



**Rafael Brand Rodrigues**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Validação de uma Solução para o  
Melhoramento da Utilização do Hélio em  
Aeróstatos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Alberto José Antunes Marques Martinho,  
Professor Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Pedro Miguel Marques dos Santos Silva,  
Mestre em Engenharia Mecânica, Omnidea – Aerospace  
Technology and Energy Systems



**Rafael Brand Rodrigues**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Validação de uma Solução para o  
Melhoramento da Utilização do Hélio em  
Aeróstatos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Alberto José Antunes Marques Martinho,  
Professor Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Pedro Miguel Marques dos Santos Silva,  
Mestre em Engenharia Mecânica, Omnidea – Aerospace  
Technology and Energy Systems

**Setembro 2018**



**Copyright © 2018 Rafael Brand Rodrigues**

**Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Lisboa**

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **Agradecimentos**

Quero agradecer ao meu orientador Professor Doutor Alberto Martinho pelo acompanhamento e pelas sugestões dadas, à equipa da Omnidea, em especial ao Engenheiro Pedro Silva, pelo auxílio prestado e condições de trabalho que proporcionaram.

Um especial agradecimento aos meus colegas de curso, em especial ao Carlos Sarmiento, ao Tiago Bancaleiro, ao Pedro Moreira e ao Carlos Guimarães, que através de momentos de companheirismo e entreaajuda tornaram tudo mais fácil.

À minha namorada Rita Oliveira pela ajuda e o apoio que me deu ao longo deste percurso.

E por fim, mas não menos importante, ao meu pai que sempre me incentivou sendo que sem ele não seria possível concluir esta etapa da minha vida académica.



## Resumo

A presente dissertação tem como objetivo a conceção de uma solução para o problema da difusão dos gases através do envelope de um aeróstato. A difusão dos gases envolve não só a perda do gás que providencia a sustentação do aeróstato, neste caso o hélio, mas também a contaminação de gases atmosférico para o interior deste que, de igual forma, contribui para a diminuição da sustentação ao longo do tempo.

Neste trabalho projeta-se uma nova configuração para o envelope de um aeróstato no qual se introduz um espaço, constituído por um material muito permeável, entre duas camadas de material impermeável. Nesta camada permeável é aplicado vácuo por meio de uma bomba conectada a um dos extremos do envelope e os gases extraídos circulam através de uma unidade de separação de gás onde o hélio é devolvido para ao interior do aeróstato e os restantes gases libertados para a atmosfera.

O projeto foi desenvolvido em duas fases. Na primeira fase realizou-se um estudo teórico dos fluxos de difusão que ocorrem para diferentes pressões aplicadas na camada permeável de forma a entender-se qual a melhor pressão a aplicar. Estes fluxos incluem as perdas de hélio para a atmosfera e a contaminação de ar para o interior do aeróstato.

Na segunda fase do projeto, foram realizados ensaios de permeabilidade no material escolhido para constituir a camada permeável de forma a verificar se o diferencial de pressão entre os extremos do ABM não é excessivo, uma vez que se pretende minimizar este parâmetro.

Do estudo realizado concluiu-se que a adoção desta solução contribui para o aumento da autonomia do aeróstato com a desvantagem do peso que lhe é acrescentado.

**Palavras-chave:** Permeabilidade; Difusão; Aeróstato; Vácuo; Permeabilidade; Gases; Hélio.



## **Abstract**

The present dissertation aims at the design of a solution to the problem of the diffusion of gases through the envelope of an airship. The diffusion of the gases involves not only the loss of the gas that provides the support of the airship, in this case helium, but also the contamination of atmospheric gases to the interior of this, which, likewise, contributes to the decrease of the sustentation over time.

In this work a new configuration for the envelope of an airship is projected in which a space, composed of a very permeable material, is introduced between two layers of impermeable material. In this permeable layer vacuum is applied by means of a pump connected to one of the ends of the envelope and the extracted gases circulate through a gas separation unit where the helium is returned into the airship and the remaining gases released into the atmosphere.

The project was developed in two phases. In the first phase, a theoretical study of the diffusion fluxes that occur for different pressures applied in the permeable layer was carried out in order to understand the best pressure to be applied. These flows include the losses of helium into the atmosphere and the contamination of air into the airship.

In the second phase of the project, permeability tests were performed on the material chosen to form the permeable layer in order to verify if the pressure differential between the ends of the ABM is not excessive, since this parameter is to be minimized.

The study concluded that the adoption of this solution contributes to increase the autonomy of the airship with the disadvantage of the weight added to it.

**Keywords:** Permeability; Diffusion; Aircraft; Vacuum; Permeability; Gases; Helium.



# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento .....	1
1.2	Objetivos .....	3
1.3	Abordagem ao Problema.....	3
1.3.1	Esquema da solução proposta .....	4
1.3.2	Materiais Permeáveis .....	6
1.4	Estrutura da dissertação .....	8
<b>2</b>	<b>Noções de comportamento dos gases.....</b>	<b>9</b>
2.1	Pressão e composição do ar atmosférico.....	9
2.2	Gases ideais.....	10
2.3	Modelos de Permeabilidade .....	13
2.3.1	Modelo de escoamento poroso (Lei de Darcy) .....	14
2.3.2	Modelo de Solução-Difusão.....	15
<b>3</b>	<b>Análise e estimativa dos caudais de Difusão.....</b>	<b>17</b>
3.1	Permeabilidade do TPU: .....	17
3.2	Análise dos caudais de fuga em função da pressão de vácuo .....	19
3.2.1	Análise das pressões parciais .....	19
3.2.2	Análise do fluxo de contaminação de ar .....	20
3.2.3	Análise dos fluxos de difusão em função da pressão na camada.....	21
3.2.4	Resolução do sistema .....	25
3.3	Conclusões .....	28
<b>4</b>	<b>Ensaio de Permeabilidade.....</b>	<b>35</b>
4.1	Descrição do ensaio .....	35
4.1.1	Análise das forças e pressões que atuam no envelope .....	37
4.1.2	Montagem experimental .....	38
4.1.3	Descrição do procedimento experimental.....	43
4.2	Resultados .....	45
4.2.1	Resultados experimentais.....	45

4.2.2	Permeabilidade em função da tensão de compactação.....	49
<b>5</b>	<b>Pressão e velocidade do gás na camada permeável.....</b>	<b>53</b>
5.1	Cálculo da velocidade do gás ao longo da camada.....	53
5.1.1	Dimensões do coletor de gás.....	63
5.1.2	Camada total .....	64
5.2	Estudo da velocidade máxima do gás ao longo da camada.....	66
5.3	Cálculo da pressão ao longo da camada.....	67
5.4	Estudo da evolução da pressão ao longo da camada.....	71
<b>6</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>73</b>
6.1	Conclusões .....	73
6.2	Propostas de trabalhos futuros .....	74
	<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>75</b>
	<b>Anexo A – Bomba de vácuo proposta para o sistema .....</b>	<b>77</b>
	<b>Anexo B – Ficha técnica do Material Permeável.....</b>	<b>79</b>
	<b>Anexo C – Ficha técnica do Sensor de Pressão e Temperatura.....</b>	<b>81</b>
	<b>Anexo D – Código Arduíno utilizado nos Ensaios .....</b>	<b>83</b>
	<b>Anexo E – Resultados obtidos nos ensaios de Permeabilidade .....</b>	<b>85</b>

# Índice de Figuras

Figura 1.1-Plataforma aérea [1] .....	1
Figura 1.2- Efeito de Magnus [1].....	2
Figura 1.3-Sistema completo [1].....	2
Figura 1.4 – Envelope do ABM atual .....	4
Figura 1.5 – Envelope proposto .....	4
Figura 1.6 - Esquema de funcionamento .....	5
Figura 1.7 - Esquema do processo de infusão de resina assistida por vácuo [2] .....	6
Figura 2.1 - Composição do ar atmosférico [4] .....	9
Figura 2.2 - Variação da pressão atmosférica com a altitude [6].....	10
Figura 2.3 - Modelos de Permeabilidade .....	13
Figura 2.4 - Modelo de solução-difusão .....	15
Figura 3.1 – Esquema dos fluxos de difusão em circulação no sistema .....	19
Figura 3.2 - Esquema simplificado das pressões parciais e fluxos entre as diferentes zonas do sistema .....	20
Figura 3.3 - Esquema das pressões parciais que anulam a contaminação.....	21
Figura 3.4 - Caudais em circulação no sistema.....	22
Figura 3.5 - Esquema do balanço do hélio na camada.....	23
Figura 3.6 - Frações molares dos gases no interior do ABM.....	29
Figura 3.7 - Frações molares dos gases na Camada permeável .....	30
Figura 3.8 - Pressão parcial do hélio nas diferentes zonas do sistema.....	31
Figura 3.9 - Pressão parcial do ar nas diferentes zonas do sistema.....	31
Figura 3.10 - Caudais Volumétricos entre as diferentes zonas do sistema .....	32
Figura 3.11 - Caudal de gás extraído da camada .....	34
Figura 4.1 - Esquema dos fluxos de difusão e caudal na camada .....	35
Figura 4.2 - FM105 EasyFlow Knitted Infusion mesh .....	36
Figura 4.3 - Esquema do efeito de compactação do material .....	36
Figura 4.4 - Esquema das forças e pressões que atuam no envelope .....	37

Figura 4.5 - Esquema da montagem experimental.....	38
Figura 4.6 - Montagem experimental.....	39
Figura 4.7 - Câmara de vácuo .....	39
Figura 4.8 - Tomada de ar da câmara de pressão.....	40
Figura 4.9 - Tomada de ar da amostra de material.....	40
Figura 4.10 - Vista inferior da estrutura rígida que contém a amostra de material e a câmara de compactação.....	41
Figura 4.11 - Estrutura rígida que envolve a amostra de material e a câmara de compactação.....	41
Figura 4.12 - Bomba de pressão com manómetro.....	42
Figura 4.13 - Montagem da tomada de ar .....	42
Figura 4.14 - Sensor de Temperatura e Pressão BMP 280 .....	43
Figura 4.15 - Esquema do gradiente de pressão aplicado no material permeável.....	45
Figura 4.16 - Gráfico da pressão presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio.....	47
Figura 4.17 - Gráfico da temperatura do gás presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio .....	47
Figura 4.18 - Gráfico da massa de gás presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio .....	47
Figura 4.19 - Gráfico do caudal mássico de gás que percorre o material ao longo do tempo de ensaio .....	47
Figura 4.20 - Gráfico do gradiente de pressão aplicado no material ao longo do tempo de ensaio.....	47
Figura 4.21 - Gráfico do caudal volumétrico de gás que percorre a amostra de material ao longo do tempo de ensaio.....	47
Figura 4.22 - Gráfico do gradiente de pressão aplicado na amostra de material em função do caudal volumétrico de gás que o atravessa.....	48
Figura 4.23 - Gráfico do gradiente de pressão aplicado no material em função do caudal volumétrico de gás que o atravessa, para as diferentes pressões de compactação .....	49
Figura 4.24 – Gráfico das retas obtidas por regressão linear do gradiente de pressão aplicado no material em função do caudal volumétrico de gás que atravessa o material por unidade de largura, para as diferentes pressões de compactação.....	50
Figura 4.25 - Gráfico de K·e em função da pressão de compactação .....	51

Figura 5.1 - Esquema dos fluxos de difusão e caudais que circulam nas diferentes áreas da camada permeável.....	54
Figura 5.2 - Esquema da área da secção transversal ao fluxo de gás do troço 1.....	55
Figura 5.3 - Esquema do caudal de gás que percorre a camada numa dada secção do troço 1.....	56
Figura 5.4 - Esquema da área da secção transversal ao fluxo de gás e do caudal de gás na secção do troço 2 .....	58
Figura 5.5 - Esquema da área da secção transversal ao fluxo de gás do troço 3.....	60
Figura 5.6 - Esquema do caudal de gás que percorre a camada numa dada secção do troço 3.....	61
Figura 5.7 - Esquema das dimensões do coletor de gás.....	63
Figura 5.8 - Esquema das coordenadas locais e globais utilizadas .....	64
Figura 5.9 - Evolução da velocidade do gás ao longo da camada permeável .....	66
Figura 5.10 - Algoritmo utilizado para o cálculo numérico da pressão ao longo da camada .....	69
Figura 5.11 - Gráfico da pressão do gás ao longo da camada.....	71



## Índice de tabelas

Tabela 1.1 - Materiais utilizados como <i>flow media</i> [3].....	7
Tabela 3.1 – Permeabilidade de diferentes tipos de TPU do fabricante Covestro [13] .....	17
Tabela 3.2 - Permeabilidades e frações molares dos principais gases atmosféricos.....	18
Tabela 3.3 Permeabilidade do TPU .....	18
Tabela 4.1 - Valor de $K \cdot e$ para cada pressão de compactação .....	51
Tabela 4.2 - Comparação dos valores de $K \cdot e$ obtidos pelos ensaios experimentais e pela função $(K \cdot e)(P_c)$ .....	52



# Lista de Símbolos, Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

## Abreviaturas:

ABM            *Airborne Module* ou módulo aéreo

TPU            *Thermoplastic Polyurethane*

## Símbolos:

A              Área

$A_s$            Área de superfície

b              Largura do material permeável

D              Coeficiente de difusidade

d              Distância entre tomadas de ar

e              Espessura do material permeável

j              Fluxo volumétrico de difusão

K              Permeabilidade no modelo de escoamento poroso

L              Comprimento da secção cilíndrica do ABM

l              Espessura da membrana ou película

$\dot{m}$             Caudal mássico

m              massa

M              Massa molar

P              Pressão do gás

Perm (Ar)    Permeabilidade ao ar

Perm (He)    Permeabilidade ao hélio

Perm           Permeabilidade do modelo de solução-difusão

$P_{\text{máx}}$        Pressão máxima

$P_{\text{mín}}$        Pressão mínima

Q              Caudal volumétrico

$Q_s$            Caudal volumétrico de gás que circula na camada permeável

R              Raio do ABM

$R_c$	Raio do Coletor de gás
$R_0$	Constante dos gases ideais
$S$	Coefficiente de Solubilidade
$T$	Temperatura
$V$	Volume de gás
$v$	Volume molar (gás ideal)
$W$	Potência
$P_0^i$	Pressão parcial do gás i a jusante da membrana
$P_a$	Pressão do gás na atmosfera
$P_a^{He}$	Pressão parcial do hélio na atmosfera
$P_a^{ar}$	Pressão parcial do ar na atmosfera
$P_c$	Pressão do gás na camada permeável
$P_c^{He}$	Pressão parcial do hélio na camada permeável
$P_c^{ar}$	Pressão parcial do ar na camada permeável
$P_i$	Pressão do gás no interior do ABM
$P^i$	Pressão parcial do gás i
$P_i^{He}$	Pressão parcial do hélio no interior do ABM
$P_i^{ar}$	Pressão parcial do ar no interior do ABM
$P_l^i$	Pressão parcial do gás i a montante da membrana
$Q_{a-c}$	Caudal volumétrico de difusão do ar, da atmosfera para a camada permeável
$Q_{c-a}$	Caudal volumétrico de difusão do hélio, da camada permeável para a atmosfera
$Q_{c-i}$	Caudal volumétrico de difusão do ar, da camada permeável para o interior do ABM
$Q_{i-c}$	Caudal volumétrico de difusão do hélio, do interior do ABM para a camada permeável
$\frac{dP}{dx}$	Gradiente de pressão segundo x
$j_{Ar}$	Fluxo volumétrico de Ar
$j_{He}$	Fluxo volumétrico de hélio
$j_{a-c}$	Fluxo volumétrico de difusão do ar, da atmosfera para a camada permeável

$j_{c-a}$	Fluxo volumétrico de difusão do hélio, da camada permeável para a atmosfera
$j_{c-i}$	Fluxo volumétrico de difusão do ar, da camada permeável para o interior do ABM
$j_{i-c}$	Fluxo volumétrico de difusão do hélio, do interior do ABM para a camada permeável
$x_a^{Ar}$	Fração molar do ar na atmosfera
$x_a^{He}$	Fração molar do hélio na atmosfera
$x_c^{Ar}$	Fração molar do ar na camada permeável
$x_c^{He}$	Fração molar do hélio na camada permeável
$x^i$	Fração molar do gás i
$x_i^{Ar}$	Fração molar do ar no interior do ABM
$x_i^{He}$	Fração molar do hélio no interior do ABM
$\Delta P$	Diferença de pressão
$\mu$	Viscosidade dinâmica



# 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento

O tema desta dissertação tem como objetivo complementar o projeto LEMAP (Long Endurance Medium Altitude Platform) desenvolvido pela empresa Omnidea. Este projeto consiste numa plataforma aérea mais leve que o ar baseado no primeiro protótipo desenvolvido pela empresa, que tem como objetivo ser um posto de observação com capacidade de operar a 600 metros de altitude e suportar ventos até 18 m/s [1]. Esta plataforma, ilustrada na figura 1.1, tem uma forma cilíndrica com 17 metros de comprimento e 3.8 metros de diâmetro e tem capacidade para transportar uma carga útil com um peso máximo de 40 kg.



Figura 1.1-Plataforma aérea [1]

Um dos princípios de operação desta plataforma é o efeito de *Magnus*. Este fenómeno ocorre em corpos de secção redonda (como esferas e cilindros) e em rotação quando imersos num fluído em movimento na direção perpendicular ao eixo.

Na parte inferior do corpo, a rotação desacelera o fluxo de ar que se movimenta em direção ao corpo, criando uma zona de pressão elevada. Na parte superior do corpo a rotação arrasta o fluído, acelerando-o e criando assim uma zona de baixa pressão. Esta diferença de pressões origina uma força de sustentação dependente da velocidade de rotação e da velocidade do escoamento de ar. Ambos estes parâmetros contribuem para o aumento desta força.

Na figura 1.2 está representada a secção transversal da plataforma, bem como o efeito de *Magnus* que ocorre na mesma.

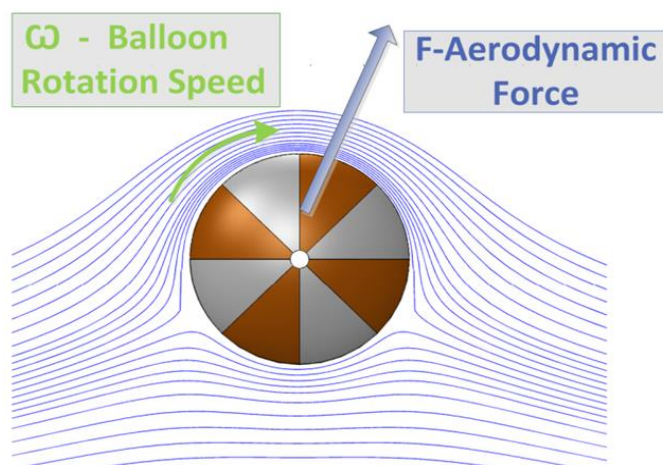


Figura 1.2- Efeito de Magnus [1]

O sistema completo, representado na figura 1.3, consiste num módulo aéreo (*airborne module*, ABM) onde é colocada a carga útil e uma estação de controlo na qual se encontra o guincho onde é enrolado o cabo umbilical que conecta o módulo aéreo ao solo[1].



Figura 1.3-Sistema completo [1]

O ABM trata-se de um dirigível cheio de hélio cujo envelope tem uma forma cilíndrica e é composto por três camadas:

- Uma camada interna com baixa permeabilidade ao hélio fabricada em TPU (*Thermoplastic polyurethane*);
- Uma camada intermédia com boa resistência à abrasão (*Ripstop*);
- Uma terceira camada que confere resistência estrutural ao envelope feita de rede *Dyneema*.

Nas extremidades do módulo aéreo encontram-se os motores que conferem o movimento de rotação ao balão.

Com um baixo custo de implementação a plataforma aérea desenvolvida pela Omnidea proporciona uma solução para tarefas como:

- Observação de terrenos (como por exemplo para prevenção e monitorização de operações de combate ao fogo);
- Mapeamento de terrenos;
- Recetor de sinais de telecomunicações por satélite/repetidor de sinais de redes móveis.

## **1.2 Objetivos**

Um dos problemas a que este trabalho pretende dar resposta é a perda de hélio através do envelope de aeróstatos como por exemplo dos dirigíveis e dos balões. Este fenómeno é considerado um problema geral dos aeróstatos, devido ao facto do envelope que contém o gás, neste caso o hélio, não ser perfeitamente impermeável. Posto isto, com o tempo existe um decréscimo da pressão no interior do balão que tem de ser compensada de forma a este não perder a sua rigidez estrutural.

O problema referido não implica somente a perda do hélio através do envelope, mas também a sua contaminação através de gases presentes na atmosfera em redor, maioritariamente azoto e o oxigénio. Estas duas condições originam um decréscimo da impulsão ao longo do tempo.

No protótipo atual existe um tubo de abastecimento auxiliar de hélio que compensa as perdas de hélio de forma a manter a pressão dentro do balão constante. No entanto, esta solução não resolve o problema da contaminação do ar e mantendo-se ainda o problema do hélio que é perdido para a atmosfera representar um custo ainda significativo.

Esta dissertação tem como objetivo estudar uma solução que diminua a difusão dos gases através do envelope do ABM de forma a reduzir as perdas de hélio e a respetiva contaminação com ar. Na nova solução o envelope do ABM incorpora um material poroso no seu interior e ainda um sistema de extração e separação dos gases difundidos.

## **1.3 Abordagem ao Problema**

A solução proposta é um sistema de recuperação do hélio perdido por difusão através do envelope. Trata-se de uma solução ativa para este problema na qual o hélio que atravessa a camada interna do envelope circula através de um espaço intermédio contido no interior deste envelope, passando por um sistema de purificação que posteriormente retorna o hélio para o interior do balão.

### 1.3.1 Esquema da solução proposta

Como foi suprarreferido, atualmente o envelope é constituído por três camadas de material, uma camada interna de baixa permeabilidade constituída por uma película de TPU com 0.2 mm de espessura, uma camada intermédia resistente à abrasão (*Ripstop*) e uma rede que confere a rigidez estrutural ao envelope (Rede *Dyneema*). A figura 1.4 esquematiza a constituição deste envelope.

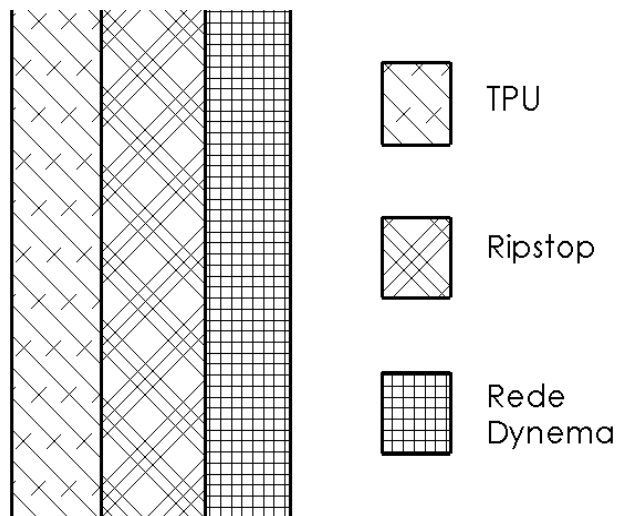


Figura 1.4 – Envelope do ABM atual

Este sistema de recuperação de hélio propõe a criação de uma segunda camada de TPU separada da primeira por uma camada de material de grande permeabilidade, como ilustrado na figura 1.5. Ambas as camadas de TPU com 0.1 mm de espessura.

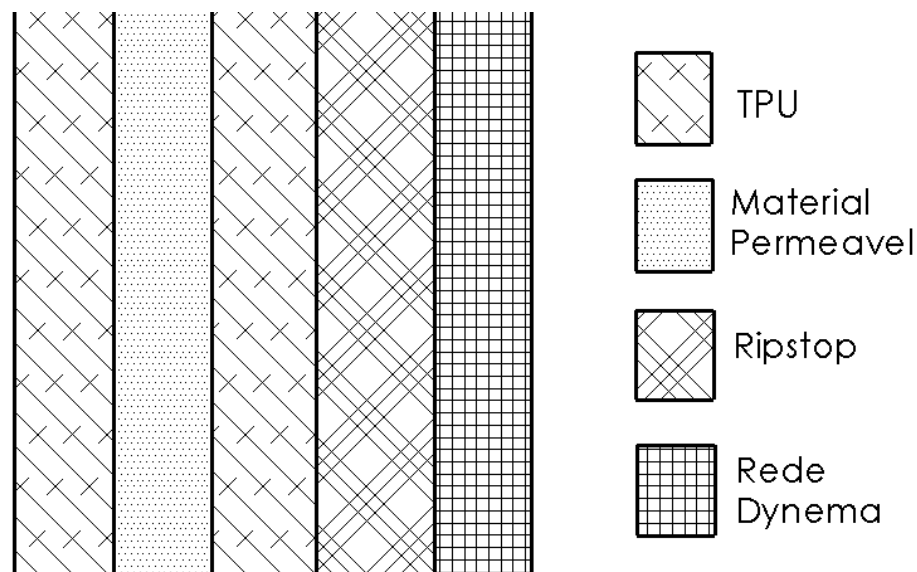


Figura 1.5 – Envelope proposto

O fluxo de gás ocorre nesta camada intermédia, por isso é necessário que o material que o compõe seja o mais permeável possível de forma a reduzir as perdas de carga no fluxo de gás. Este material impede também a junção das duas camadas de TPU que, devido ao vácuo, tendem a juntar-se impedindo o fluxo.

Na figura 1.6 encontra-se esquematizado o funcionamento deste sistema. O hélio perdido por difusão na primeira camada de TPU mistura-se com os gases atmosféricos, que por meio do mesmo fenómeno atravessam as camadas exteriores do envelope. Um sistema de vácuo cria uma pressão na camada intermédia inferior à pressão atmosférica que origina um fluxo em direção a um sistema de separação de gases que posteriormente conduz o hélio de regresso para o interior do balão e os gases contaminantes para a atmosfera.

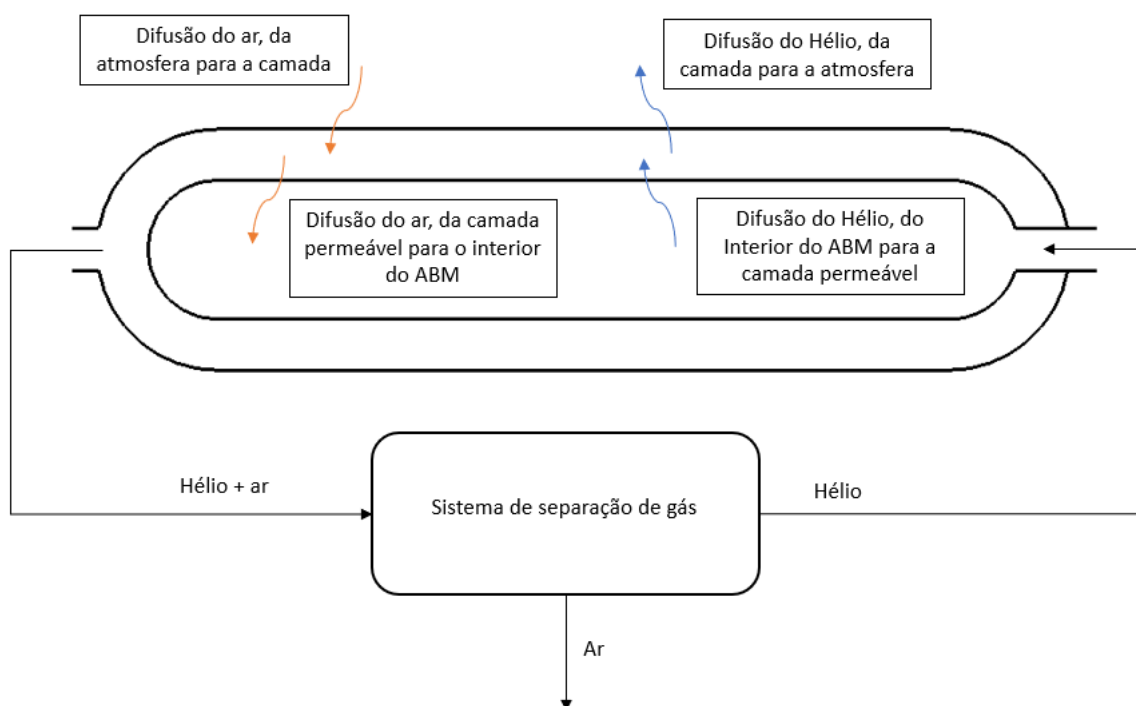


Figura 1.6 - Esquema de funcionamento

Esta dissertação foca-se nos estudos necessários ao desenvolvimento desta camada permeável e à sua validação. Foi necessário realizar um estudo do impacto que o vácuo, na camada permeável, tem nos diferentes fluxos que circulam no sistema, e posteriormente através de ensaios de permeabilidade foi também estimado o aumento de pressão que ocorre ao longo desta camada. Pretende-se que a diferença de pressão do interior do ABM para a camada e da atmosfera para a camada seja o mais constante possível ao longo da superfície do ABM e para tal é necessário que a pressão na camada seja o mais homogênea possível. O sistema de separação de gases foi deixado como proposta para trabalhos futuros uma vez que esta unidade ainda requer um grande desenvolvimento.

### 1.3.2 Materiais Permeáveis

Uma vez que se pretende que a pressão na camada seja o mais homogênea possível é necessário que o material constituinte desta seja muito permeável. Desta forma o material não oferece muita resistência ao gás que o atravessa, impedindo assim que não haja um gradiente de pressão muito acentuado. Outra propriedade importante do material a utilizar nesta camada é o peso, uma vez que se pretende que o ABM tenha o menor peso possível.

Existe um ramo da tecnologia de compósitos que aborda um problema muito semelhante a este que é o caso do processo de moldagem de compósitos por infusão de resina assistida por vácuo (*Vacuum infusion molding*).

Neste processo a peça é coberta por um material designado de *flow media* e envolvida com uma película impermeável sendo desta forma selada do ar exterior. Num dos extremos da peça é ligada uma bomba de vácuo e no outro é conectado um tubo que está ligado a um reservatório de resina. O vácuo induzido desloca a resina a longo da peça enquanto a pressão atmosférica a comprime durante o processo de cura. Este processo encontra-se ilustrado na figura 1.7.

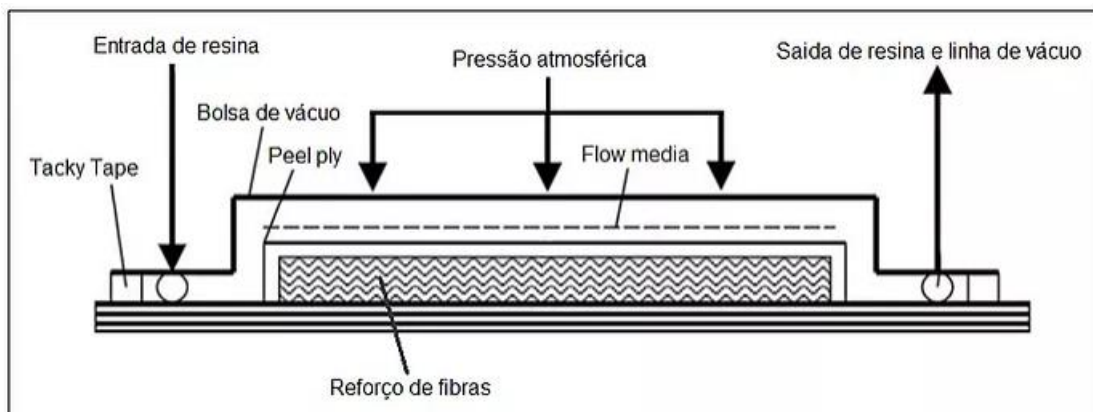


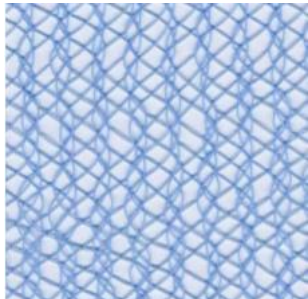
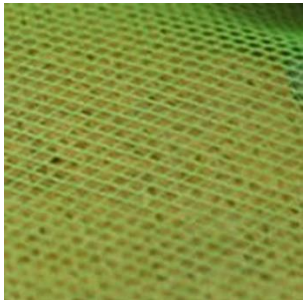
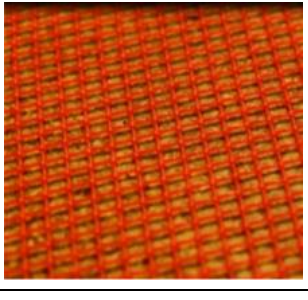

Figura 1.7 - Esquema do processo de infusão de resina assistida por vácuo [2]

O *flow media* tem como objetivo garantir que o vácuo alcance todos os pontos da peça de forma a permitir que a resina cubra a totalidade da superfície.

Portanto uma vez que se pretende a mesma função na camada permeável do ABM realizou-se uma pesquisa dos diferentes materiais utilizados nesta tecnologia.

Na tabela 1.1 identificam-se alguns exemplos de materiais utilizados como *flow media* e suas propriedades.

