



**Fernando Manuel Simões Oliveira**

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

## **Estudo Experimental da Limitação da Contaminação com Poluentes Utilizando Jatos Planos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil

Orientador: Doutor João Carlos Viegas, Investigador Principal,  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Co-orientadores: Professor Doutor, Daniel Aelenei, Professor Auxiliar,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia,  
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Fernando M. A. Henriques

Arguente: Prof. Doutor José M. P. Conde

Vogal: Doutor João Carlos Viegas



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro, 2017



### **Estudo Experimental da Limitação da Contaminação com Poluentes Utilizando Jatos Planos**

Copyright © Fernando Manuel Simões Oliveira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova 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

Gostaria de agradecer em primeiro lugar ao Doutor João Viegas por me ter orientado durante toda a evolução desta dissertação com muita paciência, desde já um muito obrigado pelos conhecimentos transmitidos. Da mesma forma queria agradecer ao Professor Doutor Daniel Aelenei pelo convite para este projeto e pela confiança depositada em mim, pela qual espero corresponder.

Queria agradecer também ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil por me ter acolhido, pelas instalações e meios fornecidos para poder realizar este trabalho, assim como a todas as pessoas com que encontrei ao longo do tempo em que aqui estive, pela simpatia e ajudas que me deram.

Gostava de deixar aqui o meu agradecimento a todos os funcionários e gerentes do restaurante CORROIANA – RESTAURAÇÃO – RÁPIDA, S.A., pelos dias que lá passei e por todo o apoio que me deram.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL), e a todos que nela trabalham, para a nossa educação e bem-estar, um muito obrigado.

Deixo um agradecimento também à Associação de Estudantes da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa que fez com que eu pudesse competir no Campeonato Nacional de Tiro com Arco e pela ajuda que me deram enquanto estudante e membro do NTA.

Um especial agradecimento aos meus colegas e amigos de faculdade, em especial: Gustavo Rei, Cristina Batista, pelas horas passadas juntos tanto em trabalhos académicos como em diversão e pelo apoio que me deram durante as piores alturas em que o tempo de um dia precisava ter 25 ou 26 horas. Ao Núcleo de Tiro com Arco esta grande família, onde não fizemos só um desporto, mas também tivemos imensa diversão e estudo, por isso e muito mais gostava de deixar aqui um abraço muito grande a estes meus companheiros e amigos para o resto da minha vida, em especial, Nuno Pombo, Filipe Martins, Elói Martins, Ana Coutinho, Diana Bordalo e Tiago Monteiro. Por fim quero deixar um muito obrigado, a uma pessoa muito especial para mim, que sempre confiou, apoiou e me compreendeu, Maria João Banha, obrigado por tudo e por me lembrares todos os dias que tinha de escrever esta dissertação.

Gostava ainda de agradecer à minha família, ao meu irmão e irmã e aos amigos em especial Rita Soeiro, Lino Santos, Diogo Soares e João Amaral, que passaram meses e no caso de alguns anos sem poderem estar comigo, sempre me apoiaram e sei que o vão continuar a fazer. Ainda quero deixar aqui um grande abraço ao meu pai e à minha mãe, pelo esforço que fizeram e por terem dado todo o que tinham para que eu pudesse estar onde estou hoje, estarei eternamente grato.

“Este projeto recebeu financiamento do programa de investigação e inovação Horizonte 2020 da União Europeia ao abrigo do acordo de subvenção Marie Skłodowska-Curie N 690968”. Pelo qual estou imensamente grato por me terem integrado.

## Resumo

---

O controlo da qualidade do ar é de extrema importância dentro dos edifícios de hoje em dia. Atualmente, as cortinas de ar verticais são frequentemente usadas para separar duas zonas climáticas diferentes, de modo a reduzir as transferências de calor. Na investigação realizada neste trabalho, é proposto o uso da cortina de ar para garantir uma separação de duas zonas, uma limpa e outra contaminada. A metodologia desta investigação inclui, i) ensaios à escala reduzida em modelos de água, de modo a assegurar que a contaminação não passa através da cortina de ar e ii) um desenvolvimento analítico com as principais características físicas dos jatos planos.

Na solução que se pretende desenvolver associa-se um caudal de ar extraído do compartimento contaminado à cortina de ar, bem como a determinação do caudal mínimo de exaustão capaz de garantir a estanquidade da cortina.

Este estudo enquadra-se no projeto europeu *Nanoguard2ar*, cujo objetivo principal é desenvolver, testar, validar e fazer a demonstração de um sistema inovador baseado na combinação de nano-materiais com cortinas de ar, para garantir o isolamento e a qualidade do ar interior em edifícios. Para atingir esse objetivo, é utilizado um processo de oxidação de limpeza do ar extraído do compartimento contaminado, juntamente com as cortinas de ar que garantem a separação entre espaços limpos e os contaminados. Este projeto recebeu financiamento do programa de investigação e inovação Horizonte 2020 da União Europeia ao abrigo do acordo de subvenção Marie Skłodowska-Curie n.º 690968.

**Palavras-chave:** Jato plano; Cortina de ar; Modelos em escala reduzida; Controlo de contaminação; Ensaios; Qualidade de ar; *Nanoguard2ar*; Ventilação; Edifícios.

---



# Abstract

---

Controlling air quality is of the utmost importance within today's buildings. Vertical air curtains are often used to separate two different climatic zones in order to reduce heat transfer. In this investigation, it is proposed to use the air curtain to ensure separation of two zones, one clean and one contaminated. The methodology of this research includes: (i) small scale tests on water models to ensure that contamination does not pass through the air curtain; (ii) an analytical development with the main physical characteristics of plane jets.

In the solution to be developed, a flow of air extracted from the compartment contaminated with the air curtain is associated. It's intended to determine the minimum exhaust flow in order to ensure the tightness of the curtain.

This study is part of the European project Nanoguard2ar, whose main objective is to develop, design, test, validate and demonstrate an innovative system based on the combination of Nano-materials with air curtains to ensure insulation and air quality interior in buildings. To achieve this objective, an oxidation process is used to clean the air extracted from the contaminated compartment, together with the air curtains that guarantee the separation between spaces that must be kept clean and contaminated. This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement N 690968.

**Keywords:** 2D Jets; Air curtains; Scale models; Control of contamination; Experiences; Air quality; Nanoguard2ar; Ventilation; Buildings.

---



# ÍNDICE DO TEXTO

<b>RESUMO .....</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>III</b>
<b>ÍNDICE DO TEXTO .....</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE QUADROS .....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>XI</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO E ENQUADRAMENTO DO TEMA	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 PLANO DE TRABALHOS E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
<b>2 ESTADO DO CONHECIMENTO .....</b>	<b>5</b>
2.1 GENERALIDADES	5
2.2 ESTADO DO CONHECIMENTO DAS CORTINAS DE AR	5
2.3 JATOS PLANOS	10
2.4 SIMULAÇÃO EM ESCALA REDUZIDA	12
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>13</b>
3.1 OBJETIVO	13
3.2 EQUIPAMENTO USADO EM ENSAIO	13
3.3 DADOS GEOMÉTRICOS DO JATO	14
3.4 PROCEDIMENTO DE ENSAIO	15
3.4.1 <i>Parte 1:</i>	15
3.4.2 <i>Parte 2:</i>	16
3.4.3 <i>Parte 3:</i>	16
3.5 PLANO DE ENSAIOS	17

3.6	AJUSTAMENTO DO MÉTODO DE ENSAIO	17
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>19</b>
4.1	GENERALIDADES	19
4.2	REGIMES DOS JATOS PLANOS	19
4.3	CAUDAL DO CONTAMINANTE (PARTE 1)	20
4.4	VELOCIDADE E CAUDAL DO JATO (PARTE 2)	23
4.5	CAUDAIS DE EXAUSTÃO (PARTE 3)	25
4.6	RESUMO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	30
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>33</b>
5.1	GENERALIDADES	33
5.2	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO JATO NA VELOCIDADE MÉDIA DE ADMISSÃO NA PORTA	33
5.3	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DO JATO	35
5.4	RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DO JATO E A VELOCIDADE MÉDIA NA ABERTURA DA PORTA	37
5.4.1	<i>Relação <math>u \propto 0,5</math></i>	38
5.4.2	<i>Relação <math>u \propto 0,5(1 - \sin \alpha)</math></i>	42
5.4.3	<i>Relação do método dos mínimos quadrados</i>	44
5.5	ANÁLISE TEÓRICA	48
5.5.1	<i>Equilíbrio de Quantidade de Movimento (EQM)</i>	48
5.5.2	<i>Equilíbrio de Caudal Mássico (ECM)</i>	53
5.6	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	54
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>57</b>
6.1	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	57
6.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	58
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>59</b>
<b>8</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>61</b>

# Lista de Quadros

QUADRO 3.1 – CONJUNTO DE VALORES GEOMÉTRICOS DO JATO. ....	15
QUADRO 4.1 – VALORES DE CAUDAIS OBTIDOS DO CONTAMINANTE COM JATO DESLIGADO. ....	21
QUADRO 4.2 – VALORES DE CAUDAIS OBTIDOS DO CONTAMINANTE COM JATO LIGADO PARTE 1. ....	22
QUADRO 4.3 – VALORES DE CAUDAIS OBTIDOS DO CONTAMINANTE COM JATO LIGADO PARTE 2. ....	23
QUADRO 4.4 – CAUDAIS E VELOCIDADES DO JATO ENSAIADOS PARTE 1. ....	24
QUADRO 4.5 – CAUDAIS E VELOCIDADES DO JATO ENSAIADOS PARTE 2. ....	25
QUADRO 4.6 – REGISTO DOS TEMPOS E CAUDAIS DE EXAUSTÃO PARTE 1. ....	29
QUADRO 4.7 – REGISTO DOS TEMPOS E CAUDAIS DE EXAUSTÃO PARTE 2. ....	30
QUADRO 4.8 – REGISTO DOS DADOS COM ESPESSURA DO JATO 0,00125M E COM O JATO DESLIGADO. ....	31
QUADRO 4.9 – REGISTO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO JATO. ....	32
QUADRO 4.10 – REGISTO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM ÁGUA SALGADA. ....	32
QUADRO 5.1 – REGISTO DA VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO JATO 1. ....	33
QUADRO 5.2 – REGISTO DA VARIAÇÃO DO ANGULO DO JATO PARA $Re=2125$ . ....	35
QUADRO 5.3 – REGISTO DA VARIAÇÃO DO ANGULO DO JATO PARA $Re=1710$ . ....	35
QUADRO 5.4 – REGISTO DA VARIAÇÃO DO ANGULO DO JATO PARA $Re=1224$ . ....	35
QUADRO 5.5 – REGISTO DA VARIAÇÃO DO ANGULO DO JATO PARA $Re=687$ . ....	36
QUADRO 5.6 – REGISTO DA VARIAÇÃO DO ANGULO DO JATO PARA $Re=367$ . ....	36
QUADRO 5.7 – REGISTO DA VARIAÇÃO DO ANGULO DO JATO PARA $Re=147$ . ....	36
QUADRO 5.8 – REGISTO DA VARIAÇÃO DAS VELOCIDADES PARA UM ÂNGULO $A = 0^\circ$ . ....	38
QUADRO 5.9 – REGISTO DA VARIAÇÃO DAS VELOCIDADES PARA UM ÂNGULO $A = 5^\circ$ . ....	38
QUADRO 5.10 – REGISTO DA VARIAÇÃO DAS VELOCIDADES PARA UM ÂNGULO $A = 10^\circ$ . ....	39
QUADRO 5.11 – REGISTO DA VARIAÇÃO DAS VELOCIDADES PARA UM ÂNGULO $A = 15^\circ$ . ....	39
QUADRO 5.12 – REGISTO DOS VALORES DOS ENSAIOS COM O JATO DESLIGADO. ....	40
QUADRO 5.13 – REGISTO DA VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO JATO 2. ....	41
QUADRO 5.14 – REGISTO DA VARIAÇÃO DAS VELOCIDADES COM A RELAÇÃO $u_0, 5(1 - \text{sen}\alpha)$ PARA UM ÂNGULO $A=0^\circ$ . ....	42
QUADRO 5.15 – REGISTO DA VARIAÇÃO DAS VELOCIDADES COM A RELAÇÃO $u_0, 5(1 - \text{sen}\alpha)$ PARA UM ÂNGULO $A=5^\circ$ . ....	43
QUADRO 5.16 – REGISTO DA VARIAÇÃO DAS VELOCIDADES COM A RELAÇÃO $u_0, 5(1 - \text{sen}\alpha)$ PARA UM ÂNGULO $A=10^\circ$ . ....	43
QUADRO 5.17 – REGISTO DA VARIAÇÃO DAS VELOCIDADES COM A RELAÇÃO $u_0, 5(1 - \text{sen}\alpha)$ PARA UM ÂNGULO $A=15^\circ$ . ....	43
QUADRO 5.18 – REGISTO DA VARIAÇÃO DAS VELOCIDADES COM A RELAÇÃO $u_0, 5(1 - \text{sen}\alpha)$ COM A ALTERAÇÃO DA ESPESSURA DO JATO. ....	43
QUADRO 5.19 – RESULTADO DAS VARIÁVEIS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS. ....	45
QUADRO 5.20 – RESULTADO DAS VARIÁVEIS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS, APENAS NAS VARIÁVEIS A E B	46
QUADRO 5.21 – REGISTO DA VARIAÇÃO DAS VELOCIDADES COM A RELAÇÃO $u_0(1 - \text{sen}\alpha)0, 5$ PARA UM ÂNGULO $A=0^\circ$ . ....	50

QUADRO 5.22 – REGISTO DA VARIAÇÃO DAS VELOCIDADES COM A RELAÇÃO $u_0(1 - \text{sen}\alpha)^{0,5}$ PARA UM ÂNGULO $A=5^\circ$ .....	50
QUADRO 5.23 – REGISTO DA VARIAÇÃO DAS VELOCIDADES COM A RELAÇÃO $u_0(1 - \text{sen}\alpha)^{0,5}$ PARA UM ÂNGULO $A=10^\circ$ .....	50
QUADRO 5.24 – REGISTO DA VARIAÇÃO DAS VELOCIDADES COM A RELAÇÃO $u_0(1 - \text{sen}\alpha)^{0,5}$ PARA A VARIAÇÃO DE ESPESSURAS. ....	51

## Lista de Figuras

FIGURA 3.1: MODELO DE ENSAIO USADO COM ÁGUA SALGADA.....	14
FIGURA 3.2: MODELO DE ENSAIO - AVERMELHO O CIRCUITO DO CONTAMINANTE, A AZUL ESCURO O CIRCUITO DE EXAUSTÃO, A VERDE O CIRCUITO DO JATO, A ROXO A ADMISSÃO DE ÁGUA, DIMENSÕES EM CENTÍMETRO. ....	14
FIGURA 4.1 – EXEMPLO DE VÓRTICES PARA NÚMERO DE REYNOLDS DE 146.....	20
FIGURA 4.2 – REGRESSÃO LINEAR DOS REGISTOS DO TEMPO EM FUNÇÃO DE UM CAUDAL DE EXAUSTÃO.....	20
FIGURA 4.3 – ESTADO DE SOBREDIMENSIONAMENTO BASTANTE ACENTUADO.....	26
FIGURA 4.4 – ESTADO DE SOBREDIMENSIONAMENTO ACENTUADO. ....	26
FIGURA 4.5 – ESTADO DE SOBREDIMENSIONAMENTO QUASE LIMITE. ....	26
FIGURA 4.6 – ESTADO DE SUBDIMENSIONAMENTO BASTANTE ACENTUADO. ....	27
FIGURA 4.7 – ESTADO DE SUBDIMENSIONAMENTO ACENTUADO. ....	27
FIGURA 4.8 – ESTADO DE SUBDIMENSIONAMENTO QUASE LIMITE.....	27
FIGURA 4.9 – ESTADO LIMITE DO CAUDAL DE EXAUSTÃO. ....	28
FIGURA 5.1 – ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA DE ADMISSÃO NA PORTA COM VELOCIDADE DO JATO.....	34
FIGURA 5.2 – REGRESSÃO LINEAR ENTRE A VELOCIDADE DO JATO E A RAIZ QUADRADA DA VELOCIDADE MÉDIA DE ADMISSÃO NA PORTA. .....	34
FIGURA 5.3 – GRÁFICO DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DO JATO .....	36
FIGURA 5.4 – RELAÇÃO ENTRE O SENO DO ÂNGULO DO JATO E A RAIZ QUADRADA DA VELOCIDADE MÉDIA NA ABERTURA NORMALIZADA. ....	37
FIGURA 5.5 – RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE NA ABERTURA E A RAIZ QUADRADA VELOCIDADE DO JATO. ....	39
FIGURA 5.6 – REGRESSÃO LINEAR DA RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DO JATO E A VELOCIDADE NA ABERTURA. ....	40
FIGURA 5.7 – REGRESSÃO LINEAR DA RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DO JATO E A VELOCIDADE NA ABERTURA A PASSAR PELO VALOR DOS ENSAIOS COM O JATO DESLIGADO. ....	41
FIGURA 5.8 – RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DO JATO E A VELOCIDADE MÉDIA NA ABERTURA COM O ACRÉSCIMO DA VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO JATO (15°*). ....	42
FIGURA 5.9 – RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE NA ABERTURA E $u_{0,5}(1 - \text{sen}\alpha)$ PARA DIFERENTES ÂNGULOS DO JATO (15°* VALORES CORRESPONDENTES AO AUMENTO DA ESPESSURA DO JATO).....	44
FIGURA 5.10 – REGRESSÃO LINEAR ENTRE A VELOCIDADE NA ABERTURA E $u_{0,5}(1 - \text{sen}\alpha)$ . ....	44

FIGURA 5.11 – RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE NA ABERTURA E $u_0,470(1,00 - \text{sen}\alpha)1,07$ (15* VALORES CORRESPONDENTES AO AUMENTO DA ESPESSURA DO JATO) .....	45
FIGURA 5.12 – REGRESSÃO LINEAR ENTRE A VELOCIDADE NA ABERTURA E $u_0,470(1,00 - \text{sen}\alpha)1,07$ . ....	46
FIGURA 5.13 – RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE NA ABERTURA E $u_0,5(1,00 - \text{sen}\alpha)$ (15* VALORES CORRESPONDENTES AO AUMENTO DA ESPESSURA DO JATO).....	47
FIGURA 5.14 – REGRESSÃO LINEAR ENTRE A VELOCIDADE NA ABERTURA $u_0,5(1,00 - \text{sen}\alpha)$ . ....	47
FIGURA 5.15 – ESQUEMA DA SUBDIVISÃO DO JATO .....	48
FIGURA 5.16 – REGRESSÃO LINEAR ENTRE A VELOCIDADE NA ABERTURA E $u_0(1 - \text{sen}\alpha)0,5$ . ....	51
FIGURA 5.17 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM UMA EXPRESSÃO TEÓRICA EQM COM D=1 (15* VALORES CORRESPONDENTES AO AUMENTO DA ESPESSURA DO JATO) .....	52
FIGURA 5.18 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM UMA EXPRESSÃO TEÓRICA EQM COM D=7 (15* VALORES CORRESPONDENTES AO AUMENTO DA ESPESSURA DO JATO) .....	52
FIGURA 5.19 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM UMA EXPRESSÃO TEÓRICA ECM COM D=1. ....	54
FIGURA 5.20 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM UMA EXPRESSÃO TEÓRICA ECM COM D=7. ....	54
FIGURA 5.21 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DO AJUSTAMENTO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E AS EQUAÇÕES DO EQM E ECM ADAPTADAS AOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS. ....	55

# Lista de Símbolos

$A_{\text{jato}}$	Área do jato [ $\text{m}^2$ ]
$D_m$	Módulo de deflexão
$e/b_0$	Espessura do bocal do jato [m]
$g$	Aceleração gravítica [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]
$H$	Altura da abertura da porta [m]
$h$	Comprimento da cortina [m]
$l$	Largura do jato [m]
$J$	Quantidade de movimento [ $\text{m}^4/\text{s}^2$ ]
$L$	Largura da abertura da porta [m]
$M_0$	Quantidade de movimento do jato por unidade de largura do jato [ $\text{m}^4/\text{s}^2$ ]
$M$	Caudal mássico [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$Q_a$	Caudal de admissão na abertura da porta [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$Q_e$	Caudal de exaustão [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$\bar{Q}_e$	Média dos caudais de exaustão [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$Q_0/Q_{\text{jato}}$	Caudal do jato [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$Re$	Número de Reynolds
$u_0$	Velocidade média no bocal do jato [m/s]
$u_a$	velocidade média de admissão na abertura da porta [m/s]
$x$	Distância da origem do jato na direção central do jato [m]
$y$	Distância na perpendicular do eixo $x$ e ao desenvolvimento do jato [m]
$\alpha/\alpha_0$	Ângulo do jato [°]
$\alpha_f$	Ângulo de impacto do jato com o solo [°]
$\Delta P$	Diferença de duas pressões [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]
$\eta/v$	Viscosidade dinâmica [ $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ]
$\rho$	Massa volúmica [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 *Motivação e Enquadramento do Tema*

Cortinas de ar são jatos planos de um fluido que são frequentemente usados para separar diferentes zonas ambientais. O objetivo principal de cortinas de ar é reduzir ou controlar a transferência de calor e massa, bem como de reduzir a dispersão de poluentes no ar entre duas zonas. A sua aplicação é útil principalmente quando as barreiras físicas são inaceitáveis. Neste contexto, as cortinas de ar têm sido aplicadas em diversos domínios, tais como AVAC [1][2][3], controlo de fumo em passagens [4][5], controlo de poluentes no ar e controlo biológico [6][7][8].

