



João Eduardo Lopes Alves
Mestre em Engenharia Mecânica

Escoamento axissimétrico estabelecido por um jacto confinado: determinação experimental da localização do recolamento e da razão de recirculação

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Doutor Daniel Cardoso Vaz,
Professor Auxiliar, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António Rafael Janeiro Borges
Arguente: Prof. Doutor José Fernando de Almeida Dias
Vogal: Prof. Doutor Daniel Cardoso Vaz



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro de 2012

Escoamento axissimétrico estabelecido por um jacto confinado: determinação experimental da localização do recolamento e da razão de recirculação

Nota: A presente dissertação foi redigida segundo a ortografia anterior ao novo acordo ortográfico.

Copyright © João Eduardo Lopes Alves, 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 objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

João Eduardo Lopes Alves

Mestre em Engenharia Mecânica

Escoamento axissimétrico estabelecido por um jacto confinado: determinação experimental da localização do recolamento e da razão de recirculação

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Setembro 2012

Agradecimentos

Ao Professor Daniel Cardoso Vaz, meu orientador, agradeço a confiança depositada nas minhas capacidades para a realização deste trabalho. Pelos ensinamentos transmitidos, ajuda na construção das sondas de pressão e o apoio prestado nos ensaios experimentais. Pelas discussões e revisão técnica, que ajudaram a enriquecer este trabalho ao longo destes meses.

Ao pessoal do laboratório do Núcleo de Tecnologia Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica da FCT, pela sua disponibilidade e prontidão, no facejamento do tubo de acrílico, e no acesso a ferramentas e instrumentos de uso corrente.

Ao Professor Alberto Martinho por disponibilizar equipamentos do laboratório do Núcleo de Projecto de Máquinas, para efectuar os orifícios na câmara e na sonda de pressão estática.

À equipa do projecto “Técnicas Numéricas e Experimentais Avançadas para a Análise de Fenómenos de Combustão sem Chama Visível”, com a referência PTDC/EME-MFE/102997/2008, pela participação nas reuniões e pelas discussões enriquecedoras.

Ao Engenheiro Filipe pela revisão integral do texto e sugestões que ajudaram a enriquecer este trabalho. Ao Miguel Magalhães pela revisão integral do texto, apoio e amizade ao longo destes anos.

A todos os meus colegas de curso que me acompanharam no Mestrado, e com os quais passei bons momentos, que irei recordar com muita saudade e em particular, ao João Duarte pela sua boa disposição e amizade, com quem realizei muitos trabalhos ao longo deste Mestrado.

À Sílvia pela dedicação, carinho, compreensão e pelo apoio em todos os momentos.

À minha família pela devida compreensão da minha ausência física ao longo destes cinco anos. Pelas condições que me proporcionaram e sacrifícios que fizeram por mim. Por todo o apoio, força e paciência, que nunca faltaram. Por terem acreditado e investido no meu futuro.

Resumo

O presente trabalho constitui uma contribuição para o conhecimento do comportamento aerodinâmico de jactos circulares turbulentos de densidade constante, confinados em câmaras coaxiais.

Utilizou-se uma instalação experimental, constituída por um modelo de câmara de combustão cilíndrica e um modelo de queimador, para o estudo do escoamento não reactivo. Determinou-se a localização do fecho da zona de recirculação, denominado por recolamento, e o valor da razão de recirculação.

Com base em revisão de literatura, seleccionaram-se as técnicas experimentais necessárias para caracterizar o escoamento. Construiu-se uma sonda de três orifícios e uma sonda de pressão estática, que foram dimensionadas de forma a diminuir a perturbação imposta ao escoamento.

Verificou-se a adequabilidade do escoamento aos objectivos através da observação da repetibilidade das experiências e a simetria do escoamento em relação ao eixo da câmara.

Obeve-se a localização do recolamento através de duas técnicas distintas envolvendo sondas de pressão (tubo de Pitot e sonda de três orifícios), tendo-se obtido resultados concordantes (diferença relativa de 0,85 %).

Mediu-se o perfil radial de pressão estática, ao nível do centro de recirculação. Constatou-se que este diferia do obtido através de ferramenta numérica.

Determinou-se o valor da razão de recirculação. Comparou-se este resultado, com o obtido através da aplicação de uma teoria com base em resultados numéricos, para o caso desta instalação experimental.

Compararam-se os resultados obtidos experimentalmente, nomeadamente a localização do recolamento e da zona do centro de recirculação (que foi determinado em trabalho anterior), com os obtidos através de uma ferramenta numérica e de equações empíricas da literatura. Através desta comparação, constatou-se que a localização do recolamento, não está muito afastado do obtido experimentalmente.

Palavras-chave: jacto confinado, sondas de pressão, filme de óleo, ponto de recolamento, razão de recirculação, experimental.

Abstract

The present work represents a contribution towards the understanding of the aerodynamic behaviour of turbulent jets with constant density confined in cylindrical chambers.

The non-reactive flow was studied in an experimental burner model coupled to an acrylic tube representing a cylindrical combustion chamber.

The location where the flow reattaches the wall was determined as well as the recirculation ratio.

In order to characterize the flow a number of experimental techniques were selected based on relevant studies reported in the literature. A three-hole pressure probe and a static pressure probe were built, which were designed in order to reduce the intrusion effects.

The flow was found to pursue the objectives given the good repeatability of experiments and its symmetry relative to the chamber axis.

The reattachment location was obtained through two distinct techniques involving pressure probes (Pitot tube and three-hole pressure probe), yielding concordant results (relative difference of 0,85 %).

A radial profile was measured at the recirculation center level. Differences were found between the profile and the one obtained through numerical tool.

The recirculation ratio value was obtained. This result agrees well with a correlation found in the literature applicable to this flow configuration.

The reattachment location and the recirculation zone center were also compared against results in literature from numerical and empirical models. The recirculation zone was found to be longer than that predicted numerically.

Keywords: confined jet, pressure probes, oil film, reattachment point, recirculation ratio, experimental.

Índice

Agradecimentos	I
Resumo	III
Abstract.....	V
Índice de figuras.....	IX
Índice de tabelas	XIII
Lista de abreviaturas	XV
Lista de símbolos.....	XVII
1 Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Estudos anteriores do jacto circular turbulento	2
1.2.1. Jacto confinado	2
1.2.2. Considerações teóricas	4
1.3. Revisão bibliográfica de técnicas experimentais.....	6
1.3.1. Tubo de Pitot	6
1.3.2. Sonda de pressão estática	10
1.3.3. Pressão estática na parede.....	12
1.3.4. Sonda de três orifícios.....	13
1.3.5. Outras técnicas.....	16
1.4. Contribuições do presente trabalho.....	19
2 Materiais e métodos	21
2.1. Instalação experimental.....	21
2.1.1. Ventilador e condutas.....	21
2.1.2. Queimador.....	23
2.1.3. Câmara de combustão	23
2.2. Instrumentação	24
2.2.1. Tubos de Pitot	24
2.2.2. Sonda de três orifícios.....	24
2.2.3. Sonda de pressão estática	27

2.2.4.	Outros instrumentos	29
2.3.	Técnicas experimentais de medida	30
2.3.1.	Caudal volúmico	30
2.3.2.	Simetria do escoamento	31
2.3.3.	Ponto de recolamento.....	33
2.3.4.	Razão de recirculação	38
3	Resultados e discussão	41
3.1.	Condições experimentais.....	41
3.2.	Simetria do escoamento	42
3.3.	Ponto de recolamento	44
3.3.1.	Sonda de três orifícios	44
3.3.2.	Tubo de Pitot.....	45
3.3.3.	Filme de óleo	46
3.4.	Razão de recirculação	49
3.5.	Comparação com resultados empíricos e numéricos da literatura.	53
4	Conclusão	55
4.1.	Principais conclusões.....	55
4.2.	Sugestões para trabalho futuro.....	56
	Bibliografia	59
	Anexo A: Erro de ângulo do escoamento na sonda de três orifícios	63
	Anexo B: Desenhos Técnicos	69

Índice de figuras

Figura 1.1 – Configuração de injectores: a) jacto central único; b) arranjo anelar de jactos.....	4
Figura 1.2 – Representação esquemática do jacto confinado em câmara circular. Figura não à escala.	4
Figura 1.3 – Diferentes geometrias da extremidade do tubo de Pitot: a) recto; b) hemisférico; c) elipsoidal.	7
Figura 1.4 – Efeito de deslocamento no tubo de Pitot.	7
Figura 1.5 – Efeito da proximidade do tubo de Pitot de uma parede.	8
Figura 1.6 – Correção devido ao efeito da proximidade à parede. Adaptado de Bryer e Pankhurst (1971).	9
Figura 1.7 – Exemplo de uma sonda de pressão estática.	10
Figura 1.8 – Influência na medição da pressão estática devido à extremidade e haste da sonda de pressão estática. Traduzido de Durst (2008).	11
Figura 1.9 – Geometria da tomada de pressão estática na parede (Benedict 1984).	13
Figura 1.10 – Sonda de três orifícios: extremidade de geometria trapezoidal.	13
Figura 1.11 – Erro devido ao chanfro com diferentes ângulos.	14
Figura 1.12 – Erro devido ao diferente comprimento de chanfros.	14
Figura 1.13 – Tufos colocados num míssil Falcon AGM-76A (Hughes).	16
Figura 1.14 – Visualização com filme de óleo do escoamento junto a uma pá de uma turbina (Havermann et al. 2002).	18
Figura 1.15 – Matriz de pontos de tinta colocada em cima de uma película antes do teste (Langston e Boyle 1982).	18
Figura 1.16 – Estrias provocadas pelo arrastamento dos pontos de tinta (Langston e Boyle 1982).	19

Figura 2.1 – Fotografia da instalação experimental.	21
Figura 2.2 – Fotografia do troço de transição de secções, rectangular para circular, e do elemento flexível.....	22
Figura 2.3 – Fotografia do troço onde se montou a tomada de pressão total e estática.....	22
Figura 2.4 – Fotografia da curva e da contracção.	22
Figura 2.5 – Dimensões principais do queimador.....	23
Figura 2.6 – Esquema dos tubos de Pitot utilizados. Da esquerda para a direita: tubo de Pitot em L e tubo de Pitot em S. Adaptado de Vaz (2007).....	24
Figura 2.7 – Representação da disposição das tomadas de pressão dentro da haste, na sonda de três orifícios: a) representação tridimensional; b) representação esquemática.....	25
Figura 2.8 – Relação entre o diâmetro interno da haste e o diâmetro externo dos tubos de tomada de pressão, com um espaçamento entre eles de 0,1 ou 0,2 mm. Os pontos representam os tubos disponíveis.....	26
Figura 2.9 – Representação esquemática da extremidade da sonda de três orifícios chanfrada a 45°.	26
Figura 2.10 – Fotografia da sonda de três orifícios.....	26
Figura 2.11 – Pormenor da extremidade da sonda.....	27
Figura 2.12 – Sonda de três orifícios colocada num projector de perfis.	27
Figura 2.13 – Fotografia da sonda de pressão estática colocada num projector de perfis. Resultado final.....	28
Figura 2.14 – Esquema do desvio do orifício em relação ao eixo da sonda de pressão estática	29
Figura 2.15 – Representação esquemática das dimensões principais da sonda de pressão estática.	29
Figura 2.16 – Fotografia do estado final da extremidade da sonda de pressão estática.	30
Figura 2.17 – Esquema do tubo de Pitot e da tomada de pressão estática no interior da conduta.....	31
Figura 2.18 – Fotografia do tubo de Pitot em S montado próximo da saída da câmara.	32

Figura 2.19 – Fotografia do pormenor da marcação das posições tangenciais.	33
Figura 2.20 – Representação esquemática do jacto confinado em câmara circular. A vermelho, a isolinha de velocidade axial nula. Adaptado de Vaz (2012).	34
Figura 2.21 – Variação de pressão sentida pelos orifícios laterais da sonda de três orifícios em função do tempo.....	34
Figura 2.22 – Resposta no tempo típica de uma sonda de pressão. Indica-se o valor assintótico, Δp_{∞} , e o erro relativo, δ	35
Figura 2.23 – Tempo necessário para a estabilização da variação de pressão, entre sucessivas medições.	36
Figura 3.1 – Exemplo do efeito da temperatura do escoamento na medição da pressão total. 41	41
Figura 3.2 – Perfil radial de intensidade turbulenta, ao nível do centro de recirculação, obtido através de ferramenta numérica: a) Referenciada à velocidade média de injeção (63 m/s); b) referenciada à velocidade local (escala semi-logarítmica).	43
Figura 3.3 – Perfil radial de pressão total, ao nível do centro de recirculação: a) Resultados das medições efectuadas com o tubo de Pitot apontado para a saída e para o queimador ; b) troços válidos das medições efectuadas.	43
Figura 3.4 – Perfil tangencial de pressão total, a 0,91L do queimador.	44
Figura 3.5 – Isolinha da componente axial da velocidade nula.	45
Figura 3.6 – Perfil longitudinal da intensidade turbulenta (escala semi-logarítmica) a uma distância da parede da câmara de 2 mm, obtido através da ferramenta numérica. Referenciada à velocidade local.....	45
Figura 3.7 – Atravessamentos axiais de pressão total junto à parede da câmara: a) escala axial completa; b) redução da escala de forma a visualizar-se o ponto onde os perfis se intersectam.	46
Figura 3.8 – Fotografia de teste efectuado com ar comprimido, numa placa plana vertical com o filme de óleo de gasóleo e tóner.	47
Figura 3.9 – Fotografia do resultado de um ensaio realizado com querosene na parede da câmara.	48

Figura 3.10 – Fotografia do resultado de um ensaio realizado com gasóleo na parede da câmara.....	48
Figura 3.11 – Perfil radial de pressão total, medido ao nível do CR.....	49
Figura 3.12 – Perfil radial de pressão estática, medido ao nível do CR (experimental).	50
Figura 3.13 – Perfil de velocidade axial, desde o centro de recirculação até à parede da câmara. Os pontos representados dizem respeito à coordenada radial onde a pressão total e estática foram medidas.	51
Figura 3.14 – Perfil radial de pressão estática ao nível do CR. Sobrepôs-se o perfil radial de pressão estática correspondente ao da figura 3.12, ao obtido através de ferramenta numérica.	51
Figura 3.15 – Zona de recirculação que se cria devido à geometria hemisférica da extremidade da sonda de pressão estática quando imersa num escoamento.....	52
Figura 3.16 – Perfil longitudinal (ao longo do eixo da câmara, $r=0$) da intensidade turbulenta, obtido através de ferramenta numérica. Referenciada à velocidade local.	52
Figura A.1 – Coordenadas dos pontos de velocidade axial nula.	64
Figura A.2 – Coordenadas dos pontos de velocidade axial nula, em cima da função que descreve a isolinha de pressões.	65
Figura A.3 – Perfil de velocidade radial em função da coordenada distância, ao longo da isolinha de velocidades axiais nula.	66
Figura A.4 – Representação do gradiente de velocidades.	67
Figura A.5 – Erro de ângulo do escoamento em função distância s.....	67

Índice de tabelas

Tabela 1.1 – Óleos frequentemente utilizados na técnica filme de óleo.	17
Tabela 1.2 – Pigmentos utilizados na técnica filme de óleo.	17
Tabela 3.1 – Propriedades do escoamento numérico.	42
Tabela 3.2 – Apresentação dos resultados obtidos por três vias: empírica, numérica e experimental.....	53
Tabela A.1 – Valores dos coeficientes da equação A.3.	64
Tabela B.1 – Lista de desenhos técnicos.	69

Lista de abreviaturas

CCD	<i>charge coupled device</i>
CR	centro da zona de recirculação
DEMI	departamento de engenharia mecânica e industrial
LDA	laser Doppler anemometry
LR	linha de recolamento
NMFTA	núcleo de mecânica dos fluídos e termodinâmica aplicada
PIV	particle image velocimetry
PR	ponto de recolamento
ZR	zona de recirculação

Lista de símbolos

Caracteres latinos

A_C	área da secção transversal da câmara [m ²]
A_N	área da secção transversal dos injectores [m ²]
a	distância entre os eixos dos dois tubos exteriores da sonda de três Orifícios [m]
C_α	coeficiente de calibração angular [-]
$C_{p_{est}}$	coeficiente de calibração de pressão estática [-]
C_{p_t}	coeficiente de calibração de pressão total [-]
D	diâmetro exterior de sondas, diâmetro interior da câmara [m]
D_i	diâmetro interior do tubo de suporte da sonda de três orifícios [m]
d	diâmetro interior [m]
d_e	diâmetro exterior dos tubos de tomada de pressão da sonda de três orifícios [m]
d_0	diâmetro do orifício do queimador [m]
f	espaçamento entre os tubos de tomada de pressão na sonda de três orifícios [m]
g	aceleração da gravidade [m/s ²]
K	gradiente de velocidades adimensional [-]
K_{Pitot}	parâmetro no cálculo do deslocamento, quando se utiliza o tubo de Pitot num escoamento onde a camada de corte está presente [-]
K_v	razão de recirculação [-]
L	comprimento característico [m]
Ma	número de Mach [-]
m	parâmetro dependente do número de Reynolds [-]
\dot{m}_a	caudal mássico do jacto anular [kg/s]
\dot{m}_{ar}	caudal mássico do ar [kg/s]
\dot{m}_{arr}	caudal mássico arrastado [kg/s]

\dot{m}_{comb}	caudal mássico de combustível [kg/s]
\dot{m}_{inj}	caudal mássico injectado [kg/s]
\dot{m}_{rec}	caudal mássico recirculado [kg/s]
n	número de constantes de tempo [-]
p_1, p_2, p_3	pressão sentida pelos orifícios 1, 2 e 3 na sonda de três orifícios [Pa]
p_{din}	pressão dinâmica [Pa]
p_{est}	pressão estática [Pa]
$p_{est,real}$	pressão estática real do escoamento [Pa]
p_t	pressão total [Pa]
p_∞	valor assintótico da pressão [Pa]
Q_v	caudal volúmico [m ³ /s]
$Q_{v_{inj}}$	caudal volúmico injectado [m ³ /s]
R	raio da câmara [m]
Re	número de Reynolds [-]
Re_r	número de Reynolds em função do raio [-]
r	coordenada radial [m]
T_{esc}	temperatura do escoamento [°C]
t	tempo [min]
t_0	tempo decorrido entre a ligação do ventilador e o início do registo da pressão [min]
U	velocidade do escoamento não perturbado [m/s]
$\overline{u'^2}$	componente da flutuação média da velocidade [-]
V	velocidade [m/s]
V_0	velocidade axial [m/s]
$\overline{v'^2}$	componente da flutuação média da velocidade [-]
$\overline{w'^2}$	componente da flutuação média da velocidade [-]
y	distância do tubo de Pitot à parede [m]
z	coordenada axial [m]
z_{CR}	coordenada axial do centro de recirculação [m]
z_{PR}	coordenada axial do ponto de recolamento [m]

Caracteres gregos

α	rácio entre áreas [-]
δ	deslocamento [m] ou erro relativo [-]
ε	erro de ângulo do escoamento [°]
ξ	distância Euclidiana [m]
θ	ângulo [°]
θ_a	parâmetro característico [-]
μ	coeficiente de viscosidade [Pa.s]
μ_{ar}	coeficiente de viscosidade do ar [Pa.s]
ν	viscosidade cinemática [m ² /s]
ρ	densidade [kg/m ³]
ρ_{amb}	densidade do fluido ambiente [kg/m ³]
ρ_{ar}	densidade do ar [kg/m ³]
ρ_{inj}	densidade do fluido injectado [kg/m ³]
τ	constante de tempo [min]
Δ	variação [-]
Δp_0	constante do sistema [Pa]

1 Introdução

1.1. Motivação

As alterações climáticas, que têm feito sentir-se nos últimos anos, levaram à criação do protocolo de Quioto em 1997, de forma a estabelecer compromissos para a redução de emissões de gases nocivos para o meio ambiente.

De forma a respeitar estes compromissos, a indústria tem sido desafiada no sentido de desenvolver novas estratégias capazes de aumentar a eficiência energética e ao mesmo tempo reduzir a emissão de poluentes.

Neste contexto, os jactos confinados em câmara coaxial têm sido estudados de forma mais exaustiva. Os jactos são classificados como livres ou confinados, de acordo com o meio onde se expandem. No jacto livre, frequentemente denominado como um jacto num meio infinito, despreza-se o efeito da vizinhança nas suas características. No jacto confinado, este expande-se dentro de um ambiente fechado, e a vizinhança afecta significativamente as suas características.

Os jactos confinados estão presentes em diversas aplicações de engenharia, como por exemplo em reactores bioquímicos, climatização, combustão entre outros. Neste tipo de aplicações explora-se o fenómeno de arrastamento que ocorre durante o processo de desenvolvimento de um jacto. Este arrastamento de fluido através das fronteiras do jacto deve-se à troca de quantidade de movimento entre o jacto e o meio circundante.

Neste tipo de jactos, formam-se zonas de recirculação (Rajaratnam 1976). Estas zonas trazem fluido de jusante para montante. Este fenómeno é de extrema importância para as aplicações de engenharia atrás referidas, em particular para certas técnicas de combustão, como por exemplo a combustão sem chama visível. Esta técnica é caracterizada por baixas emissões de óxidos de azoto, NO_x . Uma das condições necessárias para a combustão sem chama visível é a diluição dos reagentes, através da forte recirculação de gases de escape.

Posto isto, sentiu-se necessidade de estudar o comportamento aerodinâmico do jacto confinado. Na presente dissertação estuda-se, através de um modelo físico de câmara de combustão cilíndrica, o comportamento aerodinâmico do jacto confinado e a discretização de certas zonas chave do escoamento.

Na seguinte secção descrevem-se os aspectos fundamentais do desenvolvimento do jacto circular turbulento.

Esta tese contribui para os objectivos do projecto “Técnicas Numéricas e Experimentais Avançadas para a Análise de Fenómenos de Combustão sem Chama Visível”, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, com a referência PTDC/EME-MFE/102997/2008.

1.2. Estudos anteriores do jacto circular turbulento

Nesta secção aborda-se os estudos de jactos circulares em câmaras de combustão cilíndricas de diâmetro constante.

O número de Reynolds, Re , definido por:

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (1.1)$$

permite avaliar se um jacto é laminar ou turbulento. Nesta definição, D é o diâmetro do bocal e V a velocidade de injeção. De acordo com Pope (2000), se o número de Reynolds for menor que 2300, o escoamento é considerado laminar, e turbulento se for maior que 4000. Devido à turbulência diversos parâmetros variam com o tempo, como a temperatura, a concentração das espécies e as distribuições de velocidade. Estas variações são devidas a vórtices gerados pelas tensões de corte no escoamento.

No caso do jacto livre, isto é, o fluido sai de um injetor para um espaço não confinado, este interage com o fluido da vizinhança para formar um jacto. Imediatamente a jusante do injetor forma-se uma região denominada de cone potencial. No cone potencial a velocidade permanece constante. Fora desta região forma-se uma camada de corte na qual a quantidade de movimento e massa são transferidos perpendicularmente à direcção do escoamento. Posteriormente existe a região de transição até ao jacto chegar à zona em que se encontra completamente desenvolvido (região do jacto completamente desenvolvido). Nesta região de transição, a turbulência afecta a velocidade média no centro do jacto, diminuindo-a à medida que o jacto vai abrindo (Rajaratnam 1976).

Como consequência da transferência de quantidade de movimento entre o jacto e a vizinhança, o fluido é arrastado através das fronteiras do jacto. À medida que tal acontece o fluido vizinho vai começando a fazer parte do jacto. A este processo dá-se o nome de arrastamento. O arrastamento do fluido da vizinhança origina a abertura do cone do jacto. Na grande maioria das aplicações de engenharia os jactos desenvolvem-se num espaço confinado. Na seguinte secção apresenta-se o jacto confinado.

1.2.1. Jacto confinado

Em sistemas de combustão, ou na maioria destes, a combustão dá-se num espaço confinado. O comportamento dos jactos circulares confinados é de extrema importância no dimensionamento de condutas e câmaras de combustão. Os jactos em sistemas de combustão são turbulentos, pois estes promovem a mistura entre os reagentes, necessário no caso de estes entrarem separadamente na câmara de combustão.

Nos últimos anos publicaram-se diversos trabalhos sobre o comportamento de jactos circulares em condutas. Destacam-se Craya e Curtet (1955), Curtet (1958), Abramovich (1963) e Razinsky e Brighton (1971). Para o caso em que a conduta é fechada num dos topos, destacam-se Vaz (2007), Rebola (2010), Xavier (2011) e Veríssimo (2011).

À medida que os jactos evoluem dentro da câmara, eles arrastam o fluido que existe na sua vizinhança, e o caudal mássico do jacto aumenta de forma constante. O fluido é arrastado para dentro da câmara, é recirculado, e escoado para montante. A zona em que o jacto é recirculado, denomina-se por zona de recirculação, ZR. As zonas de recirculação situam-se entre o jacto e as paredes da câmara de combustão. Estas zonas são subdomínios do escoamento onde, em média, metade do caudal mássico tem uma componente da velocidade contrária à outra metade. O escoamento na ZR é de grande interesse para o estudo da combustão, nomeadamente para o regime de combustão sem chama visível, uma vez que a sua forma e tamanho afectam a estabilidade e o comprimento da chama. No caso em que existe apenas um injector coaxial, forma-se uma zona de recirculação toroidal entre o jacto e a câmara de combustão. Nesta dissertação, limitou-se o estudo ao caso do jacto central único, figura 1.1 a), porém existem diversas configurações como por exemplo o arranjo anelar de jactos, figura 1.1 b).