Tabela 1.1 - Materiais utilizados como *flow media* [3]

<p><i>EnkaFusion</i> <i>Nylon Matting</i></p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Property</th> <th>English Units</th> <th>Metric Units</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Core Material</td> <td>Nylon 6</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Thickness</td> <td>0.039 in</td> <td>1.0 mm</td> </tr> <tr> <td>Core Weight</td> <td>5.2 oz/yd<sup>2</sup></td> <td>177.0 g/m<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>Color</td> <td>Blue</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Durability Characteristics</td> <td>80% Strength Retention</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Melting Point Temperature</td> <td>420°F</td> <td>216°C</td> </tr> <tr> <td>Fuel &amp; Gasoline Submersion</td> <td>Stable</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fire Rating</td> <td>NFPA Class A*</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Property	English Units	Metric Units	Core Material	Nylon 6		Thickness	0.039 in	1.0 mm	Core Weight	5.2 oz/yd <sup>2</sup>	177.0 g/m <sup>2</sup>	Color	Blue		Durability Characteristics	80% Strength Retention		Melting Point Temperature	420°F	216°C	Fuel & Gasoline Submersion	Stable		Fire Rating	NFPA Class A*								
Property	English Units	Metric Units																																		
Core Material	Nylon 6																																			
Thickness	0.039 in	1.0 mm																																		
Core Weight	5.2 oz/yd <sup>2</sup>	177.0 g/m <sup>2</sup>																																		
Color	Blue																																			
Durability Characteristics	80% Strength Retention																																			
Melting Point Temperature	420°F	216°C																																		
Fuel & Gasoline Submersion	Stable																																			
Fire Rating	NFPA Class A*																																			
<p><i>HDPE Infusion</i> <i>Flow Media</i></p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Property</th> <th>English Units</th> <th>Metric Units</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Core Material</td> <td>HDPE</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Thickness</td> <td>0.033 in</td> <td>0.8 mm</td> </tr> <tr> <td>Color</td> <td>Green</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Max Use Temperature</td> <td>200°F</td> <td>93.33°C</td> </tr> </tbody> </table>	Property	English Units	Metric Units	Core Material	HDPE		Thickness	0.033 in	0.8 mm	Color	Green		Max Use Temperature	200°F	93.33°C																			
Property	English Units	Metric Units																																		
Core Material	HDPE																																			
Thickness	0.033 in	0.8 mm																																		
Color	Green																																			
Max Use Temperature	200°F	93.33°C																																		
<p><i>LDPE Infusion</i> <i>Flow Media</i></p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Property</th> <th>English Units</th> <th>Metric Units</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Core Material</td> <td>LDPE</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Thickness</td> <td>0.04 in</td> <td>1.0 mm</td> </tr> <tr> <td>Color</td> <td>Red</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Max Use Temperature</td> <td>150°F</td> <td>65.56°C</td> </tr> </tbody> </table>	Property	English Units	Metric Units	Core Material	LDPE		Thickness	0.04 in	1.0 mm	Color	Red		Max Use Temperature	150°F	65.56°C																			
Property	English Units	Metric Units																																		
Core Material	LDPE																																			
Thickness	0.04 in	1.0 mm																																		
Color	Red																																			
Max Use Temperature	150°F	65.56°C																																		
<p><i>DIVINYMAT</i></p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Property</th> <th>Method</th> <th>Unit</th> <th>#1024</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Nominal Density <sup>1)</sup></td> <td rowspan="2">ISO 845</td> <td>Kg/m<sup>3</sup></td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>Lb/ft<sup>3</sup></td> <td>3.8</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Compressive Strength <sup>2)</sup></td> <td rowspan="2">ASTM D 1621</td> <td>MPa</td> <td>0.9</td> </tr> <tr> <td>psi</td> <td>130</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Compressive Modulus <sup>2)</sup></td> <td rowspan="2">ASTM D 1621</td> <td>MPa</td> <td>70</td> </tr> <tr> <td>psi</td> <td>10,150</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Tensile Strength <sup>2)</sup></td> <td rowspan="2">ASTM D 1623</td> <td>MPa</td> <td>1.8</td> </tr> <tr> <td>psi</td> <td>261</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Tensile Modulus <sup>2)</sup></td> <td rowspan="2">ASTM D 1623</td> <td>MPa</td> <td>75</td> </tr> <tr> <td>psi</td> <td>10,875</td> </tr> </tbody> </table>	Property	Method	Unit	#1024	Nominal Density <sup>1)</sup>	ISO 845	Kg/m <sup>3</sup>	60	Lb/ft <sup>3</sup>	3.8	Compressive Strength <sup>2)</sup>	ASTM D 1621	MPa	0.9	psi	130	Compressive Modulus <sup>2)</sup>	ASTM D 1621	MPa	70	psi	10,150	Tensile Strength <sup>2)</sup>	ASTM D 1623	MPa	1.8	psi	261	Tensile Modulus <sup>2)</sup>	ASTM D 1623	MPa	75	psi	10,875
Property	Method	Unit	#1024																																	
Nominal Density <sup>1)</sup>	ISO 845	Kg/m <sup>3</sup>	60																																	
		Lb/ft <sup>3</sup>	3.8																																	
Compressive Strength <sup>2)</sup>	ASTM D 1621	MPa	0.9																																	
		psi	130																																	
Compressive Modulus <sup>2)</sup>	ASTM D 1621	MPa	70																																	
		psi	10,150																																	
Tensile Strength <sup>2)</sup>	ASTM D 1623	MPa	1.8																																	
		psi	261																																	
Tensile Modulus <sup>2)</sup>	ASTM D 1623	MPa	75																																	
		psi	10,875																																	

## 1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada de forma a garantir uma boa compreensão dos diferentes passos tomados no desenvolvimento desta dissertação.

- No capítulo 1 faz-se uma apresentação no âmbito da dissertação onde são apresentados os objetivos, a motivação, a primeira abordagem ao problema e a respetiva estrutura da dissertação.
- No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica onde se apresentam algumas noções do comportamento dos gases necessárias para os estudos e ensaios realizados.
- No capítulo 3 apresenta-se uma estimativa da permeabilidade do TPU e ainda uma análise da influência que a pressão, aplicada na camada, tem nos diferentes fluxos que circulam no sistema.
- No capítulo 4 descrevem-se os ensaios de permeabilidade realizados no material escolhido para a camada permeável e apresentam-se os resultados obtidos nos mesmos.
- No capítulo 5 desenvolvem-se as expressões que exprimem a velocidade e pressão do gás para os diferentes pontos da camada permeável.
- No capítulo 6 são apresentadas as conclusões gerais do estudo realizado e propostas de trabalho futuro

# 2

## Noções de comportamento dos gases

O tema desta dissertação incide em grande parte na área do comportamento de gases. Neste capítulo apresentam-se alguns dados da composição natural do ar atmosférico e ainda informação relativa à evolução da pressão com a altitude. Numa segunda parte apresentam-se os principais conceitos utilizados na resolução de problemas na área do comportamento de gases desde o conceito de gás perfeito aos diferentes modelos utilizados para descrever os mecanismos de permeabilidade e difusão.

### 2.1 Pressão e composição do ar atmosférico

O ar atmosférico é composto maioritariamente por oxigénio e azoto, como ilustrado na figura 2.1. O oxigénio representa 21% do volume de ar e o azoto representa 78% do volume de ar.

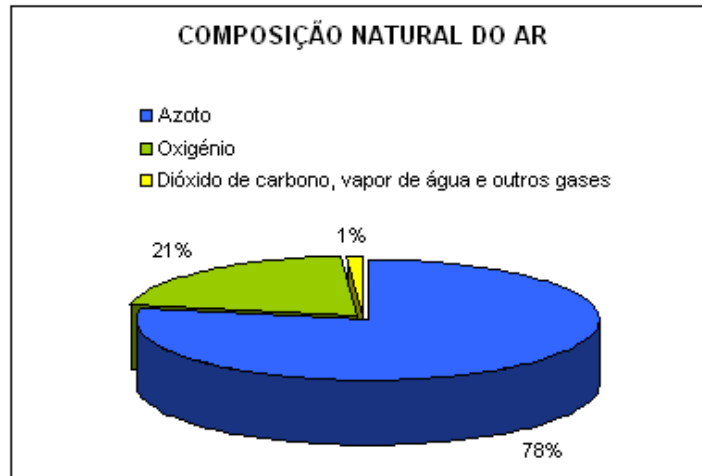


Figura 2.1 - Composição do ar atmosférico [4]

No entanto, para além destes dois gases existem ainda vários vestígios de outros gases englobados no restante 1%, indicado na figura 2.1, como é o caso hélio que apresenta uma fração molar no ar de:  $x^{He} = 5.24 \cdot 10^{-6}$  [5].

A pressão atmosférica diminui com a altitude, como ilustrado na figura 2.2, isto é, à medida que nos afastamos do nível do mar a coluna de gás que exerce força sobre um corpo é menor.

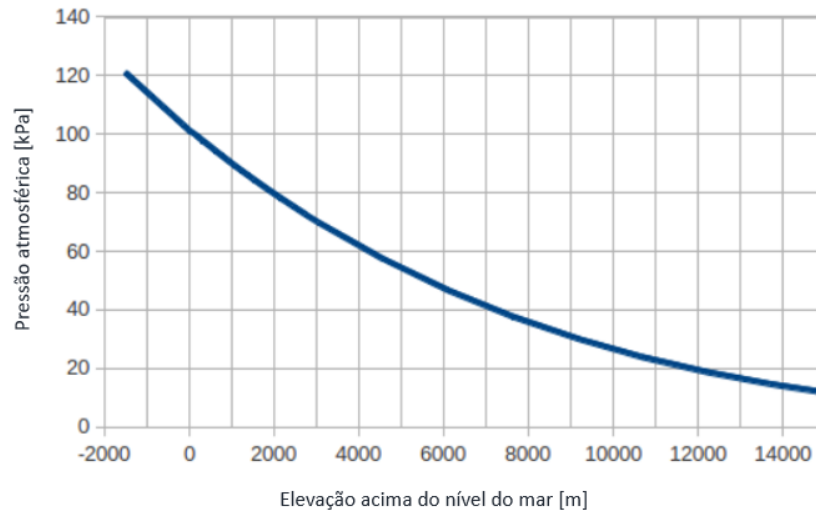


Figura 2.2 - Variação da pressão atmosférica com a altitude [6]

Uma vez que o ABM opera a uma altitude de 600 metros foi necessário estudar o funcionamento do sistema tratado nesta dissertação para uma pressão atmosférica equivalente a esta altitude.

Segundo a atmosfera padrão internacional a 600 metros de altitude a pressão atmosférica equivale a 0.944 bar, sendo que no seguimento desta dissertação é este o valor utilizado para a pressão atmosférica no funcionamento normal do ABM [7].

## 2.2 Gases ideais

No seguimento desta dissertação trataram-se os gases como gases perfeitos, uma vez que se trata de uma aproximação bastante real do comportamento dos gases em várias condições. Ao tratar um gás como gás perfeito, várias suposições são feitas, por exemplo, uma mole de gás perfeito a uma pressão de 101325 Pa e a uma temperatura de 273.15 K ocupa um volume de 22.4 litros.

Portanto tratando o ar atmosférico e o hélio como gases perfeitos estamos a assumir que ambos apresentam o mesmo volume molar.

Empiricamente, observam-se várias relações entre temperatura, pressão e volume de um gás perfeito, estas relações dão lugar à equação de estado dos gases ideais [8].

### Equação de estado dos gases ideais:

$$P \cdot V = n \cdot R_0 \cdot T \quad (2.1)$$

Onde:

P- Pressão do gás

$R_0$  - Constante dos gases ideais

V- Volume do gás

T- Temperatura do gás

n- Número de moles da amostra gasosa

Desta equação, várias relações podem ser retiradas, como por exemplo a lei de Boyle-Mariotte que enuncia que, mantendo a temperatura constante, a pressão de um gás é inversamente proporcional ao seu volume. Esta relação permite saber o volume de um gás quando a sua pressão é alterada isotermicamente ou seja [9]:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \quad (2.2)$$

Outra relação que pode ser obtida é a relação entre a massa e o volume de um gás, denominada de massa volúmica, para uma determinada pressão e temperatura [9]:

$$P \cdot V = n \cdot R_0 \cdot T \Leftrightarrow \frac{P \cdot V}{R_0 \cdot T} = \frac{m}{M} \Leftrightarrow$$

$$m = V \cdot \frac{P \cdot M}{R_0 \cdot T} \quad (2.3)$$

Onde:

m- Massa de gás

M- Massa molar do gás

Com esta relação, um caudal mássico  $\dot{m}$  pode ser relacionado com um caudal volumétrico Q assumindo que este caudal se encontra a uma temperatura T e uma pressão P, ambos constantes [9].

$$\dot{m} = Q \cdot \frac{P \cdot M}{R_0 \cdot T} \quad (2.4)$$

### **Pressões Parciais:**

Numa mistura de gases cada gás tem a sua pressão parcial. Esta noção de pressão parcial representa a pressão que um dos gases presentes teria se ocupasse o volume total da mistura [10]. A pressão parcial de um gás é uma medida da atividade termodinâmica das moléculas desse gás. Os gases difundem e dispersam-se de acordo com a pressão parcial e não de acordo com a concentração do gás na mistura [11].

### **Lei de Dalton das pressões parciais:**

Para uma mistura de gases a lei de Dalton enuncia que a pressão dessa mistura equivale à soma das pressões parciais [12], ou seja, considerando uma mistura de dois gases 1 e 2 a pressão total equivale a:

$$P = P^1 + P^2 \quad (2.5)$$

Em que:

P - Pressão total da mistura de gases

P<sup>1</sup>- Pressão parcial do gás 1

P<sup>2</sup>- Pressão parcial do gás 2

### **Misturas de gases ideais:**

Numa mistura de gases perfeitos, uma vez que o volume molar é igual para qualquer gás da mistura, o rácio entre a pressão parcial de um gás e a pressão total equivale ao rácio entre as moléculas de um gás e o número de moléculas total presente na mistura. Isto é, numa mistura de gases perfeitos a fração molar de um gás nessa mistura é idêntica a:

$$x^i = \frac{P^i}{P} = \frac{n_i}{n} \quad (2.6)$$

A pressão parcial pode pois ser obtida através da expressão:

$$P^i = x^i \cdot P \quad (2.7)$$

## 2.3 Modelos de Permeabilidade

O conceito de permeabilidade refere-se à capacidade que um material tem para deixar passar um fluido através dele. A permeabilidade de um meio está relacionada com a porosidade de um material, ou seja, quanto mais poroso uma material é, maior a sua permeabilidade, uma vez que existem mais canais que permitem a passagem do fluido [11]. Outra característica importante é a geometria dos poros e o seu nível de conectividade.

Existem dois principais modelos que descrevem o mecanismo de permeabilidade, um deles é o modelo de escoamento poroso no qual o permeado (neste caso um gás) é transportado através de poros por ação da pressão, o outro é o modelo de solução-difusão no qual o permeado se dissolve na membrana que serve de barreira e posteriormente se difunde no interior deste por meio de um gradiente de concentração. Na figura 2.3 ilustram-se estes dois modelos, à esquerda o modelo de escoamento poroso e à direita o modelo de solução-difusão.

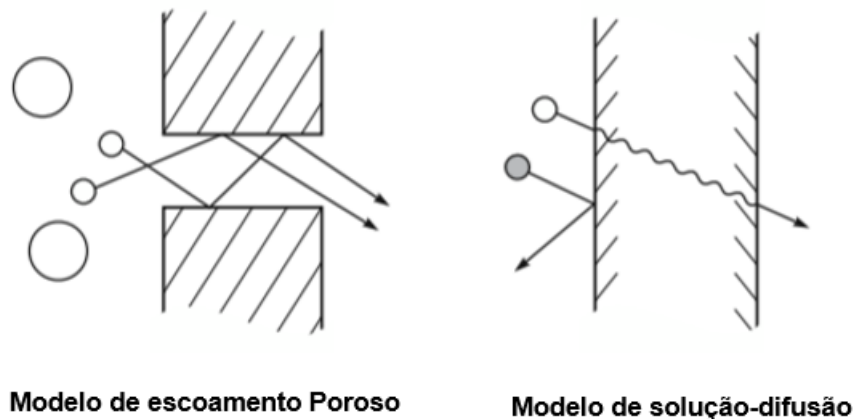


Figura 2.3 - Modelos de Permeabilidade

### 2.3.1 Modelo de escoamento poroso (Lei de Darcy)

O modelo de escoamento poroso é geralmente utilizado para descrever escoamento em canais capilares ou materiais porosos [11]. A equação que governa este tipo de escoamento é a lei de Darcy que pode ser escrita da seguinte forma:

$$Q = -\frac{K \cdot A}{\mu} \cdot \frac{dP}{dx} \quad (2.8)$$

Onde:

Q - Caudal Volumétrico

K - Permeabilidade do material

A - Área da secção transversal do material

$\mu$  - Viscosidade dinâmica

dP/dx - Gradiente de pressão numa secção de material

### 2.3.2 Modelo de Solução-Difusão

O modelo de solução-difusão aplica-se a materiais não porosos como membranas e películas poliméricas como é o caso do *Thermoplastic polyurethane* (TPU). Este modelo assume que o transporte do permeado progride através de cinco passos consecutivos, ilustrados na figura 2.4, como se segue:

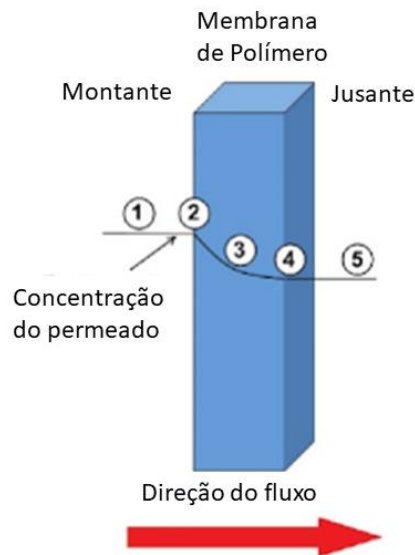


Figura 2.4 - Modelo de solução-difusão

1. Difusão do permeado, da atmosfera a montante da membrana para a interface da mesma;
2. Absorção do permeado pela membrana;
3. Difusão do permeado dentro da membrana e através desta. Este passo é o mais lento, pelo que é o determinante no fluxo através da película;
4. Dessorção do permeado na interface a jusante da membrana;
5. Difusão do permeado na atmosfera a jusante da membrana.

A relação que governa a “Permeação”, neste modelo, é derivada da lei de difusão de *Fick* e da lei da solubilidade de *Henry* e é dada pela seguinte expressão [11]:

$$j = \frac{D \cdot S \cdot (P_0^i - P_l^i)}{l} \quad (2.9)$$

Onde:

$j$  - Fluxo volumétrico de difusão

$P_0^i$  - Pressão parcial do gás  $i$  a montante da membrana

$D$  - Coeficiente de Difusidade

$P_l^i$  - Pressão parcial do gás  $i$  a jusante da membrana

$S$  - Coeficiente de Solubilidade

$l$  - Espessura da membrana

O produto dos coeficientes de Difusidade e de Solubilidade pode ser abreviado dando lugar à Permeabilidade (não confundir com a permeabilidade de Darcy).

$$Perm = D \cdot S \quad (2.10)$$

Ficando com a relação:

$$j = \frac{Perm \cdot (P_0^i - P_l^i)}{l} \quad (2.11)$$

As unidades de permeabilidade são:

(quantidade de gás · espessura da membrana) / (área da membrana · tempo · pressão)

A Permeabilidade pode ser expressa relativa a uma massa de gás ou relativa a um volume de gás. Sendo que no caso de um volume de gás se considera o volume sob condições normais de temperatura e pressão (PTN), 273.15 K (0 °C) e 101325 Pa (1 atm).

As unidades utilizadas para quantificar a permeabilidade diferem bastante de fonte para fonte. Nesta dissertação escolheu-se utilizar as unidades:  $\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{mm} / (\text{m}^2 \cdot \text{dia} \cdot \text{atm})$  uma vez que são as unidades utilizadas pelo fabricante *Covestro* de onde se retirou os valores de permeabilidade para as várias gamas de TPU.

# 3

## Análise e estimativa dos caudais de Difusão

De forma a entender qual a melhor pressão a aplicar na camada de vácuo foi necessário estudar como variam os diferentes fluxos, que circulam no sistema, em função da pressão aplicada na camada. Neste capítulo estabelecem-se as relações que governam estes diferentes fluxos de difusão e retiram-se as funções que os definem para diferentes pressões de vácuo aplicadas na camada permeável.

### 3.1 Permeabilidade do TPU:

Para que seja possível estimar os caudais de difusão foi necessário assumir um valor para a Permeabilidade do TPU tanto para o hélio como para os restantes gases atmosféricos, que daqui para a frente se designam com Ar.

Para tal retirou-se a tabela 3.1 do livro *Permeability of Plastic and Elastomers* [13], onde se encontram os valores da permeabilidade de diferentes tipos de TPU produzidos pelo fabricante de termoplásticos *Covestro*.

Tabela 3.1 – Permeabilidade de diferentes tipos de TPU do fabricante Covestro [13]

Elastollan® Type	Source Document Units, Permeability Coefficient (m <sup>2</sup> /s·Pa) × 10 <sup>-18</sup>						
	Argon	Methane	Carbon Dioxide	Hydrogen	Helium	Nitrogen	Oxygen
	Normalized Units, Permeability Coefficient (cm <sup>3</sup> ·mm/m <sup>2</sup> ·day·atm)						
C 80 A	105	96	1751	394	306	35	123
C 85 A	79	53	1313	350	263	26	88
C 90 A	44	35	350	263	219	18	61
C 95 A	26	18	175	175	175	9	35
1180 A	123	158	2014	613	438	53	184
1185 A	79	123	1576	525	350	44	140
1190 A	61	79	1138	438	263	35	105
1195 A	53	44	788	350	175	26	70

Uma vez que se pretende que o TPU seja o menos permeável possível assumiu-se que o TPU utilizado corresponde ao **TPU C95 A**, que corresponde a TPU do fabricante *Covestro* com menor Permeabilidade.

Da tabela 3.1 é possível retirar diretamente o valor da permeabilidade deste TPU ao hélio, no entanto, para se obter o valor da permeabilidade ao Ar foi necessário fazer-se uma média ponderada das permeabilidades dos diferentes gases constituinte do Ar. Para tal construiu-se a tabela 3.2 onde se indicam as Permeabilidades do TPU aos principais gases constituintes da atmosfera e ainda as frações molares desses gases na atmosfera.

Tabela 3.2 - Permeabilidades e frações molares dos principais gases atmosféricos

Componente	Permeabilidade (TPU C95 A)	Fração molar
Azoto (N <sub>2</sub> )	9	0.78084
Oxigénio (O <sub>2</sub> )	35	0.20946
Árgon (Ar)	26	0.00934
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	175	0.00033
Hélio (He)	175	$5.24 \cdot 10^{-6}$
Metano (CH <sub>4</sub> )	18	$1.79 \cdot 10^{-6}$
Hidrogénio (H <sub>2</sub> )	175	$5 \cdot 10^{-7}$

A Permeabilidade do TPU ao Ar pode então ser calculada pela média ponderada das permeabilidades dos diferentes gases atmosféricos (excetuando o Hélio) nos quais os pesos equivalem às frações molares desses gases na atmosfera:

$$Perm(ar) = \frac{(9 \cdot 0.78084) + (35 \cdot 0.20946) + (26 \cdot 0.00934) + (175 \cdot 0.00033) + (18 \cdot 1.79 \cdot 10^{-6}) + (175 \cdot 5 \cdot 10^{-7})}{1 - (5.24 \cdot 10^{-6})}$$

$$Perm(ar) = 14.659 \approx 15$$

No seguimento desta dissertação assumiu-se que as perdas de hélio são inteiramente devidas à difusão, ou seja, não são considerados quaisquer defeitos ou furos no envelope do ABM e os valores para a permeabilidade do TPU que constitui o envelope do ABM são os apresentados na tabela 3.3

Tabela 3.3 Permeabilidade do TPU

Permeabilidade do TPU ao Hélio:	175	$\frac{cm^3 * mm}{m^2 \cdot dia \cdot atm}$
Permeabilidade do TPU ao Ar:	15	

## 3.2 Análise dos caudais de fuga em função da pressão de vácuo

Após o cálculo da permeabilidade do TPU realizou-se uma análise dos diferentes fluxos de difusão que estão presentes no sistema proposto para diferentes pressões de vácuo na camada permeável. Existem quatro diferentes fluxos radiais: o hélio que atravessa do interior do ABM para a camada de vácuo, o hélio que atravessa da camada de vácuo para a atmosfera (perdas), o ar que atravessa da atmosfera para a camada e ainda o ar que atravessa da camada de vácuo para o interior do ABM (contaminação). Estes fluxos radiais estão esquematizados na figura 3.1.

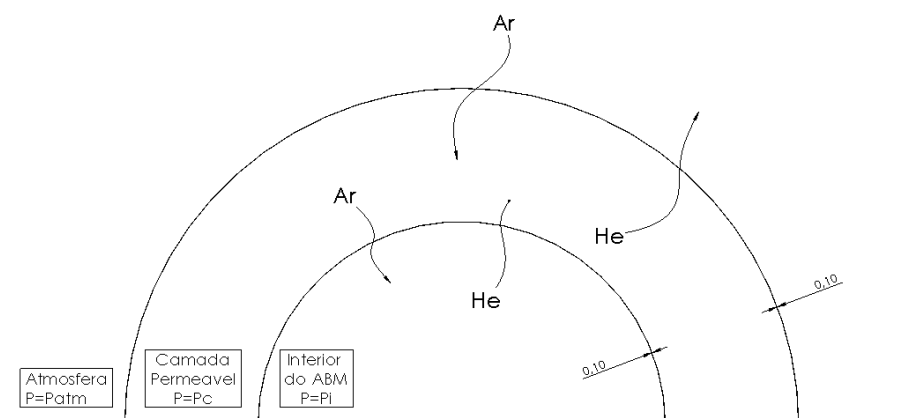


Figura 3.1 – Esquema dos fluxos de difusão em circulação no sistema

### 3.2.1 Análise das pressões parciais

Sabe-se que a pressão parcial de um gás numa mistura corresponde ao produto da pressão total da mistura dos gases pela fração molar desse gás na mistura.

Portanto para calcular as pressões parciais do ar e do hélio nas diferentes zonas do nosso sistema fez-se uma análise das frações molares no interior do ABM, na camada permeável e na atmosfera envolvente. Considerando que a pressão no interior do ABM se mantém constante, construiu-se o esquema da figura 3.2, onde se simplificou o esquema da figura 3.1, para uma melhor compreensão do sistema.

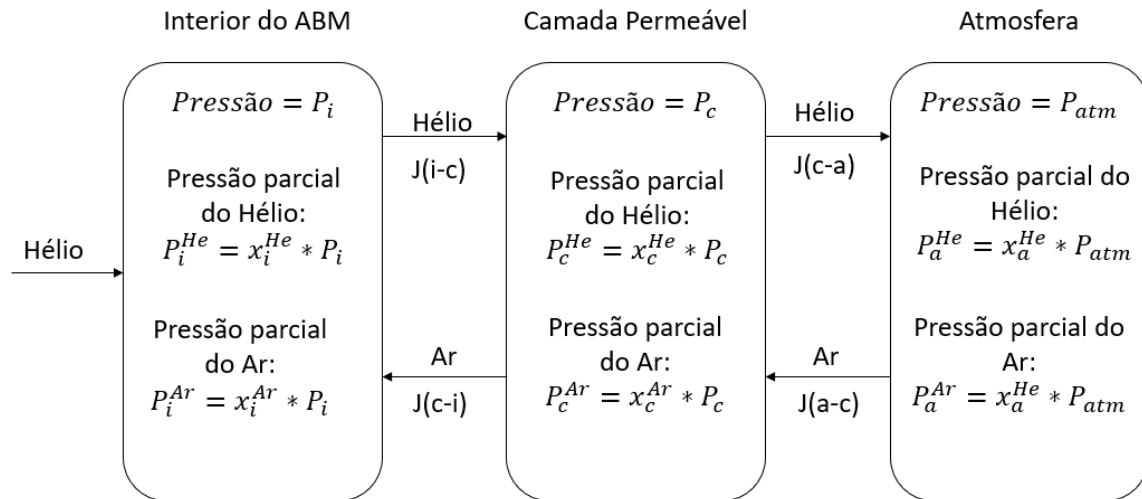


Figura 3.2 - Esquema simplificado das pressões parciais e fluxos entre as diferentes zonas do sistema

Sabe-se que as pressões parciais, tanto do hélio como do ar, na atmosfera se mantêm constantes, isto é, tanto a pressão atmosférica como as frações molares de ambos os gases não variam. Portanto assume-se do capítulo 2 que:

$$x_a^{He} = 5.24 * 10^{-6} \text{ e } x_a^{Ar} = 1, \text{ para qualquer pressão na camada.}$$

No entanto as restantes pressões parciais variam com a pressão de vácuo aplicada na camada pelo que foi necessária uma análise destas pressões em função do vácuo aplicado na camada.

### 3.2.2 Análise do fluxo de contaminação de ar

Pretende-se analisar a evolução dos diferentes caudais para as diferentes pressões de vácuo na camada permeável ( $P_c$ ). No entanto é necessário ter em conta que na presença de  $J(c-i)$ , ou seja, considerando a existência de um fluxo de ar que contamina o interior do ABM, as pressões parciais dos gases no interior do ABM variam no tempo devido à alteração das frações molares destes gases no seu interior. Este facto torna o problema bastante complicado pois todos os fluxos representados na figura 3.2 encontram-se em regime transitório, isto é, variam no tempo, até se atingir um equilíbrio no qual  $J(c-i)$  se anula. Este equilíbrio é atingido quando as pressões parciais do ar no interior do ABM e na camada permeável são iguais. Quando isto acontece todas as pressões parciais, tanto para o hélio como para o ar, atingem um equilíbrio e consequentemente também os fluxos de Difusão.

Fez-se então uma análise das pressões parciais que anulam o fluxo de contaminação de ar como ilustrado na figura 3.3.

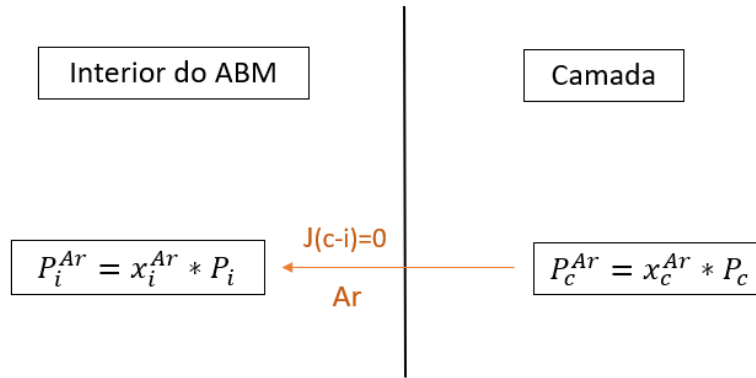


Figura 3.3 - Esquema das pressões parciais que anulam a contaminação

Fazendo:  $P_i^{Ar} = P_c^{Ar}$  obtém-se a relação:

$$x_i^{Ar} = \frac{x_c^{Ar} \cdot P_c}{P_i} \quad (3.6)$$

Isto significa que no caso de circular na camada uma mistura de 50% ar, 50% hélio e ainda se for aplicada uma pressão na camada de 10% da pressão interna do ABM então, no instante em que termina a contaminação de ar para o interior do ABM, irá existir uma fração molar de ar no interior do ABM equivalente a:

$$x_i^{Ar} = \frac{x_c^{Ar} \cdot P_c}{P_i} = 0.5 \cdot 0.1 = 0.05$$

O que corresponde à existência de 5% de Ar no interior do ABM, ou seja, uma perda de 5% na força de impulsão do mesmo. Este valor sugere que é então possível aplicar uma pressão de vácuo na camada para a qual a contaminação do ar não é significativa.

### 3.2.3 Análise dos fluxos de difusão em função da pressão na camada

De forma a perceber como variam os fluxos de difusão com a pressão aplicada na camada fez-se uma análise dos caudais que circulam no sistema como demonstrado no esquema da figura 3.4. Sabendo os caudais que atravessam os dois envelopes do sistema, o TPU que separa o interior do ABM e a camada e ainda o TPU que separa a camada permeável da atmosfera, é possível saber quais os fluxos de difusão que atravessam os mesmos através da expressão:

$$j = \frac{Q}{A_s} \quad (3.7)$$

Sendo que  $A_s$  representa a área da superfície dos Envelopes. Considerou-se que as áreas de ambos os envelopes são iguais dado que apresentam uma diferença pouco significativa uma vez que a espessura da camada é de 0.2 mm.

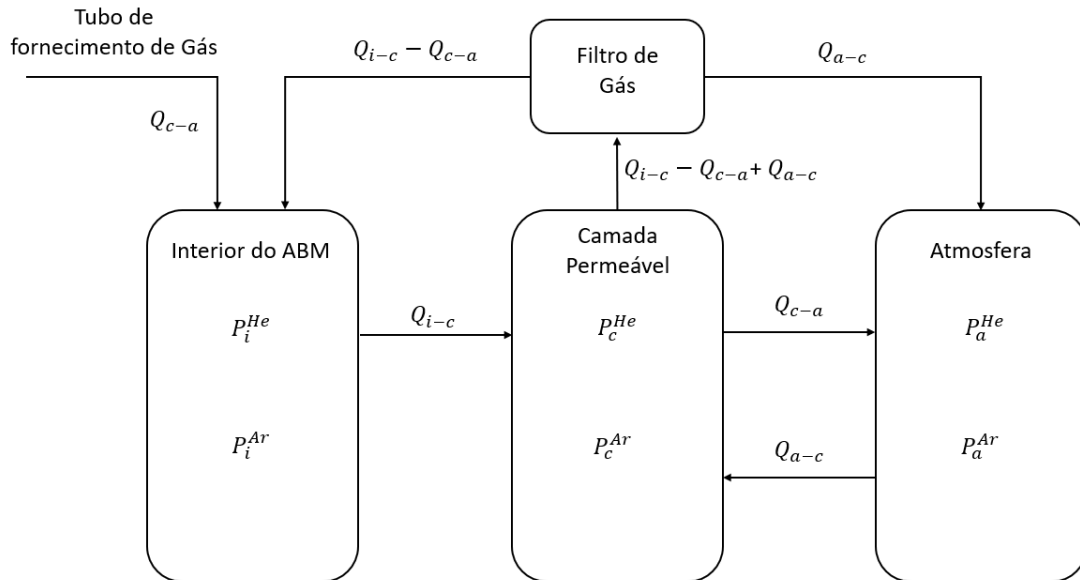


Figura 3.4 - Caudais em circulação no sistema

Após a análise destes caudais, estabeleceu-se um conjunto de relações que permitem criar um sistema de 7 equações e 7 incógnitas obtendo-se assim a solução para este sistema.

1. Como referido acima, de forma a estudar os fluxos num regime estacionário, não pode existir contaminação de ar para o interior do ABM e, portanto, estabeleceu-se a seguinte condição:

$$P_i^{Ar} = P_c^{Ar} \quad \leftrightarrow \quad x_i^{Ar} \cdot P_i = x_c^{Ar} \cdot P_c \quad (3.8)$$

2. Fazendo um balanço ao hélio na camada permeável é possível exprimir a fração molar do hélio em função dos caudais que entram e saem da camada. Na figura 3.5 encontra-se representado um esquema que simplifica esta análise.

