

2

Considerações teóricas e revisão bibliográfica

Neste capítulo são inicialmente apresentados um breve resumo do estudo para a análise experimental dos jatos livres turbulentos. Em seguida, é apresentada uma revisão da literatura de referência relativa ao desenvolvimento do estudo experimental e numérico do queimador tipo obstáculo, no caso de escoamentos quimicamente inertes e reativos.

2.1

Estudo dos escoamentos de jato livre

Os escoamentos livres cisalhantes mais comumente estudados são os jatos. Assim, por livre, entende-se que o fluido escoar sem perturbação nem confinamento de paredes e que a única fonte de turbulência provém do gradiente de velocidade [21]. Exemplos de experimentos de jato livre são mostrados na **Figura 2.1**, onde se apresentam imagens em corte de jatos turbulentos saídos de um tubo, correspondentes a dois números de Reynolds diferentes. Nesta figura percebe-se que a distribuição da concentração da estrutura é irregular, e abrange uma ampla faixa de escalas de comprimento.

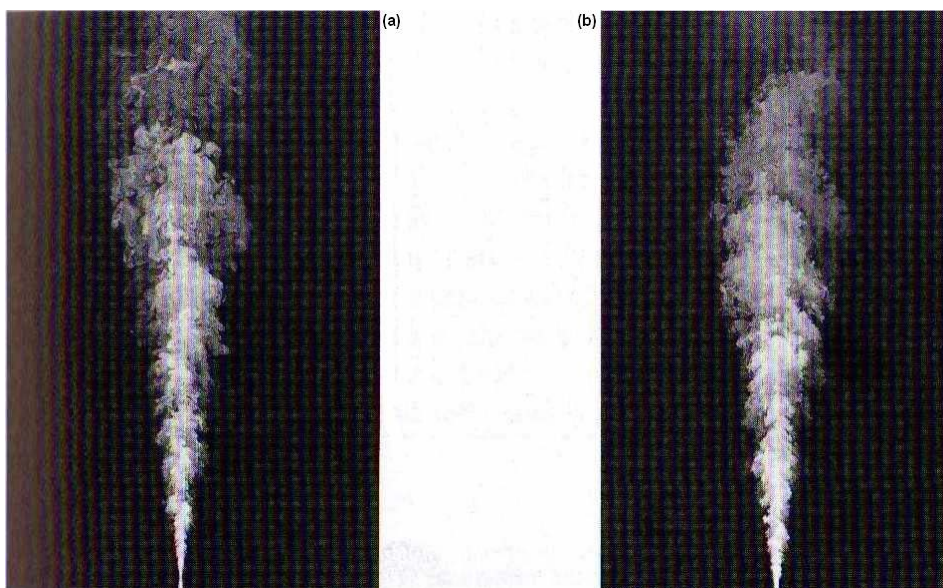


Figura 2.1 - Imagens de concentração de um jato turbulento: (a) $Re=5000$ e (b) $Re=2000$, usando a técnica de dispersão de Mie [21].

Nas figuras anteriores pode ser observado como a propagação do jato lançado livremente num espaço, após de deixar o tubo, produz uma mistura com o ar em repouso da vizinhança do jato, sofrendo a ação das forças de atrito entre ele próprio e o fluido que o circunda. A largura desta região inicial de mistura cresce continuamente, e a velocidade longitudinal do jato na linha de centro não é afetada pela mistura, sendo praticamente igual à velocidade de saída do jato no centro. Esta zona de desenvolvimento inicial do jato é denominada núcleo potencial. Após esta região, o espalhamento radial do fluido é maior e a velocidade longitudinal do jato cai fortemente conforme aumenta sua distância do orifício. Isto ocorre devido ao aumento da transferência de quantidade de movimento com o fluido que é posto em movimento. A pressão permanece praticamente constante no jato e no meio circundante [21].

As regiões de mistura existentes nos jatos livres turbulentos produzem o denominado comprimento de mistura turbulenta, L , dentro do jato. A teoria de Prandtl [21] admite que uma partícula de fluido se desloca de uma distância L antes que sua quantidade de movimento seja alterada. A distância L é considerada proporcional à largura radial do jato b , como mostrado na **Figura 2.2**.