O fecho da zona de recirculação é denominado por linha de recolamento, LR. Essa linha circunferencial, não é linear, contudo neste trabalho não se explorou a sua modulação. De acordo com a figura 1.2, que representa um corte meridional da câmara, identifica-se o fecho da zona de recirculação como ponto de recolamento, PR. Ao longo deste trabalho, designa-se por PR, o fecho da ZR.

O PR é caracterizado por ter velocidade nula, isto é, um ponto de estagnação do escoamento. É nesta zona que se inicia a recirculação dos gases. Outra zona chave deste tipo de escoamentos é o centro da zona de recirculação, CR, exemplificado na figura 1.2, caracterizado também por ter velocidade nula. Vaz (2011b), no âmbito do projecto “Técnicas Numéricas e Experimentais Avançadas para a Análise de Fenómenos de Combustão sem Chama Visível”, obteve através de ferramenta numérica, a localização destas zonas do escoamento, e experimentalmente o CR. A localização destas zonas do escoamento é importante, pois permitem avaliar o tamanho preciso da zona de recirculação, e constituem critérios para validação de resultados numéricos da literatura.

Como foi dito, para que se estabeleça uma chama estável neste tipo de câmaras de combustão é necessário que os gases da zona de recirculação sejam arrastados para o interior do jacto. A razão de recirculação de gases de combustão, também chamada de razão de recirculação global, K_v :

$$K_v = \frac{\dot{m}_{rec}}{\dot{m}_{ar} + \dot{m}_{comb}} \quad (1.2)$$

é um importante parâmetro para a técnica de combustão sem chama visível, em que \dot{m}_{rec} é o caudal mássico dos gases recirculados resultantes da combustão.



Figura 1.1 – Configuração de injectores: a) jacto central único; b) arranjo anelar de jactos.

1.2.2. Considerações teóricas

Nesta secção apresentam-se as equações, obtidas empiricamente, que permitem obter a localização das zonas chave do escoamento confinado, conforme foram indicadas na secção anterior. Apresenta-se também uma equação que permite obter o valor da razão de recirculação. Através destas é possível efectuar uma comparação com os resultados obtidos pela via experimental, que são apresentados no capítulo 3 deste trabalho.

Na figura 1.2 representa-se esquematicamente um jacto circular, axissimétrico, escoando-se para uma câmara circular de diâmetro D . O fluido é injectado para o interior da câmara através de um injector com um diâmetro d_0 .

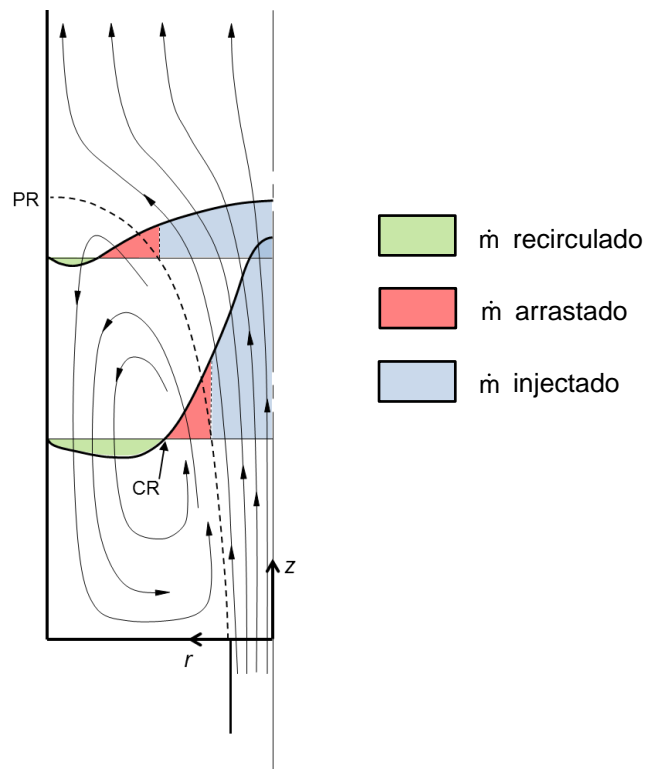


Figura 1.2 – Representação esquemática do jacto confinado em câmara circular. Figura não à escala.

Beér e Chigier (1972) obtiveram, para um sistema onde a densidade do fluido se mantém constante, a razão de recirculação local, que é dada pelo quociente entre o caudal mássico de fluido arrastado, \dot{m}_{arr} , e o caudal mássico de fluido injectado, \dot{m}_{inj} :

$$K_v(z) = \frac{\dot{m}_{arr}}{\dot{m}_{inj}} = 0,32 \frac{z}{d_0} - 1 \quad (1.3)$$

onde z é a coordenada axial representada na figura 1.2. Em sistemas onde a densidade não pode ser considerada constante, El-Mahallawy e Habik (2002) obtiveram a seguinte relação:

$$K_v(z) = 0,32 \left(\frac{\rho_{amb}}{\rho_{inj}} \right)^{0,5} \frac{z}{d_0} - 1 \quad (1.4)$$

onde ρ_{amb} é a densidade do fluido ambiente e ρ_{inj} a densidade do fluido injectado.

Segundo El-Mahallawy e Habik (2002), e considerando que o fluido é injectado através de um único injector, coaxial com a câmara, a distância do injector até ao centro de recirculação é dada por:

$$z_{CR} = 0,5 \left[z_{PR} + \frac{D}{0,32} \theta_a \right] \quad (1.5)$$

em que z_{PR} é a distância do injector até ao ponto de recolamento e θ_a um parâmetro característico. Considerando que o jacto abre até um angulo máximo de $9,7^\circ$, El-Mahallawy e Habik (2002) obtiveram que a distância do injector até ao ponto de recolamento é dada por:

$$z_{PR} = 5,85 \frac{D}{2} \quad (1.6)$$

Para o caso em que todo o fluido da vizinhança é arrastado pelo jacto antes de se iniciar a recirculação, o parâmetro característico θ_a é definido por:

$$\theta_a = \frac{d_0}{D} \left(\frac{\rho_{inj}}{\rho_{amb}} \right)^{0,5} \quad (1.7)$$

Substituindo o resultado das equações 1.6 e 1.7 na equação 1.5, vem que a distância do injector até ao CR é dada por:

$$z_{CR} = 1,56D \left[\frac{d_0}{D} \left(\frac{\rho_{inj}}{\rho_{amb}} \right)^{0,5} + 0,94 \right] \quad (1.8)$$

Obeve-se os resultados das anteriores equações, apresentados no capítulo 3, para o caso do modelo de câmara de combustão utilizada no presente trabalho.

Relativamente à razão de recirculação, Vaz (2011a) desenvolveu uma teoria que relaciona a razão de recirculação com o rácio entre a área da secção transversal da câmara, A_C , e a área da secção transversal dos injectores, A_N , dado por:

$$\alpha = \frac{A_C/A_N - 1}{2} \quad (1.9)$$

A dependência entre K_v e α , para o caso de apenas um injector central, é dada por:

$$K_v = 0,19\alpha^{1/1,36} \quad (1.10)$$

Esta relação é baseada em resultados numéricos, na condição de escoamento não reactivo, câmara com um comprimento $L/D=4$, jacto axissimétrico, modelo de turbulência $k-\varepsilon$ renormalizado e gama de velocidades idêntica à encontrada na instalação experimental deste trabalho. Como as condições do modelo numérico são idênticas às encontradas neste trabalho experimental, esta equação pode ser aplicada ao caso em estudo nesta tese.

1.3. Revisão bibliográfica de técnicas experimentais

Para caracterizar aerodinamicamente o jacto confinado foram consideradas diversas técnicas experimentais. No estudo do jacto circular empregam-se instrumentos, como as sondas clássicas, sondas de filme quente, sistemas de anemometria de laser Doppler (*Laser Doppler Anemometry* - LDA) e sistemas de velocimetria por imagem de partículas (*Particle Image Velocimetry* - PIV). As técnicas modernas oferecem resultados sobre o campo de velocidade instantâneo, por exemplo LDA e PIV, porém através das sondas clássicas obtém-se a velocidade média temporal e o campo de pressões de um escoamento.

As técnicas convencionais, descritas nas seguintes secções são consideradas intrusivas, pois estas estão em contacto directo com o escoamento e, se não forem dimensionadas de forma correcta, podem introduzir perturbações no escoamento, modificando-o e invalidando os resultados obtidos através destas técnicas.

Fez-se uma revisão bibliográfica das técnicas experimentais que se consideram válidas para este tipo de escoamento, nomeadamente para escoamentos turbulentos confinados e subsónicos. A não perturbação do escoamento e a facilidade de aplicação destas técnicas foram os principais critérios aquando da revisão bibliográfica. Os parâmetros necessários para a caracterização do escoamento são a pressão total e estática e por conseguinte a distribuição de velocidades em diversas zonas do escoamento.

1.3.1. Tubo de Pitot

Instrumento inventado por Henry Pitot em 1732 (Tropea et al. 2007), o tubo de Pitot é uma sonda, geralmente de aço ou latão, que mede a pressão total quando exposta a um escoamento. É um dos instrumentos mais úteis e utilizados em ensaios experimentais em mecânica dos fluidos. É de fácil construção e tem um princípio de funcionamento igualmente simples. Dependendo das condições do escoamento e conhecendo a pressão estática, pode obter-se o valor da velocidade através da conhecida equação de Bernoulli.

Diversas formas geométricas são utilizadas na construção da extremidade do tubo de Pitot. As padronizadas são as rectas, hemisféricas e elipsoidais como se mostra na figura 1.3 a), b) e c), respectivamente.

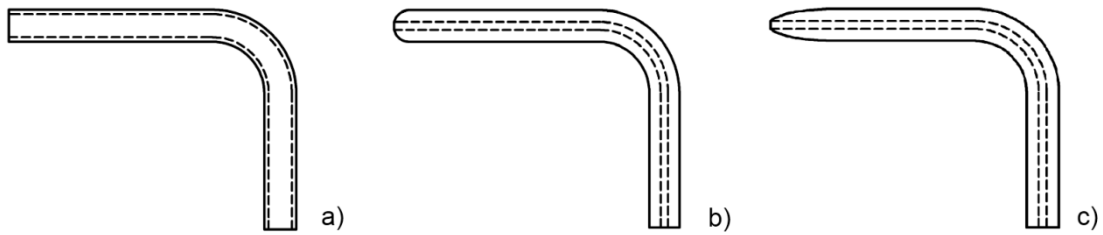


Figura 1.3 – Diferentes geometrias da extremidade do tubo de Pitot: a) recto; b) hemisférico; c) elipsoidal.

Contudo, é conhecido que a precisão das medições efectuadas depende da geometria da extremidade, do número de Reynolds, do número de Mach, da magnitude das tensões de corte transversais, da intensidade e do comprimento da escala de turbulência, e da orientação do escoamento relativamente à tomada de pressão. Limitou-se esta revisão bibliográfica a tubos de Pitot com rácio de diâmetros de $d/D = 0,6$ e extremidade recta, visto serem os parâmetros de construção mais comuns deste instrumento.

Enunciam-se os efeitos que mais contribuem para o erro total na medição com este instrumento:

I. Em escoamentos turbulentos onde estão presentes elevados gradientes de velocidade, e onde a pressão total varia na direcção transversal ao escoamento, a pressão medida pelo tubo de Pitot é maior que a pressão total do escoamento não perturbado, ao longo de uma linha de corrente hipotética, que coincidiria com o eixo do tubo, se este não estivesse inserido no escoamento, como se exemplifica na figura 1.4.

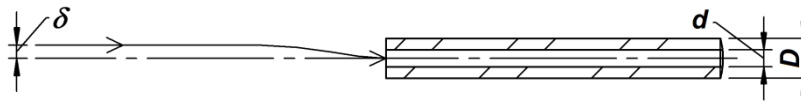


Figura 1.4 – Efeito de deslocamento no tubo de Pitot.

Este efeito deve-se às linhas de corrente serem deflectidas assimetricamente pela sonda. A componente transversal da velocidade que esta situação origina, tem sentido contrário ao gradiente de velocidade, isto é, é dirigida das altas para as baixas velocidades. O ponto de estagnação na extremidade do tubo está descentrado no sentido das menores velocidades, e a velocidade não perturbada da linha de corrente de estagnação é maior que a velocidade média através da face do tubo. Esta perturbação que é provocada pela presença do instrumento pode ser reduzida através da concepção apropriada da sonda. De forma a reduzir esta perturbação, o diâmetro do tubo de Pitot deverá ser pequeno, para que se aproxime à condição de linha de corrente única (*single-streamline condition*), contudo as dimensões do instrumento são limitadas por constrangimentos estruturais. Adicionalmente, tubos de pequeno diâmetro, resultam em tempos de resposta de medição mais longos.

Diversos estudos têm sido realizados de forma a estimar o deslocamento, δ , provocado por este efeito (figura 1.4). Para extremidades de sondas com geometria recta, Young e Maas (1937) obtiveram experimentalmente $\delta = 0,18D$. Para o mesmo tipo de geometria, MacMillan (1956) obteve um deslocamento de $\delta = 0,15D$. Contudo Hall (1956) sugere que o rácio δ / D não é constante, mas sim função de K_{Pitot} , que é definido por:

$$K_{Pitot} = \frac{D}{V} \frac{dV}{dy} \quad (1.11)$$

onde V é a velocidade do escoamento e dV / dy o gradiente de velocidade. Sami (1968) obteve em função de K_{Pitot} , o deslocamento, dado pelas seguintes equações:

$$\delta = 0,195D \text{ para } K_{Pitot} > 0,6 \quad (1.12)$$

e

$$\delta = (0,5125K_{Pitot} - 0,506K_{Pitot}^3)D \text{ para } K_{Pitot} < 0,6. \quad (1.13)$$

De acordo com Wysocki e Drobniak (2001), a fórmula de Sami (1968) revela ser a mais apropriada para uma grande variedade de gradiente de velocidades.

Raju et al (1997) constataram que o efeito de deslocamento é desprezável no caso de tubos de Pitot de diâmetro igual ou inferior a 1,02 mm, para o tipo de camadas de corte obtidas nos seus ensaios. Por conseguinte este efeito irá ser desprezado na presente tese.

II. Quando o tubo de Pitot é usado próximo de uma parede, é necessário realizar uma correcção adicional. MacMillan (1956) propôs um factor de correcção para este efeito. O critério que determina se o tubo está próximo da parede depende apenas do diâmetro exterior do tubo, D . MacMillan (1956) determinou que quando $y < 2D$ (figura 1.5), isto é, quando o tubo está a uma distância menor que $2D$ da parede é necessário fazer uma correcção.

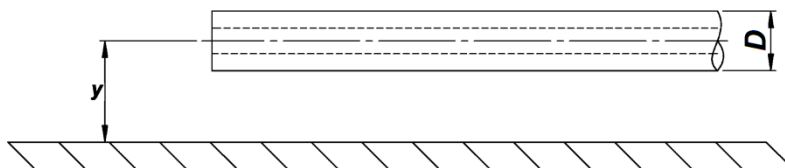


Figura 1.5 – Efeito da proximidade do tubo de Pitot de uma parede.

O efeito aqui é contrário ao do provocado pela camada de corte do escoamento. A linha de corrente resultante é deflectida na direcção oposta, isto é, em direcção à região de velocidades mais altas, sendo a pressão lida pelo tubo de Pitot menor que a pressão do escoamento não perturbado. Uma correcção para este efeito é dada pelo gráfico da figura 1.6. Este gráfico (Bryer e Pankhurst 1971) resume os resultados obtidos por MacMillan (1956) nos seus ensaios experimentais, para tubos de Pitot com rácio de $d / D = 0,6$. Este indica a percentagem de pressão dinâmica que é necessário adicionar à leitura do tubo de Pitot em função do rácio y / D .

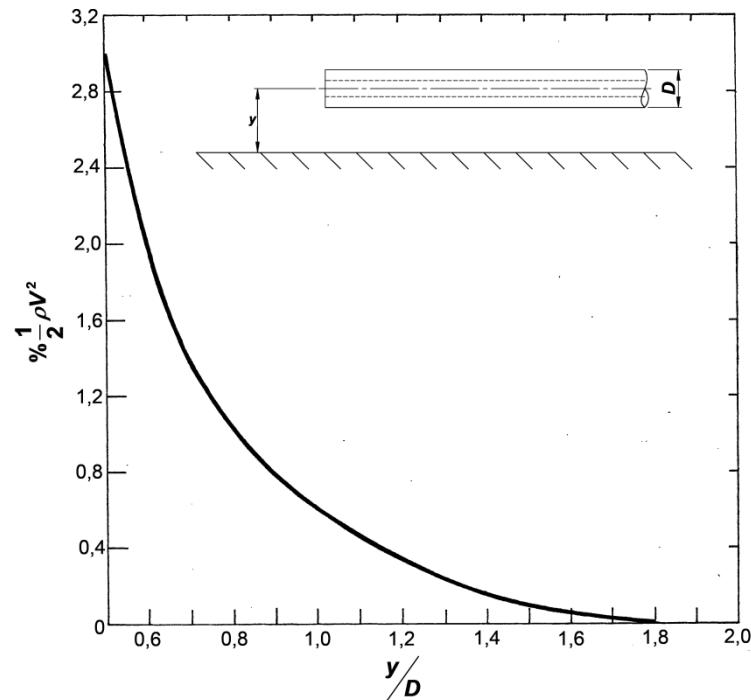


Figura 1.6 – Correção devido ao efeito da proximidade à parede. Adaptado de Bryer e Pankhurst (1971).

III. Outro efeito que pode contribuir para o erro na leitura através do tubo de Pitot é a viscosidade do fluido escoado. Em escoamentos subsônicos, a pressão de estagnação obtida pelo tubo de Pitot é bastante próxima da pressão total real. Contudo os efeitos da viscosidade tornam-se importantes na medição da pressão total quando o número de Reynolds, em função do raio do orifício de tomada de pressão do tubo, r , definido por:

$$Re_r = \frac{Ur}{\nu}, \quad (1.14)$$

for menor que 100 (dependendo da forma da sonda) (Bryer e Pankhurst 1971), sendo U a velocidade do escoamento não perturbado e ν a viscosidade do fluido. Para a maior parte das aplicações práticas, a influência do número de Reynolds nas leituras com um tubo de Pitot é desprezável, excepto para tubos muito pequenos, a velocidades muito baixas ou na medição de baixas pressões (Bryer e Pankhurst 1971). As condições do escoamento em estudo nesta tese permitem desprezar este efeito.

IV. Se o tubo de Pitot estiver inclinado relativamente ao escoamento, este mede uma pressão inferior à real, mas, para o tipo de geometrias mais utilizadas, o tubo de Pitot é insensível a este desalinhamento entre a direcção do escoamento e o instrumento (Bryer e Pankhurst 1971). Quanto maior for o rácio de diâmetros d/D , maior a insensibilidade em relação ao ângulo que o escoamento faz com o instrumento (Davies 1958). Para um rácio de $d/D \cong 0,6$, Davies (1958) estima que para ângulos acima dos 30° entre o Pitot e o vector de velocidade do escoamento, é necessário efectuar-se uma correcção. Na presente dissertação

considerou-se este erro, utilizando o tubo de Pitot em regiões onde o escoamento está alinhado com este, de forma a reduzir potenciais erros na medição

V. Em escoamentos turbulentos, a medição com o tubo de Pitot poderá ser afectada. A correcção para o efeito de turbulência requer a medição da flutuação da velocidade, por exemplo, através de anemometria de fio quente, ou através do uso de uma formula empírica da distribuição de $\overline{u'^2}$, $\overline{v'^2}$ e $\overline{w'^2}$.

De acordo com Tavoularis e Szymczak (1989) para intensidades de turbulência abaixo de 10% os efeitos de turbulência na medição com este instrumento podem ser desprezados. Nos seus ensaios experimentais, Raju et al (1997) obtiveram para intensidades de turbulência de 20%, um erro de 2% na medição da pressão, ignorando assim o efeito da turbulência. Na presente dissertação, desprezou-se este efeito, mas dados numéricos sobre a intensidade turbulenta são apresentados no capítulo 3.

1.3.2. Sonda de pressão estática

A forma mais usual de medir a pressão estática num escoamento é através de uma sonda de pressão estática. Como o tubo de Pitot, é de fácil construção e princípio de funcionamento simples. É feita de aço ou de latão mas ao contrário do tubo de Pitot, não tem orifício na extremidade, mas sim na parede do instrumento, como se mostra na figura 1.7.

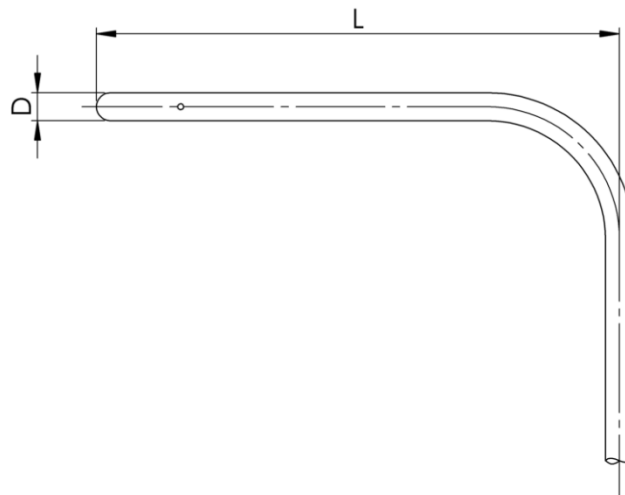


Figura 1.7 – Exemplo de uma sonda de pressão estática.

A geometria da extremidade da sonda depende do tipo de escoamento onde esta está inserida. Em escoamentos subsônicos são utilizadas extremidades de formas hemisféricas e elipsoidais, já em escoamentos supersônicos são utilizadas extremidades cónicas, contudo limitou-se esta revisão bibliográfica a escoamentos subsônicos, como foi estabelecido no início da mesma. Para sondas de dimensões reduzidas, com diâmetro exterior menor que 1,5 mm,

não é possível maquinar formas geométricas precisas, mas com calibração, consegue-se maquinar extremidades aproximadas a formas elipsoidais ou esféricas.

O eixo da sonda deve estar alinhado com o escoamento. Quando se insere a sonda num escoamento, este acelera desde a velocidade zero, no ponto de estagnação que está localizado na extremidade da sonda, até a uma velocidade, que é superior à do escoamento não perturbado. A pressão estática diminui desde o valor de estagnação até a um valor que é inferior ao do escoamento não perturbado. À medida que o escoamento se afasta da extremidade da sonda, a pressão estática aumenta lentamente até chegar ao valor real, isto é, o valor da pressão estática caso a sonda não estivesse inserida no escoamento. No gráfico da figura 1.8, mostra-se o erro obtido na medição da pressão estática em função da distância à extremidade da sonda. Outro efeito que é importante mencionar, é o da haste de suporte da sonda. A estagnação do fluido na haste da sonda tem influência na medição da pressão estática. Isto resulta numa pressão maior que a pressão do escoamento não perturbado. Na figura 1.8 também se representou a influência da haste na medição da pressão estática. O facto de a haste causar uma sobrepressão pode ser usado para compensar a depressão causada pela extremidade da sonda. Estes dois efeitos dependem da localização circunferencial do orifício.

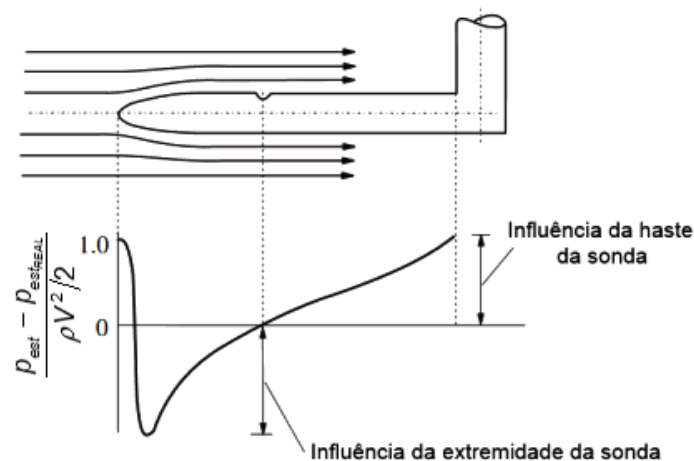


Figura 1.8 – Influência na medição da pressão estática devido à extremidade e haste da sonda de pressão estática. Traduzido de Durst (2008).

Diversos ensaios experimentais foram efectuados de forma a obter a localização do orifício. Pope e Rae (1984) consideram que para os efeitos da extremidade e da haste cancelarem, o orifício da tomada de pressão estática deve estar a 8D a jusante da extremidade e a 16D a montante da haste de suporte da sonda. Já Bradshaw (1970) considera que o orifício deve estar a 6D a jusante da extremidade e a 15D a montante da haste de suporte da sonda. De forma a reduzir o efeito da escala de turbulência, o orifício deve estar a 2D a jusante da extremidade e a 10D a montante da haste de suporte da sonda (Cho e Becker 1985). Contudo

estes valores dependem sempre da calibração da sonda num escoamento de características conhecidas.

