



Levi António Gusmão Carrasco

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

**Estudo experimental da limitação de
contaminantes através de jatos planos
combinados com exaustão de ar**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

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

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

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Maria Paulina S. F. Faria Rodrigues

Arguente: Prof. Doutor José Manuel Paixão Conde

Vogal: Prof. Doutor Daniel Aelenei



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

[novembro de 2019]

**Estudo experimental da limitação de contaminantes através de jatos
planos combinados com exaustão de ar**

Copyright © Levi António Gusmão Carrasco, 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.

A AGRADECIMENTOS

Desde já, manifesto o meu agradecimento a todos que, de algum modo, me ajudaram na realização desta dissertação.

Em primeiro lugar, quero expressar o meu agradecimento ao Doutor João Viegas que, para além de me ter dado a oportunidade de integrar este projeto de investigação, me prestou todo o apoio ao longo da dissertação e me transmitiu, pacientemente, todos os conhecimentos teóricos e científicos sobre esta matéria.

Deixo o meu agradecimento, também, ao Professor Doutor Daniel Aelenei pelo convite e confiança para integrar este projeto.

Gostaria, igualmente, de salientar o meu agradecimento ao Eng.º Luís Pinto por todo o contributo e ajuda na realização dos ensaios experimentais, quer pelo seu apoio em questões de manuseamento de equipamento, quer pelo companheirismo que demonstrou ao longo desta dissertação.

Quero agradecer também ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil por me ter acolhido e me ter dado todas as condições para poder realizar este trabalho e agradecer a todo o pessoal do departamento do CIC (Centro de Instrumentação Científica) pela sua simpatia e ajuda.

Quero deixar um especial agradecimento à minha namorada, Rute Monteiro, que sempre me apoiou e incentivou, não só na realização da tese, mas ao longo destes últimos 3 anos.

Por último, deixo um enorme agradecimento à minha família, pais e irmã, por todo o apoio, compreensão e paciência que tiveram para comigo ao longo do meu percurso académico.

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 que quero deixar aqui o meu agradecimento por me terem integrado.

RESUMO

Com o objetivo de melhorar a qualidade de ar no interior dos espaços, cada vez mais se recorre à utilização de cortinas de ar, que consistem num dispositivo mecânico que gera um jato de ar no plano da porta, funcionando com uma barreira aerodinâmica capaz de minimizar as trocas de energia e massa entre dois espaços contíguos.

Neste trabalho apresenta-se o estudo experimental sobre a aplicação de cortinas de ar de jato plano vertical e descendente com o objetivo de assegurar a estanquidade a contaminantes (neste caso, fumo). Para o efeito, foram realizados ensaios em regime isotérmico, à escala real, em que a cortina de ar está situada entre duas zonas diferentes, uma limpa e outra contaminada. Foram testados e avaliados diferentes parâmetros geométricos e dinâmicos, tais como a velocidade, espessura e ângulo no bocal do jato, associados a um caudal mínimo de exaustão no interior do compartimento contaminado, capaz de assegurar a estanquidade da cortina de ar, na tentativa de encontrar uma relação entre a velocidade média de admissão de ar na porta e a velocidade do jato.

Através dos resultados experimentais obtidos demonstrou-se que, quando corretamente implementadas, as cortinas de ar proporcionam uma vedação aerodinâmica adequada para baixos números de Reynolds do jato plano de ar. Foi, ainda, obtida uma expressão que relaciona os parâmetros do jato (velocidade, espessura e ângulo do bocal) com a velocidade média de admissão na porta.

Palavras-chave: Cortina de ar; jato plano; barreira aerodinâmica; estanquidade a contaminantes; qualidade do ar; número de Reynolds; Nanoguard2ar.

ABSTRACT

In order to improve indoor air quality, the use of air curtains is increasingly being used, which consist in a mechanical device that generates an air jet in the door plane operating as an aerodynamic barrier capable of minimizing energy and mass exchanges between two adjoining spaces.

This research work presents the experimental study on the application of vertical and descending flat jet air curtains in order to ensure the tightness of contaminants (in this case, cold smoke). For this purpose, full-scale isothermal testing was carried out in which the air curtain is located between two different zones, one clean and the other contaminated. Different geometrical and dynamic parameters, such as the velocity, thickness and angle in the jet nozzle, were tested and evaluated, associated with a minimum exhaust rate flow capable of ensuring the tightness of the air curtain, in an attempt to find a relationship between the average intake speed air in the door and the speed of the jet.

From the results obtained, it was demonstrated that, when properly implemented, air curtains provide an adequate aerodynamic sealing at low Reynolds Number jet flow. It was obtained a general physical law that relates the jet parameters (velocity, thickness and angle at the nozzle) with the average velocity through the opening.

Keywords: Air curtain; flat jet; aerodynamic barrier; tightness of contaminants; air quality; Reynolds number; Nanoguard2ar.

ÍNDICE

RESUMO.....	I
ABSTRACT.....	III
ÍNDICE.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE QUADROS.....	IX
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO E ENQUADRAMENTO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2. ESTADO DO CONHECIMENTO	5
2.1 BREVE DESCRIÇÃO.....	5
2.2 CONCEITOS GENÉRICOS SOBRE CORTINAS DE AR	5
2.3 JATOS PLANOS	9
2.3.1 JATOS LAMINARES.....	10
2.3.2 JATOS TURBULENTOS	10
2.4 ESTUDOS SOBRE CORTINAS DE AR	11
3. METODOLOGIA E RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	15
3.1 BREVE DESCRIÇÃO	15
3.2 EQUIPAMENTO E COMPARTIMENTO EXPERIMENTAL	15
3.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO	17
3.4 AJUSTAMENTO DO MÉTODO DE ENSAIO	21

3.5 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	21
4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS	27
4.1 BREVE DESCRIÇÃO	27
4.2 ANÁLISE TEÓRICA	27
4.3 ANÁLISE DE RESULTADOS	30
4.3.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DO JATO	30
4.3.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO JATO	33
4.3.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM OS ENSAIOS PRECEDENTES	35
4.3.4 FUNÇÃO DE AJUSTAMENTO PELO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS	36
5. CONCLUSÕES	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
ANEXO – ERROS EXPERIMENTAIS.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – USO DE CORTINA DE AR COM O OBJETIVO DE EVITAR A FUGA DE CONTAMINANTES DO COMPARTIMENTO CONTAMINADO PARA O EXTERIOR.	2
FIGURA 2 – COMPORTAMENTO DO AR DO JATO.	7
FIGURA 3 - VISTA GERAL DO COMPARTIMENTO EXPERIMENTAL.	15
FIGURA 4 - COMPARTIMENTO DE ENSAIOS À ESCALA REAL (ADAPTADO DE [6]).	16
FIGURA 5 - PROTÓTIPO DO APARELHO VENTILADOR QUE GERA A CORTINA DE AR: A) VISTA LATERAL; B) VISTA GERAL.	16
FIGURA 6 – LOCALIZAÇÃO DO ANEMÓMETRO DE FIO QUENTE FIXO NO BOCAL DO JATO.	17
FIGURA 7 - CALÇOS PARA AJUSTE DE ESPESSURA DO BOCAL DO JATO PRETENDIDA (OS CALÇOS APRESENTADOS TÊM 10 MM DE ESPESSURA).	18
FIGURA 8 – MEDIÇÃO DA VELOCIDADE NO BOCAL DO JATO ATRAVÉS DO ANEMÓMETRO DE FIO QUENTE (RSPRO RS-1340) E RESPECTIVA ESTRUTURA DE SUPORTE.	19
FIGURA 9 - EXEMPLO DA EQUAÇÃO DA RETA DE TENDÊNCIA DA MÉDIA DE VELOCIDADES REGISTRADA NO ANEMÓMETRO DE FIO QUENTE MÓVEL EM FUNÇÃO DA MÉDIA DE VELOCIDADES REGISTRADA PELO ANEMÓMETRO DE FIO QUENTE DE REFERÊNCIA FIXO.	19
FIGURA 10 - MÁQUINA DE FUMOS UTILIZADA NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS.	20
FIGURA 11 - CORTINA AR DE SUB-DIMENSIONADA (ESQUERDA) E CORTINA DE AR COM VELOCIDADE ÓTIMA DE FUNCIONAMENTO (DIREITA).	21
FIGURA 12 - GRÁFICO DA EQUAÇÃO DE CALIBRAÇÃO.	22
FIGURA 13 – CORTE TRANSVERSAL DO SISTEMA DE JATO PLANO VERTICAL DESCENDENTE.	27
FIGURA 14 - RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE MÉDIA DE ADMISSÃO NA ABERTURA (U_a) E O NÚMERO DE REYNOLDS (Re) PARA JATO DE AR COM 5 MM DE ESPESSURA.	31
FIGURA 15 - RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE MÉDIA DE ADMISSÃO NA ABERTURA (U_a) E O NÚMERO DE REYNOLDS (Re) PARA JATO DE AR COM 10 MM DE ESPESSURA.	31
FIGURA 16 - RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE MÉDIA DE ADMISSÃO NA ABERTURA (U_a) E O NÚMERO DE REYNOLDS (Re) PARA JATO DE AR COM 16,6 MM DE ESPESSURA.	32
FIGURA 17 - RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE MÉDIA DE ADMISSÃO NA ABERTURA (U_a) E O NÚMERO DE REYNOLDS (Re) PARA JATO DE AR COM 16,6 MM DE ESPESSURA.	32

FIGURA 18 - RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE MÉDIA DE ADMISSÃO NA ABERTURA (U_A) E O NÚMERO DE REYNOLDS (Re) DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS, INDIVIDUALIZADOS PELO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DO JATO E PELA ESPESSURA DO BOCAL.....	33
FIGURA 19 - RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE MÉDIA DE ADMISSÃO NA ABERTURA (U_A) E O NÚMERO DE REYNOLDS (Re) DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS, INDIVIDUALIZADOS PELA ESPESSURA DO BOCAL.....	34
FIGURA 20 - RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE MÉDIA DE ADMISSÃO NA ABERTURA (U_A) E O NÚMERO DE REYNOLDS (Re) DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS, INDIVIDUALIZADOS PELA ESPESSURA DO BOCAL.....	34
FIGURA 21 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS ATUAIS E OS RESULTADOS PRECEDENTES.....	36
FIGURA 22 - RESULTADOS COM O AJUSTAMENTO DO MÉTODO DOS MINIMOS QUADRADOS.....	37
FIGURA 23 - RESULTADOS COM O AJUSTAMENTO DO MÉTODO DOS MINIMOS QUADRADOS.....	38
FIGURA 24 - RESULTADOS COM O AJUSTAMENTO DO MÉTODO DOS MINIMOS QUADRADOS, COM OS NOVOS VALORES DE C E D IMPOSTOS NA FUNÇÃO.....	39
FIGURA 25 - RESULTADOS COM O AJUSTAMENTO DO MÉTODO DOS MINIMOS QUADRADOS, COM OS NOVOS VALORES DE C E D IMPOSTOS NA FUNÇÃO.....	39
FIGURA 26 - RESULTADOS COM O AJUSTAMENTO DO MÉTODO DOS MINIMOS QUADRADOS, COM OS NOVOS VALORES DE C, D E E IMPOSTOS NA FUNÇÃO.	40
FIGURA 27 - RESULTADOS COM O AJUSTAMENTO DO MÉTODO DOS MINIMOS QUADRADOS, COM OS NOVOS VALORES DE C, D E E IMPOSTOS NA FUNÇÃO.	41
FIGURA 28 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS AJUSTADOS COM A VELOCIDADE MÉDIA DO ESCOAMENTO NA PORTA (U_A) EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO JATO NO BOCAL (U_0).	42

ÍNDICE DE QUADROS

QUADRO 1 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM A CORTINA DE AR INATIVA.	22
QUADRO 2 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA ESTANQUIDADE DA CORTINA DE AR COM 5 MM DE ESPESSURA.	23
QUADRO 3 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA ESTANQUIDADE DA CORTINA DE AR COM 10 MM DE ESPESSURA.	24
QUADRO 4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA ESTANQUIDADE DA CORTINA DE AR COM 16,6 MM DE ESPESSURA.	25
QUADRO 5 - VALORES DAS VARIÁVEIS CALCULADOS PELO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS.	37
QUADRO 6 - VALORES DAS VARIÁVEIS CALCULADOS PELO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS.	38
QUADRO 7 - VALORES DAS VARIÁVEIS CALCULADOS PELO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS.	40
QUADRO 8 - CÁLCULO DE INCERTEZAS NA MEDIÇÃO DA ESPESSURA DO BOCAL DO JATO.	50
QUADRO 9 - CÁLCULO DE INCERTEZAS NA MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO BOCAL DO JATO DE AR PARA A ESPESSURA DE 5 MM.	52
QUADRO 10 - CÁLCULO DE INCERTEZAS NA MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO BOCAL DO JATO DE AR PARA A ESPESSURA DE 10 MM.	52
QUADRO 11 - CÁLCULO DE INCERTEZAS NA MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO BOCAL DO JATO DE AR PARA A ESPESSURA DE 16,6 MM.	53

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

A*	Constante que depende da geometria das condições iniciais
A_p	Área da entrada/porta [m ²]
b₀	Espessura do bocal do jato de ar [m]
D_m	Módulo de deflexão
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
H	Altura da entrada/porta [m]
h	Comprimento da cortina [m]
J	Quantidade de movimento [m ⁴ /s ²]
M	Caudal mássico [m ³ /s]
Q_e	Caudal de exaustão [m ³ /s]
Re	Número de Reynolds
u₀	Velocidade média inicial no bocal do jato [m/s]
u_a	Velocidade média de admissão na abertura da porta [m/s]
w	Largura da entrada/porta [m]
x	Distância da origem do jato na direção central do jato [m]
y	Distância perpendicular do eixo x e ao desenvolvimento do jato [m]
α₀	Ângulo inicial do jato de ar [°]
α_f	Ângulo de impacto do jato com o solo [°]
ΔP	Diferença de pressão [Pa]
v	Viscosidade dinâmica [Pa.s]
ρ	Massa volúmica [kg/m ³]

LNEC Laboratório Nacional de Engenharia Civil

UMA Unidade de Metrologia Aplicada

1. INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E ENQUADRAMENTO

Com o intuito de reduzir e controlar transferências de calor e massa, bem como de reduzir a dispersão de poluentes no ar entre duas zonas distintas, a utilização de sistemas de vedação aerodinâmica utilizando cortinas de ar resultantes da ação de jatos tem vindo a conhecer uma utilização cada vez mais crescente. Uma das grandes vantagens da utilização deste tipo de sistema passa por as cortinas de ar serem transparentes e penetráveis, ao contrário das barreiras físicas.

Existem várias aplicações deste conceito com o objetivo de evitar a propagação de contaminantes, desde salas de cirurgia, controlo do fumo de tabaco, proteção de obras de arte em museus e património cultural, vitrines refrigeradas abertas, a controlo de insetos.

Este estudo enquadra-se no âmbito do projeto europeu Nanoguard2ar, cujo objetivo principal é desenvolver, testar, validar e demonstrar 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. Este estudo experimental vem no seguimento de outros trabalhos realizados dentro deste âmbito. Foram feitos testes em que se comprovou que a estanquidade aerodinâmica pode ser obtida para equipamentos de teste à escala reduzida [1], tendo sido desenvolvidas as correspondentes leis físicas. Foi também mostrado que, através de estudos numéricos (nomeadamente Dinâmica de Fluidos Computacional), a estanquidade aerodinâmica pode ser alcançada para modelos à escala real [2]. Foram, ainda, realizados estudos do uso de cortinas de ar combinadas com extração de ar do interior do compartimento contaminado, para controlo de fumos em caso de incêndio (ambiente não isotérmico), tendo sido provada a sua eficiência e obtidas as respetivas leis físicas [8][10]. Posto isto, neste estudo, pretende-se analisar a utilização de cortinas de ar com baixos números de Reynolds do jato plano associadas a um caudal de exaustão de ar com um modelo à escala real, em regime isotérmico, que é considerado uma condição limite. Deste modo, foram impostos diferentes parâmetros geométricos e dinâmicos no bocal do jato de ar.

Podem ser adotadas diferentes formas de instalação das cortinas de ar de modo a se alcançar um controlo eficiente de contaminantes. No entanto, neste trabalho experimental, será apenas abordado um caso de estudo. Na figura 1, apresenta-se um esboço que ilustra o funcionamento das cortinas de ar em que o requisito passa por evitar a fuga dos contaminantes do compartimento contaminado para o exterior.

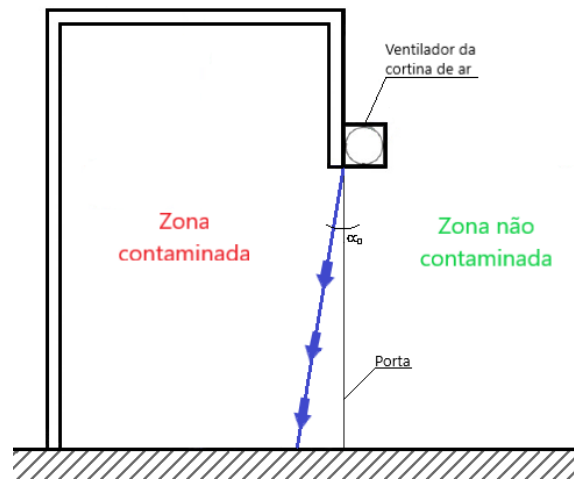


Figura 1 – Uso de cortina de ar com o objetivo de evitar a fuga de contaminantes do compartimento contaminado para o exterior.