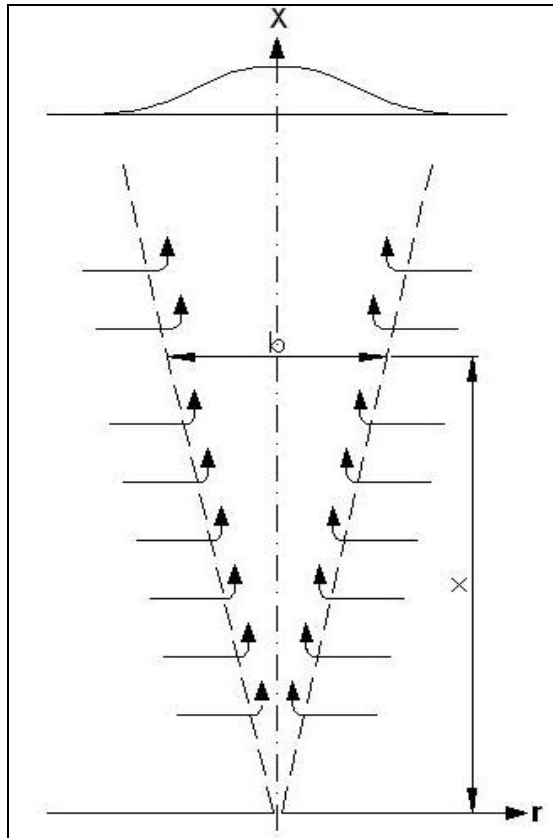


Figura 2.2 – Jato livre axi-simétrico se propagando num meio constituído pelo mesmo fluido produzindo o efeito “entrainment”.

Segundo Schlichting [21], e observando-se a **Figura 2.2**, a velocidade máxima no eixo longitudinal “X” varia com o inverso da distância longitudinal “x” ao longo do jato. Além disto, a largura, b , varia linearmente com a distância longitudinal. Isto ocorre devido às forças de cisalhamento turbulento, que reduzem a velocidade longitudinal do centro do jato, agindo desta forma também no sentido de aumentar a velocidade nas partes externas ao jato. Assim se produz o processo de “entrainment”, ou arrasto do ar parado da vizinhança para dentro do jato.

Outro estudo experimental importante em jatos livres turbulentos é o trabalho feito por Hussein et al. [11], onde foi caracterizado, por medições LDV, um escoamento quimicamente inerte que flui através de um bocal de saída circular com diâmetro de 25,4 mm para um ambiente infinito constituído pelo mesmo fluido, que é estacionário. Foi mostrado que, assumindo condições de jato livre axi-simétrico e estatisticamente permanente, o estudo experimental tornou-se simplificado para elevados números de Reynolds. Após o desenvolvimento inicial, encontra-se uma região onde a velocidade média cai fortemente, sendo observada uma distribuição transversal da velocidade de forma alargada, que se reproduz de forma auto-similar.

Deste estudo experimental [11], assumindo-se condições para um jato livre ingressando num ambiente infinito, o fluido pode ser completamente definido por U_j , D_j e ν , sendo estes a velocidade média de saída, o diâmetro de saída e a viscosidade cinemática do jato, respectivamente. Assim, o único parâmetro adimensional é o numero de Reynolds, definido por $Re = U_j D_j / \nu$. A seguir é apresentado um breve resumo onde é justificada a recomendação de utilizar variáveis normalizadas de posição e de velocidade para uma melhor caracterização dos jatos circulares livres [21, 28].

2.2

Revisão bibliográfica

Nesta seção são discutidas as principais referências da literatura disponível que constituíram um aporte importante para a elaboração do presente trabalho experimental. Em particular, são apresentados os trabalhos que motivaram o desenvolvimento e a construção da instalação experimental e os que trazem uma

descrição da estrutura do escoamento turbulento sobre a face do queimador. Note-se que alguns autores foram além da apresentação dos resultados experimentais e complementam seus estudos com a modelagem computacional.

A maioria dos trabalhos experimentais encontrados é focada na análise do comportamento da estrutura na zona de estagnação, onde ocorre a recirculação dos gases, e do núcleo potencial. São quantificados os efeitos da combustão sobre o escoamento e as propriedades de turbulência. Os estudos da estrutura de chamas turbulentas não pré-misturadas utilizam na sua maioria, técnicas de medição laser que permitem descrever o comportamento do escoamento, seja ele quimicamente inerte ou reativo. Em particular, estas técnicas permitem obter medidas de campo de velocidade média e flutuante e de escalares reativos.

Nestes trabalhos são estudados a influência sobre a estrutura do escoamento turbulento de diversos parâmetros, tais como:

- a) Número de Reynolds,
- b) Composição do jato de combustível,
- c) Propriedades termo-físicas,
- d) Intensidade de turbulência no jato.

O desenvolvimento cronológico dos principais trabalhos feitos sobre escoamentos turbulentos em queimadores tipo obstáculo é apresentado na **Tabela 2.1**. Nesta tabela as principais referências bibliográficas são classificadas segundo os principais parâmetros característicos do escoamento; tais como o tipo de fluido usado na experiência (expresso em porcentagem de volume segundo sua composição no escoamento para o queimador); a configuração geométrica, representada pela razão dos diâmetros de saída do jato central (D_j) e do queimador tipo obstáculo (D_B); a dinâmica do escoamento gerado dada pela razão da velocidade média de saída do jato central (U_j) e do ar anular (U_a); o número de Reynolds baseado no diâmetro, velocidade média e viscosidade cinemática (ν) do jato central de saída e, por último, a técnica de medição laser ou método de visualização usado.

Tabela 2.1: Tabela cronológica de referências bibliográficas dos principais estudos desenvolvidos sobre escoamentos turbulentos em queimadores tipo obstáculo.