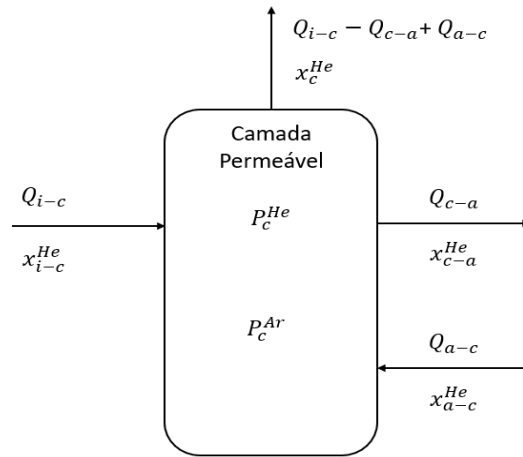


Figura 3.5 - Esquema do balanço do hélio na camada

Fazendo o balanço ao Hélio na camada obtêm-se:

$$x_c^{He} \cdot (Q_{i-c} - Q_{c-a} + Q_{a-c}) = x_{i-c}^{He} \cdot Q_{i-c} - x_{c-a}^{He} \cdot Q_{c-a} + x_{a-c}^{He} \cdot Q_{a-c} \quad (3.9)$$

Uma vez que  $Q_{i-c}$  e  $Q_{c-a}$  representam caudais de difusão de unicamente hélio:

$$x_{i-c}^{He} = x_{c-a}^{He} = 1$$

O caudal de difusão  $Q_{a-c}$  representa um caudal de difusão de unicamente ar e, portanto:

$$x_{a-c}^{He} = 0$$

Substituindo estas igualdades em 3.9 obtêm-se:

$$x_c^{He} \cdot (Q_{i-c} - Q_{c-a} + Q_{a-c}) = Q_{i-c} - Q_{c-a} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow x_c^{He} = \frac{Q_{i-c} - Q_{c-a}}{(Q_{i-c} - Q_{c-a} + Q_{a-c})}$$

Dado que as áreas são iguais:

$$x_c^{He} = \frac{j_{i-c} - j_{c-a}}{(j_{i-c} - j_{c-a} + j_{a-c})} \quad (3.10)$$

3. Na camada considera-se uma mistura de apenas dois gases, o h lio e o ar, portanto assume-se que a fra o molar do ar equivale a:

$$x_c^{Ar} = 1 - x_c^{He} \quad (3.11)$$

4. No interior do ABM de forma equivalente ao que acontece na camada, a fra o molar do ar equivale a:

$$x_i^{Ar} = 1 - x_i^{He} \quad (3.12)$$

5. A equa o que define o fluxo molar de h lio que escapa do interior do ABM para a camada   dada pelo modelo de Solu o-Difus o.

$$j_{i-c} = \frac{Perm(He)}{l} * (P_i^{He} - P_c^{He}) \leftrightarrow j_{i-c} = \frac{Perm(He)}{l} * (x_i^{He} \cdot P_{interna} - x_c^{He} * P_c) \quad (3.13)$$

6. A equa o que define o fluxo de H lio que escapa da camada para a atmosfera (perdas)   dada por:

$$j_{c-a} = \frac{Perm(He)}{l} * (P_c^{He} - P_a^{He}) \leftrightarrow j_{c-a} = \frac{Perm(He)}{l} * (x_c^{He} * P_c - x_a^{He} \cdot P_{atm}) \quad (3.14)$$

7. A equa o que define o fluxo de ar que atravessa da atmosfera para a camada   dada por:

$$j_{a-c} = \frac{Perm(Ar)}{l} * (P_a^{Ar} - P_c^{Ar}) \leftrightarrow j_{a-c} = \frac{Perm(Ar)}{l} * (x_a^{Ar} \cdot P_{atm} - x_c^{Ar} * P_c) \quad (3.15)$$

### 3.2.4 Resolução do sistema

Através das equações anteriores pode-se construir o seguinte sistema de equações que tem como incógnitas:  $x_i^{Ar}$ ,  $x_i^{He}$ ,  $x_c^{Ar}$ ,  $x_c^{He}$ ,  $j_{i-c}$ ,  $j_{c-a}$ ,  $j_{a-c}$  e  $P_c$  (7 equações e 7 incógnitas).

$$\begin{cases} x_i^{Ar} \cdot P_i = x_c^{Ar} \cdot P_c \\ x_c^{He} = \frac{j_{i-c} - j_{c-a}}{(j_{i-c} + j_{a-c}) - (j_{c-a} + j_{c-i})} \\ x_c^{Ar} = 1 - x_c^{He} \\ x_i^{Ar} = 1 - x_i^{He} \\ j_{i-c} = \frac{Perm(He)}{l} * (x_i^{He} \cdot P_{interna} - x_c^{He} * P_c) \\ j_{c-a} = \frac{Perm(He)}{l} * (x_c^{He} * P_c - x_a^{He} \cdot P_{atm}) \\ j_{a-c} = \frac{Perm(Ar)}{l} * (x_a^{Ar} \cdot P_{atm} - x_c^{Ar} * P_c) \end{cases}$$

Substituindo as constantes pelos seus valores:

$$Perm(He) = 175 \text{ [cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{dia} \cdot \text{atm})]$$

$$Perm(Ar) = 15 \text{ [cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{dia} \cdot \text{atm})]$$

$$l = 0.1 \text{ [mm]}$$

$$P_{atm} = 0.944 \text{ [bar]} = 0.932 \text{ [atm]} \text{ (a 600 metros de altitude)}$$

$$P_{interna} = 1.03325 \text{ [bar]} = 1.020 \text{ [atm]}$$

$$x_a^{He} = 5.24 \cdot 10^{-6}$$

$$x_a^{Ar} = 1 - 5.24 \cdot 10^{-6}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_i^{Ar} \cdot 1.020 = x_c^{Ar} \cdot P_c \\ x_c^{He} = \frac{j_{i-c} - j_{c-a}}{(j_{i-c} + j_{a-c}) - (j_{c-a} + j_{c-i})} \\ x_c^{Ar} = 1 - x_c^{He} \\ x_i^{Ar} = 1 - x_i^{He} \\ j_{i-c} = \frac{175}{0.1} \cdot (x_i^{He} \cdot 1.020 - x_c^{He} \cdot P_c) \\ j_{c-a} = \frac{175}{0.1} \cdot (x_c^{He} \cdot P_c - 5.24 \cdot 10^{-6} \cdot 0.932) \\ j_{a-c} = \frac{15}{0.1} \cdot ((1 - 5.24 \cdot 10^{-6}) \cdot 0.932 - x_c^{Ar} \cdot P_c) \end{array} \right.$$

A solução deste sistema é uma função de  $P_c$  e existem várias soluções para a mesma incógnita. Portanto impôs-se as seguintes condições, para se obter apenas uma solução:

$$x_i^{Ar}, x_i^{He}, x_c^{Ar}, x_c^{He}, j_{i-c}, j_{c-a}, j_{a-c} > 0 \quad \wedge \quad 0 < P_c < 1$$

A resolução do sistema é bastante vasta, portanto para simplificar apresenta-se apenas a solução para as condições impostas:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 x_i^{He} = \frac{-2.053 \cdot ((P_c - 1.507) \cdot \sqrt{P_c^2 - 1.069 \cdot P_c + 0.330} + P_c^2 - 2.042 \cdot P_c + 1.300)}{\sqrt{P_c^2 - 1.069 \cdot P_c + 0.330} + P_c - 1.465} \\
 x_i^{Ar} = 1 - \frac{-2.053 \cdot ((P_c - 1.507) \cdot \sqrt{P_c^2 - 1.069 \cdot P_c + 0.330} + P_c^2 - 2.042 \cdot P_c + 1.300)}{\sqrt{P_c^2 - 1.069 \cdot P_c + 0.330} + P_c - 1.465} \\
 x_c^{He} = \frac{-1.094 \cdot ((P_c - 1.952) \cdot \sqrt{P_c^2 - 1.069 \cdot P_c + 0.330} + P_c^2 - 1.636 + 1.122)}{\sqrt{P_c^2 - 1.069 \cdot P_c + 0.330} + P_c - 1.465} \\
 x_c^{Ar} = 1 - \frac{-1.094 \cdot ((P_c - 1.952) \cdot \sqrt{P_c^2 - 1.069 \cdot P_c + 0.330} + P_c^2 - 1.636 + 1.122)}{\sqrt{P_c^2 - 1.069 \cdot P_c + 0.330} + P_c - 1.465} \\
 j_{i-c} = -1750 \cdot (P_c - 1.020) \\
 j_{c-a} = -1832.03 \cdot (\sqrt{P_c^2 - 1.069 \cdot P_c + 0.330} + 0.045 \cdot (P_c - 12.832)) \\
 j_{a-c} = -157.031 \cdot (\sqrt{P_c^2 - 1.069 \cdot P_c + 0.330} + P_c - 1.465)
 \end{array} \right.$$

Com  $P_c$  em atmosferas (atm).

### 3.3 Conclusões

Obtendo a solução do sistema construíram-se os gráficos que demonstram a evolução das diferentes variáveis em função da pressão na camada. Estes gráficos têm o objetivo de dar a entender qual a pressão de vácuo mais indicada a aplicar na camada permeável. As unidades de pressão foram convertidas para a unidade do bar através da relação:

$$1 \text{ atm} = 1.01325 \text{ bar}$$

Dado que as bombas de vácuo convencionais apresentam geralmente uma pressão mínima superior a 0.1 bar e visto que estamos a considerar uma pressão atmosférica de 0.944 bar (pressão atmosférica a 600 m de altitude), o intervalo de pressões considerado foi:

$$0.1 < P_c < 0.9 \text{ [bar]}$$

No gráfico representado na figura 3.6 representa-se a fração molar do Hélio (linha azul) e do ar (linha laranja) no interior do ABM em função da pressão de vácuo aplicado na camada. Observa-se que com a diminuição da pressão na camada (aumento da magnitude do vácuo) a concentração de hélio no interior do ABM tende a aumentar e conseqüentemente a concentração de ar tende a diminuir até se atingir uma mistura de apenas 1% de ar para a pressão de 0.1 bar na camada. Este resultado conclui que é então possível obter uma concentração de ar na camada pouco significativa para uma pressão na camada suficientemente pequena.

Relembra-se que este resultado pressupõe que para estas concentrações o fluxo de ar que contamina a camada é nulo, ou seja, para a pressão de 0.1 bar o ar difunde-se para o interior do ABM até se atingir uma concentração de 1% de ar no seu interior, a partir deste ponto a contaminação é nula.

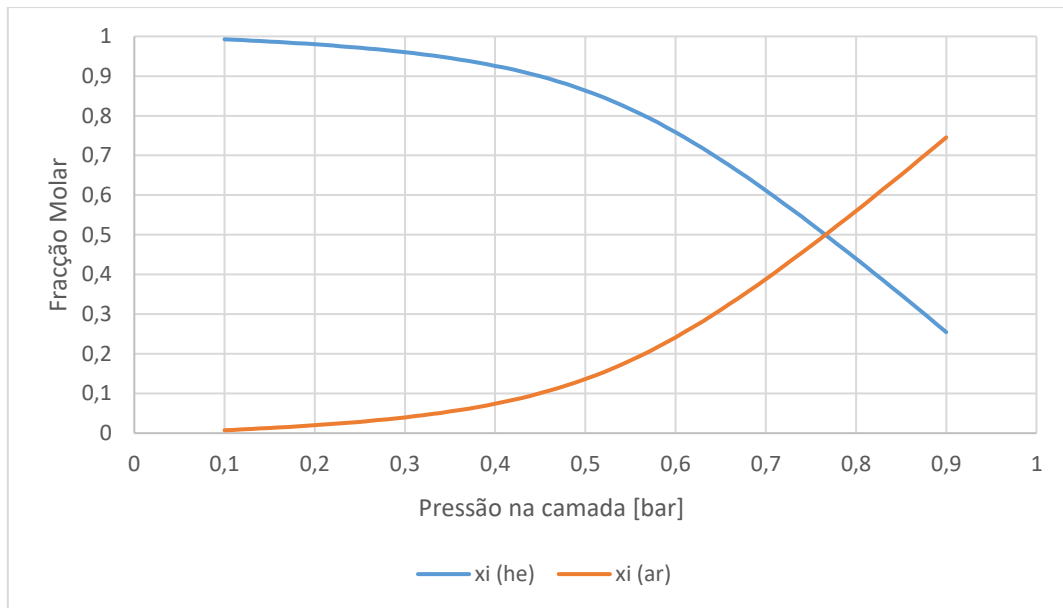


Figura 3.6 - Frações molares dos gases no interior do ABM

No gráfico representado na figura 3.7 representa-se a evolução das pressões parciais do hélio (linha azul) e do ar (linha laranja) na camada permeável com a variação da pressão na mesma. É possível verificar que com a diminuição da pressão a concentração de hélio aumenta até um valor máximo de cerca 85% de hélio para a pressão de 0.1 bar. Este resultado indica que o sistema de separação de gases terá que separar um volume de ar que diminui com a diminuição da pressão na camada, sendo para este efeito também favorável uma pressão menor na camada permeável. Observa-se também que quando a camada se encontra quase à pressão ambiente (0.9 bar) a concentração de hélio na camada é de 85%. Isto indica que mesmo sem vácuo na camada, a pressão parcial do hélio é superior à atmosférica como se verifica na secção seguinte.

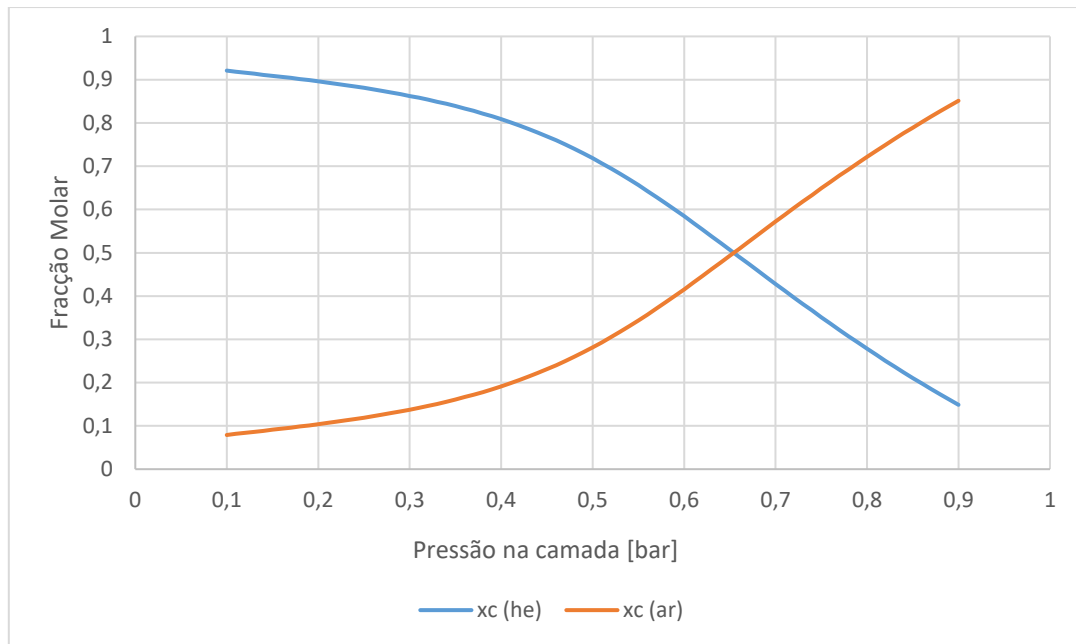


Figura 3.7 - Frações molares dos gases na Camada permeável

Pode-se então afirmar que, no que diz respeito à concentração de ar no interior do ABM e à separação de gases, é desejável uma pressão de vácuo o mais baixo possível.

Posto isto analisou-se a evolução das pressões parciais do hélio nas diferentes zonas. A pressão parcial é dada por 2.7.

$$p^{He} = P * x^{He}$$

Sabendo a pressão da mistura de gás e a fração molar do hélio nas diferentes zonas construíram-se os gráficos das pressões parciais do hélio representados na figura 3.8.

Observa-se que a pressão parcial do hélio no interior do ABM (linha azul) decresce com o aumento da pressão na camada. Dado que a pressão no interior do ABM é constante, este comportamento encontra-se de acordo com o gráfico da figura 3.6 no qual se nota que a fração molar do hélio no interior do ABM apresenta o mesmo comportamento. Relativamente à pressão parcial do hélio na camada (linha laranja), observa-se que, em pressões inferiores a 0.55 bar na camada, esta cresce com o aumento da pressão. Isto deve-se ao facto de a pressão na camada crescer mais rápido do que a fração parcial do hélio na camada decresce (figura 3.7). Em pressões superiores a 0.55 bar o mesmo já não acontece sendo que a pressão parcial do hélio decresce com o aumento da pressão na camada. A pressão parcial do hélio na atmosfera (a cinzento), como é evidente, mantém-se constante para qualquer pressão na camada.

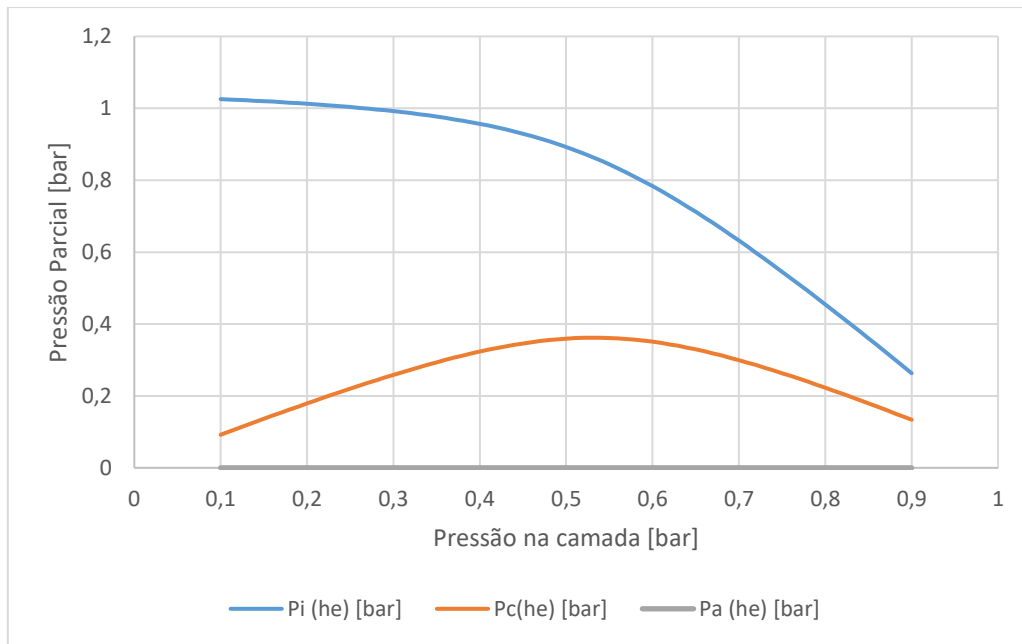


Figura 3.8 - Pressão parcial do hélio nas diferentes zonas do sistema

Após a análise da pressão parcial do hélio realizou-se o mesmo para o ar e construiu-se o gráfico da figura 3.9 que representa as pressões parciais do ar nas diferentes zonas do sistema. Observa-se que as pressões parciais do ar na camada e no interior do ABM se mantêm iguais (a linha azul e a linha laranja encontram-se sobrepostas) como foi imposto em 3.8 de forma a não existir difusão da camada para o interior do ABM. Quanto à pressão parcial do ar na atmosfera (linha a cinzento), da mesma forma que o hélio, esta mantém-se constante para qualquer pressão.

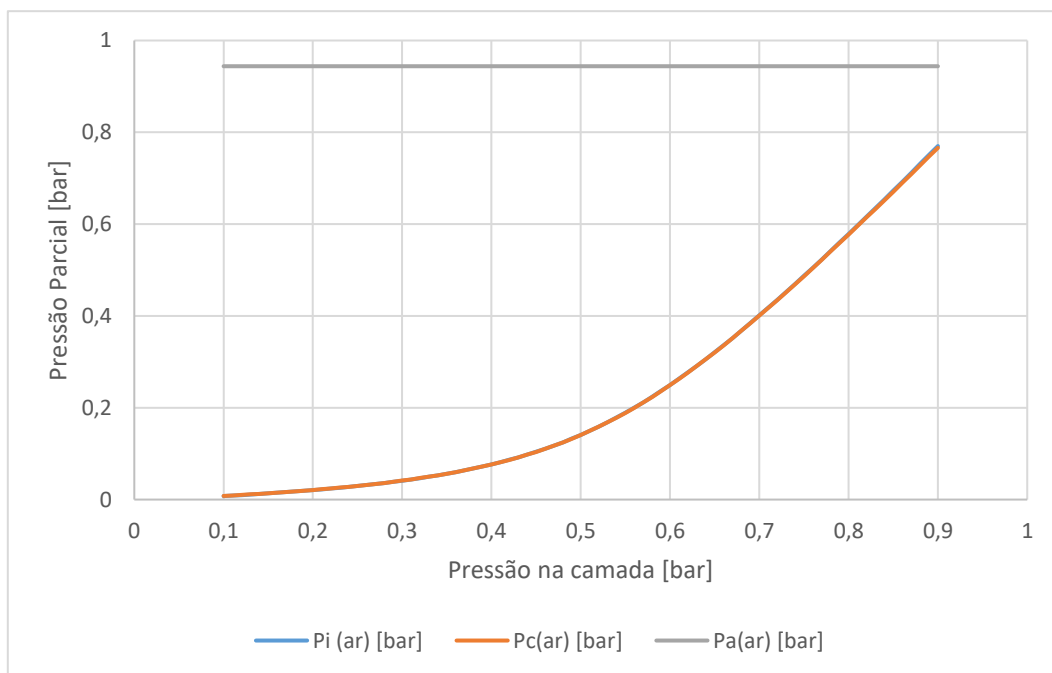


Figura 3.9 - Pressão parcial do ar nas diferentes zonas do sistema

De forma a compreenderem-se com maior facilidade as quantidades de gás em circulação no sistema, representou-se os fluxos de gás na forma de caudal volumétrico para as condições PTN. O caudal Volumétrico foi relacionado com os fluxos molares através da relação:

$$Q = j \cdot v \cdot A_s \quad (3.15)$$

Uma vez que se consideraram os gases como gases perfeitos, o seu volume molar  $v$  equivale a 22400 [cm<sup>3</sup> (STP)/mol]. A área de superfície foi considerada igual de ambos os lados da camada permeável e equivalente a 250 m<sup>2</sup>.

Posto isto construíram-se o gráfico da figura. 3.10 onde estão representados o caudal de hélio que atravessa do interior do ABM para a camada (linha azul), o caudal de hélio que se perde para a atmosfera (linha laranja) e o caudal de ar que atravessa da atmosfera para a na camada permeável (linha cinzenta). Sabe se que os caudais de difusão são proporcionais à diferença de pressões parciais do gás.

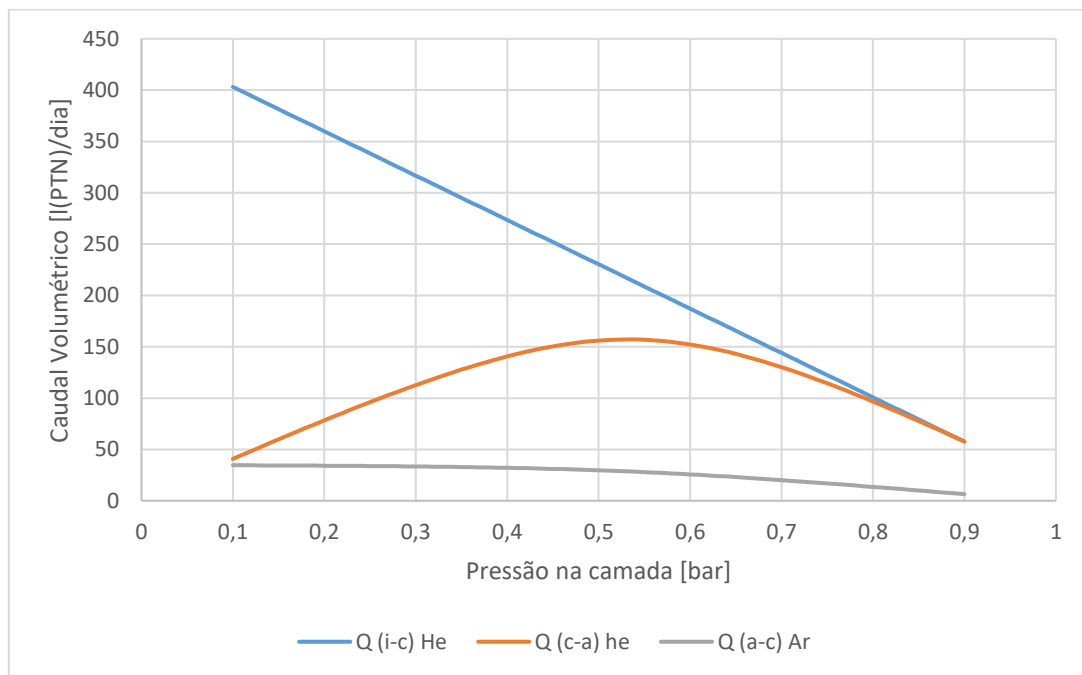


Figura 3.10 - Caudais Volumétricos entre as diferentes zonas do sistema

Observando-se o gráfico da figura 3.8 verifica-se que a pressão parcial do hélio no interior do a ABM e na camada tendem a aproximar-se com o aumento de pressão na camada, isto resulta num caudal de hélio que diminui com o aumento da pressão da camada. Este comportamento pode ser observado no gráfico da figura 3.10 onde  $Q_{i-c}$  diminui linearmente com aumento da pressão na camada. Quanto ao caudal de hélio se perde da camada para a atmosfera, nota-se que tem um comportamento muito similar ao da pressão parcial do hélio na camada representado na figura 3.8. Isto deve-se a facto de a pressão parcial do hélio na atmosfera ser constante. No caso do caudal de ar que atravessa da atmosfera para a camada permeável, este, apresenta um comportamento decrescente com o aumento

da pressão na camada. Mais uma vez analisando as pressões parciais do ar representadas na figura 3.9 observa-se que  $P_c^{Ar}$  e  $P_a^{Ar}$  tendem a aproximar-se com o aumento da pressão na camada, o que justifica este comportamento de  $Q_{a-c}$ , uma vez que o fluxo de difusão é proporcional à diferença de pressões parciais.

Após esta interpretação dos caudais de gás que circulam no sistema é então possível retirar as conclusões necessárias à seleção da melhor pressão a aplicar na camada permeável. Pretende-se acima de tudo minimizar o caudal de hélio que é perdido para a atmosfera  $Q_{c-a}$ . No caso do ABM atual sabe-se que as perdas de hélio rondam os 200l/dia. No gráfico 3.10 analisando a curva de perdas de Hélio,  $Q_{c-a}$ , nota-se que, mesmo no máximo desta curva ( $P_c = 0.55\text{bar}$ ) este valor encontra-se abaixo dos 200l/dia, o que se revela um ótimo resultado para o desenvolvimento desta dissertação. Aumentando ou diminuindo a pressão na camada observa-se que este valor diminui ainda mais. Nota-se ainda que no caso de se aplicar uma pressão quase atmosférica ( $P_c = 0.9 \text{ bar}$ ) as perdas são semelhantes a aplicar uma pressão de 0.15 bar na camada permeável. No entanto relembra-se que para uma pressão de 0.9 bar na camada, a percentagem de ar no interior do ABM, no instante em que a contaminação deixa de acontecer, equivale a 75% o que não é de todo admissível.

Posto isto conclui-se que quanto menor a pressão na camada permeável melhor o desempenho do sistema, tanto a concentração de ar no interior do ABM diminui, como, abaixo dos 0.55 bar de pressão, também diminuem as perdas de hélio para a atmosfera.

Resta então realizar-se uma análise dos caudais que circulam na camada permeável de forma a entender-se qual o volume que a bomba de vácuo terá que deslocar de forma a manter a pressão da camada constante.

Retomando ao esquema da figura 3.5 sabe-se que a bomba terá que deslocar um volume que equivale a:

$$Q_{camada} = Q_{i-c} - Q_{c-a} + Q_{a-c} \quad (3.16)$$

Este caudal representa um volume deslocado para as condições PTN, portanto é necessário converter este volume da pressão normal, 1.01325 bar, para a pressão na camada. Através da equação dos gases perfeitos sabe-se que:

$$V_1 \cdot P_1 = V_2 \cdot P_2 \Leftrightarrow V_2 = \frac{P_1}{P_2} \cdot V_1, \text{ e, portanto, temos que o caudal na camada equivale a:}$$

$$Q_{camada}(P = P_c) = \frac{1.01325}{P_c} \cdot Q_{camada}(P = 1.01325 \text{ bar}) \quad (3.17)$$

Posto isto construiu-se o gráfico da figura 3.11 onde se representa o caudal de gás, ar e hélio, que circula na camada permeável para diferentes pressões de vácuo aplicadas na mesma.

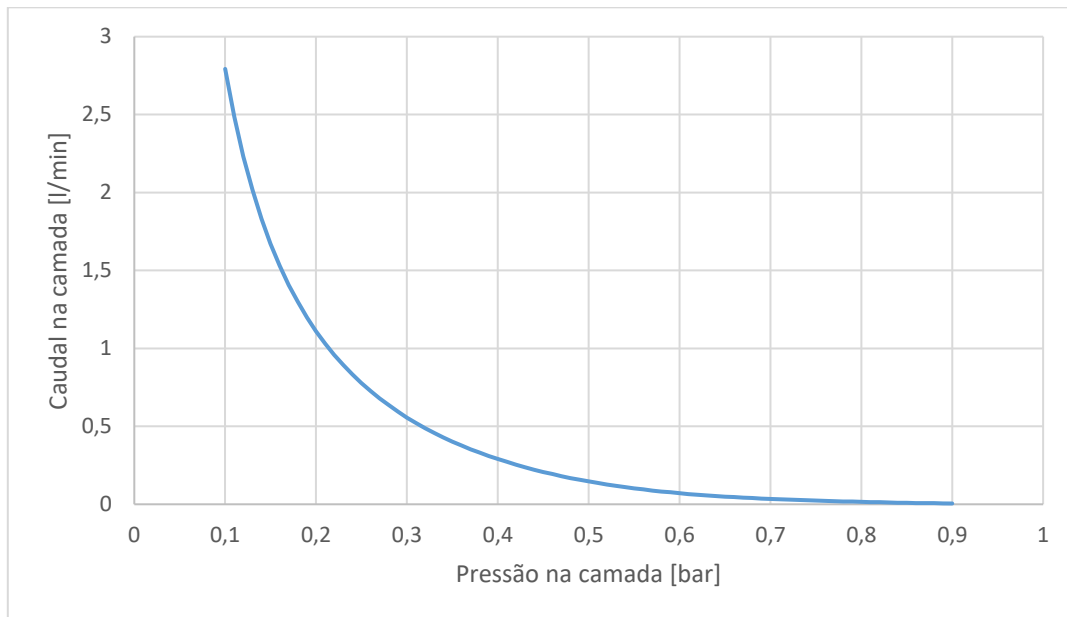


Figura 3.11 - Caudal de gás extraído da camada

Observa-se que este caudal aumenta exponencialmente com a diminuição da pressão na camada, isto deve-se ao facto de não só o fluxo molar de gás aumentar com a diminuição da pressão na camada como o volume deste fluxo molar de gás aumentar com a diminuição da pressão (Equação dos gases perfeitos). Como era esperado o caudal máximo dá-se para a pressão mínima na camada, ou seja, para a pressão de 0,1 bar, quando o caudal equivale a cerca de 2,8 l/min.

Com estes dados calculou-se a potência teórica que a bomba de vácuo teria que consumir para este efeito. Considerando uma pressão à entrada da bomba de 100 mbar e uma pressão à saída igual à pressão atmosférica ao nível do mar, ou seja 1010 mbar, a bomba terá uma diferença de pressão ( $\Delta P$ ) igual a 910 mbar.

A potência teórica da bomba de vácuo é dada por:

$$W = \Delta P \cdot Q = 91000 \text{ [Pa]} \cdot \frac{2,8}{60 \cdot 1000} \text{ [m}^3\text{/s]} = 4,25 \text{ [W]}$$

No entanto uma vez que as bombas não são máquinas ideais a potência real da bomba deverá ser superior a este valor. No anexo A apresenta-se a ficha técnica de uma bomba adequada para este efeito que apresenta uma potência máxima de 20 [W] e um peso máximo de 1,6 kg.

# 4

## Ensaio de Permeabilidade

Uma vez que é necessário prever qual a diferença de pressão que vai existir entre os extremos do ABM, é preciso conhecer a permeabilidade de Darcy do material poroso utilizado na camada permeável. Neste capítulo, descrevem-se os ensaios experimentais de permeabilidade realizados a uma amostra de material e apresentam-se os resultados obtidos. Numa primeira parte é descrita a montagem experimental e os passos tomados durante os ensaios e posteriormente apresentam-se os resultados obtidos e a relação destes com a lei de Darcy introduzida anteriormente no capítulo 2.

### 4.1 Descrição do ensaio

Após determinados os fluxos que entram na camada permeável é necessário saber qual o aumento de pressão que ocorre ao longo desta. Na figura 4.1 representa-se uma vista cortada do ABM, a preto estão representados os fluxos que entram na camada e a azul o caudal que circula dentro desta. Sabe-se que no ponto onde se recolhe o gás, isto é, à entrada da bomba de vácuo, irá estar aplicada a pressão mínima e no extremo oposto da camada irá estar a pressão máxima. O que se procura no material desta camada é que este seja o mais permeável possível de forma a minimizar este diferencial de pressão.