A sonda de pressão estática, ao contrário do tubo de Pitot, é mais sensível ao ângulo entre o vector velocidade do escoamento e a o eixo da sonda. Por exemplo, para um ângulo de 20° entre o vector velocidade e o eixo da sonda, a medição da pressão estática tem um erro de aproximadamente 10% (Blackmore 1987), portanto é importante que a sonda esteja alinhada com o vector velocidade do escoamento. De forma a reduzir erros na medição devido ao desalinhamento com o escoamento, a sonda deve ter diversos orifícios para que a pressão lida seja uma média das pressões entre os diversos orifícios (Bryer e Pankhurst 1971). Contudo Cho e Becker (1985) aconselham que a sonda de pressão estática apenas tenha um orifício, pois um grande número de orifícios pode resultar num aumento do tempo de resposta. Um outro dado importante é a simetria entre os orifícios. A não simetria dos orifícios pode causar um erro na leitura. O diâmetro do orifício, d , deve ser pequeno em relação ao diâmetro exterior da sonda. Cho e Becker (1985) aconselham $d < 0,1D$ quando possível de fabricar, contudo $d = 0,2D$ é aceitável. A espessura da parede da sonda deve ser desejavelmente maior que $1,5d$, mas para sondas miniaturizadas esta regra pode ser desprezada.

1.3.3. Pressão estática na parede

A medição da pressão estática também pode ser obtida através de pequenos orifícios na parede fronteira do escoamento. O orifício deve estar perpendicular ao escoamento, deve ser de pequenas dimensões e com aresta viva. Orifícios com diâmetros menores que 0,5 mm resultam em tempos de resposta muito grandes e são facilmente obturados devido a poeiras provenientes do escoamento. Contudo orifícios com diâmetro muito superior a 0,5 mm são menos precisos, pois provocam perturbação no escoamento. Neste caso, cria-se um escoamento recirculatório na cavidade, e a pressão estática registada é superior à do escoamento não perturbado. De acordo com Benedict (1984), e remetendo o leitor à figura 1.9, a dimensão característica da geometria do orifício, L/d não deve ser inferior a 1,5, e recomenda que a relação se mantenha entre $1,5 < L/d < 6$, em que d é o diâmetro do orifício e L o comprimento da cavidade de diâmetro d .

Para um correcto dimensionamento do orifício, de forma a minimizar os erros na medição da pressão estática, deve-se efectuar um ensaio experimental de forma a confirmar qual o diâmetro indicado para o tipo de escoamento ou zona do escoamento a medir. No final do processo de furação, é necessário efectuar uma inspecção cuidada do orifício, com o intuito de verificar se alguma rebarba ficou deposita no orifício, ou na sua extremidade, pois a sua presença é a uma das principais fontes de erro. Além das dimensões do orifício existem outras fontes de erro, como os efeitos da turbulência do escoamento e os efeitos do número de Mach, contudo estes não foram abordados nesta revisão bibliográfica.

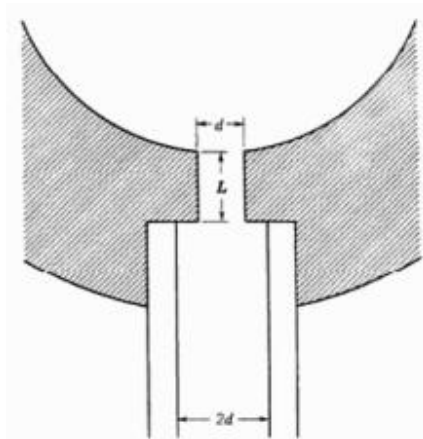


Figura 1.9 – Geometria da tomada de pressão estática na parede (Benedict 1984).

1.3.4. Sonda de três orifícios

As sondas de três orifícios são utilizadas para fazer medições em escoamentos bidimensionais, especialmente em turbomáquinas. Através destas é possível obter a pressão total, a pressão estática, bem como a direcção do escoamento. São compostas por três tubos dispostos paralelamente, um tubo central e dois laterais geralmente colados ou soldados. Os tubos laterais são inclinados ou chanfrados, por norma a 45° , que podem ser usados para obter a direcção do escoamento relativamente a um plano. A extremidade da sonda pode ter diferentes geometrias dependendo do acesso ao escoamento no qual se deseja efectuar as medições. As mais usuais têm o formato trapezoidal (figura 1.10) ou cilíndrico.

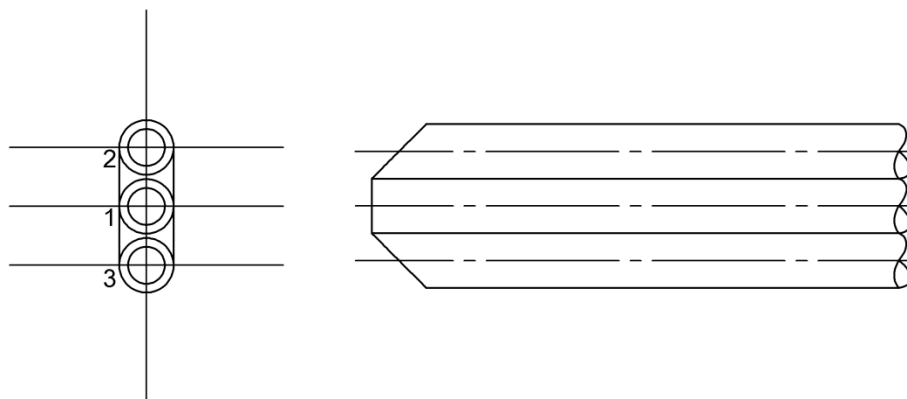


Figura 1.10 – Sonda de três orifícios: extremidade de geometria trapezoidal.

Este tipo de sondas podem ser miniaturizadas de forma a não causar perturbação no escoamento, ou por dificuldade de acesso ao local onde se deseja efectuar a medição. É necessário realizar-se calibração devido a pequenas imprecisões que podem resultar do processo de construção. Existem dois tipos de erros mais comuns que se cometem no

processo de construção deste tipo de sondas. Quando os chanfros não são maquinados com o mesmo ângulo θ , resulta numa assimetria, que pode causar um erro na medição, que aumenta quanto maior for a diferença entre os ângulos, $\Delta\theta$, como se exemplifica na figura 1.11. Outro erro comum no processo de construção é a diferença de comprimento dos chanfros. Se estes não forem feitos com o mesmo comprimento, resulta num afastamento do centro geométrico, que pode comprometer a validade da medição (figura 1.12). De forma a minimizar, ou até eliminar, este tipo de erros de construção, Bryer e Pankhurst (1971) aconselham que a extremidade da sonda seja frequentemente verificada através de um projector de perfis, durante o processo de construção.

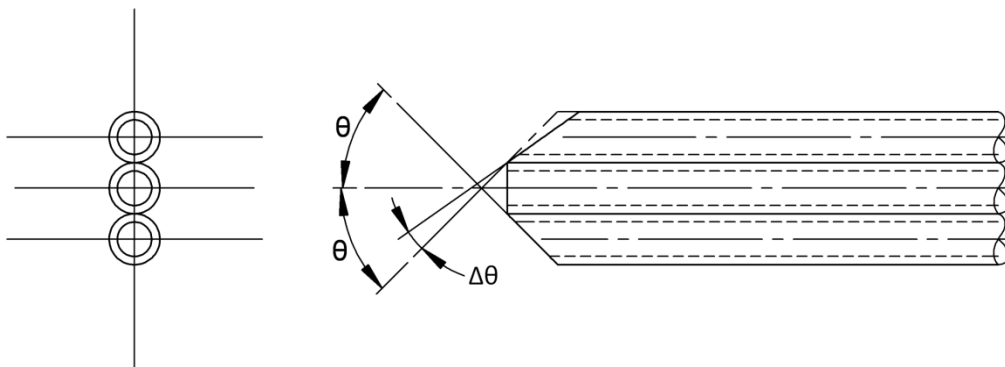


Figura 1.11 – Erro devido ao chanfro com diferentes ângulos.

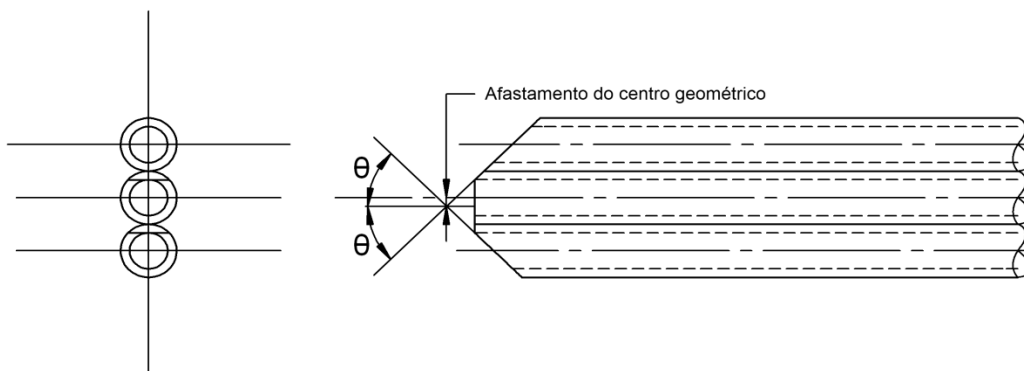


Figura 1.12 – Erro devido ao diferente comprimento de chanfros.

A sonda de três orifícios, consoante o tipo de parâmetros do escoamento que o operador deseja determinar do escoamento, pode operar segundo dois métodos de medição. O método de medição de não anulação (*non-nulling method*) ou o método de anulação (*nulling method*), também designado por método estacionário. O método nulo é a técnica mais precisa, mas mecanicamente mais complexa e morosa, porém os dados obtidos são mais simples de analisar. A sonda é montada num mecanismo de atravessamento com três graus de liberdade

e é orientada de tal forma que o eixo da sonda é perpendicular ao escoamento. Quando a pressão sentida pelos orifícios 2 e 3 é igual, $p_2 = p_3$, isto é, o ângulo do escoamento em relação à sonda é 0° , o furo central mede a pressão total, p_1 . No método de não anulação é possível obter o ângulo do escoamento, a pressão estática e a pressão total, porém para a utilização deste método é necessário realizar-se uma calibração inicial. Para que seja efectuada a calibração para este método de operação a sonda deve ser colocada num escoamento uniforme e de características conhecidas. Deve estar fixa, e o único grau de liberdade que a sonda pode experimentar é angular. Progressivamente vai-se alterando a posição angular da sonda até ao intervalo angular que se deseje. Para cada posição angular, obtém-se a pressão sentida por cada orifício individualmente. Depois do processo anterior, é possível obter os coeficientes de calibração normalizados (Díaz et al. 2010), nomeadamente o coeficiente angular, o coeficiente de pressão total e o coeficiente de pressão estática, dados pelas equações 1.15, 1.16 e 1.17 respectivamente. Após esta calibração efectuada é possível fazer-se medições em escoamentos desconhecidos. Para este efeito deve-se obter as pressões dos três furos e conseqüentemente o resultado da equação 1.15 para cada ponto medido. Através da curva de calibração angular obtida no escoamento conhecido, $C_\alpha(\alpha)$, é possível obter o ângulo do escoamento, α . Com o ângulo é possível obter-se, através das curvas de calibração, $C_p(\alpha)$ e $C_{p_{est}}(\alpha)$, a pressão total, p_t , e a pressão estática, p_{est} , respectivamente.

$$C_\alpha(\alpha) = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - 0,5(p_2 + p_3)} \quad (1.15)$$

$$C_{p_t}(\alpha) = \frac{p_t - p_1}{p_1 - 0,5(p_2 + p_3)} \quad (1.16)$$

$$C_{p_{est}}(\alpha) = \frac{p_t - p_{est}}{p_1 - 0,5(p_2 + p_3)} \quad (1.17)$$

Quando a sonda de três orifícios é utilizada em escoamentos de turbomáquinas, onde o campo de velocidades exhibe fortes gradientes de velocidades, induzidos pelas pás ou outros componentes, podem ocorrer erros na medição (Willinger e Haselbacher 2003). O principal erro na medição devido ao gradiente de velocidade é a direcção do escoamento. O gradiente de velocidades induz uma diferença de pressão entre o orifício 2 e 3, que pode ser interpretado pela sonda como o erro de ângulo do escoamento. Willinger e Haselbacher (2003) desenvolveram um método que permite determinar a influência do gradiente de velocidades no ângulo do escoamento para a sonda de três orifícios. Uma aproximação do erro do ângulo do escoamento, $\Delta\varepsilon$, induzido pelo gradiente de velocidades adimensionalizado, K , é dado por:

$$\Delta\varepsilon = K \frac{45^\circ}{\pi} \text{tg}(\theta) \quad (1.18)$$

em que θ é o ângulo dos chanfros, como se exemplificou nas figuras 1.11 e 1.12.

1.3.5. Outras técnicas

Nesta secção, descrevem-se as técnicas de visualização, muito utilizadas na indústria automóvel e aeronáutica nos seus protótipos e modelos à escala real. Conseguem, com alguma precisão, uma indicação da direcção do escoamento. Consideraram-se na presente dissertação a técnica de visualização com tufos (*tufts*), a técnica de filme de óleo (*oil film*) e a técnica de pontos de óleo (*oil dots*).

Uma forma relativamente simples de obter a direcção do escoamento próximo de uma superfície é através da distribuição de diversos tufos de um material leve, sobre uma superfície, que se movimentam de acordo com o escoamento (Merzkirch 1987). Esta técnica pode ser utilizada em escoamentos com velocidades compreendidas entre os 0,1 m/s até $Ma = 1$ (Tavoularis 2005). Através de imagens captadas, por exemplo com uma câmara CCD (*Charge Coupled Device*), pode obter-se uma média da direcção do escoamento, e assim avaliar a mudança da direcção do vector velocidade. O tamanho e material do tufo depende das condições do escoamento e do tipo de modelo a ser testado. O material mais utilizado é a lã, devido à sua pequena massa e espessura.

Vaz (2007) utilizou a técnica de tufos de lã para visualizar as linhas de corrente do escoamento, de forma a localizar o ponto de recolamento no seu modelo de câmara de combustão. Na figura 1.13 representa-se uma das aplicações desta técnica.

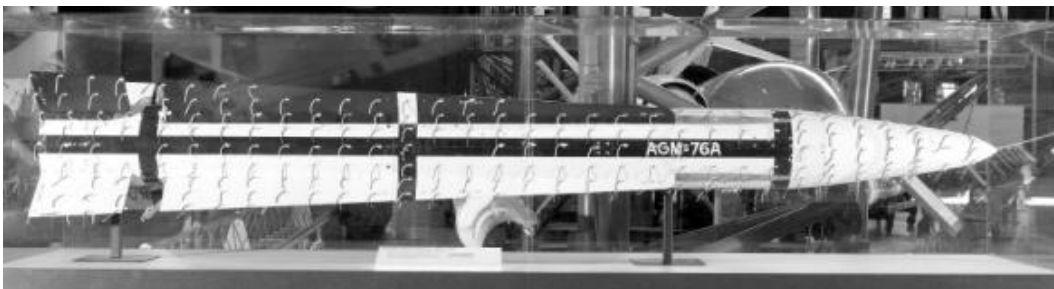


Figura 1.13 – Tufos colocados num míssil Falcon AGM-76A (Hughes).

O filme de óleo é outra técnica amplamente utilizada. Em ensaios aerodinâmicos, quando existe necessidade de se observar as linhas de corrente de um escoamento sobre uma superfície, é usual utilizar-se a técnica de filme de óleo. É indicada para escoamentos com velocidades compreendidas entre os 5 m/s até $Ma = 6$ (Tavoularis 2005). O filme de óleo é composto por uma mistura de óleos mais pigmentos, que posteriormente é aplicado à superfície do modelo. Os óleos e pigmentos respectivamente apresentados nas tabelas 1.1 e 1.2 são, de acordo com Maltby (1962) e Merzkirch (1987), os mais utilizados nesta técnica.

Tabela 1.1 – Óleos frequentemente utilizados na técnica filme de óleo.

Óleos
Óleos levemente transformados
Diesel
Querosene

Tabela 1.2 – Pigmentos utilizados na técnica filme de óleo.

Pigmentos Utilizados
Dióxido de Titânio
Argila da China
Pigmento Negro (<i>LampBlack</i>)
Criseno Fluorescente

À medida que o escoamento actua sobre o filme, formam-se estrias, que indicam a direcção do escoamento (Maltby 1962). Estas estrias são formadas devido às forças de atrito que existem entre o ar e o filme. Maltby (1962) refere que a tinta que se aplica na superfície é composta por um pigmento fino, um óleo médio, e em alguns casos um agente dispersante, como por exemplo o ácido oleico (composto principal do azeite) ou óleo de linhaça, de forma a obter-se estrias mais pronunciadas.

O filme deve permanecer em repouso antes do arranque do escoamento, isto é, não deve sofrer nenhum deslocamento devido á força de gravidade. De acordo com Merzkirch (1987), um importante parâmetro do óleo é a sua viscosidade. A viscosidade não deverá ser muito elevada, pois o filme poderá não reagir à passagem do escoamento. Por outro lado, também não pode ser de baixa viscosidade pois poderá escorrer pela superfície. O óleo deve então comportar-se como um fluido não Newtoniano, para que não responda, ou demore um certo intervalo de tempo a responder à acção da gravidade. Squire (1961) conclui que com óleos com viscosidade 10^2 a 10^4 vezes superiores à do ar, este tende a seguir o escoamento, reproduzindo satisfatoriamente as estrias que dão a direcção do escoamento.

Um outro parâmetro importante é a espessura do filme de óleo. Não deve ser muito espesso, pois poderá estar mais susceptível de sofrer acção da gravidade.

Este tipo de técnica requer bastantes tentativas de forma a encontrar-se a mistura perfeita entre óleo e pigmentos que se pretende. Na figura 1.14 representa-se uma aplicação desta técnica. Através desta revisão bibliográfica, percebe-se que o filme de óleo não é fácil de reproduzir, pois consoante o escoamento e a superfície, diversas misturas podem ser utilizadas.



Figura 1.14 – Visualização com filme de óleo do escoamento junto a uma pá de uma turbina (Havermann et al. 2002).

Uma outra técnica de visualização de escoamento que se considera válida para a presente dissertação, é a técnica dos pontos de óleo (*oil dots*). Inicialmente desenvolvida por Langston e Boyle (1982), tem a mesma finalidade que a técnica de filme de óleo, obter a direcção do escoamento. Langston e Boyle (1982) recomendam que a superfície deve ser forrada com uma película de poliéster, contudo pode não ser necessário dependendo do material do modelo. Por cima dessa película são aplicados pontos de uma tinta insolúvel em água (figura 1.15). Estes pontos podem ser aplicados com uma caneta tipo feltro. Depois de aplicados os pontos na superfície, deve-se pulverizar esta zona com óleo de Bétula (*oil of wintergreen*). Quando se inicia o escoamento, o óleo de Bétula é arrastado, e por conseguinte os pontos de tinta vão mover-se, mostrando assim as estrias que dão a direcção do escoamento (figura 1.16).

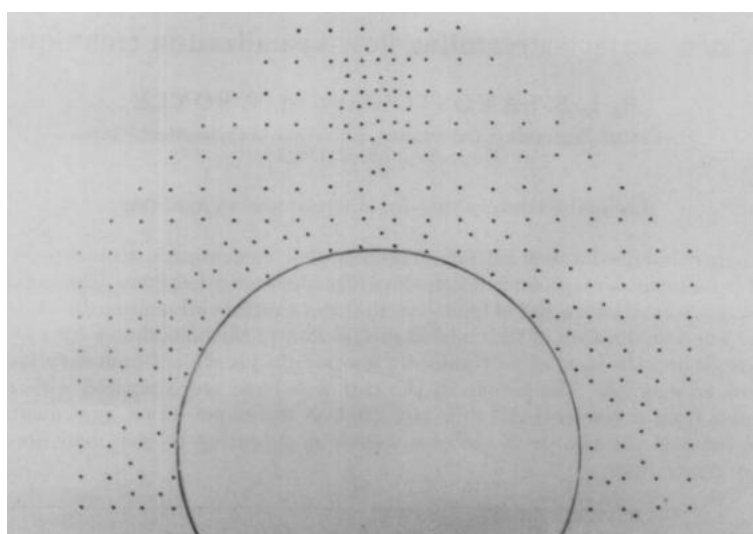


Figura 1.15 – Matriz de pontos de tinta colocada em cima de uma película antes do teste (Langston e Boyle 1982).

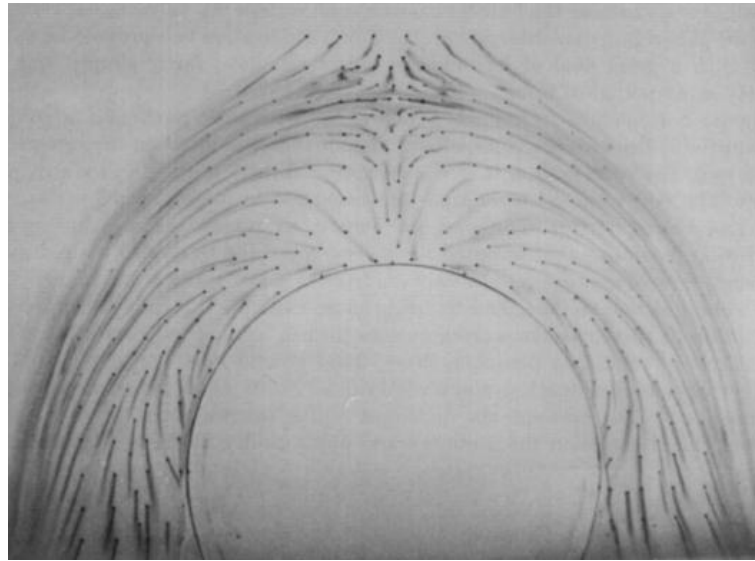


Figura 1.16 – Estrias provocadas pelo arrastamento dos pontos de tinta (Langston e Boyle 1982).

1.4. Contribuições do presente trabalho

As secções anteriormente apresentadas dão ao leitor a informação dos estudos realizados e as técnicas experimentais necessárias para a discretização aerodinâmica do escoamento de jactos confinados turbulentos. Este tipo de escoamentos é muito utilizado em aplicações de engenharia como por exemplo em equipamentos de combustão, nomeadamente para o regime de combustão sem chama visível. Este regime de combustão é um grande contributo no avanço da tecnologia, de forma a reduzir as emissões poluentes, nomeadamente as emissões de NO_x . As consequências das emissões de óxidos de azoto são diversas. Tem-se o exemplo do *smog* fotoquímico, que ocorre geralmente na troposfera. Este tipo de poluição forma-se quando o sol bate em diferentes poluentes no ar, incluindo compostos orgânicos e óxidos de azoto, formando diversos poluentes secundários, que podem ser perigosos para a saúde e o ambiente. Além de contribuírem para o efeito fotoquímico, as emissões de óxidos de azoto são responsáveis por doenças respiratórias. Os NO_x reagem com a amónia, com a humidade e outros compostos para formar pequenas partículas que podem penetrar profundamente nos tecidos pulmonares e danificá-los, e em casos extremos, podem causar a morte prematura (EPA 1998).

Embora existam diversos estudos aerodinâmicos, reactivos e não reactivos, sobre o regime de combustão visível, o conhecimento da localização das zonas-chave do escoamento é ainda limitado, devido à dificuldade de acesso e medição neste tipo de equipamentos. Esta limitação tem dificultado a validação e desenvolvimento de modelos numéricos que permitam prever este regime de combustão com um maior rigor.

A presente dissertação tenta contribuir para o conhecimento das zonas-chave e parâmetros do escoamento que poderão ser aplicados a câmaras de combustão, nomeadamente para o regime de combustão sem chama visível.

O objectivo principal desta dissertação é validar os resultados numéricos obtidos por Vaz (2011b), para o regime de combustão sem chama visível. Neste contexto, as principais contribuições da presente dissertação são:

- Localização do ponto de recolamento.
- Obtenção da razão de recirculação, através da medição de perfis radiais de pressão total e estática ao nível do centro de recirculação.

2 Materiais e métodos

2.1. Instalação experimental

A instalação experimental, para o estudo do escoamento não reactivo, está localizada no laboratório do Núcleo de Mecânica dos Fluidos e Termodinâmica Aplicada, NMFTA, do departamento de Engenharia Mecânica da FCT/UNL. Foi montada por Vaz (2007). É composta por um ventilador, condutas de admissão e acessórios de ligação. Conta também com um modelo de queimador e uma câmara de combustão. Na figura 2.1 apresenta-se a instalação experimental.



Figura 2.1 – Fotografia da instalação experimental.

Os parâmetros de funcionamento do ventilador não estavam disponíveis. Como tal obteve-se o caudal volúmico, onde o método aplicado está descrito na secção 2.3.1.

2.1.1. Ventilador e condutas

As condutas de ligação desde o ventilador ao queimador foram dimensionadas de forma a minimizar as perdas de carga (Xavier 2011). São compostas por 6 troços. O primeiro

troço foi colocado de forma a criar uma transição para uma secção circular, representando uma contracção, como se mostra figura 2.2. O segundo troço serve de ligação entre a transição e os restantes troços de PVC. Nesta ligação foi utilizado um material flexível, como também se mostra na figura 2.2, de forma a acomodar vibrações provenientes do ventilador.



Figura 2.2 – Fotografia do troço de transição de secções, rectangular para circular, e do elemento flexível.

Para os restantes troços da conduta foi utilizada canalização em PVC. O terceiro troço, imediatamente a jusante do elemento de ligação flexível, foi dimensionado de forma que o seu comprimento assegurasse a obtenção de um escoamento totalmente desenvolvido no final deste, para instalar uma tomada de pressão estática e total, como se mostra na figura 2.3.

No quarto troço colocou-se uma curva que garantia que a perda de carga não era grande. Entre o quinto e o sexto troço, colocou-se uma contracção, como se mostra na figura 2.4, de forma a fazer ligação ao queimador.