1.2 OBJETIVOS

O estudo apresentado na presente dissertação enquadra-se no âmbito do projeto *Nanoguard2ar*, que tem como principal objetivo desenvolver uma solução de engenharia inovadora baseada em tecnologia de nano-materiais juntamente com tecnologia de cortinas de ar, através de jatos ajustáveis, funcionando como uma barreira estanque a contaminações de micróbios (fungos, bactérias,...) permitindo garantir a qualidade do ar no interior dos edifícios sendo, simultaneamente, transparente e penetrável, ao contrário das paredes de vidro ou qualquer outro tipo de barreira sólida frequentemente utilizadas. Deste modo, pretende-se demonstrar, em primeiro lugar, que as cortinas de ar podem providenciar uma estanquidade aerodinâmica eficiente para baixos números de Reynolds do jato de ar. Portanto, no objetivo deste estudo experimental, será feita a definição das características do jato plano que possibilitam essa estanquidade aerodinâmica, garantindo baixos caudais de exaustão do compartimento contaminado reduzindo, deste modo, os custos do tratamento do ar. Para a definição das características da cortina, os ensaios foram realizados com recurso a um modelo à escala real, em regime isotérmico. Outro dos objetivos que se pretende atingir passa por obter uma expressão com recurso ao método dos mínimos quadrados que, através dos resultados experimentais obtidos, possibilite prever o nível da estanquidade aerodinâmica da cortina de ar, para um caudal de exaustão mínimo.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em 5 capítulos diferentes que, por sua vez, podem ainda ser divididos em subcapítulos, que são apresentados de seguida.

Neste capítulo introdutório foi dada uma visão geral dos objetivos e do plano do trabalho, tendo em conta o problema principal que é alvo deste estudo.

No capítulo 2, numa primeira fase, serão apresentados alguns conceitos base inerentes à temática de cortinas de ar, nomeadamente, as suas características e tipologias e alguns modelos físicos utilizados para descrever o comportamento do jato das cortinas de ar. Neste capítulo serão, também, referidos e analisados, ainda que de um modo sumário, trabalhos de investigação experimentais e/ou numéricos desenvolvidos ao longo do tempo, com abordagens próximas ao estudo aqui apresentado, ou seja, com o objetivo de evitar a propagação de contaminantes.

No capítulo 3, para além de ser feita a descrição da instalação experimental e do principal equipamento utilizado, será também abordada toda a metodologia adotada na realização dos ensaios. Os ensaios foram feitos com diferentes velocidades, espessuras e ângulos do jato (e, por conseguinte, diferentes números de Reynolds – diferentes regimes de escoamento), sempre com o caudal de exaustão minimizado. Importa referir que toda a avaliação da estanquidade da cortina de ar foi feita visualmente. Neste capítulo, serão, ainda, apresentados todos os registos dos resultados experimentais. Os resultados expostos permitem identificar quais as características que o jato deve ter de modo a ser assegurada a estanquidade da cortina de ar, em conjunto com um determinado caudal de exaustão mínimo no interior do compartimento.

De seguida, será feita a discussão dos resultados experimentais obtidos, no capítulo 4. Neste, os resultados estão apresentados graficamente com o intuito de facilitar a análise da influência dos diferentes parâmetros do jato de ar, tendo sido obtida uma relação entre a velocidade média inicial no jato e a velocidade média de admissão da porta.

Por fim, no capítulo 5, serão descritas as principais conclusões retiradas deste estudo experimental.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1 BREVE DESCRIÇÃO

Neste capítulo, pretende-se abordar, de um modo sucinto, os conceitos base inerentes à temática de cortinas de ar, como também referir, cronologicamente, a literatura relevante de índole científica de maneira a se compreender a evolução das investigações realizadas nesta área.

2.2 CONCEITOS GENÉRICOS SOBRE CORTINAS DE AR

A cortina de ar consiste no desenvolvimento de um jato de ar originado por um ventilador que, impondo uma certa quantidade de movimento inicial, permite melhorar a preservação das características térmicas e/ou químicas de um determinado espaço. Uma cortina de ar gera uma barreira aerodinâmica que se opõe ao escoamento de ar, através de um vão da envolvente de um compartimento ou de um edifício (como por exemplo, as portas), sem necessidade de recorrer a qualquer tipo de barreira física, preservando, deste modo, o livre acesso ao interior dos espaços.

Na prática, são inúmeras as situações em que se pode recorrer às barreiras aerodinâmicas como forma de controlo de determinados parâmetros em ambientes muito particulares. Em seguida, apresentam-se, de forma muito sucinta, as aplicações mais frequentes dos equipamentos de cortina de ar:

- Controlo de condições de conforto térmico no interior de espaços;
- Proteção de 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;
- Controlo de fumos ou maus odores.

Tendo em conta a extensa e variada aplicação deste tipo de equipamentos, existem também vários tipos de equipamento de cortina de ar que podem ser utilizados. Uma classificação que pode ser feita destes dispositivos encontra-se em Neto (2006) que organiza as cortinas em duas categorias: com e sem recirculação do ar. Nos tipos de cortinas em que há recirculação do ar, a injeção é feita por um bocal de insuflação, que tem no seu oposto uma grelha de recolha do ar insuflado. Esta grelha acolhe, também, parte do ar da vizinhança que é arrastado ao longo do desenvolvimento do jato. O ar recolhido é depois levado, através de condutas próprias, para ser eventualmente tratado (filtrado, aquecido ou arrefecido), e de novo injetado pelo bocal de descarga. Os equipamentos de cortina de ar em que não

existe recirculação de ar, para além de serem utilizados para o caso de estudo desta dissertação, são também os mais comuns. O ar é injetado com uma determinada velocidade inicial, através de um bocal de injeção, formando assim uma barreira aerodinâmica sem que se faça um retorno imediato do ar injetado.

Para além da anterior classificação mencionada, um outro fator que distingue os diferentes tipos de cortinas de ar é a posição em que estas são instaladas e, por conseguinte, a direção principal do escoamento do jato de ar. Assim, pode-se ter cortinas de jato de ar vertical ou horizontal. No primeiro caso (mais corrente), os jatos de ar podem ser descendentes, caso o ventilador seja instalado sobre a entrada a vedar ou ascendentes, no caso do bocal de injeção se situar ao nível do solo. Relativamente às cortinas de jato de ar horizontal, o equipamento pode ser instalado numa ou em ambas as extremidades laterais da porta a vedar.

Para o estudo desta dissertação, foi utilizado o equipamento de cortina de ar sem recirculação de ar, com jato de ar vertical descendente, em que o compartimento de ensaios e o espaço exterior encontram-se à mesma temperatura – configuração isotérmica. No entanto, apesar de se estar na presença de condições isotérmicas, é criada uma diferença de pressão entre os dois espaços, dada pela expressão proposta por Hayes [14]:

$$\Delta P_a = \frac{\rho b_0 u_0^2}{H} (\sin \alpha_f - \sin \alpha_0) \quad (2.1)$$

Em que:

ΔP_a – diferença de pressão [Pa];

ρ – massa volúmica do ar [kg/m^3];

b_0 – espessura do bocal do jato [m];

u_0 – velocidade inicial do jato [m/s];

H – altura da porta [m];

α_f – ângulo de impacto do jato com o solo [°];

α_0 – ângulo inicial do jato [°].

Na figura 2, está representado um esboço do equipamento ventilador instalado do lado de fora do compartimento. Como se pode ver, o ar do jato divide-se junto ao solo e igualmente para ambos os lados.

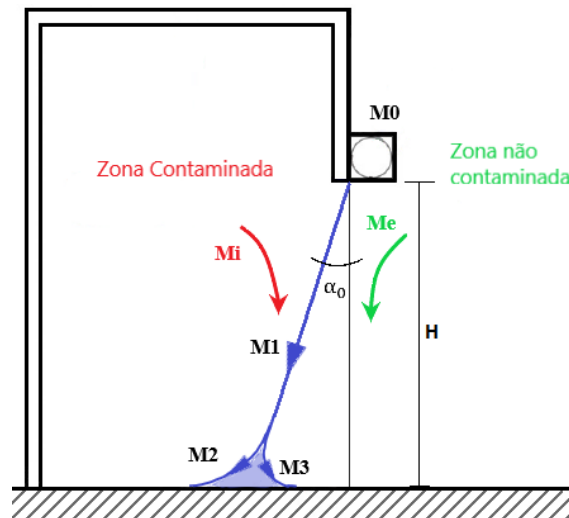


Figura 2 – Comportamento do ar do jato.

Para a disposição apresentada, em que o jato é gerado no exterior do compartimento e o ângulo do bocal está voltado para o interior, o caudal de ar que é arrastado do interior do compartimento (M_i) é, na fase transiente inicial, maior do que o caudal de ar arrastado do exterior (M_e). Consequentemente, a pressão no interior do compartimento começa a aumentar, levando à deflexão do jato e a uma divisão desigual do escoamento junto ao solo. Esta diferença de pressão faz alterar o ângulo de impacto do jato com o solo, α_f , até que o caudal de ar rejeitado para fora do compartimento seja igual ao caudal de ar escoado para dentro do compartimento, acrescido do caudal no bocal do jato. A variação deste ângulo (α_f) [15] é dada pela seguinte expressão:

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

Relativamente aos casos em que o equipamento de cortina de ar separa dois ambientes a diferentes temperaturas (condições não-isotérmicas), para além de ser gerada a diferença de pressão através da cortina (ΔP_a), deve ter-se conta uma diferença de pressão adicional criada pela diferença de densidades do ar entre as duas zonas (ΔP_s), designada por “efeito chaminé” [14]. Esta diferença de pressão é expressa por:

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

Onde:

ρ_f – massa volúmica do ar frio [kg/m^3];

ρ_q – massa volúmica do ar quente [kg/m^3];

Z_0 – distância medida desde o cimo da porta até ao plano neutro (plano no qual esta diferença de pressão é nula, para os casos de compartimentos em que exista uma única porta, $Z_0 = H/2$ [m]).

Assim, para os casos não-isotérmicos, é definida uma diferença de pressão através da cortina de ar, ΔP , como resultado da soma algébrica das diferenças de pressão ΔP_a e ΔP_s . No entanto, ao contrário do caso isotérmico em que a diferença de pressão é constante, esta diferença de pressão varia consoante a distância em relação ao plano neutro. Se a velocidade inicial do jato for demasiado baixa, pode acontecer que a quantidade de movimento inicial do jato seja da mesma ordem de grandeza das forças transversais (geradas pela diferença de densidades do ar), que sobre ele atuam, deflectindo-o, prematuramente, e impedindo-o de atingir o solo, deixando de estar garantida a continuidade e perdendo-se, por conseguinte, o efeito de vedação aerodinâmica pretendido.

Sabendo que a capacidade de vedação de uma cortina depende do equilíbrio entre a quantidade de movimento que é transmitida, inicialmente, ao jato de ar, e as forças transversais que se pretendem neutralizar, o quociente entre estas duas forças permite obter um indicador da regulação a efetuar ao equipamento, designado por módulo de deflexão, D_m [16]. Para cortinas de um só jato, vertical e sem recirculação de ar, este módulo pode ser expresso por:

$$D_m = \frac{\rho_0 b_0 u_0^2}{gH^2(\rho_f - \rho_q)} \quad (2.4)$$

Onde $\rho_0 b_0 u_0^2$ representa o fluxo de quantidade de movimento por unidade de comprimento do bocal de descarga, expresso em [N/m].

A fim de assegurar um jato estável e contínuo até ao solo, 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) do jato. Deste modo, a equação 2.4 passa a tomar a seguinte forma:

$$D_{m,\min} = \frac{(\rho_0 b_0 u_0^2)_{\min}}{gH^2(\rho_f - \rho_q)} \quad (2.5)$$

De acordo com a formulação de Hayes e Stoecker [16], o módulo de deflexão pode ser determinado através da seguinte expressão:

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

Sendo que, o ângulo de impacto do jato com o solo, α_f , é calculado através da equação 2.2.

2.3 JATOS PLANOS

Para a análise dos resultados, é importante o conhecimento do regime de escoamento em que o jato de ar se encontra, através do número de Reynolds¹.

O número de Reynolds (Re) é um número adimensional que permite o cálculo do regime de escoamento – laminar, de transição ou turbulento - de um determinado fluido. O escoamento laminar é caracterizado por um caminho disciplinado das partículas que seguem trajetórias regulares, as trajetórias das partículas vizinhas não se cruzam. No escoamento turbulento, a velocidade num dado ponto varia constantemente em grandeza e direção, sem regularidade. As trajetórias são extremamente irregulares.

Este número é, usualmente, caracterizado pela relação entre as forças de inércia e de viscosidade do fluido (equação 2.7). Deste modo, é fácil compreender que se as forças de viscosidade forem muito maiores que as forças de inércia (valores de Re pequenos), está-se na presença de um regime laminar, enquanto que se as forças de inércia forem muito superiores às forças de viscosidade (valores de Re grandes), diz-se que o regime é turbulento.

Embora os jatos assimétricos permaneçam laminares até valores de Re de 1000 e se tornem completamente turbulentos para $Re > 3000$, os jatos planos de um bocal longo e estreito podem apresentar instabilidades turbulentas apreciáveis com valores de Re tão baixos quanto 30 [5].

$$Re = \frac{\text{Forças de Inércia}}{\text{Forças de viscosidade}} = \frac{\rho \cdot b_0 \cdot \bar{u}_0}{\eta} \quad (2.7)$$

Em que,

ρ – massa volúmica [kg/m^3]

b_0 – espessura do bocal do jato [m]

\bar{u}_0 – velocidade média inicial do jato [m/s]

η - viscosidade dinâmica [Pa.s]

Sabendo que na realização dos ensaios experimentais, os jatos planos vão estar sujeitos a diferentes regimes de escoamento (laminar e turbulento), importa caracterizar o comportamento dos jatos planos mais relevantes para este estudo, para cada regime individualizado, nomeadamente, a velocidade do jato e o caudal de arrastamento [5].

¹ Número introduzido em 1883 por Osborne Reynolds, físico e engenheiro hidráulico irlandês.

2.3.1 JATOS LAMINARES

A velocidade dos jatos em regime laminar (u), definida na equação 2.8, é especificada recorrendo à velocidade na linha central, u_m [5].

$$u = u_m (1 - \tanh^2 \xi) \quad (2.8)$$

Em que,

$$\xi = 0,2752 \left(\frac{M_0^2}{v^2} \right)^{1/3} \frac{y}{x^{2/3}} \quad (2.9)$$

$$M_0 = \int_{-\infty}^{\infty} u^2 dy = \text{constante} \quad (2.10)$$

Sendo y , a distância perpendicular ao eixo x e ao desenvolvimento do jato.

A velocidade da linha central do jato depende da quantidade de movimento inicial, M_0 , e é inversamente proporcional à distância da origem do jato na direção da linha central do jato (x).

$$u_m = 0,4543 \left(\frac{M_0^2}{vx} \right)^{1/3} \quad (2.11)$$

O caudal de arrastamento, calculado para unidade de comprimento do jato, depende igualmente da variável x e da quantidade de movimento inicial, sendo agora diretamente proporcional.

$$Q_{\text{arrastamento}} = 3,3019(M_0 vx)^{1/3} \quad (2.12)$$

2.3.2 JATOS TURBULENTOS

Relativamente ao regime turbulento, as expressões da velocidade do jato, a velocidade na linha central do jato e o caudal de arrastamento são definidas na equação 2.13, equação 2.14 e equação 2.15, respetivamente [5].

$$u_m = 3,4 \left(\frac{b_0}{2x} \right)^{1/2} u_0 \quad (2.13)$$

$$u(x, y) = u_m e^{-5,7 \left(\frac{y}{x} \right)^2} \quad (2.14)$$

$$Q_{\text{arrastamento}} = 0,44 \left(\frac{2x}{b_0} \right)^{1/2} Q_0 \quad (2.15)$$

Em que Q_0 representa o caudal inicial do jato.

2.4 ESTUDOS SOBRE CORTINAS DE AR

Ao longo do tempo, foram vários os investigadores que estudaram cortinas de ar em diferentes vertentes (referidas no capítulo anterior). No entanto, serão apenas referidos os estudos/investigações mais relevantes e de maior interesse para o objetivo da presente dissertação.

Existem várias aplicações deste conceito com o objetivo de evitar a propagação de contaminantes, desde salas de cirurgia, controlo do fumo de tabaco, proteção de obras de arte em museus e património cultural, vitrines refrigeradas abertas a controlo de insetos.

Os primeiros estudos teóricos e experimentais dedicados ao problema da vedação aerodinâmica por jatos planos remontam à década de 60 com *Hayes* e *Stoecker* a darem um grande contributo [14][15][16]. Os autores estudaram o desempenho da vedação aerodinâmica de cortinas de ar vertical em condições isotérmicas e não-isotérmicas (abordado no subcapítulo anterior).

Em 2000, *Rydock et al.* [6] apresentaram um estudo experimental sobre a separação invisível (cortina de ar) entre zonas de fumadores e de não-fumadores em restaurantes. O estudo foi realizado num compartimento de teste a simular uma pequena sala de restaurante. A cortina de ar está localizada no teto, com espessura e ângulo ajustáveis. Foram realizados testes com cortina de ar de 3, 5 e 10 mm de espessura e com diferentes ângulos em relação à zona de não fumadores (+15°, 0° e -15°), com diferentes taxas de fornecimento e extração de fluxo de ar. Os melhores resultados foram conseguidos usando a cortina de ar com 100 m³/h (por metro de cortina de ar) e para uma espessura do bocal de 5 mm e ângulo de 15° direcionado para a sala de fumadores. Concluiu-se que, para as configurações da cortina de ar testadas, nenhuma permite alcançar uma completa estanquidade. Contudo, a utilização de cortinas de ar permitiu evitar, significativamente, a transferência de fumo do tabaco e, consequentemente, melhorar a qualidade do ar na zona de fumadores.

Em 2006, *Santoli et al.* [7] realizaram um estudo numérico e experimental de cortinas de ar, com o intuito de proteger e conservar trabalhos de arte de poluentes no ar (pó, cabelos, pólen e outros tipos de resíduos biológicos). A simulação do estudo foi realizada num edifício cultural (castelo Rocca di Vignola), com a utilização de uma cortina de ar localizada no lintel de uma entrada (porta), com velocidades compreendidas entre 4 – 5 m/s. Os resultados obtidos revelaram uma eficiência das cortinas de ar na ordem dos 70-75%. No entanto, não foi efetuado qualquer tipo de estudo a avaliar os parâmetros que permitem maximizar a eficiência das cortinas de ar para este tipo de finalidades.