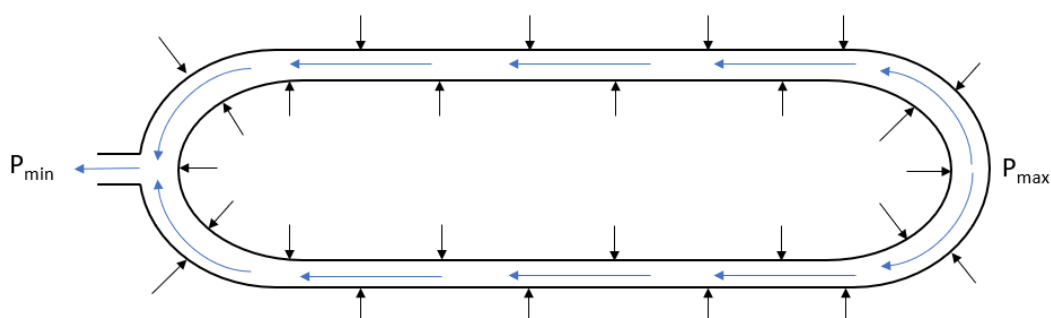


Figura 4.1 - Esquema dos fluxos de difusão e caudal na camada

O material escolhido para a camada para além de permeável tem também de ser o mais leve possível. Posto isto optou-se por uma rede de infusão utilizada na tecnologia de compósitos no processo de infusão de resina por vácuo como descrito no capítulo 1.

Após uma pesquisa dos materiais deste tipo que apresentam o menor peso optou-se pelo material FM105 *EasyFlow Knitted Infusion mesh* cuja ficha técnica se apresenta no anexo B. O peso do material corresponde a 88 g/m<sup>2</sup> e encontra-se ilustrado na figura 4.2.

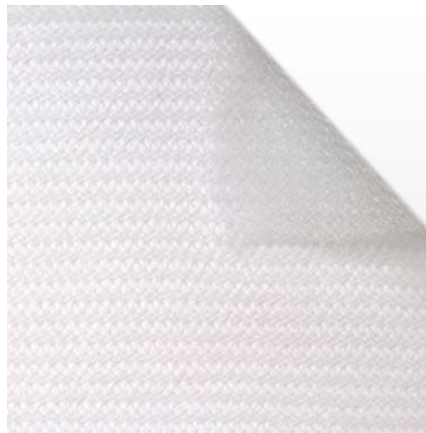


Figura 4.2 - FM105 EasyFlow Knitted Infusion mesh

Foi então necessário encontrar uma forma de medir a permeabilidade deste material para as condições de funcionamento da camada do ABM. Para tal é necessário que a amostra de material esteja envolvida em TPU dado que a rugosidade deste pode contribuir para uma diminuição da permeabilidade da camada. Outra situação que foi necessária ter em conta foi que, ao aplicar-se vácuo no interior da camada, a pressão atmosférica irá pressionar as películas de TPU contra o material permeável diminuindo os espaços vazios que formam canais para o gás circular, como ilustrado na figura 4.3. Este problema dificulta bastante o estudo da permeabilidade, pois à medida que a pressão no interior da camada varia, a permeabilidade do material varia também. Portanto foi necessário um estudo da permeabilidade em função da tensão de compactação aplicada.

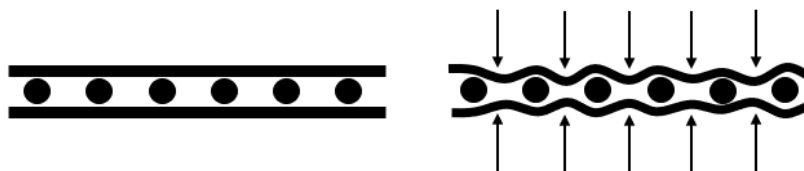


Figura 4.3 - Esquema do efeito de compactação do material

#### 4.1.1 Análise das forças e pressões que atuam no envelope

Na figura 4.4 encontra-se esquematizado uma fatia do envelope do ABM. Neste esquema estão representadas as forças e pressões que atuam no envelope. No interior do ABM a pressão interna atua na película interna de TPU, esta pressão é equilibrada pela pressão aplicada na camada permeável e ainda pela tensão de compressão a que o material permeável está sujeito. Por último estas forças são equilibradas pela pressão atmosférica e pela força tangencial aplicada na camada exterior do envelope.

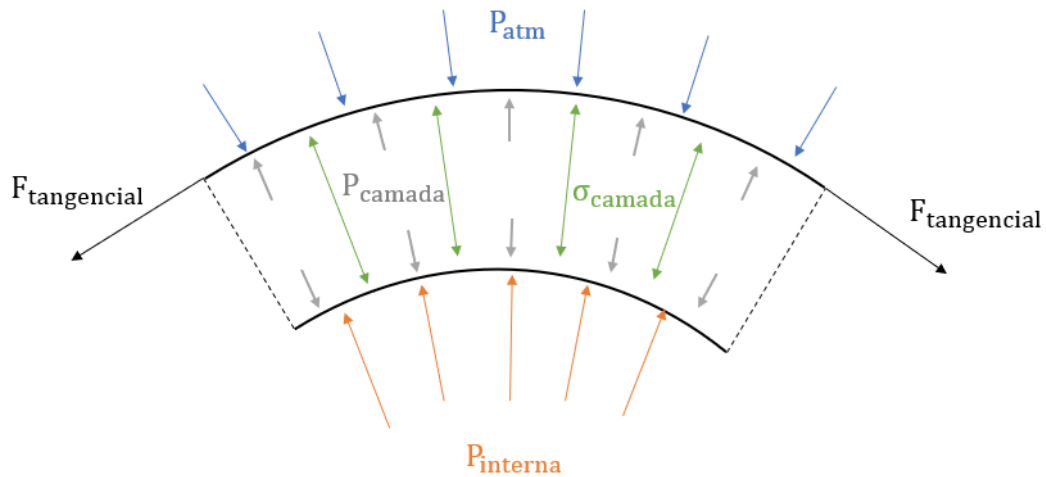


Figura 4.4 - Esquema das forças e pressões que atuam no envelope

Analisando o esquema da figura 4.4 é possível exprimir o equilíbrio de forças que estão aplicadas na camada interna de TPU.

$$P_{interna} = P_{camada} + \sigma_{comp}$$

De onde se retira que a tensão a que o material permeável está sujeito é equivalente a:

$$\sigma_{comp} = P_{interna} - P_{camada} \quad (4.1)$$

### 4.1.2 Montagem experimental

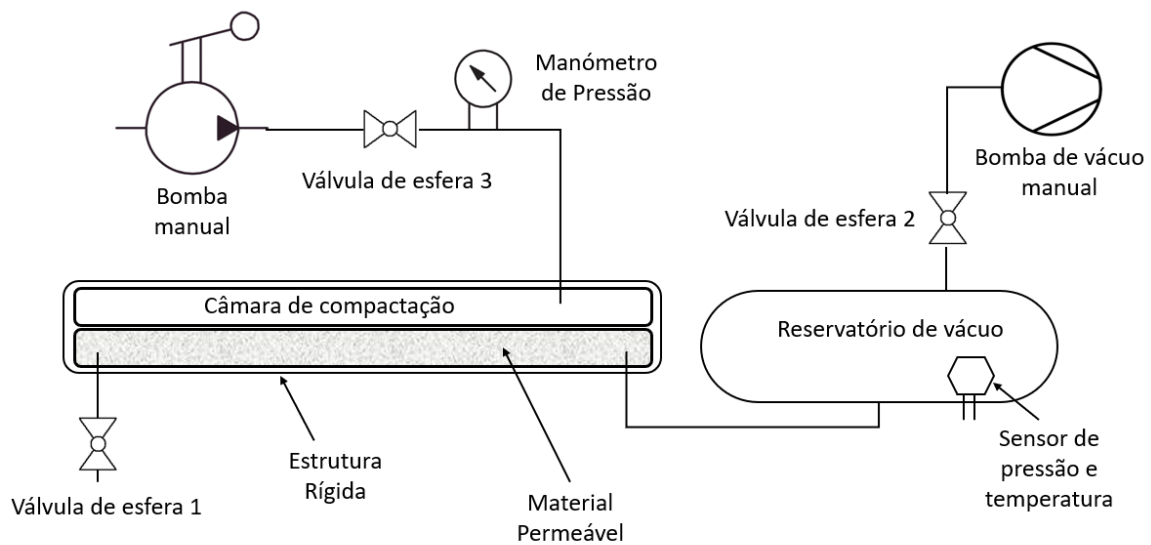


Figura 4.5 - Esquema da montagem experimental

Na figura 4.5 encontra-se um esquema do ensaio realizado. O objetivo deste consiste em determinar a permeabilidade na direção longitudinal do material para diferentes forças de compactação. A amostra de material foi envolvida por uma película de TPU de forma a obter-se uma camada isolada da atmosfera e ao mesmo tempo simular as mesmas condições da camada permeável do ABM. Uma bomba de vácuo foi conectada a um reservatório e utilizou-se uma válvula de esfera de forma a ser possível isolar-se o reservatório da bomba de vácuo. No mesmo reservatório colocou-se um sensor de pressão e temperatura e a um dos extremos do material foi conectado um tubo que se ligou a este reservatório. No outro extremo do material ligou-se uma válvula de esfera (válvula de esfera 1) que quando fechada isola o material da atmosfera. Aplicando vácuo no reservatório, com a válvula de esfera que liga ao material fechada, o mesmo vácuo é aplicado na camada onde se encontra a amostra de material. A amostra de material envolvida em TPU foi encostada a uma câmara de compactação, que consiste num reservatório de paredes flexíveis conectado a uma bomba de pressão com manómetro, e este conjunto foi inserido numa estrutura rígida. Aplicando pressão nesta câmara, as paredes desta expandem-se ficando a amostra de material sujeita a uma tensão de compactação equivalente à pressão colocada na câmara. Desta forma foi possível simular diferentes tensões de compactação aplicando diferentes pressões na câmara de compactação.

Na figura 4.6 apresenta-se uma foto da montagem experimental completa onde se observa, à direita o reservatório de vácuo onde está conectada uma bomba de vácuo, no meio, a estrutura rígida que envolve a câmara de pressão e a amostra de material que envolve o material, e à esquerda, a bomba utilizada para aplicar pressão na câmara de compactação.

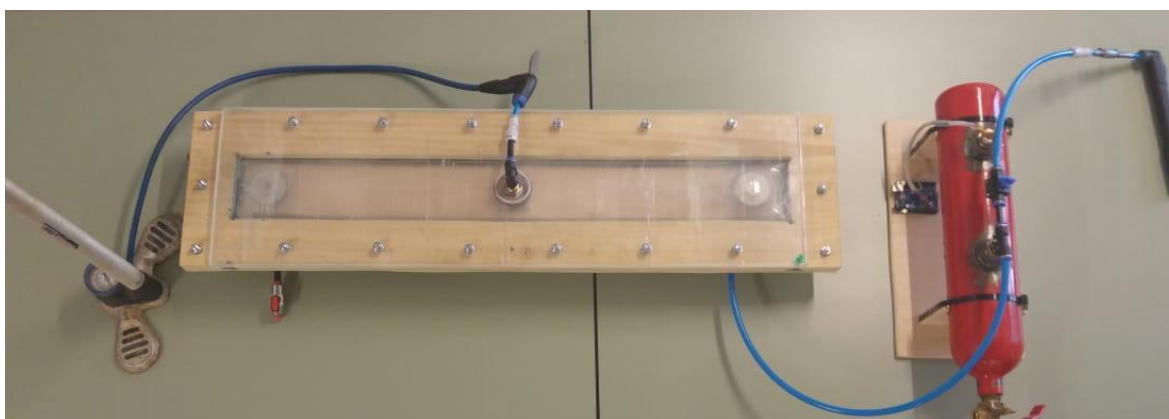


Figura 4.6 - Montagem experimental

O reservatório de vácuo pode ser observado em pormenor na figura 4.7, nesta câmara estão conectados dois tubos, o tubo que segue para a amostra de material, de cor azul, e o tubo que se conecta à bomba de vácuo, de cor preta.



Figura 4.7 - Câmara de vácuo

Na figura 4.8 é possível observar em pormenor a tomada de ar que se conecta à câmara de pressão contida na estrutura rígida feita em madeira e acrílico e ainda a válvula de esfera 3, utilizada para isolar a câmara da bomba de pressão.

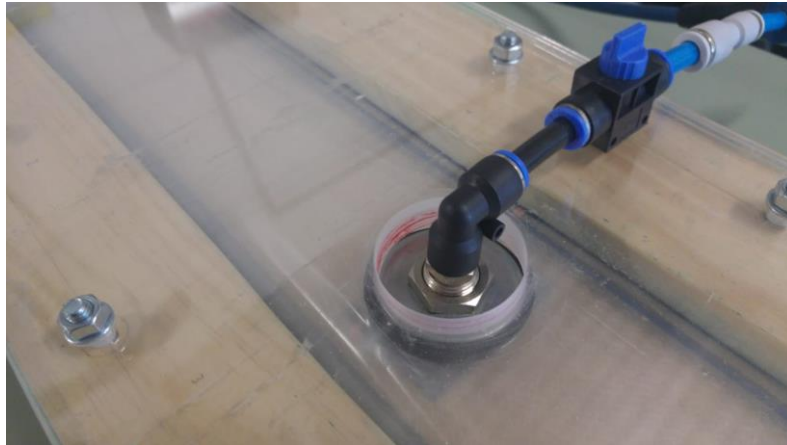


Figura 4.8 - Tomada de ar da câmara de pressão

Na figura 4.9 encontra-se ilustrada a tomada de ar, contida na estrutura rígida, que conecta amostra de material à válvula 1, que separa a amostra da atmosfera.

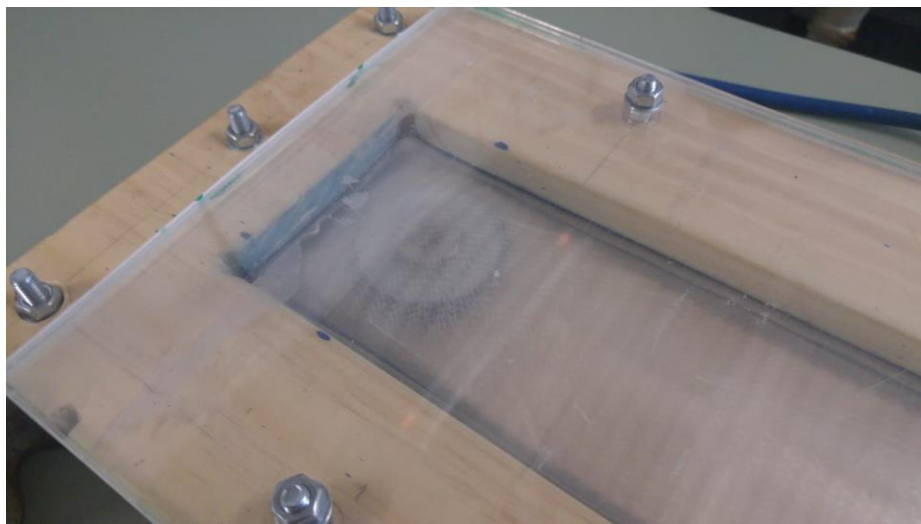


Figura 4.9 - Tomada de ar da amostra de material

Na figura 4.10 encontra-se ilustrado o segmento inferior da estrutura rígida que contem a amostra de material e a câmara de compactação. Ambas as tomadas de ar aqui evidenciadas fazem a conexão com a amostra de material.

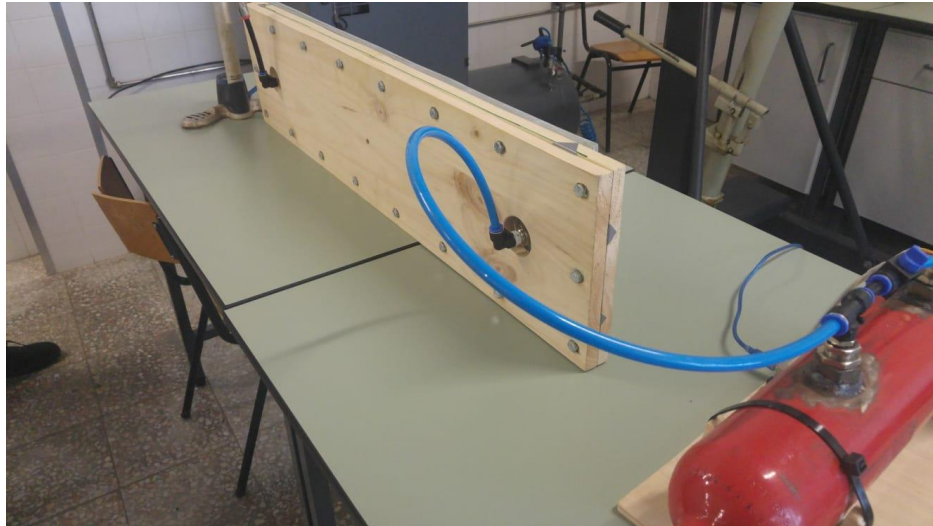


Figura 4.10 - Vista inferior da estrutura rígida que contém a amostra de material e a câmara de compactação

O segmento superior da estrutura encontra-se ilustrada na figura 4.11 onde se verifica a tomada de ar que conecta à câmara de compactação. Esta estrutura foi construída com o topo em acrílico, como se repara na figura, de forma a observar-se o efeito da compactação no material permeável.

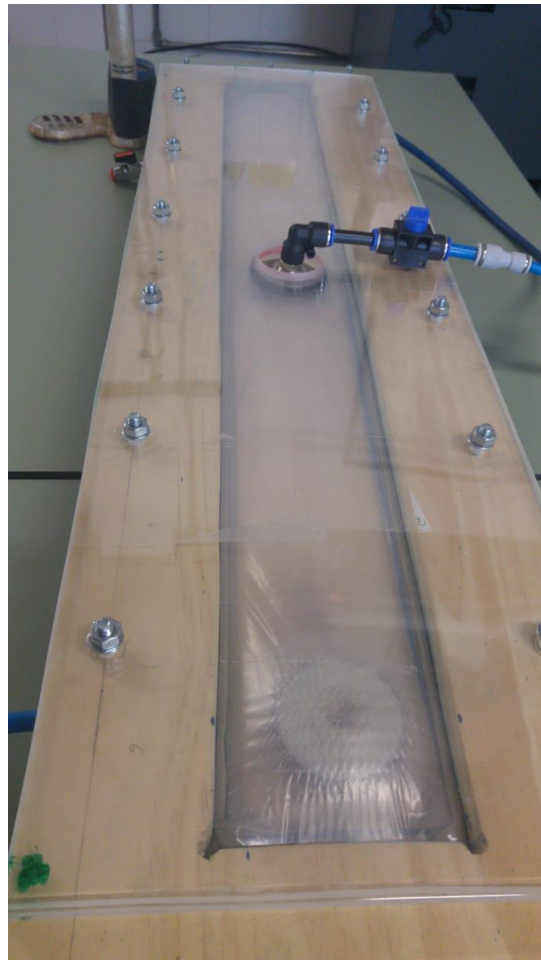


Figura 4.11 - Estrutura rígida que envolve a amostra de material e a câmara de compactação

A bomba que fornece pressão à câmara de compactação encontra-se ilustrada na figura 4.12 onde se nota o manómetro incorporado na mesma.



Figura 4.12 - Bomba de pressão com manómetro

A tomadas de ar que conectam as tubagens ao filme de TPU que envolve a amostra de material foram produzidas a partir de um passa-chapas, duas anilhas de aço, duas anilhas de borracha e uma porca que assegura a compressão de ambas as anilhas de borracha contra o filme de TPU. Esta montagem encontra-se ilustrada em vista explodida na figura 4.13.

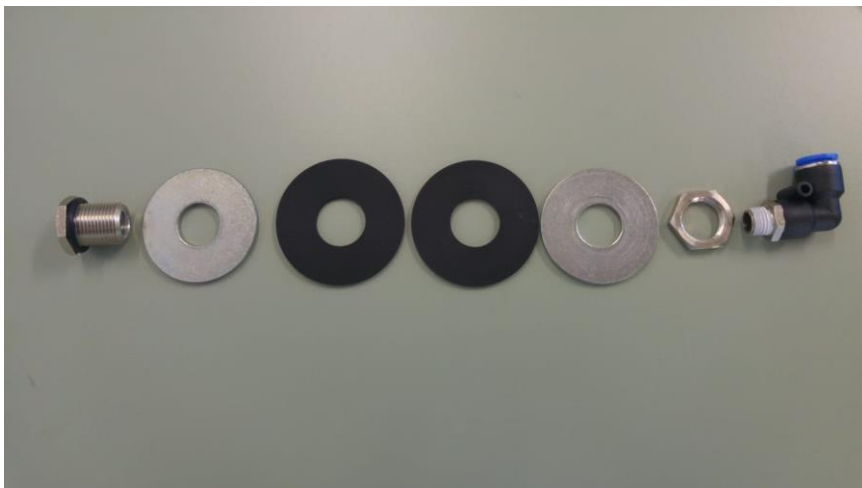


Figura 4.13 - Montagem da tomada de ar

O sensor de pressão e temperatura utilizado tem a designação de *BMP280*, apresenta-se a ficha técnica no anexo C, este sensor tem capacidade para medir 157 amostras por segundo com uma incerteza de pressão de  $\pm 1$  mbar e uma incerteza de temperatura de  $\pm 0.01^\circ\text{C}$ . Na figura 4.14 apresenta-se uma foto do sensor.

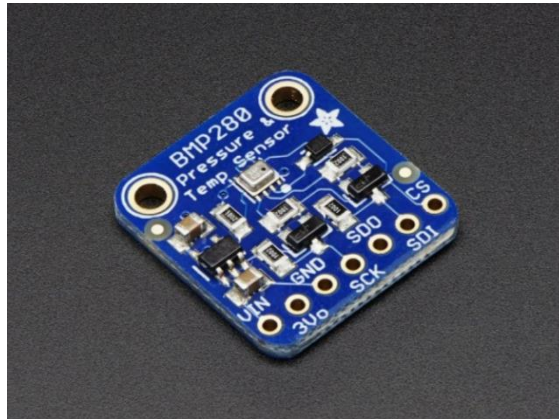


Figura 4.14 - Sensor de Temperatura e Pressão BMP 280

Optou-se por uma taxa de amostragem de 100 Hz como se verifica no código Arduino apresentado no anexo D. Utilizou-se ainda um filtro de dados de forma a eliminar o ruído das medições. Este filtro recebe os valores de 10 dados consecutivos e devolve a média. Portanto a taxa de amostragem após filtragem é de 10 Hz, ou seja, 10 amostras por segundo. Isto equivale a um período de  $T = 0.1$  s.

### 4.1.3 Descrição do procedimento experimental

1. Aplicou-se a pressão de compactação desejada na câmara de compactação.
2. Fechou-se a válvula de esfera 3 criando-se assim um isolamento entre a câmara de compactação e a bomba de pressão.
3. Com a válvula de esfera 1 fechada e a válvula de esfera 2 aberta, aplicou-se vácuo na câmara até uma pressão de cerca de 300 mbar.
4. Fechou-se a válvula de esfera 2 isolando a câmara de vácuo da bomba de vácuo.
5. Abriu-se a válvula de esfera 1 e gravaram-se os dados medidos pelo sensor relativos à evolução da pressão e da temperatura no interior do reservatório, nos vários instantes de tempo, até se atingir a pressão atmosférica.

O microcomputador Arduíno foi programado da seguinte forma: são definidas uma pressão inicial e uma pressão final. Na maioria dos testes estas pressões foram de 500 e 1000 mbar respetivamente. No instante em que se abre a válvula de esfera 1 a pressão dentro do reservatório começa a aumentar, quando esta atinge a pressão inicial os dados do sensor começam a ser gravados com uma taxa de 100 Hz. Assim que a pressão atinge o valor da pressão final a gravação dos dados termina. Posteriormente realizou-se o tratamento dos dados recolhidos no Programa MS Excel onde se aplicou o filtro de ruído.

Sabendo o volume da câmara de vácuo ( $V$ ) e obtendo os valores de pressão ( $P$ ) e de temperatura ( $T$ ) no interior do reservatório é possível calcular a massa de ar ( $m$ ) presente dentro do mesmo para os vários instantes de tempo através da expressão 2.3:

$$m(t) = \frac{M \cdot P(t) \cdot V}{R_0 \cdot T(t)}$$

Derivando  $m(t)$  em ordem ao tempo obtém-se o caudal mássico  $\dot{m}(t)$  que atravessa a amostra de material para os vários instantes de tempo como

$$\dot{m}(t) = \frac{dm(t)}{dt} \approx \frac{m(t) - m(t - T)}{T} \quad (4.2)$$

Considerando que o ar que atravessa a amostra se encontra a uma pressão média constante, esta pode ser dada por:

$$P_{media} = \frac{P_{atm} + P(t)}{2} \quad (4.3)$$

Posto isto é possível transformar o caudal mássico num caudal volumétrico ( $Q$ ) através do material utilizando a expressão 2.4, assumindo que o volume de ar se encontra à temperatura ambiente enquanto atravessa a amostra de material permeável

$$Q(t) = \dot{m}(t) \cdot \frac{R_0 \cdot T_{amb}}{M \cdot P_{média}}$$

Sabendo a pressão do reservatório nos vários instantes de tempo e a distância entre as duas tomadas ( $d$ ) de ar sabe-se também o gradiente de pressão ( $dP/dx$ ) no material para os vários instantes do tempo como ilustrado na figura 4.15.

$$\frac{dP}{dx}(t) = \frac{P(t) - P_{atm}}{d} \quad (4.5)$$

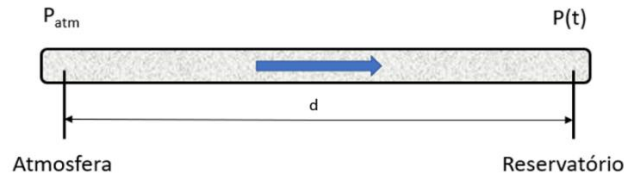


Figura 4.15 - Esquema do gradiente de pressão aplicado no material permeável

Com esta informação foi então possível relacionar o gradiente de pressão com o caudal volumétrico para os vários instantes de tempo e verificar se a lei de Darcy se aplica para estas condições de escoamento. A lei de Darcy refere que para caudais pequenos onde as forças inerciais são também pequenas existe uma relação linear entre o gradiente de pressão aplicado num material poroso e o caudal que o atravessa. De 2.8 sabe-se que:

$$Q = - \frac{K \cdot A}{\mu} \cdot \frac{dP}{dx}$$

Onde A representa a área da secção transversal do material e  $\mu$  representa a viscosidade do ar.

## 4.2 Resultados

De forma a obter-se uma boa estimativa da permeabilidade em função da pressão de compactação realizaram-se 5 ensaios para as pressões de compactação de 0, 50, 100, 200, 300, 400 e 500 mbar de pressão, perfazendo um total de 35 ensaios. Utilizou-se uma amostra de material com largura (b) de 100 mm e uma distância entre tomadas de ar (d) de 750 mm.

### 4.2.1 Resultados experimentais

Uma vez que foram realizados no total 35 ensaios, 5 ensaio por cada pressão de compactação, optou-se por apresentar apenas os resultados relativos a 1 dos 5 ensaios realizados em cada pressão de compactação. No anexo D apresentam-se os resultados relativos às pressões de compactação de 0, 50, 200, 300, 400 e 500 mbar. Os resultados relativos à pressão de compactação de 100 mbar foram escolhidos como exemplo para interpretação dos resultados obtidos uma vez que os restantes resultados podem ser interpretados de forma análoga.

Na figura 4.16 apresenta-se o gráfico da pressão no reservatório de vácuo obtido pelas medições do sensor. Nota-se neste gráfico que a pressão aumenta até a pressão no reservatório igualar a pressão atmosférica.

No gráfico da figura 4.17 apresenta-se o gráfico da temperatura no interior do reservatório de vácuo obtido pelas medições do sensor de temperatura. Neste gráfico observa-se o efeito térmico proveniente da compressão do gás no interior do reservatório. A temperatura do gás no interior do reservatório sofre um aumento de cerca de 1° Celcius no decorrer do teste que foi necessário ter em conta no cálculo da massa de gás presente no reservatório.

Na figura 4.18 apresenta-se o gráfico da massa de gás presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio obtido através da expressão 2.3. É possível observar que a massa presente no reservatório aumenta proporcionalmente ao aumento de pressão com um pequeno desvio causado pelos efeitos térmicos.

Na figura 4.19 encontra-se representado o gráfico do caudal mássico de gás que percorre o material até entrar no reservatório ao longo do tempo de ensaio. Este gráfico foi obtido através da expressão 4.2 onde se deriva a curva da massa de gás presente no reservatório, representado na figura 4.17, de forma a obter a variação da massa no tempo. Observa-se, como esperado, que este caudal decresce ao longo do tempo até se igualar a zero no instante em que a pressão no interior do reservatório iguala a pressão atmosférica. Estes valores apresentam alguma dispersão uma vez que o ruído obtido nas medições do sensor é acentuado ao derivar os valores da massa presente no reservatório.

Na figura 4.20 apresenta-se o gráfico do gradiente de pressão aplicado no material ao longo do tempo de ensaio obtido através de 4.5. Nota-se neste gráfico que o gradiente de pressão é cada vez menos acentuado à medida que a pressão no reservatório se aproxima da pressão atmosférica.

Na figura 4.21 encontra-se representado o gráfico do caudal volumétrico de gás que percorre a amostra de material ao longo do tempo de ensaio obtido através da expressão 2.4 onde se assume que o gás que atravessa a amostra de material se encontra a uma temperatura constante de igual à temperatura ambiente, neste caso 292.8 K, e a pressão desse gás equivalente à média das pressões aplicadas nos extremos do material como apresentado em 4.3. Observa-se neste gráfico que o caudal volumétrico decresce ao longo do tempo de forma similar ao caudal mássico, no entanto como uma variação do seu declive mais suave.

Por último colocando os dados do gradiente de pressão em função do caudal volumétrico construiu-se o gráfico apresentado na figura 4.22 onde se nota o comportamento linear entre estas duas grandezas. Este comportamento vai de acordo com o modelo de escoamento poroso (lei de Darcy) apresentado no capítulo 2 o que nos indica que o escoamento de gás ao longo deste material pode ser modelado por esta lei. O mesmo comportamento foi verificado nos ensaios realizados para as restantes pressões de compactação como pode ser observado no Anexo E.