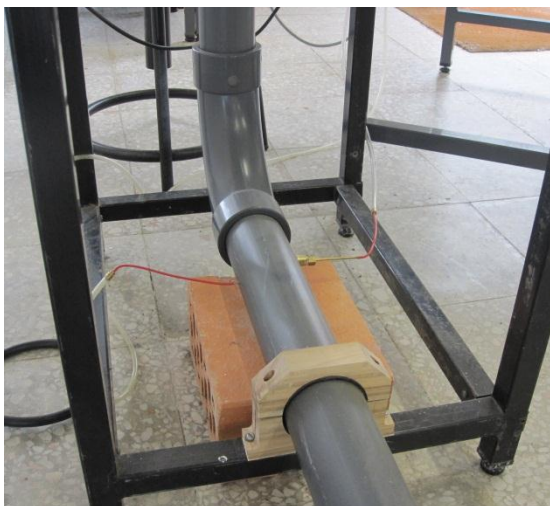


Figura 2.3 – Fotografia do troço onde se montou a tomada de pressão total e estática.



Figura 2.4 – Fotografia da curva e da contracção.

Depois de cada contracção da conduta de admissão colocaram-se estruturas em forma de rede de forma a poder reduzir a turbulência provocada por estas, e a seguir à curva colocou-se uma estrutura em “favo de abelha” de forma a equilibrar a distribuição de

velocidades. Estas estruturas foram inseridas na conduta de admissão com o intuito de se obter um escoamento pouco perturbado à entrada do queimador.

2.1.2. Queimador

O queimador (Vaz 2011b) foi fabricado em Sikablock m650, um material de fácil maquinação, caracterizado por não sofrer alterações geométricas significativas devido a variações de temperatura e humidade. Foi montado numa mesa de suporte. É composto apenas por um orifício central com um diâmetro, d_0 , de 22,2 mm. O desenho técnico do queimador encontra-se no anexo B, contudo na figura 2.5 resumem-se as dimensões principais.

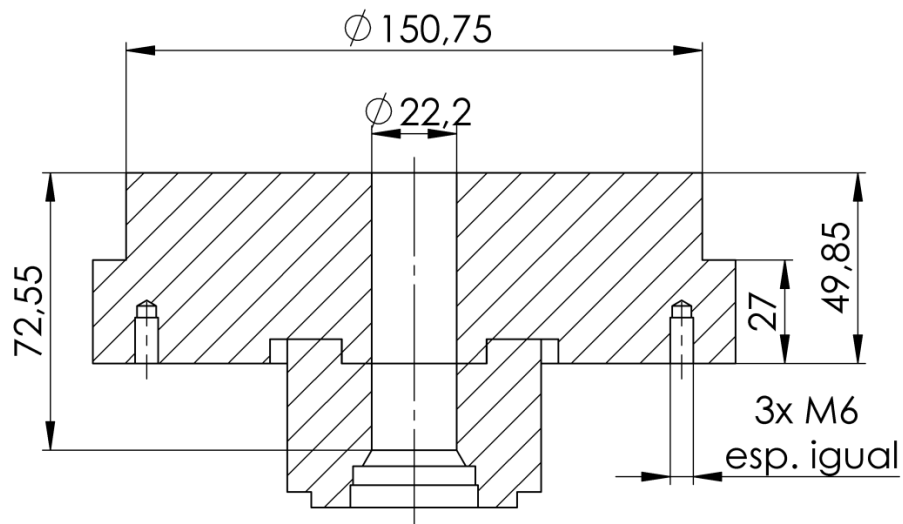


Figura 2.5 – Dimensões principais do queimador.

2.1.3. Câmara de combustão

A câmara de combustão é um tubo de acrílico. Utilizou-se um tubo com um diâmetro interno, D , de 150,8 mm. Escolheu-se o acrílico pois este é transparente, possibilitando a visualização para o interior da câmara, nomeadamente para seguir as sondas de pressão. É também fácil de maquinar com os recursos existentes no laboratório. O tubo de acrílico tem um comprimento total de aproximadamente $5,89D$, de forma a obter-se um escoamento totalmente desenvolvido à saída do modelo. O tubo tem dois rasgos na vertical de modo a permitir o acesso às sondas. Nestes rasgos colocou-se uma espuma por forma a obturar este espaço, como se pode verificar na figura 2.18 da página 32.

2.2. Instrumentação

Instrumentos de medida foram especialmente construídos para este trabalho, nomeadamente uma sonda de três orifícios e uma sonda de pressão estática, pois não existiam no laboratório do NMFTA. Nas seguintes secções descreve-se o processo de construção de ambas as sondas.

2.2.1. Tubos de Pitot

Para este trabalho experimental utilizaram-se duas configurações de tubos de Pitot. Estes estavam disponíveis no NMFTA (Vaz 2007). Os tubos de Pitot utilizados apresentam duas configurações distintas, um com o formato em L e outro em S. O tubo de Pitot com a configuração em S é de latão e as suas dimensões principais estão representadas na figura 2.6. O tubo de Pitot com a configuração em L é de aço, contudo o troço com o diâmetro exterior de 1 mm, como se representa na figura 2.6, é de latão.

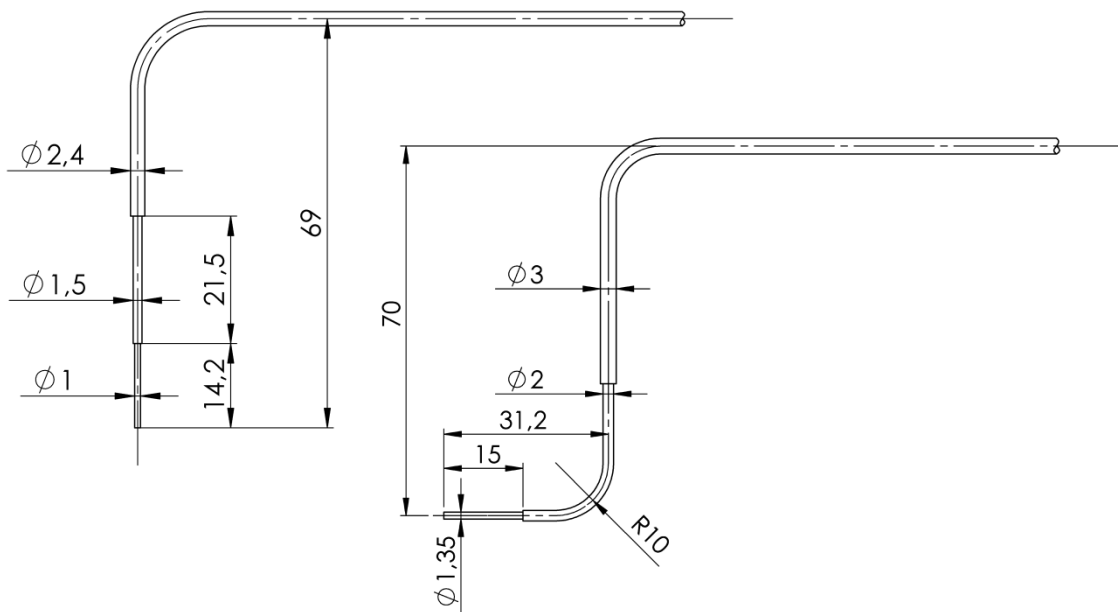


Figura 2.6 – Esquema dos tubos de Pitot utilizados. Da esquerda para a direita: tubo de Pitot em L e tubo de Pitot em S. Adaptado de Vaz (2007).

2.2.2. Sonda de três orifícios

O material adoptado para a construção da sonda foi um aço inoxidável 316L. A sonda é composta por quatro tubos, como se representa na figura 2.7 a). Um exterior, a haste da sonda, e outros três tubos que são as de tomada de pressão. Iniciou-se o processo de construção, escolhendo o diâmetro de tubos necessário.

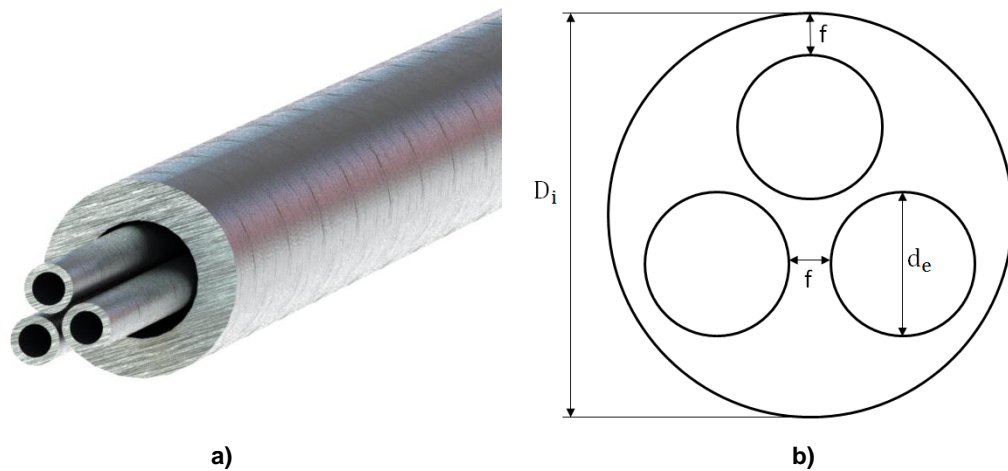


Figura 2.7 – Representação da disposição das tomadas de pressão dentro da haste, na sonda de três orifícios: a) representação tridimensional; b) representação esquemática.

A escolha dos quatro tubos foi efectuada de modo a que os três tubos de tomada de pressão ficassem estrangidos no interior da haste. Considerou-se que entre todos os tubos o espaçamento é igual a f . Na figura 2.7 b) representa-se esquematicamente, os quatro tubos da sonda e as respectivas dimensões.

Recorrendo a geometria simples, deduziu-se a equação 2.1, que determina qual o diâmetro interno necessário para o tubo da haste, D_i , em função do diâmetro externo dos tubos de tomada de pressão, d_e , e de f :

$$D_i = d_e \left(\frac{2\sqrt{3}}{3} + 1 \right) + 2f \left(\frac{\sqrt{3}}{3} + 1 \right) \quad (2.1)$$

Admitiu-se uma distância entre tubos, f , de 0,2 ou de 0,1 mm e obteve-se o gráfico da figura 2.8. Representou-se por linhas verticais e horizontais os diâmetros externos e internos, respectivamente, da família de tubos disponíveis, e por pontos os tubos disponíveis. Constatou-se que a única opção válida, era que o diâmetro interior do tubo da haste da sonda teria de ser aproximadamente 3 mm e por conseguinte, o diâmetro exterior dos três tubos de tomada de pressão de 1,24 milímetros.

Após a escolha dos tubos, estes foram cortados e posteriormente inseriram-se os 3 tubos de diâmetro inferior no tubo da haste da sonda. Os três tubos que formam a extremidade da sonda foram colados, de forma a estarem paralelos. Depois desse processo, os dois tubos laterais foram chanfrados a 45°, como se representa na figura 2.9. Por último, aplicou-se uma massa de enchimento para preencher os pequenos interstícios entre os tubos, suavizando o contorno da secção, bem como na transição para a haste da sonda.

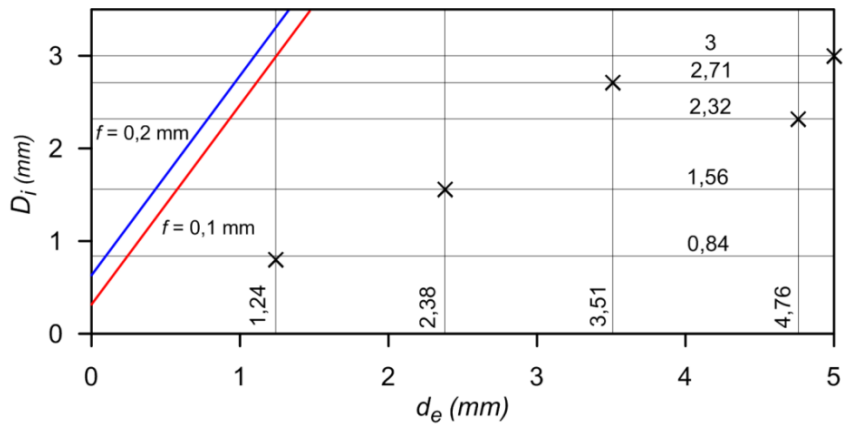


Figura 2.8 – Relação entre o diâmetro interno da haste e o diâmetro externo dos tubos de tomada de pressão, com um espaçamento entre eles de 0,1 ou 0,2 mm. Os pontos representam os tubos disponíveis.

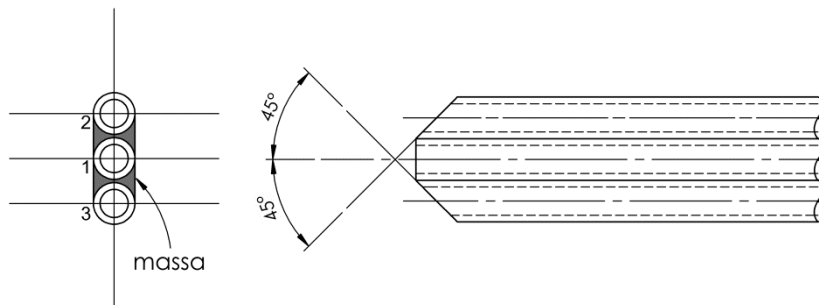


Figura 2.9 – Representação esquemática da extremidade da sonda de três orifícios chanfrada a 45°.

Depois de concluídos estes processos de construção, colocou-se a sonda num escoamento uniforme e completamente desenvolvido, com o intuito de verificar se esta sentiria a mesma pressão nos orifícios 2 e 3 (figura 2.9). Mediu-se a diferença de pressão entre os dois orifícios e verificou-se inicialmente que não era nula, indicando que a sonda não estaria totalmente alinhada com o escoamento. Constatou-se que a extremidade da sonda estava ligeiramente inclinada. Corrigiu-se esse erro e posteriormente colocou-se novamente a sonda no mesmo escoamento e constatou-se que neste caso a diferença de pressão entre os orifícios laterais 2 e 3 era nula. Nas figuras 2.10 e 2.11 apresentam-se as fotografias da sonda de três orifícios construída para este trabalho.



Figura 2.10 – Fotografia da sonda de três orifícios.



Figura 2.11 – Pormenor da extremidade da sonda.

A sonda foi inspeccionada num projector de perfis (figura 2.12), de forma a verificar a ocorrência de possíveis erros que poderiam advir do processo de construção, nomeadamente os que foram apresentados na secção 1.3.4. do capítulo 1. Mediram-se os ângulos dos dois chanfros e os seus comprimentos. Constatou-se que a diferença entre os ângulos dos dois chanfros era nula, isto é, ambos estavam a 45° relativamente ao eixo da sonda. Relativamente aos comprimentos dos chanfros, verificou-se apenas uma diferença de 0,2 mm entre o comprimento de ambos, não sendo possível obter melhores resultados com os recursos que dispúnhamos no NMFTA. O desenho técnico da sonda de três orifícios encontra-se no anexo B.



Figura 2.12 – Sonda de três orifícios colocada num projector de perfis.

2.2.3. Sonda de pressão estática

No laboratório do NMFTA encontra-se disponível uma sonda de pressão estática com um diâmetro exterior de 4 mm, contudo considerou-se que esta poderia perturbar o escoamento, optando-se pela construção de uma nova sonda de pressão estática com um

diâmetro inferior, seguindo as sugestões de Cho e Becker (1985) para as dimensões principais, apresentadas na secção 1.3.2.

Escolheu-se para o corpo da sonda, um tubo de aço 316L, de diâmetro externo de 2,38 mm e espessura de 0,41 mm. Não se consideraram diâmetros de tubos inferiores pois com os recursos disponíveis era de todo impossível maquinar uma forma esférica para a extremidade da sonda. Como apresentado na secção 1.3.2., Cho e Becker (1985) aconselham que o orifício deve ter um diâmetro menor que 0,1 vezes o diâmetro do corpo da sonda, contudo aceitam-se diâmetros de orifícios até 0,2 vezes o diâmetro do corpo da sonda. Com os recursos disponíveis no laboratório foi possível fazer um furo de 0,5 mm.

Uma das principais dificuldades na construção deste tipo de sondas de reduzidas dimensões é a sua extremidade.

Através do projector de perfis (figura 2.13) constatou-se que a extremidade da sonda tinha um diâmetro de 2,3 mm, 0,08 mm de diferença relativamente ao diâmetro externo do corpo da sonda, o qual se considerou desprezável.



Figura 2.13 – Fotografia da sonda de pressão estática colocada num projector de perfis. Resultado final.

Ainda de acordo com Cho e Becker (1985), o orifício deve estar localizado a 2D a jusante da extremidade e a 10D a montante da haste de suporte da sonda. Através do projector de perfis verificou-se que a localização do orifício encontrava-se a 3D a jusante da extremidade e a 15,1D a montante da haste de suporte da sonda, não estando totalmente de acordo com o aconselhado por Cho e Becker (1985).

Verificou-se, também através do projector de perfis, que o furo foi feito perpendicularmente ao plano da sonda, contudo descentrado do eixo da sonda de aproximadamente 0,06 mm, como se exemplifica na figura 2.14. No entanto, considerou-se este pequeno desvio como desprezável.

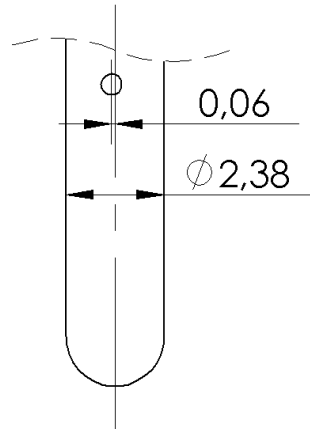


Figura 2.14 – Esquema do desvio do orifício em relação ao eixo da sonda de pressão estática

Na figura 2.15 estão representadas as dimensões principais da sonda de pressão estática, no entanto, um desenho técnico completo da sonda encontra-se no anexo B. Na figura 2.16 apresenta-se uma fotografia do estado final da extremidade da sonda de pressão estática.



Figura 2.15 – Representação esquemática das dimensões principais da sonda de pressão estática.

2.2.4. Outros instrumentos

Neste trabalho experimental utilizaram-se dois micromanômetros Betz, um com uma resolução de 0,25 Pa e outro com uma resolução de 0,025 kgf/m² .

Na mesa de suporte onde se montou o queimador, existe também um dispositivo de atravessamento. Nesse dispositivo de atravessamento montou-se um graminho Mitutoyo com uma resolução de 0,01 mm.

As temperaturas exteriores e do escoamento foram monitorizadas através de um termómetro de mercúrio com uma resolução de 0,2 °C.

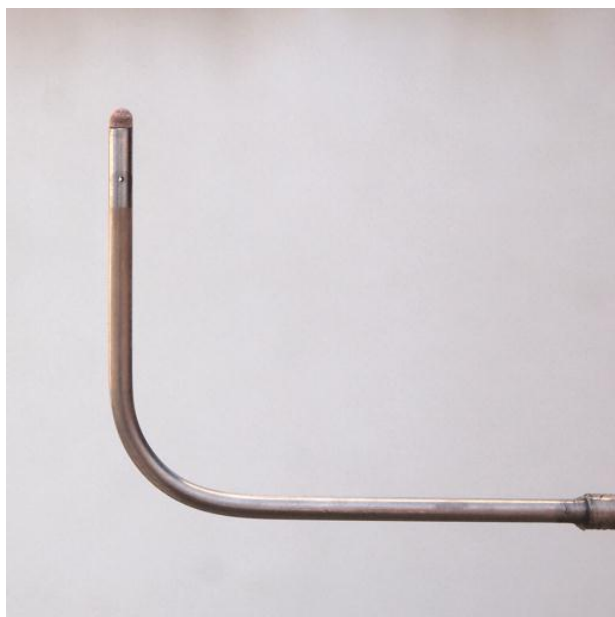


Figura 2.16 – Fotografia do estado final da extremidade da sonda de pressão estática.

2.3. Técnicas experimentais de medida

2.3.1. Caudal volúmico

O caudal volúmico é um dado importante para a determinação da repetibilidade dos ensaios. Devido à ocorrência de variações da temperatura, que podem ocorrer entre ensaios, diversos parâmetros do escoamento podem ser afectados, e por conseguinte o caudal também.

Registou-se a temperatura do escoamento, pois com o conhecimento desta, pode-se determinar, recorrendo a tabelas de propriedades, os valores da densidade, ρ , e do coeficiente de viscosidade, μ , do ar à temperatura do escoamento.

Mediu-se a pressão total no eixo da conduta, através de um tubo de Pitot, e a pressão estática na parede desta. Ambas as tomadas de pressão foram ligadas directamente ao micromanómetro Betz, sendo o valor lido a diferença entre a pressão total e a pressão estática, isto é, a pressão dinâmica, p_{din} . O comprimento da conduta, desde o compressor até à secção onde se registou a pressão dinâmica, é suficiente para se considerar o escoamento como completamente desenvolvido. Na figura 2.17 representa-se um esquema da montagem do tubo de Pitot e da tomada de pressão estática, no interior da conduta.

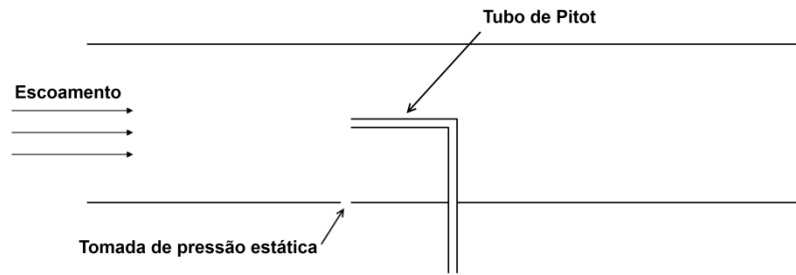


Figura 2.17 – Esquema do tubo de Pitot e da tomada de pressão estática no interior da conduta.

A partir da equação de Bernoulli, obtém-se a equação da velocidade axial no centro da conduta, dada por:

$$V_0 = \sqrt{\frac{2(p_t - p_{est})}{\rho}} \quad (2.2)$$

Num escoamento no interior de um tubo, o número de Reynolds é usualmente definido por:

$$Re = \frac{\rho \langle V \rangle d}{\mu} \quad (2.3)$$

sendo $\langle V \rangle$ a velocidade média que atravessa a secção da conduta. Os valores de $\langle V \rangle$ e Re foram obtidos por processos iterativos, recorrendo a interpolações em tabelas. Por fim, o caudal volúmico foi obtido através de:

$$Q_v = \int_A (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = \langle V \rangle A_c \quad (2.4)$$

onde A_c é a área da secção transversal da conduta. Em todos os ensaios foi registado o caudal volúmico.

2.3.2. Simetria do escoamento

Por forma a considerar o escoamento dentro da câmara como axissimétrico, e validar o modelo experimental, verificou-se o escoamento quanto à sua simetria.

Mediram-se dois perfis de pressão total, um ao nível do centro de recirculação e outro próximo da saída da câmara. O perfil ao nível do centro de recirculação foi medido radialmente, através do tubo de Pitot de configuração em L. Nesta zona o vector velocidade do escoamento é perpendicular ao plano do queimador, contudo o sentido do vector velocidade varia. Para que o tubo de Pitot estivesse sempre alinhado com o escoamento, a sua orientação foi modificada. Entre o eixo da câmara até ao centro de recirculação, apontou-se a extremidade do tubo de Pitot para o queimador, e desde o centro de recirculação até à parede da câmara, apontou-se para a saída da câmara.

Como foi descrito no capítulo 1, a medida obtida com o tubo de Pitot, pode ser afectada pela turbulência. Na impossibilidade de obter experimentalmente a intensidade de turbulência, obteve-se o perfil radial de intensidade de turbulência através de ferramenta numérica. A

intensidade turbulenta, foi obtida na forma de percentagem, ao nível do centro de recirculação numérico. Esta informação é útil de forma a verificar os valores de intensidade turbulenta que podem estar envolvidos na utilização do tubo de Pitot aquando o atravessamento radial.

Outra região onde o jacto pode sofrer desvios relativamente ao eixo do tubo, é próximo da saída da câmara, onde a velocidade é menor. À medida que o jacto se vai afastando do queimador para jusante, a sua velocidade vai diminuindo, isto é, o jacto vai perdendo a sua energia tendendo a uniformizar-se. Este decréscimo de velocidade junto à saída da câmara pode fazer com que apareçam assimetrias no escoamento. Para isso mediu-se um perfil tangencial da pressão total a uma altura fixa em relação ao queimador. Utilizou-se um tubo de Pitot com a configuração em forma de S. Fixou-se a sonda com recurso a um graminho, como se mostra na figura 2.18, e garantiu-se que o seu eixo estava alinhado com o eixo da câmara. Garantiu-se também que a única liberdade que a sonda poderia experimentar era tangencial. Colocou-se a extremidade da sonda a uma distância radial fixa de 70 mm em relação ao eixo do tubo.

Nesta região, $r/R = 0,93$, o gradiente de velocidades é acentuado (Vaz 2007), logo é importante que se mantenha esta distância fixa enquanto se obtém o perfil. Obteve-se este perfil próximo da secção de saída do tubo, a uma distância de $0,91L$ do queimador. Esta distância garantia que o suporte da sonda estava suficientemente afastado da saída, para não perturbar e bloquear o escoamento.

Em ambos os ensaios utilizou-se uma transparência, que está disponível no anexo B, possibilitando o alinhamento de ambas as sondas com o centro do queimador.