Estudo	Jato Central (%Volume)	D _j / D _B (mm / mm)	U _j / U _a (m·s ⁻¹ / m·s ⁻¹)	Re _j	Medidas	Métodos de Medição
[26] Schefer, Namazian e Kelly (1987)	CH ₄	5,4 / 50	21 / 25	7000	Médias e Flutuações r.m.s. de Velocidade.	L.D.V.
[27] Schefer, Namazian e Kelly (1989)	CH ₄	5,4 / 50	21 / 25	7000	Médias e Flutuações r.m.s. de Espécie CH ₄	Raman Scattering Imaging System
[7] Chen, Driscoll, Kelly, Namazian e Schefer (1990)	CH ₄	5,4 / 50	21 / 25	7000	Médias e Flutuações r.m.s. de Velocidade.	LDV
[8] Correa e Gulati (1992)	27,5%CO / 32,3%H ₂ / 40,2%N ₂	3,18/38,1	80 / 6,5	---	Médias e Flutuações de Densidade, Temperatura, Espécies Majoritárias.	Raman Scattering Imaging System
[15] Masri, Dibble e Barlow (1992)	CH ₃ OH	4,6 / 60	82 / 20	31100	Médias de Temperatura, Espécies Majoritárias.	Raman – Rayleigh Scattering Imaging System
			99 / 20	37600		
			106 / 20	40300		
			113 / 20	43000		
	CH ₄	1,6 / 60	124 / 20	11700		
			143 / 20	13500		
			155 / 20	14700		
[16] Masri, Dally, Barlow e Carter (1994)	50%CH ₄ / 50%CO	2 / 50	97,6 / 25	12156	Médias e Flutuações r.m.s. de Temperatura, Espécies.	Raman Scattering Imaging System
	66,7%CH ₄ / 33,3%H ₂		167,1 / 25	15183		
[9] Dally, Masri, Barlow, Fiechtner e Fletcher (1996)	CH ₃ OH	3,6 / 50	80 / 40	23700	Médias de Temperatura, Espécies Majoritárias e Minoritárias.	Raman – Rayleigh – L.I.F. Scattering Imaging System
			121 / 40	35900		
	66,7%H ₂ / 33,3%CO		134 / 40	17500		
			321 / 40	41990		
	50%CH ₄ / 50%H ₂		118 / 40	15800		
			178 / 40	23900		
			214 / 40	28700		
[17] Masri, Dibble e Barlow (1996)	Vários	Vários	Vários	Vários	Médias e Flutuações de Velocidade, Temperatura, Espécies Majoritárias.	Raman-Rayleigh-L.I.F. Scattering Imaging System
[10] Dally, Masri, Barlow e Fiechtner (1998)	CH ₃ OH	3,6 / 50	80 / 40	23700	Médias e Flutuações r.m.s. de Temperatura, Espécies Majoritárias e Minoritárias.	Raman – Rayleigh – L.I.F. Scattering Imaging System
			121 / 40	35900		
			134 / 40	39700		
	66,7%H ₂ / 33,3%CO		134 / 40	17500		
			321 / 40	41990		
			536 / 40	70120		
	50%CH ₄ / 50%H ₂		118 / 40	15800		
			178 / 40	23900		
			214 / 40	28700		

O início do desenvolvimento destes estudos sobre a estabilização de chamas em queimadores tipo obstáculo pode ser atribuído cronologicamente ao trabalho de Roquemoire et al. [25]. Neste estudo primeiramente foram realizados testes experimentais com combustível (gás propano) no jato central; utilizando como técnica de visualização a dispersão de Mie com partículas de TiO_2 . Foram obtidas imagens das chamas por fotografia convencional dos regimes de operação em combustão realizando o mapeamento da estrutura do escoamento.

Determinou-se assim, os pontos de estabilidade do escoamento reativo e a eficiência do queimador, observando-se igualmente as formas das chamas e as tendências que dão origem à formação de fuligem. Baseado nos testes visuais dos regimes de operação do queimador, foi proposta a categorização das chamas em dominadas pelo jato central ou pelo ar anular. A diferença essencial entre as duas categorias está relacionada a mudanças na estrutura numa zona a jusante da face do queimador, denominada região de recirculação devido à formação, principalmente, de dois vórtices de diferentes comprimentos, os quais são influenciados pelas velocidades dos dois escoamentos. Depois de caracterizar a estrutura da chama pelas condições de operação estes autores realizaram medições LDV para localizar os pontos de estagnação característicos da zona de recirculação. Do estudo experimental concluiu-se que o comportamento médio da estrutura dos escoamentos com obstáculo é instável e que os processos de chama são significativamente influenciados pelas componentes temporais do escoamento.