Em 2007 e 2009, *Cook e Int-Hout* [13] avaliaram uma alternativa de garantir o nível de assepsia em blocos operatórios. Atualmente, é frequente a utilização de difusores laminares no local onde se situa a maca de operação, juntamente com cortinas de ar para isolar a área de atuação de contaminantes externos. De acordo com estes autores, outra maneira de garantir o nível de assepsia dentro de um bloco operatório é garantir a hierarquia de pressão correspondente entre 10 a 15% do volume da sala. Para os autores, a dificuldade para garantir o nível de assepsia deve-se à dificuldade em conseguir o fluxo laminar nos painéis devido às altas velocidades indesejáveis que, por arrastamento do ar e face ao gradiente de pressão gerado pela diferença de temperatura, aumentam a intensidade de turbulência na sala. Porém, os estudos não são conclusivos acerca da velocidade que deve ser usada para ser alcançado um determinado nível de assepsia, uma vez que não indicam a velocidade ideal, apenas se faz referência que velocidades baixas serão mais eficientes.

Shih et al. (2010) [12] apresentaram um estudo numérico do etanol a dispersar-se numa sala limpa. Neste estudo, foi analisada a influência dos parâmetros da cortina de ar, nomeadamente, a altura de instalação, velocidade e ângulo da cortina. 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.

Em 2013, *Zhai e Osborne* [11] apresentaram 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 de jato elevado. No entanto, não é mostrada a relação entre as taxas de entrada pela cortina e saída da sala.

Por sua vez, *J.C. Viegas* (2016) [8] apresentou um estudo analítico e experimental com água salgada sobre o uso de cortinas numa passagem em situação de incêndio. Nos ensaios, foram utilizadas espessuras do bocal de 1,25 mm, 2,5 mm, 5,0 mm e 7,5 mm, ângulos de 25°, 30° e 35° e velocidades compreendidas entre 0,142 – 1,0 m/s. Estes ensaios foram realizados com diferenças de massa volúmica entre o exterior e o fumo (simulado pela água salgada) com valores próximos dos 55 kg/m³ que, de acordo com o número de Froude, corresponde a uma diferença de temperatura 372 K à escala real. Os resultados mostraram 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. Através dos resultados experimentais, foi possível obter uma expressão que permite relacionar a velocidade mínima do jato de modo a garantir estanquidade da cortina (equação 2.7).

$$u_0 = \sqrt{\frac{0,0195gh^2(\rho_0 - \rho_1)}{\rho_0 b_0 (\sin \alpha_0 + A^{*2})}} \quad (2.7)$$

Em que:

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

g – aceleração da gravidade [m/s²];

b_0 – espessura do bocal do jato [m];

A^* - constante que depende geometria das condições iniciais do problema;

α – ângulo do jato [°];

ρ_0 – massa volúmica inicial [kg/m³];

ρ_1 – massa volúmica da água salgada [kg/m³];

h – comprimento da cortina [m].

Kairo et al (2017) [9] apresentaram um estudo sobre a eficiência de cortinas de ar como barreira anti insetos. Os estudos foram realizados com livre acesso a comida no interior de um compartimento de modo a atrair insetos. Os resultados mostraram que a cortina de ar colocada sobre a porta diminui drasticamente (eficiência na ordem dos 99%) a entrada de insetos no interior do compartimento para velocidades de cortina de 7,5 m/s.

Em 2018, *J.C. Viegas e H. Cruz* [10] avaliaram a possibilidade da utilização de cortinas de ar para prevenir a saída de fumo de compartimentos com fogo. Os testes foram realizados à escala real e a estanquidade ao fumo foi avaliada sob determinados parâmetros. Os ensaios foram realizados com a velocidade da cortina compreendida entre 8,3 m/s e 19,9 m/s, com ângulo (medido entre o eixo da cortina e o plano vertical) entre 18° e 26° e com espessura do bocal do jato a variar entre, aproximadamente, 17 e 45 mm. A cortina de ar foi instalada no lintel da entrada, de modo a se avaliar a cortina com jato vertical descendente. Ao contrário de muitos estudos realizados nesta área, estes autores avaliaram a importância de conjugar a cortina de ar com pequenos fluxos de exaustão do fumo, pelo que consideram ser fundamental na obtenção da estanquidade.

Já em 2019, *J. Dias, Gogotsi e J.C. Viegas* [2] apresentaram um estudo numérico sobre o uso de cortinas de ar com o objetivo de garantir uma separação adequada entre uma zona limpa e uma zona contaminada, utilizando, conjuntamente, extração de ar no compartimento contaminado. Os ensaios realizados mostraram que esta solução é bastante viável. Verificou-se um desempenho adequado com velocidades no bocal do jato tão baixas quanto 1 m/s e para uma espessura do bocal de 10 mm. O melhor desempenho é obtido quando o fluxo de extração do compartimento contaminado corresponde ao fluxo total arrastado pela cortina do lado do compartimento não-contaminado. Segundo os autores, o fluxo de exaustão pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$V_{\text{exaustão}} = \left[0,22 \left(\frac{2x}{b_0} \right)^{0,5} + 0,5 \right] \bar{u}_0 w b_0 \quad (2.8)$$

Estado do conhecimento

Onde:

x – distância da origem do jato na direção central do jato [m];

b_0 – espessura do bocal do jato [mm];

\bar{u}_0 – velocidade média no bocal do jato [m/s];

w – largura da porta [m].

3. METODOLOGIA E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1 BREVE DESCRIÇÃO

Neste capítulo será abordada e explicada toda a metodologia utilizada para se obter a estanquidade aerodinâmica visual. Será feita uma breve descrição do compartimento experimental e do equipamento mais relevante utilizado. Por último, serão apresentados todos os resultados relativos aos ensaios experimentais realizados.

3.2 EQUIPAMENTO E COMPARTIMENTO EXPERIMENTAL

No presente trabalho de investigação, os ensaios foram realizados numa instalação/compartimento experimental, à escala real, projetado e construído para o efeito, localizado no interior de um hangar no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de modo a se evitar a interferência do vento durante a realização dos ensaios (figura 3).



Figura 3 - Vista geral do compartimento experimental.

Este compartimento é constituído por uma estrutura de metal, placas de gesso cartonado com resistência ao fogo de 10 mm de espessura, 50 mm de lã de rocha no interior e apresenta como dimensões em planta 5,0 m \times 4,0 m e 2,8 m de pé direito. A abertura a vedar (porta) tem 0,9 m de largura e 2,0 m de altura. No interior do compartimento foi instalado um ventilador de exaustão (regulável), localizado na zona superior da parede oposta à porta, tendo uma boca de extração com as dimensões 0,625 m \times 0,535 m. Na figura 4, apresenta-se o esquema tridimensional do compartimento de ensaios.

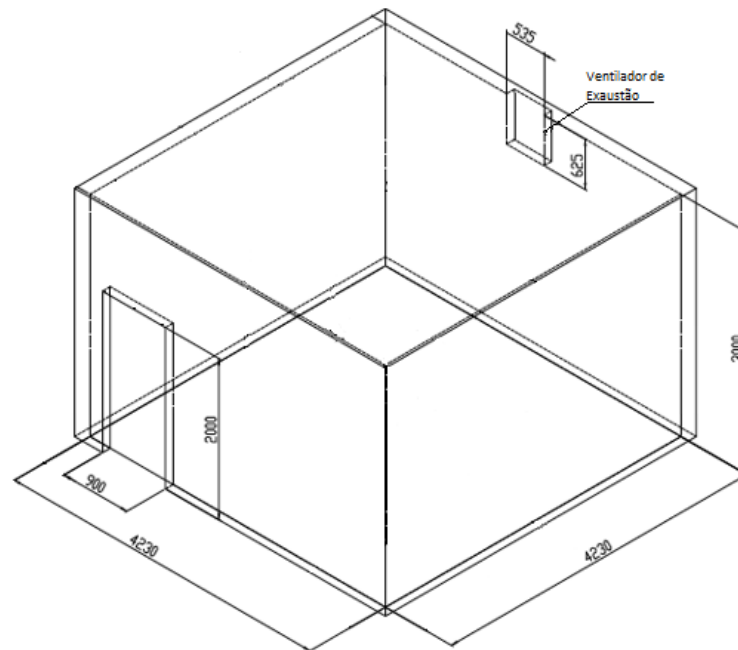


Figura 4 - Compartimento de ensaios à escala real (adaptado de [6]).

O protótipo do ventilador que gera a cortina de ar encontra-se instalado no lado exterior do compartimento, situado no lintel da porta para se obter uma configuração de jato de ar vertical descendente (figura 5). Trata-se de um aparelho capaz de gerar cortinas de jato plano de ar com baixos números de Reynolds. O jato apresenta um comprimento superior ao da porta, propositadamente, de modo a se evitar qualquer fuga entre o jato e as paredes laterais da porta.

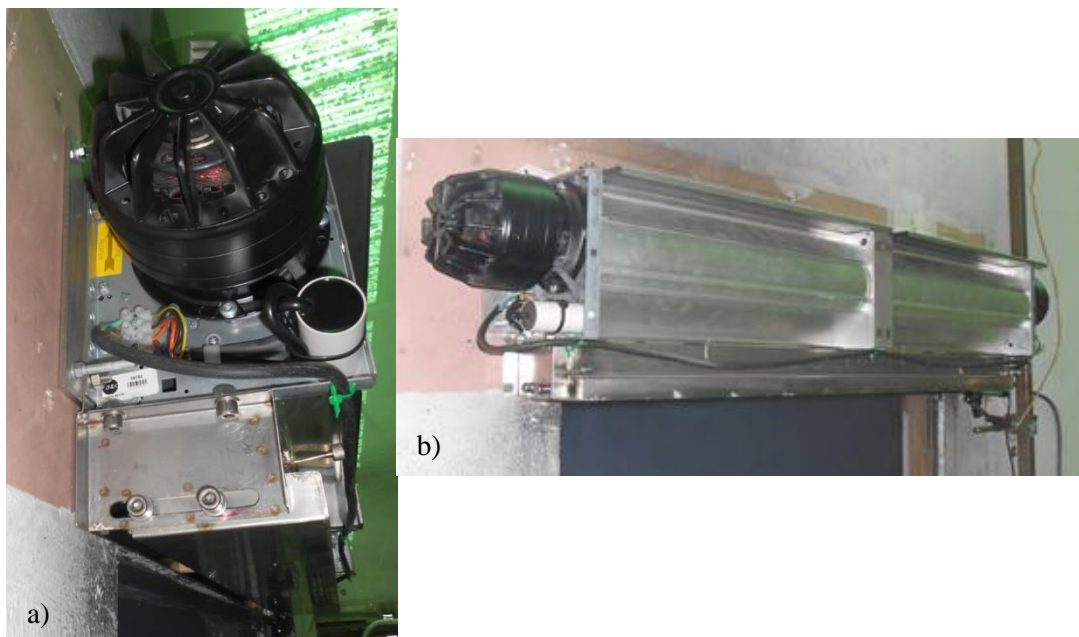


Figura 5 - Protótipo do aparelho ventilador que gera a cortina de ar: a) vista lateral; b) vista geral.

De entre os parâmetros geométricos e dinâmicos tidos em conta para este estudo são de referir a velocidade, espessura e ângulo do jato e a frequência do ventilador de exaustão. Relativamente à velocidade da cortina de ar vertical, esta foi registada continuamente com recurso a um anemómetro de fio quente (modelos Airflow TSI 8455 e Airflow TA5) - anemómetro de referência fixo - localizado no bocal do jato de ar, como se apresenta na figura 6. Para a medição da espessura, utilizou-se um paquímetro digital (Mitutoyo modelo CD-15CPX) e para a medição do ângulo da cortina foi utilizado uma suta analógica (Mitutoyo 300mm Blade).



Figura 6 – Localização do anemómetro de fio quente fixo no bocal do jato.

3.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

O método de ensaio realizado tem como finalidade analisar a estanquidade da cortina de ar, ou seja, encontrar o equilíbrio entre o caudal de exaustão mínimo e a velocidade do jato plano de ar – cortina – de modo a não haver fugas do compartimento contaminado (com fumo) para o exterior.

O procedimento adotado para a realização dos ensaios pode ser dividido em duas partes. A primeira parte corresponde à medição das características geométricas e dinâmicas da cortina enquanto que a segunda parte diz respeito à medição do caudal mínimo de exaustão para uma determinada velocidade de referência imposta na cortina de ar. Os ensaios foram realizados para espessuras do bocal do jato com 5 mm, 10 mm e 16,6 mm e para cada espessura referida foi feita a avaliação com diferentes ângulos (0°, 5°, 10°, 15° e 20°) entre o jato plano e o eixo vertical.

Importa referir que, antes de dar início aos ensaios, foi utilizado um período de espera de modo a que todos os equipamentos atingissem a sua estabilidade.

- PARTE 1

Como referido anteriormente, esta primeira parte corresponde à medição das características da cortina de ar (espessura e ângulo) e à calibração da velocidade no bocal do jato. A ordem de tarefas é, então, apresentada de seguida.

1. Período de espera de 10 a 15 minutos para os equipamentos atingirem a sua estabilidade;
2. Ajuste do ângulo do jato, com o auxílio de uma suta analógica;
3. Ajuste da espessura, com auxílio de pequenos calços (gabaritos) com espessuras iguais à que se pretende no bocal do jato (ver figura 7);
4. Medição da espessura ao longo do comprimento do bocal do jato, com pontos distanciados 5 cm entre si (19 pontos, no total). Efetuar três leituras em cada ponto (e calcular a respetiva média), para minimizar erros de medição;
5. Medição da velocidade ao longo do comprimento do bocal do jato, de 5 em 5 cm, através de um anemómetro de fio quente móvel (RSPRO RS-1340) com a respetiva estrutura de suporte (figura 8). Efetuar cinco leituras em cada ponto para cada velocidade de referência;

Relativamente a este último ponto (ponto 5), a medição é realizada tendo em conta uma determinada velocidade imposta na cortina de ar registada pelo anemómetro de fio quente de referência (fixo) com valores de 9,0 m/s, 5,0 m/s e 1,2/1,7 m/s (velocidade mínima registada pelo anemómetro na posição em que está instalado). Aqui referem-se duas velocidades de referência mínimas, visto que ao longo do período dos testes experimentais, foram utilizados dois anemómetros fixos diferentes, devido a uma avaria no primeiro deles.

Este procedimento foi repetido sempre que ocorreu alteração de uma das seguintes variáveis: espessura e/ou ângulo do jato de ar.



Figura 7 - calços para ajuste de espessura do bocal do jato pretendida (os calços apresentados têm 10 mm de espessura).



Figura 8 – Medição da velocidade no bocal do jato através do anemómetro de fio quente (RSPRO RS-1340) e respetiva estrutura de suporte.

Concluída a primeira fase experimental, procedeu-se à análise dos dados obtidos. Para cada espessura e respetivos ângulos, foi necessário criar uma equação da reta de tendência da média de velocidades, registada no anemómetro de fio quente móvel, em função da média de velocidades registada pelo anemómetro de fio quente de referência fixo em todo o comprimento da cortina do tipo $y=mx+b$, conforme ilustrado na figura 9.

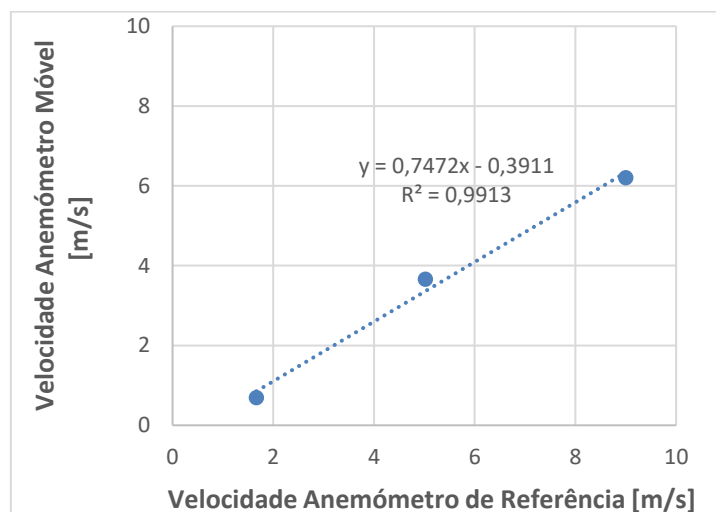


Figura 9 - Exemplo da equação da reta de tendência da média de velocidades registada no anemómetro de fio quente móvel em função da média de velocidades registada pelo anemómetro de fio quente de referência fixo.

Deste modo, é possível calcular a velocidade real do jato de ar, sabendo que:

$$V_{real} = m.V_{ref} + b \quad (3.1)$$

- PARTE 2

A segunda parte dos ensaios corresponde à obtenção da estanquidade aerodinâmica (avaliada visualmente), tendo em conta uma determinada velocidade imposta na cortina de ar e um caudal de exaustão mínimo. Nestes ensaios, foi utilizada uma fonte de fumo (ibiza LSM1500PRO) no interior do compartimento de teste, com o intuito de simular o contaminante (figura 10). É ativada uma cortina de ar de jato plano, a proteger uma entrada aberta, e um ventilador de exaustão é também ativado.

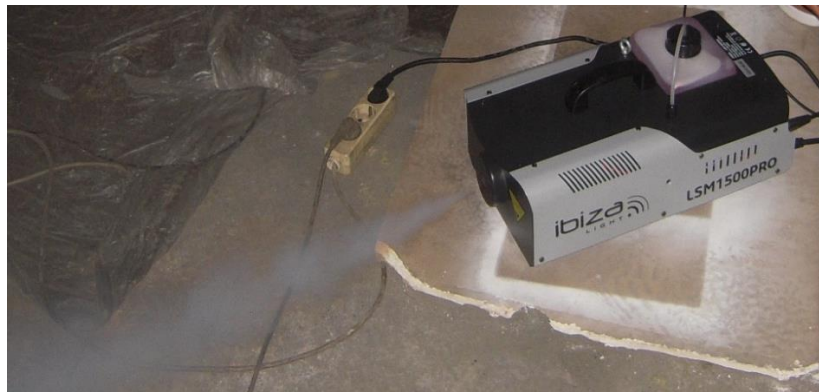


Figura 10 - Máquina de fumos utilizada nos ensaios experimentais.

O caudal de exaustão do compartimento e a velocidade no bocal do jato são reduzidos tanto quanto possível durante cada ensaio até que seja alcançado o limite da estanquidade aerodinâmica na porta, ou seja, quando se obtém o valor mais baixo de caudal de exaustão para o qual se deixou de visualizar a saída de fumo do interior do compartimento para o exterior. O seguinte procedimento de ensaios apresentado foi repetido para velocidades da cortina de ar com 8,0 m/s, 7,0 m/s, 6,0 m/s, 5,0 m/s, 4,0 m/s, 3,0 m/s, 2,0 m/s e 1,2/1,8 m/s.