## Pressão de Compactação de 100 mbar

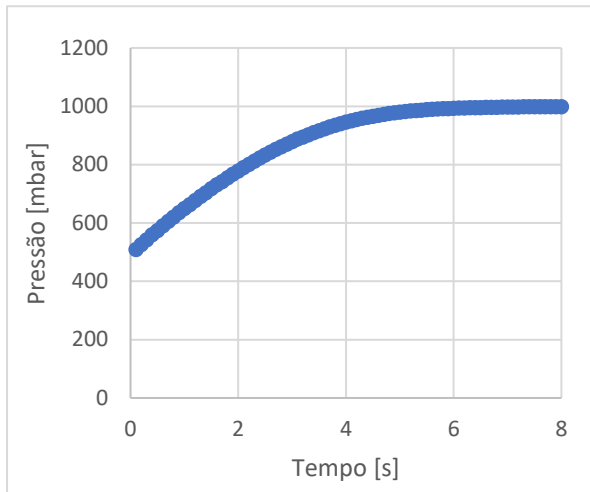


Figura 4.16 - Gráfico da pressão presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio

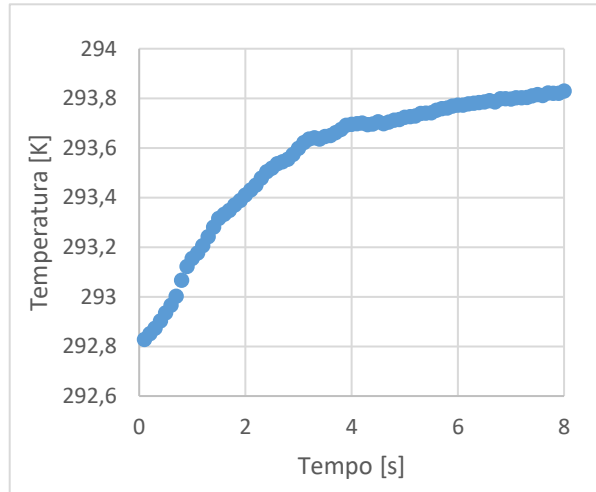


Figura 4.17 - Gráfico da temperatura do gás presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio

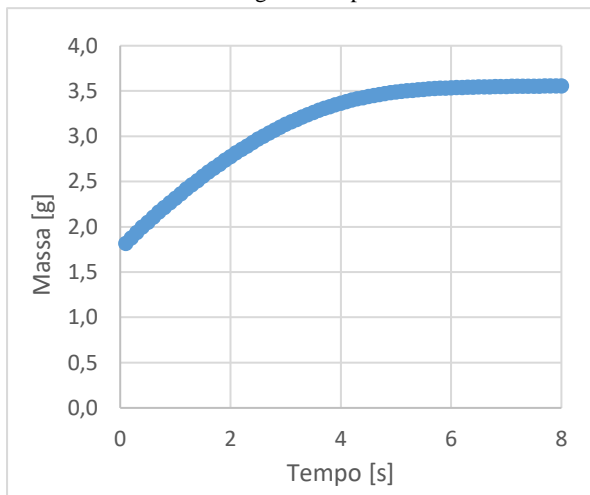


Figura 4.18 - Gráfico da massa de gás presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio

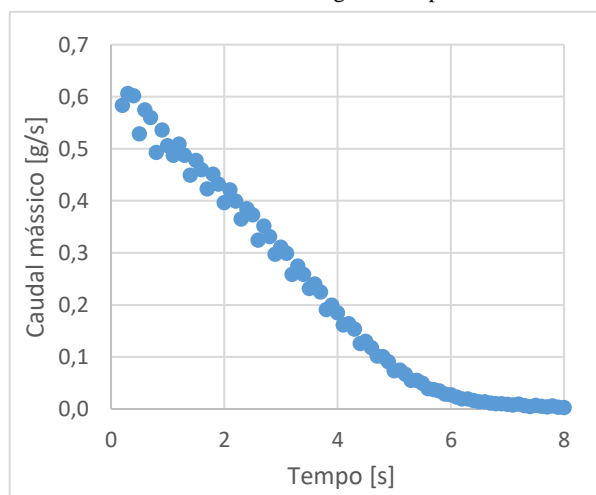


Figura 4.19 - Gráfico do caudal mássico de gás que percorre o material ao longo do tempo de ensaio

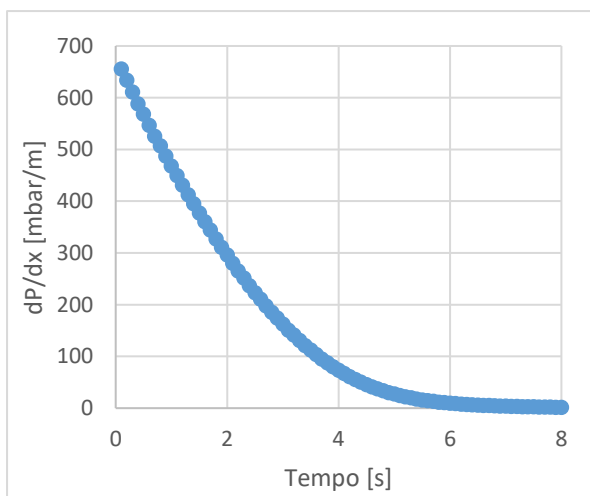


Figura 4.20 - Gráfico do gradiente de pressão aplicado no material ao longo do tempo de ensaio

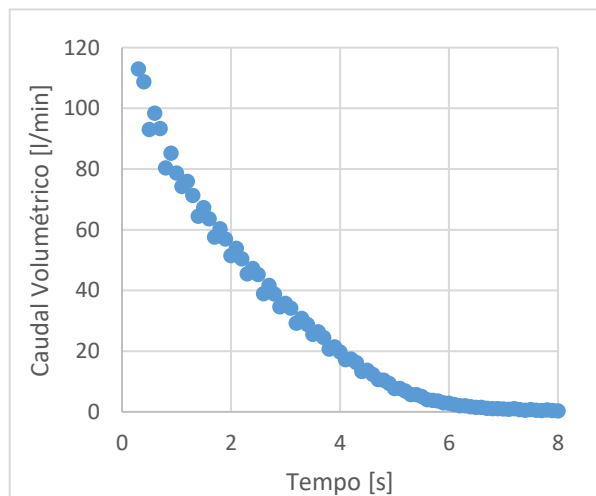


Figura 4.21 - Gráfico do caudal volumétrico de gás que percorre a amostra de material ao longo do tempo de ensaio

## Pressão de Compactação de 100 mbar

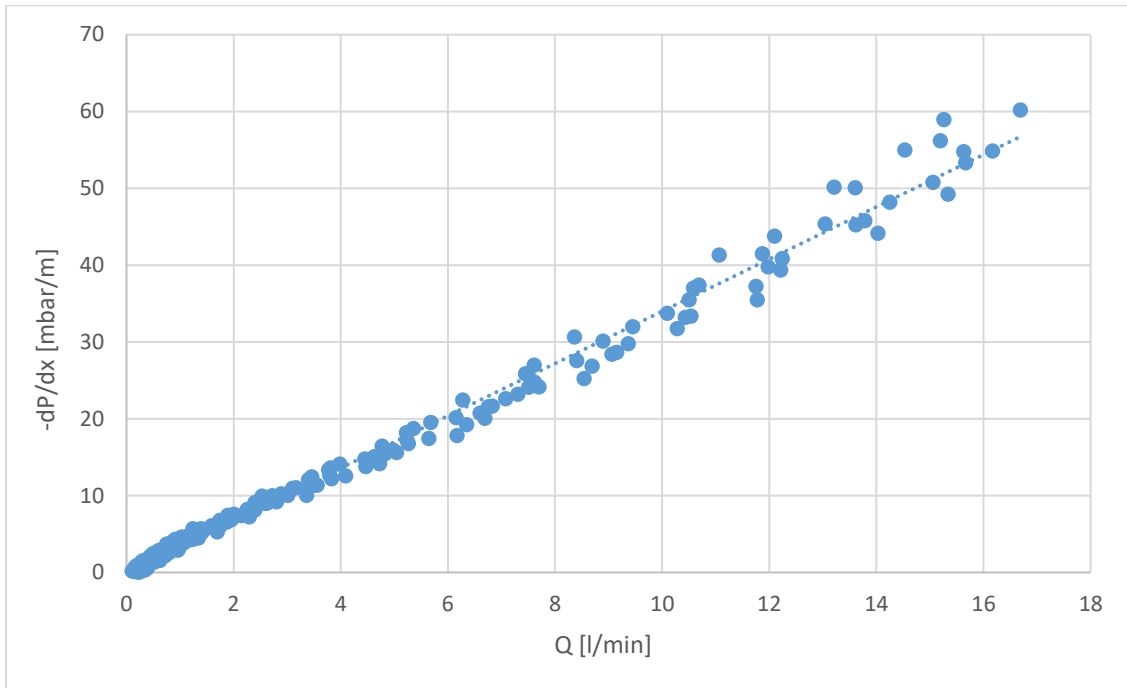


Figura 4.22 - Gráfico do gradiente de pressão aplicado na amostra de material em função do caudal volumétrico de gás que o atravessa

## 4.2.2 Permeabilidade em função da tensão de compactação

Na figura 4.23 sumarizam-se os dados recolhidos na totalidade dos ensaios realizados para as diferentes pressões de compactação.

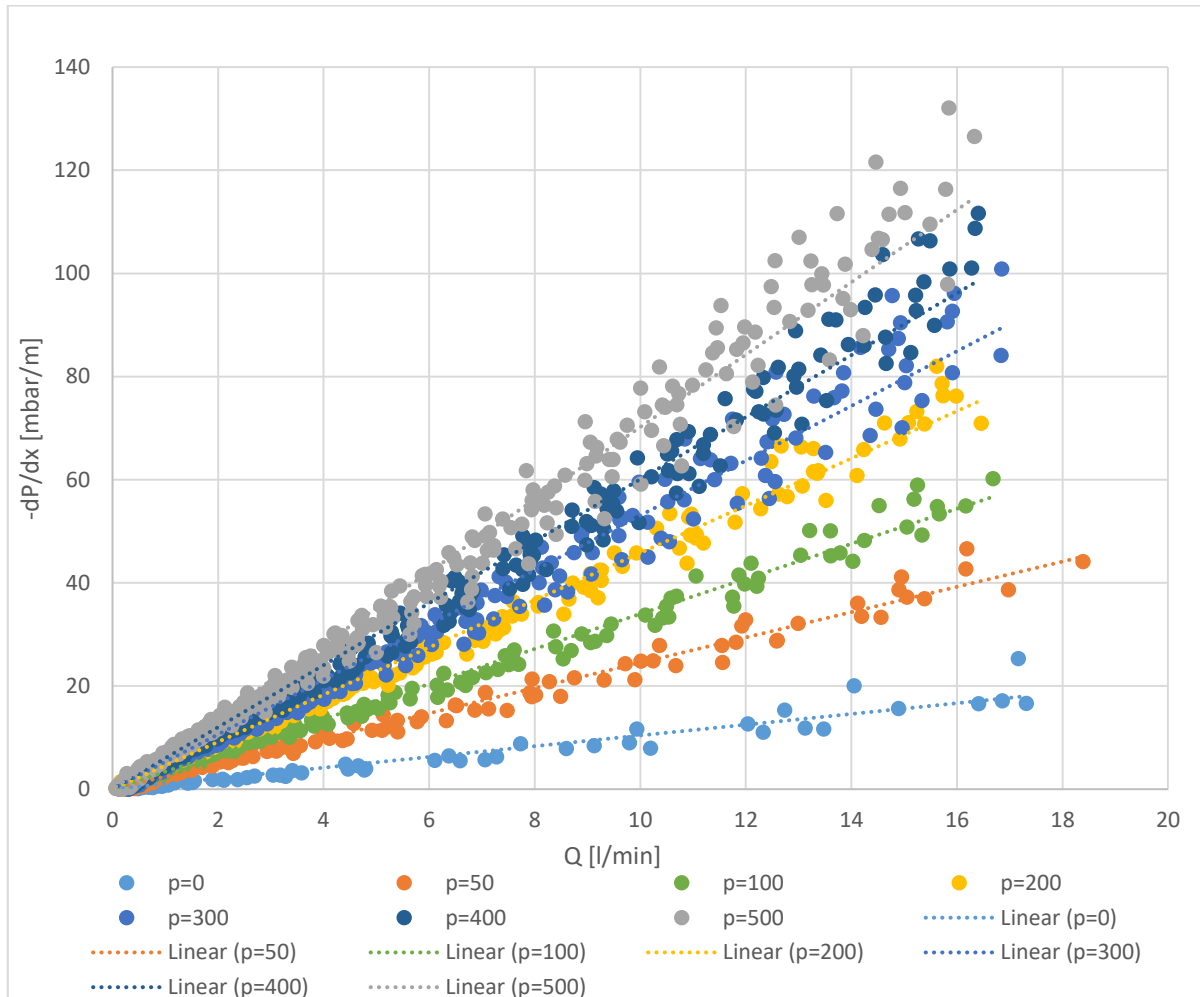


Figura 4.23 - Gráfico do gradiente de pressão aplicado no material em função do caudal volumétrico de gás que o atravessa, para as diferentes pressões de compactação

Através dos dados recolhidos percebe-se que a relação entre o caudal que escoar através do material e o gradiente de pressão aplicado, é aproximadamente linear, o que vai de acordo com a lei de Darcy. No entanto esta proporcionalidade varia com a pressão de compactação aplicada, como era esperado. Ao aplicar-se pressão de compactação no material ( $P_c$ ) pode-se admitir que existe uma variação de dois parâmetros: a permeabilidade do material ( $K$ ) e a sua espessura ( $e$ ), mantendo se a largura ( $b$ ) do material constante. Ou seja, pode-se admitir que tanto a permeabilidade como a espessura do material são funções da pressão de compactação. E assim a expressão 2.8 pode ser expressada seguinte forma:

$$Q = - \frac{K(P_c) \cdot e(P_c) \cdot b}{\mu} \cdot \frac{dP}{dx} \quad (4.6)$$

Colocando a expressão 4.6 em ordem ao gradiente de pressão e expressando  $K(P_c) \cdot e(P_c)$  como uma única função de  $P_c$  obtém-se a seguinte expressão:

$$-\frac{dP}{dx} = \frac{\mu}{(K \cdot e)(P_c)} \cdot \frac{Q}{b} \quad (4.7)$$

É então necessário saber-se qual a função que define  $K(P_c) \cdot e(P_c)$ . Conhecendo-se esta função é possível estimar o caudal que, por unidade de largura, atravessa o material, em função de um certo gradiente de pressão e de uma certa pressão de compactação aplicada. Para tal construiu-se o gráfico representado na figura 4.24 no qual se representa o gradiente de pressão aplicado no material em função do caudal que atravessa o material por unidade de largura, ambas as grandezas em unidades S.I. Neste gráfico estão representadas as equações das retas que aproximam esta relação, obtidas por regressão linear.

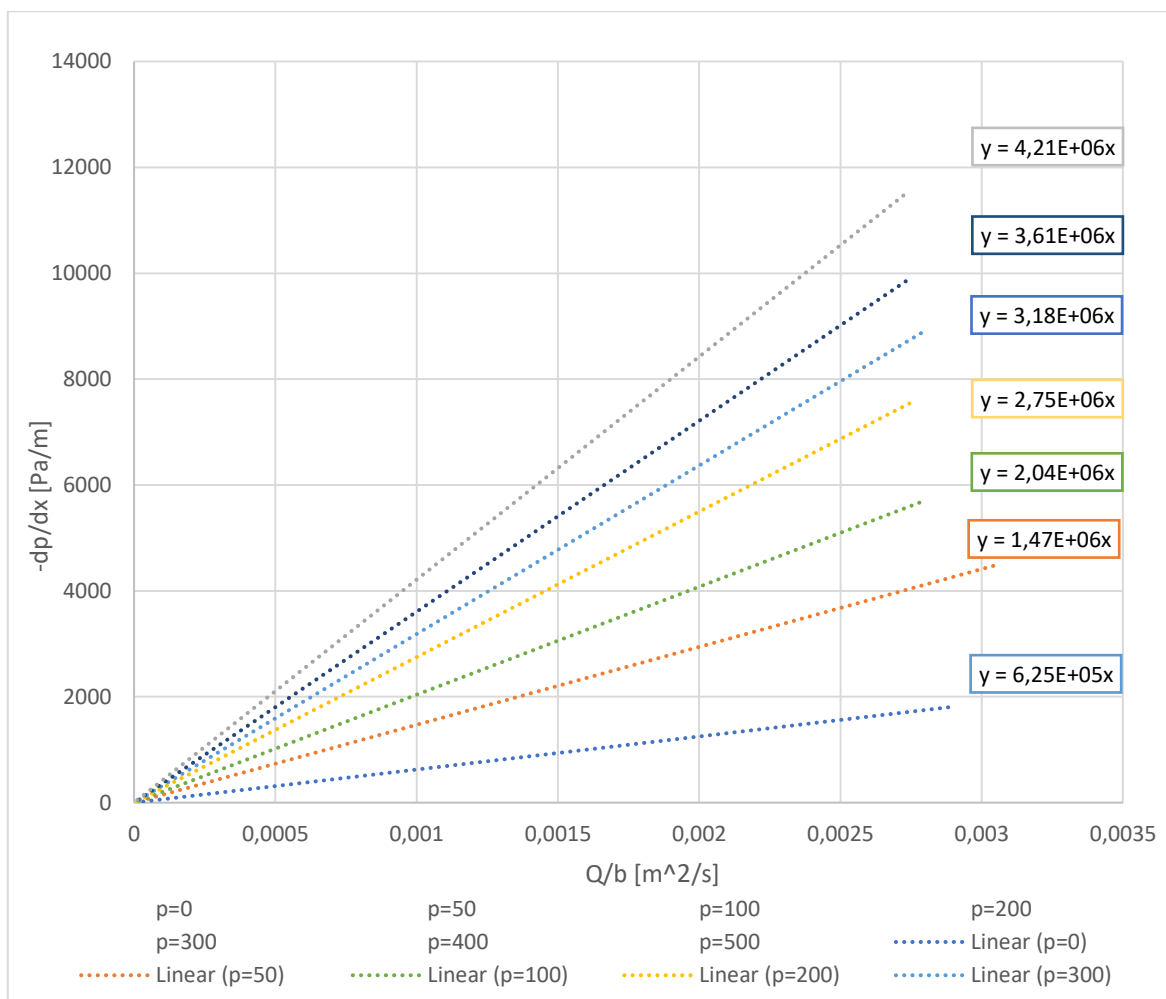


Figura 4.24 – Gráfico das retas obtidas por regressão linear do gradiente de pressão aplicado no material em função do caudal volumétrico de gás que atravessa o material por unidade de largura, para as diferentes pressões de compactação

Da expressão 4.7 sabe-se que os declives ( $m$ ) das retas obtidas por regressão linear equivalem a:

$$m = \frac{\mu}{K \cdot e} \quad (4.8)$$

Portanto sabendo a viscosidade do ar foi possível determinar  $K \cdot e$  para cada pressão de compactação aplicada no material.

$$K \cdot e = \frac{\mu}{m} \quad (4.9)$$

À temperatura de 294 K o ar apresenta uma viscosidade de:  $18.27 \cdot 10^{-6} [Pa \cdot s]$ . Substituindo este valor em 4.9 calculou-se  $K \cdot e$  para cada pressão de compactação e sumarizaram-se estes valores na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Valor de  $K \cdot e$  para cada pressão de compactação

Pressão de Compactação [bar]	$m = \frac{\mu}{K \cdot e}$	$K \cdot e$
0	6.25E5	2.92E-11
0.05	1.47E6	1.24E-11
0.1	2.04E6	8.96E-12
0.2	2.75E6	6.65E-12
0.3	3.19E6	5.74E-12
0.4	3.61E6	5.07E-12
0.5	4.21E6	4.34E-12

Com estes valores construiu-se o gráfico da figura 4.25 onde se representa  $K \cdot e$  em função da pressão de compactação.

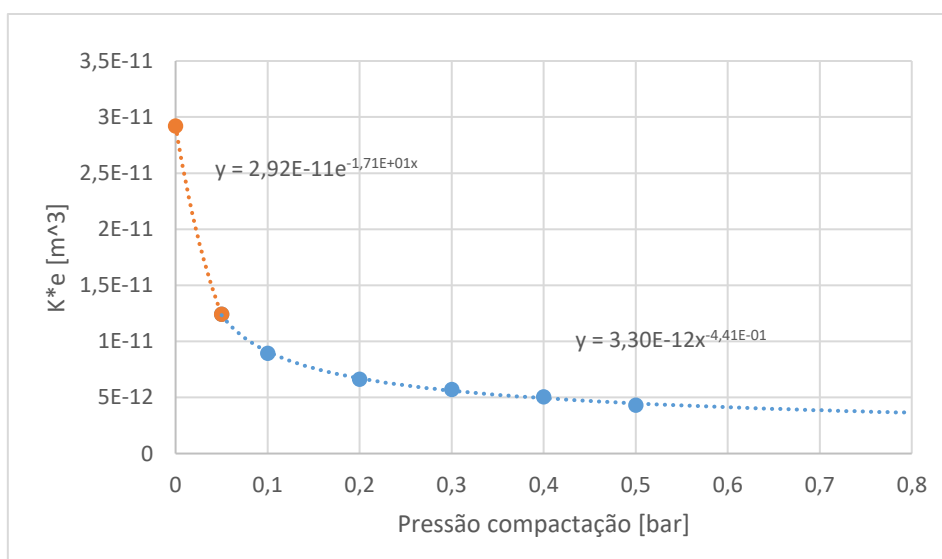


Figura 4.25 - Gráfico de  $K \cdot e$  em função da pressão de compactação

O objetivo de relacionar  $(K \cdot e)$  com a pressão de compactação é estimar o aumento de pressão que ocorre na camada permeável, desenvolvido no capítulo 5. Uma vez que a pressão na camada varia de forma contínua, também a pressão de compactação varia desta forma e, portanto, é conveniente expressar a relação  $(K \cdot e)(P_c)$  de forma explícita.

Como se observa no gráfico representado na figura 4.25 a função  $(K \cdot e)(P_c)$  pode ser aproximada através de uma função definida por ramos, no entanto, uma vez que a pressão de compactação na camada é sempre superior a 0.05 bar, é válido considerar que esta função pode ser aproximada por:

$$(K \cdot e)(P_c) = 3.30 \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{P_c}{\text{bar}}\right)^{-0.441} \quad (4.10)$$

Na tabela 4.2 encontra-se a comparação dos valores de  $K \cdot e$  obtidos pelos ensaios experimentais e pela função definida acima de forma a verificar se esta função se trata ou não de uma boa aproximação.

Tabela 4.2 - Comparação dos valores de  $K \cdot e$  obtidos pelos ensaios experimentais e pela função  $(K \cdot e)(P_c)$

Pressão de compactação [bar]	$K \cdot e$ (Obtido nos ensaios)	$(K \cdot e)(P_c)$	Erro relativo [%]
0.05	1.24E-11	1.24E-11	0.00
0.1	8.96E-12	9.09E-12	1.51
0.2	6.65E-12	6.70E-12	0.75
0.3	5.74E-12	5.61E-12	2.26
0.4	5.07E-12	4.94E-12	2.56
0.5	4.34E-12	4.48E-12	3.22

Como se pode observar os erros relativos indicados na tabela são inferiores a 5%, portanto, considerou-se que a função  $(K \cdot e)(P_c)$  se trata de uma aproximação aceitável dos valores obtidos nos ensaios.

# 5

## **Pressão e velocidade do gás na camada permeável**

Neste capítulo apresenta-se o seguimento lógico e as considerações feitas para prever como varia a velocidade e pressão do gás ao longo da superfície do ABM. Numa primeira fase é analisada a velocidade do gás ao longo da superfície do ABM e numa segunda fase, com recurso à lei de Darcy e os resultados obtidos nos ensaios experimentais, foi possível expressar a evolução da pressão do gás ao longo da camada permeável. Este estudo foi feito considerando sempre o cenário que maximiza o gradiente de pressão de forma a obter-se o aumento de pressão máximo que ocorre ao longo da camada.

### **5.1 Cálculo da velocidade do gás ao longo da camada**

De forma a ser possível estimar qual o aumento de pressão que existe desde o coletor de gás até ao extremo oposto do ABM, foi necessária uma análise da evolução da velocidade do gás ao longo da camada permeável.

Sabe-se através da lei de Darcy que com o aumento da velocidade do gás na camada existe também um aumento do gradiente de pressão. E, uma vez que se pretende estudar o pior caso, ou seja, quando o gradiente de pressão é máximo, é necessária uma análise da velocidade do gás quando esta é também máxima.

Na figura 5.1 está representado um esquema de um corte longitudinal do ABM onde se exibem os fluxos de gás ( $j$ ) que entram na camada, a partir da atmosfera e do interior do ABM, e ainda o caudal de gás que circula na camada ( $Q_s$ ). De forma a facilitar o cálculo da velocidade do gás ao longo da camada dividiu-se o ABM em 3 diferentes áreas: a área 1 que é constituída pela secção semiesférica do ABM que não contém o coletor de gás, a área 2 que é constituída pela secção cilíndrica do ABM e por último a área 3 que é constituída pela secção semiesférica que contém o coletor de gás.

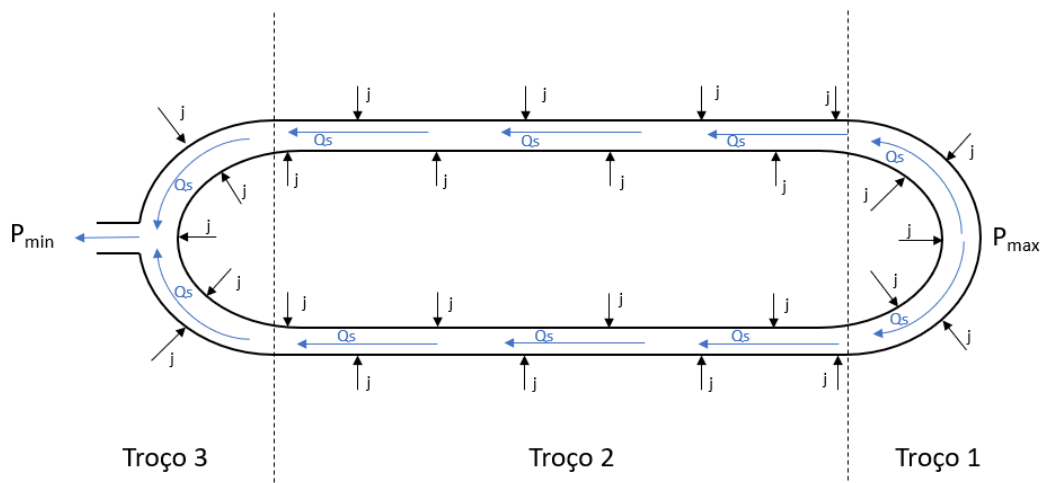


Figura 5.1 - Esquema dos fluxos de difusão e caudais que circulam nas diferentes áreas da camada permeável

Para calcular a velocidade do gás ao longo da camada considerou-se que o fluxo  $j$  que entra na camada ao longo da superfície do ABM é constante em toda a superfície. Para tal majorou-se este fluxo admitindo que, para este efeito, a pressão na camada é constante e equivalente à pressão mínima, ou seja, equivalente à pressão na entrada da bomba ( $P_{\min}$ ).

Ao analisar o gráfico da figura 3.11 sabe-se que o caudal máximo ocorre para uma pressão na camada de 100 mbar e a esta pressão o caudal total que entra na camada equivale a 2.8 l/min, portanto o fluxo máximo equivale a:

$$j = \frac{\frac{2.8 * 10^6}{60} [mm^3/s]}{250 * 10^6 [mm^2]} = 1.87 \cdot 10^{-4} [mm/s]$$

O cálculo da velocidade do gás ao longo da camada foi realizado da mesma forma para os diferentes troços. Primeiramente realizou-se uma análise da área secção transversal da camada em função de uma coordenada definida localmente. Posteriormente analisou-se o caudal que circula na secção transversal em função da mesma coordenada e por último calculou-se a velocidade do gás que circula na secção fazendo o quociente entre o caudal e a área da secção da camada.

A variação da pressão do gás que circula na camada não foi tida em conta para este cálculo, pelo que se assumiu uma pressão do gás equivalente á pressão de entrada na bomba, majorando assim a velocidade do gás.

- **Troço 1**

**Análise da Área da secção transversal:**

Na figura 5.2 está representado o troço 1 do ABM e a secção transversal ao fluxo da camada permeável (a traço grosso). A coordenada  $\theta_1$  representa o ângulo entre o eixo da secção semiesférica do ABM e a secção transversal da camada,  $R$  representa o raio interno do ABM e  $r$  representa o raio da circunferência definida pela intersecção da secção transversal da camada e o envelope interno do ABM. A coordenada  $x_1$  representa o comprimento do arco de raio  $R + \frac{e}{2}$  que vai do eixo do ABM à secção transversal da camada.

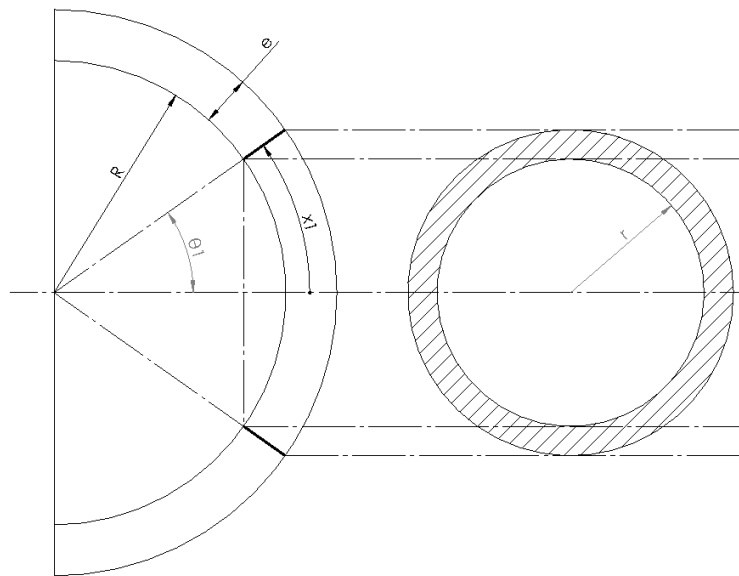


Figura 5.2 - Esquema da área da secção transversal ao fluxo de gás do troço 1

A coordenada  $x_1$  pode ser expressa em função da coordenada  $\theta_1$  através da relação:

$$x_1 = \left(R + \frac{e}{2}\right) \cdot \theta_1 \quad (5.1)$$

Uma vez que a espessura da camada ( $e$ ) é 3 ordens de grandeza menor do que o raio do ABM ( $R$ ), desprezou-se a espessura ( $e$ ) ficando a coordenada  $x_1$  expressa da seguinte forma:

$$x_1 = R \cdot \theta_1 \quad (5.2)$$

Tendo em conta que o troço 1 corresponde à secção semiesférica, o domínio de  $x_1$  equivale ao valor de  $x_1$  quando:  $0 \leq \theta_1 \leq \frac{\pi}{2}$  portanto este domínio pode ser expresso da seguinte forma:

$$0 \leq x_1 < \frac{\pi R}{2}$$

A área da secção transversal foi então definida em função da coordenada  $x_1$  através da expressão:

$$A_s \approx 2\pi r e = 2\pi e R \cdot \sin \theta_1 \leftrightarrow$$

$$A_s = 2\pi e R \cdot \sin \frac{x_1}{R} \quad (5.3)$$

### Análise do caudal que atravessa a camada permeável:

Na figura 5.3 está representado o fluxo que entra para a camada permeável e o caudal que atravessa a camada numa certa secção definida pela coordenada  $\theta_1$  ou  $x_1$ .

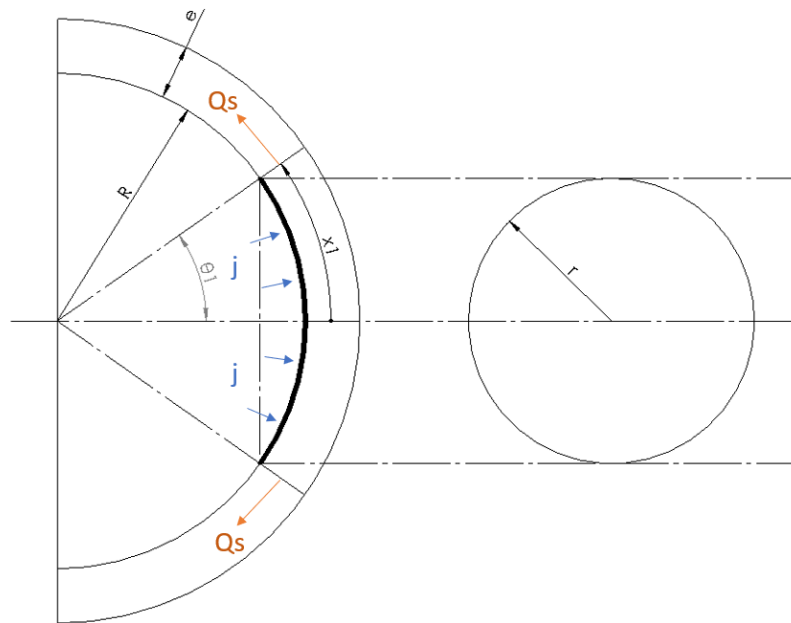


Figura 5.3 - Esquema do caudal de gás que percorre a camada numa dada secção do troço 1

Este caudal pode ser calculado pelo integral do fluxo ( $j$ ) ao longo da superfície interna do ABM (representada na figura a traço grosso). Portanto definindo o perímetro da circunferência interna da secção em função da coordenada  $x_1$  é possível calcular a expressão que relaciona o caudal que atravessa a secção da camada permeável para qualquer valor de  $x_1$ .

$$P = r \cdot 2 \cdot \pi$$

$$P(x_1) = R \cdot 2\pi \cdot \sin \frac{x_1}{R}$$

Com o perímetro da circunferência interna definido em função de  $x_1$  calculou-se o caudal da seguinte forma:

$$Q_s(x_1) = \int_0^{x_1} j \cdot P(x_1) \cdot dx_1 = \int_0^{x_1} j \cdot 2\pi R \cdot \sin \frac{x_1}{R} \cdot dx_1 \leftrightarrow$$

$$Q_s(x_1) = j \cdot 2\pi R \cdot \int_0^{x_1} \sin \frac{x_1}{R} \cdot dx_1 \leftrightarrow Q_s = j \cdot 2\pi R \cdot (R - R \cdot \cos \frac{x_1}{R})$$

$$Q_s(x_1) = j \cdot 2\pi \cdot R^2 \cdot (1 - \cos \frac{x_1}{R}) \quad (5.4)$$

### Análise da evolução da velocidade ao longo da camada permeável

Sabe-se que:

$$v(x_1) = \frac{Q_s(x_1)}{A_s(x_1)} \quad (5.5)$$

Substituindo 5.3 e 5.4 em 5.5 obtém-se:

$$v(x_1) = \frac{j \cdot 2\pi \cdot R^2 \cdot (1 - \cos \frac{x_1}{R})}{2\pi e R \cdot \sin \frac{x_1}{R}} \quad (5.6)$$

Simplificando 5.6 obtém-se a expressão da velocidade do gás numa secção da camada definida pela coordenada  $x_1$ .

$$v(x_1) = \frac{j \cdot R \cdot (1 - \cos \frac{x_1}{R})}{e \cdot \sin \frac{x_1}{R}} \quad (5.7)$$

- **Troço 2**

Na figura 5.4 está representado um corte transversal no troço cilíndrico do ABM. A coordenada  $x_2$  representa a distância linear deste corte transversal ao início da secção semiesférica direita (troço 1). Está também representado, a azul, o fluxo de gás que entra na camada e, a laranja, o caudal de gás que circula nesta secção da camada.

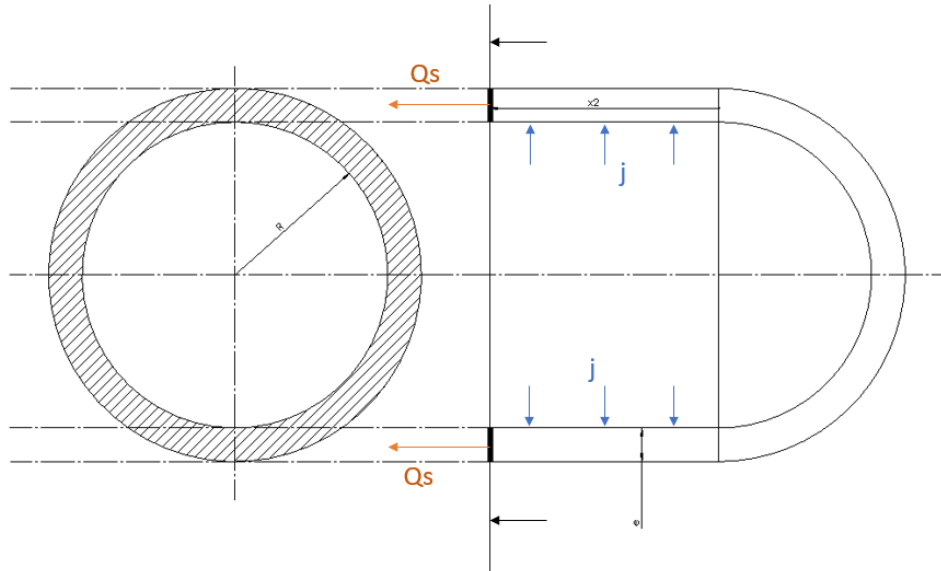


Figura 5.4 - Esquema da área da secção transversal ao fluxo de gás e do caudal de gás na secção do troço 2

**Análise da Área da secção transversal:**

Uma vez que a secção transversal da camada se mantém constante em todo o troço cilíndrico, a área desta secção não depende da coordenada  $x_2$ . De forma a simplificar os cálculos seguintes aproximou-se a área da secção da seguinte forma:

$$A_s \approx 2\pi \cdot R \cdot e \quad (5.8)$$

**Análise do caudal que atravessa a camada permeável:**

O caudal que atravessa a secção da camada permeável corresponde ao caudal proveniente do troço 1 e ainda o fluxo que atravessou a superfície interna do ABM até esta secção, portanto pode-se expressar o caudal em função da coordenada  $x_2$  da seguinte forma:

$$Q_s(x_2) = j \cdot 2\pi \cdot R^2 + \int_0^{x_2} j \cdot 2\pi \cdot R \, dx_2 = j \cdot 2\pi \cdot R^2 + j \cdot 2\pi \cdot R \cdot x_2 \leftrightarrow$$

$$Q_s(x_2) = j \cdot 2\pi \cdot R \cdot (R + x_2) \quad (5.9)$$

Em que:

$$0 \leq x_2 < L$$

### **Análise da evolução da velocidade ao longo da camada permeável**

A velocidade do gás numa secção da camada é dada pelo quociente entre o caudal que circula nesta secção e a área da mesma como apresentado em 5.10.

$$v(x_2) = \frac{Q_s(x_2)}{A_s} \quad (5.10)$$

Substituindo 5.8 e 5.9 em 5.10 obtém-se:

$$v(x_2) = \frac{j \cdot 2\pi \cdot R \cdot (R + x_2)}{2\pi \cdot R \cdot e} \leftrightarrow$$

$$v(x_2) = \frac{j}{e} \cdot (R + x_2) \quad (5.11)$$

- Troço 3

**Análise da Área da secção transversal:**

A figura 5.5 apresenta um esquema da secção transversal da camada permeável no troço 3. A coordenada  $\theta_3$  representa o ângulo entre a secção considerada e a secção cilíndrica do ABM.

