04	0,4359	4,7312	27:32	0,4913	4,6963
24:08	0,4378	4,7302	27:36	0,4921	4,6959
24:12	0,4382	4,7298	27:40	0,4932	4,6954

Tempo (mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)	Tempo (hh:mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)
27:44	0,4948	4,6946	29:16	0,5178	4,6794
27:48	0,4958	4,694	29:20	0,5192	4,6779
27:52	0,4971	4,6933	29:24	0,5204	4,6774
27:56	0,498	4,692	29:28	0,5212	4,6768
28:00	0,4986	4,6922	29:32	0,5224	4,6756
28:04	0,5	4,6916	29:36	0,5236	4,6755
28:08	0,5009	4,6906	29:40	0,5243	4,6745
28:12	0,5017	4,6894	29:44	0,5256	4,6735
28:16	0,5032	4,6889	29:48	0,5265	4,6734
28:20	0,5038	4,6885	29:52	0,5276	4,6732
28:24	0,5051	4,688	29:56	0,5288	4,6722
28:28	0,506	4,6874	30:00	0,5301	4,6714
28:32	0,5066	4,6865	30:04	0,5309	4,6709
28:36	0,5081	4,6856	30:08	0,5317	4,67
28:40	0,5089	4,685	30:12	0,5331	4,669
28:44	0,5102	4,6838	30:16	0,534	4,6694
28:48	0,5109	4,6839	30:20	0,5353	4,6681
28:52	0,5125	4,6831	30:24	0,5358	4,6675
28:56	0,5132	4,6819	30:28	0,5372	4,6665
29:00	0,5141	4,6817	30:32	0,5386	4,6663
29:04	0,5154	4,6815	30:36	0,5392	4,6652
29:08	0,5165	4,6801	30:40	0,5403	4,6642
29:12	0,5176	4,6796	30:44	0,5415	4,664

---

### 6.5.3 Ensaio do material compósito (PA6 com fibras de carbono) com hélio

Tempo (hh:mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)	Tempo (hh:mm:ss)	p <sub>C.baixo</sub> (bar)	p <sub>C.cima</sub> (bar)
00:00:00	0,074	8,9643	00:34:40	0,0879	8,7705
00:00:40	0,0818	8,7995	00:35:20	0,0882	8,7702
00:01:20	0,0823	8,7971	00:36:00	0,0878	8,7706
00:02:00	0,0825	8,7939	00:36:40	0,0881	8,7709
00:02:40	0,0831	8,7918	00:37:20	0,0886	8,7704
00:03:20	0,0829	8,7907	00:38:00	0,0883	8,77
00:04:00	0,0824	8,7888	00:38:40	0,0878	8,7705
00:04:40	0,0836	8,787	00:39:20	0,088	8,7718
00:05:20	0,0842	8,7865	00:40:00	0,0883	8,7688
00:06:00	0,0847	8,7855	00:40:40	0,0877	8,7704
00:06:40	0,0846	8,7853	00:41:20	0,0881	8,7689
00:07:20	0,0846	8,7842	00:42:00	0,088	8,7708
00:08:00	0,0847	8,7839	00:42:40	0,0881	8,7694
00:08:40	0,0849	8,7823	00:43:20	0,0883	8,7701
00:09:20	0,0845	8,7814	00:44:00	0,0873	8,7688
00:10:00	0,0851	8,7819	00:44:40	0,0877	8,7686
00:10:40	0,0852	8,7814	00:45:20	0,0878	8,7674
00:11:20	0,0851	8,7811	00:46:00	0,0882	8,7675
00:12:00	0,0853	8,78	00:46:40	0,0884	8,7675