1. Ajuste da velocidade da cortina de ar de modo a ser obtida uma velocidade predeterminada no anemómetro de fio quente fixo;
2. Ligar o ventilador de exaustão com frequência tão baixa quanto possível, de modo a evitar que o fumo saia do compartimento pela porta;
3. Saturar o interior do compartimento com fumo;
4. Registrar o caudal de exaustão mínimo. Este valor é obtido quando se deixa de visualizar saída de fumo do interior do compartimento, ou seja, quando foi atingido o caudal mínimo do ventilador de exaustão compatível com as condições de funcionamento da cortina de ar;
5. Filmagem do ensaio;

3.4 AJUSTAMENTO DO MÉTODO DE ENSAIO

Na fase inicial dos ensaios, verificou-se que a influência de pressões externas devido ao vento através da conduta do ventilador de exaustão era bastante relevante, uma vez que os caudais de exaustão apresentavam valores bastante maiores que ao esperado (conduta do ventilador de exaustão ligada diretamente ao exterior). Deste modo, optou-se por colocar essa conduta a libertar o ar extraído para o interior do hangar, onde se situa o compartimento experimental.

3.5 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Para a segunda fase de ensaios, os dados registados baseiam-se na observação a olho nu da estanquidade da cortina de ar. Como referido anteriormente, esta estanquidade é obtida quando é atingido o caudal mínimo do ventilador de exaustão compatível com as condições de funcionamento da cortina de ar de modo a não haver fugas do compartimento contaminado (fumo) para o exterior. Os resultados ilustrados na figura 11 demonstram a viabilidade do uso de jatos planos de ar de modo a evitar a fuga de fumo do interior do compartimento.



Figura 11 - Cortina ar de sub-dimensionada (esquerda) e cortina de ar com velocidade ótima de funcionamento (direita).

Sabendo que os ensaios foram realizados com o auxílio do anemómetro de fio quente, os valores lidos não correspondem verdadeiramente aos valores da velocidade da cortina (U_0). Isto porque, deverá ter-se em conta a calibração do anemómetro. Esta calibração (certificado nº 0579/2018-UMA) foi, previamente, feita pela Unidade de Metrologia Aplicada (UMA) pertencente ao LNEC, que após a realização de vários ensaios, obteve o seguinte gráfico da equação de calibração (figura 12).

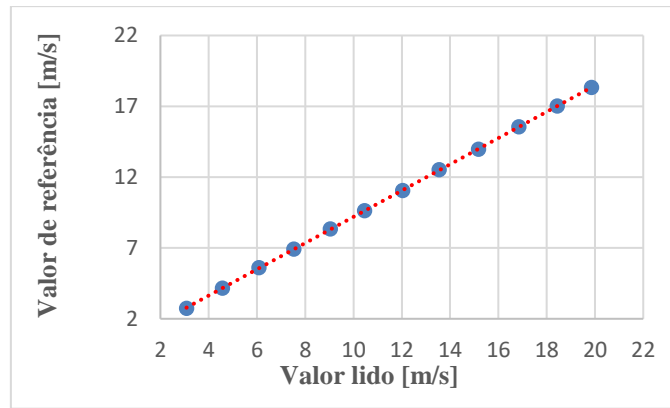


Figura 12 - Gráfico da equação de calibração.

Pelo gráfico, retira-se a equação da velocidade real da cortina de ar em função da velocidade lida no anemómetro, dada pela seguinte expressão:

$$u_{real} = 0,9267 \cdot u_{lida} - 0,067 \quad (3.1)$$

Para evitar a fuga de fumo do interior do compartimento, para além da velocidade do jato de ar (u_0), importa também conhecer a velocidade média de admissão na abertura (u_a). A velocidade média de admissão na porta depende, diretamente, do caudal de exaustão (Q_e) imposto no interior do compartimento e pode ser calculado através da expressão seguinte:

$$u_a = \frac{Q_e}{A_p} \quad (3.2)$$

Por sua vez, Q_e é calculado através,

$$Q_e = (0,1265Q_{e,freq} + 0,0062)0,334375 \quad (3.3)$$

Sendo $Q_{e,freq}$ a frequência do ventilador de exaustão imposto no regulador, em Hz. Esta expressão acaba por ter este aspeto por ter já em conta a calibração, previamente efetuada.

Concluída toda a fase experimental, os resultados obtidos foram organizados pela espessura do bocal do jato e estão apresentados no quadro 2 (espessura nominal do jato de 5 mm), quadro 3 (espessura nominal do jato de 10 mm) e no quadro 4 (espessura nominal do jato de 16,6 mm). Para além destes, foram ainda realizados ensaios experimentais com a cortina de ar inativa (quadro 1).

Quadro 1 - Resultados experimentais com a cortina de ar inativa.

Nº Ensaio	Espessura da cortina [mm]	Velocidade de referência do jato [m/s]	u_0 [m/s]	Re	Ângulo da cortina [°]	Frequência de exaustão [Hz]	Caudal de exaustão [m³/s]	u_a
Ensaio 237	-	-	-	-	-	4,70	0,2009	0,1116
Ensaio 281	-	-	-	-	-	3,10	0,1332	0,0740

Estudo experimental da limitação de contaminantes através de jatos planos combinados com exaustão de ar

O jato inativo corresponde a um caso de referência que é estudado para mostrar que o caudal de admissão na porta, se suficientemente forte, é capaz de criar uma condição de estanquidade na porta.

Quadro 2 - Resultados experimentais da estanquidade da cortina de ar com 5 mm de espessura.

Nº Ensaio	Espessura da cortina [mm]	Velocidade de referência do jato [m/s]	u_0 [m/s]	Re	Ângulo da cortina [°]	Frequência de exaustão [Hz]	Caudal de exaustão [m³/s]	u_a [m/s]
Ensaio 151	4,95	1,30	0,86	279,97	20	1,80	0,0782	0,0435
Ensaio 152	4,95	8,00	6,03	1970,41	20	3,90	0,1670	0,0928
Ensaio 153	4,95	6,90	5,18	1692,88	20	3,20	0,1374	0,0763
Ensaio 154	4,95	6,00	4,49	1465,80	20	3,00	0,1290	0,0716
Ensaio 155	4,95	5,10	3,79	1238,73	20	2,80	0,1205	0,0669
Ensaio 156	4,95	3,90	2,86	935,96	20	2,50	0,1078	0,0599
Ensaio 157	4,95	3,00	2,17	708,89	20	2,50	0,1078	0,0599
Ensaio 158	4,95	2,20	1,55	507,04	20	2,20	0,0951	0,0528
Ensaio 159	4,82	5,10	3,73	1185,67	5	2,60	0,1120	0,0622
Ensaio 160	4,82	7,00	5,27	1677,79	5	2,90	0,1247	0,0693
Ensaio 161	4,82	8,00	6,09	1936,80	5	3,30	0,1417	0,0787
Ensaio 162	4,82	6,00	4,46	1418,78	5	2,80	0,1205	0,0669
Ensaio 163	4,82	4,00	2,83	900,76	5	2,40	0,1036	0,0575
Ensaio 164	4,88	3,00	2,02	650,00	5	2,10	0,0909	0,0505
Ensaio 165	4,82	2,00	1,20	382,74	5	2,90	0,1247	0,0693
Ensaio 166	4,82	1,20	0,55	175,53	5	3,20	0,1374	0,0763
Ensaio 167	4,59	1,20	1,13	341,43	15	3,90	0,1670	0,0928
Ensaio 168	4,59	2,00	1,77	536,60	15	1,80	0,0782	0,0435
Ensaio 169	4,59	3,00	2,58	780,55	15	2,20	0,0951	0,0528
Ensaio 170	4,59	4,00	3,38	1024,50	15	2,60	0,1120	0,0622
Ensaio 171	4,59	5,00	4,19	1268,46	15	2,80	0,1205	0,0669
Ensaio 172	4,59	6,00	4,99	1512,41	15	3,10	0,1332	0,0740
Ensaio 173	4,59	7,00	5,80	1756,37	15	3,50	0,1501	0,0834
Ensaio 174	4,59	8,00	6,60	2000,32	15	3,80	0,1628	0,0904
Ensaio 175	4,98	1,20	1,00	327,99	0	3,30	0,1417	0,0787
Ensaio 176	4,98	2,00	1,58	517,86	0	3,00	0,1290	0,0716
Ensaio 177	4,98	3,00	2,30	755,19	0	2,20	0,0951	0,0528
Ensaio 178	4,98	4,00	3,02	992,52	0	2,40	0,1036	0,0575
Ensaio 179	4,98	5,00	3,74	1229,86	0	2,60	0,1120	0,0622
Ensaio 180	4,98	6,00	4,46	1467,19	0	2,80	0,1205	0,0669
Ensaio 181	4,98	7,00	5,19	1704,52	0	3,10	0,1332	0,0740
Ensaio 182	4,98	8,00	5,91	1941,86	0	3,40	0,1459	0,0810
Ensaio 183	4,74	1,20	0,76	236,86	10	4,00	0,1713	0,0951
Ensaio 184	4,74	2,00	1,44	449,57	10	2,30	0,0994	0,0552
Ensaio 185	4,74	3,00	2,29	715,45	10	2,60	0,1120	0,0622
Ensaio 186	4,74	4,00	3,14	981,33	10	3,30	0,1417	0,0787
Ensaio 187	4,74	5,00	3,99	1247,21	10	3,60	0,1543	0,0857
Ensaio 188	4,74	6,00	4,84	1513,09	10	3,90	0,1670	0,0928
Ensaio 189	4,74	7,00	5,69	1778,97	10	4,10	0,1755	0,0975
Ensaio 190	4,74	8,00	6,54	2044,85	10	4,40	0,1882	0,1045

Quadro 3 - Resultados experimentais da estanquidade da cortina de ar com 10 mm de espessura.

Nº Ensaio	Espessura da cortina [mm]	Velocidade de referência do jato [m/s]	u_0 [m/s]	Re	Ângulo da cortina [°]	Frequência de exaustão [Hz]	Caudal de exaustão [m³/s]	u_a [m/s]
Ensaio 199	9,38	8,00	3,62	2241,25	5	4,40	0,1882	0,1045
Ensaio 200	9,38	7,00	3,15	1951,24	5	4,20	0,1797	0,0998
Ensaio 201	9,38	6,00	2,68	1661,24	5	3,80	0,1628	0,0904
Ensaio 202	9,38	5,00	2,21	1371,23	5	3,60	0,1543	0,0857
Ensaio 203	9,38	4,00	1,75	1081,22	5	3,20	0,1374	0,0763
Ensaio 204	9,38	3,00	1,28	791,21	5	2,90	0,1247	0,0693
Ensaio 205	9,38	2,00	0,81	501,20	5	4,10	0,1755	0,0975
Ensaio 206	9,38	1,60	0,62	385,20	5	4,90	0,2093	0,1163
Ensaio 207	9,25	8,00	3,64	2220,69	10	4,20	0,1797	0,0998
Ensaio 208	9,25	7,00	3,17	1934,21	10	3,80	0,1628	0,0904
Ensaio 209	9,25	6,00	2,70	1647,74	10	3,40	0,1459	0,0810
Ensaio 210	9,25	5,00	2,23	1361,26	10	3,10	0,1332	0,0740
Ensaio 211	9,25	4,00	1,76	1074,78	10	2,90	0,1247	0,0693
Ensaio 212	9,25	3,00	1,29	788,30	10	2,40	0,1036	0,0575
Ensaio 213	9,25	1,68	0,67	410,15	10	3,30	0,1417	0,0787
Ensaio 216	9,46	8,00	3,57	2229,21	0	4,50	0,1924	0,1069
Ensaio 217	9,46	7,00	3,11	1941,53	0	4,30	0,1840	0,1022
Ensaio 218	9,46	6,00	2,65	1653,86	0	4,00	0,1713	0,0951
Ensaio 219	9,46	5,00	2,19	1366,19	0	3,80	0,1628	0,0904
Ensaio 220	9,46	4,00	1,73	1078,51	0	3,70	0,1586	0,0881
Ensaio 221	9,46	3,00	1,27	790,84	0	3,50	0,1501	0,0834
Ensaio 222	9,46	2,00	0,81	503,16	0	3,20	0,1374	0,0763
Ensaio 223	9,79	8,00	3,54	2286,49	15	4,40	0,1882	0,1045
Ensaio 224	9,79	7,00	3,07	1986,77	15	4,10	0,1755	0,0975
Ensaio 225	9,79	6,00	2,61	1687,06	15	3,80	0,1628	0,0904
Ensaio 226	9,79	5,00	2,15	1387,35	15	3,40	0,1459	0,0810
Ensaio 227	9,79	4,00	1,68	1087,64	15	3,20	0,1374	0,0763
Ensaio 228	9,79	3,00	1,22	787,92	15	3,10	0,1332	0,0740
Ensaio 229	9,79	2,00	0,76	488,21	15	3,10	0,1332	0,0740
Ensaio 230	9,68	8,00	3,58	2288,40	20	4,60	0,1966	0,1092
Ensaio 231	9,68	7,00	3,10	1979,08	20	4,40	0,1882	0,1045
Ensaio 232	9,68	6,00	2,61	1669,77	20	4,10	0,1755	0,0975
Ensaio 233	9,68	5,00	2,13	1360,45	20	3,80	0,1628	0,0904
Ensaio 234	9,68	4,00	1,65	1051,14	20	3,70	0,1586	0,0881
Ensaio 235	9,68	3,00	1,16	741,82	20	3,50	0,1501	0,0834
Ensaio 236	9,68	2,00	0,68	432,51	20	3,20	0,1374	0,0763

Estudo experimental da limitação de contaminantes através de jatos planos combinados com exaustão de ar

Quadro 4 - Resultados experimentais da estanquidade da cortina de ar com 16,6 mm de espessura.

Nº Ensaio	Espessura da cortina [mm]	Velocidade de referência do jato [m/s]	u_0 [m/s]	Re	Ângulo da cortina [°]	Freq. de exaustão [Hz]	Caudal de exaustão [m³/s]	u_a [m/s]
Ensaio 238	16,37	8,00	3,31	3576,04	20	5,20	0,2220	0,1233
Ensaio 239	16,37	7,00	2,88	3114,54	20	5,00	0,2136	0,1186
Ensaio 240	16,37	6,00	2,46	2653,05	20	4,80	0,2051	0,1139
Ensaio 241	16,37	5,00	2,03	2191,55	20	4,40	0,1882	0,1045
Ensaio 242	16,37	4,00	1,60	1730,05	20	4,20	0,1797	0,0998
Ensaio 243	16,37	3,00	1,17	1268,55	20	4,00	0,1713	0,0951
Ensaio 244	16,37	2,00	0,75	807,05	20	4,40	0,1882	0,1045
Ensaio 245	15,53	8,00	3,43	3510,94	0	5,30	0,2263	0,1257
Ensaio 246	15,53	7,00	2,97	3043,50	0	5,10	0,2178	0,1210
Ensaio 247	15,53	6,00	2,51	2576,06	0	4,80	0,2051	0,1139
Ensaio 248	15,53	5,00	2,06	2108,61	0	4,40	0,1882	0,1045
Ensaio 249	15,53	4,00	1,60	1641,17	0	4,30	0,1840	0,1022
Ensaio 250	15,53	3,00	1,15	1173,73	0	4,00	0,1713	0,0951
Ensaio 251	15,53	2,00	0,69	706,29	0	3,60	0,1543	0,0857
Ensaio 252	16,59	8,00	3,31	3626,62	5	5,40	0,2305	0,1280
Ensaio 253	16,59	7,00	2,86	3135,27	5	5,30	0,2263	0,1257
Ensaio 254	16,59	6,00	2,41	2643,91	5	4,90	0,2093	0,1163
Ensaio 255	16,59	5,00	1,97	2152,56	5	4,50	0,1924	0,1069
Ensaio 256	16,59	4,00	1,52	1661,21	5	4,20	0,1797	0,0998
Ensaio 257	16,59	3,00	1,07	1169,85	5	3,90	0,1670	0,0928
Ensaio 258	16,59	2,00	0,62	678,50	5	3,70	0,1586	0,0881
Ensaio 259	16,72	8,00	3,29	3630,43	10	5,70	0,2432	0,1351
Ensaio 260	16,72	7,00	2,85	3144,82	10	5,40	0,2305	0,1280
Ensaio 261	16,72	6,00	2,41	2659,22	10	4,90	0,2093	0,1163
Ensaio 262	16,72	5,00	1,97	2173,62	10	4,40	0,1882	0,1045
Ensaio 263	16,72	4,00	1,53	1688,02	10	4,10	0,1755	0,0975
Ensaio 264	16,72	3,00	1,09	1202,42	10	3,80	0,1628	0,0904
Ensaio 265	16,72	2,00	0,65	716,81	10	4,00	0,1713	0,0951
Ensaio 266	16,64	8,00	3,31	3639,53	15	5,60	0,2389	0,1327
Ensaio 267	16,64	7,00	2,87	3148,01	15	5,30	0,2263	0,1257
Ensaio 268	16,64	6,00	2,42	2656,49	15	5,00	0,2136	0,1186
Ensaio 269	16,64	5,00	1,97	2164,98	15	4,50	0,1924	0,1069
Ensaio 270	16,64	4,00	1,52	1673,46	15	4,00	0,1713	0,0951
Ensaio 271	16,64	3,00	1,08	1181,95	15	3,60	0,1543	0,0857
Ensaio 272	16,64	2,00	0,63	690,43	15	3,90	0,1670	0,0928
Ensaio 273	16,64	10,30	4,34	4770,01	15	7,20	0,3066	0,1703
Ensaio 274	16,64	13,50	5,77	6342,86	15	8,30	0,3532	0,1962
Ensaio 275	16,64	16,60	7,16	7866,56	15	12,30	0,5223	0,2902
Ensaio 276	16,64	19,80	8,59	9439,42	15	13,40	0,5689	0,3160
Ensaio 277	16,64	22,90	9,98	10963,12	15	14,40	0,6112	0,3395
Ensaio 278	16,64	26,10	11,41	12535,97	15	17,10	0,7254	0,4030
Ensaio 279	16,64	3,00	1,08	1181,95	15	4,00	0,1713	0,0951
Ensaio 280	16,64	1,18	0,26	287,39	15	3,40	0,1459	0,0810
Ensaio 282	16,64	27,56	12,07	13253,58	15	20,30	0,8607	0,4782

Metodologia e resultados experimentais

Uma vez que todo este trabalho é baseado num estudo experimental, é importante apresentar um estudo relativo aos erros experimentais de modo a se compreender e avaliar as incertezas correspondentes a esses mesmos resultados. Toda a metodologia bem como os resultados das incertezas, encontram-se na secção dos anexos – erros experimentais.