Schefer et al. [26] apresentam um estudo das chamas estabilizadas por um obstáculo. Baseado no trabalho de Roquemoire et al. [25] e nas condições de operação dadas na **Tabela 2.1**, foram feitas medições não intrusivas, usando um sistema laser LDV, obtendo os três componentes da velocidade média, flutuações e suas correlações estatísticas. Os escoamentos inerte e reativo foram caracterizados, mostrando o predomínio do escoamento reverso da corrente de ar anular. Neste caso, dois pontos de estagnação existem ao longo da linha de centro, os quais são influenciados pelo jato central do combustível e pelo ar anular. Uma conclusão obtida foi que, em presença de combustão, a penetração do jato de combustível aumenta na região da linha de centro, devido à baixa densidade dos gases da zona de recirculação.

Embora o estudo feito por Schefer et al. [26] use uma técnica de medição LDV, relativamente complexa na operação de coleta de dados, quando comparada

às modernas técnicas usadas hoje, como o PIV, os resultados obtidos para caracterizar o escoamento do campo de velocidade inerte e reativo foram satisfatórios, se referimos à descrição da estrutura da zona de recirculação. Os vetores do campo de velocidade obtidos desta medição são mostrados na **Figura 2.3**; onde em ambos os casos inerte e reativo se observa que o escoamento de ar anular converge em direção da linha de centro do queimador, formando assim uma grande região de esteira a qual se estende aproximadamente por um diâmetro à jusante da face do queimador.

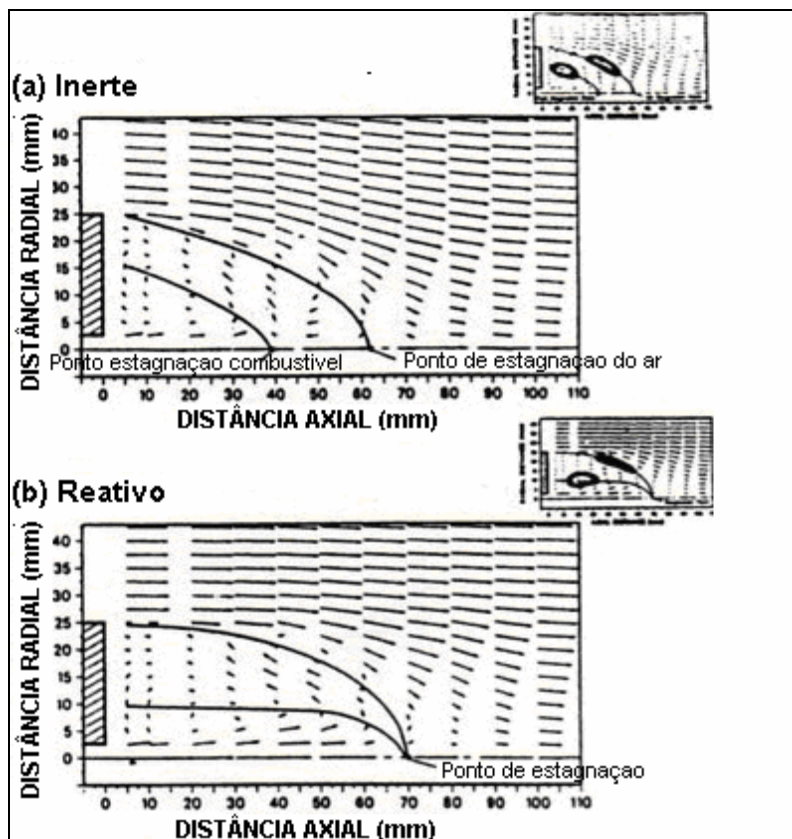


Figura 2.3 – Campo vetorial de velocidade média para escoamento: (a) quimicamente inerte e (b) reativo, segundo estudo de Schefer et al. [26].

Com base no campo de vetores obtidos na zona de recirculação da **Figura 2.3**, percebe-se que esta região é formada na vizinhança da face do queimador pela interação do escoamento de ar anular com o escoamento do jato central. No escoamento inerte são encontrados dois vórtices contra rotativos na zona de recirculação. O primeiro vórtice gira em sentido anti-horário e é conduzido pelo escoamento do jato central. O segundo vórtice, que gira em sentido horário, é localizado adjacente à camada cisalhante estabelecida ao longo do escoamento de ar anular externo, sendo por ele conduzida. O centro deste vórtice é localizado na linha de estagnação externa. No caso de escoamento reativo ocorre a convergência

dos pontos de estagnação, os quais formam um mesmo ponto na linha de centro. As rotações de ambos os vórtices são similares ao do caso inerte.

Outra técnica utilizada do estudo de Schefer et al. [26] foi a de visualização de dispersão de luz de Mie, usada para definir em maior detalhe o escoamento instantâneo. As imagens mostradas na **Figura 2.4** foram obtidas usando partículas de alumina de $0,8\ \mu\text{m}$ de diâmetro introduzidas no jato central, sendo iluminadas por um plano de luz obtido com um laser Nd:YAG cujo tempo de duração do pulso é de 8 ns. Estas imagens correspondem às mesmas condições de escoamento inerte e reativo usadas na obtenção do campo de vetores da **Figura 2.3**. Na **Figura 2.4** podem ser observados que elementos do fluido contendo ar não misturado, representados pela ausência de partículas, os quais são vistos no interior da zona de recirculação, indicando transporte de grande escala de ar anular para a vizinhança do jato central.