00:12:40	0,0855	8,7806	00:47:20	0,0885	8,7668
00:13:20	0,0851	8,7792	00:48:00	0,0881	8,7671
00:14:00	0,0861	8,7793	00:48:40	0,088	8,7671
00:14:40	0,0859	8,7793	00:49:20	0,0883	8,7665
00:15:20	0,0857	8,7772	00:50:00	0,0879	8,7669
00:16:00	0,086	8,7773	00:50:40	0,0886	8,7666
00:16:40	0,0867	8,7778	00:51:20	0,0885	8,766
00:17:20	0,0865	8,7778	00:52:00	0,0885	8,7658
00:18:00	0,0864	8,7764	00:52:40	0,0886	8,766
00:18:40	0,0856	8,7766	00:53:20	0,0884	8,7661
00:19:20	0,0864	8,7759	00:54:00	0,0883	8,766
00:20:00	0,0862	8,777	00:54:40	0,0884	8,7641
00:20:40	0,0863	8,7761	00:55:20	0,0885	8,7657
00:21:20	0,0868	8,7755	00:56:00	0,0882	8,7642
00:22:00	0,086	8,7757	00:56:40	0,0884	8,7646
00:22:40	0,0867	8,7752	00:57:20	0,0884	8,765
00:23:20	0,0864	8,7747	00:58:00	0,0886	8,7638
00:24:00	0,0869	8,7732	00:58:40	0,0886	8,7639
00:24:40	0,0868	8,7743	00:59:20	0,0882	8,7639
00:25:20	0,0864	8,7739	01:00:00	0,0883	8,7629
00:26:00	0,0869	8,7732	01:00:40	0,0887	8,7639
00:26:40	0,0868	8,7728	01:01:20	0,0883	8,7631
00:27:20	0,0869	8,773	01:02:00	0,088	8,7632
00:28:00	0,0869	8,7726	01:02:40	0,0882	8,7623
00:28:40	0,0872	8,773	01:03:20	0,0884	8,7628
00:29:20	0,0874	8,7733	01:04:00	0,0881	8,7617
00:30:00	0,0874	8,773	01:04:40	0,0882	8,7619
00:30:40	0,0873	8,7727	01:05:20	0,0883	8,7621
00:31:20	0,0878	8,7723	01:06:00	0,0883	8,761
00:32:00	0,0874	8,7726	01:06:40	0,0884	8,7617
00:32:40	0,0876	8,7727	01:07:20	0,0886	8,7614
00:33:20	0,0879	8,7718	01:08:00	0,0888	8,7608
00:34:00	0,0877	8,7715	01:08:40	0,0885	8,7606

Tempo (hh:mm:ss)	p C.baixo (bar)	p C.cima (bar)	Tempo (hh:mm:ss)	p C.baixo (bar)	p C.cima (bar)
01:09:20	0,0883	8,7604	01:44:00	0,0888	8,7524
01:10:00	0,0883	8,7605	01:44:40	0,089	8,7524
01:10:40	0,089	8,7605	01:45:20	0,0889	8,7527
01:11:20	0,0887	8,7603	01:46:00	0,0895	8,7526
01:12:00	0,0886	8,7598	01:46:40	0,0892	8,7511
01:12:40	0,0885	8,7603	01:47:20	0,0893	8,7525
01:13:20	0,0883	8,7597	01:48:00	0,0895	8,7508
01:14:00	0,0884	8,7598	01:48:40	0,0892	8,7523
01:14:40	0,0885	8,7598	01:49:20	0,0896	8,7511
01:15:20	0,0887	8,7595	01:50:00	0,0893	8,7508
01:16:00	0,0885	8,7595	01:50:40	0,0904	8,7515
01:16:40	0,0889	8,7592	01:51:20	0,0895	8,7495
01:17:20	0,0885	8,7591	01:52:00	0,0896	8,7494
01:18:00	0,0886	8,7584	01:52:40	0,0897	8,7499