4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 BREVE DESCRIÇÃO

No presente capítulo, será efetuada, em primeiro lugar, uma pequena análise teórica sobre o sistema de jatos planos, onde será feita a dedução da função que permita prever o comportamento próximo daquele que foi encontrado nos ensaios realizados. Numa fase posterior, serão discutidos os resultados dos ensaios efetuados, dispostos graficamente, de modo a facilitar a compreensão dos mesmos, em que será analisada, de forma individual, a influência dos diferentes parâmetros impostos no jato da cortina de ar, em conjunto com a velocidade de admissão na porta.

4.2 ANÁLISE TEÓRICA

Antes de se proceder a uma análise mais rigorosa dos resultados obtidos nos ensaios experimentais, importa abordar alguns conceitos que permitam explicar o comportamento das cortinas de ar.

Na figura 13 está ilustrado um esquema do sistema de cortina de jato de ar vertical descendente, onde se vê a subdivisão do jato quando este toca no solo. Este comportamento pode ser explicado recorrendo ao conceito de equilíbrio de quantidade de movimento (EQM). Segundo os autores da seguinte derivação [1], assume-se que a quantidade de movimento é conservativa e que os perfis da velocidade são uniformes ao longo do jato.

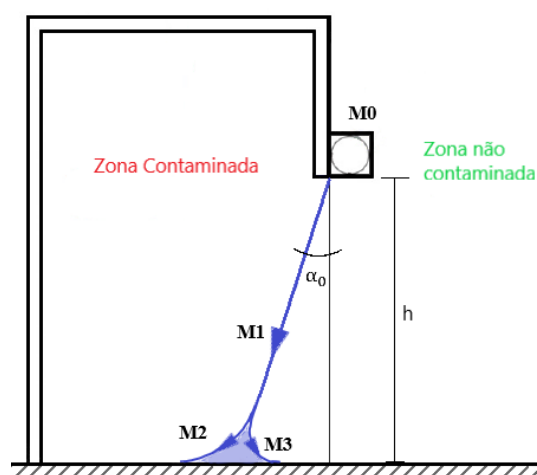


Figura 13 – Corte transversal do sistema de jato plano vertical descendente.

O equilíbrio do fluxo de ar está apresentado na equação 4.1, onde M_1 representa o fluxo na zona de impacto, M_2 representa o fluxo rejeitado para a zona contaminada e M_3 é o fluxo rejeitado para a zona não contaminada.

$$M_1 = M_2 + M_3 \quad (4.1)$$

O fluxo que é imprimido inicialmente ao jato de ar, M_0 , é expresso por:

$$M_0 = b_0 L \bar{u}_0 \quad (4.2)$$

Pressupondo que a quantidade de movimento pode ser definida pelo produto do caudal mássico e da velocidade média (de modo a analisar as variáveis que influenciam neste estudo), seguem-se as seguintes definições:

$$J_1 = b_0 L \bar{u}_0^2 \quad (4.3)$$

$$J_2 = M_2 \bar{u}_1 \quad (4.4)$$

$$J_3 = M_3 \bar{u}_1 \quad (4.5)$$

Em que \bar{u}_1 representa a velocidade média na zona de impacto.

Assumindo, também, que a velocidade média do jato se mantém igual para ângulos pequenos, em valor absoluto, nos dois componentes em que se subdivide o jato, tem-se que:

$$\bar{u}_1 = \bar{u}_2 = \bar{u}_3 \quad (4.6)$$

O equilíbrio de quantidade de movimento na zona de impacto no solo é expresso por:

$$J_2 = J_3 + J_1 \sin \alpha_0 \quad (4.7)$$

Substituindo J_1 , J_2 e J_3 pelas suas definições,

$$M_2 \bar{u}_1 = M_3 \bar{u}_1 + M_1 \bar{u}_1 \sin \alpha_0 \quad (4.8)$$

Assim, a partir da equação 4.8 é possível estimar a divisão do escoamento na zona de impacto no solo.

$$M_2 = M_3 \frac{1 + \sin \alpha_0}{1 - \sin \alpha_0} \quad (4.9)$$

$$M_2 = M_1 \frac{1 + \text{sen } \alpha_0}{2} \quad (4.10)$$

$$M_3 = M_1 \frac{1 - \text{sen } \alpha_0}{2} \quad (4.11)$$

A quantidade de movimento rejeitado para a zona não contaminada pode ser expressa por:

$$J_3 = J_1 \frac{1 - \text{sen } \alpha_0}{2} \quad (4.12)$$

Que, por sua vez,

$$J_3 = b_0 L \bar{u}_0^2 \frac{1 - \text{sen } \alpha_0}{2} \quad (4.13)$$

A quantidade de movimento na porta, J_a , é expressa por:

$$J_a = B_a h \bar{u}_a^2 \quad (4.14)$$

Pode ser assumido que a quantidade de movimento na porta (correspondente à exaustão do caudal mássico da zona contaminada) será, pelo menos, maior ou igual à quantidade de movimento do caudal mássico rejeitado para a zona não contaminada. Deste modo, a condição de estanquidade é dada por:

$$J_a = J_3 \quad (4.15)$$

$$B_a h \bar{u}_a^2 = b_0 L \bar{u}_0^2 \frac{1 - \text{sen } \alpha_0}{2} \quad (4.16)$$

Assumindo que $B_a = L$ e simplificando a equação 4.16, tem-se que,

$$\bar{u}_a = \bar{u}_0 \left[\frac{b_0}{h} \frac{1 - \text{sen } \alpha_0}{2} \right]^{0,5} \quad (4.17)$$

Considera-se relevante comparar uma outra condição de estanquidade da cortina de ar. Para além do caudal que sai do bocal do jato fornecido pela zona não contaminada, há também uma parte desse caudal que é arrastado desse mesmo lado não contaminado. Esse caudal de arrastamento pode ser calculado através da equação 4.18.

$$Q_{\text{arrastamento}} = 0,44 M_0 \left(\frac{2x}{b_0} \right)^{0,5} \quad (4.18)$$

Sendo M_0 obtido pela equação 4.2, e “x” definido por:

$$x = \frac{h}{\cos \alpha_0} \quad (4.19)$$

Adicionando esta nova condição de estanquidade, a equação 4.17 passa a ter o seguinte formato:

$$\bar{u}_a = 0,22 \left[\frac{2h}{b_0 \cos \alpha_0} \right]^{0,5} + 0,5 \bar{u}_0 \frac{b_0}{h} \quad (4.20)$$

Embora a equação 4.20 não apresente a diferença de pressão entre o compartimento interior e o compartimento exterior, essa correlação pode ser obtida se o coeficiente de descarga correspondente à abertura protegida pelo jato de ar for introduzido.

Através de vários testes realizados, à escala reduzida, a velocidade média de admissão na porta foi correlacionada com as características do jato plano de ar, tendo sido obtida a equação 4.21 capaz de prever suficientemente bem os resultados experimentais [1], em que K representa uma constante empírica.

$$\bar{u}_a = K \left[0,22 \left(\frac{2h}{b_0 \cos \alpha_0} \right)^{\frac{1}{2}} + 0,5 \right] \bar{u}_0 \frac{b_0}{h} \quad (4.21)$$

4.3 ANÁLISE DE RESULTADOS

Tendo sido toda a metodologia de ensaio e os métodos de cálculo explanados no capítulo anterior, importa agora analisar/discutir os resultados, procurando, perceber desde logo a influência dos diferentes parâmetros do jato de ar.

4.3.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DO JATO

Nas figuras 14, 15 e 16 apresentam-se os conjuntos dos resultados experimentais relevantes, individualizados pelas espessuras de jato de 5, 10 e 16,6 mm, respetivamente. O eixo das abcissas corresponde ao número de Reynolds do jato plano e o eixo das ordenadas corresponde à velocidade média mínima de admissão na porta para que se obtenha a estanquidade aerodinâmica visual. Na figura 17, estão apresentados os resultados do jato com espessura de 16,6 mm e ângulo de 15°, mas para velocidades da cortina mais elevadas (ou seja, maiores números de Reynolds).

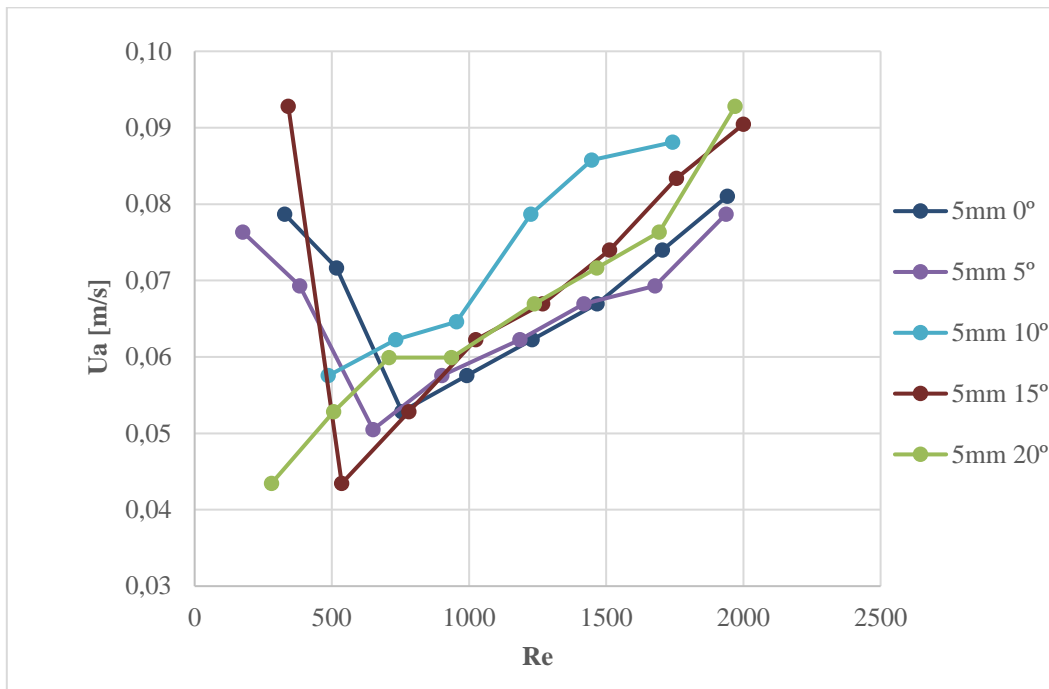


Figura 14 - Relação entre a velocidade média de admissão na abertura (U_a) e o número de Reynolds (Re) para jato de ar com 5 mm de espessura.

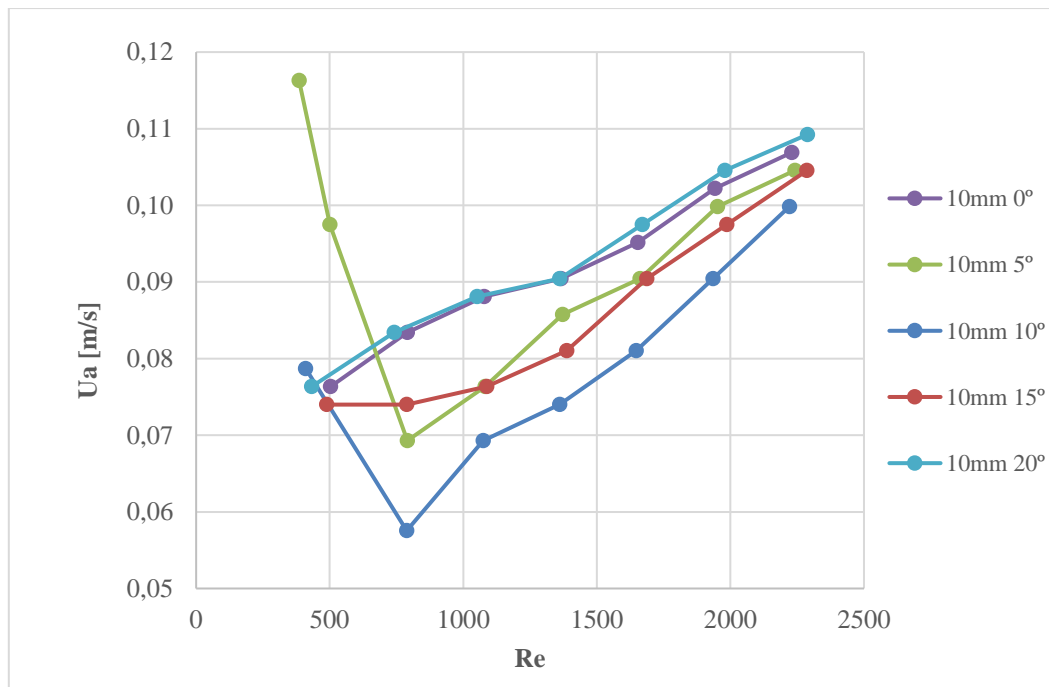


Figura 15 - Relação entre a velocidade média de admissão na abertura (U_a) e o número de Reynolds (Re) para jato de ar com 10 mm de espessura.

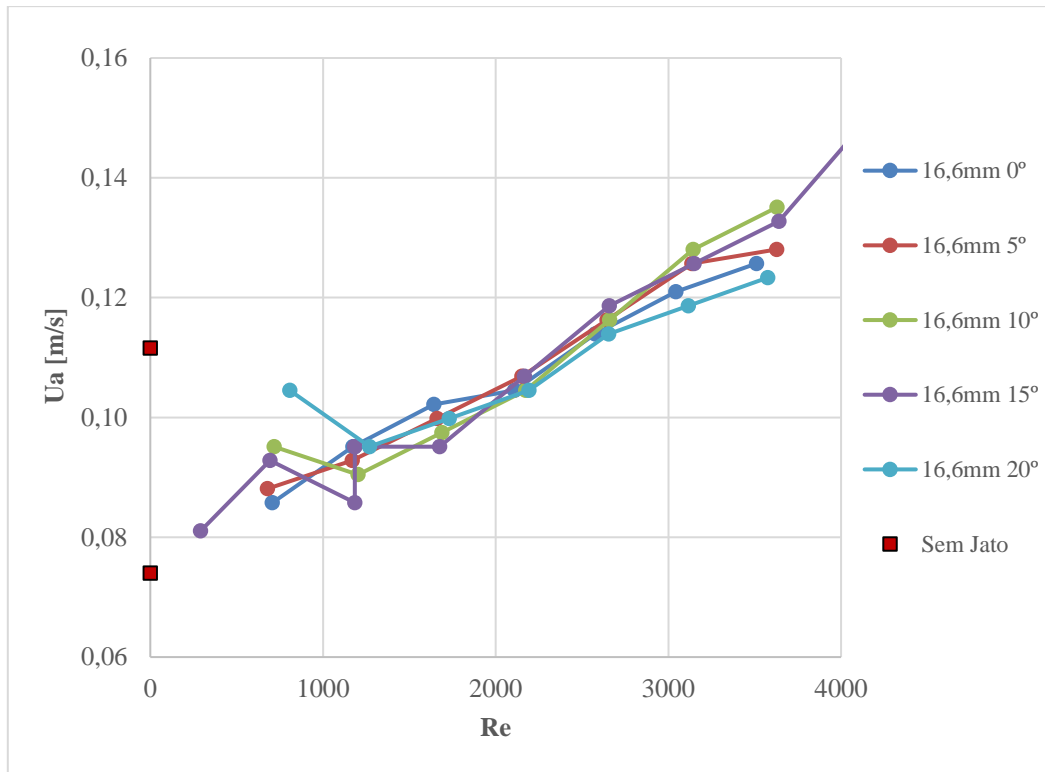


Figura 16 - Relação entre a velocidade média de admissão na abertura (U_a) e o número de Reynolds (Re) para jato de ar com 16,6 mm de espessura.

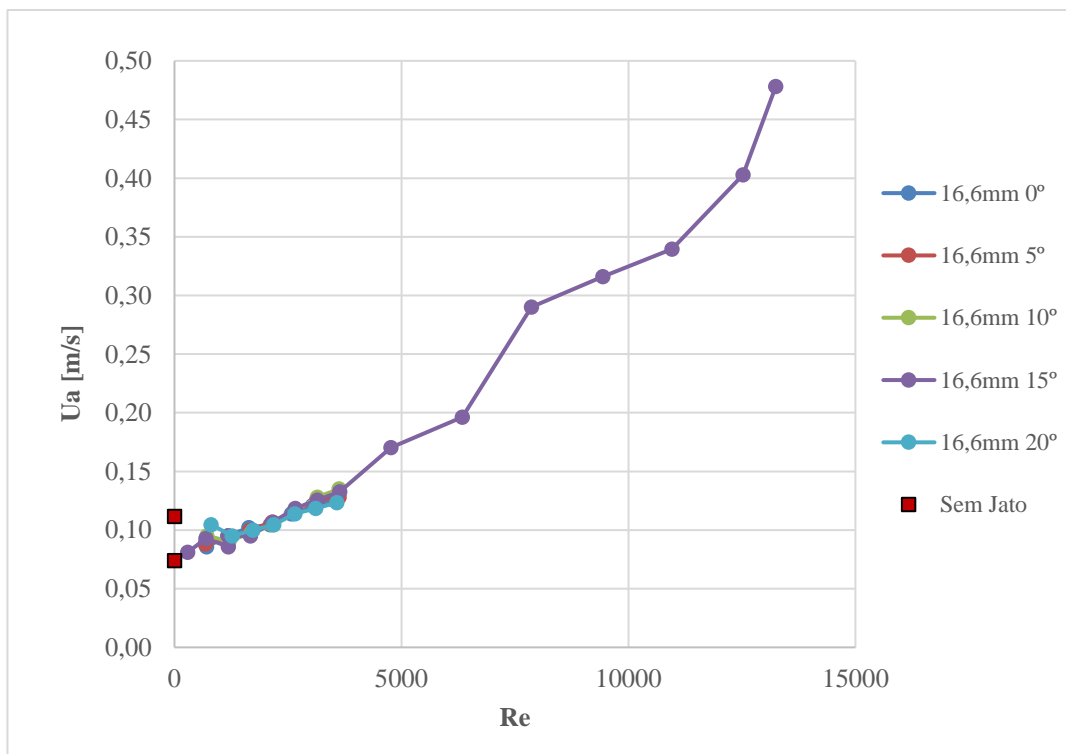


Figura 17 - Relação entre a velocidade média de admissão na abertura (U_a) e o número de Reynolds (Re) para jato de ar com 16,6 mm de espessura.