Os jatos de ar introduzem uma perturbação entre o fluxo de ar do próprio jato e o ar ambiente estagnado, que promove um arrastamento de ar. Em jatos com grandes velocidades o caudal de arrastamento pode ser bastante elevado. O caudal arrastado de ambos os lados sofre uma mistura turbulenta no jato. Este comportamento promove o transporte de caudal de ar de ambos os lados para o jato (compartimento limpo e contaminado) e sua mistura; a dispersão do jato quando atinge a superfície oposta provoca um fluxo do compartimento contaminado para o compartimento limpo, o que representa a quebra da cortina de ar (perda de contenção dos poluentes). Na prática, este fenómeno caracteriza-se pelo número de Reynolds, definido como a relação entre forças inerciais e forças viscosas.

Na aplicação desta tecnologia a fim de preservar o compartimento limpo de poluentes no ar (micro-organismos, bactérias, fungos, partículas), cujo regime é isotérmico, usam-se baixas velocidades no jato. Nas aplicações de cortinas de ar em aberturas de altura da porta, o escoamento é caracterizado por se encontrar num regime de transição. Assim, para evitar a contaminação do jato, teoricamente dever-se-ia minimizar a sua velocidade, para reduzir o caudal arrastado para o jato, mas ainda com velocidade suficientemente elevada de modo a garantir a estanquidade de cortina de ar. No entanto, com velocidades de jatos baixas, quando as pessoas caminham através da porta, o tempo de reconstituição de cortina de ar é mais longo, o que poderá incrementar a dispersão de poluentes através da cortina de ar. Para minimizar esse problema usa-se uma velocidade mais elevada na cortina de ar. Esta estratégia, só por si, revela-se insuficiente para evitar a contaminação do compartimento limpo com o ar contaminado arrastado para a cortina e disperso a partir do ponto de impacto da cortina no piso. Neste estudo será utilizada, de forma inovadora, a exaustão de ar do compartimento

contaminado para eliminar a dispersão promovida pelo jato para o exterior do compartimento contaminado.

## **1.2 Objetivos**

Este estudo enquadra-se no âmbito do projeto *Nanoguard2ar*, cujo objetivo principal é desenvolver, ensaiar, validar e demonstrar um inovador sistema baseado em nano-materiais para assegurar a qualidade do ar interior em edifícios. Para atingir esse objetivo, será aplicado um processo de oxidação para descontaminar o ar extraído do compartimento contaminado, juntamente com as cortinas de ar que garantem a separação relativamente a espaços que devem ser mantidos descontaminados. Assim, o objetivo deste estudo é, recorrendo a um modelo à escala reduzida, caracterizar os jatos que asseguram a estanquidade da cortina de ar em regime isotérmico, garantindo caudais de exaustão compatíveis com o processo de tratamento de ar.

## **1.3 Plano de Trabalhos e Organização da Dissertação**

De forma a facilitar a compreensão desta dissertação e os resultados obtidos, apresenta-se seguidamente o plano de trabalhos e a organização da mesma. Tendo em conta os objetivos apresentados anteriormente, procurou-se saber qual a velocidade mínima média na abertura da porta que, para determinadas características do jato, assegura a proteção do compartimento e garante estanquidade a contaminantes em regime isotérmico, para assim ser possível a aplicação da tecnologia de descontaminação que está a ser desenvolvida no projeto *Nanoguard2ar*.

No capítulo 2, é apresentado um resumo sobre a bibliografia existente até ao momento sobre esta temática. No entanto, não foram encontradas quaisquer referências que abordem o objetivo deste trabalho, pelo que se concluiu que esta via de investigação é neste momento única e original.

Tal como será descrito no capítulo 3, relativo ao método de ensaio, foram realizados vários ensaios com variação do número de Reynolds, da velocidade e da espessura do jato, tendo em conta que em todos os ensaios foi minimizado o caudal de exaustão, sem que seja visível a ocorrência de fugas através da cortina. Note-se que nestes ensaios o maior erro está associado à avaliação visual da estanquidade.

No capítulo 4, encontram-se os registos dos resultados obtidos após o ajuste do método de ensaio. Em anexo, é apresentado um estudo dos erros associados a esta metodologia de ensaios.

Estes resultados serão discutidos no capítulo 5, começando por se fazer uma análise da influência dos parâmetros na velocidade média de admissão na porta que está protegida pelo jato.

Seguidamente relacionou-se a velocidade média de admissão na porta e a velocidade inicial do jato e por fim comparam-se estes resultados com uma análise teórica.

No capítulo 6, descrevem-se as principais conclusões que respondem ao problema apresentado nos objetivos desta investigação.



## **2 ESTADO DO CONHECIMENTO**

### **2.1 Generalidades**

Neste capítulo, apresenta-se alguns conceitos teóricos sobre cortinas de ar e jatos planos relativamente ao seu comportamento, seguidos de um estudo do conhecimento adquirido das cortinas de ar. São abordados diversos trabalhos disponíveis na literatura de modo a compreender a evolução da investigação sobre cortinas de ar. Por fim, apresenta-se uma secção onde são descritos os modelos à escala reduzida adotados.

### **2.2 Estado do conhecimento das cortinas de ar**

Considerando o caso em estudo no projeto Nanoguard2ar, será dada uma nova aplicação às cortinas de ar, que será, o controlo de microrganismos para uma melhor qualidade do ar. Para isso será feito um estudo inicial de contenção de um contaminante com jatos verticais descendente sem recirculação de ar em ambiente isotérmico.

As cortinas de ar são normalmente compostas por um ou mais jatos de ar, usadas em norma para separar dois ambientes, oferecendo uma resistência ao escoamento de ar que atravessa uma abertura entre esses dois ambientes.

Existem varias aplicações para as cortinas de ar atualmente, entre as quais:

- Controlo de áreas e ambientes climatizados;
- Proteção de portas de acesso a espaços refrigerados;
- Equipamentos expositores refrigerados abertos;
- Redução de perdas de calor pelas portas de fornos industriais;
- Controlo de poeiras e de humidade ambiental;
- Controlo de fluxos de ar em minas;
- Controlo de insetos;

Dependendo da aplicação que se pretende, existem diferentes tipos de cortinas de ar que podem ser usadas, com ou sem recirculação de ar, verticais ascendentes ou descendentes e ainda horizontais.

Nos sistemas em que existe recirculação de ar, após a saída de ar no bocal existe uma grelha no lado oposto a recolher o ar proveniente do bocal, depois de este ser filtrado, aquecido ou arrefecido volta a sair no jato. Já os sistemas sem recirculação de ar (caso em estudo), após a saída do ar no bocal este não volta de imediato ao sistema.

Relativamente aos sistemas horizontais, estes podem ser aplicados em apenas num lado da abertura ou nos dois.

Por fim existem as cortinas verticais, ascendentes ou descendentes. Estas normalmente são aplicadas na parede divisória por cima da porta, quando descendentes (caso em estudo). No caso das ascendentes, o(s) jato(s) é (são) colocado(s) ao nível do solo.

Considerando o caso de jatos verticais descendentes sem recirculação de ar, em condições isotérmicas, que é o caso que está em estudo nesta dissertação, mesmo nesta situação em que não existe diferenças de temperatura entre o interior de um compartimento e o exterior, é criada uma diferença de pressão, dada por:

$$\Delta P_a = \frac{\rho \times b_0 \times U_0^2}{H} \times (\text{sen } \alpha_f - \text{sen } \alpha_0) \quad 2.1$$

onde:

$\rho$  – Massa volúmica do ar;

$\Delta P_a$  – Auto geração de uma diferença de pressão;

$b_0$  – Largura do bocal de descarga;

$U_0$  – Velocidade inicial do jato;

$H$  – Altura da porta;

$\alpha_f$  – Ângulo de impacto do jato com o solo;

$\alpha_0$  – Ângulo inicial do jato.

Devido a esta diferença de pressão, o ângulo de impacto do jato com o chão ( $\alpha_f$ ) altera-se até que o caudal mássico de ar arrastado para fora do compartimento seja igual ao caudal mássico de ar escoado para dentro do compartimento. Considerando que o jato é instalado do lado exterior do compartimento a variação deste ângulo é dada por [9]:

$$\sin \alpha_f = 2,4 \times \sqrt{\frac{b_0}{H}} \times \left(1 - 2,56 \times \frac{b_0}{H}\right) \quad 2.2$$

Em casos não isotérmicos ainda deve ser tida em conta uma diferença de pressão gerada pela diferença de massa volúmica entre os dois ambientes, normalmente designada por “efeito de chaminé” ( $\Delta P_s$ ), expressa por:

$$\Delta P_s = -(\rho_f - \rho_q) \times g \times (Z - Z_0) \quad 2.3$$

Onde:

$\rho_f$  – Massa volúmica do ar, mais frio;

$\rho_q$  – Massa volúmica do ar, mais quente;

$Z_0$  – Distância medida desde o cimo da porta até ao local onde esta diferença de pressão é nula, (para o caso de compartimentos com uma única abertura  $Z_0 \approx H/2$ );

Sendo assim, a soma algébrica destas duas pressões resulta na diferença de pressão real num caso não isotérmico, porém esta não é constante, pelo que a velocidade do jato não pode ser muito baixa por consequência de a cortina de ar se defletir demasiado cedo e se perder o contacto com o chão. Assim a velocidade do jato tem de ser suficientemente alta de modo a que a quantidade de movimento do jato de ar e as forças transversais consigam manter a cortina intacta. Foi assim definido o módulo de deflexão que é o quociente entre estas duas forças, dado por:

$$D_m = \frac{\rho_0 \times b_0 \times U_0^2}{g \times H^2 \times (\rho_f - \rho_q)} \quad 2.4$$

Para garantir a estabilidade da cortina, deve-se garantir um módulo de deflexão mínimo, que na verdade vai depender apenas da velocidade caso se mantenham as condições geométricas ( $b_0$  e  $H$ ), assim a Equação 2.4 passa a tomar a seguinte forma:

$$D_{m,min} = \frac{(\rho_0 \times b_0 \times U_0^2)_{min}}{g \times H^2 \times (\rho_f - \rho_q)} \quad 2.5$$

Através da formulação de Hayes apresentada por Luís P. C. Neto [9], o módulo de flexão pode ser determinado através da seguinte expressão:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_f \neq \alpha_0: D_{m,min} = \frac{-\sin \alpha_f - \sin \alpha_0 + 2 - 2 \times \sqrt{(1 - \sin \alpha_f) \times (1 - \sin \alpha_0)}}{2 \times (\sin \alpha_f - \sin \alpha_0)^2} \\ \alpha_f = \alpha_0: D_{m,min} = \frac{1}{8 \times (1 - \sin \alpha_0)} \end{array} \right. \quad 2.6$$

Sendo que  $\alpha_f$  é obtido através da Equação 2.2.

Existem várias aplicações deste conceito, a fim de evitar a propagação de contaminantes: de salas de cirurgia ([6][10][11][12][13][14][15]), controle do fumo do tabaco [16][17][18], proteção de obras de arte em museus e património cultural [19][20] e vitrines refrigeradas abertas [21][22].

No entanto, não há uma abordagem que vá de encontro ao nosso objetivo. Os estudos sobre a aplicação de cortinas de ar foram baseados em experiências [23][18][24], modelos CFD [20] e modelos semi analíticos [25].

Rydock *et al.* (2000) [18] apresentam um estudo experimental sobre a eficiência da cortina de ar numa zona de restaurante de fumadores. A cortina de ar foi instalada na 0,8 m de altura e um bocal com larguras de 10 mm, 5 mm e 3 mm, com diferentes ângulos de montagem (+ 15°, 0°, -15°) com a vertical, com taxas de fornecimento e extrações de ar diferentes e com várias configurações diferentes de zonas para não-fumador. A eficiência máxima de cortina de ar foi conseguida usando os 100 m<sup>3</sup>/h por metro de cortina de ar e para uma largura do bocal de 5 mm e ângulo de 15° direcionado para a sala de fumadores. Os resultados sugerem a viabilidade da cortina de ar para aumentar a qualidade do ar da zona de não fumadores, evitando praticamente que esta seja contaminada pela zona de fumadores. No entanto, o ambiente livre de fumo não é completamente atingível em uma seção de um compartimento individual. O fluxo de ar na cortina de ar foi alimentado pelo ar contaminado da zona de fumadores. Os autores deste trabalho consideraram que, para garantir a estanquidade ao fumo do tabaco, a cortina de ar tinha de ser alimentada por ar limpo. Tendo a condição:

$$y = \frac{M \times (\cos \alpha - \cos \alpha_0)}{\Delta p} = H \quad 2.7$$

Onde:

y – Distância atingida pelo centro jato;

H – Distância que se pretende atingir com o centro do jato;

M – Quantidade de movimento do fluxo do jato por unidade de comprimento do jato;

$\alpha$  – Ângulo de incidência do jato na distância y e medido com a horizontal (o autor pretende que no seu caso  $\alpha = 0^\circ$ );

$\alpha_0$  – Ângulo do jato medido com a horizontal;

$\Delta p$  – Diferença de pressão.

É de notar que o objetivo dos autores era ter a cortina de ar com a componente da velocidade no contacto com a superfície horizontal, sem que esta perdesse totalmente o contacto.

Shih *et al.* (2010) [13] apresentam um estudo numérico do etanol a dispersar-se numa sala limpa. Os autores analisaram a influência dos parâmetros de cortina de ar, tais como altura de instalação, ângulo e velocidade do jato. A velocidade mínima estudada foi de 3 m/s. A eficiência máxima foi alcançada para o jato de velocidade de 5 m/s e um ângulo de 15°. Foi encontrado neste estudo que a perda de estanquidade da cortina de ar ocorre essencialmente junto ao fundo, quando há um fluxo de separação.

Tal como outros autores foram usados um conjunto de parâmetros físicos fixos e foram testados de forma a ver se existe ou não perda da estanquidade da cortina não havendo a preocupação de encontrar os parâmetros que otimizam a estanquidade da cortina.

Santoli *et al.* (2006) [20] apresentaram um estudo numérico e experimental num edifício histórico, usando o jato de ar com velocidades entre 4 e 5 m/s, para criar uma barreira física para o fluxo. Concluíram que o sistema de ventilação tem eficiências de 70-75%. No entanto, os parâmetros que permitem maximizar a eficiência da cortina de ar não são analisados.

Num bloco operatório, os difusores laminares no local onde se situa a maca de operação, juntamente com as cortinas de ar são frequentemente usados para isolar a área de atuação de contaminantes externos [12]. Cook e Int-Hout (2007) [14] ressaltam que outra maneira de garantir o nível de assepsia dentro do bloco operatório é garantir uma hierarquia de pressão neste espaço correspondente a entre 10 a 15% do volume da sala. De acordo com os autores, a dificuldade para garantir o nível de assepsia é devido à dificuldade em conseguir o fluxo laminar nos painéis devido às altas velocidades indesejáveis que, por arrastamento do ar e devido ao gradiente de pressão gerado pela diferença de temperatura, aumentam a intensidade de turbulência na sala. No entanto, os estudos não são conclusivos sobre a velocidade que deve ser usada para ser alcançado um determinado nível de assepsia, pois não indicam a velocidade ideal, apenas se faz referência que velocidades baixas serão mais eficientes [12].

Zhai *et al.* (2013) [10] apresentam um estudo numérico e experimental, onde concluíram que não há nenhuma correlação entre o difusor do fluxo laminar, o caudal de cortina de ar e a concentração do contaminante. Verificou-se que é melhor usar difusores unidirecionais em vez de usar as cortinas de ar com velocidades jato elevado. No entanto, ele não mostra a relação entre a taxas de entrada pela cortina e saída da sala.

J.C. Viegas (2016) [4], apresenta um estudo analítico, experimental com água salgada e uma versão de escala real para o uso de cortinas de ar numa passagem em situação de incêndio. Foram usadas espessuras do bocal de 0,00125 m, 0,00250 m, 0,00500 m e 0,00750 m, ângulos de 25°, 30° e 35°, velocidade entre [0,142-1,000] m/s, com diferenças de massa volúmica entre o exterior e o fumo a rondar os 55 kg/m<sup>3</sup> que de acordo com o número de Froude corresponde a uma diferença de temperatura 372 K à escala real. Tendo sido o único autor que tentar minimizar o caudal de exaustão de modo a manter a estanquidade da cortina de ar. Os resultados mostram que é viável o uso de cortinas de ar para estas situações e que existe uma dependência entre o caudal de exaustão e a velocidade inicial da cortina. Ainda obteve uma expressão através dos seus resultados experimentais que relaciona a velocidade mínima do jato de modo a garantir a estanquidade da cortina:

$$u_0 = \sqrt{\frac{0,0195 \times g \times h^2 \times (\rho_0 - \rho_1)}{\rho_0 \times b_0 \times (\sin \alpha_0 + A^{*2})}} \quad 2.8$$

$u_0$  – Velocidade média no bocal do jato;

$g$  – Aceleração gravítica;

$A^*$  - Constante de depende da geometria das condições iniciais do problema;

$\alpha$  – Ângulo do jato;

$\rho$  – Massa volúmica da água (índice 0 para inicial e 1 para água salgada (fumo));

$h$  – Comprimento da cortina.

Embora neste trabalho se pretenda analisar a cortina num sistema isotérmico, este modelo de ensaio, também vai ser realizado com água salgada por forma a poder dar continuidade a desenvolvimentos futuros e comparação de resultados.

Nos trabalhos anteriormente mencionados verifica-se que não há nenhuma correlação clara entre o caudal de entrada (caudal que entra na abertura na porta) e a velocidade no bocal do jato que garanta a máxima eficácia de cortinas de ar e do nível de assepsia, em casos isotérmicos ou de diferenças de temperaturas baixas. As velocidades que normalmente são avaliadas nestes trabalhos são bastante elevadas e por sua vez os números de Reynolds adotados são mais elevados que nesta investigação, pois não existe a preocupação de diminuir o caudal de exaustão de modo a aumentar a eficiência da cortina, mas sim apenas de garantir a estanquidade da cortina e os níveis de assepsia.

Neste trabalho considerou-se de extrema importância avaliar o balanço entre a velocidade média na abertura da porta e as características do jato, de modo a aumentar a eficiência da cortina de ar e assim poder aplicar-se ao sistema de *Nanoguard2ar*. Também serão usadas velocidades bastante baixas até um máximo de 1,70 m/s. Os objetivos deste trabalho serão obtidos tanto por análise de resultados experimentais como por avaliação das formulações analíticas.

### 2.3 Jatos Planos

Os jatos planos, neste contexto são abordados de duas formas, laminares e turbulentos, sendo que os casos de regime de transição são abordados da mesma forma que os turbulentos. Sendo assim, foi necessário caracterizar os jatos quanto ao seu caudal de arrastamento e velocidade média do jato [26].

- Jatos laminares:

A especificação da velocidade do jato em regime laminar é feita com recurso à velocidade na linha central do jato ( $u_m$ ), que depende apenas da distância da origem do jato na direção da linha

central do jato ( $x$ ), e à variação da velocidade em torno de  $u_m$ , dependendo esta de duas variáveis  $x$  e  $y$ , em que  $y$  é a distância na perpendicular do eixo  $x$  e ao desenvolvimento do jato. A conjugação da velocidade  $u_m$  com a sua variação permite especificar o campo de velocidade  $u(x, y)$ . O caudal de arrastamento ( $Q_{\text{arrastamento}}$ ) também é expresso em função da variável  $x$ , devendo este ser multiplicado pela largura do jato plano. Estas expressões tomam a seguinte forma:

$$u_m = 0,4543 \times \left( \frac{M_0^2}{v \times x} \right)^{\frac{1}{3}} \quad 2.9$$

$$u(x, y) = u_m \times (1 - \tanh^2 \xi) = 0,4543 \times \left( \frac{M_0^2}{v \times x} \right)^{\frac{1}{3}} \times (1 - \tanh^2 \xi) \quad 2.10$$

$$Q_{\text{arrastamento}} = 3,3019 \times (M_0 \times v \times x)^{\frac{1}{3}}; \text{ por unidade de comprimento do jato} \quad 2.11$$

Em que:

$$\xi = 0,2752 \times \left( \frac{M_0^2}{v^2} \right)^{\frac{1}{3}} \times \frac{y}{x^{\frac{2}{3}}}$$

$$M_0 = \int_{-\infty}^{\infty} u^2 dy = \text{constante}$$

- Jatos turbulentos:

No caso do regime turbulento, as expressões são mais simples e podem facilmente ser expressas em apenas em duas equações simples. Começando pela velocidade.

$$u_m = 3,4 \times \left( \frac{b_0}{2 \times x} \right)^{\frac{1}{2}} \times u_0 \quad 2.12$$

$$u(x, y) = u_m \times e^{-57 \times \left( \frac{y}{x} \right)^2} = 3,4 \times \left( \frac{b_0}{2 \times x} \right)^{\frac{1}{2}} \times u_0 \times e^{-57 \times \left( \frac{y}{x} \right)^2} \quad 2.13$$

$$Q_{\text{arrastamento}} = 0,44 \times \left( \frac{2 \times x}{b_0} \right)^{\frac{1}{2}} \times Q_0 \quad 2.14$$

As variáveis apresentadas em ambos os regimes representam:

$M_0$  – Quantidade de movimento do jato por unidade de largura do jato;

$v$  – Viscosidade cinemática;

$x$  – Distância da origem do jato na direção da linha central do jato;

$y$  – Distância na perpendicular do eixo  $x$  e ao desenvolvimento do jato;

$b_0$  – Espessura do bocal do jato;

$Q_0$  – Caudal do jato.

## 2.4 Simulação em escala reduzida

Nesta dissertação são abordados dois modelos a escala reduzida, um que corresponde a um modelo de água com sal e outro apenas com água. Optou-se por realizar estes ensaios à escala reduzida, uma vez que numa fase inicial não é economicamente viável fazer este estudo à escala real.