01:18:40	0,0885	8,7582	01:53:20	0,0893	8,7503
01:19:20	0,0886	8,7586	01:54:00	0,0893	8,7497
01:20:00	0,0887	8,7581	01:54:40	0,0894	8,7499
01:20:40	0,0888	8,7573	01:55:20	0,0895	8,749
01:21:20	0,0886	8,7581	01:56:00	0,089	8,7488
01:22:00	0,0888	8,7568	01:56:40	0,0892	8,7489
01:22:40	0,0887	8,7575	01:57:20	0,0893	8,7485
01:23:20	0,089	8,7578	01:58:00	0,0894	8,7484
01:24:00	0,0888	8,7567	01:58:40	0,0892	8,7486
01:24:40	0,0887	8,7568	01:59:20	0,0894	8,7483
01:25:20	0,0888	8,7574	02:00:00	0,0893	8,7473
01:26:00	0,0891	8,7569	02:00:40	0,0895	8,7487
01:26:40	0,0888	8,7569	02:01:20	0,0897	8,7476
01:27:20	0,0891	8,7569	02:02:00	0,0892	8,7469
01:28:00	0,0888	8,757	02:02:40	0,0894	8,7476
01:28:40	0,0884	8,7548	02:03:20	0,0892	8,7477
01:29:20	0,0889	8,7551	02:04:00	0,0894	8,7478
01:30:00	0,0889	8,756	02:04:40	0,0902	8,7475
01:30:40	0,089	8,7552	02:05:20	0,0895	8,7478
01:31:20	0,0892	8,7556	02:06:00	0,0896	8,7474
01:32:00	0,0888	8,7554	02:06:40	0,0901	8,7468
01:32:40	0,0892	8,7543	02:07:20	0,0895	8,7457
01:33:20	0,0893	8,7554	02:08:00	0,0898	8,746
01:34:00	0,0893	8,7553	02:08:40	0,0898	8,7462
01:34:40	0,089	8,7543	02:09:20	0,0898	8,746
01:35:20	0,089	8,7546	02:10:00	0,0897	8,7461
01:36:00	0,0888	8,754	02:10:40	0,0897	8,7456
01:36:40	0,0885	8,7541	02:11:20	0,0891	8,7454
01:37:20	0,089	8,7537	02:12:00	0,0901	8,746
01:38:00	0,0888	8,7535	02:12:40	0,0889	8,7451
01:38:40	0,0885	8,7538	02:13:20	0,0899	8,7449
01:39:20	0,0886	8,7535	02:14:00	0,0897	8,746
01:40:00	0,089	8,7536	02:14:40	0,0899	8,7457
01:40:40	0,0896	8,753	02:15:20	0,0901	8,7448
01:41:20	0,0889	8,7518	02:16:00	0,0892	8,7437
01:42:00	0,0893	8,7519	02:16:40	0,0897	8,7449
01:42:40	0,0895	8,7533	02:17:20	0,09	8,7443
01:43:20	0,0891	8,7524	02:18:00	0,0896	8,7443

Tempo (hh:mm:ss)	p C.baixo (bar)	p C.cima (bar)	Tempo (hh:mm:ss)	p C.baixo (bar)	p C.cima (bar)
02:18:40	0,0899	8,7437	02:53:20	0,09	8,7358
02:19:20	0,0898	8,744	02:54:00	0,09	8,7354
02:20:00	0,09	8,7434	02:54:40	0,0886	8,7342
02:20:40	0,0893	8,7431	02:55:20	0,0897	8,7342
02:21:20	0,09	8,7443	02:56:00	0,0896	8,7351
02:22:00	0,0903	8,7443	02:56:40	0,0899	8,7344
02:22:40	0,0896	8,7424	02:57:20	0,0896	8,7352
02:23:20	0,0896	8,7432	02:58:00	0,0899	8,7329
02:24:00	0,0892	8,744	02:58:40	0,0896	8,7335
02:24:40	0,0896	8,7433	02:59:20	0,09	8,7333