Através da observação dos gráficos, constata-se que os ângulos do jato não aparentam ter uma influência significativa na estanquidade da cortina, tendo em conta a clara dispersão dos resultados, em que não há qualquer sequência (quer crescente, quer decrescente) dos valores obtidos. Esta situação é bem visível para as três espessuras apresentadas.

É, também, possível observar claramente que, em cada espessura, existem resultados experimentais que apresentam uma inflexão (para Re compreendido entre 800 e 1800). Verifica-se, assim, valores de velocidade média de admissão na porta mais elevados para números de Reynolds mais baixos. No entanto, este comportamento é coerente com o valor de velocidade média de admissão na porta medido quando a cortina de ar está desligada (conforme se vê nas figuras 14 e 15).

4.3.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO JATO

Para analisar a influência da espessura do jato, apresenta-se de seguida o conjunto dos resultados, no primeiro caso, individualizados por ângulo de inclinação do jato e por espessura do bocal (figura 18) e, no segundo caso, individualizados apenas pela espessura do bocal (figuras 19 e 20).

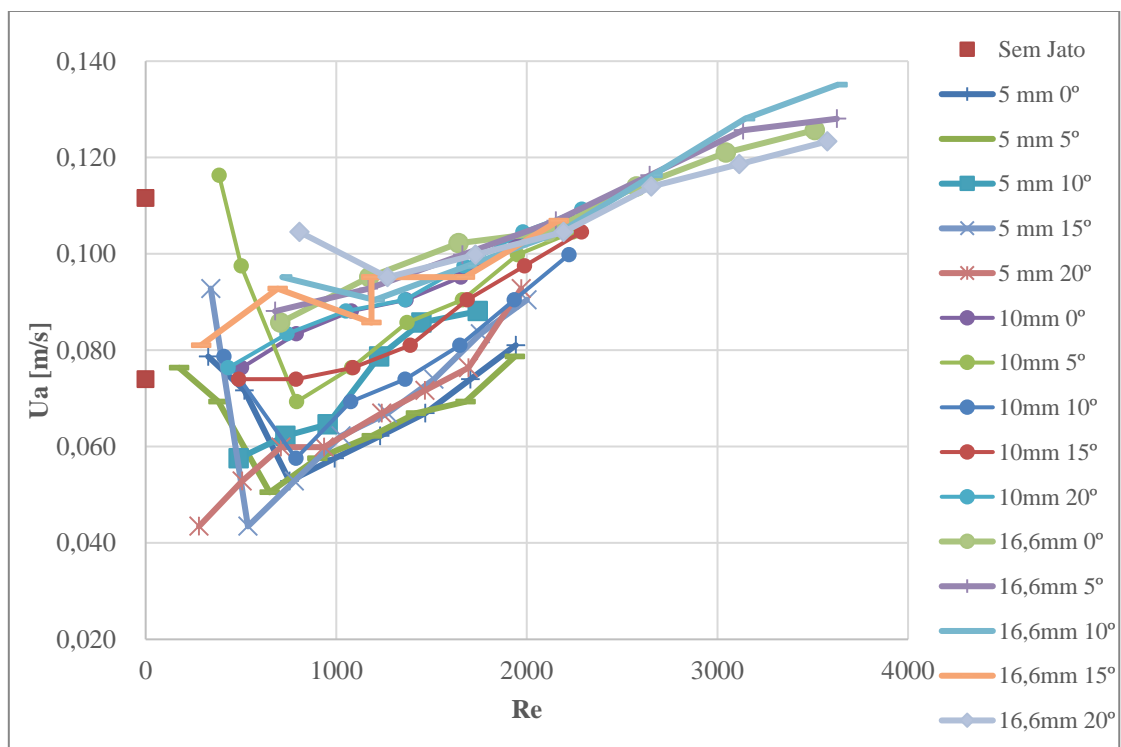


Figura 18 - Relação entre a velocidade média de admissão na abertura (U_a) e o número de Reynolds (Re) de todos os ensaios realizados, individualizados pelo ângulo de inclinação do jato e pela espessura do bocal.

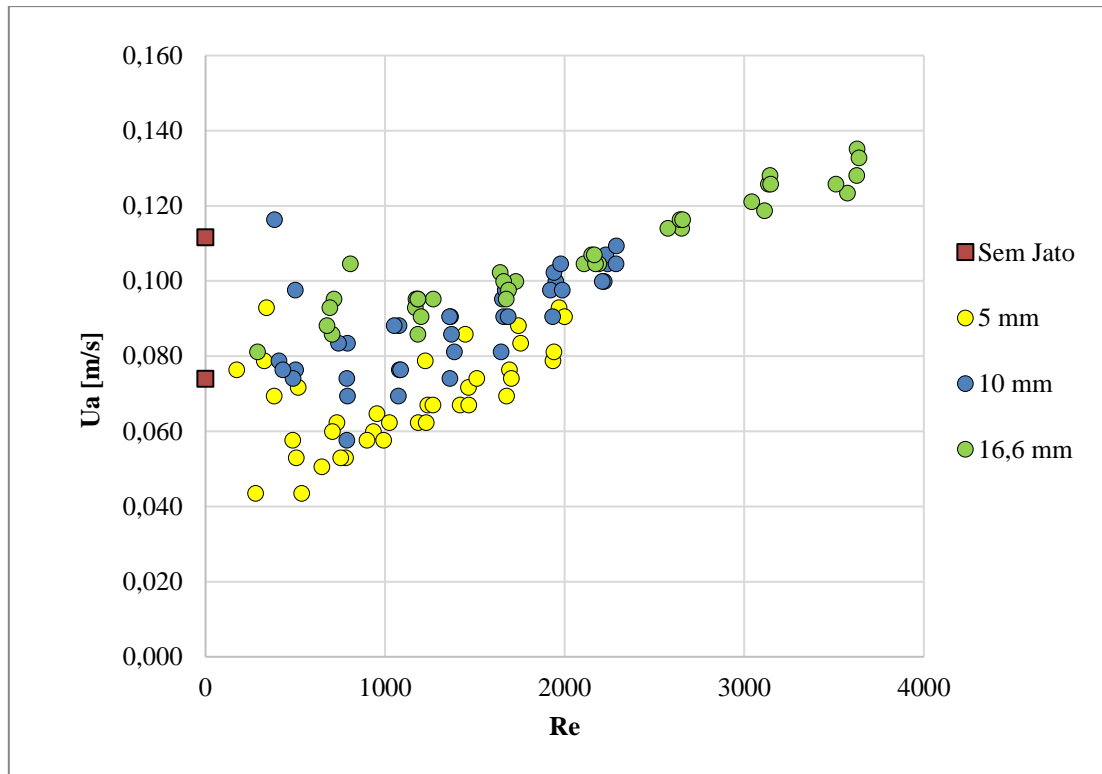


Figura 19 - Relação entre a velocidade média de admissão na abertura (U_a) e o número de Reynolds (Re) de todos os ensaios realizados, individualizados pela espessura do bocal.

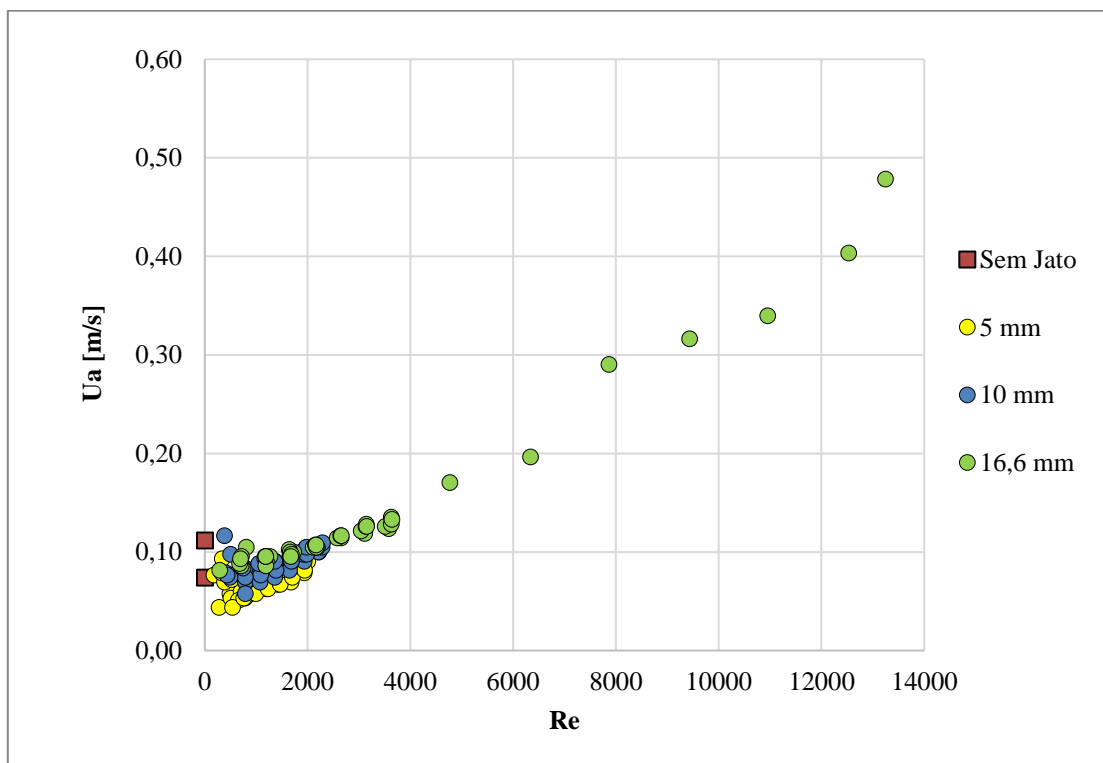


Figura 20 - Relação entre a velocidade média de admissão na abertura (U_a) e o número de Reynolds (Re) de todos os ensaios realizados, individualizados pela espessura do bocal.

É possível observar, principalmente na figura 20 (onde a disposição dos resultados está mais clara), que os resultados experimentais apresentam uma disposição ordenada no sentido crescente de espessuras. Isto é, para o mesmo número de Reynolds, a menor espessura apresenta valores de velocidade média de admissão na porta mais baixos e a maior espessura apresenta valores de velocidade média de admissão na porta mais altos.

Confirma-se, uma vez mais, que os valores decrescentes da velocidade média de admissão na porta, para baixos números de Reynolds, são coerentes com o valor da velocidade média de admissão na porta quando a cortina de ar está inativa.

4.3.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM OS ENSAIOS PRECEDENTES

Uma vez que o estudo aqui apresentado vem no seguimento de outros estudos anteriores [19], irá fazer-se uma análise comparativa dos mesmos. Foram realizados ensaios da cortina de ar com números de Reynolds bastante maiores (como se tem visto nas figuras anteriores) com o objetivo de perceber a dispersão dos resultados atuais com os precedentes.

Antes de se proceder à análise comparativa, é importante explicar como foram alcançados os resultados dos ensaios precedentes, pois estes apresentam algumas particularidades. Nos ensaios anteriores foram utilizadas partículas de pequenas dimensões, PM10 e PM2.5 (com o objetivo de simular micro-organismos). Foi colocado um contador de partículas no interior do compartimento contaminado e outro contador no exterior. O rácio entre a concentração de partículas no exterior e o interior do compartimento permitiu avaliar a estanquidade aerodinâmica da cortina de ar. À semelhança dos ensaios atuais, esta estanquidade aerodinâmica foi avaliada impondo diferentes parâmetros no jato e diferentes caudais de exaustão.

Na figura 21, estão apresentados os resultados experimentais obtidos para a espessura nominal do bocal do jato de 16,6 mm, e alguns resultados de 5 e 10 mm (representados por bolas), em comparação com os ensaios precedentes (representados por quadrados). Os ensaios relativos à avaliação da estanquidade aerodinâmica, recorrendo aos contadores, de partículas foram realizados com ângulo no bocal de jato de 18° e 22,5°, impondo diferentes velocidades no jato em que o caudal de exaustão foi variando gradualmente consoante a variação do rácio entre a concentração de contaminantes no exterior e no interior. Foram, também, realizados ensaios sem recurso aos contadores, em que a avaliação da estanquidade foi obtida apenas visualmente (com ângulo no bocal de 30°) e os resultados obtidos correspondem ao caudal de exaustão mínimo necessário para se alcançar a estanquidade. Em alguns resultados, constatou-se que a ação do vento no exterior, tanto em velocidade como em direção (impondo diferentes pressões no interior do compartimento), teve um grande impacto nos ensaios.

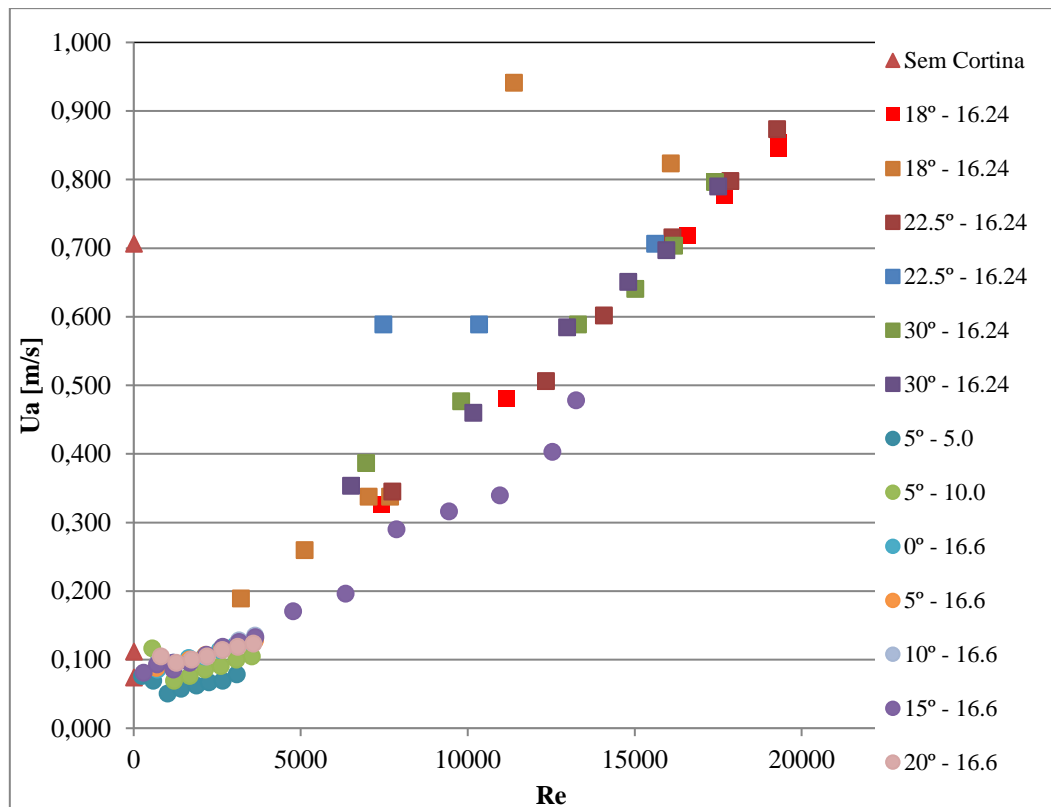


Figura 21 - Comparação entre os resultados atuais e os resultados precedentes.

É possível verificar que os resultados mais recentes apresentam uma ligeira dispersão relativamente aos resultados precedentes. Esta divergência deve-se, em grande parte, ao isolamento da exaustão em relação à ação do vento (ligado ao exterior) que, para os ensaios mais recentes, reduziu substancialmente as perturbações na porta. No entanto, apesar desta divergência, verifica-se que ambos os resultados se encontram alinhados ao longo de uma linha reta.

4.3.4 FUNÇÃO DE AJUSTAMENTO PELO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

Conforme foi explicado no subcapítulo 4.2 (da análise teórica), para o regime turbulento, a estanquidade aerodinâmica pode ser expressa pela seguinte função.

$$\bar{u}_a = K \left[0.22 \left(\frac{2h}{b_0 \cos \alpha_0} \right)^{0.5} + 0.5 \right] \bar{u}_0 \frac{b_0}{h} \quad (4.22)$$

Neste caso, é importante analisar e verificar se os resultados obtidos dos ensaios podem ser expressos por tal função. Para o efeito, foi realizado o ajustamento dos resultados pelo método dos mínimos quadrados da equação 4.22.

$$U_a = A \left[0.22 \left(\frac{2h}{b_0 \cos \alpha_0} \right)^D + C \right] \bar{u}_0 \frac{(b_0)^E}{h} + F \quad (4.23)$$

Os resultados obtidos estão apresentados em baixo.

Quadro 5 - Valores das variáveis calculados pelo método dos mínimos quadrados.