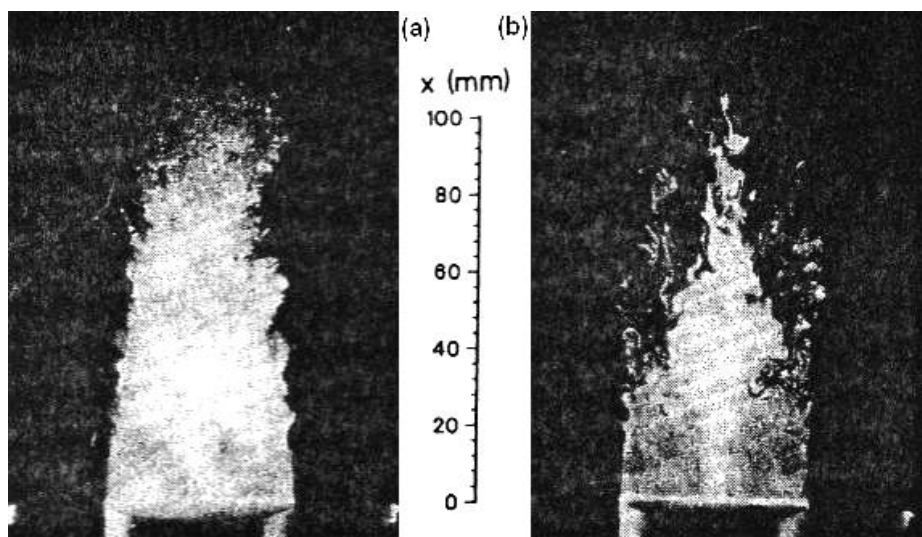


Figura 2.4 – Distribuição instantânea de partículas inseridas no jato central estabilizado, para escoamentos com obstáculo: (a) inerte e (b) reativo, [26].

Uma conclusão importante do trabalho de Schefer et al. [26] foi que os efeitos primários da combustão foram observados na região da linha de centro, onde a penetração do jato central aumenta nos escoamentos reativos. Isto ocorre devido à densidade mais baixa dos gases da zona de recirculação, o qual reduz a taxa de “entrainment” (arrasto) do jato central. Estes efeitos são refletidos na redução da velocidade média ao longo da linha de centro e na mudança de posição do ponto de estagnação do jato central.

Schefer et al. [27] apresentam também uma comparação das chamas estabilizadas com obstáculo e de jato livre, cujas condições de operação são dadas

na **Tabela 2.1**, usando técnicas planares de imagens baseadas na dispersão Raman para medição de concentrações de CH_4 . Este trabalho demonstra que a informação da estrutura do escoamento e da formação da mistura turbulenta é perdida quando são usadas técnicas instantâneas de medição pontuais como o LDV. Isto ocorre pois ambas as chamas são caracterizadas pela presença de estruturas de grande escala variantes no tempo.

No estudo de Schefer et al. [27], o qual é similar ao presente trabalho, para se examinar a diferença da estrutura na zona da chama estabilizada, duas imagens foram registradas utilizando a técnica laser da dispersão da luz de Mie. Consegue-se assim a visualização do desenvolvimento das grandes estruturas do escoamento, tais como as mostradas na **Figura 2.5**. Nesta, o caso (a) corresponde a uma chama de jato livre, e (b) a uma chama com obstáculo. No primeiro caso, em localizações a montante, o jato central aparece relativamente uniforme, e mostra uma pequena penetração no ar do meio ambiente produzindo o efeito de “entrainment”. Já no segundo caso se observa a penetração limitada do jato central ao longo da linha de centro devido ao escoamento reverso do ar anular.

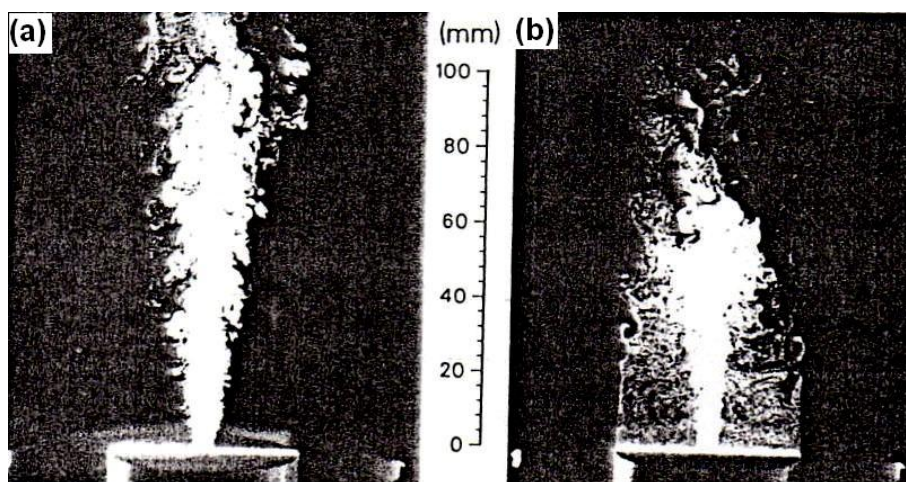


Figura 2.5 – Distribuição instantânea de partículas de alumina inseridas no jato central, para chamas de: (a) jato livre e (b) jato com obstáculo [27].