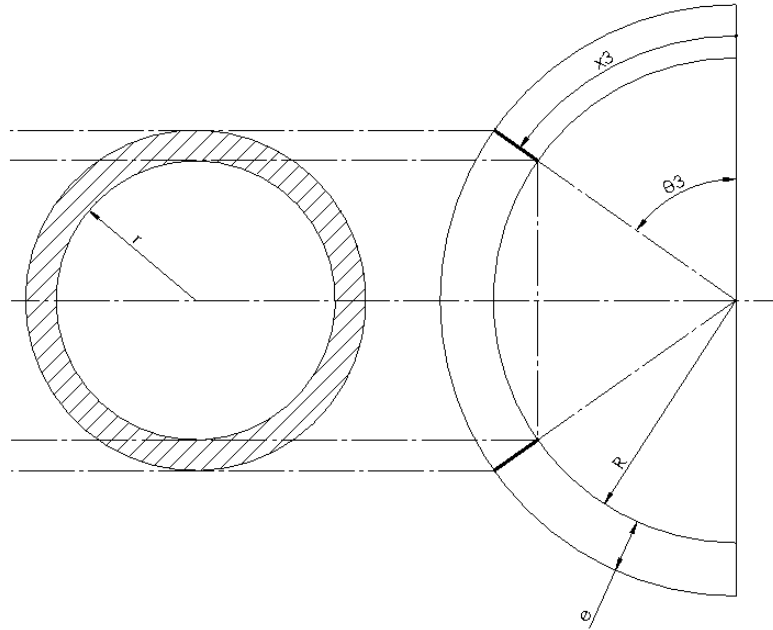


Figura 5.5 - Esquema da área da secção transversal ao fluxo de gás do troço 3

A coordenada  $x_3$  representa a distância do arco formado entre a secção transversal e a secção cilíndrica. De forma similar ao que acontece no troço 1, estas duas coordenadas podem ser relacionadas de forma aproximada através da expressão:

$$x_3 = R \cdot \theta_3 \quad (5.12)$$

Com:

$$0 \leq x_3 < \pi R$$

A área da secção pode então ser expressa em função da coordenada  $x_3$  através da expressão:

$$A_s \approx 2\pi r e = 2\pi e R \cdot \cos \theta_1 \leftrightarrow$$

$$A_s = 2\pi e R \cdot \cos \frac{x_3}{R} \quad (5.13)$$

### Análise do caudal que atravessa a camada permeável:

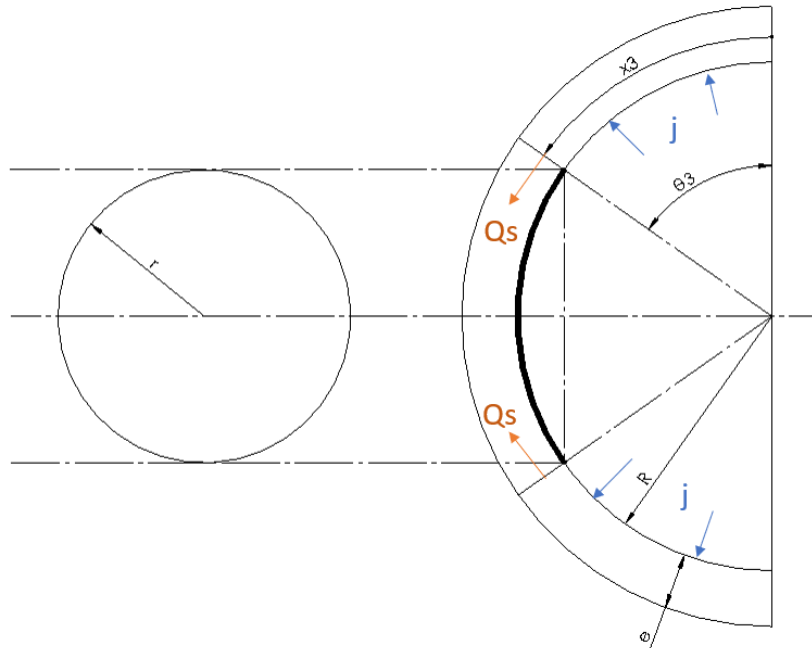


Figura 5.6 - Esquema do caudal de gás que percorre a camada numa dada secção do troço 3

Na figura 5.6 está representado o fluxo que entra para a camada permeável no troço 3 e o caudal que atravessa a camada numa dada secção definida pela coordenada  $\theta_3$  e  $x_3$ .

O caudal que atravessa a secção da camada permeável corresponde ao caudal proveniente do troço 2 e ainda o fluxo que atravessou a superfície interna do ABM, representada a traço grosso na figura 5.6, até à secção considerada.

Expressando o perímetro interno da secção transversal em função da variável  $x_3$  é possível calcular o integral do fluxo ao longo da superfície.

$$P(\theta_3) = 2\pi \cdot r(\theta_3) \leftrightarrow$$

$$P(\theta_3) = 2\pi R \cdot \cos \theta_3 \leftrightarrow$$

$$P(x_3) = 2\pi R \cdot \cos \frac{x_3}{R} \tag{5.14}$$

O caudal proveniente do troço 2 equivale ao caudal dado pela expressão 5.9 substituindo variável  $x_2$  pelo seu limite  $L$ .

O caudal pode então ser expresso através de:

$$Q_s(x_3) = j \cdot 2\pi \cdot R \cdot (R + L) + \int_0^{x_3} j \cdot P(x_3) dx_3 \leftrightarrow$$

$$Q_s(x_3) = j \cdot 2\pi \cdot R \cdot (R + L) + \int_0^{x_3} j \cdot 2\pi R \cdot \cos \frac{x_3}{R} dx_3 \leftrightarrow$$

$$Q_s(x_3) = j \cdot 2\pi \cdot R \cdot (R + L) + j \cdot 2\pi R \cdot \int_0^{x_3} \cos \frac{x_3}{R} dx_3 \leftrightarrow$$

$$Q_s(x_3) = j \cdot 2\pi \cdot R \cdot (R + L) + j \cdot 2\pi R \cdot R \cdot \sin \frac{x_3}{R}$$

Simplificando a expressão obtém-se:

$$Q_s(x_3) = j \cdot 2\pi \cdot R \cdot (R \cdot \sin \frac{x_3}{R} + R + L) \quad (5.15)$$

### Análise da evolução da velocidade ao longo da camada permeável

Sabe-se que a velocidade do gás na camada é dada por:

$$v(x_3) = \frac{Q_s(x_3)}{A_s(x_3)} \quad (5.16)$$

Substituindo 5.13 e 5.15 em 5.16 obtém-se a expressão:

$$v(x_3) = \frac{j \cdot 2\pi \cdot R \cdot (R \cdot \sin \frac{x_3}{R} + R + L)}{2\pi e R \cdot \cos \frac{x_3}{R}}$$

Simplificando:

$$v(x_3) = \frac{j \cdot (R \cdot \sin \frac{x_3}{R} + R + L)}{e \cdot \cos \frac{x_3}{R}} \quad (5.17)$$

### 5.1.1 Dimensões do coletor de gás

Na figura 5.7 está esquematizado o coletor de gás onde se representa o raio do coletor  $R_c$  e o ângulo  $\theta_c$  formado entre o extremo do coletor e o centro da semiesfera,  $x_c$  que corresponde ao comprimento do arco que vai do extremo da semiesfera ao extremo do coletor e ainda  $z_c$  que corresponde à distância longitudinal que o arco do coletor percorre.

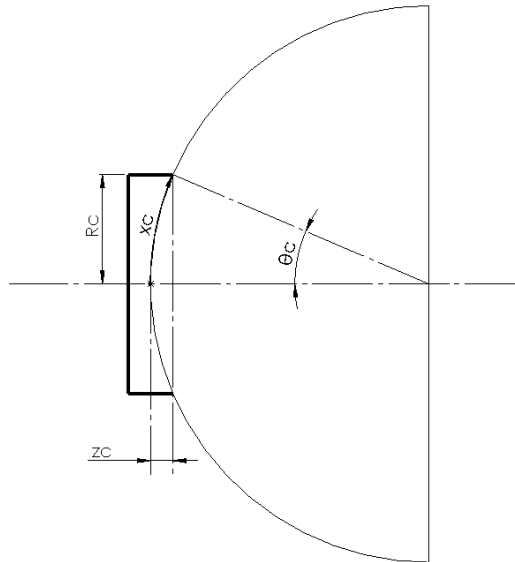


Figura 5.7 - Esquema das dimensões do coletor de gás

A coordenada  $x_c$  pode ser expressa em função de  $R_c$  através da expressão:

$$x_c = R \sin^{-1} \frac{R_c}{R} \quad (5.18)$$

O mesmo pode ser feito para a coordenada  $z_c$ :

$$z_c = R(1 - \cos(\sin^{-1} \frac{R_c}{R})) \quad (5.19)$$

Portanto uma vez que a coordenada  $x_3$  corresponde à distância percorrida sobre a superfície do ABM desde a área cilíndrica até ao coletor de gás, o domínio desta coordenada é dado em função do raio do coletor da seguinte forma:

$$0 \leq x_3 < \frac{\pi R}{2} - R \sin^{-1} \frac{R_c}{R}$$

### 5.1.2 Camada total

Uma vez calculadas as equações que relacionam a velocidade do gás para cada área em função das coordenadas locais  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ , foi necessário expressar estas relações em função da coordenada global  $x$  que corresponde ao percurso longitudinal ao longo da superfície do ABM, como esquematizado na figura 5.8

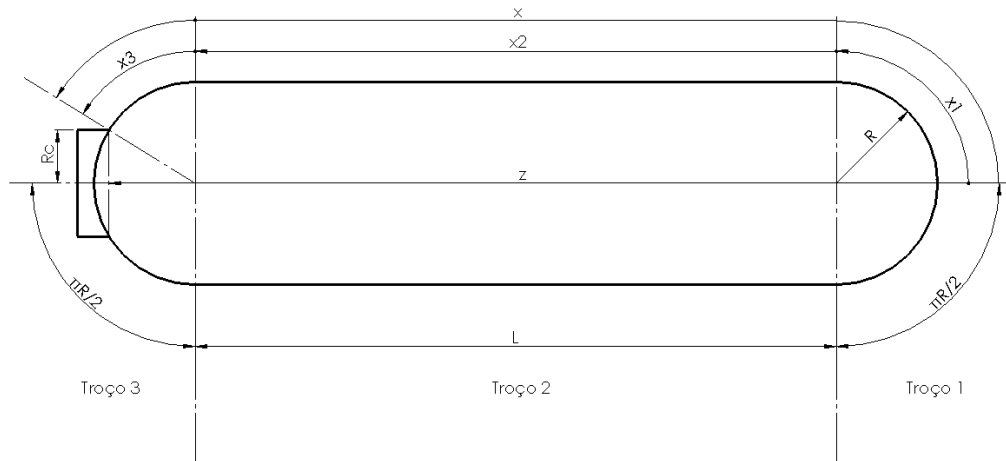


Figura 5.8 - Esquema das coordenadas locais e globais utilizadas

A coordenada  $x$  definiu-se desta forma para facilitar o cálculo da pressão ao longo da camada que se demonstra no capítulo 6.

As variáveis  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$  podem ser expressas em função da coordenada  $x$  através das relações:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= x, & 0 \leq x < \frac{\pi R}{2} \\
 x_2 &= x - \frac{\pi R}{2}, & \frac{\pi R}{2} \leq x < \frac{\pi R}{2} + L \\
 x_3 &= x - \frac{\pi R}{2} - L, & \frac{\pi R}{2} + L \leq x < \pi R + L - R \sin^{-1} \frac{R_c}{R}
 \end{aligned}$$

Substituindo as coordenadas locais pelas expressões acima, a velocidade do gás na camada foi expressa em função da coordenada global  $x$  pela seguinte função definida por ramos:

$$v(x) = \begin{cases} \frac{j \cdot R \cdot (1 - \cos \frac{x}{R})}{e \cdot \sin \frac{x}{R}}, & 0 \leq x < \frac{\pi R}{2} \\ \frac{j}{e} \cdot \left( R + x - \frac{\pi R}{2} \right), & \frac{\pi R}{2} \leq x < \frac{\pi R}{2} + L \\ \frac{j \cdot (R \cdot \sin(\frac{x}{R} - \frac{\pi}{2} - \frac{L}{R}) + R + L)}{e \cdot \cos(\frac{x}{R} - \frac{\pi}{2} - \frac{L}{R})}, & \frac{\pi R}{2} + L \leq x < \pi R + L - R \sin^{-1} \frac{R_c}{R} \end{cases} \quad (5.20)$$

Com o objetivo de facilitar a visualização da evolução da velocidade do gás ao longo da camada definiu-se a coordenada  $z$  que representa a distância na direção do eixo do ABM, do extremo direito à secção da camada considerada, como representado na figura 5.8.

As variáveis  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$  podem ser expressas em função desta coordenada  $z$  através das relações:

$$\begin{aligned} x_1 &= R \cdot \cos^{-1} \left( 1 - \frac{z}{R} \right) & 0 \leq z < R \\ x_2 &= z - R & R \leq z < R + L \\ x_3 &= R \cdot \sin^{-1} \left( \frac{z}{R} - \frac{L}{R} - 1 \right) & R + L \leq z < R + L - R \cdot \cos \left( \sin^{-1} \frac{R_c}{R} \right) \end{aligned}$$

Substituindo as coordenadas locais pelas expressões acima, a velocidade do gás na camada foi expressa em função de  $z$  pela seguinte função definida por ramos:

$$v(z) = \begin{cases} \frac{j \cdot z \cdot R}{e \cdot \sqrt{z \cdot (2R - z)}}, & 0 \leq z < R \\ \frac{j}{e} \cdot \left( z - \frac{\pi R}{2} \right), & R \leq z < R + L \\ \frac{j \cdot (R \cdot \sin(\sin^{-1}(\frac{z}{R} - \frac{L}{R} - 1) - \frac{\pi}{2} - \frac{L}{R}) + R + L)}{e \cdot \cos(\sin^{-1}(\frac{z}{R} - \frac{L}{R} - 1) - \frac{\pi}{2} - \frac{L}{R})}, & R + L \leq z < \pi R + L - R \sin^{-1} \frac{R_c}{R} \end{cases} \quad (5.21)$$

## 5.2 Estudo da velocidade máxima do gás ao longo da camada

Considerando a espessura ( $e$ ) constante e substituindo as constantes  $R$ ,  $R_c$  e  $L$  pelos seus valores e ainda  $j$  pelo fluxo máximo calculado no início deste capítulo, foi possível representar a velocidade do gás ao longo de toda a camada do ABM em função da coordenada  $z$ , como representado na figura 5.9 onde se considerou:

$e = 2$  [mm],  $R = 1900$  [mm],  $R_c = 50$  [mm],  $L = 13200$  [mm] e  $j = 0.000187$  [mm/s]

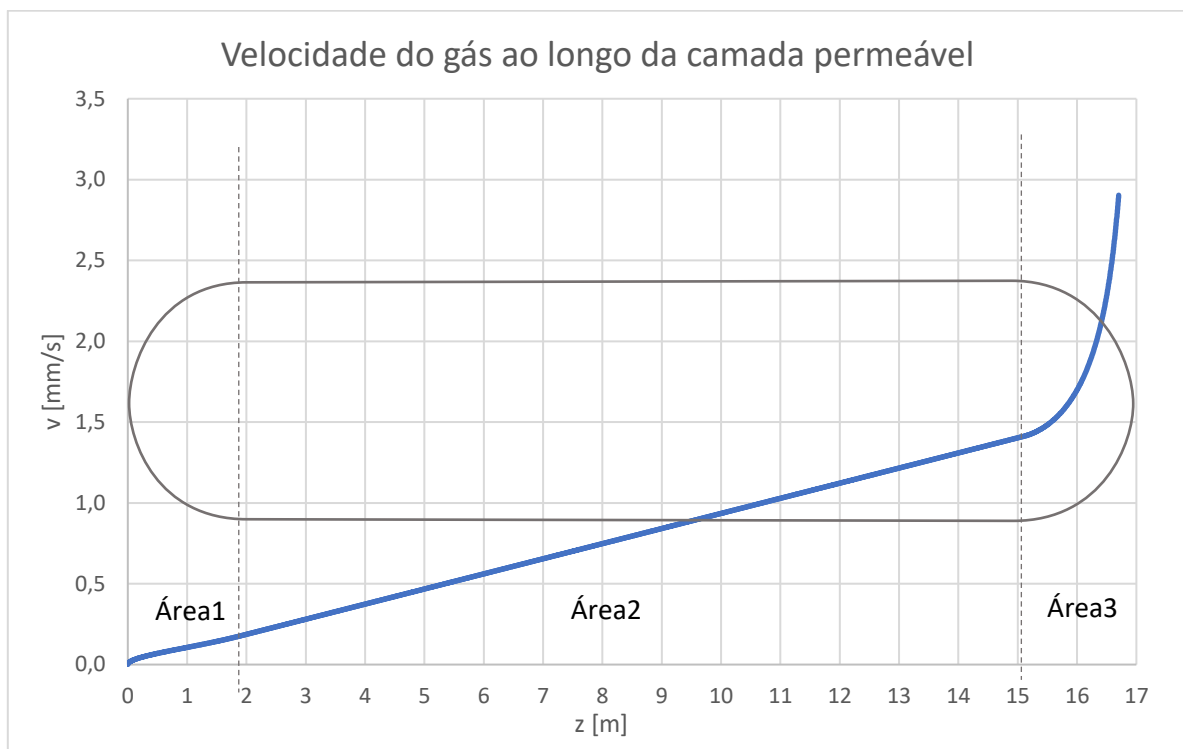


Figura 5.9 - Evolução da velocidade do gás ao longo da camada permeável

Note-se a direção do eixo  $z$  que no gráfico acima está representado no sentido contrário ao da figura 5.8.

Observando a figura 5.9 verifica-se que na área 1 da camada permeável a velocidade do gás aparenta aumentar com um comportamento aproximadamente linear. Na área 2 a velocidade do gás aumenta de forma linear, como era esperado, uma vez que a área da secção da camada se mantém constante. Na área 3 da camada observa-se um aumento exponencial da velocidade do gás uma vez que, para além do caudal que circula na camada aumentar com a distância percorrida sobre a superfície, também a área da secção transversal diminui à medida que o gás se aproxima do coletor.

### 5.3 Cálculo da pressão ao longo da camada

Com os dados obtidos nos ensaios experimentais e ainda com o estudo da velocidade ao longo da camada que foi feito na secção anterior é possível calcular a evolução da pressão ao longo da camada.

Segundo 2.8, a lei de Darcy é dada pela expressão:

$$Q = -\frac{K \cdot e \cdot b}{\mu} \cdot \frac{dP}{dx}$$

Substituindo o caudal volumétrico pela velocidade do gás e colocando a expressão em ordem ao gradiente de pressão ficando na forma:

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{\mu}{K} \cdot v \quad (5.22)$$

Uma vez que se conhece a função da velocidade ao longo da camada:

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{\mu}{K} \cdot v(x) \quad (5.23)$$

Portanto integrando ambos os lados da equivalência, seria possível calcular  $P(x)$  da seguinte forma:

$$P(x) - P(0) = -\frac{\mu}{K} \cdot \int_0^x v(x) dx \quad (5.24)$$

No entanto, tanto a espessura como a permeabilidade são funções da pressão de compactação que varia ao longo de  $x$ , pelo que foi necessário calcular este integral de forma numérica.

Sabe-se de 4.7 que:

$$-\frac{dP}{dx} = \frac{\mu}{(K \cdot e)(P_c)} \cdot \frac{Q}{b}$$

Como:

$$Q = A \cdot v \leftrightarrow Q = e \cdot b \cdot v \leftrightarrow \frac{Q}{b} = e \cdot v \quad (5.25)$$

Ou seja, multiplicando  $v(x)$  em 5.20 por  $(e)$  obtém-se a função  $\left(\frac{Q}{b}\right)(x)$  definida em 5.26.

$$\left(\frac{Q}{b}\right)(x) = \begin{cases} \frac{j \cdot R \cdot (1 - \cos \frac{x}{R})}{\sin \frac{x}{R}}, & 0 \leq x < \frac{\pi R}{2} \\ j \cdot \left(R + x - \frac{\pi R}{2}\right), & \frac{\pi R}{2} \leq x < \frac{\pi R}{2} + L \\ \frac{j \cdot (R \cdot \sin(\frac{x}{R} - \frac{\pi}{2} - \frac{L}{R}) + R + L)}{\cos(\frac{x}{R} - \frac{\pi}{2} - \frac{L}{R})}, & \frac{\pi R}{2} + L \leq x < \pi R + L \end{cases} \quad (5.26)$$

Sabe-se de 4.10 que:

$$(K \cdot e)(P_c) = 3.30 \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{P_c}{bar}\right)^{-0.441}$$

Portanto substituindo 5.25 e 4.10 em 4.7 obtém-se a expressão que define o gradiente de pressão em função da coordenada x e da pressão de compactação.

A pressão de compactação pode ser relacionada com a pressão na camada através de:

$$P_c(P(x_n)) = P_{interna} - P(x_n) \quad (5.27)$$

Portanto tem-se que:

$$\frac{dP}{dx}(x_n) = -\frac{\mu}{(K \cdot e)(P_c(P(x_n)))} \cdot \left(\frac{Q}{b}\right)(x_n) \quad (5.28)$$

Com esta expressão, sabendo a pressão aplicada numa certa secção definida por x, é possível saber o gradiente de pressão que ocorre nesta secção.

De seguida apresenta-se o seguimento lógico utilizado no cálculo numérico da pressão ao longo da camada. Este cálculo assemelha-se a calcular o integral definido 5.24 pelo método de *Riemann*.

Se a coordenada x for dividida em intervalos de 5mm, obtém-se uma variável discreta em que:

$$x_{n+1} = x_n - 0.005 [m] \quad (5.29)$$

E assim o gradiente de pressão pode ser expresso por:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dx} &= \frac{P(x_n) - P(x_{n+1})}{0.005[m]} \leftrightarrow \\ P(x_{n+1}) &= P(x_n) - \frac{dP}{dx}(x_n) \cdot 0.005[m] \end{aligned} \quad (5.30)$$

Por conseguinte a diferença de pressão que ocorre numa distância de 5 mm percorrida na coordenada  $x$  equivale a:

$$\Delta P(x_n) = -\frac{dP}{dx}(x_n) \cdot 0.005[m] \quad (5.31)$$

Substituindo 5.31 em 5.30 obtém-se:

$$P(x_{n+1}) = P(x_n) + \Delta P(x_n) \quad (5.32)$$

A pressão conhecida corresponde à pressão mínima  $P_{min}$ , ou seja, a pressão aplicada à entrada da bomba de vácuo. Esta pressão ocorre no coletor de gás, ou seja, em  $x_{máx}$ . Portanto sabe-se que:

$$P(x_{max}) = P_{min}$$

Sendo que o limite máximo da coordenada é dado em função do raio do coletor através da expressão:

$$x_{max} = \pi R + L - R \sin^{-1} \frac{R_c}{R} \quad (5.33)$$

Portanto uma vez definidas as constantes  $R$ ,  $L$  e  $R_c$  obtém-se  $x_{máx}$ .

O algoritmo utilizado para o cálculo da pressão ao longo da camada encontra-se esquematizado na figura 5.10.

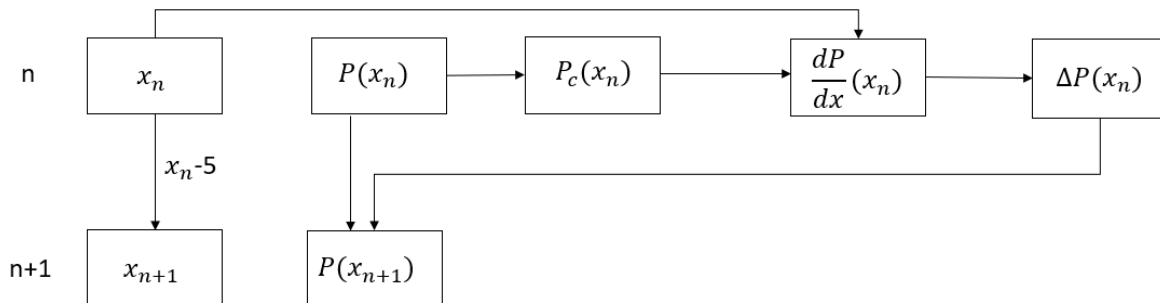


Figura 5.10 - Algoritmo utilizado para o cálculo numérico da pressão ao longo da camada

O cálculo começa com  $x_0 = x_{máx}$  que se obtém após definir o raio do coletor e  $P(x_0) = P_{min}$  correspondente à pressão aplicada pela bomba de vácuo. De seguida calcula-se a pressão de compactação através da expressão 5.27:

$$P_c(P(x_n)) = P_{interna} - P(x_n)$$

O gradiente de pressão  $\frac{dP}{dx}(x_n)$  é calculado com os valores  $P_c(x_n)$  e  $x_n$  com a expressão 5.28:

$$\frac{dP}{dx}(x_n) = -\frac{\mu}{(K \cdot e)(P_c(x_n))} \cdot \left(\frac{Q}{b}\right)(x_n)$$

Posto isto obtém se a variação da pressão no intervalo de  $x$  através de 5.30:

$$\Delta P(x_n) = -\frac{dP}{dx}(x_n) \cdot 5[mm]$$

Obtendo-se assim  $P(x_{n+1})$  conforme 5.32:

$$P(x_{n+1}) = P(x_n) + \Delta P(x_n)$$

$x_{n+1}$  obtém-se subtraindo 5[mm] a  $x_n$  segundo 5.29

$$x_{n+1} = x_n - 0.005 [m]$$

Este algoritmo repete-se até  $x_n=0$  ou seja quando se chega à extremidade do balão.

## 5.4 Estudo da evolução da pressão ao longo da camada

Sabe-se que o aumento de pressão máximo se dá para a pressão mínima na camada, ou seja, quando o fluxo que atravessa para a camada é máximo e quando o raio do coletor é mínimo. Portanto estudou-se a evolução da pressão na camada para os valores:

$R = 1900$  [mm],  $L = 13200$  [mm],  $j = 1.87 \cdot 10^{-4}$  [m/s],  $R_c = 50$  [mm] e  $P_{min} = 0.1$  [bar] =  $10000$  [Pa]

Do capítulo 3, figura 3.7 sabe-se que nestas condições a mistura de gás na camada corresponde a cerca de 15% ar e 85% hélio, portanto considerou-se uma viscosidade de:

$$\mu = 0.15 \cdot \mu_{Ar} + 0.85 \cdot \mu_{He}$$

A viscosidade do ar e do hélio equivale a:

$$\mu_{Ar} = 1.83 \cdot 10^{-5} [Pa \cdot s] \text{ e } \mu_{He} = 1.96 \cdot 10^{-5} [Pa \cdot s]$$

Portanto considerou-se uma viscosidade de:

$$\mu = 1.85 \cdot 10^{-5} [Pa \cdot s]$$

Substituindo estas constantes nas expressões obteve-se o gráfico representado na figura 5.11.

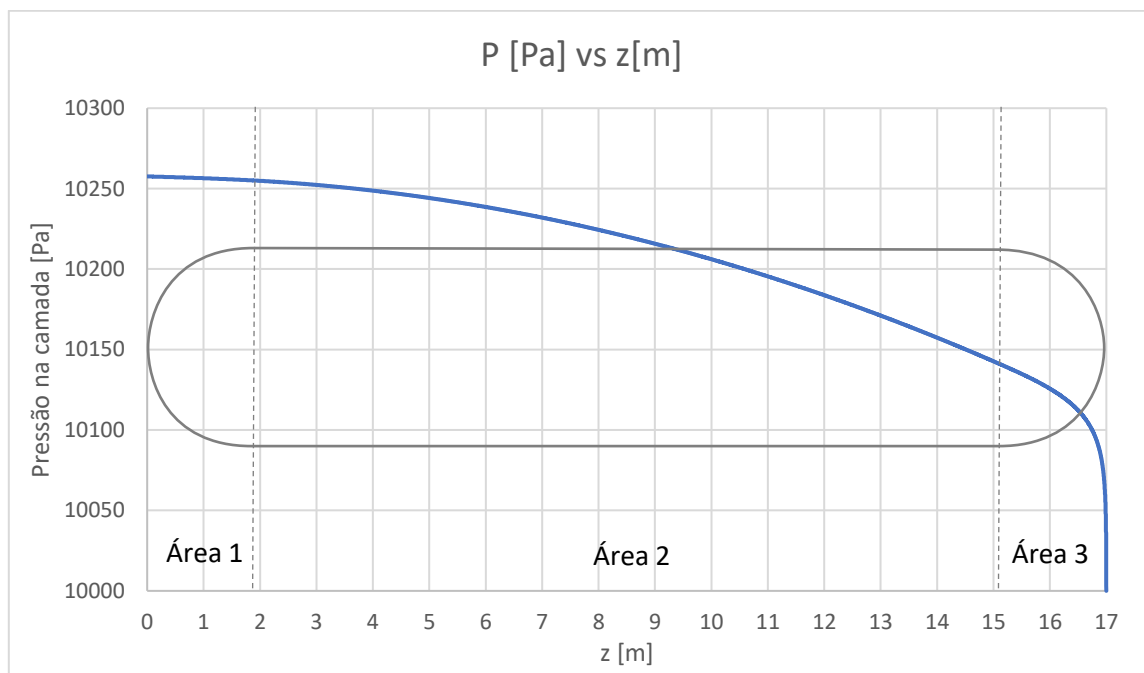


Figura 5.11 - Gráfico da pressão do gás ao longo da camada

Observa-se que mesmo para o pior caso a diferença de pressão de um extremo do ABM para o outro é inferior a  $3000$  [Pa] ou seja  $3$  [mbar] o que representa apenas um aumento de cerca de  $3\%$  da pressão aplicada no coletor de gás. Portanto este resultado indica que o diferencial de pressão que existe entre os extremos do ABM pode ser negligenciado no âmbito do estudo dos caudais de difusão que circulam no sistema.



# 6

## Conclusões

### 6.1 Conclusões

O estudo realizado nesta dissertação permite tirar várias conclusões relativas ao tema tratado.

Do capítulo 3, conclui-se que quanto mais baixa a pressão aplicada na camada, menor é a contaminação de ar para o interior do ABM, sendo que para a pressão de 100 [mbar] na camada estima-se que o fluxo de ar que se difunde para o interior é nulo assim que se obtêm nele uma fração molar de ar de menos de 1%. Isto quer diz que, com este sistema, a contribuição da contaminação para a diminuição da força de sustentação nunca ultrapassa os 1% da força inicial. Na ausência deste sistema a contaminação só iria estancar quando o interior do ABM tivesse uma concentração de ar semelhante à atmosférica, onde evidentemente já não haveria força de sustentação.

Relativamente às perdas de hélio para a atmosfera o mesmo pode ser referido, quanto menor a pressão na camada, menor é este fluxo.

No que diz respeito ao impacto deste sistema na autonomia do ABM, pode afirmar-se que mantendo o tubo de gás auxiliar e considerando que é possível a inclusão de um sistema de separação de gases no solo junto à estação de controlo, é possível, uma vez que a contaminação deixa de ser um problema, manter o ABM na atmosfera num período de tempo teoricamente indefinido.

No capítulo 5 foi visto que a diferença de pressões, desde o coletor de gás até ao extremo oposto do ABM, é inferior a 3 [mbar] quando considerado um diâmetro do coletor de apenas 100 [mm] e uma pressão no coletor de 100 mbar. Isto demonstra que o material escolhido para a camada permeável é adequado no que diz respeito a questões de permeabilidade. Este aumento de pressão representa apenas uma percentagem de 3% relativa à pressão de 100 [mbar] aplicado no coletor, pelo que, é aceitável afirmar que a pressão se mantém praticamente constante em toda a camada.

Relativamente ao peso que é acrescentado ao ABM com este sistema, uma vez que o material utilizado para a camada apresenta um peso de 88 [g/m<sup>2</sup>], com uma área de superfície de 250 m<sup>2</sup> o ABM iria aumentar o seu peso em 22 kg. A bomba proposta no capítulo 5, apresenta um peso máximo de 1.6 kg. Portanto, se for assumido que o sistema de separação de gás é colocado no solo então, no total, este sistema contribui com 23.6 kg para o aumento do peso total do ABM. Uma vez que a carga útil máxima do ABM originalmente é de 40 kg, esta diminui para 16.4 kg.

## 6.2 Propostas de trabalhos futuros

Uma vez que não houve oportunidade para uma validação experimental do trabalho desenvolvido, é feita a sugestão para seu desenvolvimento, em trabalhos futuros, de um protótipo que valide o trabalho feito nesta dissertação no que toca às questões de difusão, que foram tratadas meramente de forma teórica e assentadas em dados de permeabilidade fornecidos por fabricantes e não testados em laboratório. Este protótipo seria um modelo em escala reduzida do ABM atual no qual se introduziria a camada permeável, alvo de estudo desta dissertação, e através de ensaios se verificariam as concentrações de hélio e ar ao longo do tempo nas diferentes zonas do sistema.