Figura 2.18 – Fotografia do tubo de Pitot em S montado próximo da saída da câmara.

Para se obter uma resolução de 30 graus, dividiu-se o perímetro do tubo em 12 partes iguais, como se mostra na figura 2.19. O perfil foi obtido rodando tangencialmente a sonda de 30 em 30 graus, e registou-se a pressão em cada ponto dada pelo micromanómetro Betz.



Figura 2.19 – Fotografia do pormenor da marcação das posições tangenciais.

2.3.3. Ponto de recolamento

Como foi apresentado no capítulo 1, o ponto de recolamento, é o fecho da zona de recirculação, caracterizado por ter velocidade nula. A sua localização é um dos principais objectivos desta tese. Para tal utilizaram-se três técnicas independentes.

2.3.3.1. Sonda de três orifícios

A localização do PR através de uma sonda de três orifícios foi obtida percorrendo uma isolinha de velocidade axial nula, dentro da câmara de combustão. Esta linha de corrente parte do queimador, passa pelo CR, até ao PR, e é caracterizada por ter nula a componente axial da velocidade. Na figura 2.20, representa-se a vermelho, a isolinha.

Para tal foi necessário operar a sonda segundo o método de anulação, descrito na secção 1.3.4 do capítulo 1.

Devido a este método ser bastante moroso, calculou-se inicialmente o tempo necessário para obter-se uma diferença de pressão estabilizada. Determinou-se então o tempo de resposta do sistema, ou seja, o tempo necessário para que, a partir daí, a variação de pressão se mantivesse constante. Para isso, inseriu-se a sonda no escoamento, colocando-a numa determinada posição fixa. Ligou-se o ventilador, e registou-se a variação de pressão entre os orifícios laterais da sonda de 15 em 15 segundos. Ajustaram-se os pontos obtidos, a uma curva do tipo resposta de degrau unitário de sistemas de 1ª ordem:

$$\Delta p(t) = \Delta p_0 \left(1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \right) \quad (2.5)$$

em que Δp_0 é uma constante do sistema, t é a coordenada tempo em minutos, t_0 o intervalo de tempo entre ligar o ventilador até ao começo de registo dos dados e τ a constante de

tempo. Dos pontos de diferença de pressão medidos (figura 2.21), obteve-se a equação da resposta do sistema obtida, que é dada por:

$$\Delta p(t) = 605,63 \left(1 - e^{-\frac{t+0,272}{2,423}} \right) \quad (2.6)$$

onde a constante de tempo, τ , obtida foi de 2,423 minutos.

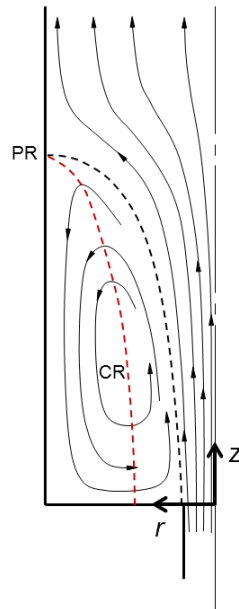


Figura 2.20 – Representação esquemática do jacto confinado em câmara circular. A vermelho, a isolinha de velocidade axial nula. Adaptado de Vaz (2012).

Através da equação do tempo de resposta da sonda obtida, constata-se que a variação de pressão tende a estabilizar a partir de um certo intervalo de tempo. Verificou-se que esta leva $\cong 12$ minutos até alcançar 99,3% do valor final, isto é, o tempo a partir do qual a variação de pressão se mantém constante.

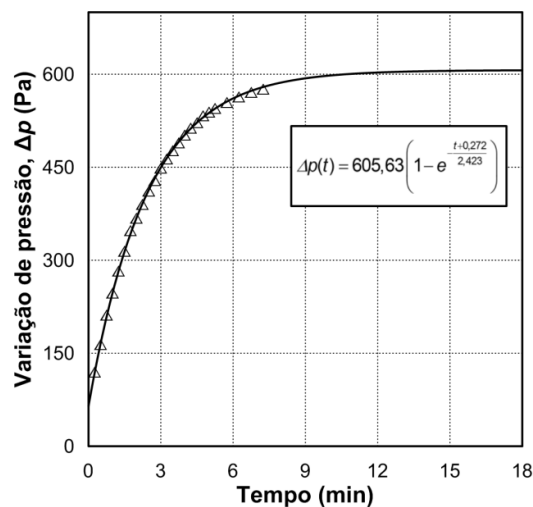


Figura 2.21 – Variação de pressão sentida pelos orifícios laterais da sonda de três orifícios em função do tempo.

Obteve-se também o número de constantes de tempo, $n\tau$, que representa o tempo que é necessário esperar entre sucessivas medições de variação de pressão entre os dois orifícios laterais, Δp . Começou-se por determinar a função n . De forma a determinar-se o tempo de estabelecimento, isto é, o tempo necessário para que a pressão estabilize, considerou-se uma faixa de 2%, como se exemplifica na figura 2.22. Analiticamente vem:

$$\Delta p_{\infty} - \Delta p(t) = 0,02 \quad (2.7)$$

Considerando que $\Delta p_{\infty} = \Delta p_0 = \Delta p$ e substituindo t por $n\tau$, vem então que:

$$n = -\ln\left(\frac{0,02}{\Delta p} e^{-\left(\frac{t_0}{\tau}\right)}\right) \quad (2.8)$$

Substituindo os valores das constantes t_0 e τ da equação de resposta na equação 2.8 vem:

$$n = -\ln\left(\frac{0,02}{\Delta p} e^{-\left(\frac{0,272}{2,423}\right)}\right) \quad (2.9)$$

O gráfico que relaciona o tempo que é necessário esperar entre sucessivas medições, para variações de pressão entre 0,1 Pa até 1 Pa aproximadamente, é dado pela figura 2.23.

Depois de concluído este processo, procedeu-se de forma a localizar o ponto de recolamento. Inseriu-se a sonda através dos rasgos da câmara. Posicionou-se a sonda a 90° em relação ao eixo da câmara. Colocou-se a sonda nas coordenadas do CR, que foram obtidas experimentalmente por Vaz (2011b), e foi-se avançando o graminho radialmente até se obter uma diferença de pressão nula entre os orifícios laterais 2 e 3. Neste caso a pressão sentida pelo orifício central é a pressão total. Nestes pontos registou-se a coordenada radial e a axial. Com o mesmo método foi-se avançando axialmente até se chegar próximo do ponto de recolamento, percorrendo a isolinha, como se exemplifica na figura 2.20.

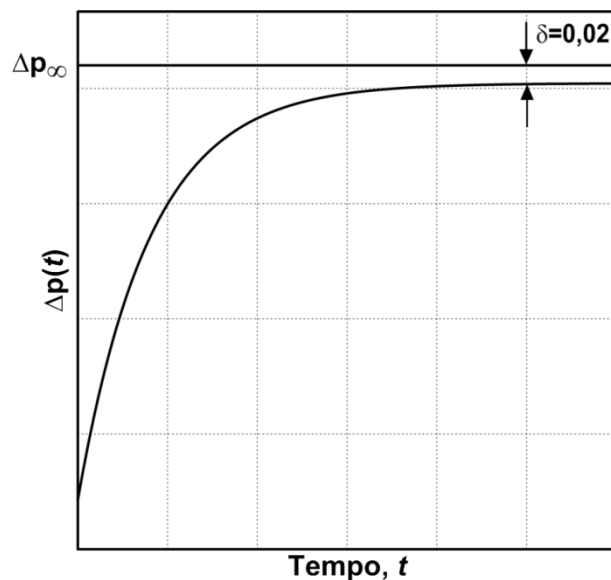


Figura 2.22 – Resposta no tempo típica de uma sonda de pressão. Indica-se o valor assintótico, Δp_{∞} , e o erro relativo, δ .

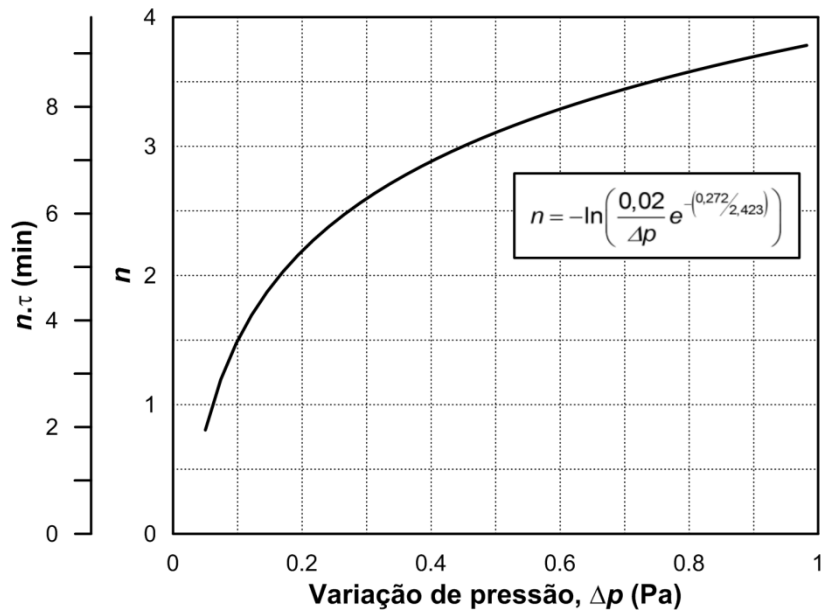


Figura 2.23 – Tempo necessário para a estabilização da variação de pressão, entre sucessivas medições.

Para que as medições feitas com a sonda, próximo da parede, não fossem perturbadas pela proximidade à espuma colocada nos rasgos, decidiu-se medir até a uma distância da parede de aproximadamente $0,04D$. De forma a obter a localização do ponto de recolamento, ajustou-se aos pontos anteriormente obtidos uma equação do tipo:

$$z = a.r^4 + b.r^2 + c.r \quad (2.10)$$

e através desta foi possível obter a cota do PR, com um erro da ordem do afastamento da parede. No anexo A, descreve-se o método utilizado de forma a obter o erro de ângulo do escoamento, sentido pela sonda de três orifícios, que foi apresentado na secção 1.34 do capítulo 1.

2.3.3.2. Tubo de Pitot

Através de um tubo de Pitot com configuração em L, obteve-se a localização do PR. Começou-se inicialmente por alinhar o eixo do tubo de Pitot com o eixo do queimador, através de uma transparência, disponível no anexo B, e fez-se o “zero” do graminho, quando a tomada de pressão estava à face do queimador.

Inseriu-se o tubo de Pitot na câmara através dos seus rasgos, e posicionou-se o Pitot junto à parede diametralmente oposta da câmara. Realizaram-se dois atravessamentos axiais para $2r = D$, passando pela possível localização do ponto de recolamento, dada pelos resultados anteriormente obtidos com a sonda de três orifícios. Um dos atravessamentos com o tubo de Pitot foi feito com a extremidade direccionada para o queimador, e o outro com a extremidade direccionada para a saída. Foram registadas as pressões e a respectiva coordenada z em diversos pontos, em intervalos longitudinais semelhantes para os dois atravessamentos. Por fim ajustaram-se equações aos pontos obtidos. A equação que melhor

se ajusta aos pontos obtidos pelo tubo de Pitot com a extremidade direccionada para o queimador é do tipo:

$$p = \frac{a.z^2 + b}{c.z^2 + 1} \quad (2.11)$$

A equação que melhor se ajusta aos pontos obtidos pelo tubo de Pitot com a extremidade direccionada para a saída da câmara é do tipo:

$$p = a.z^4 + b.z^2 + c \quad (2.12)$$

As coordenadas do ponto de recolamento são então dadas pela intersecção das curvas obtidas.

À semelhança do que foi dito na secção 2.3.2., a turbulência pode afectar a medição da pressão, aquando a utilização de um tubo de Pitot. Para este atravessamento longitudinal, foi obtido numericamente, o perfil axial de intensidade turbulenta, a uma distância de 0,01D da parede.

2.3.3.3. Filme de óleo

Para localizar o ponto de recolamento, utilizou-se outra técnica, o filme de óleo. Não existe nenhum método bem definido na literatura para a utilização desta técnica, contudo começou-se por verificar qual o óleo mais indicado para a superfície em estudo.

Inicialmente foram experimentados vários óleos, nomeadamente o de silicone, 15W 40, 70W 90, líquido hidráulico, querosene, gasóleo e gasolina. Estes óleos foram testados quanto à sua viscosidade e resposta à força da gravidade. Foram colocados sobre uma superfície de acrílico, de igual material que a câmara, posicionada na vertical, e seleccionaram-se os que menos reagiram à gravidade.

Os óleos seleccionados foram posteriormente testados sobre a mesma placa de acrílico, colocada na mesma posição, mas desta vez apontou-se ar comprimido, de forma a verificar-se a criação de estrias, que dessem a indicação da direcção do escoamento. Nestes ensaios juntaram-se pigmentos, nomeadamente giz, tóner de fotocopiadora e pó de grafite com um intuito de visualizar as estrias. Nestes ensaios foi também utilizado o óleo de linhaça de forma afinar a qualidade das estrias.

As quantidades necessárias de óleo, pigmentos e óleo de linhaça não estão descritas na literatura. De forma a ter uma noção das quantidades de cada “ingrediente” do filme, utilizou-se a gota, com um diâmetro aproximado de 5 mm. Na secção 3.3.3 do capítulo 3, todas as quantidades apresentadas estão em número de gotas.

Depois de seleccionadas as misturas que melhor se comportaram nos testes realizados, foram aplicados directamente à parede do queimador, num intervalo onde estaria o ponto de recolamento, obtido pelas técnicas experimentais anteriormente enunciadas.

2.3.4. Razão de recirculação

Como foi apresentado na secção 1.2.1. pela equação 1.2, a razão de recirculação de gases de combustão é definida pelo quociente entre o caudal mássico recirculado e o caudal mássico injectado.

Experimentalmente é possível obter a razão de recirculação através do conhecimento de ambos os caudais mássicos. O caudal mássico injectado foi obtido através de:

$$\dot{m}_{inj} = Q_v \rho \quad (2.13)$$

De acordo com a lei da conservação da massa, o caudal volúmico é o mesmo que o medido na secção 2.3.1. Através da medição da temperatura do escoamento, obteve-se a densidade do ar, ρ , interpolando em tabelas.

O caudal mássico recirculado foi obtido através da integração do perfil radial de velocidades axiais ao nível do CR. Optou-se pela medição do perfil radial de velocidades axiais ao nível do CR, pois nesta região o vector de velocidade está alinhado com ambas as sondas, neste caso o tubo de Pitot e a sonda de pressão estática, necessárias para a obtenção deste perfil. De notar que o perfil radial de pressão total já tinha sido obtido, aquando a verificação da simetria do escoamento, sendo apenas necessário a obtenção do perfil de pressão estática.

O método da obtenção do perfil radial de pressão estática é idêntico ao da obtenção do perfil radial de pressão total, descrito na secção 2.3.2. Centrou-se inicialmente a sonda de pressão estática com o centro do queimador, através da transparência disponível no anexo B. Fez o “zero” do graminho quando o orifício de tomada de pressão estática estava ao nível da face do queimador. Desde o eixo da câmara até ao centro de recirculação, apontou-se a sonda de pressão estática para o queimador, e desde o centro de recirculação até à parede da câmara, apontou-se a sonda para a saída. Por fim ajustou-se uma equação aos pontos de pressão estática medidos.

De acordo com a equação 2.2, obtidos os perfis radiais de pressão total e estática, o perfil de velocidade radial é então obtido através de:

$$V(r) = \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_t(r) - p_{est}(r))} \quad (2.14)$$

A recirculação está compreendida entre o centro de recirculação e a parede do queimador, e através da equação 2.4, o caudal volúmico recirculado foi obtido:

$$Q_v = \int_0^{2\pi} \int_{R_{CR}}^R V(r).r \, drd\theta \quad (2.15)$$

e por conseguinte o caudal mássico recirculado é dado por:

$$\dot{m}_{rec} = \int_0^{2\pi} \int_{R_{CR}}^R \rho.V(r).r \, drd\theta \quad (=) \quad \dot{m}_{rec} = 2\pi\rho \int_{R_{CR}}^R V(r).r \, dr \quad (2.16)$$

Por fim, obteve-se a razão de recirculação através de:

$$K_v = \frac{\dot{m}_{rec}}{\dot{m}_{inj}} = \frac{2\pi \int_0^R V(r).r dr}{Q_{v_{inj}}} \quad (2.17)$$

3 Resultados e discussão

3.1. Condições experimentais

Nesta secção apresentam-se as condições de operação da instalação no decorrer dos ensaios. Durante todos os ensaios a temperatura ambiente e a temperatura do escoamento foram monitorizadas. A temperatura ambiente manteve-se nos $17,5 \pm 2,2^\circ\text{C}$ e a temperatura do escoamento nos $26,3 \pm 4,2^\circ\text{C}$. As pequenas diferenças de temperatura do escoamento em diferentes ensaios experimentais não produziram efeitos significativos no escoamento, como se demonstra pelo gráfico da figura 3.1. Através deste gráfico também é possível constatar, que as variações de temperatura experimentadas durante os ensaios, não comprometeram a repetibilidade dos resultados entre os ensaios experimentais.

O caudal volúmico em todos os ensaios manteve-se praticamente constante e com um valor de $83,8 \pm 0,7 \text{ m}^3/\text{h}$.

Na presente dissertação vamos adoptar o diâmetro como parâmetro de adimensionalização e por isso a coordenada radial será expressa pelo parâmetro adimensional $r/R = R/(D/2) = 2r/D$. As barras de erro representadas em diversos gráficos ao longo desta dissertação são os limites da variação de pressão e não outros erros experimentais.

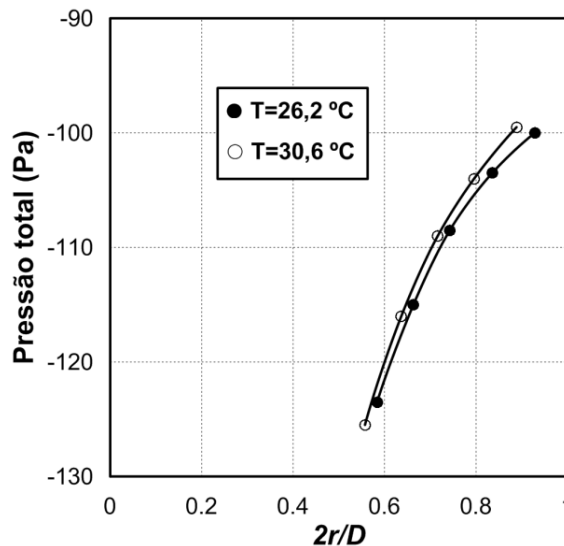


Figura 3.1 – Exemplo do efeito da temperatura do escoamento na medição da pressão total.

3.2. Simetria do escoamento

De forma a verificar a simetria do escoamento mediu-se o perfil radial de pressão total ao nível do centro de recirculação. Contudo, começou-se por verificar as intensidades de turbulência que poderiam estar envolvidas ao nível do centro de recirculação.

De forma a verificar a intensidade da turbulência, obteve-se, através de uma ferramenta numérica, dois perfis radiais de intensidade turbulenta ao nível do centro de recirculação, um onde a velocidade de injeção foi tomada como referência, figura 3.2 a), e outro onde se tomou como referência a velocidade local, figura 3.2 b). Numericamente as dimensões foram reproduzidas à semelhança das da instalação experimental: o orifício do queimador com um diâmetro, d_0 , de 22,2 mm, a câmara com um diâmetro, D , de 150,8 mm e um comprimento $L/D = 6$. As propriedades do escoamento numérico não reactivo, são apresentadas através da tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades do escoamento numérico.

Modelo de turbulência: $k-\varepsilon$ padrão	Temperatura do escoamento, T_{esc} (K)	Densidade do ar, ρ_{ar} (kg/m ³)	Coefficiente de viscosidade do ar, μ_{ar} (Pa.s)
	288,16	1,225	$1,789 \times 10^{-5}$

Constata-se que a intensidade de turbulência ao longo de todo o perfil da figura 3.2 a) não ultrapassa os 14%. De acordo com Tavoularis e Szymczac (1989) para valores abaixo de 10%, a turbulência pode ser desprezada. Relativamente ao perfil da figura 3.2 b), verifica-se que o gráfico apresenta uma descontinuidade, que corresponde à localização do CR, sendo a intensidade turbulenta infinita devido à velocidade ser nula no CR. Como sugestão para trabalho futuro, poder-se-á obter a intensidade da turbulência experimentalmente, de forma a confirmar os resultados obtidos numericamente.

Realizou-se o atravessamento radial de pressão total ao nível do centro de recirculação (figura 3.3). As coordenadas do centro de recirculação, obtidas experimentalmente por Vaz (2011b) na mesma instalação, são: $z/D = 1,39$ e $2r/D = 0,57$.

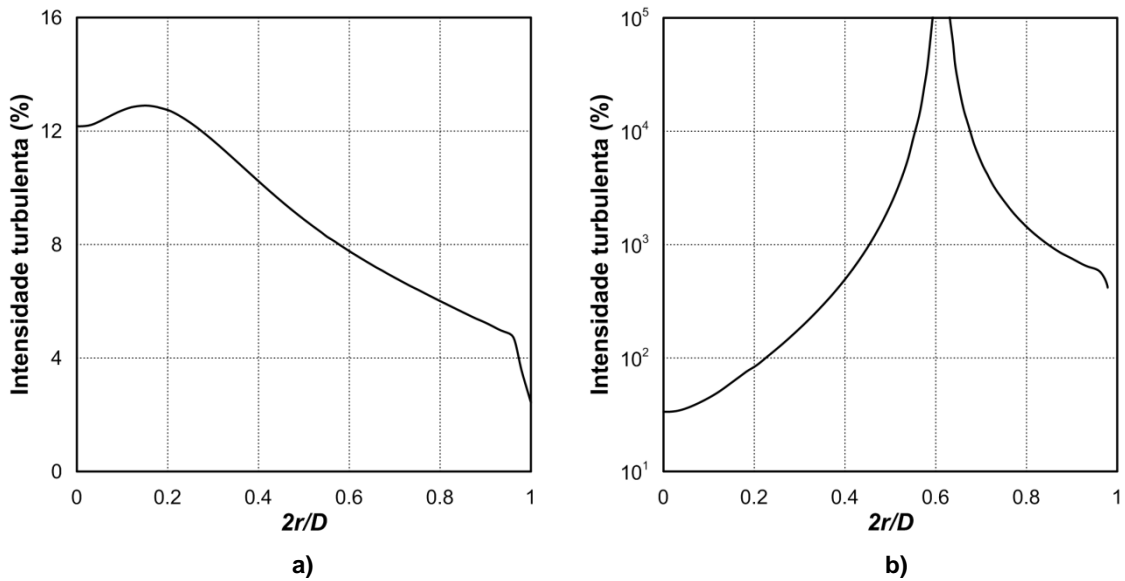


Figura 3.2 – Perfil radial de intensidade turbulenta, ao nível do centro de recirculação, obtido através de ferramenta numérica: a) Referenciada à velocidade média de injeção (63 m/s); b) referenciada à velocidade local (escala semi-logarítmica).

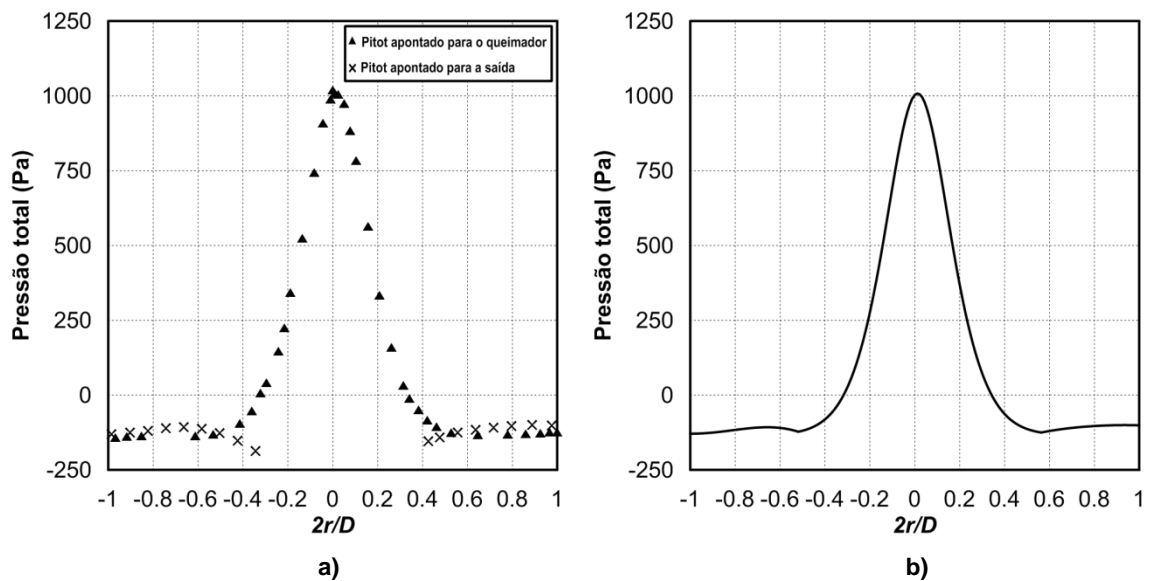


Figura 3.3 – Perfil radial de pressão total, ao nível do centro de recirculação: a) Resultados das medições efectuadas com o tubo de Pitot apontado para a saída e para o queimador ; b) troços válidos das medições efectuadas.