As imagens bidimensionais de CH_4 , obtidas no estudo de Schefer et al. [27], permitiram caracterizar as estruturas irregulares de grande escala e de mistura turbulenta para ambas as chamas. No caso da chama de jato livre, a variação espacial de pequena escala das concentrações de CH_4 corresponde ao efeito de “entrainment” (arrasto) e de mistura turbulenta. Isto é manifestado pelos altos níveis de turbulência medidos na camada cisalhante, o que caracteriza esta chama como sendo menos instável. No caso de chama com obstáculo, os altos níveis de

flutuação na turbulência são similares em ambas as camadas cisalhantes do jato central e de ar anular. Isto está relacionado à quase constância da concentração medida na região de estagnação. Este processo de estagnação governa a mistura entre o combustível e ar anular e, conseqüentemente, como reagem em chamas, determinando assim as maiores diferenças na região de estabilização a montante entre estes dois tipos de chamas.

Chen et al. [7] apresentaram uma comparação experimental dos escoamentos reativos obtidos com queimadores tipo ciclone e obstáculo. Neste trabalho é discutida a influência da zona de recirculação sobre a estrutura e a estabilização da chama, mediante a análise da transferência de calor e dos comprimentos de chama.

Este trabalho [7], cujas características são apresentadas na **Tabela 2.1**, mostra que as medições LDV dos escoamentos ciclone e com obstáculo são similares, no que se refere à interação entre o jato central e a zona de recirculação, a qual exerce o controle sobre a chama. Estes autores concluem que existem dois parâmetros importantes que governam ambos os tipos de chama:

- (i) A quantidade de movimento do vórtice formado na zona de recirculação, a qual é determinada utilizando-se a velocidade característica na zona de recirculação e a distância radial máxima entre o contorno de velocidade longitudinal zero e a linha de centro,
- (ii) A quantidade de movimento do jato central.

Além disto, Chen et al. [7] propõe uma classificação da estrutura das chamas em dois tipos:

- (i) Chamas dominadas pelo jato central, representadas na **Figura 2.6**, que ocorrem quando a razão entre a quantidade de movimento do jato central e do ar anular é suficientemente grande para que o jato central atravesse a zona de recirculação. Estas chamas são similares, em aparência, às chamas de jato livre.

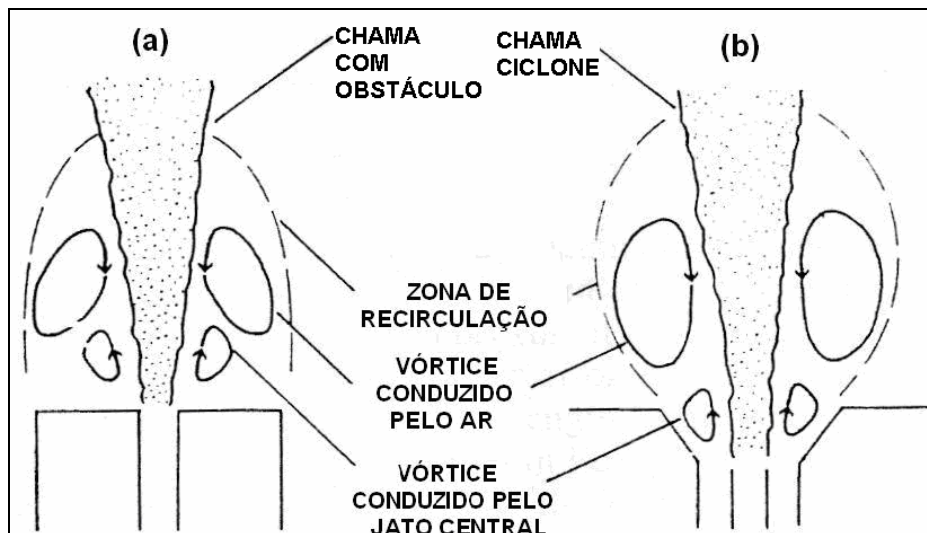


Figura 2.6 – Comparação esquemática da interação entre o jato central e o vórtice conduzido de ar em escoamentos de chamas dominadas pelo jato central para queimadores tipo: (a) obstáculo e (b) ciclone, [7].

- (ii) Chamas fortemente recirculantes, mostrados na **Figura 2.7**, as quais são mais curtas e mais amplas que as chamas dominadas pelo jato central. Nestas ocorre queima significativa no interior da zona de recirculação. Além disto, estas chamas são caracterizadas pela presença de dois pontos de estagnação ao longo do eixo central. Na vizinhança do primeiro destes pontos de estagnação o combustível é espalhado na direção radial e retorna em direção à face do queimador, resultando em mistura com o ar.