No caso de se validar experimentalmente as conclusões retiradas desta dissertação, propõe-se então que fosse desenvolvida a unidade de separação de gás que complementaria o projeto até agora desenvolvido. Uma vez que a concentração de hélio na camada permeável, para uma pressão de 100 mbar na mesma, ronda os 85%, é possível a separação do hélio dos restantes gases através de membranas semipermeáveis. Este processo é realizado unicamente através da passagem de uma mistura de gás através de uma membrana apenas por ação de uma diferença de pressão através da mesma. Este processo tornaria esta unidade bastante compacta e até mesmo passível de ser colocada no próprio ABM. A empresa *SEPURAN* afirma que as suas membranas são capazes de extrair de uma mistura de gás hélio com uma pureza de 99% a partir de uma mistura de apenas 25% de hélio.

## Referências Bibliográficas

- [1] «Omnia | aerial platforms». [Em linha]. Disponível em: <https://www.omnia.net/aerial-platforms>. [Acedido: 13-Mai-2018].
- [2] «O processo de laminação por Infusão a vácuo. | Engenharia Mecânica | Rio Grande do Sul | GAS Engenharia». [Em linha]. Disponível em: <https://www.gas-eng.com.br/blank-3/2018/06/16/O-processo-de-laminação-por-Infusão-a-vácuo>. [Acedido: 16-Set-2018].
- [3] «Vacuum Infusion Supplies and Tools for Composites in Stock|Fibre Glast». [Em linha]. Disponível em: [https://www.fibreglast.com/category/Vacuum\\_Bagging\\_Vacuum\\_Infusion](https://www.fibreglast.com/category/Vacuum_Bagging_Vacuum_Infusion). [Acedido: 19-Mai-2018].
- [4] «Air - Composition and Molecular Weight». [Em linha]. Disponível em: [https://www.engineeringtoolbox.com/air-composition-d\\_212.html](https://www.engineeringtoolbox.com/air-composition-d_212.html). [Acedido: 19-Mai-2018].
- [5] «Air - Molecular Weight and Composition». [Em linha]. Disponível em: [https://www.engineeringtoolbox.com/molecular-mass-air-d\\_679.html](https://www.engineeringtoolbox.com/molecular-mass-air-d_679.html). [Acedido: 19-Abr-2018].
- [6] «Altitude above Sea Level and Air Pressure». [Em linha]. Disponível em: [https://www.engineeringtoolbox.com/air-altitude-pressure-d\\_462.html](https://www.engineeringtoolbox.com/air-altitude-pressure-d_462.html). [Acedido: 14-Mai-2018].
- [7] «aviation.ch - ICAO Standard Atmosphere». [Em linha]. Disponível em: <http://www.aviation.ch/tools-atmosphere.asp>. [Acedido: 19-Jun-2018].
- [8] H. Rottländer, G. Voss, e W. Umrath, «Fundamentals of leak detection», n. 199, 2016.
- [9] J. F. O'Hanlon, *A User's Guide to Vacuum Technology*. 2003.
- [10] C. Henrickson, *Chemistry*. Wiley, 2005.
- [11] R. W. Baker, *Membrane Technology and Applications*. 2012.
- [12] «Gas Laws: Dalton's Law». [Em linha]. Disponível em: <http://www.chm.davidson.edu/vce/gaslaws/daltonslaw.html>. [Acedido: 19-Mai-2018].
- [13] L. W. McKeen, *Permeability properties of plastics and elastomers*. William Andrew, 2011.



# Anexo A – Bomba de vácuo proposta para o sistema

## MEMBRANE VACUUM MINI PUMPS



The mini pumps described in this page are membrane-type. They can be used both as vacuum pumps and compressors. In the latter version they can supply compressed air 100% oil-free up to a maximum 2 bar (g) pressure.

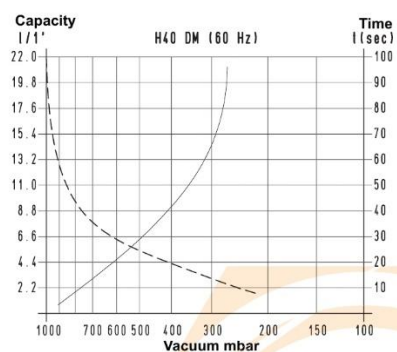
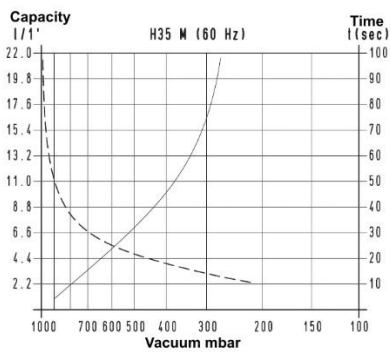
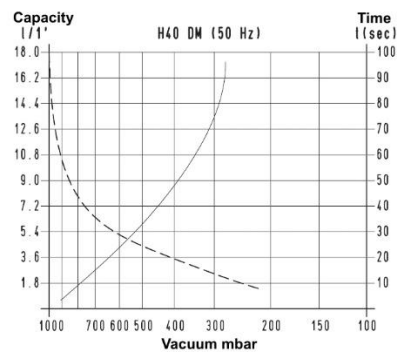
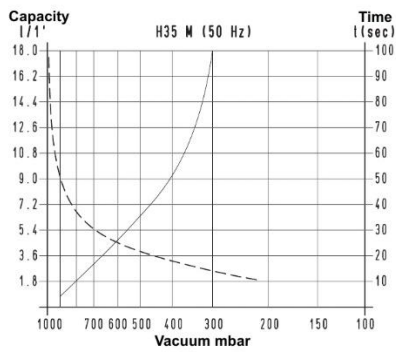
- They are composed of:
- An air-cooled single-phase electric motor with protection class IP 00 (assembly execution).
  - A pump body made of plastic corrosion-resistant material, complete with fittings at both suction and blowing ports.
  - A Viton membrane, resistant to wear and corrosion, solidly connected to a connecting rod.
  - A connecting rod with built-in "long life" bearing activated by a balanced eccentric system fitted on the motor shaft.
  - An aluminium support for fixing the pump.

They are available in the versions with single and double head to be used in series or in parallel.

Membrane vacuum mini pumps are very silent ( $\leq 50\text{dB(A)}$ ), they have reduced vibrations and can be installed in any position. Lubrication-free, they require no maintenance.

Thanks to their minimal overall dimensions and reduced weight, they are particularly indicated for being installed on portable equipment. They are suited for a discontinuous and non-intense use.

--- Curves regarding capacity (referring to a 1013 bar pressure)  
 — Curves regarding the emptying of a 6-litre volume



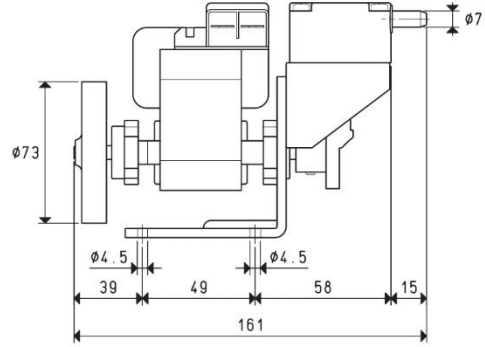
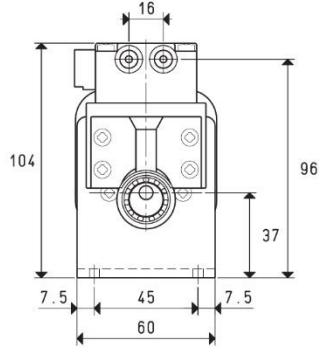
To calculate the emptying time of a volume  $V_1$ , apply the formula  $t_1 = \frac{t \times V_1}{6}$

$V_1$  : Volume to be emptied  
 $t_1$  : Time to be calculated (sec)  
 $t$  : Time obtained in the table (sec)

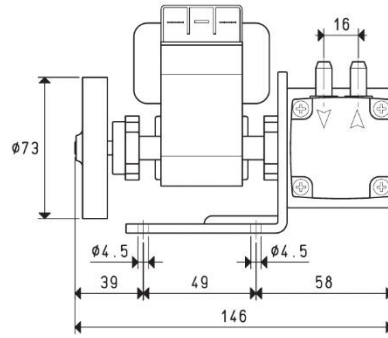
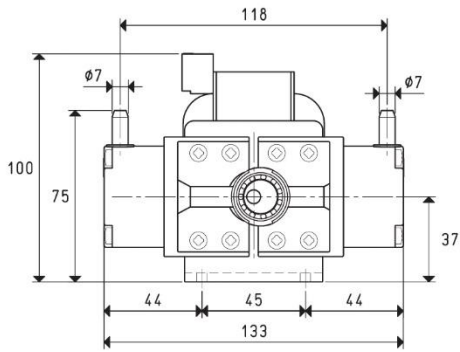
3D drawings available at [www.vuototecnica.net](http://www.vuototecnica.net)

## MEMBRANE VACUUM MINI PUMPS

H 35 M



H 40 DM



Art.	H35 M		H40 DM		
	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz	
<b>Frequency</b>					
<b>Nominal capacity:</b>					
<b>Connection in series</b>	17.5	21.0	18.0	21.5	
<b>Connection in parallel</b>	=	=	18.0 + 18.0	21.5 + 21.5	
<b>Final pressure:</b>					
<b>Connection in series</b>	mbar abs.	200		60	
<b>Connection in parallel</b>	mbar abs.	=		160	
<b>Max. pressure</b>	bar (g)	2		2	
<b>Motor execution</b>	1~	230 ± 10%		230 ± 10%	
<b>Volt</b>					
<b>Motor power</b>	1~	15	18	16.5	20
<b>Watt</b>					
<b>Electric absorption</b>	A	0.60		0.80	
<b>Rotation speed</b>	rev/min <sup>-1</sup>	2800	3300	2800	3300
<b>Noise level</b>	dB(A)	≤ 50		≤ 50	
<b>Max. weight</b>	Kg	1.3		1.6	
<b>Accessories and spare parts</b>					
<b>Membrane</b>	art.	00 H35M 15		00 H40DM 15	
<b>Lid with fittings</b>	art.	00 H35M 16		00 H40DM 20	

7.02

Conversion ratio: inch =  $\frac{\text{mm}}{25.4}$ ; pounds =  $\frac{\text{g}}{453.6} = \frac{\text{Kg}}{0.4536}$

cfm= cum/h x 0.588; inch Hg= mbar x 0.0295; psi= bar (g) x 14.6

## Anexo B – Ficha técnica do Material Permeável



### Key Features

- Highly conformable
- Ideal for complex mouldings
- Excellent flow characteristics

### Product Description

FM105 EasyFlow Knitted Infusion mesh is a warp knitted polypropylene infusion mesh offering excellent flow media properties in conjunction with outstanding conformability over complex mould specifically as a flow media for more complex mould shapes. EasyFlow will conform over contoured mould surfaces and into tight corners whilst still maintaining excellent resin flow.

FM105 EasyFlow mesh is suitable for infusion projects of almost any size; from small aero components through to vehicle panels, smaller boat hulls and wind energy mouldings.

The soft, knitted structure of FM105 EasyFlow mesh makes it difficult to separate from peel ply once the part is cured and so to aid removal of the bagging consumables from the cured laminate, it is strongly recommended to use a heavily perforated release film between the FM105 EasyFlow mesh and the peel ply.

### Recommended Uses

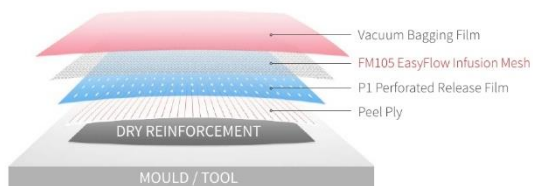
- Resin infusion of more contoured or complex mouldings
- Epoxy, polyester and vinylester infusions

### Typical Use

FM105 EasyFlow mesh is most typically used as a flow media to distribute resin through the laminate during vacuum resin infusion of more complex or contoured mouldings.

A typical consumables stack for this process would be peel ply, then P1 perforated film, the FM105 mesh and then the vacuum bag.

#### Example Stack : Resin Infusion



### Specification

Property	Units	Value
Material	-	Polypropylene
Width	mm	1400 (-0 +2%)
Format	-	Single Sheet
Areal Weight	g/m <sup>2</sup>	88 ± 10%
Maximum Use Temperature	°C	100
Appearance	-	Clear Knitted Mesh

### Handling & Storage

FM105 is a stable polypropylene material with no special handling or storage requirements.

### Disclaimer

This data is not to be used for specifications. Values listed are for typical properties and should not be considered minimum or maximum.

Our technical advice, whether verbal or in writing, is given in good faith but EasyComposites Ltd gives no warranty, express or implied, and all products are sold upon condition that purchasers will make their own tests to determine the quality and suitability of the product for their particular application and circumstances.

Easy Composites Ltd shall be in no way responsible for the proper use and service of the product, nor for the safeguarding of personnel or property, all of which is the duty of the user. Any information or suggestions are without warranty of any kind and purchasers are solely responsible for any loss arising from the use of such information or suggestions. No information or suggestions given by us shall be deemed to be a recommendation to use any product in conflict with any existing patent rights.

Before using any of our products, users should familiarise themselves with the relevant technical and safety datasheets provided by Easy Composites Ltd.

Aerofilm® is a trademark of Easy Composites Ltd.



# Anexo C – Ficha técnica do Sensor de Pressão e Temperatura

 <b>BOSCH</b>	Datasheet BMP280 Digital Pressure Sensor	Page 2
--	---	--------

## BMP280

### DIGITAL PRESSURE SENSOR

#### Key parameters

- Pressure range 300 ... 1100 hPa  
(equiv. to +9000...-500 m above/below sea level)
- Package 8-pin LGA metal-lid  
Footprint : 2.0 × 2.5 mm<sup>2</sup>, height: 0.95 mm
- Relative accuracy ±0.12 hPa, equiv. to ±1 m  
(950 ... 1050hPa @25°C)
- Absolute accuracy typ. ±1 hPa  
(950 ...1050 hPa, 0 ...+40 °C)
- Temperature coefficient offset 1.5 Pa/K, equiv. to 12.6 cm/K  
(25 ... 40°C @900hPa)
- Digital interfaces I<sup>2</sup>C (up to 3.4 MHz)  
SPI (3 and 4 wire, up to 10 MHz)
- Current consumption 2.7µA @ 1 Hz sampling rate
- Temperature range -40 ... +85 °C
- RoHS compliant, halogen-free
- MSL 1

#### Typical applications

- Enhancement of GPS navigation  
(e.g. time-to-first-fix improvement, dead-reckoning, slope detection)
- Indoor navigation (floor detection, elevator detection)
- Outdoor navigation, leisure and sports applications
- Weather forecast
- Health care applications (e.g. spirometry)
- Vertical velocity indication (e.g. rise/sink speed)

#### Target devices

- Handsets such as mobile phones, tablet PCs, GPS devices
- Navigation systems
- Portable health care devices
- Home weather stations
- Flying toys
- Watches

## General Description

Robert Bosch is the world market leader for pressure sensors in automotive and consumer applications. Bosch's proprietary APSM (Advanced Porous Silicon Membrane) MEMS manufacturing process is fully CMOS compatible and allows a hermetic sealing of the cavity in an all silicon process. The BMP280 is based on Bosch's proven Piezo-resistive pressure sensor technology featuring high EMC robustness, high accuracy and linearity and long term stability.

The BMP280 is an absolute barometric pressure sensor especially designed for mobile applications. The sensor module is housed in an extremely compact 8-pin metal-lid LGA package with a footprint of only  $2.0 \times 2.5 \text{ mm}^2$  and 0.95 mm package height. Its small dimensions and its low power consumption of  $2.7 \mu\text{A}$  @1Hz allow the implementation in battery driven devices such as mobile phones, GPS modules or watches.

As the successor to the widely adopted BMP180, the BMP280 delivers high performance in all applications that require precise pressure measurement. The BMP280 operates at lower noise, supports new filter modes and an SPI interface within a footprint 63% smaller than the BMP180.

The emerging applications of in-door navigation, health care as well as GPS refinement require a high relative accuracy and a low TCO at the same time. BMP180 and BMP280 are perfectly suitable for applications like floor detection since both sensors feature excellent relative accuracy is  $\pm 0.12 \text{ hPa}$ , which is equivalent to  $\pm 1 \text{ m}$  difference in altitude. The very low offset temperature coefficient (TCO) of  $1.5 \text{ Pa/K}$  translates to a temperature drift of only  $12.6 \text{ cm/K}$ . Please contact your regional Bosch Sensortec partner for more information about software packages enhancing the calculation of the altitude given by the BMP280 pressure reading.

Table 1: Comparison between BMP180 and BMP280

Parameter	BMP180	BMP280
Footprint	$3.6 \times 3.8 \text{ mm}$	$2.0 \times 2.5 \text{ mm}$
Minimum $V_{DD}$	1.80 V	1.71 V
Minimum $V_{DDIO}$	1.62 V	1.20 V
Current consumption @3 Pa RMS noise	$12 \mu\text{A}$	$2.7 \mu\text{A}$
RMS Noise	3 Pa	1.3 Pa
Pressure resolution	1 Pa	0.16 Pa
Temperature resolution	$0.1^\circ\text{C}$	$0.01^\circ\text{C}$
Interfaces	I <sup>2</sup> C	I <sup>2</sup> C & SPI (3 and 4 wire, mode '00' and '11')
Measurement modes	Only P or T, forced	P&T, forced or periodic
Measurement rate	up to 120 Hz	up to 157 Hz
Filter options	None	Five bandwidths

## Anexo D – Código Arduino utilizado nos Ensaios

```
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BMP280.h>

Adafruit_BMP280 bmp; // I2C

const int pressaoinicial = 500;
const int pressaofinal = 1000;

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  if (!bmp.begin()) {
    Serial.println(F("Could not find a valid BMP280 sensor, check wiring!"));
    while (1);
  }
}

void loop() {

  if ((bmp.readPressure()/100) > pressaoinicial) and ((bmp.readPressure()/100) < pressaofinal) {

    Serial.print(bmp.readPressure()/100);
    Serial.print(F(", "));
    Serial.println(bmp.readTemperature()+274.15);

  }
  delay(10);
}
```

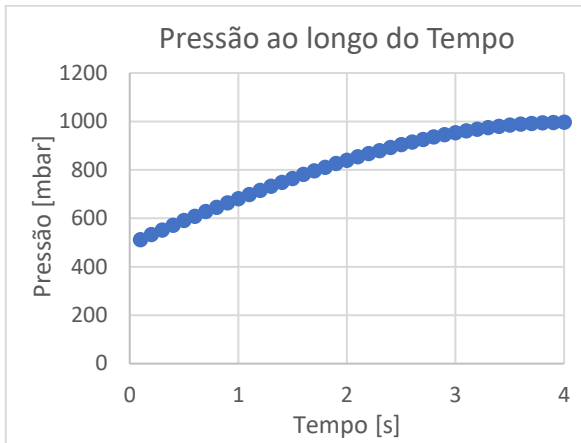


## **Anexo E – Resultados obtidos nos ensaios de Permeabilidade**

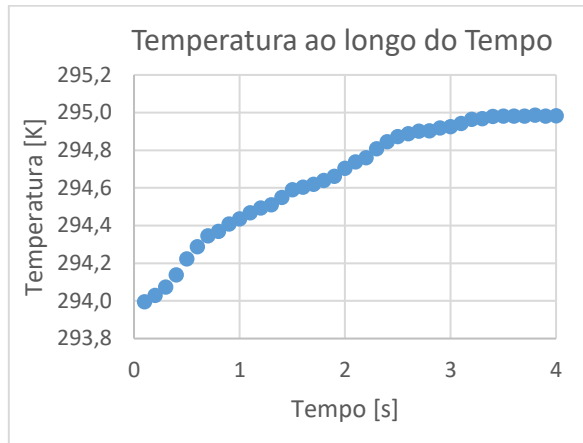
Neste anexo apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade para as pressões de compactação de 0, 50, 200, 300, 400 e 500 mbar. Para cada pressão foram feitos 5 ensaios. Os resultados apresentados consistem em diferentes gráficos como se enumera a seguir:

1. Gráfico da pressão presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio;
2. Gráfico da temperatura do gás presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio;
3. Gráfico da massa de gás presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio;
4. Gráfico do caudal mássico de gás que percorre o material permeável ao longo do tempo de ensaio;
5. Gráfico do gradiente de pressão aplicado no material permeável ao longo do tempo de ensaio;
6. Gráfico do caudal volumétrico de gás que percorre a amostra de material permeável ao longo do tempo de ensaio;
7. Gráfico do gradiente de pressão aplicado na amostra de material permeável em função do caudal volumétrico de gás que atravessa o material;

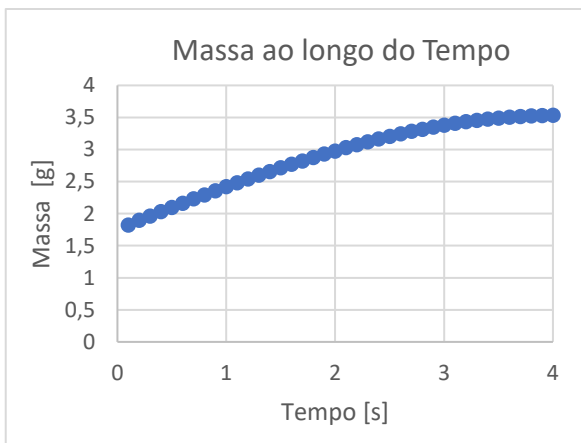
## Pressão de Compactação de 0 mbar



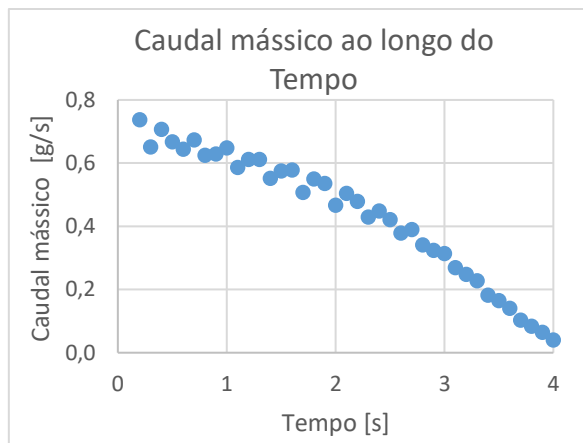
E 1 - Gráfico da pressão presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio



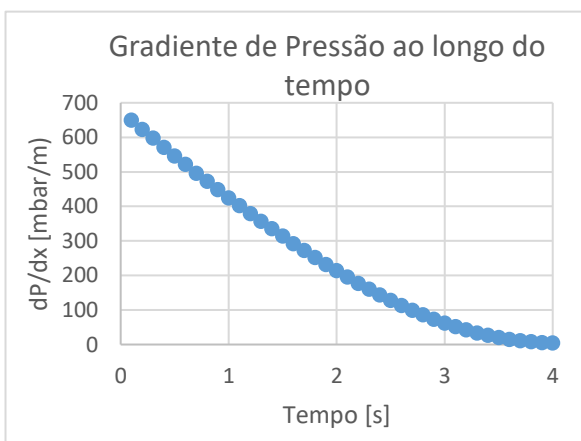
E 2 - Gráfico da temperatura do gás presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio



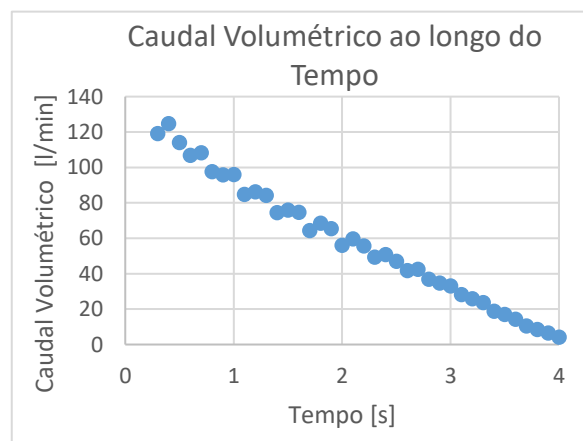
E 3 - Gráfico da massa de gás presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio



E 4 - Gráfico do caudal mássico de gás que percorre o material ao longo do tempo de ensaio

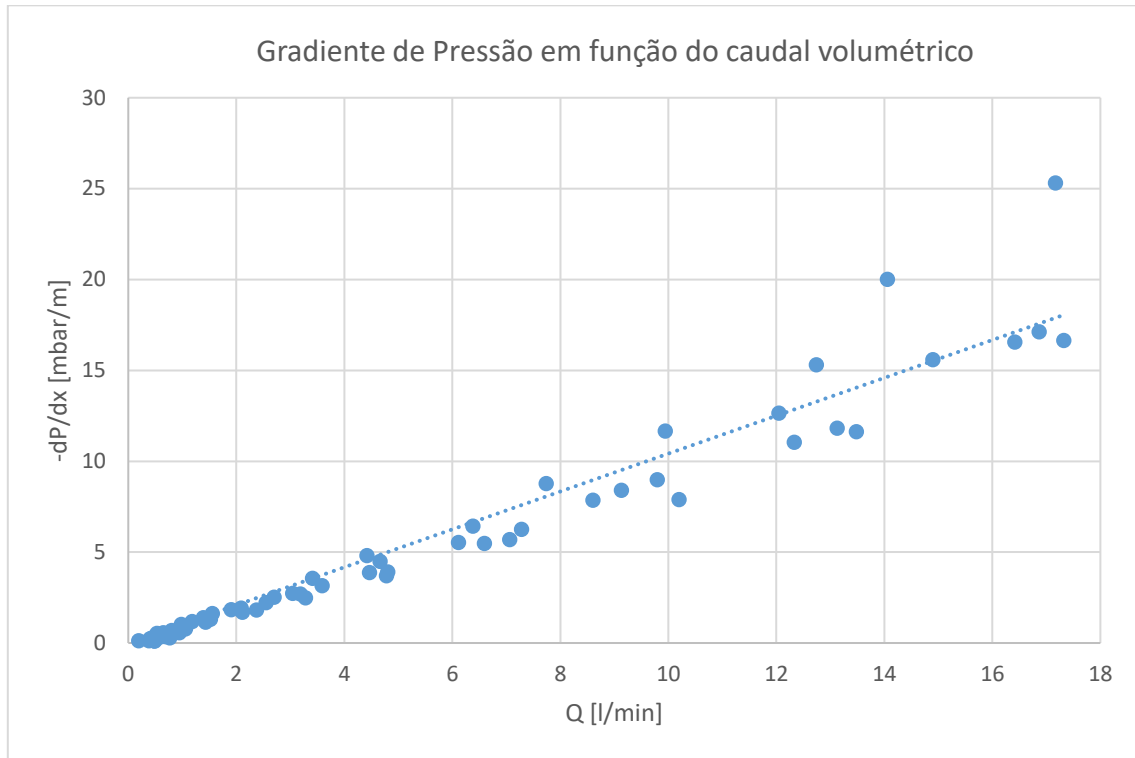


E 5 - Gráfico do gradiente de pressão aplicado no material ao longo do tempo de ensaio



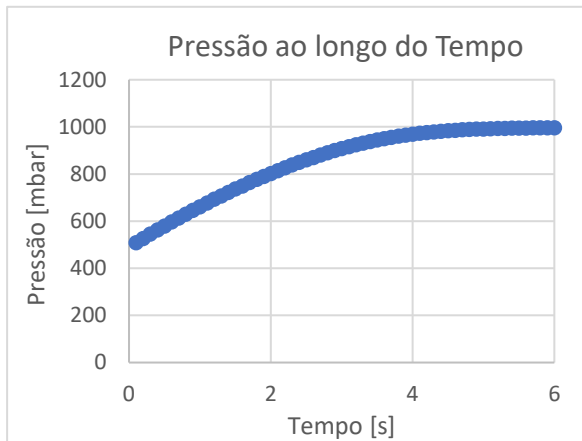
E 6 - Gráfico do caudal volumétrico de gás que percorre a amostra de material ao longo do tempo de ensaio

## Pressão de Compactação de 0 mbar

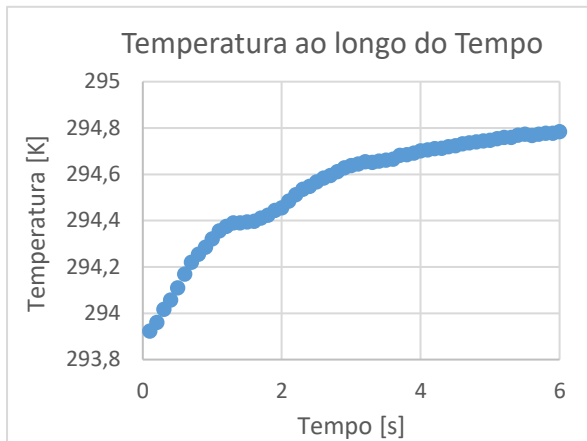


E 7 - Gráfico do gradiente de pressão aplicado na amostra de material em função do caudal volumétrico de gás que o atravessa

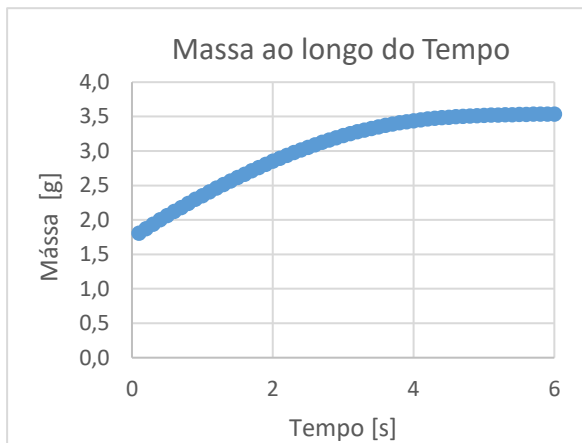
## Pressão de Compactação de 50 mbar



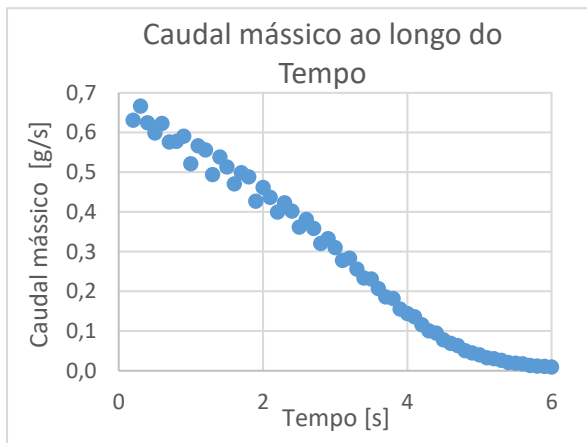
E 8 - Gráfico da pressão presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio



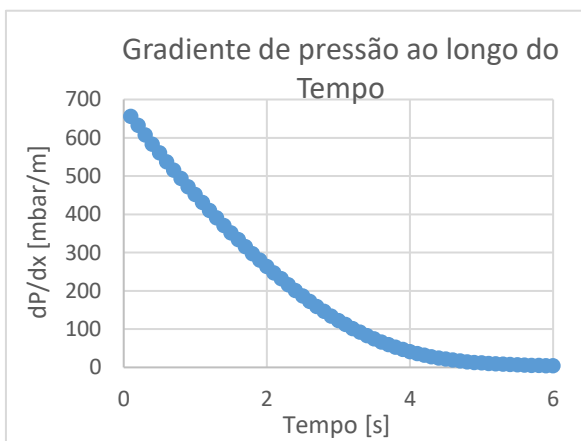
E 9 - Gráfico da temperatura do gás presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio



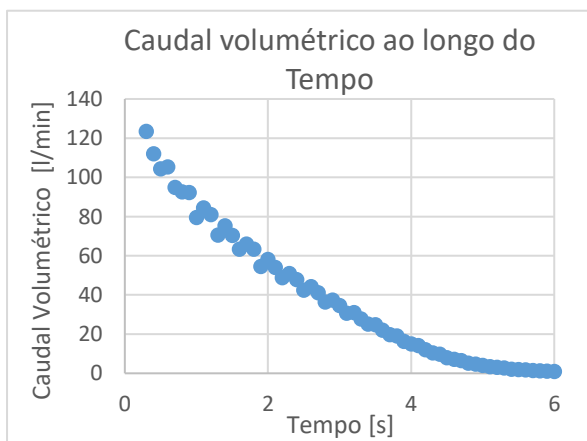
E 10 - Gráfico da massa de gás presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio



E 11 - Gráfico do caudal mássico de gás que percorre o material ao longo do tempo de ensaio

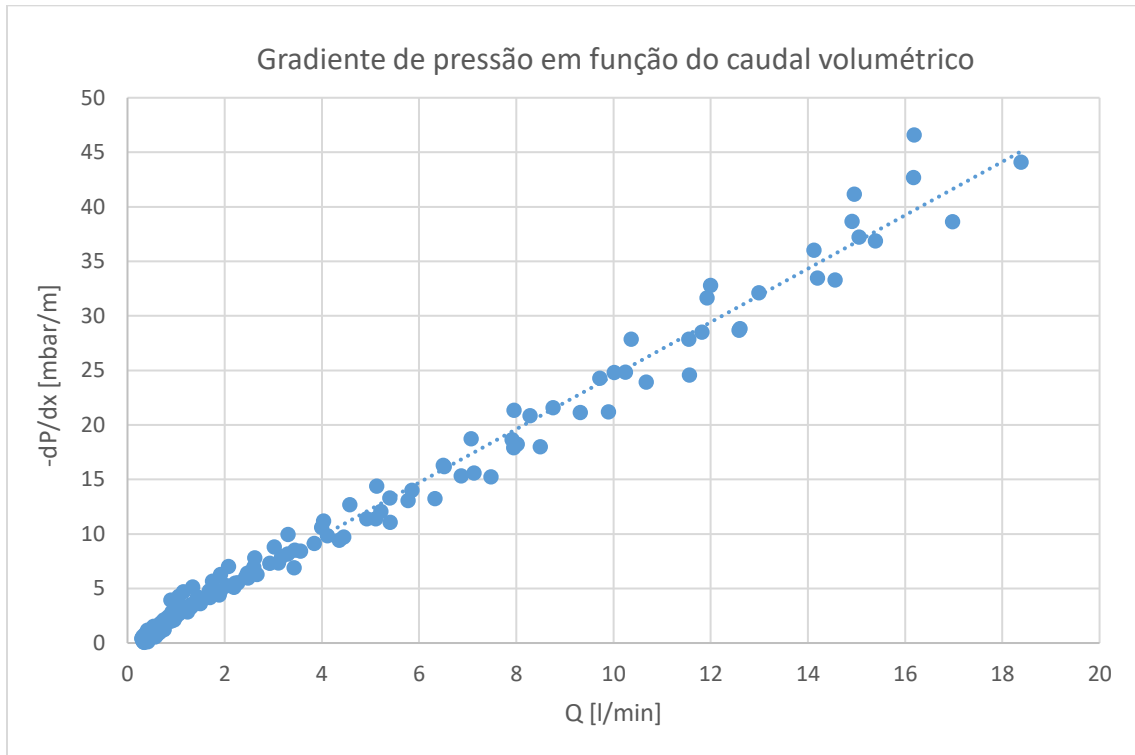


E 12 - Gráfico do gradiente de pressão aplicado no material ao longo do tempo de ensaio