No gráfico da figura 3.3, optou-se pela não colocação das barras de erro em cada ponto medido, de forma a não o saturar. A variação de pressão máxima e média na medição com o tubo de Pitot apontado para o queimador foi de 20 Pa e $\pm 4,5$ Pa, respectivamente. No caso em que o tubo de Pitot estava apontado para a saída, a variação máxima foi de 0,75 Pa e a variação média de $\pm 0,37$ Pa.

Através do perfil obtido na figura 3.3, constata-se um ligeiro desvio relativamente ao eixo da câmara. O desvio relativamente ao eixo foi de $2r/D=0,0125$, que pode advir de diversos factores tais como:

- desvios de coaxialidade do tubo relativamente ao eixo do queimador;
- erro associado ao posicionamento do tubo de Pitot;

De forma a verificar a simetria do escoamento à saída mediu-se o perfil tangencial da pressão total (figura 3.4). A pressão total média, representada no gráfico da figura 3.4 por uma recta horizontal, foi de 2,02 Pa. A variação de pressão entre cada ponto medido foi de aproximadamente 0,125 Pa, que é inferior à resolução do micromanómetro Betz utilizado neste ensaio, 0,25 Pa, o que indica que se chegou ao máximo da resolução do instrumento.

Pode-se afirmar que o perfil de pressões total que se obteve é aproximadamente uniforme, e concluir que, na prática, o escoamento é uniforme próximo da saída.

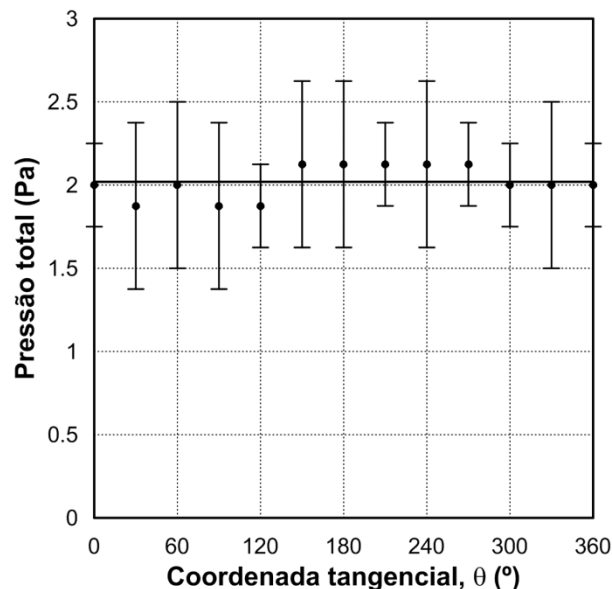


Figura 3.4 – Perfil tangencial de pressão total, a 0,91L do queimador.

3.3. Ponto de recolamento

3.3.1. Sonda de três orifícios

Conforme descrito na secção 2.3.3.1 do capítulo 2, obtiveram-se as coordenadas da isolinha de velocidade axial nula. Definida a isolinha (figura 3.5), obteve-se o ponto de recolamento. O ponto de recolamento está localizado na parede e a uma distância do queimador de $z/D = 3,28$.

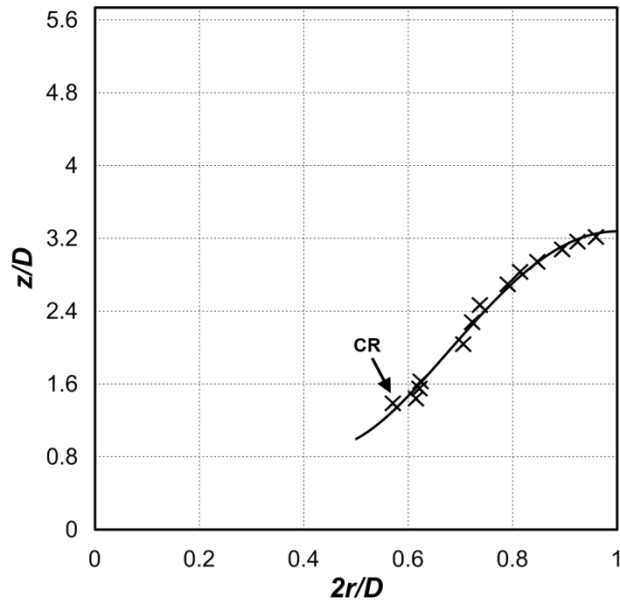


Figura 3.5 – Isolinha da componente axial da velocidade nula.

3.3.2. Tubo de Pitot

À semelhança do que foi apresentado na secção 3.2, obteve-se por via numérica o perfil axial de intensidade turbulenta a 2 mm da parede (figura 3.6). Obteve-se este perfil com o intuito de verificar se a localização do ponto de recolamento obtido experimentalmente estaria próximo do obtido por via numérica. Ora como o PR tem velocidade nula, a intensidade turbulenta será infinita nessa região. Constata-se no perfil obtido (figura 3.6) que entre $z/D=3$ e $z/D=3,5$ existe uma descontinuidade no gráfico, que representa a localização do PR. O ruído que o gráfico da figura 3.6 apresenta é devido à discretização da malha.

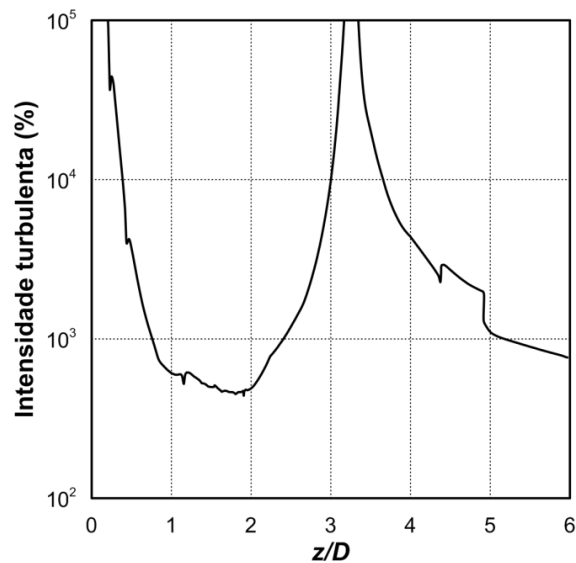


Figura 3.6 – Perfil longitudinal da intensidade turbulenta (escala semi-logarítmica) a uma distância da parede da câmara de 2 mm, obtido através da ferramenta numérica. Referenciada à velocidade local.

Nos gráficos da figura 3.7, apresentam-se os perfis axiais de pressão total junto à parede da câmara, com o tubo de Pitot apontado para o queimador e para a saída.

As curvas, que se ajustaram aos pontos medidos experimentalmente, intersectam-se a uma distância do queimador de $z/D=3,25$, que representa a localização do ponto de recolamento.

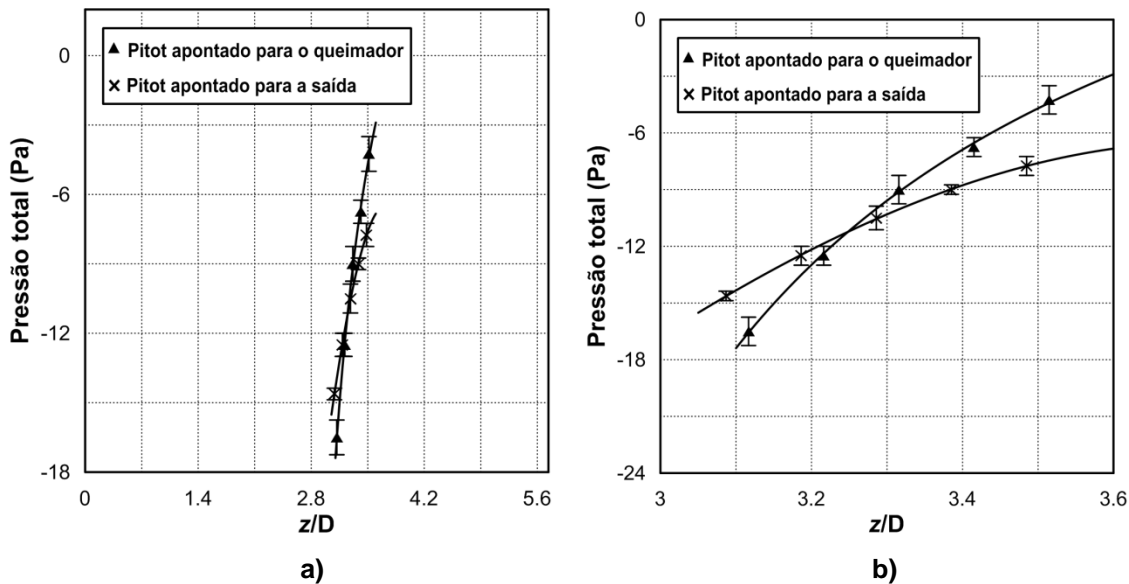


Figura 3.7 – Atravessamentos axiais de pressão total junto à parede da câmara: a) escala axial completa; b) redução da escala de forma a visualizar-se o ponto onde os perfis se intersectam.

3.3.3. Filme de óleo

Outra técnica utilizada de forma a tentar obter a localização do PR foi o filme de óleo.

Na literatura, a falta de objectividade na descrição das misturas, mencionando apenas os principais componentes, não indicando quantidades, torna esta técnica difícil e morosa de reproduzir. Para que se obtenha uma mistura que à medida que o escoamento passa, esta mostre a direcção do escoamento, é necessário um elevado número de ensaios de forma a obter-se a mistura ideal entre óleos, pigmentos e aditivos.

Nesta secção descreve-se o trabalho efectuado na tentativa de obter a localização do PR. Descrevem-se as quantidades de cada componente utilizado em cada mistura, para que estas sejam possíveis de reproduzir por outra pessoa, no entanto não se obteve sucesso na localização do PR através desta técnica.

Efectuaram-se testes iniciais com o intuito de escolher o tipo de filme, isto é, que melhor mistura entre óleo e pigmentos que resistia à acção da gravidade, e se indicava a direcção do escoamento. Estes testes foram efectuados sobre uma superfície de uma placa plana de acrílico, colocada na vertical, onde se experimentaram várias misturas, das quais se destacam as seguintes:

- duas gotas de óleo 15W40, uma gota de óleo de linhaça e uma gota de tóner;

- três gotas de querosene, duas gotas de óleo de linhaça e três gotas de pó de talco. Testaram-se dois pós de talco, um natural e outro aromatizado, obtendo-se melhores resultados com o natural;
- quatro gotas de gasolina, três gotas de óleo de linhaça e uma gota de tóner;
- dez gotas de gasóleo, uma gota de óleo de linhaça e três gotas de tóner.

Nestes testes utilizou-se uma pistola de ar comprimido, direccionada perpendicularmente à placa de acrílico, a uma distância de 35 cm entre o bocal da pistola de ar e a placa, por forma a reproduzir as condições do escoamento no interior da câmara. Com o óleo 15W40, não se conseguiu visualizar com qualidade as estrias que dão a direcção do escoamento. Com o querosene, foi possível visualizar as linhas de corrente do escoamento, contudo este evaporava com muita facilidade, acontecendo o mesmo com as misturas com gasolina. Com a mistura com gasóleo também foi possível visualizar as estrias, e que, ao contrário da mistura de querosene, este não evaporava tão rapidamente, dando tempo para que o filme fosse arrastado. Verificou-se que, dos quatro ensaios efectuados, os que descreviam melhor a direcção do escoamento, foram as misturas de querosene e gasóleo. Na figura 3.8 mostra-se o resultado de uma das experiências feitas com gasóleo, óleo de linhaça e tóner. Nesta figura é possível identificar o ponto de estagnação e a direcção do escoamento.

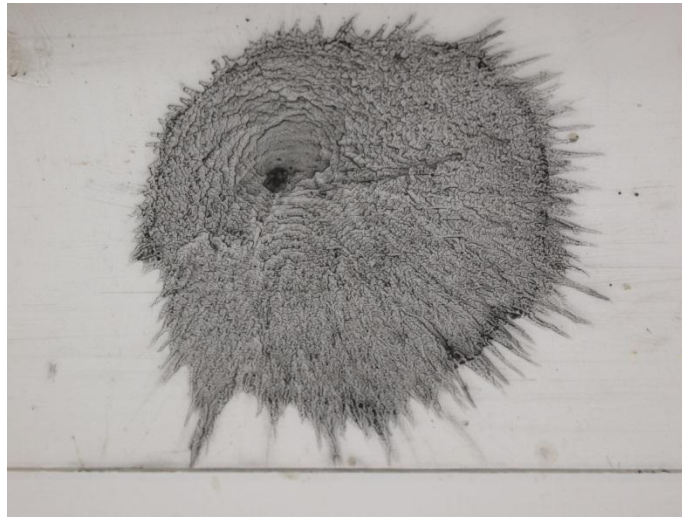


Figura 3.8 – Fotografia de teste efectuado com ar comprimido, numa placa plana vertical com o filme de óleo de gasóleo e tóner.

Depois de seleccionadas as misturas que melhor se comportaram nos ensaios iniciais, procedeu-se aos testes no interior da câmara. Foram realizados vários testes na parede da câmara. Colocou-se a mistura numa secção da câmara, numa zona onde se sabia que estava localizado o ponto de recolamento, $2,98 \leq L/D \leq 3,98$.

As misturas em que se obtiveram melhores resultados visuais foram as seguintes:

- doze gotas de querosene, quatro gotas de óleo de linhaça e cinco gotas de pó de talco (figura 3.9);

- vinte gotas de gasóleo, duas gotas de óleo de linhaça e três gotas de tóner (figura 3.10).

Em ambas as misturas mostradas nas figuras 3.9 e 3.10, constatou-se que se obteve escorrência, isto é, a tensão de corte entre a tinta e a superfície não era suficiente para vencer os efeitos da gravidade. Dever-se-ia ter observado uma separação nas estrias, umas no sentido da saída da câmara, e outras no sentido do queimador. Na região onde o sentido das linhas de corrente se alterava, era onde estava localizado o PR. Contudo, nenhuma das misturas conseguiu revelar essa região. A mistura com gasóleo foi a que melhor se comportou em todos os ensaios, observando-se estrias, mas não pronunciadas de modo a obter-se a localização da PR.



Figura 3.9 – Fotografia do resultado de um ensaio realizado com querosene na parede da câmara.



Figura 3.10 – Fotografia do resultado de um ensaio realizado com gasóleo na parede da câmara.

Uma das formas de vencer os efeitos da gravidade, de forma a não obter a escorrência das misturas, é colocando a câmara de combustão na horizontal, que possibilita que os efeitos da gravidade sobre a mistura sejam inferiores. Além da escorrência constatada, outra razão para não se ter obtido esta separação das estrias na região do PR, foram as baixas velocidades que esta região apresenta, pois é uma zona de estagnação.

3.4. Razão de recirculação

Obteve-se, o caudal mássico injectado através do queimador, \dot{m}_{inj} , que foi de 0,027 kg/s. Outro dado necessário para calcular a razão de recirculação é o caudal mássico recirculado. Para isso, mediram-se os perfis radiais de pressão total (figura 3.11) e estática (figura 3.12) ao nível do CR. De forma a que o instrumento de medição esteja alinhado com o escoamento, desde o eixo da câmara até à coordenada radial do CR, o troço válido é o obtido com o instrumento apontado para o queimador, e desde o CR até à parede, o troço válido é o obtido com o instrumento apontado para a saída. Na região onde as curvas se intersectam é onde está localizado o CR. Em ambos os gráficos apresentados, representou-se por linha contínua, os troços válidos das curvas obtidas, e a traço interrompido os troços não válidos. Contudo no gráfico da figura 3.12 as curvas ajustadas aos pontos medidos não se cruzam, e o erro experimental é dado segundo as barras de erro apresentadas. Portanto, de forma a manter a coerência relativamente ao apresentado no gráfico da figura 3.11, considerou-se válido desde o eixo da câmara até à coordenada do CR, o troço que continha os pontos medidos com a sonda apontada para o queimador, e desde o CR até à parede, os pontos medidos com a sonda apontada para a saída.

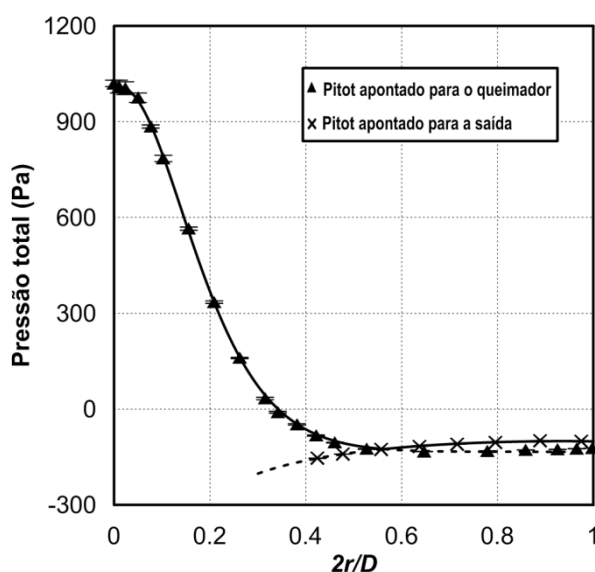


Figura 3.11 – Perfil radial de pressão total, medido ao nível do CR.

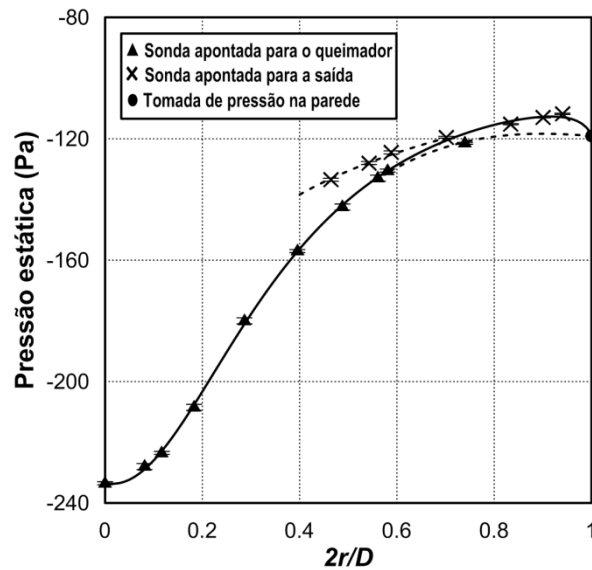


Figura 3.12 – Perfil radial de pressão estática, medido ao nível do CR (experimental).

A velocidade axial ao nível do CR foi obtida através da equação 2.12, enunciada na página 37 do capítulo 2. A equação da pressão total em função do raio da câmara, $p_t(r)$, é a equação do perfil radial de pressão, e $p_{est}(r)$, a equação do perfil de pressão estática, ambos obtidos experimentalmente. No gráfico da figura 3.13 apresenta-se o perfil radial de velocidades axiais ao nível do CR. A velocidade axial foi adimensionalizada através da velocidade de injeção, $V_{injecção} = 60,14$ m/s. Uma vez que a pressão estática não foi medida nos mesmo pontos que a pressão total, representa-se neste gráfico a localização radial dos pontos de cada uma destas séries. O perfil de pressão dinâmica foi obtido pela diferença das curvas ajustadas aquelas duas séries de pontos.

Integrando o perfil de velocidade axial, representado no gráfico da figura 3.13, obteve-se um caudal volúmico recirculado de $0,051$ m³/s, através da equação 2.15. Por conseguinte o caudal mássico recirculado obtido foi de $0,060$ kg/s. Obteve-se um valor de razão de recirculação, K_v , de 2,2. Conforme esperado, constata-se que o caudal mássico recirculado é superior ao injectado, pois o queimador e a câmara foram dimensionados de forma a obter-se razões de recirculação superiores a 1 (Vaz 2011b), importante para diversos regimes de combustão.

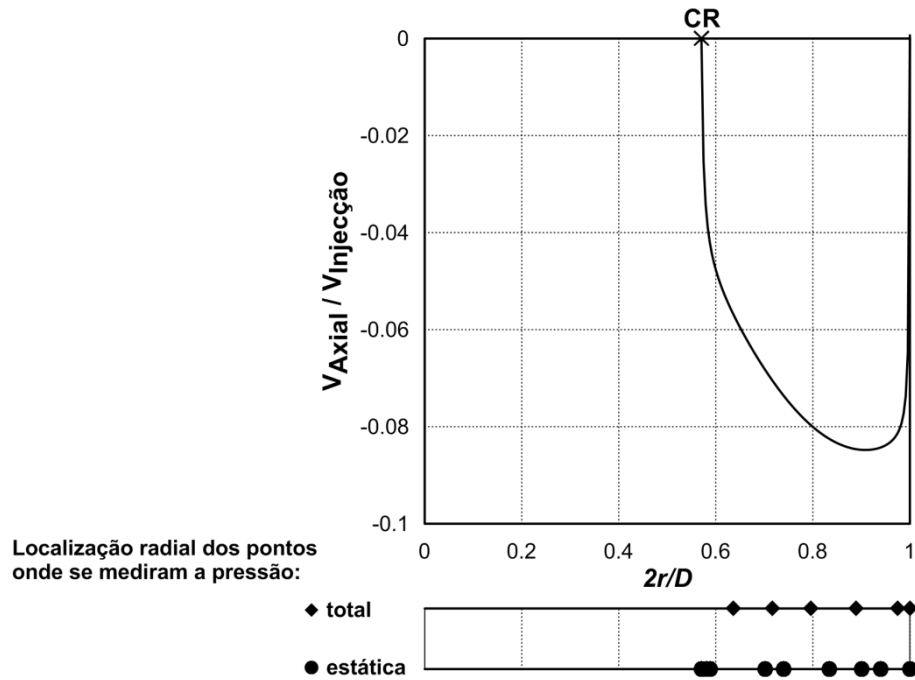


Figura 3.13 – Perfil de velocidade axial, desde o centro de recirculação até à parede da câmara. Os pontos representados dizem respeito à coordenada radial onde a pressão total e estática foram medidas.

O objectivo era obter o perfil de pressão total e estático ao nível do CR, desde o CR até à parede, no entanto prolongou-se até ao eixo da câmara e observou-se um facto curioso relativamente ao perfil de pressão estática. Consta-se que a pressão estática no perfil experimental aumenta. Quisemos comparar com resultados numéricos para trazer luz a este assunto. Na figura 3.14 representa-se graficamente o perfil radial de pressão estática ao nível do CR, numérico e experimental.

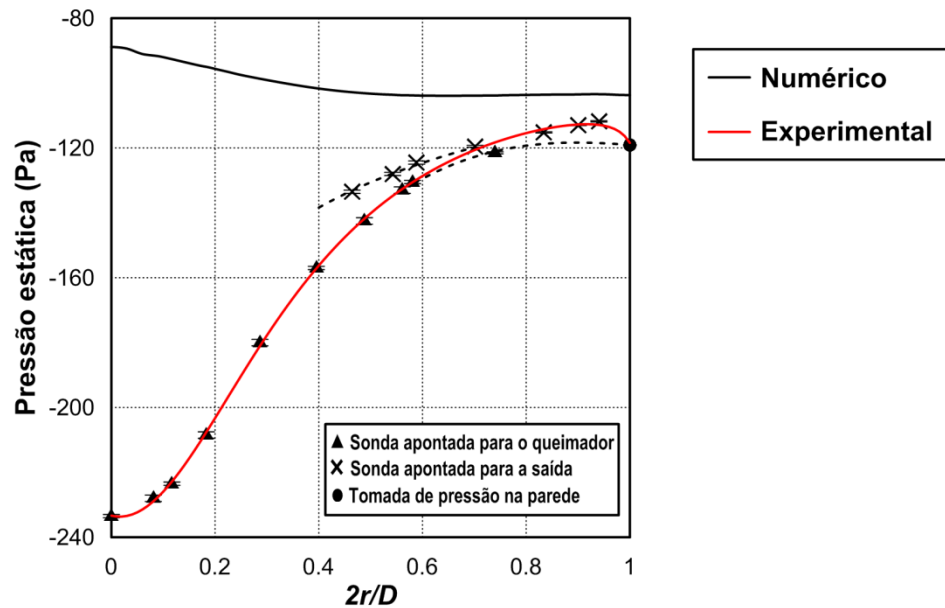


Figura 3.14 – Perfil radial de pressão estática ao nível do CR. Sobrepõe-se o perfil radial de pressão estática correspondente ao da figura 3.12, ao obtido através de ferramenta numérica.

Comparando os dois perfis de pressão estática (numérico e experimental), verifica-se que o perfil experimental difere do obtido numericamente. Esta diferença entre os perfis pode advir de diferentes fontes de erro. A não localização correcta dos orifícios, de acordo com Cho e Becker (1985), pode causar um erro sistemático na medição da pressão estática. Os resultados obtidos próximos da parede, com a sonda inserida no escoamento, são concordantes com a medição clássica da pressão estática (na parede). No entanto no eixo da câmara e próximo deste, onde as velocidades são superiores às encontradas na parede, a medição da pressão estática pode vir adulterada. Este facto deve-se aos orifícios de tomada de pressão estática poderem ainda estar localizados na zona de recirculação que se cria devido à extremidade hemisférica deste tipo de sondas, como se exemplifica na figura 3.15.