A	C	D	E	F
23,951	3,26E-08	0,720	2,054	0,049

Em termos gráficos, o resultado obtido é o seguinte:

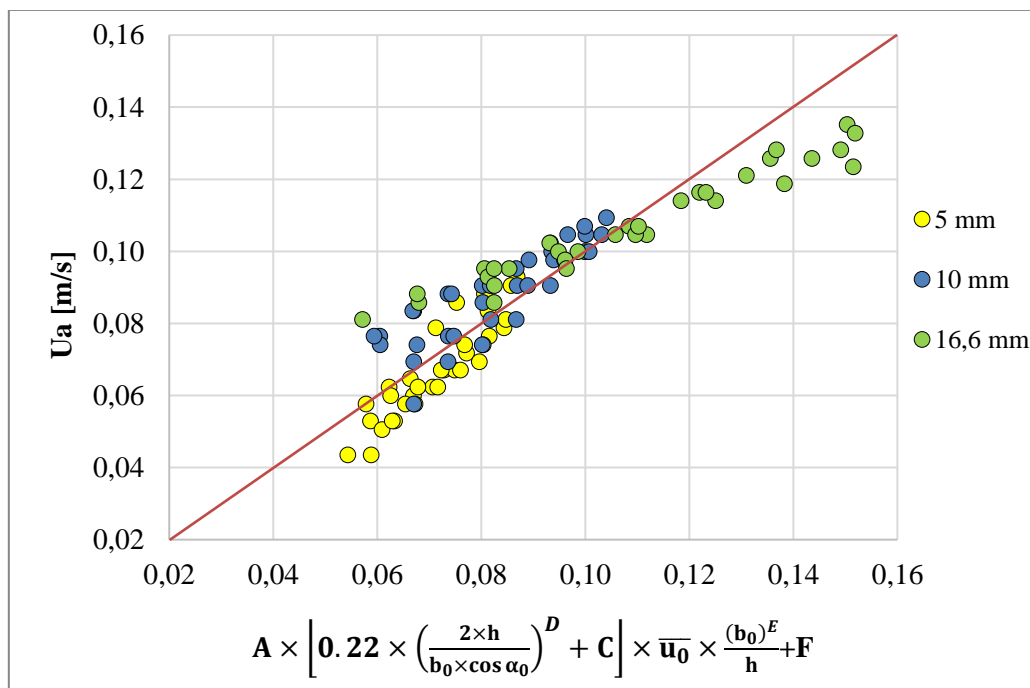


Figura 22 - Resultados com o ajustamento do método dos mínimos quadrados.

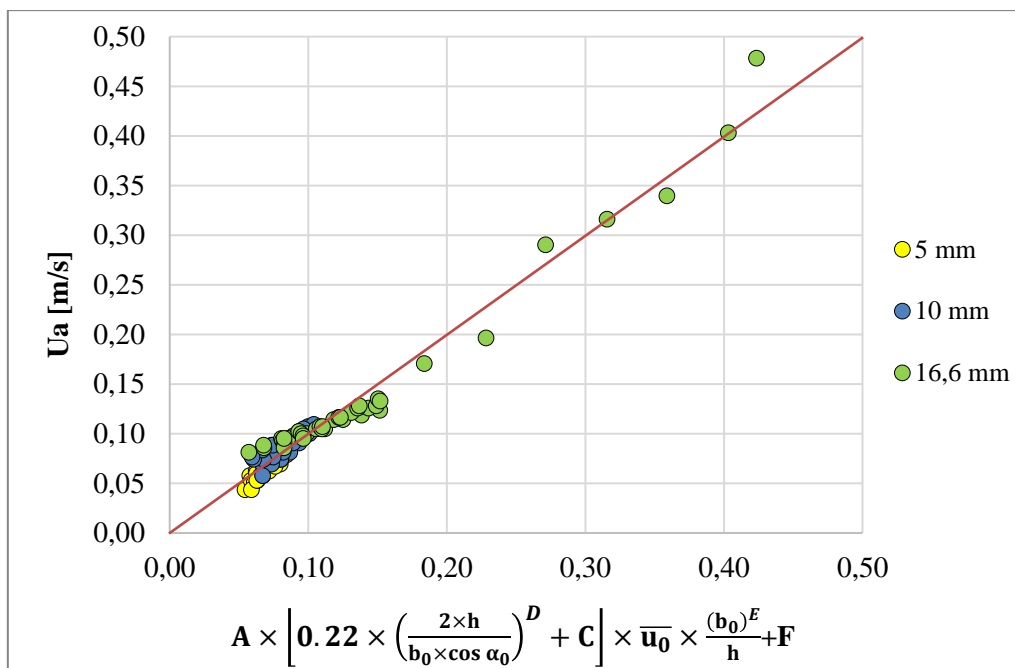


Figura 23 - Resultados com o ajustamento do método dos mínimos quadrados.

Para este caso, o coeficiente de correlação (R^2) correspondente ao ajuste linear apresenta um valor de 0,967.

De referir que a linha vermelha imposta tanto nas figuras 22 e 23 como nas figuras posteriores tem apenas o objetivo de mostrar a simetria do gráfico para se perceber mais facilmente o ajustamento dos resultados pelo método dos mínimos quadrados.

De modo a se obter uma expressão mais próxima daquela que foi deduzida teoricamente (equação 4.22), foram impostos valores nas variáveis C e D. As restantes variáveis da equação 4.23 foram ajustadas pelo método dos mínimos quadrados. Os resultados obtidos para esta nova configuração encontram-se no quadro seguinte.

Quadro 6 - Valores das variáveis calculados pelo método dos mínimos quadrados.

A	C	D	E	F
23,336	0,5	0,5	1,784	0,049

Para as novas variáveis obtidas, a equação 4.23 passa a ter a seguinte forma:

$$U_a = 23,34 \times \left[0.22 \times \left(\frac{2 \times h}{b_0 \times \cos \alpha_0} \right)^{0,5} + 0,5 \right] \times \bar{u}_0 \times \frac{(b_0)^{1,78}}{h} + 0,049 \quad (4.24)$$

Em termos gráficos, o novo ajustamento obtido encontra-se em baixo.

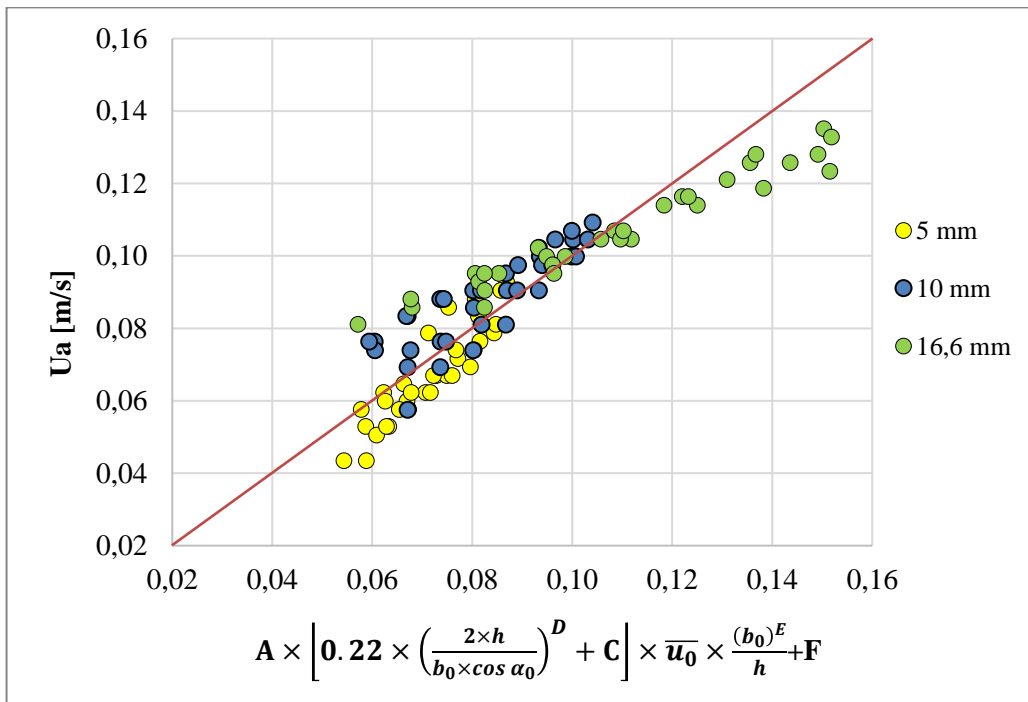


Figura 24 - Resultados com o ajustamento do método dos mínimos quadrados, com os novos valores de C e D impostos na função.

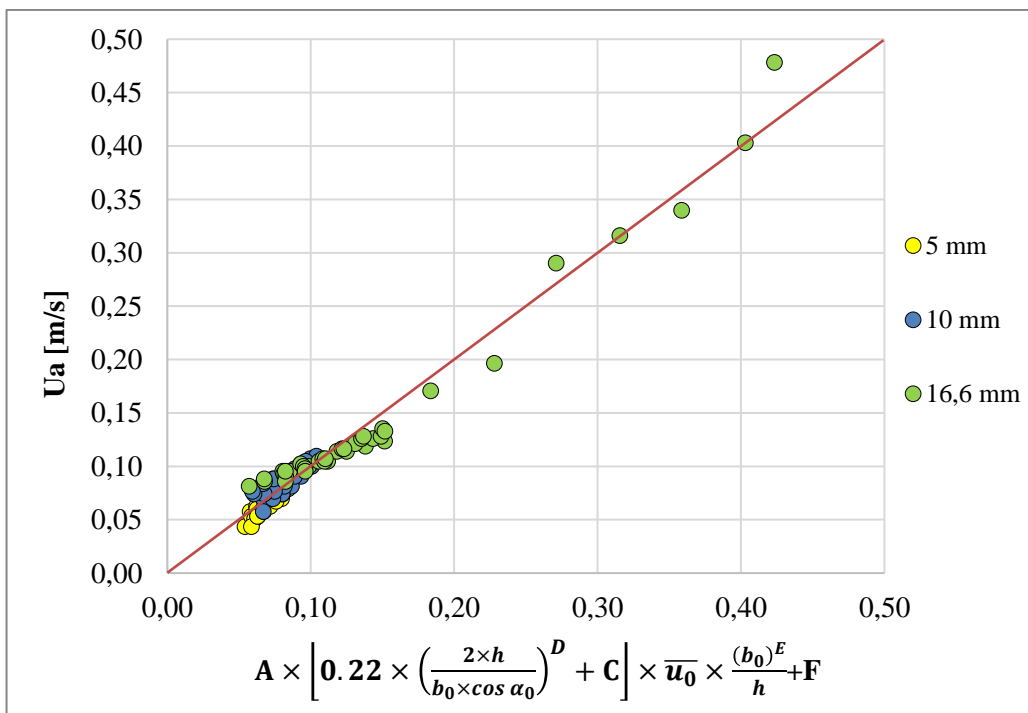


Figura 25 - Resultados com o ajustamento do método dos mínimos quadrados, com os novos valores de C e D impostos na função.

Discussão de resultados

Para este novo ajustamento, o valor de R^2 apresenta um valor de 0,967. Isto significa, portanto, que a qualidade deste ajuste, embora não seja o melhor, é bastante semelhante ao ajuste apresentado nas figuras 22 e 23.

Finalmente, para se obter uma expressão similar à deduzida teoricamente (equação 4.22) foram impostos valores para as variáveis C, D e E. As restantes variáveis da equação 4.23 foram novamente ajustadas pelo método dos mínimos quadrados. Os resultados obtidos estão apresentados no quadro 7.

Quadro 7 - Valores das variáveis calculados pelo método dos mínimos quadrados.

A	C	D	E	F
0,96	0,5	0,5	1,0	0,029

Assim, com as variáveis obtidas, a equação 4.23 passa a ter o seguinte formato:

$$U_a = 0,96 \times \left[0,22 \times \left(\frac{2 \times h}{b_0 \times \cos \alpha_0} \right)^{0,5} + 0,5 \right] \times \bar{u}_0 \times \frac{b_0}{h} + 0,029 \quad (4.25)$$

Em termos gráficos, o resultado obtido encontra-se na figura 26 e figura 27.

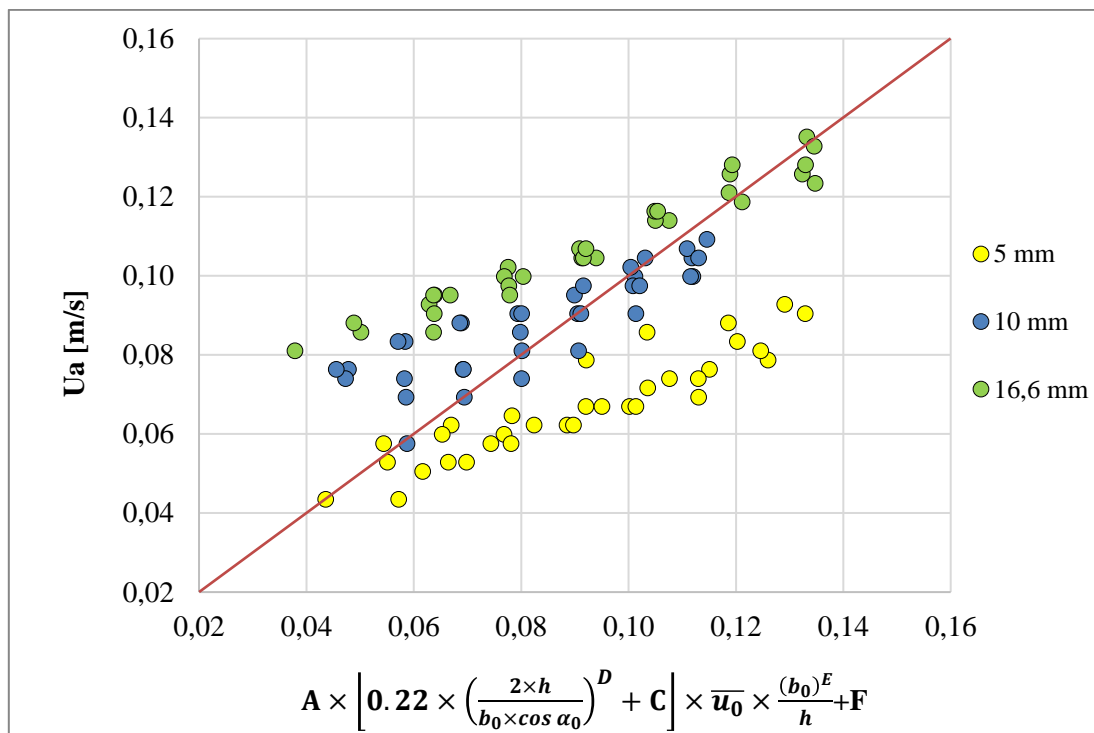


Figura 26 - Resultados com o ajustamento do método dos mínimos quadrados, com os novos valores de C, D e E impostos na função.

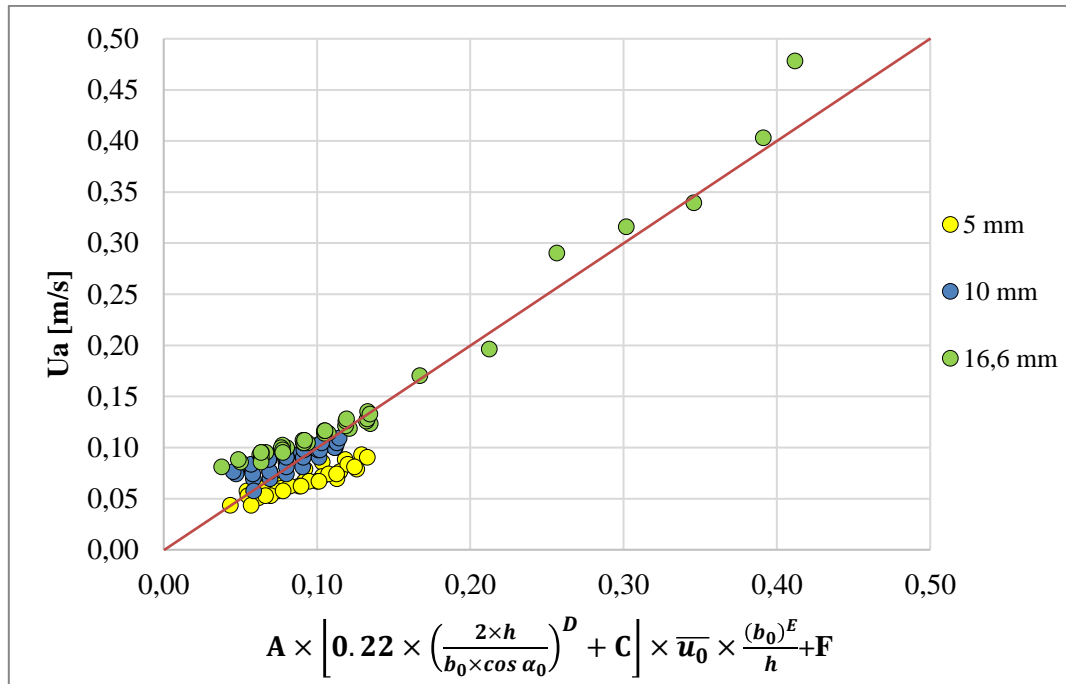


Figura 27 - Resultados com o ajustamento do método dos mínimos quadrados, com os novos valores de C, D e E impostos na função.

Neste caso, o valor de R^2 , correspondente ao ajuste linear, é de 0,889, que é significativamente mais baixo que os valores de R^2 obtidos nas tentativas de ajustamento anteriores. Isto significa que a qualidade de ajustamento apresentada nas figuras 26 e 27 é pior que as anteriores (figuras 22 e 23 e figuras 24 e 25). Portanto, mantém-se a equação 4.24, pois esta apresenta o melhor ajuste, mais próximo da equação teórica (equação 4.22).

Por último, é apresentado, na figura 28, o gráfico com os resultados experimentais com a média de admissão na porta (U_a) em função da velocidade do jato no bocal (U_0) em comparação com as previsões obtidas com a equação 4.2.