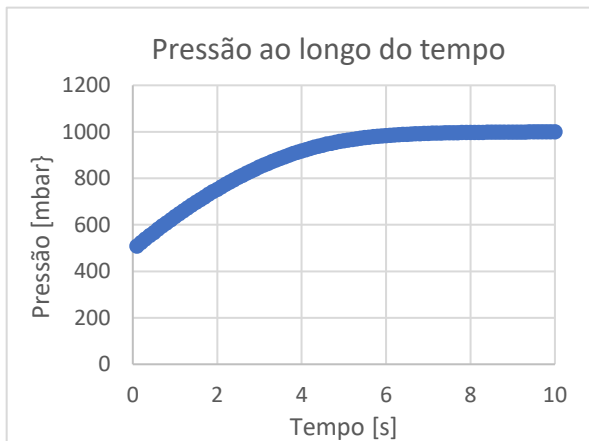
E 13 - Gráfico do caudal volumétrico de gás que percorre a amostra de material ao longo do tempo de ensaio

## Pressão de Compactação de 50 mbar

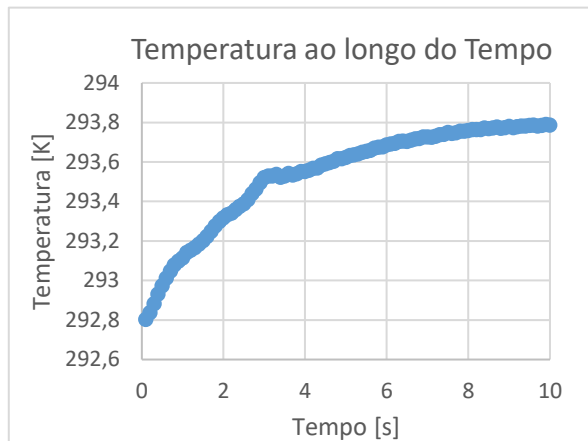


E 14 - Gráfico do gradiente de pressão aplicado na amostra de material em função do caudal volumétrico de gás que o atravessa

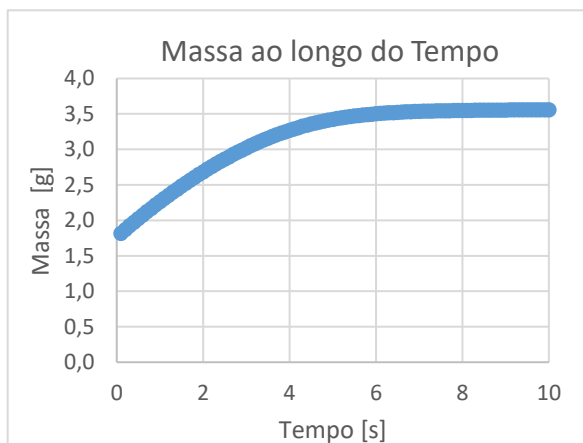
## Pressão de Compactação de 200 mbar



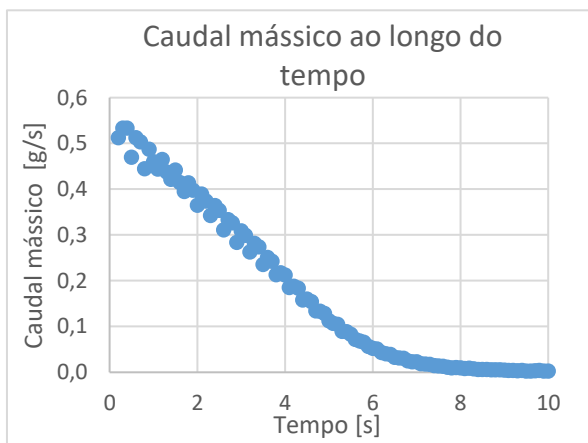
E 15 - Gráfico da pressão presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio



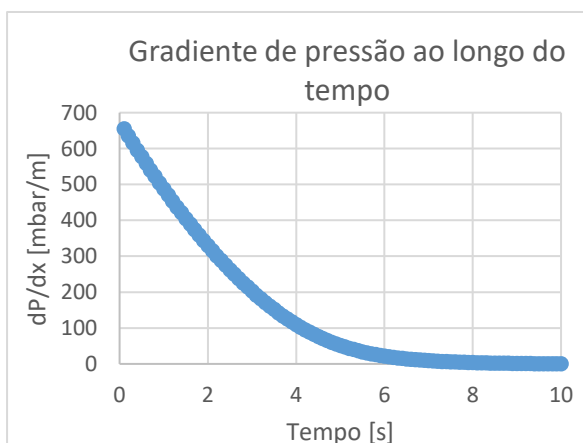
E 16 - Gráfico da temperatura do gás presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio



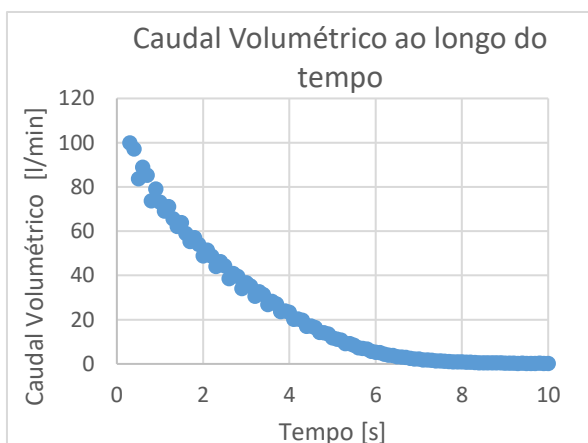
E 17 - Gráfico da massa de gás presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio



E 18 - Gráfico do caudal mássico de gás que percorre o material ao longo do tempo de ensaio

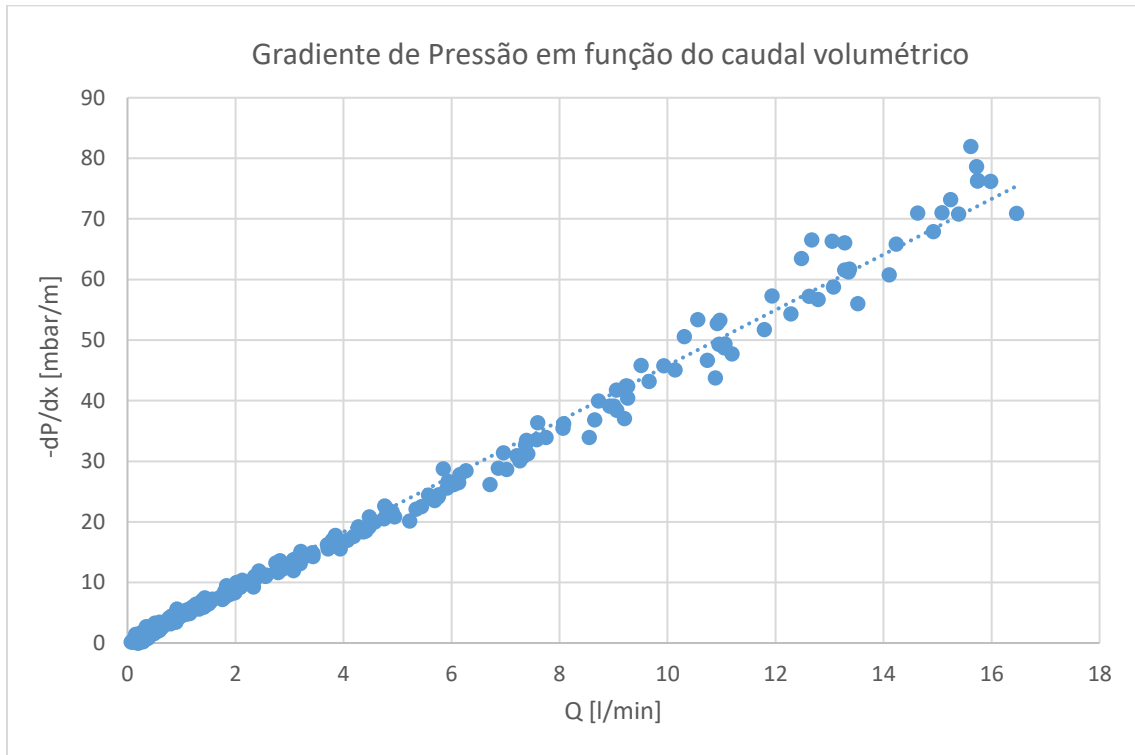


E 19 - Gráfico do gradiente de pressão aplicado no material ao longo do tempo de ensaio



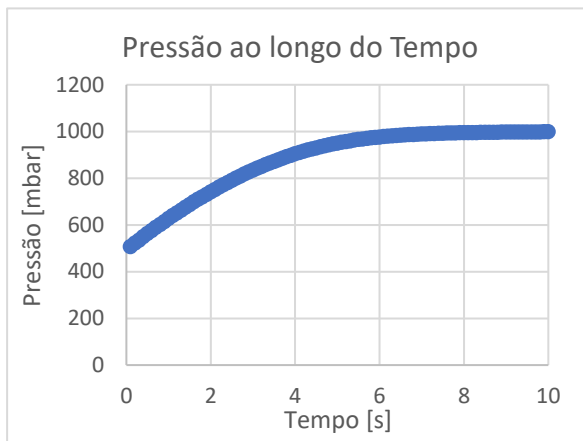
E 20 - Gráfico do caudal volumétrico de gás que percorre a amostra de material ao longo do tempo de ensaio

## Pressão de Compactação de 200 mbar

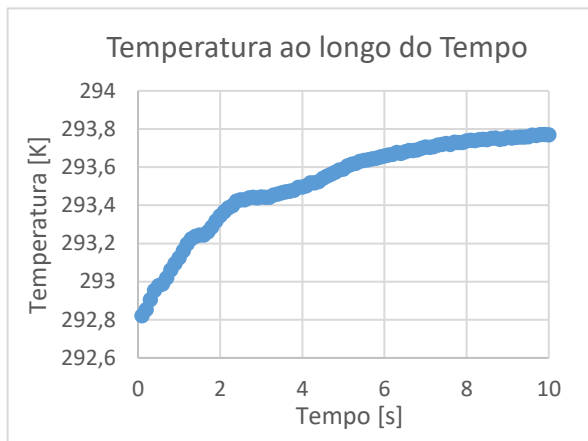


E 21 - Gráfico do gradiente de pressão aplicado na amostra de material em função do caudal volumétrico de gás que o atravessa

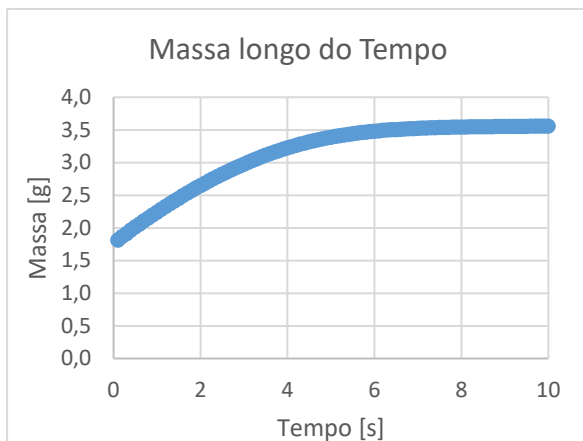
## Pressão de Compactação de 300 mbar



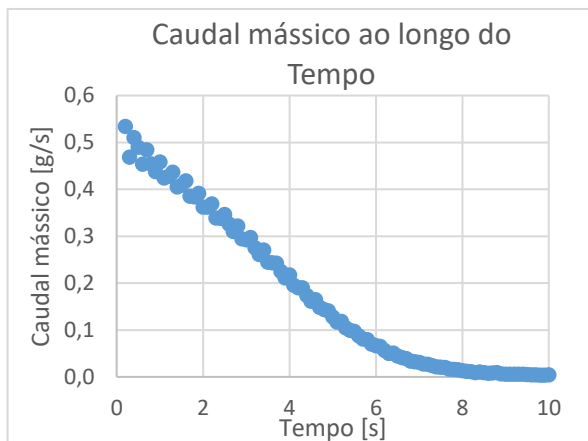
E 22 - Gráfico da pressão presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio



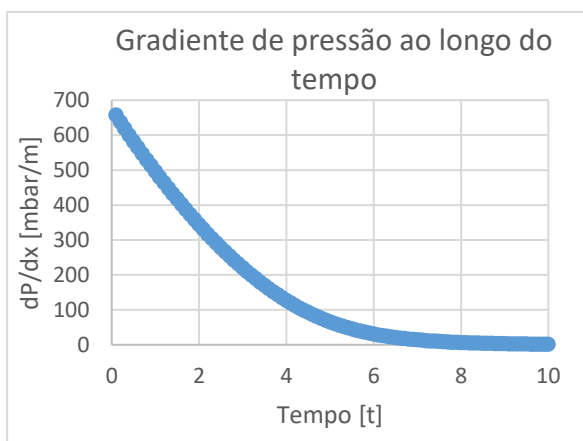
E 23 - Gráfico da temperatura do gás presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio



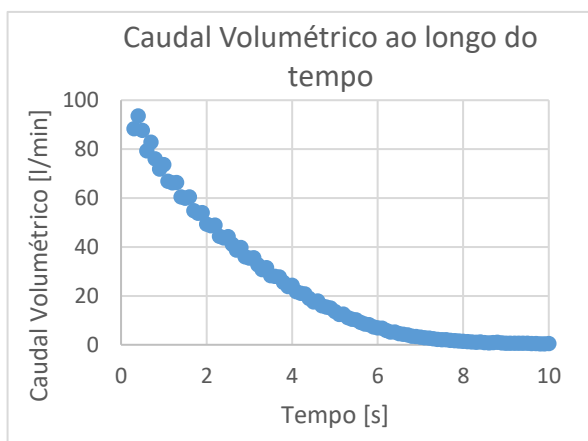
E 24 - Gráfico da temperatura do gás presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio



E 25 - Gráfico do caudal mássico de gás que percorre o material ao longo do tempo de ensaio

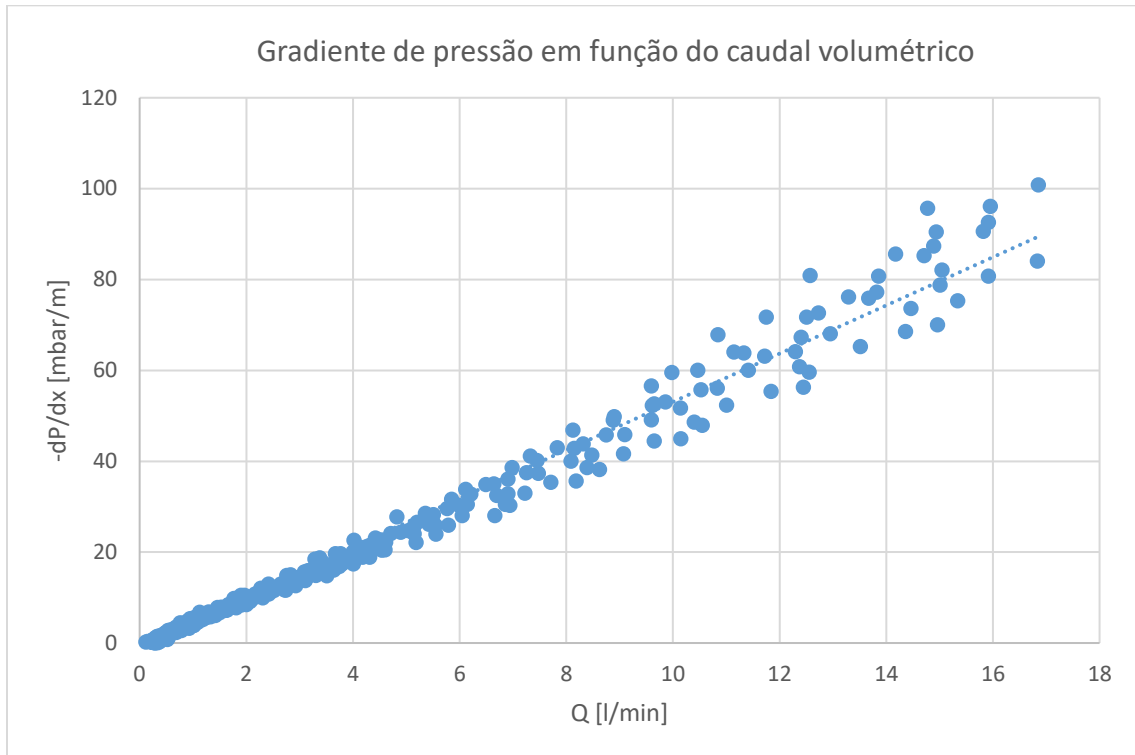


E 26 - Gráfico do gradiente de pressão aplicado no material ao longo do tempo de ensaio



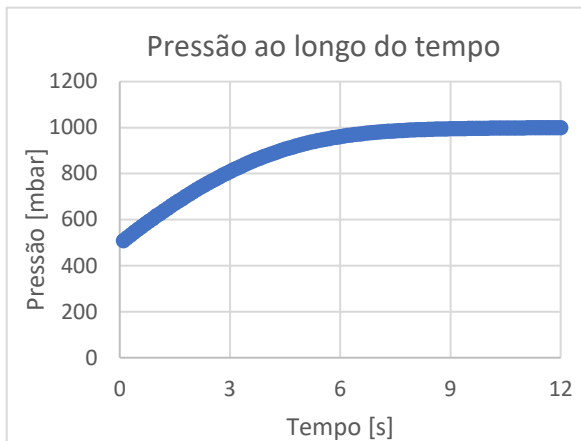
E 27 - Gráfico do caudal volumétrico de gás que percorre a amostra de material ao longo do tempo de ensaio

## Pressão de Compactação de 300 mbar

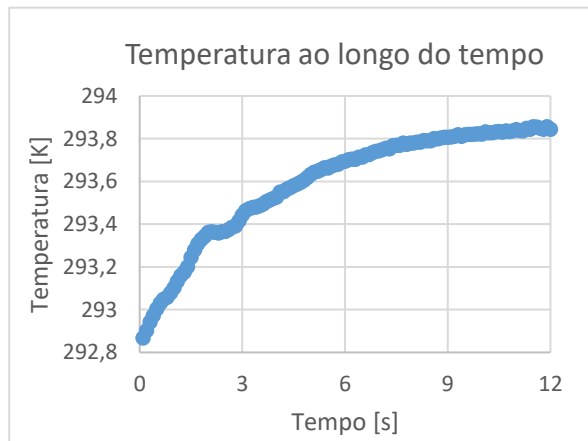


E 28 - Gráfico do gradiente de pressão aplicado na amostra de material em função do caudal volumétrico de gás que o atravessa

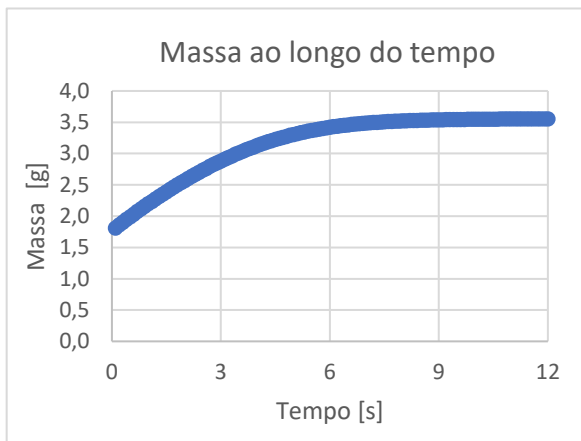
## Pressão de Compactação de 400 mbar



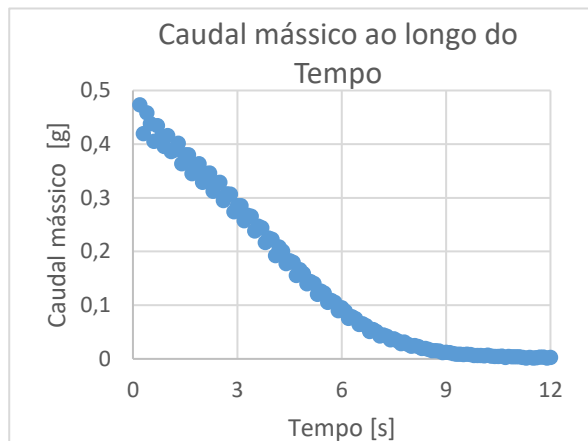
E 29 - Gráfico da pressão presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio



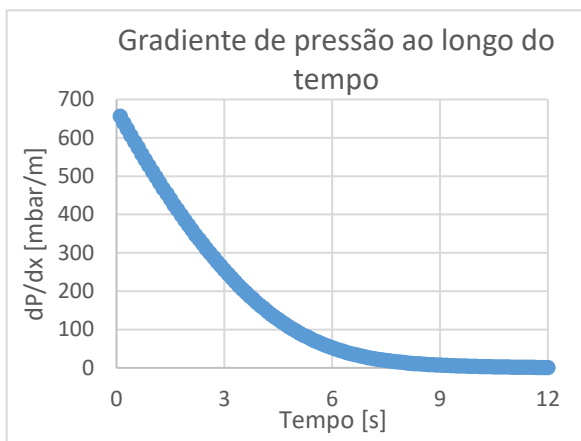
E 30 - Gráfico da temperatura do gás presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio



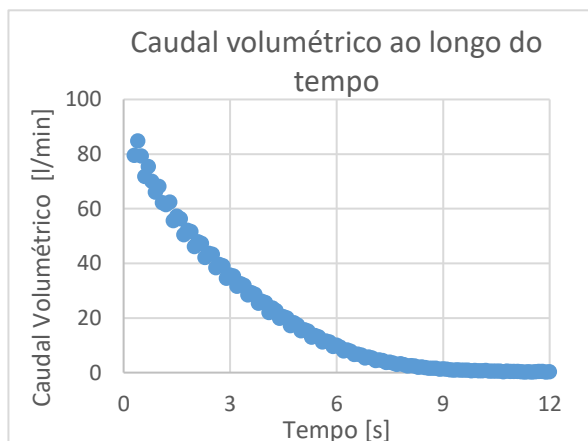
E 31 - Gráfico da temperatura do gás presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio



E 32 - Gráfico do caudal mássico de gás que percorre o material ao longo do tempo de ensaio

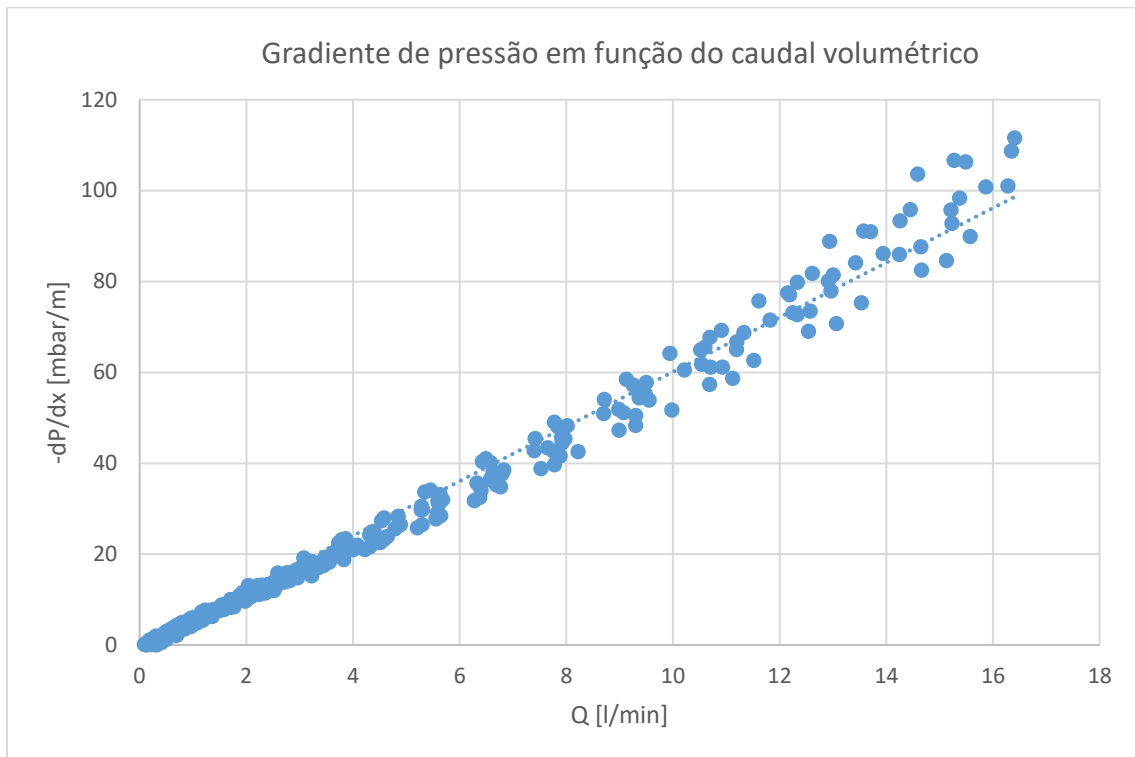


E 33 - Gráfico do gradiente de pressão aplicado no material ao longo do tempo de ensaio



E 34 - Gráfico do caudal volumétrico de gás que percorre a amostra de material ao longo do tempo de ensaio

## Pressão de Compactação de 400 mbar

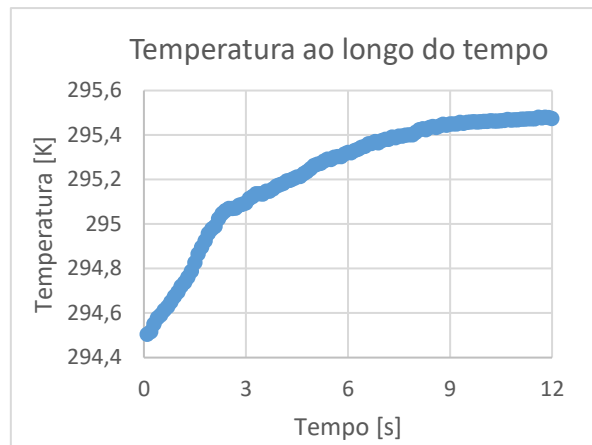


E 35 - Gráfico do gradiente de pressão aplicado na amostra de material em função do caudal volumétrico de gás que o atravessa

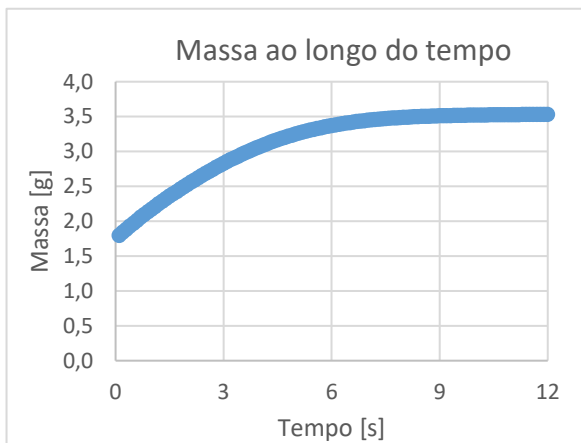
## Pressão de Compactação de 500 mbar



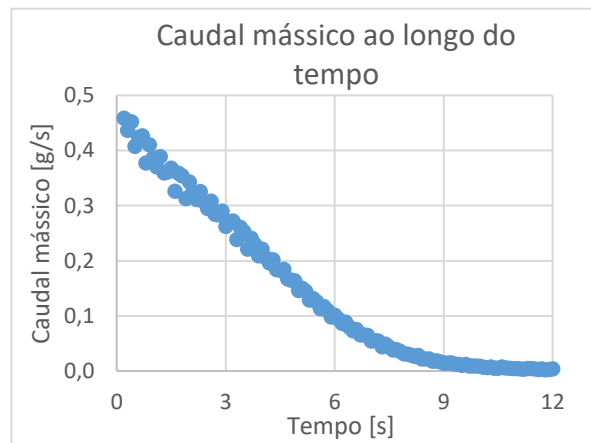
E 36 - Gráfico da pressão presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio



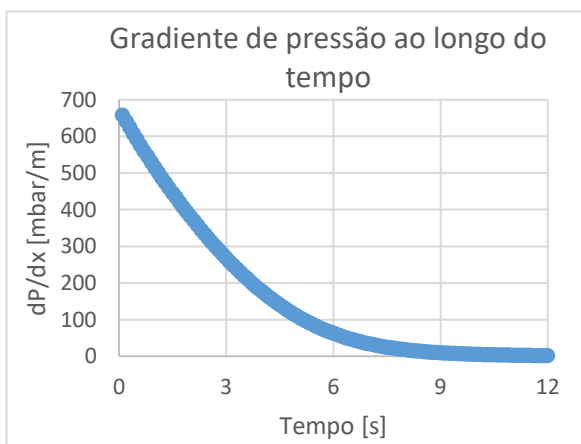
E 37 - Gráfico da temperatura do gás presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio



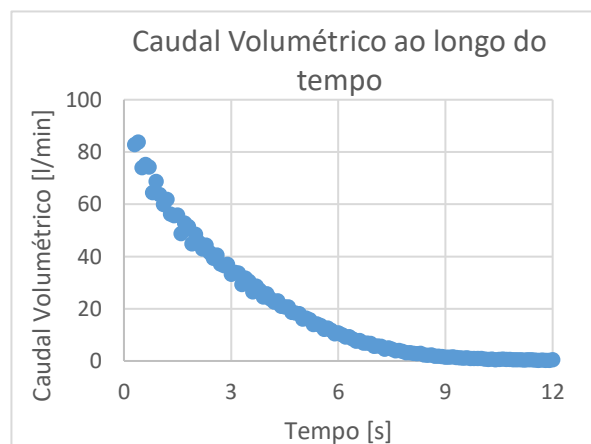
E 38 - Gráfico da temperatura do gás presente no reservatório de vácuo ao longo do tempo de ensaio



E 39 - Gráfico do caudal mássico de gás que percorre o material ao longo do tempo de ensaio

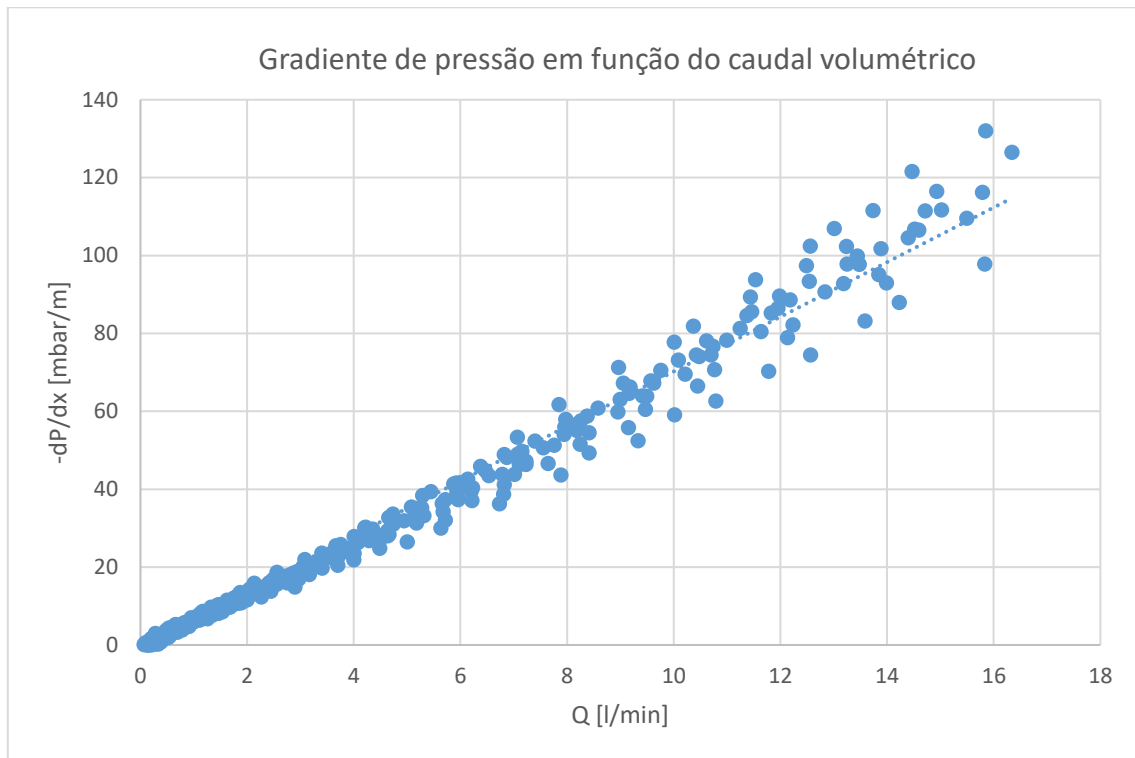


E 40 - Gráfico do gradiente de pressão aplicado no material ao longo do tempo de ensaio



E 41 - Gráfico do caudal volumétrico de gás que percorre a amostra de material ao longo do tempo de ensaio

## Pressão de Compactação de 500 mbar



E 42 - Gráfico do gradiente de pressão aplicado na amostra de material em função do caudal volumétrico de gás que o atravessa