02:25:20	0,0899	8,7418	03:00:00	0,0895	8,7334
02:26:00	0,0896	8,7438	03:00:40	0,0902	8,7343
02:26:40	0,0891	8,7418	03:01:20	0,09	8,7326
02:27:20	0,0894	8,7432	03:02:00	0,09	8,7334
02:28:00	0,0901	8,7425	03:02:40	0,089	8,7328
02:28:40	0,0892	8,7428	03:03:20	0,0894	8,7324
02:29:20	0,0897	8,7409	03:04:00	0,0897	8,7334
02:30:00	0,0895	8,7421	03:04:40	0,0896	8,7325
02:30:40	0,0893	8,7419	03:05:20	0,0899	8,7331
02:31:20	0,0897	8,7407	03:06:00	0,09	8,7316
02:32:00	0,0897	8,741	03:06:40	0,0903	8,7329
02:32:40	0,0899	8,741	03:07:20	0,0902	8,7331
02:33:20	0,0894	8,7403	03:08:00	0,09	8,7329
02:34:00	0,0898	8,7407	03:08:40	0,0895	8,7318
02:34:40	0,0893	8,7407	03:09:20	0,0905	8,7312
02:35:20	0,0896	8,7404	03:10:00	0,0898	8,7312
02:36:00	0,0897	8,7403	03:10:40	0,0898	8,7306
02:36:40	0,0885	8,7406	03:11:20	0,0896	8,7305
02:37:20	0,0888	8,7399	03:12:00	0,0893	8,7299
02:38:00	0,09	8,7402	03:12:40	0,0902	8,7299
02:38:40	0,0895	8,7403	03:13:20	0,09	8,7295
02:39:20	0,0903	8,739	03:14:00	0,0899	8,73
02:40:00	0,0901	8,7396	03:14:40	0,0893	8,7297
02:40:40	0,0889	8,7388	03:15:20	0,0904	8,7295
02:41:20	0,0898	8,7387	03:16:00	0,0897	8,7297
02:42:00	0,0887	8,7385	03:16:40	0,0898	8,729
02:42:40	0,0899	8,7371	03:17:20	0,0896	8,7296
02:43:20	0,0895	8,7375	03:18:00	0,0895	8,7302
02:44:00	0,09	8,7376	03:18:40	0,0896	8,7284
02:44:40	0,0902	8,737	03:19:20	0,0904	8,729
02:45:20	0,0892	8,737	03:20:00	0,0901	8,7277
02:46:00	0,0891	8,7374	03:20:40	0,0893	8,728
02:46:40	0,0894	8,7376	03:21:20	0,0893	8,728
02:47:20	0,0898	8,7373	03:22:00	0,0897	8,7282
02:48:00	0,0892	8,7357	03:22:40	0,0896	8,7272
02:48:40	0,0897	8,7367	03:23:20	0,0898	8,7274
02:49:20	0,0889	8,7368	03:24:00	0,0893	8,7272
02:50:00	0,0897	8,7363	03:24:40	0,0899	8,7271
02:50:40	0,0902	8,7362	03:25:20	0,0894	8,727
02:51:20	0,0888	8,7357	03:26:00	0,0904	8,7272
02:52:00	0,0896	8,736	03:26:40	0,0897	8,7273
02:52:40	0,0895	8,7361	03:27:20	0,0903	8,7266

Tempo (hh:mm:ss)	p C.baixo (bar)	p C.cima (bar)	Tempo (hh:mm:ss)	p C.baixo (bar)	p C.cima (bar)
03:28:00	0,0903	8,7265	04:02:40	0,0894	8,7176
03:28:40	0,0898	8,7264	04:03:20	0,0894	8,7175
03:29:20	0,09	8,7257	04:04:00	0,0895	8,7172
03:30:00	0,0896	8,7263	04:04:40	0,0892	8,7166
03:30:40	0,0895	8,7258	04:05:20	0,0891	8,7173