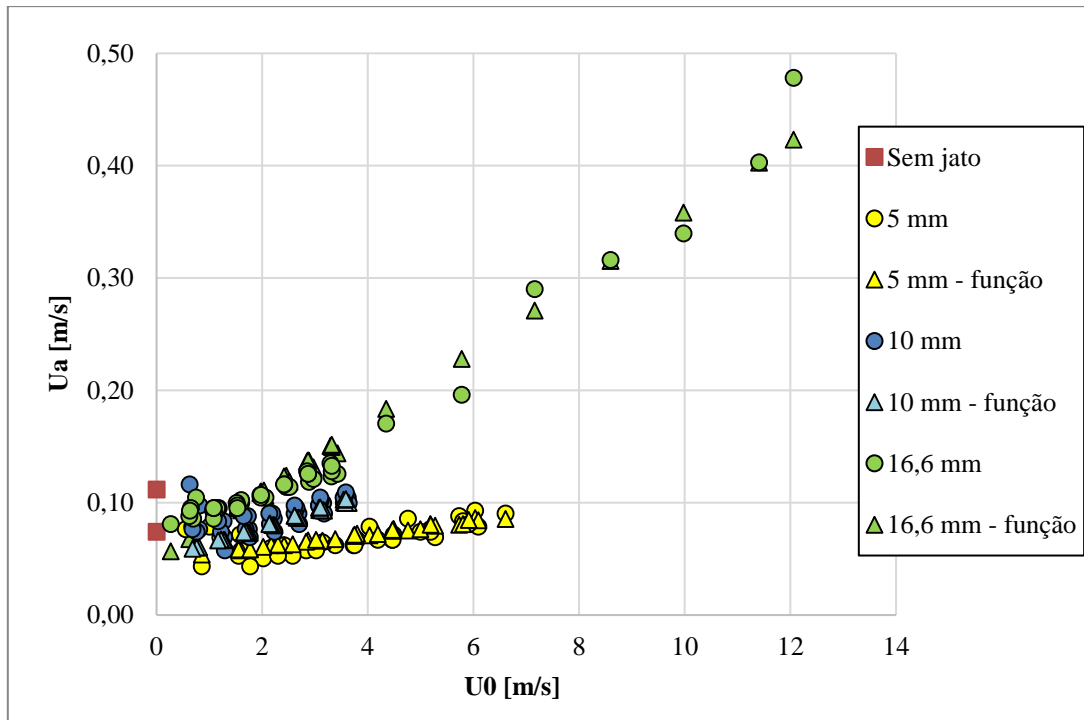


Figura 28 - Resultados experimentais ajustados com a velocidade média do escoamento na porta (U_a) em função da velocidade do jato no bocal (U_0).

5. CONCLUSÕES

O estudo experimental aqui apresentado veio dar continuidade e complementar outros estudos precedentes em que se pretende avaliar a estanquidade aerodinâmica das cortinas de ar associadas a um caudal de exaustão no interior de um compartimento contaminado. De um modo geral, pode dizer-se que existe uma boa concordância entre os resultados precedentes com os resultados obtidos neste trabalho, como também na avaliação da eficiência da estanquidade aerodinâmica propiciada pela cortina de ar.

Foram avaliados diferentes parâmetros impostos na cortina de ar (velocidade, espessura e ângulo do bocal do jato) com o intuito de analisar a sua influência na estanquidade da cortina. No entanto, constatou-se que, embora tenha sido alcançada a estanquidade pretendida, o ângulo da cortina não apresenta uma influência significativa. Verificou-se, ainda, que à medida que a espessura do jato aumenta, para um mesmo número de Reynolds, a velocidade de admissão na porta, u_a , também aumenta. Contudo, o objetivo principal prendia-se com a identificação de qual a velocidade média mínima de admissão na abertura para as diferentes configurações da cortina, mencionadas anteriormente, que garante a estanquidade, em regime isotérmico.

Recorrendo ao método dos mínimos quadrados, foi possível encontrar o melhor ajustamento de uma função exponencial aos resultados dos ensaios, de modo a obter-se uma equação que permite prever a eficiência da estanquidade aerodinâmica da cortina de ar para um fluxo de exaustão minimizado. Considerando os resultados experimentais alcançados, foi obtida uma equação geral, para baixos e altos números de Reynolds do jato de ar, para prever a velocidade média através da porta, protegida pela cortina de ar (relacionada com a exaustão do compartimento) necessária para se alcançar devidamente a estanquidade aerodinâmica, em função dos parâmetros geométricos e dinâmicos do jato.

Concluindo, foi provada a viabilidade do uso de cortinas de ar com combinação de exaustão de ar, de modo a evitar a fuga de contaminantes de uma zona contaminada para uma zona “limpa” e encontrada a sua configuração otimizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Viegas, J.C.; Oliveira, F.; Aelenei, D. Experimental Study on the Aerodynamic Sealing of Air Curtains. *Fluids* 3, 49, 2018.
- [2] Dias, J.; Gogotsi, A.; Viegas, J.C. - CFD simulation of the aerodynamic sealing of plane jets. *IOSR Journal of Engineering*, Vol. 09, pp. 31-53, 2019.
- [3] L.P.C. Neto, *Estudo de Sistemas de Vedação Aerodinâmica do Tipo Cortina de Ar*. Por Luís Paulo Coelho Neto, Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica (Aerodinâmica), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2006.
- [4] J.C. Gonçalves, *Estudo Numérico e Experimental da Vedação Aerodinâmica em Espaços Refrigerados*. Por João Carlos Gonçalves, Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2010.
- [5] Blevins R. D., “Applied fluid dynamics handbook”. Van Nostrand Reinhold, 1984.
- [6] J. E. Rydock, J.P.; Hestad, T.; Haugen, H.; Skaret, “An Isothermal Air Curtain for Isolation of Smoking Areas in Restaurants,” 2000.
- [7] 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*, vol. 1, pp. 385–392, 2006.
- [8] 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.
- [9] G. Kairo, M. Pioz, S. Tchamitchian, M. Pelissier, J. Brunet and L.P. Belzunces, “Efficiency of an air curtain as an anti-insect barrier: the honey bee as a model insect”, 2017.
- [10] Viegas, João Carlos e Hildebrando CRUZ - Air Curtains Combined with Smoke Exhaust for Smoke Control in Case of Fire: Full-Size Experiments. *Fire Technology*, 55, pp211–232, 2019.

- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] G. Cook; and D. Int-hout, “In the Hospital Operating Room,” *ASHRAE Journal*, no., 2009.
- [14] Hayes, F.C., "Heat transfer characteristics of the air curtain: A plane jet subjected to transverse pressure and temperature gradients", Tese de Doutorado, Department of Mechanical Engineering, University of Illinois, USA, 1968.
- [15] Hayes, F.C. e Stoecker, W.F., "Design data for air curtains", *ASHRAE Transactions*, 75(2), pp. 168-180, 1969a.
- [16] Hayes, F.C. e Stoecker, W.F., "Heat transfer characteristics of the air curtain", *ASHRAE Transactions*, 75(2), pp. 153-167, 1969b.
- [17] 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.
- [18] F.M.S. Oliveira, *Estudo Experimental da Limitação da Contaminação com Poluentes Utilizando Jatos Planos*. Por Fernando Manuel Simões Oliveira, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Caparica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2017.
- [19] Kaluzny, P. Viegas, J. Durand, A. Fluchaire, L. Franco, D. Saldanha, C. Pimentel Real, L. Carrasco, L. Pinto, L. Morais, J. Morais, P. – Nanoguard2ar D4.1 - Enhanced environmental assessment, including monitoring of the up-scaled system efficiency. Lisboa, LNEC, 2019.
- [20] JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections, Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement.

Páginas da Internet

- **CORDIS. Projects&Results. Nanoguar2ar Nanomaterials-based innovative engineering solution to ensure sustainable safeguard to indoor. Consultado em Junho de 2019.**
(<https://cordis.europa.eu/project/rcn/199201/factsheet/en>)
- **IPAC. Documentos. Avaliação da Incerteza de Medição em Calibração. Consultado em Outubro de 2019.**
(<http://www.ipac.pt/docs/publicdocs/requisitos/OGC010.pdf>)

ANEXO – ERROS EXPERIMENTAIS

O cálculo dos erros experimentais aqui apresentado é baseado nas recomendações do Guia para a expressão da Incerteza na Medição (GUM) [20]. De entre os parâmetros geométricos e dinâmicos utilizados neste estudo, serão avaliadas as incertezas das medições experimentais com maior relevância e que se consideram ter maior impacto nos resultados obtidos, nomeadamente:

- ângulo no bocal do jato;
- espessura no bocal do jato;
- velocidade no bocal do jato;
- caudal de exaustão;

1. Ângulo no bocal do jato

O erro de medição do ângulo está diretamente associado ao operador, sendo a incerteza $U(\alpha) = \pm 1^\circ$.

2. Espessura no bocal do jato

A espessura do bocal do jato foi medida de duas formas diferentes. Para a espessura de 5 mm, mediu-se através de um conjunto de 3 pequenos apalpa-folgas com espessuras diferentes, enquanto que para as espessuras de 10 e 16,6 mm, estas foram medidas com o auxílio de um paquímetro digital com $\epsilon_x = 0,005$ mm.

Para o cálculo da incerteza do apalpa folgas, realizaram-se 10 medições em cada espessura diferente de modo a se encontrar a variância (equação A.1).

$$S^2(\bar{e}) = \frac{\sum (e_i)}{n^2} \quad (\text{A.1})$$

Por sua vez, a incerteza do apalpa folgas é obtido pela raiz da variância (equação A.2),

$$U(\bar{e}) = \sqrt{S^2(\bar{e})} \quad (\text{A.2})$$

No entanto, a espessura do bocal do jato foi sempre medida com a combinação de 2 apalpa folgas, por isso, a incerteza é dada por:

$$U_2(\bar{e}) = \sqrt{2S^2(\bar{e})} \quad (\text{A.3})$$

Relativamente ao paquímetro digital, a variância é obtida através:

$$S^2(X) = \frac{1}{3} \epsilon_x^2 \quad (\text{A.4})$$

No quadro 8, apresentam-se os níveis da incerteza para cada espessura medida.

Quadro 8 - Cálculo de incertezas na medição da espessura do bocal do jato.

Espessura [mm]	Ângulo [°]	Esp.Média No Bocal [mm]	S ² (apalpafolgas/paquímetro) [mm ²]		U(apalpafolgas/paquímetro) [mm]	%
5,0	0	4,98	1,04E-05	±	0,010	0,2%
	5	4,82		±		0,2%
	10	4,74		±		0,2%
	15	4,59		±		0,2%
	20	4,95		±		0,2%
10,0	0	9,46	8,33E-06	±	0,003	0,03%
	5	9,38		±		0,03%
	10	9,25		±		0,03%
	15	9,79		±		0,03%
	20	9,68		±		0,03%
16,6	0	15,53	8,33E-06	±	0,003	0,02%
	5	16,59		±		0,02%
	10	16,72		±		0,02%
	15	16,64		±		0,02%
	20	16,37		±		0,02%

Relativamente ao apalpa folgas, foi adicionado mais 0,5 mm na incerteza que engloba os erros de utilizador (como por exemplo, força e ângulo na medição no bocal do jato).

3. Velocidade no bocal do jato

No que diz respeito à velocidade do jato de ar, consideram-se os seguintes componentes da incerteza:

- incerteza do anemómetro;
- incerteza da regressão linear;
- incerteza de calibração.

Não será tida em conta a incerteza padrão do anemómetro ($U=0,005$ m/s), pois esta apresenta um valor muito pouco significativo e, por esse motivo, constata-se que tem pouco impacto nos resultados.

A incerteza relativa à calibração do anemómetro (efetuada pela UMA) apresenta um valor de $U(\text{cal}) = 0,048$ m/s.

As curvas de calibração serão determinadas através de regressões lineares. A incerteza que diz respeito à determinação da curva de calibração é obtida através da seguinte expressão:

$$U_c^2[Y(X)] = S^2(b) + X^2 S^2(a) + 2 X S(a) S(b) r(a, b) \quad (\text{A.5})$$

$S^2(a)$ e $S^2(b)$ representam as variâncias do declive da reta (a) e da ordenada na origem (b), sendo expressas por:

$$S^2(b) = \frac{S^2 \sum_i^n X_i^2}{D} \quad (\text{A.6})$$

$$S^2(a) = n \frac{S^2}{D} \quad (\text{A.7})$$

$r(a, b)$ é o coeficiente de correlação estimado, dado por:

$$r(a, b) = - \frac{\sum_i^n X_i}{\sqrt{n \sum_i^n X_i^2}} \quad (\text{A.8})$$

A variância da regressão linear, S^2 , é calculada através de:

$$S^2 = \frac{\sum_i^n [Y_i - Y(X_i)]^2}{n - 2} \quad (\text{A.9})$$

A variável D presente nas expressões A.6 e A.7 é calculada por:

$$D = n \sum_i^n X_i^2 - (\sum_i^n X_i)^2 \quad (\text{A.10})$$

A variável $Y(X_i)$ representa a linha de tendência para o conjunto global dos resultados, sendo a velocidade de referência a variável independente

A incerteza combinada é, então, obtida pela raiz da soma dos quadrados das variâncias da calibração e da regressão linear:

$$U = \sqrt{U_c^2 + U_v^2} \quad (\text{A.11})$$

A incerteza inerente às velocidades medidas pelo anemómetro de fio quente, encontra-se nos quadros 9, 10 e 11.

Quadro 9 – Cálculo de incertezas na medição da velocidade do bocal do jato de ar para a espessura de 5 mm.

Ângulo [°]	V _{méd.ref} [m/s]	V _{méd.bocal} [m/s]	X ²	Y(X _i)	(Y - Y(X _i)) ²		Uc ² [Y(X)]	Uc[Y(X)]	%
0	1,17	1,00	1,37	0,82	0,03	±	0,003	0,225	22%
	5,10	3,77	26,01	3,93	0,03	±	0,001	0,221	6%
	9,03	6,67	81,54	7,04	0,14	±	0,003	0,224	3%
5	1,15	0,58	1,32	0,81	0,05	±	0,003	0,225	39%
	5,03	3,53	25,30	3,88	0,12	±	0,001	0,221	6%
	9,11	7,05	82,99	7,11	0,00	±	0,003	0,225	3%
10	1,30	0,78	1,69	0,93	0,02	±	0,003	0,225	29%
	5,02	4,13	25,20	3,87	0,07	±	0,001	0,221	5%
	9,07	7,39	82,26	7,08	0,10	±	0,003	0,224	3%
15	1,09	0,82	1,19	0,76	0,00	±	0,003	0,225	27%
	4,83	4,47	23,33	3,72	0,56	±	0,001	0,221	5%
	9,03	7,23	81,54	7,04	0,03	±	0,003	0,224	3%
20	1,28	0,75	1,64	0,91	0,03	±	0,003	0,225	30%
	5,02	3,91	25,20	3,87	0,00	±	0,001	0,221	6%
	9,19	6,87	84,46	7,17	0,09	±	0,003	0,225	3%

Quadro 10 - Cálculo de incertezas na medição da velocidade do bocal do jato de ar para a espessura de 10 mm.

Ângulo [°]	V _{méd.ref} [m/s]	V _{méd.bocal} [m/s]	X ²	Y(X _i)	(Y - Y(X _i)) ²		Uc ² [Y(X)]	Uc[Y(X)]	%
0	1,70	0,62	2,89	0,60	0,00	±	0,002	0,224	36%
	5,02	2,29	25,20	2,11	0,03	±	0,001	0,221	10%
	9,07	4,02	82,26	3,96	0,00	±	0,003	0,224	6%
5	1,55	0,55	2,40	0,53	0,00	±	0,003	0,224	41%
	5,02	2,32	25,20	2,11	0,04	±	0,001	0,221	10%
	9,02	4,05	81,36	3,94	0,01	±	0,003	0,224	6%
10	1,68	0,61	2,82	0,59	0,00	±	0,003	0,224	37%
	5,03	2,35	25,30	2,12	0,05	±	0,001	0,221	9%
	9,01	4,06	81,18	3,93	0,02	±	0,003	0,224	6%
15	1,75	0,62	3,06	0,62	0,00	±	0,002	0,224	36%
	5,00	2,18	25,00	2,10	0,01	±	0,001	0,221	10%
	9,01	3,99	81,18	3,93	0,00	±	0,003	0,224	6%
20	1,87	0,62	3,50	0,68	0,00	±	0,002	0,224	36%
	-	-	-	-	-	±	-	-	-
	9,00	4,07	81,00	3,93	0,02	±	0,003	0,224	6%

Quadro 11 - Cálculo de incertezas na medição da velocidade do bocal do jato de ar para a espessura de 16,6 mm.

Ângulo [°]	V _{méd.ref} [m/s]	V _{méd.bocal} [m/s]	X ²	Y(X _i)	(Y - Y(X _i)) ²		Uc ² [Y(X)]	Uc[Y(X)]	%
0	1,85	0,62	3,42	0,67	0,00	±	0,002	0,224	36%
	-	-	-	-	-	±	-	-	-
5	9,04	3,90	81,72	3,95	0,00	±	0,003	0,224	6%
	1,89	0,57	3,57	0,69	0,01	±	0,002	0,224	39%
10	-	-	-	-	-	±	-	-	-
	9,02	3,77	81,36	3,94	0,03	±	0,003	0,224	6%
15	1,88	0,60	3,53	0,68	0,01	±	0,002	0,224	37%
	-	-	-	-	-	±	-	-	-
20	9,03	3,74	81,54	3,94	0,04	±	0,003	0,224	6%
	1,86	0,57	3,46	0,67	0,01	±	0,002	0,224	39%
	-	-	-	-	-	±	-	-	-
	9,03	3,78	81,54	3,94	0,03	±	0,003	0,224	6%
	1,87	0,56	3,50	0,68	0,01	±	0,002	0,224	40%
	5,01	2,26	25,10	2,11	0,02	±	0,001	0,221	10%
	9,03	3,65	81,54	3,94	0,08	±	0,003	0,224	6%

Como é possível de constatar, o grau de incerteza para as velocidades mais baixas (a variar entre 22 e 40%) é significativamente maior que as velocidades mais elevadas (varia entre 3 e 11%). Este comportamento verifica-se devido ao elevado valor correspondente à incerteza da calibração do anemómetro de fio quente.

4. Caudal de exaustão

A incerteza relativa ao caudal de exaustão foi efetuada em estudo precedente [10]. A respetiva incerteza padrão do caudal volúmico, incluindo a componente da regressão linear (entre o controlador do ventilador e o caudal volúmico) é $U(\dot{v}) = 0,339 \text{ m}^3/\text{s}$.

A incerteza padrão apresenta um valor elevado em relação aos valores obtidos nos ensaios deste estudo (ver quadros 1, 2, 3 e 4 no capítulo 3). Este valor elevado deve-se à calibração do anemómetro de turbina. Esta calibração foi realizada no túnel de vento com recurso a um micromanómetro com tubo de Pitot, que regista variações de pressão muito pequenas para baixas velocidades. Está a desenvolver-se uma metodologia de calibração mais adequada que permita reduzir a respetiva incerteza.