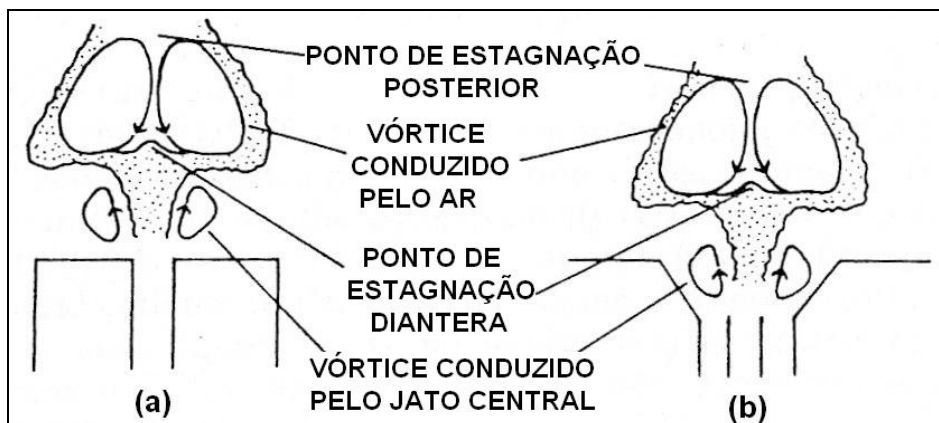


Figura 2.7 – Representação comparativa da interação de chamas fortemente recirculantes entre o jato central e o vórtice conduzido de ar em queimadores tipo: (a) obstáculo e (b) ciclone, [7].

Este trabalho [7] também mostra como podem ser controladas as propriedades das chamas com obstáculo e ciclone utilizando-se os dois parâmetros definidos acima, isto é as quantidades de movimento do vórtice e do jato central.

Correa et al. [8] realizaram um estudo experimental e numérico destas chamas. Foram utilizadas técnicas de medição Raman para a obtenção de propriedades químicas, como temperatura e concentrações de espécies, usando uma instalação experimental confinada, e as condições experimentais dadas na **Tabela 2.1**. Com o intuito de fornecer uma chama com zona de recirculação limpa de fuligem, o combustível usado foi uma composição de CO, H₂ e N₂. Um esquema do experimento é mostrado na **Figura 2.8**.

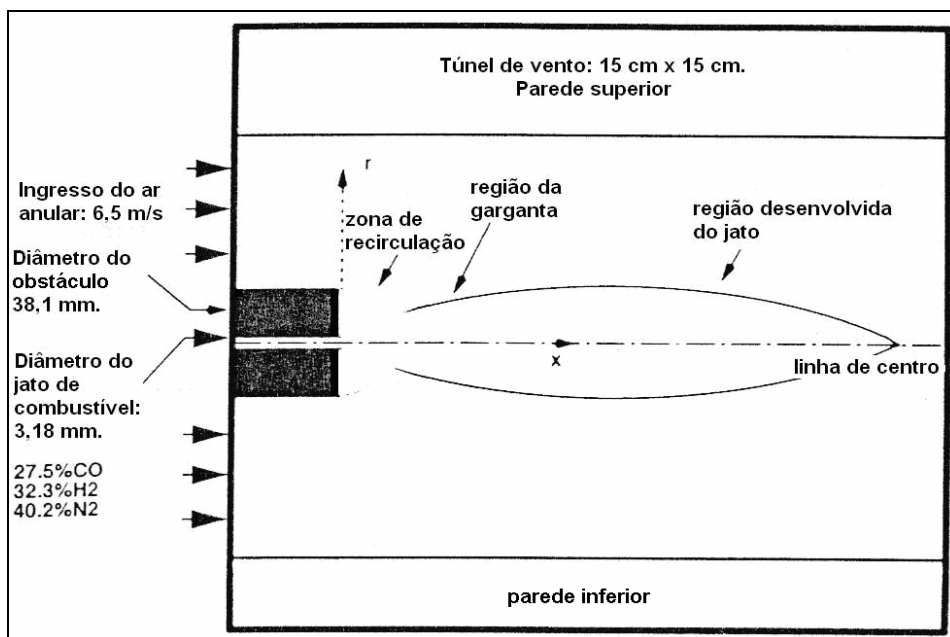


Figura 2.8 – Esquema da instalação confinada, condições de ingresso e regiões da chama estudada no trabalho experimental e numérico de Correa et al [8].