03:31:20	0,0897	8,7249	04:06:00	0,0886	8,7167
03:32:00	0,0894	8,7247	04:06:40	0,0885	8,7159
03:32:40	0,0898	8,7254	04:07:20	0,0892	8,717
03:33:20	0,0902	8,7247	04:08:00	0,0896	8,7169
03:34:00	0,0892	8,7248	04:08:40	0,0896	8,7153
03:34:40	0,09	8,7237	04:09:20	0,0898	8,7156
03:35:20	0,09	8,7237	04:10:00	0,089	8,7148
03:36:00	0,0896	8,7233	04:10:40	0,089	8,7146
03:36:40	0,0895	8,7232	04:11:20	0,0889	8,7143
03:37:20	0,0889	8,7232	04:12:00	0,0893	8,7153
03:38:00	0,0895	8,7241	04:12:40	0,0892	8,7147
03:38:40	0,0901	8,7243	04:13:20	0,0894	8,7151
03:39:20	0,0898	8,723	04:14:00	0,0897	8,7154
03:40:00	0,0894	8,7239	04:14:40	0,0892	8,7137
03:40:40	0,0889	8,7235	04:15:20	0,0891	8,7138
03:41:20	0,089	8,7226	04:16:00	0,0895	8,7143
03:42:00	0,0897	8,7223	04:16:40	0,0892	8,7136
03:42:40	0,0896	8,7224	04:17:20	0,0893	8,714
03:43:20	0,0896	8,7217	04:18:00	0,0891	8,7141
03:44:00	0,0897	8,722	04:18:40	0,0893	8,7131
03:44:40	0,0884	8,7214	04:19:20	0,0892	8,7143
03:45:20	0,0891	8,7215	04:20:00	0,0892	8,7124
03:46:00	0,0897	8,7217	04:20:40	0,089	8,7141
03:46:40	0,0888	8,7213	04:21:20	0,0887	8,7123
03:47:20	0,0901	8,7215	04:22:00	0,089	8,713
03:48:00	0,0892	8,7213	04:22:40	0,0891	8,7121
03:48:40	0,0894	8,7205	04:23:20	0,089	8,7128
03:49:20	0,0895	8,7209	04:24:00	0,0888	8,7121
03:50:00	0,0891	8,7202	04:24:40	0,0892	8,7109
03:50:40	0,0883	8,7205	04:25:20	0,0898	8,7119
03:51:20	0,0894	8,7201	04:26:00	0,0886	8,7115
03:52:00	0,0894	8,7193	04:26:40	0,089	8,7112
03:52:40	0,0891	8,7205	04:27:20	0,089	8,7118
03:53:20	0,089	8,7199	04:28:00	0,0889	8,7109
03:54:00	0,0891	8,7192	04:28:40	0,0892	8,7111
03:54:40	0,0898	8,7202	04:29:20	0,0891	8,7109
03:55:20	0,0888	8,719	04:30:00	0,0889	8,7106
03:56:00	0,0888	8,7185	04:30:40	0,0893	8,7109
03:56:40	0,0892	8,7197	04:31:20	0,0888	8,711
03:57:20	0,0897	8,719	04:32:00	0,0884	8,7099
03:58:00	0,0893	8,718	04:32:40	0,0892	8,7109
03:58:40	0,0899	8,7181	04:33:20	0,0893	8,7096
03:59:20	0,0897	8,7179	04:34:00	0,0887	8,7084
04:00:00	0,0891	8,7184	04:34:40	0,0893	8,7092
04:00:40	0,0895	8,7178	04:35:20	0,0893	8,7092
04:01:20	0,0889	8,7178	04:36:00	0,0898	8,7092
04:02:00	0,0883	8,7174	04:36:40	0,0889	8,7087

Tempo (hh:mm:ss)	p C.baixo (bar)	p C.cima (bar)	Tempo (hh:mm:ss)	p C.baixo (bar)	p C.cima (bar)