O modelo de água com sal pretende simular diferenças de temperatura e baseia-se no número de Froude (Equação 2.15) para relacionar as diferenças de massa volúmica e assim simular as diferenças de temperatura que ocorrem em escala real. Também é necessário assegurar que o regime do escoamento é o mesmo quer no modelo (escala reduzida), quer no protótipo (escala real). Este modelo foi usado pelo autor J. C. Viegas [4].

$$\frac{u_m}{u_p} = \frac{\sqrt{2 \times g \times l_m \times (\rho - \rho_0)_m / \rho_m}}{\sqrt{2 \times g \times l_p \times (\rho - \rho_0)_p / \rho_p}} \Leftrightarrow (T - T_0)_P = \frac{L}{l} \times \left( 1 - \left( \frac{\rho_0}{\rho} \right)_m \right) \times T_{0P} \quad 2.15$$

Em que:

m – Representa o modelo de água salgada;

P – Representa um protótipo à escala real;

L – Diâmetro da fonte de ar quente do protótipo;

l – Diâmetro da fonte de água salgada.

O modelo com água doce pretende simular uma situação isotérmica e é utilizado para a realização de ensaios em escala reduzida com o mesmo Número de Reynolds que ocorre na escala real. Neste caso, a extrapolação para o modelo à escala real é feita apenas pelo número de Reynolds (Equação 4.6), ou seja, ajustando as variáveis, espessura e velocidade do jato do protótipo à escala real de modo a obter o número de Reynolds pretendido.

## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 Objetivo**

O presente método de ensaios destina-se a determinar o caudal de exaustão mínimo necessário para que um determinado compartimento contaminado não tenha fugas através de uma abertura protegida por uma cortina formada pelo jato plano do fluido.

### **3.2 Equipamento usado em ensaio**

Neste trabalho de investigação os ensaios decorreram num tanque de água, de forma a simular o ar. Dentro de um tanque com 120×49×50 cm foi colocado o compartimento em estudo com 40×25×26 cm, onde se encontra uma abertura que simula a porta com dimensões 12,5×12,5 cm aqui é instalado o jato com comprimento 14,56 cm e espessuras de 1,25 mm, 2,50 mm, 3,75 mm e 5,00 mm. Este jato está ligado a uma bomba com um contador que permite calcular o caudal escoado no bocal do jato. Na extremidade oposta à porta existem duas aberturas, uma para a entrada do contaminante (água com corante alimentar), com 1 cm de diâmetro, e outra para a saída do caudal de exaustão, efetuado com o apoio de uma bomba, com o diâmetro de 5 cm. O nível do contaminante é mantido constante de modo a assegurar-se que o seu caudal é constante (ver Figura 3.1 e Figura 3.2).

Inicialmente é ajustada a velocidade do jato, usando para isso a bomba e o contador que está ligado ao jato. As características do jato (velocidade, ângulo e espessura) não devem ser alteradas durante o decorrer do ensaio.

Após o início do ensaio apenas se ajusta o caudal de exaustão aos resultados pretendidos, usando para isso a bomba que está ligado a este. A medição do caudal de exaustão é feita depois de terminado o ensaio usando um recipiente neste caso de 6 L.

Note-se que o modelo e o ensaio estão invertidos, ou seja, a abertura da porta está na parte de cima do compartimento. Isto é necessário, uma vez que está a ser usada água salgada para simular ar quente. Posteriormente as imagens serão rodadas para se ter uma melhor perceção com a realidade.



Figura 3.1: Modelo de ensaio usado com água salgada.

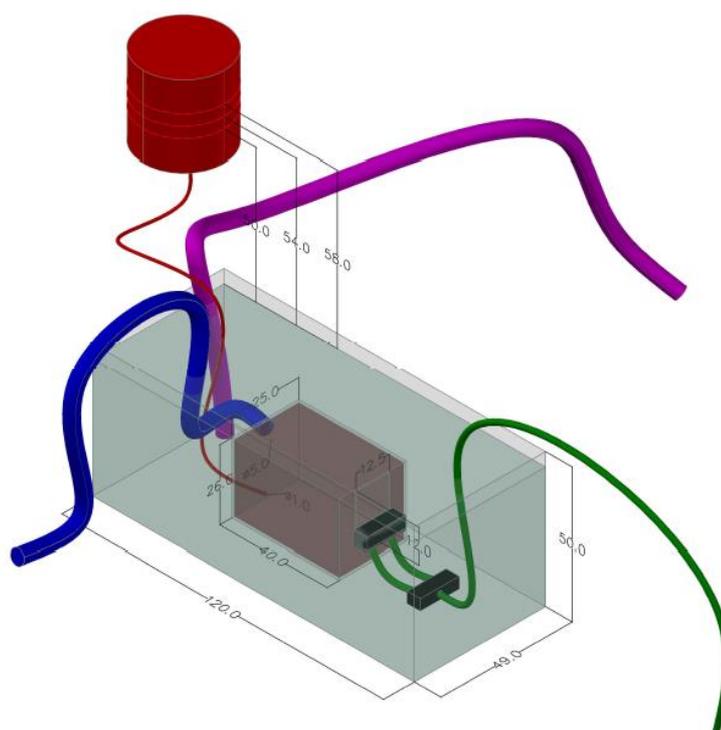


Figura 3.2: Modelo de ensaio - Avermelho o circuito do contaminante, a azul escuro o circuito de exaustão, a verde o circuito do jato, a roxo a admissão de água, dimensões em centímetro.

### 3.3 Dados geométricos do jato

Como referido anteriormente o jato respeita um conjunto de parâmetros geométricos, destes apenas a espessura do jato foi alterada para além dos 4 ângulos usados. Note-se que nos

ensaios de 89 a 91 foi sempre mantido o mesmo ângulo de 15°, fazendo-se varias as espessuras do bocal, enquanto que os ensaios 55 e 56 foram realizados com o jato desligado. No Quadro 3.1 estão apresentadas as características geométricas do bocal e da abertura, no modelo, que é protegido pelo jato.

Quadro 3.1 - Conjunto de valores geométricos do jato.

<i>Ensaio</i>	<i>Espessura do jato (e) [m]</i>	<i>Largura do jato (l) [m]</i>	<i>Secção do jato [m<sup>2</sup>]</i>	<i>Altura da Porta (H) [m]</i>	<i>Largura da Porta (L) [m]</i>
[57-88]; [92-107]	0,00125		0,000182		
89	0,00250	0,1456	0,000364	0,125	0,125
90	0,00375		0,000546		
91	0,00500		0,000728		

### 3.4 Procedimento de ensaio

Este ensaio dividiu-se em 3 partes. A primeira parte diz respeito à medição do caudal de saída do contaminante, a segunda parte refere-se à medição do caudal inicial do jato plano e, por fim, a última parte consistiu na medição do caudal de exaustão, que diz respeito ao ensaio propriamente dito.

Antes de dar início ao ensaio foram tomadas medidas no sentido de garantir uma temperatura de admissão de água constante e igual à temperatura dos recipientes pois este ensaio decorre em condições isotérmicas.

#### 3.4.1 Parte 1:

Este procedimento tem o objetivo a determinação do tempo que um certo caudal de contaminante demora a escoar, de forma a calcular posteriormente e de forma simples, o caudal de saída do contaminante. Assim foi usado o seguinte método:

1. Aplicar um caudal de exaustão;
2. Encher o reservatório do contaminante com 5L de água;
3. Contar o tempo que o reservatório demora a vazar;
4. Repetir o procedimento pelo menos 3 vezes;
5. Criar uma equação da reta de tendência de tempo em função do caudal de exaustão, do tipo  $t = -a(Q_e)+b$ .

### 3.4.2 Parte 2:

Este procedimento tem o objetivo de determinar o caudal e conseqüentemente a velocidade do jato, através do seguinte método:

1. Ajustar uma espessura “e” (1,25 mm, 2,50 mm, 3,75 mm e 5,00 mm) ao jato com um palpa folgas;
2. Encher o tanque até o compartimento estar completamente submerso;
3. Ligar o jato e, com o auxílio de um cronómetro e do contador ligado antes do jato, ajustar ao caudal ou velocidade pretendida;
4. Medir durante aproximadamente 10 minutos (período suficientemente prolongado de modo a minimizar erros de medição);
5. Calcular o caudal jato ( $Q_{\text{jato}}$ ), velocidade jato ( $u_0$ ) e número de Reynolds (Re).

Este procedimento deve ser repetido sempre que se altere uma das seguintes variáveis: espessura do jato, velocidade ou caudal do jato ou número de Reynolds.

### 3.4.3 Parte 3:

Como referido anteriormente esta parte diz respeito ao ensaio propriamente dito e tem como objetivo determinar o caudal de exaustão. Todos os ensaios devem ser gravados, registados e arquivados. Assim foi seguido o seguinte procedimento:

1. Aplicar o ângulo pretendido do jato “ $\alpha$ ” (0°, 5°, 10° e 15°)
2. Encher o tanque com água;
3. Encher o reservatório com o contaminante 58 cm acima do nível da água do tanque;
4. Certificar que as tubagens estão todas ligadas corretamente;
5. Ligar o jato, o caudal de exaustão (superior ao mínimo) e a admissão de água;
6. Começar a filmagem do ensaio;
7. Abrir a válvula do contaminante;
8. Quando o contaminante estiver a 54 cm acima do nível da água, baixar o caudal de exaustão até começar a sair contaminante na porta;
9. Aumentar gradualmente o caudal até parar de sair contaminante pela porta, garantindo assim o caudal mínimo para as características usadas. Neste ensaio o nível de contaminante é mantido constante através da sua realimentação;
10. Determinar o caudal de exaustão, com o auxílio de um recipiente (este caso de 6 L) e de um cronómetro através da medição do tempo de enchimento do recipiente.

### **3.5 Plano de ensaios**

Foi seguido um plano de ensaios em que cada variável selecionada foi alterada à vez. Assim iniciaram-se os ensaios com um Número Reynolds relativamente elevado no que diz respeito a este tipo de aplicação, com o valor de 2125, 1710 e 1224, e uma espessura de 1,25mm, para os ângulos em estudo (X, Y e Z, respetivamente). Seguidamente foi sendo reduzida a velocidade do jato de forma a serem obtidos valores de Número de Reynolds mais baixos, 687, 367 e 147, respetivamente.

Após estes ensaios foi necessário fazer variar a espessura inicial do jato, para os seguintes valores 2,50 mm, 3,75 mm e 5,00 m. Nesta variação foi mantido o Número de Reynolds de 367, pelo que a velocidade do jato foi sendo reduzida.

Também foram realizados dois ensaios suplementares, um com o jato desligado em condições isotérmicas com o mesmo método descrito anteriormente e um outro que simula uma diferença de temperatura, à semelhança do que existe na realidade, com e sem jato, mimetizando o método de ensaios utilizado pelo autor J. C. Viegas[4].

### **3.6 Ajustamento do Método de Ensaio**

Depois de decorridos alguns ensaios de teste, verificou-se que os caudais de exaustão eram afetados por algumas características tais como:

- Concentração de corante usado para a contaminação;
- Altura da superfície livre do recipiente do contaminante;

Assim foi necessário aumentar a concentração do contaminante até se conseguir visualizar inequivocamente as fugas de corante e os caudais de exaustão se manterem constantes. Para isso foram testadas as concentrações de corante de 7 mL/5 L, 14 mL/5 L, 28 mL/5 L, 56 mL/5 L, 112 mL/5 L, 150 mL/5 L. As concentrações 112 mL/5 L e 150mL /5 L deram resultados de caudais de exaustão aproximadamente iguais. Com estes resultados, optou-se pela concentração de 112 mL/5 L para se prosseguir com os ensaios.

Em relação à altura da superfície livre do recipiente do contaminante, a solução foi mais simples. Controlou-se a altura de início de ensaio, início do controlo do caudal de exaustão e fim de ensaio, procedendo-se à realimentação de contaminante de modo a manter o seu nível aproximadamente constante durante todo o ensaio.



## **4 RESULTADOS**

### ***4.1 Generalidades***

Este capítulo inicia-se com uma breve introdução aos regimes dos jatos planos. Posteriormente apresentam-se os registos dos ensaios, pela mesma ordem apresentada no capítulo da metodologia. É ainda apresentado um resumo dos resultados de modo a obter-se uma melhor apreciação global dos mesmos.

### ***4.2 Regimes dos Jatos Planos***

Existem três tipos de regimes em jatos planos submersos, nomeadamente, laminar, transição e turbulento. Estes são regidos pelo número de Reynolds que é utilizado como indicador do regime de escoamento. Assim, em jatos planos, o regime é completamente laminar para números de Reynolds inferiores a 30. O regime de escoamento, mantêm um comportamento próximo do laminar para números de Reynolds superiores a 30, até 1000, quando assume um comportamento próximo do turbulento. Por fim, o regime apresenta-se completamente turbulento para números de Reynolds superiores a 3000 [26]. Uma vez que neste trabalho são caracterizados jatos com números de Reynolds entre 146-2125, os regimes de escoamento associados correspondem à transição e serão tratados como turbulentos. A Figura 4.1 apresenta a título de exemplo os vórtices turbulentos observados num ensaio efetuado para o número de Reynolds de 146.

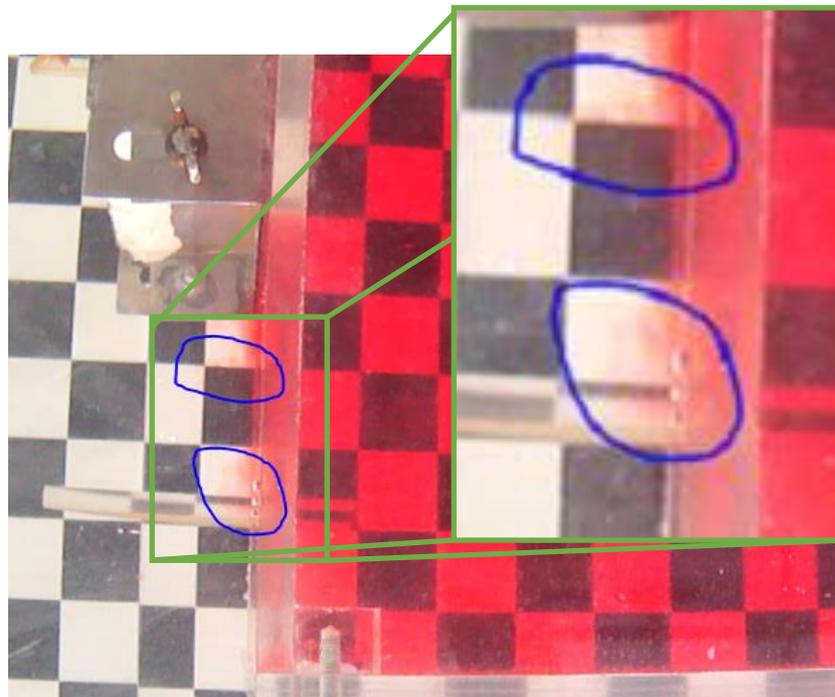


Figura 4.1 – Exemplo de vórtices para número de Reynolds de 146.

### 4.3 Caudal do contaminante (parte 1)

Relativamente à parte 1 do procedimento de ensaio indicado na secção 3.4.1, verificou-se que o caudal de exaustão influencia o caudal de contaminante escoado para o compartimento. Pela medição do caudal do contaminante chegou-se a uma expressão que indica o tempo de vazamento do depósito de 5 L em função do caudal de exaustão como mostra a Figura 4.2.

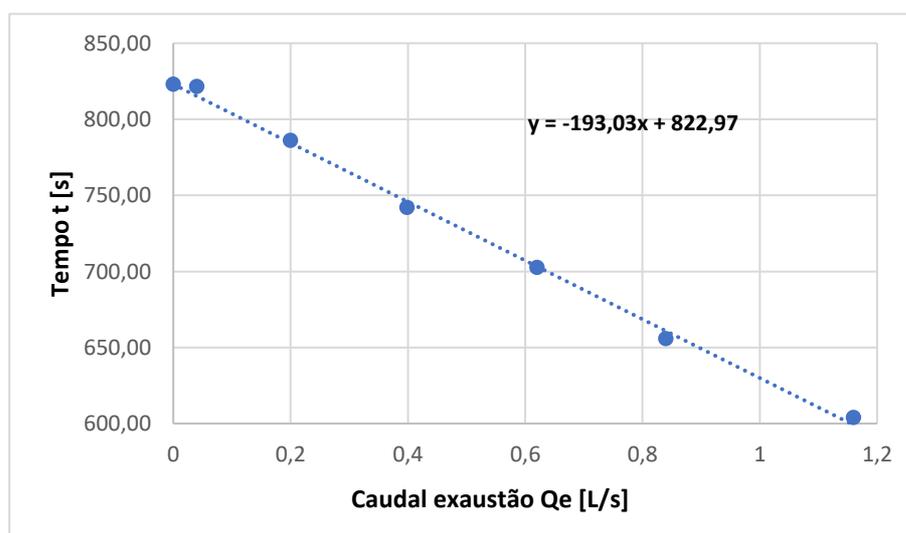


Figura 4.2 – Regressão linear dos registos do tempo em função de um caudal de exaustão.

$$t = -193,03 \times Q_e + 822,97; [s]$$

4.1

No Quadro 4.1 a Quadro 4.3, encontram-se os valores obtidos de tempo de vazamento do depósito calculados com a Equação 4.1 e com os caudais de exaustão obtidos mais à frente na parte 3, assim foi possível determinar os caudais do contaminante de forma expedita sem interferir com os ensaios.

**Quadro 4.1 – Valores de caudais obtidos do contaminante com jato desligado.**

Ensaio	Tempo	Caudal	Caudal	Corante
	[sec]	[L/s]	[m <sup>3</sup> /s]	[mL/5L]
55	815	0,0061	6,14E-06	112
56	813	0,0062	6,15E-06	

Quadro 4.2 – Valores de caudais obtidos do contaminante com jato ligado parte 1.

<b>Ensaio</b>	<b>Tempo</b>	<b>Caudal</b>	<b>Re</b>
	<b>[sec]</b>	<b>[L/s]</b>	
<b>57</b>	758	0,0066	367
<b>58</b>	759	0,0066	
<b>59</b>	742	0,0067	
<b>60</b>	739	0,0068	
<b>61</b>	730	0,0069	
<b>62</b>	728	0,0069	
<b>63</b>	712	0,0070	
<b>64</b>	719	0,0070	
<b>65</b>	705	0,0071	687
<b>66</b>	713	0,0070	
<b>67</b>	702	0,0071	
<b>68</b>	695	0,0072	
<b>69</b>	691	0,0072	
<b>70</b>	687	0,0073	
<b>108</b>	683	0,0073	
<b>109</b>	680	0,0073	
<b>73</b>	615	0,0081	1710
<b>74</b>	615	0,0081	
<b>75</b>	615	0,0081	
<b>76</b>	615	0,0081	
<b>77</b>	615	0,0081	
<b>78</b>	613	0,0082	
<b>79</b>	613	0,0082	
<b>80</b>	615	0,0081	
<b>81</b>	738	0,0068	146
<b>82</b>	746	0,0067	
<b>83</b>	754	0,0066	
<b>84</b>	760	0,0066	
<b>85</b>	773	0,0065	
<b>86</b>	776	0,0064	
<b>87</b>	784	0,0064	
<b>88</b>	785	0,0064	

Quadro 4.3 – Valores de caudais obtidos do contaminante com jato ligado parte 2.

Ensaio	Tempo [sec]	Caudal [L/s]	Re
89	778	0,0064	367
90	782	0,0064	
91	786	0,0064	
92	598	0,0084	2125
93	580	0,0086	
94	593	0,0084	
95	586	0,0085	
96	595	0,0084	
97	586	0,0085	
98	587	0,0085	
99	593	0,0084	
100	660	0,0076	1224
101	661	0,0076	
102	664	0,0075	
103	666	0,0075	
104	669	0,0075	
105	669	0,0075	
106	685	0,0073	
107	693	0,0072	

#### 4.4 Velocidade e caudal do jato (parte 2)

Tal como referido na ficha de ensaio da secção 3.4 parte 2, é necessário ajustar o jato e determinar o seu caudal e a sua velocidade. Foram realizados dois ensaios para cada ângulo e velocidade do jato, posteriormente foi calculada a média de destes dois ensaios de forma a resumir os dados e reduzir o erro associado. Nos Quadro 4.4 e Quadro 4.5 estão apresentados os resultados da medição dos caudais e velocidades do jato, calculados através da Equação 4.2 e Equação 4.3:

$$Q_{jato} = \frac{\text{Volume de água[L]}}{\text{Tempo[s]}}; [L/s] \quad 4.2$$

$$u_0 = \frac{Q_{jato}[m^3/s]}{A_{jato}[m^2]}; [m/s] \quad 4.3$$

Quadro 4.4 - Caudais e velocidades do jato ensaiados parte 1.

<b>Ensaio</b>	<b>Início da contagem</b>	<b>Fim da contagem</b>	<b>Tempo da contagem</b>	<b>Volume de água</b>	<b>Caudal Jato</b>	<b><math>U_0</math></b>	<b>Ângulo</b>
	[L]	[L]	[sec]	[L]	[L/s]	[m/s]	[°]
57							15
58							15
59							10
60							10
61	814	846	597,58	32	0,054	0,29	5
62							5
63							0
64							0
65							15
66							15
67							10
68	469	506	369,05	37			10
69					0,100	0,55	5
70							5
108							0
109	46	100	538,6	54			0
73							0
74							0
75							5
76							5
77	325	420	380,5	95	0,250	1,37	10
78							10
79							15
80							15
81							0
82							0
83							5
84							5
85	509	525	752,88	16	0,021	0,12	10
86							10
87							15
88							15

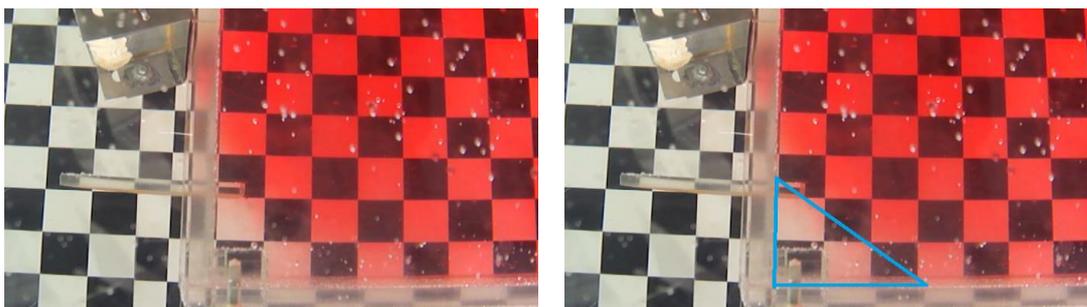
Quadro 4.5 – Caudais e velocidades do jato ensaiados parte 2.