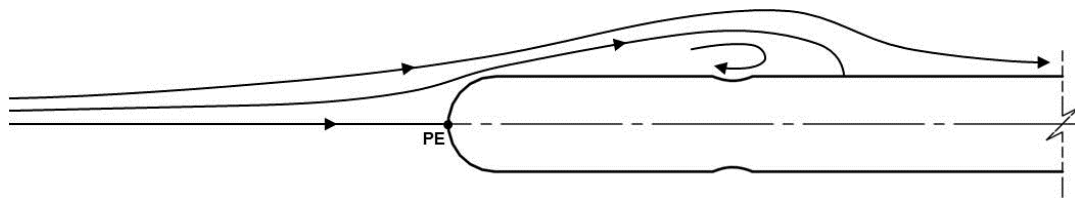


Figura 3.15 – Zona de recirculação que se cria devido à geometria hemisférica da extremidade da sonda de pressão estática quando imersa num escoamento.

A turbulência pode afectar de forma mais significativa, os resultados obtidos com a sonda de pressão estática, do que os obtidos com o tubo de Pitot (Cho e Becker 1985). Através de ferramenta numérica, obteve-se o perfil ao longo do eixo da câmara, da intensidade turbulenta (figura 3.16). Constatou-se deste perfil que existe um máximo em $z/D = 4$, que representa a coordenada axial a partir do qual o escoamento é do tipo *plug-flow*.

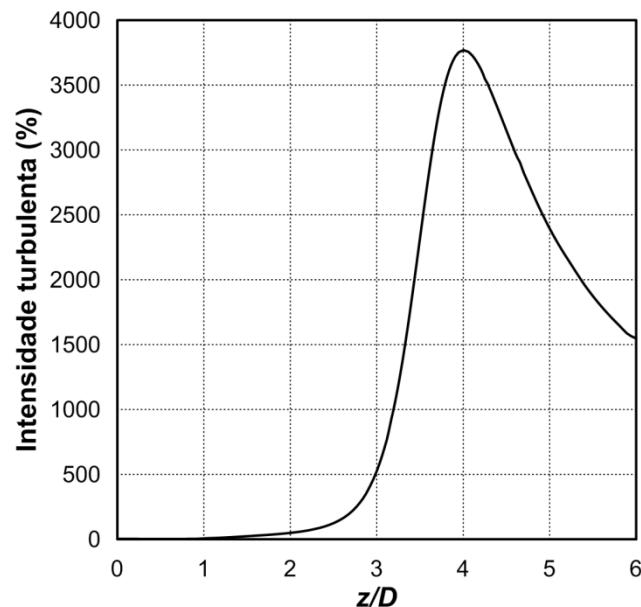


Figura 3.16 – Perfil longitudinal (ao longo do eixo da câmara, $r=0$) da intensidade turbulenta, obtido através de ferramenta numérica. Referenciada à velocidade local.

Outros factores que podem fazer com que a pressão estática medida não seja a correcta, são os seguintes:

- a localização descentrada do orifício em relação ao eixo da sonda;
- a forma e o material da extremidade da sonda podem não ter sido as adequadas.

Aconselha-se a efectuar um estudo numérico com a sonda inserida no escoamento e verificar se é devido aos efeitos intrusivos da sonda. Outra forma de verificar se a sonda de pressão estática está a medir a pressão estática real do escoamento é fazer um ensaio experimental com a sonda colocada num escoamento de características conhecidas e verificar se a pressão estática medida é a correcta.

3.5. Comparação com resultados empíricos e numéricos da literatura.

Através das equações empíricas enunciadas na secção 1.2.2, foi possível obter a localização do nível do PR e do CR, em relação ao queimador. O PR, obtido através da equação 1.6 da página 5 do capítulo 1, está localizado a uma distância do queimador de $z/D=2,93$. Recorrendo à equação 1.8, obteve-se que o nível do CR, isto é, a distância desde o queimador até ao CR, é de $z/D=1,69$.

Na tabela 3.2 apresentam-se os resultados empíricos, numéricos e experimentais, da localização do CR e do PR.

Tabela 3.2 – Apresentação dos resultados obtidos por três vias: empírica, numérica e experimental

Resultados		Centro da ZR		PR ($2r/D=1$)
		z/D	$2r/D$	z/D
El-Mahallawy e Habik (2002)		1,69	n.a.	2,93
Numéricos	k-ε padrão	1,74	0,61	2,79
	Sonda de três orifícios	n.a.	n.a.	3,28
Experimentais	Tubo de Pitot	1,39 ⁽¹⁾	0,57 ⁽¹⁾	3,25
	Filme de óleo	n.a.	n.a.	-

⁽¹⁾ Vaz (2011b).

Constata-se que a localização do PR obtido experimentalmente, através de duas técnicas experimentais, sonda de três orifícios e tubo de Pitot, é próxima uma da outra, com uma diferença de apenas 4,5 mm. Em média, as coordenadas do PR, obtidas experimentalmente, foram: $z/D=3,26 \pm 0,01$ e $2r/D=1$.

A diferença entre as coordenadas do ponto de recolamento obtidas experimentalmente, e as obtidas através das equações empíricas de El-Mahallawy e Habik (2002), foi de

aproximadamente 10%. Já o modelo numérico prevê as coordenadas do ponto de recolamento com uma diferença de 14%, relativamente às obtidas experimentalmente.

Quanto à localização do centro de recirculação, nenhum dos modelos, empírico e numérico, se aproxima das coordenadas obtidas experimentalmente, sendo o maior desvio verificado através do modelo numérico, na ordem dos 25%.

Relativamente à razão de recirculação, e comparando com o valor obtido através da equação 1.10, baseada em resultados numéricos, 1,9, com o obtido experimentalmente, 2,2, verifica-se um desvio de 12,5%, considerando assim uma boa aproximação aos resultados experimentais.

4 Conclusão

O presente estudo experimental teve como objectivo principal a caracterização aerodinâmica de um escoamento não reactivo num modelo laboratorial de câmara de combustão cilíndrica, de forma a validar resultados de estudos numéricos desta instalação.

Inicialmente verificou-se a simetria do escoamento através da medição de dois perfis de pressão total. Subsequentemente, obteve-se a localização do fecho da zona de recirculação, o ponto de recolamento, através de sondas de pressão. Utilizou-se também uma técnica de visualização, na tentativa de obter-se o PR, no entanto não se obteve resultados através da utilização desta técnica. Por fim, realizaram-se dois atravessamentos radiais de pressão total e estática, com o intuito de se obter a razão de recirculação.

De seguida, apresentam-se as principais conclusões desta dissertação, e por fim são dadas sugestões para trabalho futuro.

4.1. Principais conclusões

As principais conclusões dos resultados experimentais apresentados no capítulo 3 são as seguintes:

1. A temperatura do escoamento não influencia significativamente a repetibilidade dos resultados, e foi avaliado através da medição de perfis de pressão total em duas sessões experimentais, onde a temperatura variou 4,4 °C. Observou-se uma diferença relativa entre perfis obtidos de 3,9 %.

Através dos dois perfis de pressão total obtidos, um ao nível do CR e outro a 0,91L do queimador, conclui-se que o escoamento é simétrico em relação ao eixo da câmara. No entanto, constatou-se no perfil radial de pressão total ao nível do CR, um ligeiro desvio, 0,94 mm, relativamente ao eixo da câmara. Este desvio pode advir do posicionamento do tubo de Pitot. Este posicionamento é feito visualmente e pode compreender erros de posição na ordem do milímetro. Face a isto pode considerar-se o escoamento simétrico ao nível do CR. À saída da câmara, obteve-se um perfil tangencial uniforme, que sugere, mais uma vez, que o escoamento se desenvolve ao longo da câmara, mantendo simetria.

Obteve-se a localização do PR a uma distância média do queimador de $z/D=3,26 \pm 0,01$.

Os resultados obtidos com recurso a uma sonda de três orifícios e a um tubo de Pitot, na localização do PR, diferem pouco entre si. A pequena diferença de 4,5 mm na direcção axial é uma medida do erro experimental. Não se explorou a hipótese de a linha de recolamento estar modulada. No entanto o perfil tangencial obtido próximo da saída da câmara, sugere que esta modulação será uma preocupação pequena. As sondas de pressão são intrusivas, mas procurou-se sempre reduzir a perturbação do escoamento, dimensionando e usando correctamente estes instrumentos.

2. A utilização da técnica filme de óleo revelou-se inconclusiva. A escorrência do filme, devido à acção gravítica, sobrepôs-se à acção do escoamento e contribuiu para a não obtenção da localização do PR.

Nesta técnica o filme de óleo deve fluir na direcção do escoamento por acção das forças de corte, o que permitiria identificar o ponto de recolamento, que separa zonas do escoamento com sentido contrário. Contudo, a força gravítica, revelou-se mais importante que as tensões de corte, causando escorrência do filme, no sentido descendente.

Para o tubo posicionado na vertical, não se conseguiu obter uma localização válida do ponto de recolamento com esta técnica. No entanto, espera-se que com a câmara na posição horizontal, que as tensões de corte sejam mais importantes que a componente gravítica, que ainda existirá devido à curvatura do tubo.

A dificuldade de reprodução desta técnica de visualização deveu-se, em parte, à falta de literatura objectiva acerca desta técnica.

3. O valor da razão de recirculação obtido experimentalmente foi de 2,2. Este valor está de acordo com a razão de recirculação obtida através da teoria de Vaz (2011a), 1,9.
4. Comparou-se o perfil radial de pressão estática obtido experimentalmente com o perfil obtido através de ferramenta numérica, e constatou-se que estes diferiam. A localização incorrecta dos orifícios da tomada de pressão estática pode ter sido uma das razões para o sucedido. Verificou-se também, através da ferramenta numérica, que a intensidade turbulenta na região onde a sonda de pressão estática foi utilizada, tinha um elevado valor, podendo deturpar as medições efectuadas com esta, visto que a sonda de pressão estática é sensível à intensidade turbulenta.
5. Através de ferramenta numérica, obteve-se desvios em relação à localização do CR e PR obtidos pela via experimental, na ordem dos 15 a 20%. Conclui-se que o modelo de turbulência utilizado por Vaz, $k-\varepsilon$ padrão, não prevê com exactidão a localização do PR e do CR.

4.2. Sugestões para trabalho futuro

No decorrer da presente tese, identificaram-se alguns aspectos que poderão ser considerados em futuras investigações de forma a melhorar a compreensão dos fenómenos associados aos jactos turbulentos confinados em câmaras fechadas. Destacam-se as seguintes:

1. Efectuar a calibração da sonda de pressão estática, de forma a averiguar se a pressão estática lida por esta, é a pressão real do escoamento.

2. Medição experimental da intensidade turbulenta de forma a verificar quais os valores envolvidos nas zonas onde são utilizadas as sondas de pressão.
3. Utilização da técnica de filme de óleo, com a instalação na configuração horizontal, de forma a se obter a localização do PR. Nesta configuração, os efeitos da gravidade sobre o filme seriam inferiores, não ocorrendo assim a escorrência do filme. Nesta configuração seria também interessante utilizar a técnica dos pontos de óleo e a técnica dos tufos, de forma a inferir sobre a localização do PR. A utilização destas técnicas de visualização poderá ser uma mais-valia, pois irá reforçar os resultados obtidos pelas sondas de pressão.
4. Ajustar o modelo numérico de forma a prever melhor a localização do CR. Seria interessante utilizar modelos numéricos mais evoluídos do que os de duas equações, para esta configuração de queimador, de forma a comparar os resultados obtidos entre eles e os resultados experimentais.

Bibliografia

- Abramovich, G. N. (1963) *The Theory of Turbulent Jets*, The MIT Press.
- Benedict, R. P. (1984) *Fundamentals of temperature, pressure, and flow measurements*, Wiley.
- Beér, J. M. e Chigier, N. A. (1972) *Combustion Aerodynamics*, London: Applied Science Publishers Ltd.
- Blackmore, P. A. (1987) 'A static pressure probe for use in turbulent three-dimensional flows', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 25(2), 207-218.
- Bradshaw, P. (1970) *Experimental fluid mechanics*, Pergamon Press.
- Bryer, D. W. e Pankhurst, R. C. (1971) *Pressure-probe methods for determining wind speed and flow direction*, National Physical Laboratory, London: Her Majesty's Stationery Office.
- Cho, S. H. e Becker, H. A. (1985) 'Response of static pressure probes in turbulent streams', *Experiments in Fluids*, 3(2), 93-102.
- Craya, A. e Curtet, R. (1955) 'Sur l'évolution d'un jet en espace confiné', *C. R. Acad. Sci., Paris*, 241, 621-622.
- Curtet, R. (1958) 'Confined jets and recirculation phenomena with cold air', *Combustion and Flame*, 2(4), 383-411.
- Davies, P. O. A. L. (1958) 'The behaviour of a Pitot tube in transverse shear', *Journal of Fluid Mechanics*, 3(05), 441-456.
- Durst, F. (2008) *Fluid Mechanics*, Springer Berlin Heidelberg.
- Díaz, A. K., Oro, F. J., Marigorta, B. E. e Perotti, B. R. (2010) 'Head geometry effects on pneumatic three-hole pressure probes for wide angular range', *Flow Measurement and Instrumentation*, 21(3), 330-339.
- El-Mahallawy, F. e Habik, S. E. (2002) *Fundamentals and Technology of Combustion*, ELSEVIER.
- EPA, U. (1998) *How nitrogen oxides affect the way we live and breathe*,
- Hall, L. M. (1956) 'The displacement effect of a sphere in a two-dimensional shear flow', *Journal of Fluid Mechanics*, 1, 142-162.
- Havermann, M., Haertig, J., Rey, C. e George, A. (2002) 'Application of Particle Image Velocimetry to High-Speed Supersonic Flows in a Shock Tunnel', Comunicação na ISL, ed. *11th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisboa, Portugal.
- Hughes, A. C. 'Falcon AGM-76A Missile', [disponível em linha], em: <http://airandspace.si.edu/collections/artifact.cfm?id=A19700276000> [visitado em Julho de 2012].
- Langston, L. S. e Boyle, M. T. (1982) 'A New surface-streamline flow-visualization technique', *Journal of Fluid Mechanics*, 125(DEC), 53-&.

- MacMillan, F. A. (1956) 'Experiments on Pitot-tubes in shear flow', *Ministry of Supply, Aero. Res. Counc. R. & M. No. 3028*.
- Maltby, R. L. (1962) *Flow visualization in wind tunnels using indicators, Agardograph 70*, Paris: N.A.T.O. Adv. Group for Aeronaut. Res & Dev.
- Merzkirch, W. (1987) *Flow Visualization*, Academic Press.
- Pope, A. e Rae, W. H. (1984) *Low-speed wind tunnel testing*, Wiley.
- Pope, S. B. (2000) *Turbulent Flows*, Cornell University, New York: Cambridge University Press.
- Rajaratnam, N. (1976) *Turbulent Jets*, Elsevier Scientific Publishing Company.
- Raju, K. G., Porey, P. D. e Asawa, G. L. (1997) 'Displacement effect in Pitot tube measurements in shear flows', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 66(2), 95-105.
- Razinsky, E. e Brighton, J. A. (1971) 'Confined jet mixing for non-separating conditions', *ASME Journal of Basic Engineering*, 93(3), 333-47.
- Rebola, A. (2010) 'Investigação Experimental e Computacional de uma Câmara de Combustão Laboratorial Operando no Regime de Combustão sem Chama Visível', Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Sami, S. (1968) 'The Pitot tube in turbulent shear flow', in *Proc. 11th Midwestern Mechanics Conf.*, Development in Mechanics, 191-200.
- Squire, L. C. (1961) 'The motion of a thin oil sheet under the steady boundary layer on a body', *Journal of Fluid Mechanics*, 11(02), 161-179.
- Tavoularis, S. (2005) *Measurement in Fluid Mechanics*, Cambridge University Press.
- Tavoularis, S. e Szymczak, M. (1989) 'Displacement effect of square-ended pitot tubes in shear flows', *Experiments in Fluids*, 7(1), 33-37.
- Tropea, C., Yarin, A. L. e Foss, J. F. (2007) *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*, Springer Berlin Heidelberg.
- Vaz, D. C. (1997) *Reburning-Jets Mixing in a Cold Model of a Utility Boiler - Final Report*, Ijmuiden: IFRF – International Flame Research Foundation.
- Vaz, D. C. (2007) *Towards the Application of Flameless Combustion to Micro Gas Turbines*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal
- Vaz, D. C. (2011a) 'Relations between global recirculation ratio and area ratio in combustors fired with jets', *Heat Processing*, 9(3), 253-255.
- Vaz, D. C. (2011b) 'Técnicas Numéricas e Experimentais Avançadas para a Análise de Fenómenos de Combustão sem Chama Visível', ref. PTDC/EME-MFE/102997/2008, Comunicação na 3ª Reunião de Progresso de Projecto, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.
- Vaz, D. C. (2012) 'The effect of combustor-to-nozzles area ratio on recirculation in combustors fired with jets', Comunicação no 3rd TU Delft Gas Turbine Symposium, Delft University of Technology, The Netherlands.

Veríssimo, A. (2011) 'Estudo Experimental de uma Câmara de Combustão Operando no Regime de Combustão sem Chama Visível', Tese de Doutoramento. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal

Willinger, R. e Haselbacher, H. (2003) 'A Three-Hole Pressure Probe Exposed to Velocity Gradient Effects - Experimental Calibration and Numerical Investigation', in *Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'03) The 12th International Conference on Fluid Flow Technologies*, Budapest, Hungary.

Wysocki, M. e Drobniak, S. (2001) 'A comparative analysis of correction method for total-head probes in large velocity-gradient flows', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89(1), 31-43.

Xavier, M. (2011) *Caracterização Experimental da Aerodinâmica Interior de Um Modelo Laboratorial de Câmara de Combustão*, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal.

Young, A. D. e Maas, J. N. (1937) *The Behaviour of a Pitot Tube in a Transverse Total-pressure Gradient*, 1770 ed., H.M. Stationery Office.

Anexo A: Erro de ângulo do escoamento na sonda de três orifícios

De forma a obter-se o erro de ângulo do escoamento na sonda de três orifícios, através da equação 1.18 da página 15 do capítulo 1, induzido pelo gradiente de velocidades, deve-se em primeiro lugar obter o gradiente de velocidades na isolinha de componente axial da velocidade nula. Como não foi possível obter o gradiente de velocidades experimentalmente, utilizou-se uma ferramenta numérica. As condições dos ensaios numéricos são: escoamento não reactivo; câmara com um comprimento $L/D = 4$; jacto axissimétrico; modelo de turbulência $k-\varepsilon$ renormalizado e gama de velocidades idêntica à encontrada na instalação experimental deste trabalho.

Obtiveram-se as coordenadas r e z , desde o centro de recirculação até à parede da câmara, para o caso onde a velocidade axial é nula, isto é, as coordenadas da isolinha. Além das coordenadas r e z dos pontos, obteve-se também a velocidade radial em cada um dos destes. Obtiveram-se 538 pontos não repetidos. Na figura A.1 representam-se graficamente os pontos obtidos através de ferramenta numérica.

Constatou-se, observando a distribuição dos pontos da figura A.1, que a função que melhor se ajusta é composta por duas assíntotas. Para o presente caso a função com duas assíntotas, é dada por:

$$(z - n.r - a)(z + m.r - b) = c \quad (\text{A.1})$$

ou na forma de $z = f(r)$ (Vaz 1997):

$$z = \frac{(n-m)r}{2} + \frac{b+a}{2} + \sqrt{\frac{[(m-n)r - b - a]^2}{4} + (n.r + a)(m.r - b) + c} \quad (\text{A.2})$$

que é equivalente a:

$$z = \frac{e.r + f}{2} + \sqrt{\frac{(g + h.r)^2 + i}{4}} \quad (\text{A.3})$$

Os coeficientes da equação que se ajusta ao conjunto de pontos obtidos são dados pela tabela A.1.

Tabela A.1 – Valores dos coeficientes da equação A.3.

Coeficientes	Valores correspondentes aos coeficientes
e	0,99
f	-0,297
g	0,369
h	-0,93
i	6×10^{-4}

Na figura A.1, representou-se a curva descrita pela equação A.3 a de cor azul, que se ajusta aos pontos obtidos através de ferramenta numérica.

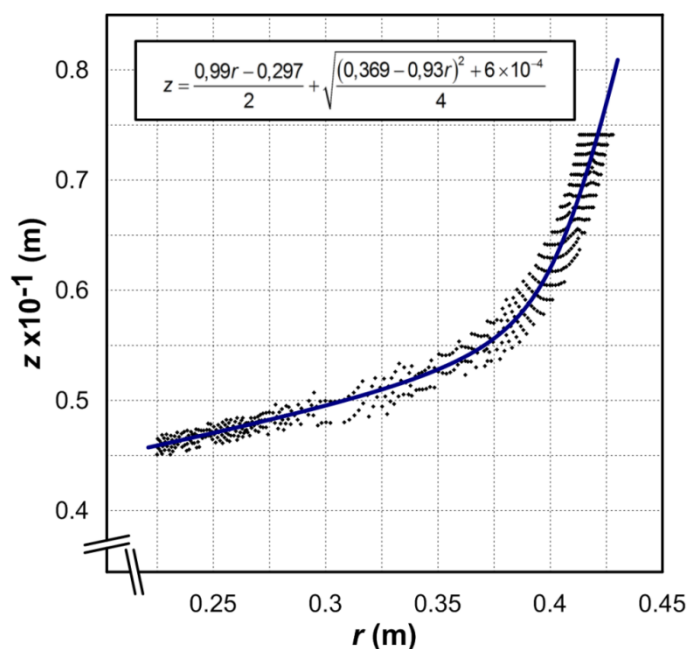


Figura A.1 – Coordenadas dos pontos de velocidade axial nula.

Com o intuito de obter-se a distribuição de velocidades na isolinha, colocaram-se os pontos em cima da curva atrás determinada. Para este processo, queria-se que os pontos fossem transportados para cima da curva percorrendo a menor distância possível. Para isso, começou-se por calcular a distância mínima entre cada ponto e a curva, recorrendo à definição de distância Euclidiana. Sendo r_0 e z_0 as coordenadas dos 538 pontos que estão a uma distância ξ , da curva $z = f(r)$, a equação que traduz a distância é dada por:

$$\xi = \sqrt{(r - r_0)^2 + (f(r) - z_0)^2} \quad (\text{A.4})$$

Por forma a obter-se as coordenadas dos pontos em cima da curva, minimizou-se a distância, $d\xi/dr = 0$, e obtiveram-se os pontos da função que estavam à distância mínima relativamente aos pontos r_0 e z_0 . Na figura A.2 representa-se a vermelho, os pontos colocados em cima da curva.

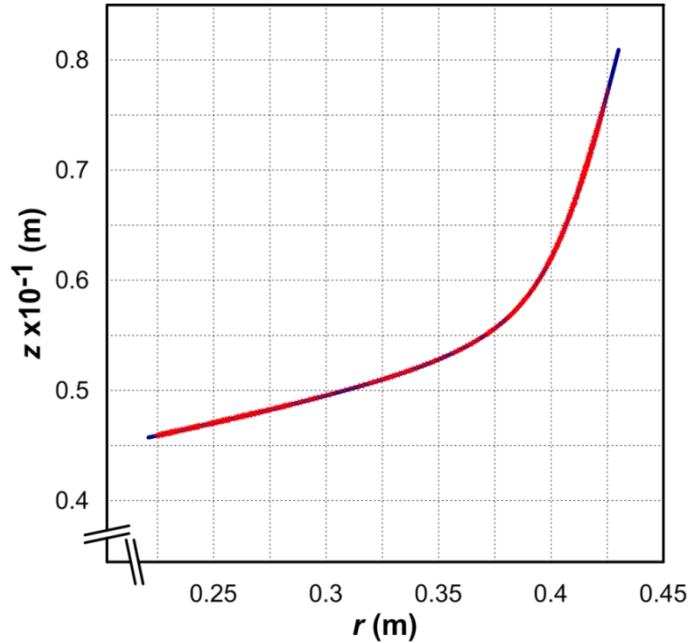


Figura A.2 – Coordenadas dos pontos de velocidade axial nula, em cima da função que descreve a isolinha de pressões.

De forma a obter-se o perfil de velocidades, determinou-se a coordenada s . Para isso, calculou-se o comprimento entre o centro de recirculação, até aos 537 pontos, isto é, o comprimento de cada troço da curva, compreendido entre o centro de recirculação e os pontos colocados em cima da curva. Para determinar o comprimento de cada troço da curva, recorreu-se à definição de comprimento de arco. Seja s , o comprimento de cada troço da curva, compreendido por dois pontos consecutivos, demonstra-se pelo teorema de Pitágoras, que para distâncias infinitesimais vem:

$$ds^2 = dr^2 + dz^2 \Rightarrow \frac{ds^2}{dr^2} = 1 + \frac{dz^2}{dr^2} \Rightarrow ds = \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dr}\right)^2} dr \quad (A.5)$$

Integrando, obteve-se o comprimento entre o CR e os pontos em cima da curva, entre o ponto $r = r_{CR}$ e $r = r_n$:

$$s = \int_{r_{CR}}^{r_n} \sqrt{1 + [f'(r)]^2} dr \quad (A.6)$$

Aos pontos da distância s , fez-se corresponder a velocidade radial obtida através de ferramenta numérica. Na A.3 representam-se os pontos obtidos e o perfil de velocidades radiais, V_r , em função da distância, s .