04:37:20	0,0887	8,7081	05:10:40	0,0884	8,7008
04:38:00	0,0887	8,7082	05:11:20	0,0886	8,7003
04:38:40	0,0888	8,7081	05:12:00	0,0885	8,7008
04:39:20	0,0891	8,708	05:12:40	0,0882	8,6989
04:40:00	0,089	8,708	05:13:20	0,0886	8,6997
04:40:40	0,0886	8,7079	05:14:00	0,0881	8,6999
04:41:20	0,0888	8,7081	05:14:40	0,0883	8,699
04:42:00	0,0887	8,707	05:15:20	0,0882	8,6997
04:42:40	0,0887	8,7075	05:16:00	0,0884	8,6985
04:43:20	0,0889	8,707	05:16:40	0,0884	8,6985
04:44:00	0,089	8,7077	05:17:20	0,0888	8,6984
04:44:40	0,0889	8,706	05:18:00	0,0885	8,6992
04:45:20	0,0885	8,7065	05:18:40	0,0885	8,699
04:46:00	0,0892	8,7062	05:19:20	0,0883	8,6984
04:46:40	0,0886	8,7065	05:20:00	0,0884	8,6978
04:47:20	0,0889	8,7056	05:20:40	0,0883	8,6979
04:48:00	0,0884	8,7061	05:21:20	0,0881	8,6986
04:48:40	0,0884	8,7067	05:22:00	0,0882	8,6976
04:49:20	0,089	8,7054	05:22:40	0,0881	8,6984
04:50:00	0,0888	8,7064	05:23:20	0,0884	8,6981
04:50:40	0,0884	8,7051	05:24:00	0,0882	8,6968
04:51:20	0,0883	8,705	05:24:40	0,0883	8,6977
04:52:00	0,0886	8,7044	05:25:20	0,0879	8,6975
04:52:40	0,0884	8,7052	05:26:00	0,0882	8,6969
04:53:20	0,0885	8,7041	05:26:40	0,0884	8,696
04:54:00	0,0889	8,7037	05:27:20	0,0881	8,6961
04:54:40	0,0889	8,7043	05:28:00	0,088	8,6963
04:55:20	0,0883	8,7048	05:28:40	0,0884	8,6968
04:56:00	0,0883	8,7031	05:29:20	0,088	8,6965
04:56:40	0,0885	8,7036	05:30:00	0,0878	8,6957
04:57:20	0,0886	8,7047	05:30:40	0,0877	8,695
04:58:00	0,0885	8,7041	05:31:20	0,0886	8,6956
04:58:40	0,0887	8,7036	05:32:00	0,0881	8,6956
04:59:20	0,0886	8,704	05:32:40	0,0874	8,6954
05:00:00	0,0883	8,7035	05:33:20	0,0878	8,6954
05:00:40	0,0883	8,7028	05:34:00	0,087	8,694
05:01:20	0,088	8,7027	05:34:40	0,0881	8,6948
05:02:00	0,0884	8,7033	05:35:20	0,0878	8,6949
05:02:40	0,0883	8,703	05:36:00	0,0879	8,6945
05:03:20	0,0888	8,7024	05:36:40	0,0875	8,6938
05:04:00	0,0887	8,7025	05:37:20	0,088	8,6947
05:04:40	0,0885	8,7013	05:38:00	0,0873	8,6934
05:05:20	0,0886	8,7016	05:38:40	0,0874	8,6943
05:06:00	0,0887	8,7016	05:39:20	0,0877	8,6932
05:06:40	0,0886	8,701	05:40:00	0,0871	8,6933
05:07:20	0,088	8,7003	05:40:40	0,0871	8,6926
05:08:00	0,0884	8,7003	05:41:20	0,0878	8,6926
05:08:40	0,0885	8,7013	05:42:00	0,0873	8,6924
05:09:20	0,0886	8,7008	05:42:40	0,0878	8,6928
05:10:00	0,0882	8,6999			