<i>Ensaio</i>	<i>Início da contagem</i>	<i>Fim da contagem</i>	<i>Tempo da contagem</i>	<i>Volume de água</i>	<i>Caudal Jato</i>	$U_0$	<i>Ângulo</i>
	[L]	[L]	[sec]	[L]	[L/s]	[m/s]	[°]
89	680	715	652,93	35	0,054	0,15	15
90	680	715	652,93	35	0,054	0,10	15
91	680	715	652,93	35	0,054	0,07	15
92							0
93							0
94							5
95							5
96	610	820	676,77	210	0,310	1,70	10
97							10
98							15
99							15
100							0
101							0
102							5
103							5
104	12	220	1163,99	208	0,179	0,98	10
105							10
106							15
107							15

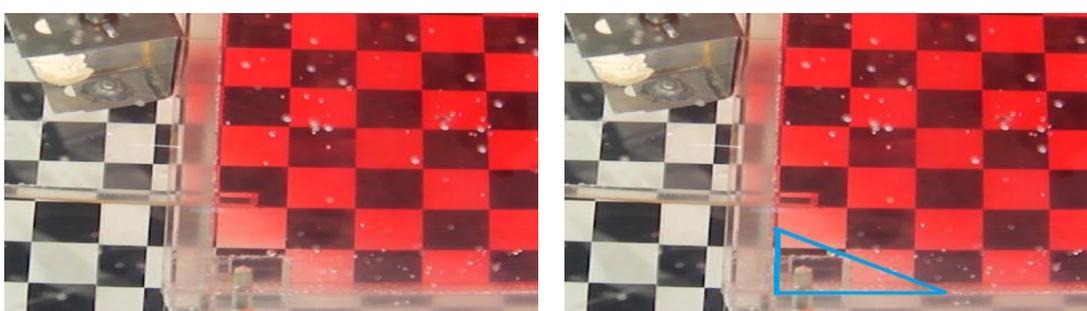
#### 4.5 Caudais de exaustão (parte 3)

Durante esta parte do ensaio tem-se de ter em conta que o olho humano não é um instrumento de precisão, pelo que é necessário criar critérios que indiquem se o caudal de exaustão está num estado limite mínimo para que não exista perda de estanquidade da cortina. Sendo assim consideram-se os seguintes casos: estado limite (pretendido), subdimensionado (caudal demasiado baixo) e sobredimensionado (caudal demasiado elevado).

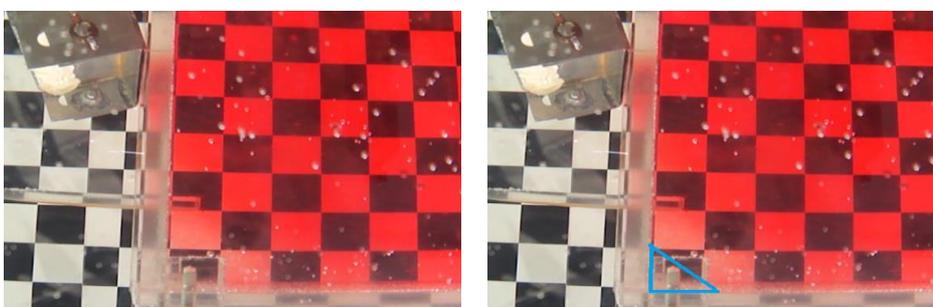
Relativamente ao sobredimensionamento, da Figura 4.3 à Figura 4.5 é possível ver uma cunha do lado de dentro do compartimento que demonstra um elevado caudal de exaustão. À medida que se diminui o caudal de exaustão o tamanho desta cunha vai diminuindo.



**Figura 4.3 – Estado de sobredimensionamento bastante acentuado.**



**Figura 4.4 – Estado de sobredimensionamento acentuado.**



**Figura 4.5 – Estado de sobredimensionamento quase limite.**

Da mesma forma pode-se deparar com a situação em que o caudal de exaustão é tão baixo que a cortina perde a estanquidade (casos de subdimensionamento), sendo as fugas tanto maiores quanto mais baixo forem os caudais de exaustão (Figura 4.6 à Figura 4.8).

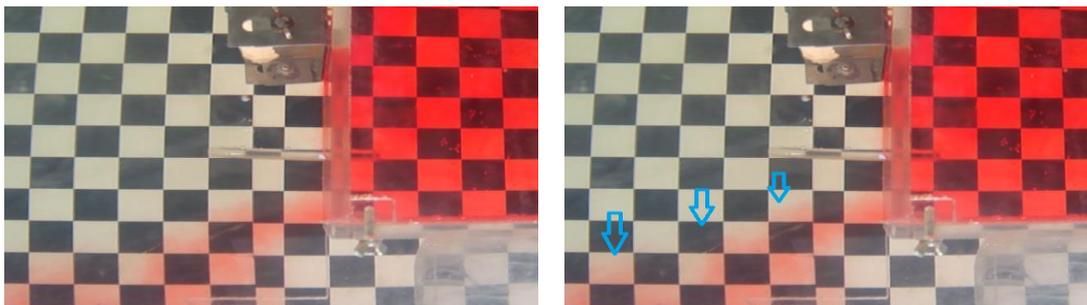


Figura 4.6 – Estado de subdimensionamento bastante acentuado.

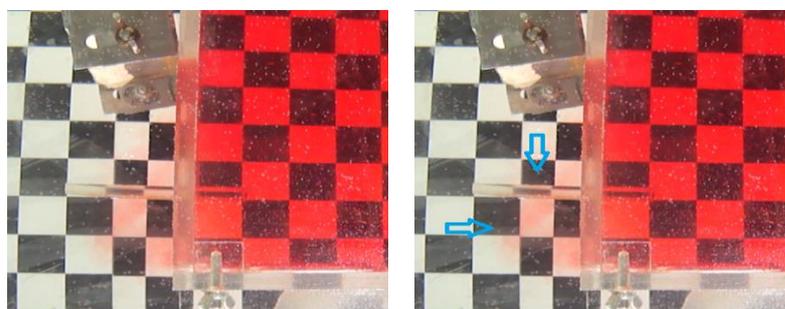


Figura 4.7 – Estado de subdimensionamento acentuado.

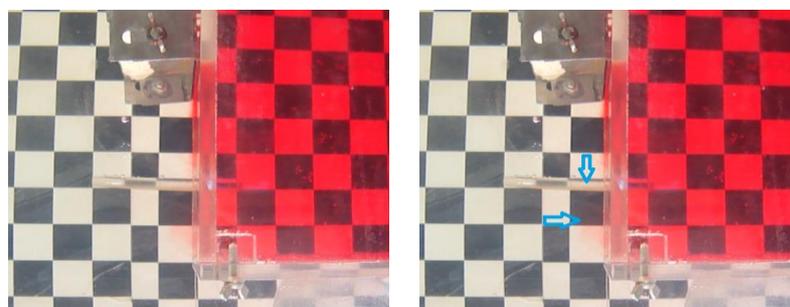
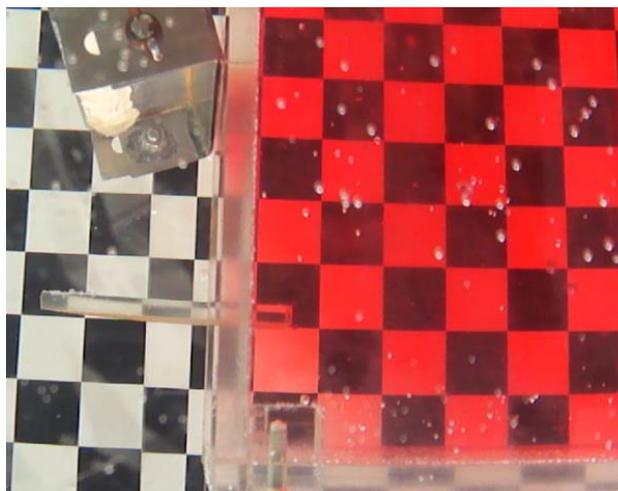


Figura 4.8 – Estado de subdimensionamento quase limite.

Por fim temos o estado limite apresentado na Figura 4.9. Foram sentidas grandes dificuldades para definir um critério em não se esteja no caso de subdimensionamento quase limite. Situação na qual existem vórtices que parecem ser novamente capturados pelo efeito de arrastamento do jato, no entanto podem levar sempre a perdas devido à turbulência do escoamento. Por outro lado, também é difícil saber até que ponto se está numa situação de sobredimensionamento quase limite e

no estado limite, note-se que ambos parecem ter o mesmo efeito visual, no entanto a diferença do caudal de exaustão ainda é considerável.



**Figura 4.9 – Estado Limite do caudal de exaustão.**

Considerando estes casos apresentados e tal como referido no capítulo anterior, durante o ensaio deve-se passar de um estado sobredimensionado para um estado subdimensionado e por fim, deve-se aumentar o caudal de exaustão lenta e consecutivamente, até que se deixe de ver possíveis fugas causadas pelos vórtices.

Após o ensaio foram registados os tempos de enchimento de um recipiente de volume conhecido e calculado o caudal de exaustão fazendo uma média dos tempos registados através da Equação 4.4 estes valores encontram-se no Quadro 4.6 e Quadro 4.7. Note-se que a este caudal ainda deve ser deduzido o caudal do contaminante de modo a ser considerado apenas o caudal que realmente atravessa a abertura protegida pelo jato.

Quadro 4.6 – Registo dos tempos e caudais de exaustão parte1.

Ensaio	Volume de água [L]	Tempo 1 [sec]	Tempo 2 [sec]	Tempo 3 [sec]	Tempo 4 [sec]	Tempo 5 [sec]	Caudal médio [L/s]	
57	6	17,67	17,78	17,79	17,68	17,75	0,34	
58		18,23	18,18	18,32	18,27	18,21	0,33	
59		14,30	14,42	14,21	14,25	14,26	0,42	
60		14,24	13,46	13,73	13,84	13,79	0,43	
61		12,39	12,48	12,37	12,46	12,43	0,48	
62		12,31	12,17	12,13	12,17	12,15	0,49	
63		10,37	10,38	10,42	10,45	10,33	0,58	
64		11,17	11,23	11,26	11,10	11,07	0,54	
65		9,87	9,92	9,77	9,61	9,85	0,61	
66		10,74	10,53	10,66	10,32	10,45	0,57	
67	6	9,67	9,53	9,54	9,60	9,69	0,62	
68		8,97	9,16	9,06	9,12	9,01	0,66	
69		8,89	8,72	8,83	8,74	8,79	0,68	
70		8,55	8,53	8,49	8,52	8,55	0,70	
108		8,21	8,27	8,26	8,26	8,25	0,73	
109		8,10	8,11	8,15	8,11	8,12	0,74	
73		6	5,46	5,49	5,67	5,58	5,64	1,08
74			5,53	5,61	5,69	5,41	5,61	1,08
75			5,57	5,58	5,67	5,43	5,55	1,08
76			5,65	5,43	5,48	5,64	5,64	1,08
77	5,50		5,52	5,64	5,71	5,45	1,08	
78	5,41		5,54	5,55	5,68	5,43	1,09	
79	5,44		5,49	5,50	5,58	5,61	1,09	
80	5,51		5,56	5,63	5,48	5,67	1,08	
81	6		13,65	13,50	13,64	13,59	13,55	0,44
82			14,96	14,85	15,06	14,92	14,98	0,40
83		16,92	16,86	16,93	16,87	16,88	0,36	
84		18,40	18,36	18,37	18,32	18,35	0,33	
85		22,89	22,95	23,08	22,99	23,03	0,26	
86		24,75	24,52	24,58	24,45	24,49	0,24	
87		29,55	29,60	29,59	29,53	29,61	0,20	
88		30,84	30,72	30,86	30,75	30,81	0,19	

Quadro 4.7 – Registo dos tempos e caudais de exaustão parte 2.

Ensaio	Volume de água [L]	Tempo 1 [sec]	Tempo 2 [sec]	Tempo 3 [sec]	Tempo 4 [sec]	Tempo 5 [sec]	Caudal médio [L/s]
89	6	25,55	25,59	25,43	25,51	25,56	0,24
90	6	28,54	28,56	28,60	28,49	28,51	0,21
91	6	31,14	30,98	31,10	31,20	31,02	0,19
92	6	5,23	5,09	5,15	4,97	5,26	1,17
93	6	4,86	4,8	4,75	4,75	4,68	1,26
94	6	5,03	5,16	4,92	5,07	4,99	1,19
95	6	4,71	4,96	4,84	4,93	5,01	1,23
96	6	5,02	5,16	5,08	4,98	5,13	1,18
97	6	4,75	4,81	5,01	4,95	4,87	1,23
98	6	4,92	4,95	4,83	4,97	4,87	1,22
99	6	5,16	4,86	5,09	5,11	4,92	1,19
100	6	7,12	7,11	7,05	7,09	7,07	0,85
101	6	7,12	7,08	7,14	7,19	7,12	0,84
102	6	7,3	7,36	7,29	7,25	7,32	0,82
103	6	7,47	7,42	7,3	7,36	7,33	0,81
104	6	7,59	7,46	7,48	7,55	7,54	0,80
105	6	7,57	7,52	7,59	7,49	7,49	0,80
106	6	8,46	8,43	8,44	8,39	8,4	0,71
107	6	8,93	8,87	8,89	8,9	8,85	0,68

$$\bar{Q}_e = \frac{\text{Volume de água[L]}}{\frac{\sum_{i=1}^5 t_i[s]}{5}}; [L/s] \quad 4.4$$

#### 4.6 Resumo dos resultados experimentais

Nos Quadro 4.8 e Quadro 4.9, estão apresentados os registos dos resultados experimentais. Tal como referido anteriormente, ao caudal de exaustão foi deduzido o caudal do contaminante, obtendo-se o caudal que atravessa a porta ( $Q_a$ ), (ver Equação 4.5). Também foi calculado o número de Reynolds através da Equação 4.6.

Quadro 4.8 – Registo dos dados com espessura do jato 0,00125m e com o jato desligado

Espessura do Jato (e= 0,00125m)			
Velocidade do Jato ( $u_0$ ) [m/s]	Ângulo do jato ( $\alpha$ ) [°]	$Q_a$ [L/s]	Re
1,70	0	1,20	2125
	5	1,20	
	10	1,20	
	15	1,20	
1,37	0	1,07	1710
	5	1,07	
	10	1,07	
	15	1,07	
0,98	0	0,84	1224
	5	0,81	
	10	0,79	
	15	0,69	
0,55	0	0,73	687
	5	0,69	
	10	0,64	
	15	0,58	
0,29	0	0,55	367
	5	0,48	
	10	0,42	
	15	0,33	
0,12	0	0,41	146
	5	0,33	
	10	0,25	
	15	0,19	
0,00	-	0,04	-

$$Q_e = Q_c + Q_a \Leftrightarrow Q_a = Q_e - Q_c \quad 4.5$$

$$Re = \frac{\rho \times u_0 \times e}{\eta} \quad 4.6$$

Em que:

$Q_e$  – Caudal de exaustão;

$Q_c$  – Caudal do contaminante;

$Q_a$  – Caudal de admissão na abertura na porta;

Re – Número de Reynolds;

$\eta$  – Viscosidade dinâmica da água à temperatura medida em cada ensaio [kg/ (m.s)];

$\rho$  – Massa volúmica da água [Kg/m<sup>3</sup>];

$u_0$  – Velocidade média no bocal do jato [m/s];

$e$  – Espessura do bocal do jato [m].

No Quadro 4.9, são apresentados resultados experimentais relativos às mesmas variáveis, mas desta vez para as diferentes espessuras do bocal do jato. Note-se que estes ensaios foram realizados mantendo inalterado o Número de Reynolds  $e$ , conseqüentemente, o caudal em todos os ensaios é igual.

**Quadro 4.9 – Registo dos resultados experimentais com variação da espessura do jato.**

Velocidade do Jato ( $u_0$ ) [m/s]	Ângulo do jato ( $\alpha$ ) [°]	$Q_a$ [L/s]	Re	Espessura do Jato ( $e$ ) [m]
0,29	15	0,33	367	0,00125
0,15	15	0,23	367	0,00250
0,10	15	0,20	367	0,00375
0,07	15	0,19	367	0,00500

Por fim são apresentados os resultados dos ensaios experimentais com água salgada. Para estes ensaios foi usado um  $\alpha = 15^\circ$ , uma velocidade inicial do jato de 0,29 m/s,  $e = 0,00125\text{m}$  e número de Reynolds 367, adicionalmente fez-se também um ensaio com o jato desligado.

**Quadro 4.10 – Registo dos resultados experimentais com água salgada.**

Espessura do Jato ( $e = 0,00125\text{m}$ )			
Velocidade do Jato ( $u_0$ ) [m/s]	Ângulo do jato ( $\alpha$ ) [°]	$Q_e$ [L/s]	Re
0,29	15	0,57	367
0,00	-	0,70	-

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 Generalidades

Neste capítulo serão analisados os resultados experimentais, começando pela avaliação da influência de algumas variáveis (espessura e ângulos do jato) sobre esses resultados. De seguida tentar-se-á obter uma relação entre velocidade média de admissão na abertura da porta e a velocidade inicial do jato usando apenas os resultados experimentais. Também se vai tentar chegar a aproximações das expressões teóricas aos resultados obtidos. Por fim será feita uma comparação dos métodos usados.

### 5.2 Análise da influência da espessura do jato na velocidade média de admissão na porta

No primeiro conjunto de dados prende-se analisar a influência da espessura do bocal do jato na velocidade média de admissão na abertura. Assim foi necessário calcular a velocidade média de admissão na abertura através da Equação 5.1. No Quadro 5.1, apresenta-se os resultados das variáveis em estudo nesta análise.

Quadro 5.1 – Registo da variação da espessura do jato 1.

Velocidade do Jato ( $u_0$ ) [m/s]	Ângulo do jato ( $\alpha$ ) [°]	$Q_a$ [L/s]	$u_a$ [m/s]	Re	Espessura do Jato ( $e$ ) [m]
0,29	15	0,33	0,021	367	0,00125
0,15	15	0,23	0,015	367	0,00250
0,10	15	0,20	0,013	367	0,00375
0,07	15	0,19	0,012	367	0,00500

$$u_a = \frac{Q_a}{H \times L} \text{ [m/s]} \quad 5.1$$

No gráfico seguinte (Figura 5.1), apresenta-se a relação entre a velocidade inicial do jato e a velocidade média de admissão na porta. É também apresentado o resultado da análise da sua tendência por regressão linear. Pela Equação 4.6, note-se que, pelo facto de se aumentar a espessura do bocal do jato e de modo ao número de Reynolds ser mantido constante, é necessário reduzir a velocidade do jato, como se pode observar no Quadro 5.1.

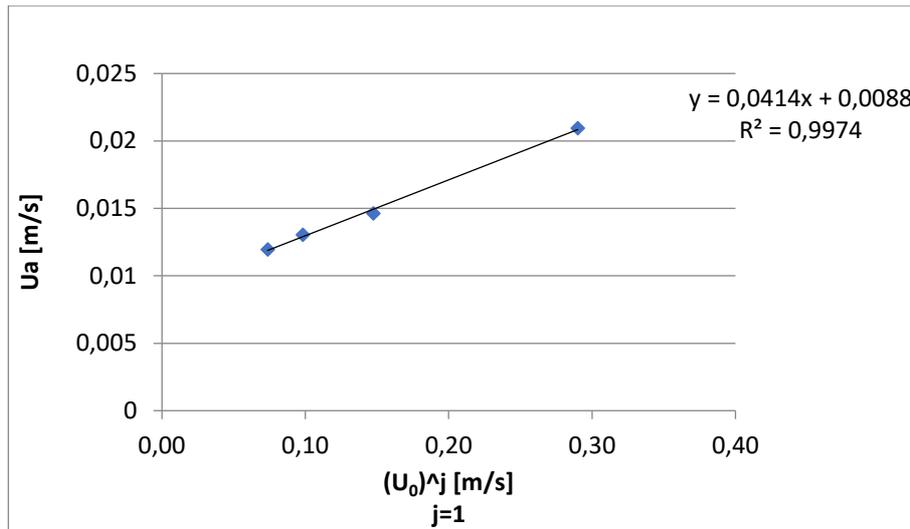


Figura 5.1 – Análise da variação da velocidade média de admissão na porta com velocidade do jato.

$$u_a = 0,0414 \times u_0 + 0,0088 \text{ [m/s]} \quad 5.2$$

Tendo em conta a Equação 5.2 obtida na regressão linear da Figura 5.1, constata-se que a variação da espessura do bocal do jato, mantendo constante o Número de Reynolds, não conduz à alteração da relação linear existente entre a velocidade do jato e a velocidade média de admissão na abertura.