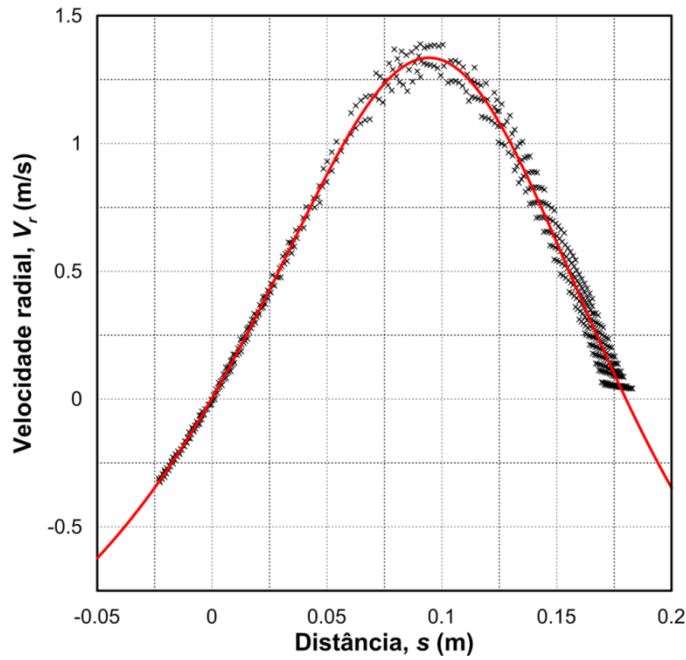


Figura A.3 – Perfil de velocidade radial em função da coordenada distância, ao longo da isolinha de velocidades axiais nula.

Através do ajuste aos pontos obtidos, obteve-se a equação do perfil radial de velocidades, que se representa na figura A.3 a vermelho:

$$V_r(s) = \frac{-1,836(s^2 - 0,180s - 4,644 \times 10^{-5})}{s^2 - 0,200s + 0,021} \text{ (m/s)} \quad (\text{A.7})$$

Integrando o perfil de derivando o perfil de velocidade em ordem à coordenada s , obteve-se o gradiente de velocidades dado por:

$$\frac{dV_r}{ds} = \frac{0,039(s^2 - 2,016s + 0,181)}{(s^2 - 0,201s + 0,02)^2} \text{ (m/s}^2\text{)} \quad (\text{A.8})$$

que se apresenta no gráfico da figura A.3.

Através da equação A.9 (Willinger e Haselbacher 2003), obtém-se o erro de ângulo do escoamento, induzido pelo gradiente de velocidade, através de:

$$\Delta\varepsilon = K \frac{45^\circ}{\pi} \text{tg}(\theta) \quad (\text{A.9})$$

onde K é o gradiente de velocidades adimensionalizado, dado por:

$$K = \frac{dV_r(s)}{ds} \frac{2a}{V_r(s)} \quad (\text{A.10})$$

Na equação do gradiente de velocidades adimensionalizado, K , a constante a é a distância compreendida entre os eixos dos orifícios laterais da sonda, que no caso da sonda de três orifícios construída para esta tese, tem um valor de $2,68 \times 10^{-3}$ m.

Aplicando a equação A.9, obtém-se em função da coordenada s , o erro de ângulo do escoamento, sentido pela sonda de três orifícios, como se representa no gráfico da figura A.5.

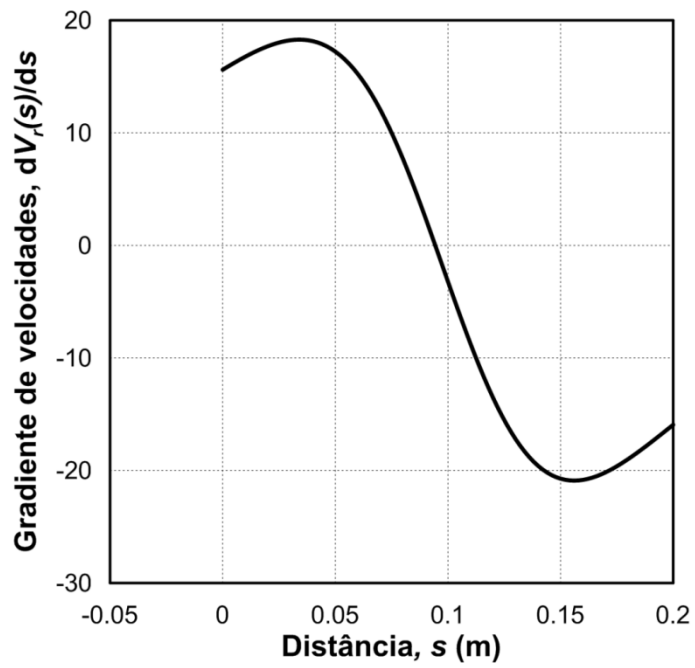


Figura A.4 – Representação do gradiente de velocidades.

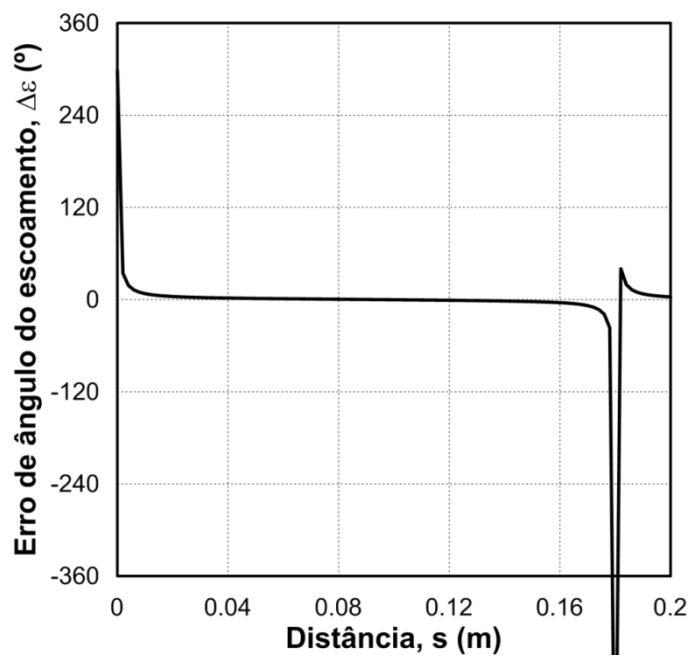


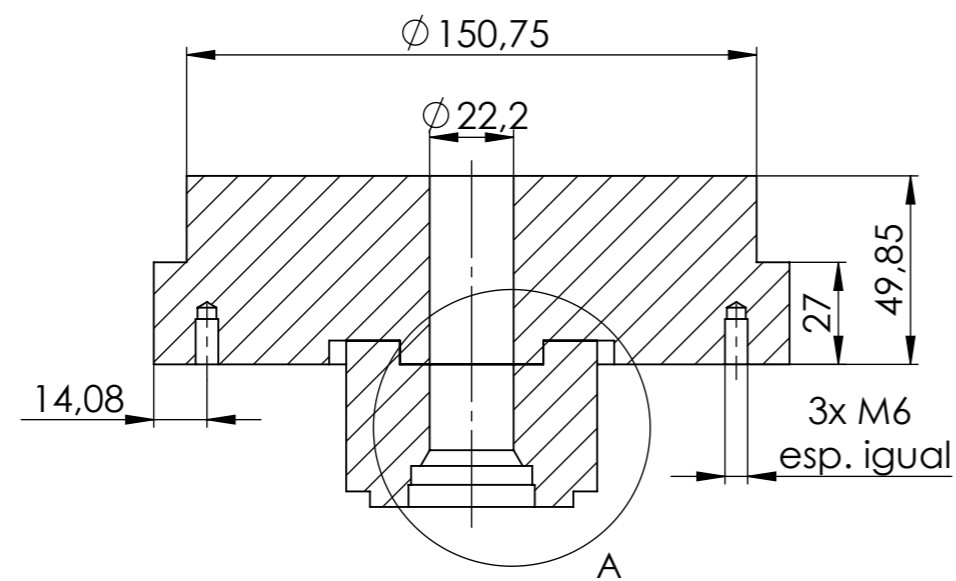
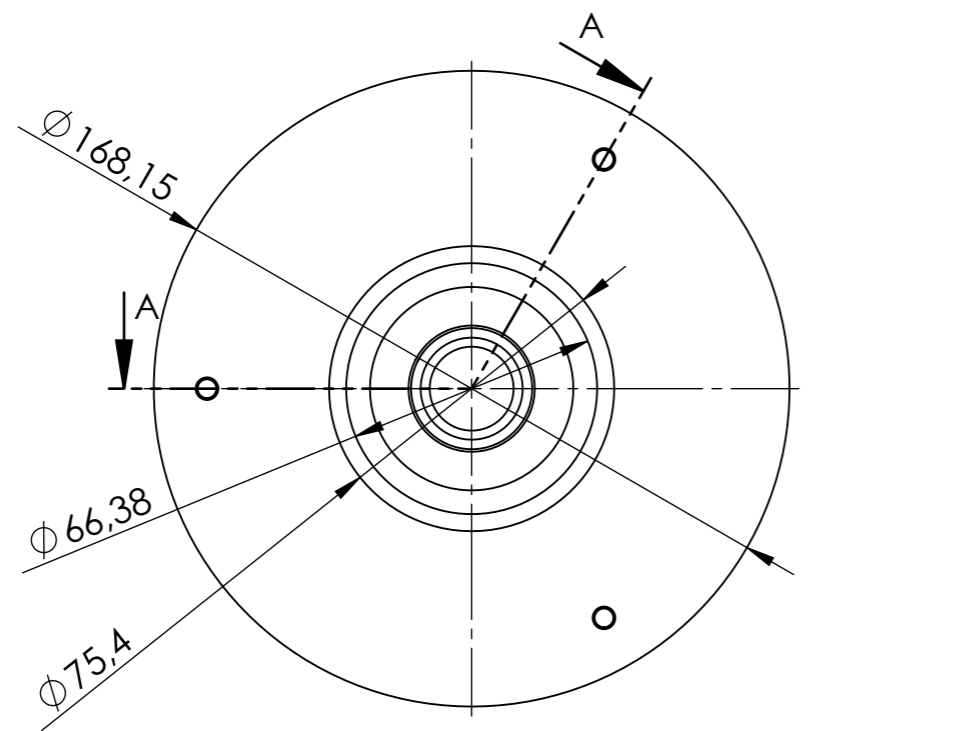
Figura A.5 – Erro de ângulo do escoamento em função distância s .

Anexo B: Desenhos Técnicos

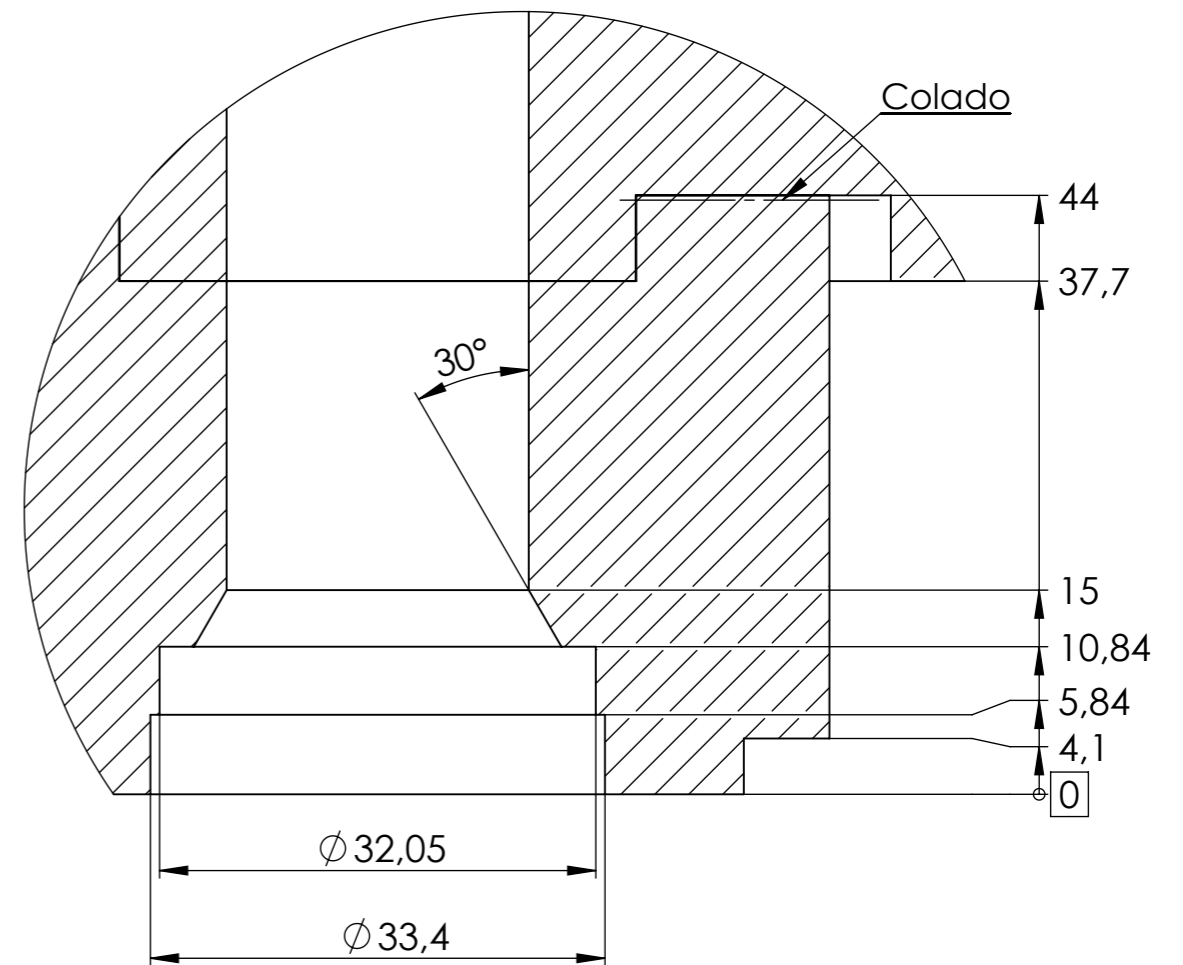
Este anexo contém os desenhos técnicos do queimador, da sonda de três orifícios e da sonda de pressão estática. Contém também a transparência utilizada para o alinhamento das sondas.

Tabela B.1 – Lista de desenhos técnicos.

Desenhos técnicos	Página
Modelo de queimador	70
Sonda de três orifícios	71
Sonda de pressão estática	72
Transparência para alinhamento de sondas	73

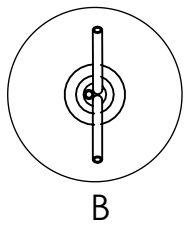


Corte A-A

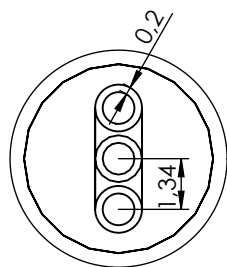
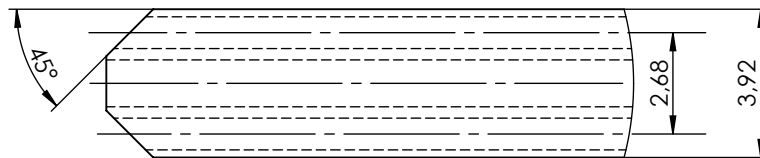
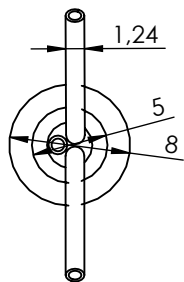
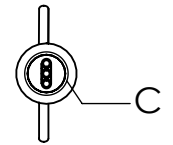
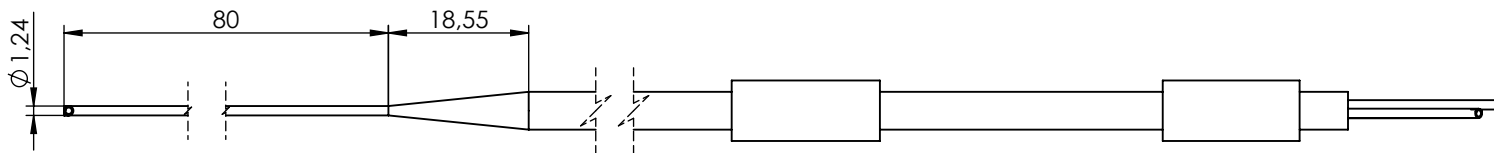
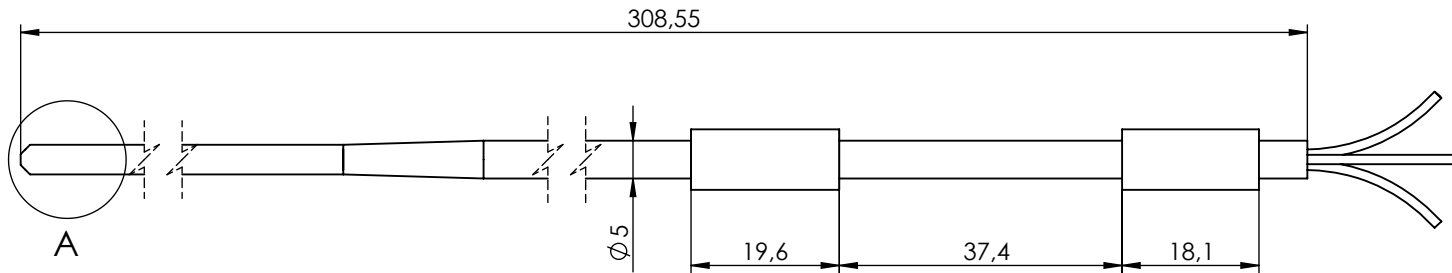


Pormenor A
Escala 2:1

Proj.	1/12/2010	D. Vaz			FCT/UNL
Des.	20/09/2012	J. Alves			
Copiado	-				
Verificada	Out. 2012	D. Vaz			NMFTA/DEMI
Escala	1:2		<i>Modelo de queimador</i>		
	2:1				
Toleran.	-				



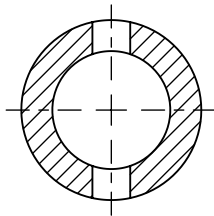
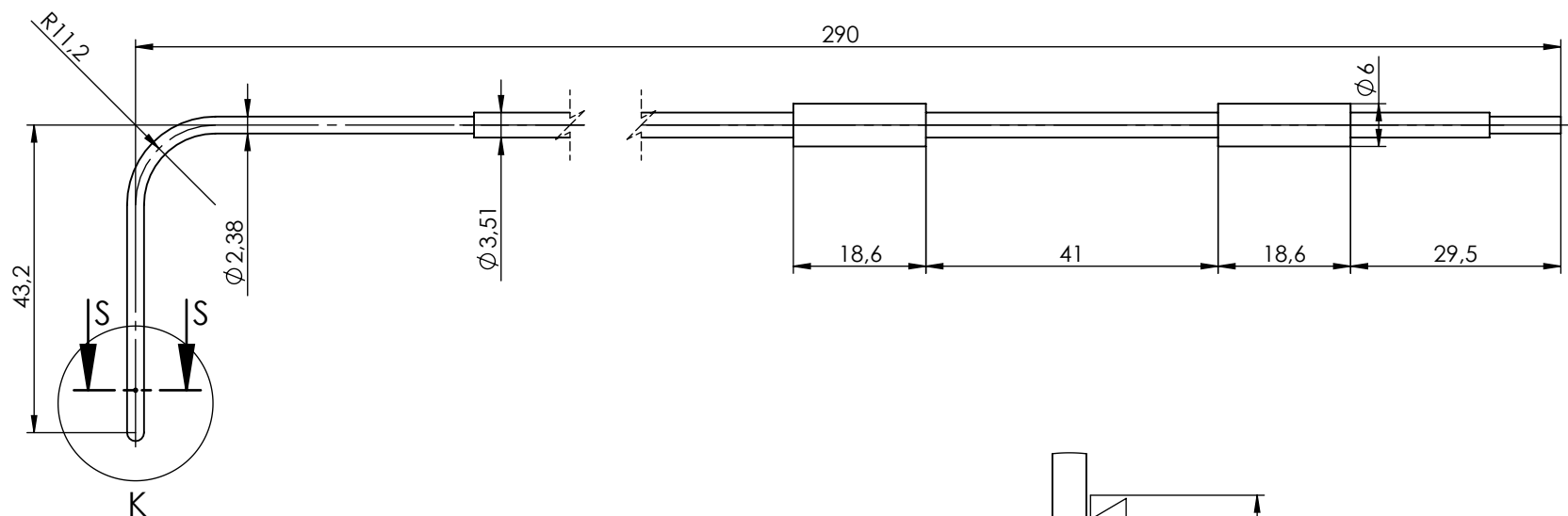
Pormenor B
Escala 2 : 1



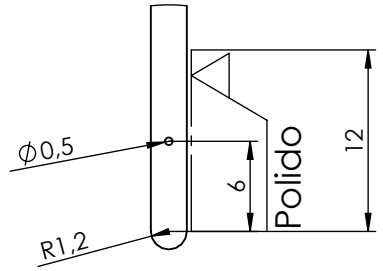
Pormenor C
Escala 5 : 1

Pormenor A
Escala 5 : 1

Proj.	29/12/2011	D. Vaz	<i>Sonda de três orifícios</i>				FCT/UNL	
Des.	24/01/2012	J. Alves					NMFTA/DEMI	
Copiada	-							
Verificada	Set. 2012	D. Vaz						
Escala	1:1 2:1 5:1							
Toleran.	-							

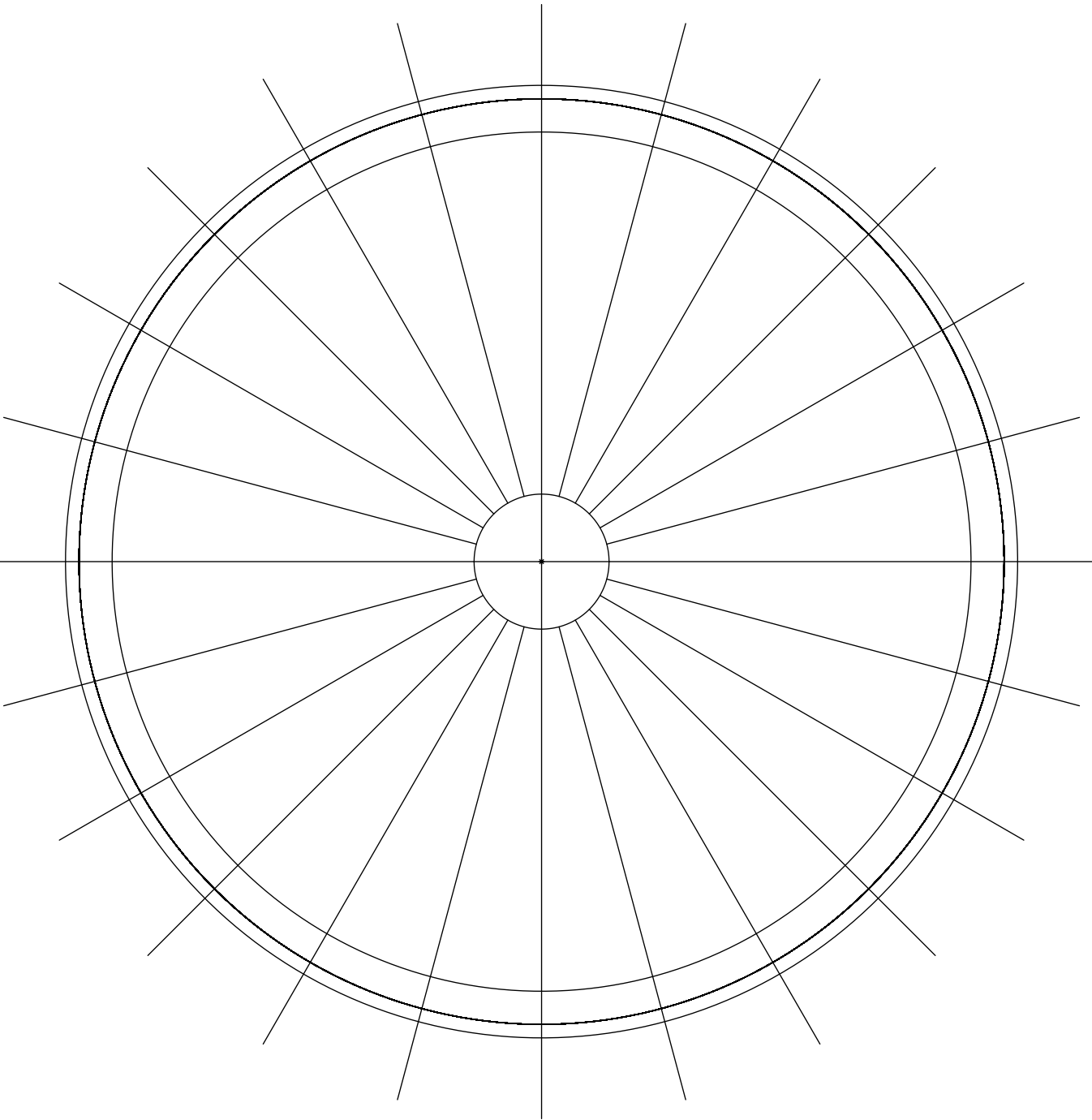


Corte S-S
Escala 10 : 1



Pormenor K
Escala 2:1

Proj.	10/07/2012	J. Alves					FCT/UNL	
Des.	20/09/2012	J. Alves						
Copiado	-							
Verificada	Set. 2012	D. Vaz					NMFTA/DEMI	
Escala	1:1 2:1 10:1		Sonda de pressão estática					
Toleran.	-							



Proj.	11/04/2012	D. Vaz			FCT/UNL																												
Des.	12/04/2012	J. Alves																															
Copiado	-																																
Verificado	Set. 2012	D. Vaz			NMFTA/DEMI																												
Escala	<i>Transparência para alinhamento de sondas</i>				<table border="1" style="width: 100%; height: 100%;"> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>																												
1:1																																	
Toleran.	-																																
-																																	