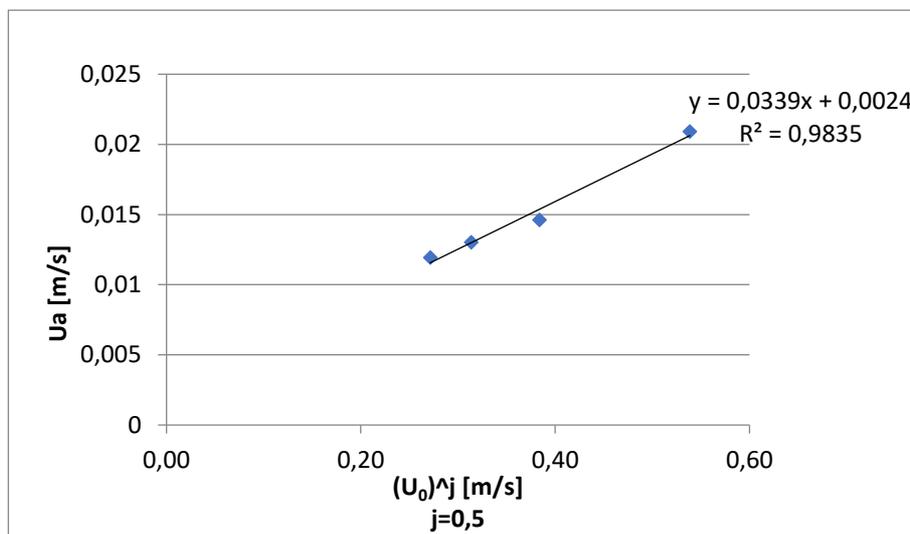


Figura 5.2 – Regressão linear entre a velocidade do jato e a raiz quadrada da velocidade média de admissão na porta.

$$u_a = 0,0339 \times \sqrt{u_0} + 0,0024 \text{ [m/s]} \quad 5.3$$

Na Figura 5.2 apresentam-se os mesmos resultados experimentais, mas a variável independente agora escolhida é a raiz quadrada da velocidade no bocal do jato. Verifica-se que a linha de tendência pode ainda ser adequadamente expressa por uma regressão linear. Esta observação

permite evidenciar que os resultados de ensaio não permitem claramente apoiar uma relação de dependência entre a velocidade média de admissão na abertura e a velocidade inicial do jato linear ou com a raiz quadrada, embora o coeficiente de correlação se apresente ligeiramente melhor no primeiro caso. Para além disso, o valor da constante independente aproxima-se do valor em que o jato está desligado (ver Quadro 5.12). Isto evidencia que é necessária uma análise mais aprofundada. Esta análise está detalhada na secção 5.4.

Mantém-se evidente que não existe dependência significativa com a espessura do jato.

### 5.3 Análise da influência do ângulo do jato

O segundo parâmetro analisado, é a influência do ângulo do jato. Para isso a velocidade média na abertura foi normalizada e representou-se um gráfico de  $\sin \alpha$  em função da razão entre a raiz quadrada da velocidade média na abertura e a raiz quadrada da velocidade média na abertura para  $\alpha = 0^\circ$  (Figura 5.3), estes resultados estão esquematizados do Quadro 5.2 ao Quadro 5.7.

**Quadro 5.2 – Registo da variação do ângulo do jato para Re=2125.**

Ângulo do jato ( $\alpha$ ) [°]	$\text{Sen}\alpha$	$Q_a$ [L/s]	$u_a$ [m/s]	$\sqrt{u_a}/\sqrt{u_a^0}$
0	0,000	1,20	0,077	1,00
5	0,087	1,20	0,077	1,00
10	0,174	1,20	0,077	1,00
15	0,259	1,20	0,077	1,00

**Quadro 5.3 – Registo da variação do ângulo do jato para Re=1710.**

Ângulo do jato ( $\alpha$ ) [°]	$\text{Sen}\alpha$	$Q_a$ [L/s]	$u_a$ [m/s]	$\sqrt{u_a}/\sqrt{u_a^0}$
0	0,000	1,07	0,068	1,00
5	0,087	1,07	0,068	1,00
10	0,174	1,07	0,069	1,00
15	0,259	1,07	0,069	1,00

**Quadro 5.4 – Registo da variação do ângulo do jato para Re=1224.**

Ângulo do jato ( $\alpha$ ) [°]	$\text{Sen}\alpha$	$Q_a$ [L/s]	$u_a$ [m/s]	$\sqrt{u_a}/\sqrt{u_a^0}$
0	0,000	0,836	0,054	1,00
5	0,087	0,810	0,052	0,98
10	0,174	0,790	0,051	0,97
15	0,259	0,686	0,044	0,91

Quadro 5.5 – Registo da variação do ângulo do jato para Re=687.

Ângulo do jato (α) [°]	Senα	Q <sub>a</sub> [L/s]	u <sub>a</sub> [m/s]	$\frac{\sqrt{u_a}}{\sqrt{u_a^0}}$
0	0,000	0,726	0,046	1,00
5	0,087	0,686	0,044	0,97
10	0,174	0,636	0,041	0,94
15	0,259	0,584	0,037	0,90

Quadro 5.6 – Registo da variação do ângulo do jato para Re=367.

Ângulo do jato (α) [°]	Senα	Q <sub>a</sub> [L/s]	u <sub>a</sub> [m/s]	$\frac{\sqrt{u_a}}{\sqrt{u_a^0}}$
0	0,000	0,550	0,035	1,00
5	0,087	0,481	0,031	0,94
10	0,174	0,420	0,027	0,87
15	0,259	0,327	0,021	0,77

Quadro 5.7 – Registo da variação do ângulo do jato para Re=147.

Ângulo do jato (α) [°]	Senα	Q <sub>a</sub> [L/s]	u <sub>a</sub> [m/s]	$\frac{\sqrt{u_a}}{\sqrt{u_a^0}}$
0	0,000	0,415	0,027	1,00
5	0,087	0,334	0,021	0,90
10	0,174	0,246	0,016	0,77
15	0,259	0,192	0,012	0,68

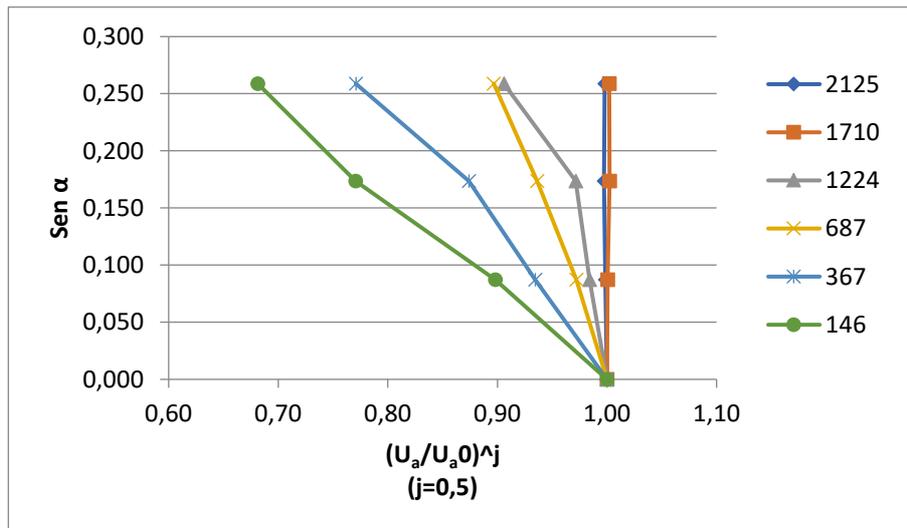


Figura 5.3 – Gráfico da influência do ângulo do jato

Como se pode verificar no gráfico da Figura 5.3, para números de Reynolds iguais ou superiores a 1710, não existe qualquer influência do ângulo do jato. Para o número de Reynolds próximo 1224 já se nota alguma influência, no entanto não é significativa, pelo que na próxima análise serão excluídos os dados relativos a  $Re = 1224$  a  $2125$ . Para números de Reynolds entre 146 e 687 existe uma clara influência do ângulo do jato. Na Figura 5.4 a relação dos resultados para esses números de Reynolds é expressa através de uma regressão linear, cuja expressão se apresenta na Equação 5.4.

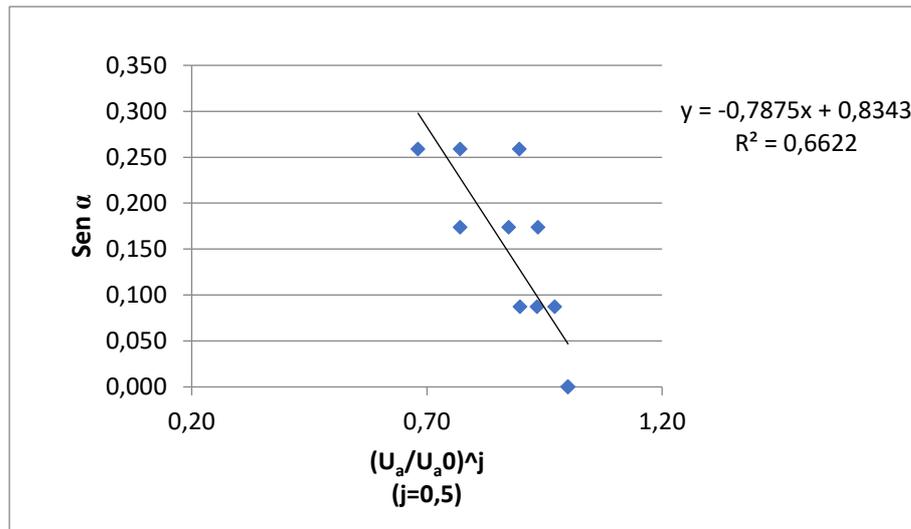


Figura 5.4 – Relação entre o seno do ângulo do jato e a raiz quadrada da velocidade média na abertura normalizada.

$$\sin \alpha = -0,7875 \times \left(\frac{u_a}{u_a0}\right)^{0,5} + 0,8343 \quad 5.4$$

Pode-se notar que a regressão linear na Figura 5.4, tem um coeficiente de correlação bastante baixo. Isto deve-se ao facto de se estar a tentar chegar apenas a uma expressão de influência do ângulo do jato para diferentes números de Reynolds.

#### **5.4 Relação entre a velocidade do jato e a velocidade média na abertura da porta**

O terceiro parâmetro analisado é a relação entre a velocidade do jato e a velocidade média na abertura da porta. Tal como referido anteriormente esta avaliação requer um tratamento mais aprofundado dos dados. Esta secção tem 3 partes, em que se pretende criar uma expressão final capaz de relacionar estes dois parâmetros.

### 5.4.1 Relação $u_o^{0,5}$

Numa primeira fase coligem-se todos os dados experimentais estabelecendo uma relação entre a velocidade média e a raiz quadrada da velocidade inicial do jato. Estes valores encontram-se do Quadro 5.8 ao Quadro 5.11. Posteriormente inclui-se a influência do ângulo, já analisada na secção anterior 5.3, juntamente com a raiz quadrada da velocidade do jato.

**Quadro 5.8 – Registo da variação das velocidades para um ângulo  $\alpha = 0^\circ$ .**

<b>Ângulo do jato <math>\alpha = 0^\circ</math></b>				
<b>Velocidade do Jato (<math>u_o</math>) [m/s]</b>	<b><math>u_o^j</math> (j=0,5)</b>	<b><math>Q_a</math> [L/s]</b>	<b><math>u_a</math>[m/s]</b>	<b>Re</b>
1,70	1,31	1,20	0,077	2125
1,37	1,17	1,07	0,068	1710
0,98	0,99	0,84	0,054	1224
0,55	0,74	0,73	0,046	687
0,29	0,54	0,55	0,035	367
0,12	0,34	0,41	0,027	146

**Quadro 5.9 – Registo da variação das velocidades para um ângulo  $\alpha = 5^\circ$ .**

<b>Ângulo do jato <math>\alpha = 5^\circ</math></b>				
<b>Velocidade do Jato (<math>u_o</math>) [m/s]</b>	<b><math>u_o^j</math> (j=0,5)</b>	<b><math>Q_a</math> [L/s]</b>	<b><math>u_a</math>[m/s]</b>	<b>Re</b>
1,70	1,31	1,20	0,077	2125
1,37	1,17	1,07	0,068	1710
0,98	0,99	0,81	0,052	1224
0,55	0,74	0,69	0,044	687
0,29	0,54	0,48	0,031	367
0,12	0,34	0,33	0,021	146

Quadro 5.10 – Registo da variação das velocidades para um ângulo  $\alpha = 10^\circ$ .

Ângulo do jato $\alpha = 10^\circ$				
Velocidade do Jato ( $u_0$ ) [m/s]	$u_0^j$ (j=0,5)	$Q_a$ [L/s]	$u_a$ [m/s]	Re
1,70	1,31	1,20	0,077	2125
1,37	1,17	1,07	0,069	1710
0,98	0,99	0,79	0,051	1224
0,55	0,74	0,64	0,041	687
0,29	0,54	0,42	0,027	367
0,12	0,34	0,25	0,016	146

Quadro 5.11 – Registo da variação das velocidades para um ângulo  $\alpha = 15^\circ$ .

Ângulo do jato $\alpha = 15^\circ$				
Velocidade do Jato ( $u_0$ ) [m/s]	$u_0^j$ (j=0,5)	$Q_a$ [L/s]	$u_a$ [m/s]	Re
1,70	1,31	1,20	0,077	2125
1,37	1,17	1,07	0,069	1710
0,98	0,99	0,69	0,044	1224
0,55	0,74	0,58	0,037	687
0,29	0,54	0,33	0,021	367
0,12	0,34	0,19	0,012	146

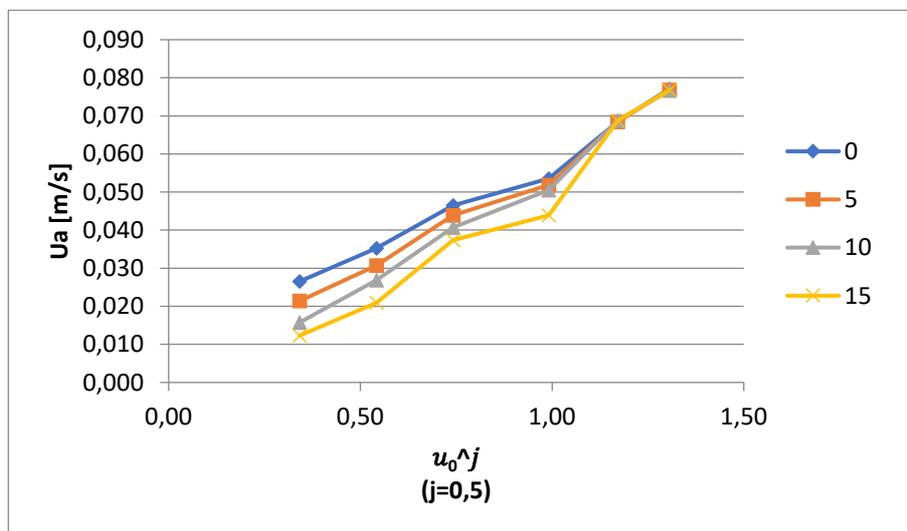


Figura 5.5 – Relação entre a velocidade na abertura e a raiz quadrada velocidade do jato.

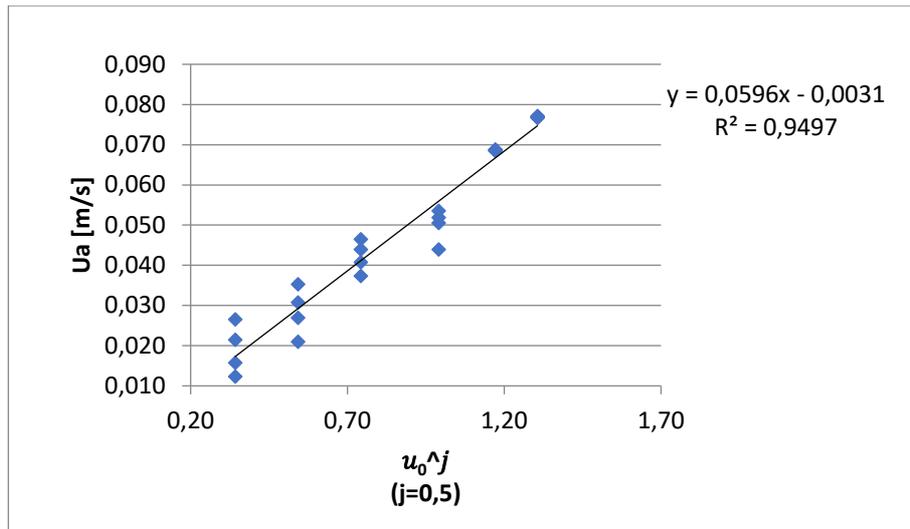


Figura 5.6 – Regressão linear da relação entre a velocidade do jato e a velocidade na abertura.

Confirma-se, na Figura 5.5, a existência de uma forte dependência relativamente ao ângulo do jato para baixos números de Reynolds. A relação entre a velocidade do jato e a velocidade na porta é dada pela Equação 5.5, que difere da expressão obtida na secção 5.2, porque agora o conjunto de dados e ângulos incluídos é mais vasto.

$$u_a = 0,0596 \times \sqrt{u_0} - 0,0031; [m/s] \tag{5.5}$$

Se se obrigar a reta de ajustamento a passar pelo valor da velocidade média na abertura da porta obtida em ensaio com o jato inativo (Quadro 5.12), obtêm-se a regressão linear da Figura 5.7, que não difere significativamente da Equação 5.5 e tem a vantagem de refletir adequadamente os resultados de ensaio com jato desligado.

Quadro 5.12 – Registo dos valores dos ensaios com o jato desligado.

Velocidade do Jato ( $u_0$ ) [m/s]	$u_0^j$ (j=0,5)	$Q_a$ [L/s]	$u_a$ [m/s]	Re
0,00	0,00	0,04	0,0026	1710

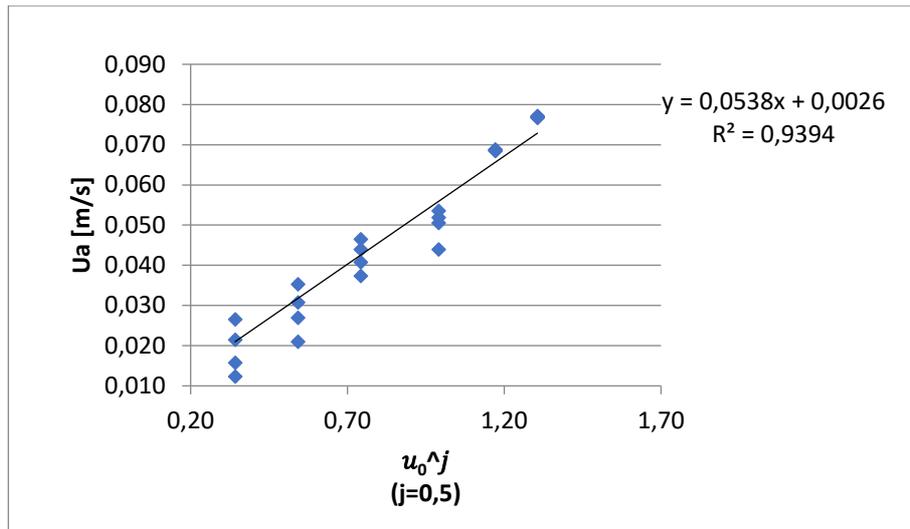


Figura 5.7 – Regressão linear da relação entre a velocidade do jato e a velocidade na abertura a passar pelo valor dos ensaios com o jato desligado.

Assim a expressão passa a ser dada pela Equação 5.6

$$u_a = 0,0538 \times \sqrt{u_0} + u_{a(u_0=0)} = 0,0538 \times \sqrt{u_0} + 0,0026 \text{ [m/s]} \quad 5.6$$

Combinando-se a variação da velocidade do jato com a sua variação de espessura (ver Figura 5.8), conclui-se mais uma vez que a variação de espessura não é relevante para a velocidade na abertura, a linha correspondente aos resultados experimentais com variação de espessura segue praticamente sobreposta à que corresponde a  $\alpha = 15^\circ$ .

Quadro 5.13 – Registo da variação da espessura do jato 2.

Velocidade do Jato ( $u_0$ ) [m/s]	$u_0^j$ (j=0,5)	$Q_a$ [L/s]	$u_a$ [m/s]	Re	Espessura do Jato (e) [m]
0,29	0,54	0,33	0,021	367	0,00125
0,15	0,38	0,23	0,015		0,00250
0,10	0,31	0,20	0,013		0,00375
0,07	0,27	0,19	0,012		0,00500

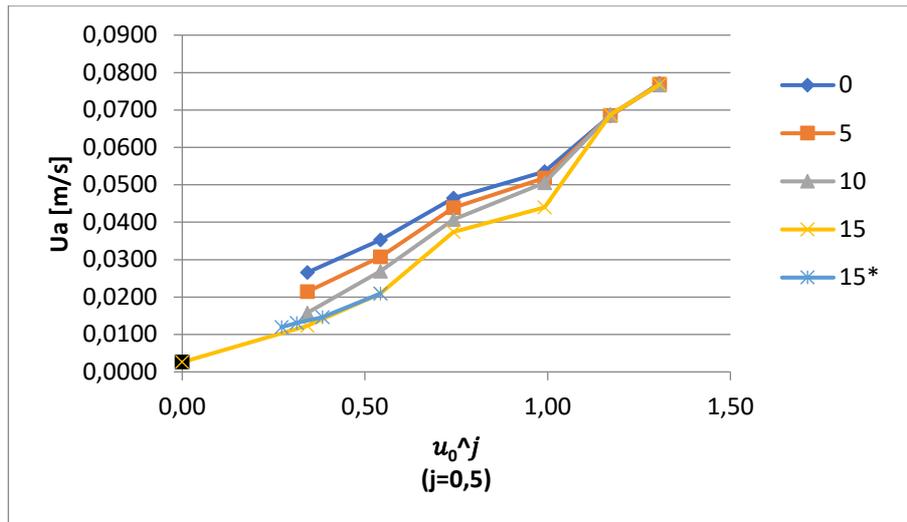


Figura 5.8 – Relação entre a velocidade do jato e a velocidade média na abertura com o acréscimo da variação da espessura do jato (15\*).

### 5.4.2 Relação $u_0^{0,5} (1 - \text{sen } \alpha)$

Nesta relação incluiu-se na expressão a influência do ângulo de forma a se conseguir exprimir a velocidade média na abertura da porta em função não só da velocidade do jato, como também em função do ângulo do jato. No Quadro 5.14 ao Quadro 5.18, encontram-se os resultados obtidos. Note-se que se chegou à conclusão que o ângulo não influencia a velocidade média na abertura da porta para números de Reynolds maiores ou iguais a 1224, como tal se considerou irrelevante a inclusão do termo  $\text{sen } \alpha$  na sua expressão, remetendo aos resultados anteriores.

Quadro 5.14 – Registo da variação das velocidades com a relação  $u_0^{0,5} (1 - \text{sen } \alpha)$  para um ângulo  $\alpha=0^\circ$ .

Ângulo do jato $\alpha = 0^\circ$				
Velocidade do Jato ( $u_0$ ) [m/s]	$u_0^j (1 - \text{sen } \alpha)^f$ (j=0,5; f=1)	Q a [L/s]	$u_a$ [m/s]	Re
0,55	0,74	0,86	0,055	687
0,29	0,54	0,55	0,035	367
0,12	0,35	0,41	0,027	146

Quadro 5.15 – Registo da variação das velocidades com a relação  $u_o^{0,5} (1 - \text{sen } \alpha)$  para um ângulo  $\alpha=5^\circ$ .

Ângulo do jato $\alpha = 5^\circ$				
Velocidade do Jato ( $u_o$ ) [m/s]	$u_o^j (1 - \text{sen } \alpha)^f$ ( $j=0,5; f=1$ )	Q a [L/s]	$u_a$ [m/s]	Re
0,55	0,68	0,69	0,044	687
0,29	0,49	0,48	0,031	367
0,12	0,32	0,33	0,021	146

Quadro 5.16 – Registo da variação das velocidades com a relação  $u_o^{0,5} (1 - \text{sen } \alpha)$  para um ângulo  $\alpha=10^\circ$ .

Ângulo do jato $\alpha = 10^\circ$				
Velocidade do Jato ( $u_o$ ) [m/s]	$u_o^j (1 - \text{sen } \alpha)^f$ ( $j=0,5; f=1$ )	Q a [L/s]	$u_a$ [m/s]	Re
0,55	0,61	0,64	0,041	687
0,29	0,45	0,42	0,027	367
0,12	0,29	0,25	0,016	146

Quadro 5.17 – Registo da variação das velocidades com a relação  $u_o^{0,5} (1 - \text{sen } \alpha)$  para um ângulo  $\alpha=15^\circ$ .

Ângulo do jato $\alpha = 15^\circ$				
Velocidade do Jato ( $u_o$ ) [m/s]	$u_o^j (1 - \text{sen } \alpha)^f$ ( $j=0,5; f=1$ )	Q a [L/s]	$u_a$ [m/s]	Re
0,55	0,55	0,58	0,037	687
0,29	0,40	0,33	0,021	367
0,12	0,26	0,19	0,012	146

Quadro 5.18 – Registo da variação das velocidades com a relação  $u_o^{0,5} (1 - \text{sen } \alpha)$  com a alteração da espessura do jato.

Velocidade do Jato ( $u_o$ ) [m/s]	$u_o^j (1 - \text{sen } \alpha)^f$ ( $j=0,5; f=1$ )	Q a [L/s]	$u_a$ [m/s]	Re	Espessura do Jato (e) [m]
0,29	0,40	0,33	0,021	367	0,00125
0,15	0,28	0,23	0,015		0,00250
0,10	0,23	0,20	0,013		0,00375
0,07	0,20	0,19	0,012		0,00500

Como se pode verificar na Figura 5.9, usando a relação  $u_o^{0,5} (1 - \text{sen } \alpha)$  obtém-se um melhor ajuste dos resultados experimentais, uma vez que o coeficiente de correlação é de 0,9883 (ver Figura 5.10), quando comparado com o anteriormente obtido de 0,9394.

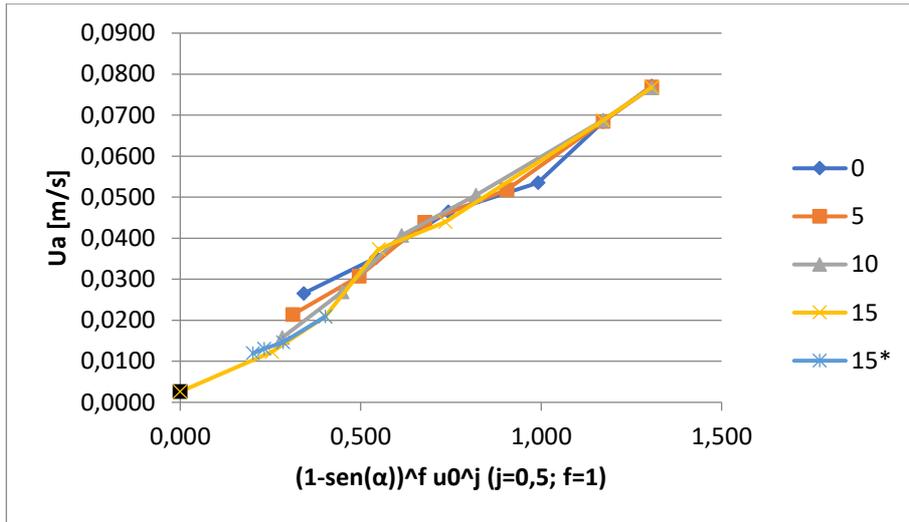


Figura 5.9 – Relação entre a velocidade na abertura e  $u_0^{0,5} (1 - \text{sen } \alpha)$  para diferentes ângulos do jato (15\* valores correspondentes ao aumento da espessura do jato).

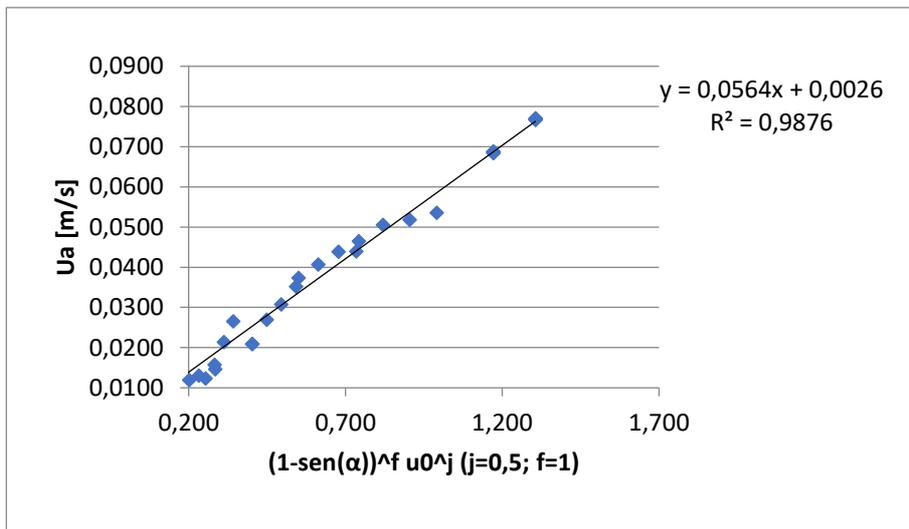


Figura 5.10 – Regressão linear entre a velocidade na abertura e  $u_0^{0,5} (1 - \text{sen } \alpha)$ .

Assim, obtém-se a seguinte Equação 5.7, na qual não foi incluída a influência de  $\text{sen } \alpha$  para  $Re > 1224$ , pois não se verificou nenhuma influência do ângulo para essas situações.

$$u_a = 0,0564 \times (1 - \text{sen } \alpha) \times \sqrt{u_0} + 0,0026; [m/s] \quad 5.7$$

### 5.4.3 Relação do método dos mínimos quadrados

Tendo em conta os resultados anteriores verifica-se que ainda é possível melhorar a expressão obtida (Equação 5.7). Assim recorreu-se ao método dos mínimos quadrados para as variáveis A, B, C, f e j da 5.8, por forma a obter-se um melhor ajustamento, onde se chegou aos valores apresentados no Quadro 5.19.

$$u_a = A \times (B - \text{sen } \alpha)^f \times u_0^j + C; [m/s]$$

5.8

Quadro 5.19 – Resultado das variáveis da aplicação do método dos mínimos quadrados

A=	0,0595
B=	1,00
C=	0,0000259
j=	0,470
f=	1,07

Como era de esperar obteve-se um ajustamento dos valores experimentais equivalente ao obtido anteriormente, como se pode ver na Figura 5.11, conseguindo-se um coeficiente de correlação de 0,9886 (ver Figura 5.12).

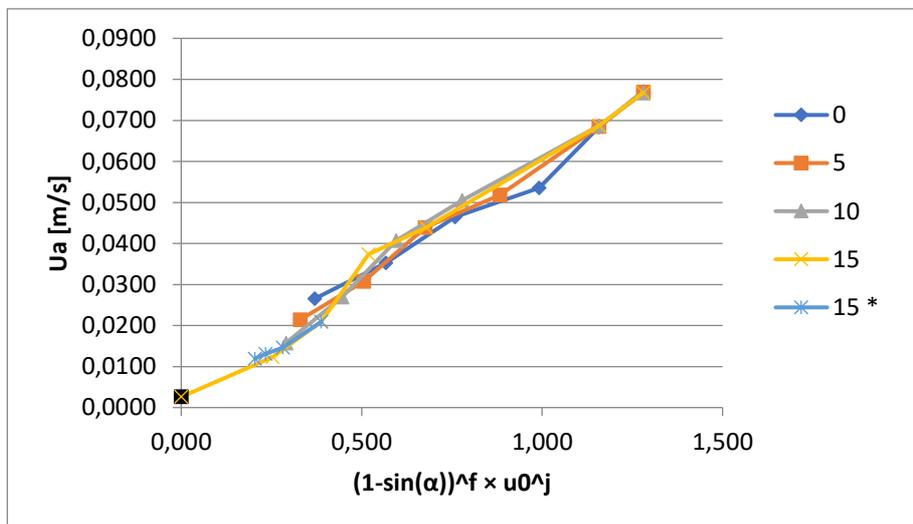


Figura 5.11 – Relação entre a velocidade na abertura e  $u_0^{0,470} (1,00 - \text{sen } \alpha)^{1,07}$  (15\* valores correspondentes ao aumento da espessura do jato).

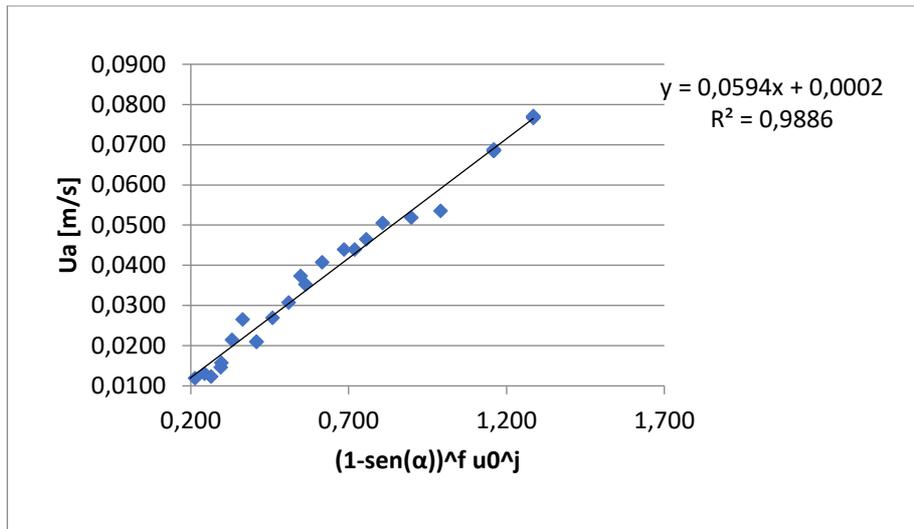


Figura 5.12 – Regressão linear entre a velocidade na abertura e  $u_0^{0,470} (1,00 - \text{sen } \alpha)^{1,07}$ .

Na Equação 5.9, apresenta-se a expressão obtida através a regressão linear anterior.

$$u_a = 0,0595 \times (1,00 - \text{sen } \alpha)^{1,07} \times u_0^{0,47} + 0,000259; [m/s] \quad 5.9$$

Analise-se qual o melhor ajustamento, mas agora com arredondamento nos expoentes e de algumas outras variáveis. Estas alterações pressupõem que os resultados experimentais podem diferir um pouco dos resultados teóricos devido às incertezas do próprio processo experimental.

- Primeiro obriga-se a variável C a assumir o valor  $C=0,0026$  m/s, que é a velocidade medida na abertura quando a velocidade do jato é nula.
- Depois obriga-se o expoente f que influência a velocidade do jato a assumir o valor  $f=1,00$ .
- Da mesma forma aproxima-se B é unidade mais próxima  $B=1,00$
- Seguidamente ajusta-se o expoente  $j=0,5$ .

Quadro 5.20 – Resultado das variáveis da aplicação do método dos mínimos quadrados, apenas nas variáveis A e B

<b>A=</b>	0,0567
<b>B=</b>	1,00
<b>C=</b>	0,00260
<b>j=</b>	0,500
<b>f=</b>	1,00

Obteve-se um ligeiro afastamento dos valores, como se pode ver nas Figura 5.13 e Figura 5.14, ficando com um coeficiente de correlação de 0,988, que é, ainda assim, bastante satisfatório.

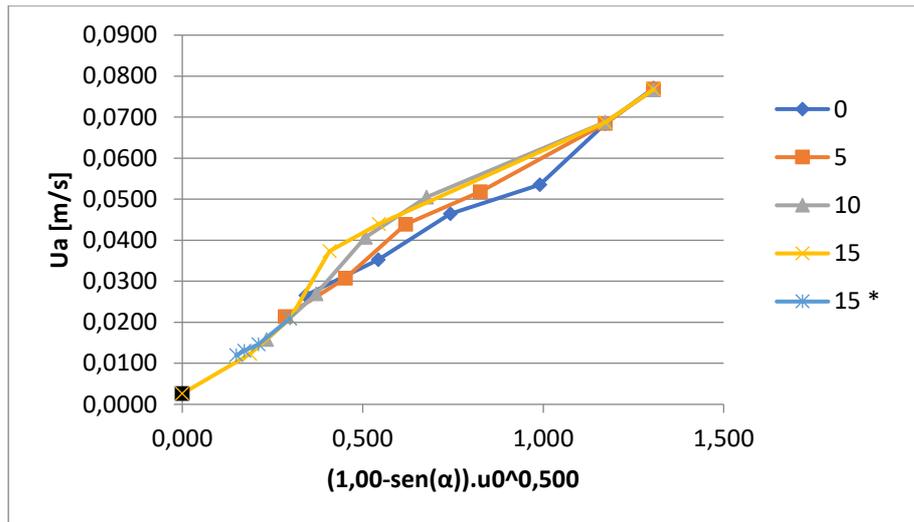


Figura 5.13 – Relação entre a velocidade na abertura e  $u_0^{0,5} (1,00 - \text{sen } \alpha)$  (15\* valores correspondentes ao aumento da espessura do jato).

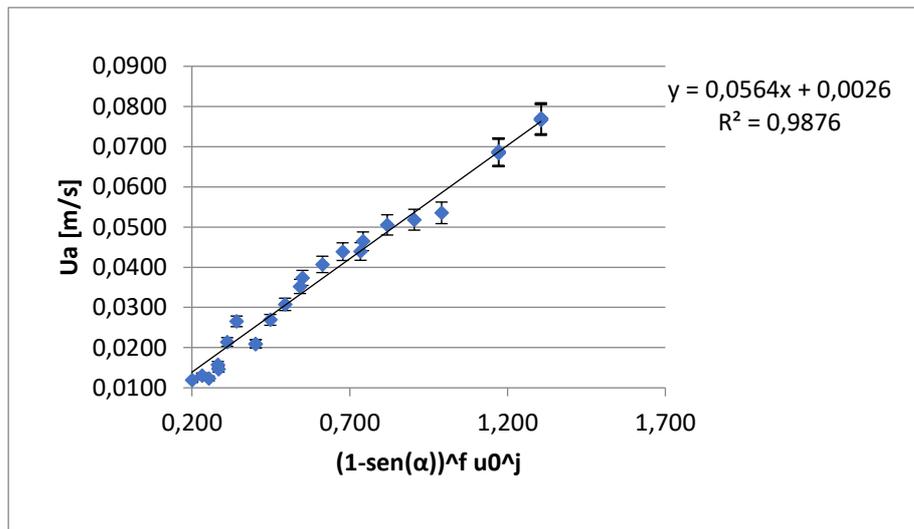


Figura 5.14 – Regressão linear entre a velocidade na abertura  $u_0^{0,5} (1,00 - \text{sen } \alpha)$ .

Na Figura 5.14, também é visível o erro de 5% associado ao método de ensaio calculado nos anexos desta dissertação.

Assim, obteve-se a Equação 5.11 mais adequada para exprimir os resultados experimentais, mesmo que a correlação da regressão linear tenha piorado um pouco, que era espectável pois apenas se fez o ajuste com o parâmetro A.

$$u_a = 0,0564 \times (1,00 - \text{sen } \alpha) \times u_0^{0,5} + 0,0026; [m/s] \quad 5.10$$

Que escrita de uma forma mais geral adota a forma:

$$u_a = 0,0564 \times (1,00 - \text{sen } \alpha) \times u_0^{0,5} + u_{a(u_0=0)}; [m/s] \quad 5.11$$

Considerando estas ultimas simplificações verifica-se que a Equação 5.10 e a Equação 5.7 são iguais, validade assim a expressão obtida anteriormente.

## 5.5 Análise Teórica

Após se ter feito um tratamento dos resultados experimentais vai-se agora ver alguns conceitos físicos que consigam descrever estes comportamentos.

Até ao momento existem dois comportamentos diferentes, um em que claramente o ângulo já tem uma influência forte que engloba os valores para número de Reynolds 146, 367 e 687 (em estudo na secção 5.1.1) e outro em que o ângulo tem pouca ou nenhuma influência para valores de Reynolds de 1224, 1710 e 2125 (em estudo na secção 5.5.2).

### 5.5.1 Equilíbrio de Quantidade de Movimento (EQM)

Analise-se a quantidade de movimento, partindo do pressuposto que esta pode ser expressa pelo produto do caudal mássico e por uma velocidade média ponderada no ponto em que o jato toca a superfície é possível fazer um equilíbrio de caudais. (Ver Figura 5.15).

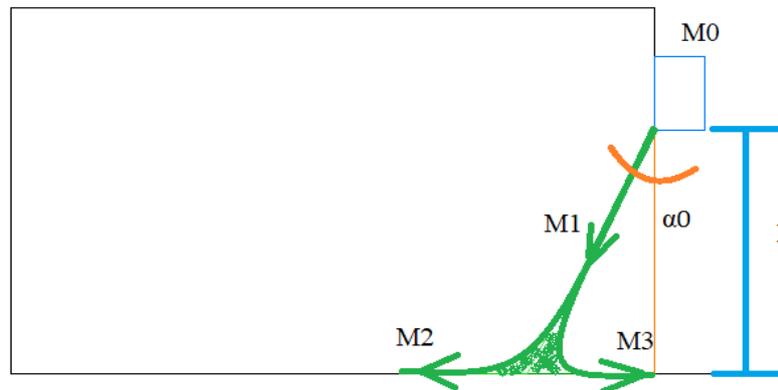


Figura 5.15 – Esquema da subdivisão do jato

Comece-se por ver o equilíbrio de caudais e considerando que os perfis de velocidade são uniformes, tem-se que:

$$\dot{M}_1 = \dot{M}_2 + \dot{M}_3 \quad 5.12$$

Sendo:

$$\dot{M}_0 = e \times L \times \bar{u}_0 \quad 5.13$$

$$J_1 = e \times L \times \bar{u}_0^2 \quad 5.14$$

$$J_2 = \dot{M}_2 \times \bar{u}_1 \quad 5.15$$

$$J_3 = \dot{M}_3 \times \bar{u}_1 \quad 5.16$$

Admite-se também que essa velocidade para ângulos pequenos, em valor absoluto, se mantém nos dois componentes em que se subdivide o jato (escoamento para o interior do compartimento e escoamento para o exterior do compartimento), pelo que:

$$\bar{u}_1 = \bar{u}_2 = \bar{u}_3 \quad 5.17$$

Através do equilíbrio da quantidade de movimento:

$$J_2 = J_3 + J_1 \times \sin \alpha_0 \Leftrightarrow \dot{M}_2 \times \bar{u}_1 = \dot{M}_3 \times \bar{u}_1 + \dot{M}_1 \times \bar{u}_1 \times \sin \alpha_0 \quad 5.18$$

Simplificando a equação em cima e resolvendo em função de M1, M2 e M3, obtêm-se:

$$\dot{M}_1 = \dot{M}_3 \times \frac{1+\sin \alpha_0}{1-\sin \alpha_0} \quad 5.19$$

$$\dot{M}_2 = \dot{M}_1 \times \frac{1+\sin \alpha_0}{2} \quad 5.20$$

$$\dot{M}_3 = \dot{M}_1 \times \frac{1-\sin \alpha_0}{2} \quad 5.21$$

Tendo em conta a igualdade de velocidade médias ponderadas acima, pode escrever-se:

$$\dot{M}_3 \times \bar{u}_1 = \dot{M}_1 \times \bar{u}_1 \times \frac{1-\sin \alpha_0}{2} \quad 5.22$$

$$\dot{M}_3 \times \bar{u}_3 = \dot{M}_1 \times \bar{u}_1 \times \frac{1-\sin \alpha_0}{2} \quad 5.23$$

$$J_3 = J_1 \times \frac{1-\sin \alpha_0}{2} \Leftrightarrow J_3 = e \times L \times \bar{u}_0^2 \times \frac{1-\sin \alpha_0}{2} \quad 5.24$$

Tendo em conta que para os ângulos considerados h é praticamente igual a H, a quantidade de movimento na porta é dada por:

$$J_a = L \times H \times \bar{u}_a^2 \quad 5.25$$

A condição de estanquidade é dada por:

$$J_a = J_3 \Leftrightarrow L \times H \times \bar{u}_a^2 = e \times L \times \bar{u}_0^2 \times \frac{1-\sin \alpha_0}{2} \quad 5.26$$

Simplificando:

$$\bar{u}_a = \bar{u}_0 \times \left[ \frac{e}{H} \times \frac{1-\sin \alpha_0}{2} \right]^{0,5}; [m/s] \quad 5.27$$

Os resultados obtidos experimentalmente mostraram que existe uma velocidade mínima de admissão pela porta, mesmo quando o jato não está ativo, assim de modo a ajustar esta expressão aos resultados experimentais, esta deve ser escrita da seguinte forma:

$$\bar{u}_a = \bar{u}_0 \times \left[ \frac{e}{H} \times \frac{1 - \sin \alpha_0}{2} \right]^{0.5} + u_{a(u_0=0)}; [m/s] \quad 5.28$$

Verifica-se ainda que a curva que se obtém pode originar valores de velocidade mínima de admissão pela porta, superiores aos valores experimentais se for usada uma majoração  $D$ , ou seja de modo a poder ser ajustada aos resultados obtidos:

$$\bar{u}_a = \bar{u}_0 \times \left[ \frac{e}{H} \times \frac{1 - \sin \alpha_0}{2} \right]^{0.5} + u_{a(u_0=0)} \times D; [m/s] \quad 5.29$$

Esta equação tem uma expressão um pouco diferente da obtida anteriormente na secção 5.4.3, no entanto quando simplificada a Equação 5.29, juntamente com as observações anteriores, que demonstra que a espessura do bocal do jato não tem influência significativa nestes resultados experimentais, metendo as restantes constantes em evidência, obtém-se uma expressão quase igual á Equação 5.11.

$$\bar{u}_a = A \times \bar{u}_0 \times [1 - \sin \alpha_0]^{0.5} + u_{a(u_0=0)} \times D; [m/s] \quad 5.30$$

Do Quadro 5.21 ao Quadro 5.24, estão os registos calculados com a Equação 5.30 e na Figura 5.16, uma regressão linear correspondente a estes valores.

**Quadro 5.21 – Registo da variação das velocidades com a relação  $u_0 (1 - \sin \alpha)^{0.5}$  para um ângulo  $\alpha=0^\circ$ .**

Velocidade do Jato ( $u_0$ ) [m/s]	$u_a$ [m/s]	$u_0^j (1 - \sin \alpha)^f$ ( $j=1; f=0,5$ )	Re
0,55	0,047	0,550	687
0,29	0,035	0,290	367
0,12	0,027	0,120	146

**Quadro 5.22 – Registo da variação das velocidades com a relação  $u_0 (1 - \sin \alpha)^{0.5}$  para um ângulo  $\alpha=5^\circ$ .**

Velocidade do Jato ( $u_0$ ) [m/s]	$u_a$ [m/s]	$u_0^j (1 - \sin \alpha)^f$ ( $j=1; f=0,5$ )	Re
0,55	0,044	0,525	687
0,29	0,031	0,277	367
0,12	0,021	0,115	146

**Quadro 5.23 – Registo da variação das velocidades com a relação  $u_0 (1 - \sin \alpha)^{0.5}$  para um ângulo  $\alpha=10^\circ$ .**

Velocidade do Jato ( $u_0$ ) [m/s]	$u_a$ [m/s]	$u_0^j (1 - \sin \alpha)^f$ ( $j=1; f=0,5$ )	Re
0,55	0,041	0,500	687
0,29	0,027	0,264	367
0,12	0,016	0,109	146

Quadro 5.24 – Registo da variação das velocidades com a relação  $u_0 (1 - \text{sen } \alpha)^{0,5}$  para a variação de espessuras.

Velocidade do Jato ( $u_0$ ) [m/s]	$u_a$ [m/s]	$u_0^j (1 - \text{sen } \alpha)^f$ ( $j=1; f=0,5$ )	Espessura do Jato ( $e$ ) [m]
0,29	0,021	0,250	0,00125
0,15	0,015	0,127	0,00250
0,10	0,013	0,085	0,00375
0,07	0,012	0,063	0,00500

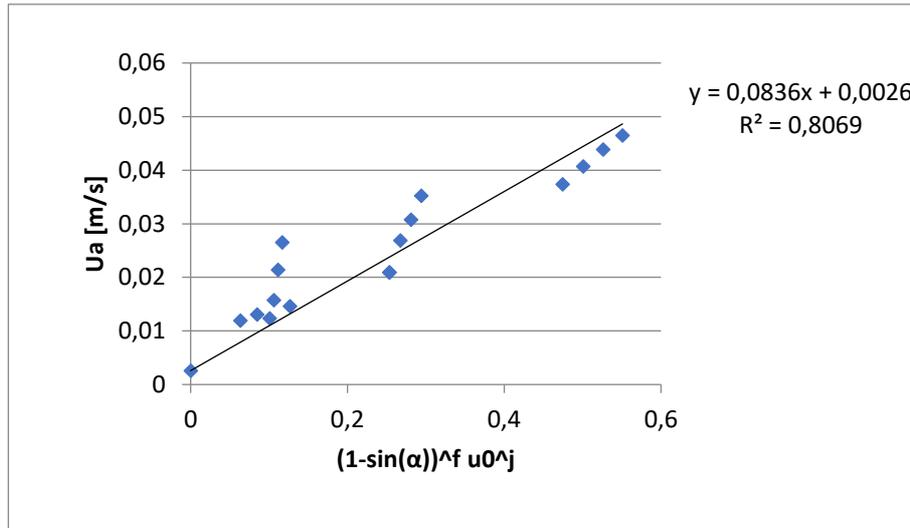


Figura 5.16 – Regressão linear entre a velocidade na abertura e  $u_0 (1 - \text{sen } \alpha)^{0,5}$ .

Assim a Equação 5.30 toma a seguinte forma:

$$\bar{u}_a = 0,0836 \times \bar{u}_0 \times [1 - \text{sen } \alpha_0]^{0,5} + u_{a(u_0=0)} \times D; [m/s] \quad 5.31$$

Quando estes resultados são comparados com a Equação 5.29, obtêm-se os resultados da Figura 5.17, onde D toma do valor de 1.

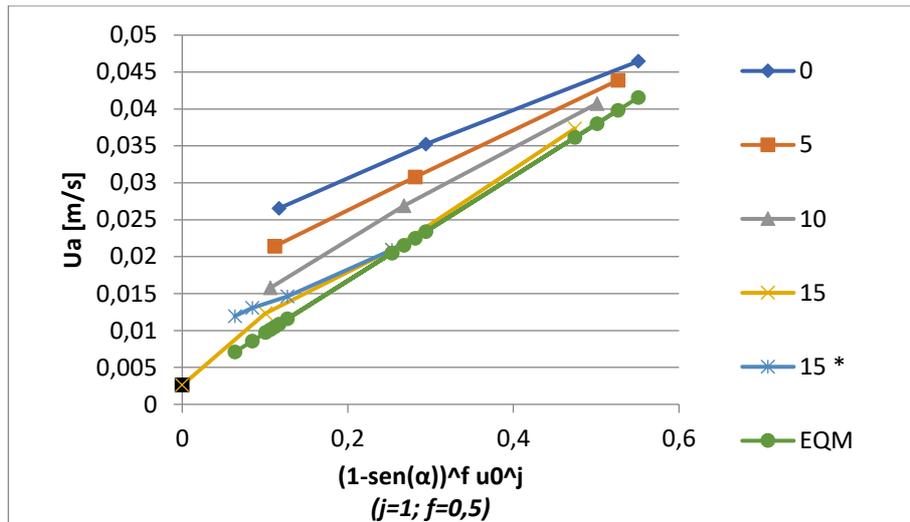


Figura 5.17 – Comparação dos resultados obtidos com uma expressão teórica EQM com  $D=1$  (15\* valores correspondentes ao aumento da espessura do jato).

Se for usada uma majoração de  $D=7$ , a expressão teórica do equilíbrio da quantidade de movimento (EQM) passa a ser conservativa relativamente aos resultados experimentais, como se demonstra na Figura 5.18.

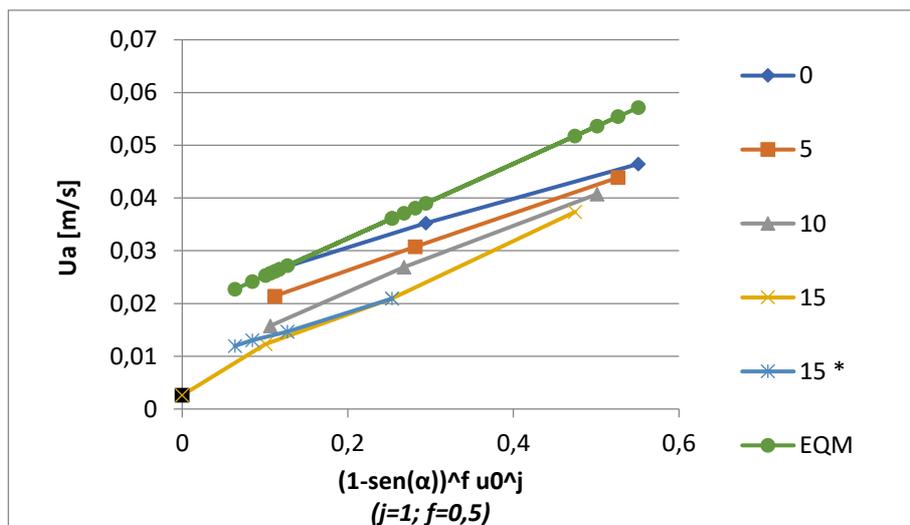


Figura 5.18 – Comparação dos resultados obtidos com uma expressão teórica EQM com  $D=7$  (15\* valores correspondentes ao aumento da espessura do jato).

É de notar que a regressão linear da Figura 5.16, tem um coeficiente de correlação não tão bom como o obtido com todos os anteriormente, isto deve-se ao facto de esta ser uma análise teórica com menos dados, no entanto valida os resultados experimentais até ao momento.

### 5.5.2 Equilíbrio de Caudal Mássico (ECM)

Para números de Reynolds mais elevados é interessante comparar o caudal de estanquidade com o caudal mássico do jato plano, uma vez que este tem uma reduzida dependência do ângulo, para ângulos pequenos. Assim através da Equação 2.14.

$$Q_{arrastamento} = 0,44 \times \left(\frac{2 \times x}{b_0}\right)^{\frac{1}{2}} \times Q_0 \quad 5.32$$

Resolvendo a Equação 5.32, para as variáveis em estudo, onde:

$$b_0 = e$$

$$Q = e \times L \times u$$

$$x = h / \cos(\alpha_0)$$

Simplificando obtêm-se:

$$u_a = \left[ 0,22 \times \left(\frac{2 \times h}{e \times \cos \alpha_0}\right)^{\frac{1}{2}} + 0,5 \right] \times u_0 \times \frac{e}{h}; [m/s] \quad 5.33$$

Da mesma forma que anteriormente adicionou-se a velocidade de admissão quando o jato está desligado e afetou-se *por uma variável D*.

$$u_a = \left[ 0,22 \times \left(\frac{2 \times h}{e \times \cos \alpha_0}\right)^{\frac{1}{2}} + 0,5 \right] \times u_0 \times \frac{e}{h} + u_{a(u_0=0)} \times D; [m/s] \quad 5.34$$

Através desta equação, apenas se pressupõe que o caudal de exaustão de estanquidade deve corresponder pelo menos ao caudal do jato. Verifica-se que ele é efetivamente superior. Constatou-se também que o caudal não varia significativamente com o ângulo para os resultados experimentais de maior número de Reynolds. Quando D toma o valor 1, obtêm-se a velocidade média na abertura da porta mínimo como está presente na Figura 5.19. Tal como anteriormente, se D tomar o valor 7 obtêm-se uma majoração dos resultados (ver Figura 5.20).

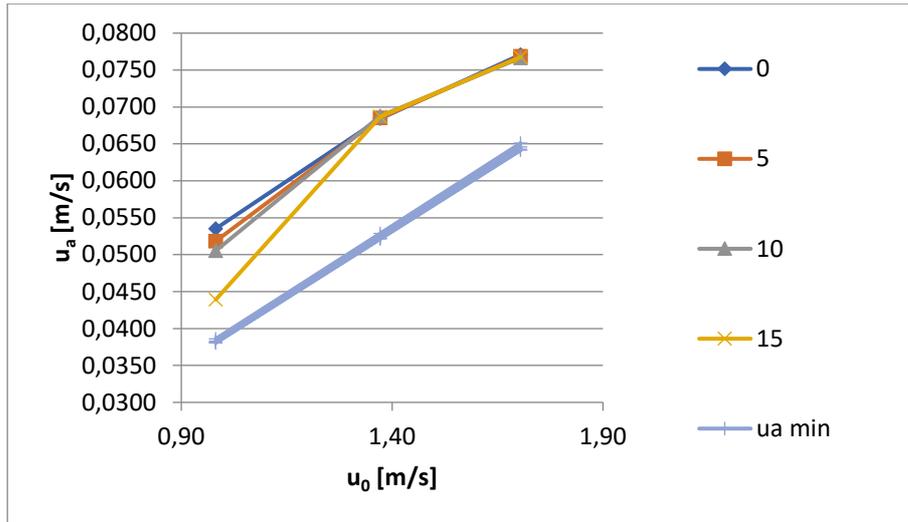


Figura 5.19 – Comparação dos resultados obtidos com uma expressão teórica ECM com D=1.

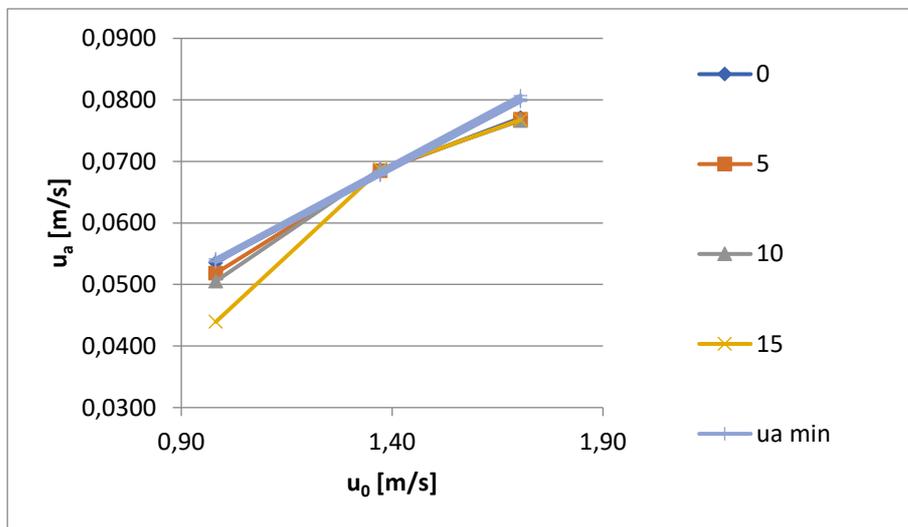


Figura 5.20 – Comparação dos resultados obtidos com uma expressão teórica ECM com D=7.

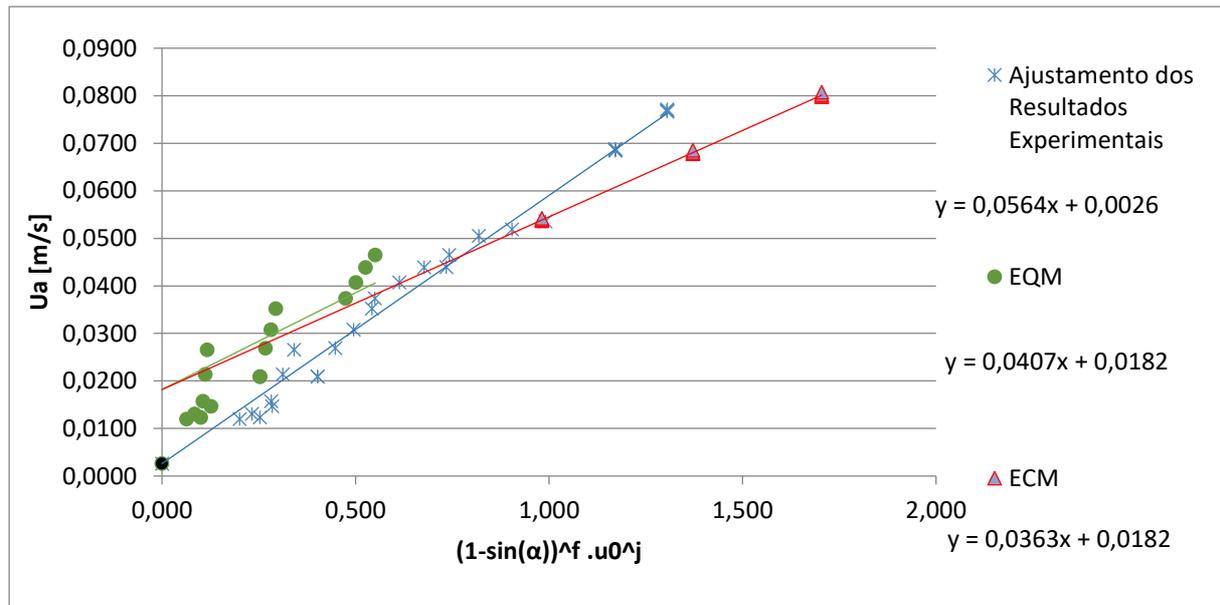
Em resumo para números de Reynolds elevados, a Equação 5.34, fica da seguinte forma:

$$u_a = 1 \times \left[ 0,22 \times \left( \frac{2 \times h}{e \times \cos \alpha_0} \right)^{\frac{1}{2}} + 0,5 \right] \times u_0 \times \frac{e}{h} + 0,0026 \times 7; [m/s] \quad 5.35$$

### 5.6 Comparação de Resultados

Desta forma chegou-se a 3 resultados, o primeiro é uma expressão obtida com o método dos mínimos quadrados, que representa um ajustamento apenas dos resultados experimentais (Equação 5.10) os outros dois resultados são obtidos a partir de dois conceitos teóricos diferentes ajustados aos resultados obtidos. Para o equilíbrio da quantidade de movimento (EQM) tem-se a Equação 5.31 e para o equilíbrio de caudal mássico (ECM) a Equação 5.35.

Na Figura 5.21, estão representados os valores obtidos através da Equação 5.10, da Equação 5.31 e da Equação 5.35, com  $D=7$ , onde é possível notar que os resultados obtidos através do EQM e ECM são mais conservativos do que os resultados obtidos apenas por ajustamentos dos resultados experimentais para baixos números de Reynolds. Quanto ao QCM, obteve-se uma majoração para os resultados experimentais apenas de número de Reynolds elevado. Como é evidenciado na Figura 5.20, no entanto a Equação 5.21 dos resultados experimentais ajustados, para números de Reynolds mais elevados é mais conservativa que a Equação QCM.



**Figura 5.21 – Comparação dos resultados obtidos através do ajustamento dos resultados experimentais e as equações do EQM e ECM adaptadas aos resultados experimentais.**

Por fim existe mais um resultado experimental que pretende demonstrar que o uso de cortinas de ar é necessário. Pois os resultados em regime isotérmico induzem em erro, uma vez que quando o jato está ligado, os caudais de admissão necessários para garantir a estanquidade são superiores do que quando este está desligado. Deste modo foram efetuados dois ensaios com água salgada registados no Quadro 4.10, através da observação deste quadro nota-se que o jato desligado tem um caudal de exaustão superior de quando o jato está ligado. Isto deve-se às diferenças de pressão, de forma similar ao que acontece nos edifícios habituais com as diferenças de temperatura abordados no capítulo 2.



## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 6.1 Principais conclusões

O principal objetivo desta dissertação era saber qual a velocidade média mínima na abertura da porta  $u_a$  que, para determinadas características do jato que está a proteger a porta (nomeadamente a sua velocidade no bocal  $u_0$ ), garante estanquidade em regime isotérmico. Neste ponto de vista conseguiu-se cumprir esse objetivo, através das Equações 5.11, 5.31 e 5.35.

No entanto as Equação 5.31 e Equação 5.35 foram obtidas para o equilíbrio da quantidade de movimento (EQM) para números de Reynolds 146, 367 e 687 e para o equilíbrio de caudal mássico (ECM) para números de Reynolds 1224, 1710 e 2125 que podem ser majoradas de modo a garantirem a estanquidade, respetivamente.

Em relação à espessura do jato, não foi visível nos resultados da velocidade média de admissão na porta que este tivesse influência, este comportamento foi visível em várias análises. No caso da Equação 5.11, nota-se que esta não depende da espessura enquanto nas Equação 5.31 e Equação 3.35 elas dependem da espessura, mas este tem um peso na expressão relativamente baixo.

Foi ainda possível observar que para números de Reynolds entre 1710 e 2125, o ângulo do jato não influencia os resultados obtidos da velocidade média de admissão na porta, enquanto que para o número de Reynolds de 1224 já se nota alguma influência, pelo que a cortina tem um comportamento diferente em relação aos números de Reynolds mais baixos. Este resultado vai de encontro ao referido anteriormente em que o jato se mantém em regime de transição de baixo número de Reynolds até aos números de Reynolds de quase 1000. Assim nesta dissertação verificou-se válido esse resultado.

Depois de analisar os resultados obtidos em modelo de escala reduzida com água salgada é possível validar o uso das cortinas de ar, para diminuir os caudais de admissão na abertura da porta.

## **6.2 *Desenvolvimentos futuros***

De forma a desenvolver este trabalho é aconselhado realizar ensaios para ângulos mais elevados, para se avaliar até que ponto estes não irão influenciar os resultados com números de Reynolds elevados, no entanto deve-se ter em atenção a possibilidade de se perder a estanquidade da cortina nas ombreiras da porta, por ter potencial para gerar zonas do vão que não são protegidas pela cortina.

Depois de serem avaliados todos os resultados em regime isotérmico, estes deverão ser repetidos, mas desta vez com ensaios em água salgada, simulando uma situação comum de diferenças de temperatura.

De modo a complementar estes estudos considera-se relevante que venham a ser feitas simulações computacionais para validar os resultados obtidos com a finalidade de otimizar ensaios à escala real.

## 7 BIBLIOGRAFIA

- [1] Hector Giraldez Garcia, “Numerical Study and Experimental Optimization of Air Curtains,” *Centre Tecnològic de Transferència de Calor; Department de Màquines i Motors Tèrmics; Universitat Politècnica de Catalunya*, vol. Doctoral T, 2015.
- [2] J. C. Gonçalves, J. J. Costa, A. R. Figueiredo, and A. M. G. Lopes, “CFD Modelling of Aerodynamic Sealing by Vertical and Horizontal Air Curtains,” *Energy Build.*, vol. 52, pp. 153–160, 2012.
- [3] J. J. Costa, L. A. Oliveira, and M. C. G. Silva, “Energy Savings by Aerodynamic Sealing With a Downward-Blowing Plane Air Curtain-A Numerical Approach,” *Energy Build.*, vol. 38, no. 10, pp. 1182–1193, 2006.
- [4] J. C. Viegas, “Saltwater Experiments With Air Curtains for Smoke Control in the Event of Fire,” *Journal of Building Engineering*, vol. 8, pp. 243–248, 2016.
- [5] G. Krajewski, “EFFICIENCY OF AIR CURTAINS USED FOR SEPARATING SMOKE FREE,” *13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, pp. 26–28, 2013.
- [6] F. Memarzadeh and A. Manning, “Comparison of Operating Room Ventilation Systems in the Protection of the Surgical Site,” *ASHRAE Journal*, no. Lewis 1993, pp. 1–13, 2002.
- [7] F. Memarzadeh and J. Jiang, “Methodology for Minimizing Risk from Airborne Organisms in Hospital Isolation Rooms,” *ASHRAE Transactions*, vol. 106, 2000.
- [8] T. Lim, J. Cho, and B. S. Kim, “Predictions and Measurements of the Stack Effect on Indoor Airborne Virus Transmission in a High-rise Hospital Building,” *Building and Environment*, vol. 46, no. 12, pp. 2413–2424, 2011.
- [9] L. P. C. Neto, *Estudo de Sistemas de Vedação Aerodinâmica do Tipo Cortina de Ar*. Por Luís Paulo Coelho Neto, Dissertação para Doutoramento em Engenharia Mecânica (Aerodinâmica), Coimbra, FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA ESTUDO, 2006.
- [10] Z. J. Zhai and A. L. Osborne, “Simulation-based Feasibility Study of Improved Air Conditioning Systems for Hospital Operating Room,” *Frontiers of Architectural Research*, vol. 2, no. 4, pp. 468–475, 2013.
- [11] T. T. Chow and X. Y. Yang, “Performance of Ventilation System in a Non-Standard Operating Room,” *Building and Environment*, vol. 38, no. 12, pp. 1401–1411, 2003.

- [12] G. Cook; and D. Int-hout, "In the Hospital Operating Room," *ASHRAE Journal*, no. March, 2009.
- [13] Y. C. Shih, A. S. Yang, and C. W. Lu, "Using Air Curtain to Control Pollutant Spreading for Emergency Management in a Cleanroom," *Building and Environment*, vol. 46, no. 5, pp. 1104–1114, 2011.
- [14] G. Cook and D. Int-Hout, "A New Idea that is 40 years old--Air Curtain Hospital Operating Room Systems," *ASHRAE Transactions*, vol. 113, no. 1, pp. 349–357, 2007.
- [15] J. Swift, E. Avis, B. Millard, and T. M. Lawrence, "Air Distribution Strategy Impact on Operating Room Infection Control," *Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors*, 2007.
- [16] M. Hyvärinen, K. Hagström, I. Grönvall, and P. Hynynen, "Reducing Bartenders Exposure to ETS by a Local Ventilation – Field Evaluation of the Solution," pp. 133–137, 2002.
- [17] H. Skis, "Efficient Ventilation : Displacement Ventilation and Air Curtain Zoning," pp. 1–17.
- [18] J. E. Rydock, j.P.; Hestad, T.; Haugen, H.; Skaret, "An Isothermal Air Curtain for Isolation of Smoking Areas in Restaurants," 2000.
- [19] X. Luo, Z. Gu, C. Yu, T. Ma, and K. Kase, "Efficacy of an Air Curtain System for Local Pit Environmental Control for Relic Preservation in Archaeology Museums," *Indoor and Built Environment*, vol. 25, no. 1, pp. 29–40, 2016.
- [20] L. de Santoli, F. Cumo, and M. Mariotti, "Air Curtain as a Barrier Against Pollutants in Cultural Heritage: a Case Study," in *Air Pollution XIV*, 2006, vol. 1, pp. 385–392.
- [21] M. Amin, H. K. Navaz, D. Dabiri, and R. Faramarzi, "Air Curtains of Open Refrigerated Display Cases Revisited: A New Technique for Infiltration Rate Measurements," *WIT Transactions on Engineering Sciences*, vol. 61, pp. 179–190, 2008.
- [22] S. R. Traboulsi, A. Hammoud, and M. F. Khalil, "Effects of Jet Inclination Angle and Geometrical Parameters on Air Curtain Performance," *ASHRAE Transactions*, vol. 115 PART 2, pp. 617–629, 2009.
- [23] K. ; M. P. Loubière;, "Educing Coherent Eddy Structures in Air Curtain Systems," *Letters in Applied Microbiology*, vol. 2705, pp. 4–6, 2005.
- [24] F. K. Lu and J. E. Fernandes, "Visualizing the Flow Induced By an Air Curtain Over a Mannequin Using Stereo Particle Image Velocimetry," *ISFV13 - 13th International Symposium on Flow Visualization*, pp. 1–10, 2008.
- [25] D. Frank and P. F. Linden, "The effects of an Opposing Buoyancy Force on the Performance of an Air Curtain in the Doorway of a Building," *Energy & Buildings*, vol. 96, pp. 20–29, 2015.
- [26] R. D. Blevins, *Applied Fluid Dynamics Handbook*. Van Nostrand Reinhold, 1984.

## 8 ANEXOS

### Estudo de Erros Experimentais

Fez-se um estudo dos erros e medições experimentais, nestes ensaios a medições de mais impacto são.

- Área do bocal do jato;
- Caudal do jato;
- Velocidade inicial do jato;
- Caudal de exaustão;
- Ângulo do jato.

Note-se que os caudais do contaminante são bastante inferiores aos caudais de exaustão, pelo que neste caso não existe relevância na determinação do erro desse parâmetro.

#### Área do bocal do jato

Iniciando-se pela área do bocal do jato, através de uma multiplicação simples da espessura do bocal pelo comprimento total do jato, tendo estes sido medido com uma régua com  $\epsilon = 0.0005$  m e um apalpa folgas com  $\epsilon = 0.00025$  m.

Sendo variância:

$$S^2(X) = \frac{1}{3} \times \epsilon_X^2$$

Tem-se que as variâncias das variáveis são:

**Quadro A 1 – Variâncias do equipamento usado na determinação da área.**

$S^2(l)$	8,33E-08
$S^2(e)$	2,08E-08

A variância da área é dada por uma função de duas variáveis pelo que:

$$S^2(A) = \frac{\partial A(e, l)}{\partial l} \times S^2(l) + \frac{\partial A(e, l)}{\partial e} \times S^2(e) = e \times S^2(l) + l \times S^2(e)$$

Por fim, a incerteza combinada,

$$u(A) = k \times \sqrt{S^2(A)}$$

Considerando que usualmente as recomendações (ISO, 1993 e IPQ, 1993) vão no sentido de k tomar o valor 2 e tendo em conta as dimensões do jato:

**Quadro A 2 – Erros de medição da área.**

e [m]	l [m]	S <sup>2</sup> (Q)	A [m <sup>2</sup> ]	u(A) [m <sup>2</sup> ]	%
0,00125	0,1456	4,42E-10	0,000182	± 0,0000420	23%
0,00250	0,1456	4,42E-10	0,000364	± 0,0000421	12%
0,00375	0,1456	4,43E-10	0,000546	± 0,0000421	8%
0,00500	0,1456	4,44E-10	0,000728	± 0,0000421	6%

### Caudal do jato

O caudal do jato é obtido através da equação:

$$Q_{\text{jato}} = \frac{\text{Volume de água [m}^3\text{]}}{\text{Tempo [s]}}; [\text{m}^3/\text{s}]$$

Tendo estes sido o volume medido com um contador de  $\epsilon = 0.000125$  m e um cronometro de  $\epsilon = 0.01$  s.

Sendo variância:

$$S^2(X) = \frac{1}{3} \times \epsilon_X^2$$

Tem-se que as variâncias das variáveis são:

**Quadro A 3 – Variâncias do equipamento usado na determinação do caudal do jato.**

S <sup>2</sup> (V)	5,21E-09
S <sup>2</sup> (t)	3,33E-05

A variância da área é dada por uma função de duas variáveis pelo que:

$$S^2(Q_{\text{jato}}) = \frac{\partial Q_{\text{jato}}(V, t)}{\partial V} \times S^2(V) + \frac{\partial Q_{\text{jato}}(V, t)}{\partial t} \times S^2(t) = \frac{1}{t} \times S^2(V) + \left(-\frac{V}{t^2}\right)^2 \times S^2(t)$$

Por fim, a incerteza combinada,

$$u(A) = k \times \sqrt{S^2(A)}$$

Considerando que usualmente as recomendações (ISO, 1993 e IPQ, 1993) vão no sentido de k tomar o valor 2 e tendo em conta as dimensões do jato:

Quadro A 4 – Erros de medição do caudal do jato.

t [s]	V [m <sup>3</sup> ]	S <sup>2</sup> (Q <sub>jato</sub> )	Q <sub>jato</sub> [m <sup>3</sup> /s]	u(Q <sub>jato</sub> ) [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>jato</sub> [L/s]	u(Q <sub>jato</sub> ) [L/s]	%
369,05	0,032	3,82E-14	8,67E-05	± 3,91E-07	0,0867	± 0,000391	0,5%
380,50	0,037	3,60E-14	9,72E-05	± 3,79E-07	0,0972	± 0,000379	0,4%
597,58	0,208	1,46E-14	3,48E-04	± 2,42E-07	0,3481	± 0,000242	0,1%
652,93	0,095	1,22E-14	1,45E-04	± 2,21E-07	0,1455	± 0,000221	0,2%
652,93	0,21	1,22E-14	3,22E-04	± 2,21E-07	0,3216	± 0,000221	0,1%
652,93	0,016	1,22E-14	2,45E-05	± 2,21E-07	0,0245	± 0,000221	0,9%
676,77	0,035	1,14E-14	5,17E-05	± 2,13E-07	0,0517	± 0,000213	0,4%
752,88	0,035	9,19E-15	4,65E-05	± 1,92E-07	0,0465	± 0,000192	0,4%
1163,99	0,035	3,84E-15	3,01E-05	± 1,24E-07	0,0301	± 0,000124	0,4%

### Velocidade inicial do jato

A velocidade inicial do jato é obtida através da equação:

$$u_0 = \frac{Q_{jato}[m^3/s]}{A_{jato}[m^2]}; [m/s]$$

Considerando u(Q<sub>jato</sub>) e u(A)

Sendo variância:

$$S^2(X) = \frac{1}{3} \times u(X)^2$$

Tem-se que as variâncias das variáveis são:

A variância da área é dada por uma função de duas variáveis pelo que:

Quadro A 5 – Variâncias dos parâmetros usados na determinação das velocidades do jato.

S <sup>2</sup> (A)	S <sup>2</sup> (Q <sub>jato</sub> )
5,89045E-10	1,94E-14
5,89045E-10	5,10E-14
5,89045E-10	5,13E-15
5,89045E-10	4,80E-14
5,89045E-10	1,52E-14
5,89045E-10	1,23E-14
5,89566E-10	1,63E-14
5,90434E-10	1,63E-14
5,91649E-10	1,63E-14

$$\begin{aligned}
 S^2(u_0) &= \frac{\partial u_0(Q_{jato}, A)}{\partial Q_{jato}} \times S^2(Q_{jato}) + \frac{\partial u_0(Q_{jato}, A)}{\partial A} \times S^2(A) \\
 &= \frac{1}{A} \times S^2(Q_{jato}) + \left(-\frac{Q_{jato}}{A^2}\right)^2 \times S^2(A)
 \end{aligned}$$

Por fim, a incerteza combinada,

$$u(A) = k \times \sqrt{S^2(A)}$$

Considerando que usualmente as recomendações (ISO, 1993 e IPQ, 1993) vão no sentido de k tomar o valor 2 e tendo em conta as dimensões do jato:

**Quadro A 6 – Erros de medição das velocidades do jato.**

A [m <sup>2</sup> ]	Q <sub>jato</sub> [m <sup>3</sup> /s]	S <sup>2</sup> (u <sub>0</sub> )	u <sub>0</sub> [m/s]	U(u <sub>0</sub> ) [m/s]	%
0,000182	0,0000535	0,00154	0,29	± 0,078	27%
0,000182	0,0001003	0,00540	0,55	± 0,147	27%
0,000182	0,0001787	0,01714	0,98	± 0,262	27%
0,000182	0,0002497	0,03347	1,37	± 0,366	27%
0,000182	0,0003103	0,05169	1,70	± 0,455	27%
0,000182	0,0000213	0,00024	0,12	± 0,031	27%
0,000364	0,0000536	0,00010	0,15	± 0,020	13%
0,000546	0,0000536	0,00002	0,10	± 0,009	9%
0,000728	0,0000536	0,00001	0,07	± 0,005	7%

### Caudal de exaustão

O caudal do jato é obtido através da equação:

$$Q_{jato} = \frac{\text{Volume de água [m}^3\text{]}}{\text{Tempo [s]}}; [\text{m}^3/\text{s}]$$

Tendo estes sido o volume medido com uma vasilha de  $\epsilon = 0.00025$  m e um cronometro de  $\epsilon = 0.01$  s, no então, pela tendo em conta que o ensaio é visual, verificou-se que os erros associados à medição do tempo são de 1s, ou seja,  $\epsilon = 1,00$  s

Sendo variância:

$$S^2(X) = \frac{1}{3} \times \epsilon_x^2$$

Tem-se que as variâncias das variáveis são:

**Quadro A 7 – Variâncias do equipamento usado na determinação do caudal de exaustão.**

S <sup>2</sup> (V)	2,08E-08
S <sup>2</sup> (t)	3,33E-01

A variância da área é dada por uma função de duas variáveis pelo que:

$$S^2(Q_{\text{exaustão}}) = \frac{\partial Q_{\text{exaustão}}(V, t)}{\partial V} \times S^2(V) + \frac{\partial Q_{\text{exaustão}}(V, t)}{\partial t} \times S^2(t)$$

$$= \frac{1}{t} \times S^2(V) + \left(-\frac{V}{t^2}\right)^2 \times S^2(t)$$

Por fim, a incerteza combinada,

$$u(A) = k \times \sqrt{S^2(A)}$$

Considerando que usualmente as recomendações (ISO, 1993 e IPQ, 1993) vão no sentido de k tomar o valor 2 e tendo em conta as dimensões do jato:

**Quadro A 8 – Erros de medição do caudal de exaustão parte 1.**

t [s]	V [m <sup>3</sup> ]	S <sup>2</sup> (Q <sub>exaustão</sub> )	Q <sub>exaustão</sub> [m <sup>3</sup> /s]	u(Q <sub>exaustão</sub> ) [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>exaustão</sub> [L/s]	u(Q <sub>exaustão</sub> ) [L/s]	%
4,77	0,006	1,15E-09	1,26E-03 ±	6,78E-05	1,2584 ±	0,0678	5%
4,88	0,006	1,09E-09	1,23E-03 ±	6,60E-05	1,2300 ±	0,0660	5%
4,89	0,006	1,08E-09	1,23E-03 ±	6,58E-05	1,2270 ±	0,0658	5%
4,91	0,006	1,07E-09	1,22E-03 ±	6,55E-05	1,2225 ±	0,0655	5%
5,03	0,006	1,01E-09	1,19E-03 ±	6,36E-05	1,1933 ±	0,0636	5%
5,03	0,006	1,01E-09	1,19E-03 ±	6,35E-05	1,1919 ±	0,0635	5%
5,07	0,006	9,90E-10	1,18E-03 ±	6,29E-05	1,1825 ±	0,0629	5%
5,14	0,006	9,60E-10	1,17E-03 ±	6,20E-05	1,1673 ±	0,0620	5%
5,52	0,006	8,12E-10	1,09E-03 ±	5,70E-05	1,0866 ±	0,0570	5%
5,52	0,006	8,12E-10	1,09E-03 ±	5,70E-05	1,0862 ±	0,0570	5%
5,56	0,006	7,99E-10	1,08E-03 ±	5,66E-05	1,0791 ±	0,0566	5%
5,56	0,006	7,98E-10	1,08E-03 ±	5,65E-05	1,0784 ±	0,0565	5%
5,57	0,006	7,97E-10	1,08E-03 ±	5,65E-05	1,0776 ±	0,0565	5%
5,57	0,006	7,97E-10	1,08E-03 ±	5,65E-05	1,0776 ±	0,0565	5%
5,57	0,006	7,96E-10	1,08E-03 ±	5,64E-05	1,0772 ±	0,0564	5%
5,57	0,006	7,96E-10	1,08E-03 ±	5,64E-05	1,0772 ±	0,0564	5%
6,70	0,006	5,24E-10	8,96E-04 ±	4,58E-05	0,8958 ±	0,0458	5%
7,09	0,006	4,62E-10	8,47E-04 ±	4,30E-05	0,8465 ±	0,0430	5%
7,13	0,006	4,56E-10	8,42E-04 ±	4,27E-05	0,8415 ±	0,0427	5%
7,15	0,006	4,53E-10	8,39E-04 ±	4,26E-05	0,8387 ±	0,0426	5%
7,30	0,006	4,33E-10	8,21E-04 ±	4,16E-05	0,8215 ±	0,0416	5%
7,38	0,006	4,23E-10	8,13E-04 ±	4,12E-05	0,8134 ±	0,0412	5%
7,52	0,006	4,05E-10	7,97E-04 ±	4,03E-05	0,7974 ±	0,0403	5%
7,53	0,006	4,05E-10	7,97E-04 ±	4,02E-05	0,7966 ±	0,0402	5%

Quadro A 9 – Erros de medição do caudal de exaustão parte 2.

t [s]	V [m <sup>3</sup> ]	S <sup>2</sup> (Q <sub>exaustão</sub> )	Q <sub>exaustão</sub> [m <sup>3</sup> /s]	u(Q <sub>exaustão</sub> ) [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>exaustão</sub> [L/s]	u(Q <sub>exaustão</sub> ) [L/s]	%
8,42	0,006	3,17E-10	7,12E-04 ±	3,56E-05	0,7123 ±	0,0356	5%
8,53	0,006	3,09E-10	7,04E-04 ±	3,52E-05	0,7036 ±	0,0352	5%
8,79	0,006	2,89E-10	6,82E-04 ±	3,40E-05	0,6823 ±	0,0340	5%
8,89	0,006	2,83E-10	6,75E-04 ±	3,36E-05	0,6751 ±	0,0336	5%
9,06	0,006	2,71E-10	6,62E-04 ±	3,29E-05	0,6620 ±	0,0329	5%
9,61	0,006	2,40E-10	6,25E-04 ±	3,10E-05	0,6246 ±	0,0310	5%
9,80	0,006	2,30E-10	6,12E-04 ±	3,03E-05	0,6120 ±	0,0303	5%
10,39	0,006	2,03E-10	5,77E-04 ±	2,85E-05	0,5775 ±	0,0285	5%
10,54	0,006	1,97E-10	5,69E-04 ±	2,81E-05	0,5693 ±	0,0281	5%
11,17	0,006	1,75E-10	5,37E-04 ±	2,64E-05	0,5373 ±	0,0264	5%
12,19	0,006	1,46E-10	4,92E-04 ±	2,41E-05	0,4924 ±	0,0241	5%
12,43	0,006	1,40E-10	4,83E-04 ±	2,37E-05	0,4829 ±	0,0237	5%
13,59	0,006	1,16E-10	4,42E-04 ±	2,16E-05	0,4416 ±	0,0216	5%
13,81	0,006	1,13E-10	4,34E-04 ±	2,12E-05	0,4344 ±	0,0212	5%
14,29	0,006	1,05E-10	4,20E-04 ±	2,05E-05	0,4199 ±	0,0205	5%
14,95	0,006	9,56E-11	4,01E-04 ±	1,96E-05	0,4012 ±	0,0196	5%
16,89	0,006	7,45E-11	3,55E-04 ±	1,73E-05	0,3552 ±	0,0173	5%
17,73	0,006	6,75E-11	3,38E-04 ±	1,64E-05	0,3383 ±	0,0164	5%
18,24	0,006	6,37E-11	3,29E-04 ±	1,60E-05	0,3289 ±	0,0160	5%
18,36	0,006	6,29E-11	3,27E-04 ±	1,59E-05	0,3268 ±	0,0159	5%
22,99	0,006	3,99E-11	2,61E-04 ±	1,26E-05	0,2610 ±	0,0126	5%
24,56	0,006	3,49E-11	2,44E-04 ±	1,18E-05	0,2443 ±	0,0118	5%
25,53	0,006	3,23E-11	2,35E-04 ±	1,14E-05	0,2350 ±	0,0114	5%
28,54	0,006	2,58E-11	2,10E-04 ±	1,02E-05	0,2102 ±	0,0102	5%
29,58	0,006	2,40E-11	2,03E-04 ±	9,79E-06	0,2029 ±	0,0098	5%
30,80	0,006	2,21E-11	1,95E-04 ±	9,40E-06	0,1948 ±	0,0094	5%
31,09	0,006	2,17E-11	1,93E-04 ±	9,31E-06	0,1930 ±	0,0093	5%
115,70	0,006	1,56E-12	5,19E-05 ±	2,50E-06	0,0519 ±	0,0025	5%
144,01	0,006	1,00E-12	4,17E-05 ±	2,00E-06	0,0417 ±	0,0020	5%

### Ângulo do jato

Os ângulos têm uma incerteza do operador de  $u(\alpha) = \pm 1^\circ$ .