O principal objetivo deste trabalho [8] foi apresentar uma modelagem computacional do escoamento com obstáculo capaz de descrever as interações entre reação química e turbulência que ocorrem nas chamas. Do ponto de vista da utilização de modelos estas chamas possuem duas vantagens importantes sobre as chamas de jato livre, mas uma desvantagem significativa:

- (i) A primeira vantagem é a existência de regiões de grandes taxas de dissipação de energia cinética da turbulência, as quais não são afetadas pelas condições de ingresso do jato. Em chamas de jato livre as taxas de dissipação máxima estão situadas no topo do jato, uma região que é sensível à escolha das condições de ingresso do jato.
- (ii) A segunda vantagem é que não há necessidade de uso de uma chama piloto para a estabilização. Uma desvantagem significativa dos escoamentos com obstáculo é que eles não podem ser modelados como escoamentos cisalhantes simples, devido à natureza elíptica das equações governantes e a

indisponibilidade de modelos de turbulência suficientemente confiáveis aplicáveis à escoamentos com recirculação.

A principal conclusão deste trabalho [8] é que, quando comparado com as chamas de jato livre, para se obter as mais altas taxas de cisalhamento turbulento necessárias para ancorar as chamas, devem ser usados queimadores tipo obstáculo, que estabilizam a chama sem instabilidades de grande escala.

Masri et al. [15], trabalhando com metano e metanol como combustível, determinaram que, na região a jusante da zona de recirculação, devido às grandes taxas de mistura turbulenta, a interação entre a turbulência e a reação química é significativa. Neste caso, a estabilização das chamas próximas à extinção mostra características similares àsquelas das chamas de jato livre. Em chamas de metanol, a região de recirculação é visivelmente livre de fuligem, já em chamas de metano isto não ocorre, o que causa interferência na luz dispersada quando é usada a técnica Raman. A descrição da estrutura mostra que, com um aumento da velocidade do jato central, a chama do metanol apresenta uma extinção global a jusante da região de recirculação; mas ocorre uma re-ignição da chama mais a jusante, onde as taxas de estiramento aerodinâmico diminuem.

Uma característica importante deste trabalho [15] foi a determinação das formas dos contornos das chamas estabilizadas no queimador, as quais variam desde aquelas dominadas pelo jato central, até as dominantes pelo ar anular com uma zona de recirculação totalmente visível. Chamas intermediárias, com uma forma cônica e apenas uma borda de chama visível no extremo da zona de recirculação, também foram encontradas.

Masri et al. [16] utilizaram a técnica de dispersão Raman para caracterizar a fração de mistura, a temperatura e a concentração de espécies estáveis na zona de recirculação de chamas de misturas de CH_4 , CO e H_2 . O estudo conclui que existem duas zonas de mistura quase homogênea na zona de recirculação:

- (i) Uma grande região de vórtice exterior, no qual o combustível é pobre em média, mas ainda dentro do limite de flamabilidade, e,
- (ii) Outra região menor, de vórtice interno, que é próxima ao jato central e possui uma mistura próxima à estequiométrica. Os valores máximos da temperatura e da fração de massa de produtos da combustão são atingidos na região interior. Na zona de recirculação não é observada extinção localizada

do processo de combustão, mesmo em jatos que estão próximos à extinção global.

Dally et al. [9] realizaram estudos da formação de NO em estruturas de chamas com misturas de combustíveis simples (H_2/CO) e complexas (H_2/CH_4), usando técnicas Raman, Rayleigh e LIF, nas condições descritas na **Tabela 2.1**. Estes autores determinaram que a variação da velocidade do jato central de combustível provoca efeitos no número de Damköhler, manifestados na formação de NO; na zona de recirculação e a montante da zona da garganta. Outras conclusões deste trabalho são:

- (i) Quando a mistura estequiométrica abrange a extensão do vórtice exterior, então o NO é produzido principalmente dentro da zona de recirculação.
- (ii) Quando a mistura estequiométrica ocorre no vórtice interior, então a zona da garganta da chama é afetada, levando à diminuição dos níveis de NO.

Masri et al. [17] apresentaram um resumo dos principais avanços no estudo das estruturas das chamas turbulentas não pré-misturadas, com ênfases na análise de escoamentos reativos de jato livre e com obstáculo. Especificamente, este trabalho descreve detalhadamente a estrutura destes escoamentos através do estudo da interação químico-turbulenta, extinção local e global (*Blow-off*) da chama estabilizada na face do queimador tipo obstáculo. Os resultados foram obtidos usando técnicas de medição Raman, Rayleigh e Fluorescência Induzida Laser (LIF).

Neste trabalho [17] é descrito o padrão de escoamento complexo formado a jusante da face do queimador onde duas zonas de recirculação são formadas, as quais são responsáveis pela estabilização da chama sobre o queimador. Nos casos em que a velocidade do jato central é bastante alta, este penetra a zona de recirculação e forma uma chama tipo jato a jusante. Esta chama tipo jato pode ser extinta a jusante da zona de recirculação, onde a turbulência é mais intensa e os efeitos de taxa de reação química finita são significativos.

Os estudos experimentais de Masri et al. [17], baseados no trabalho de Roquemore et al. [25], identificam a influência de três parâmetros de controle do regime do escoamento:

- (i) A velocidade de ar anular, que controla a quantidade de movimento do vórtice de circulação.

- (ii) A velocidade do jato de combustível, que controla a quantidade de movimento ou momento do jato.
- (iii) A razão entre os diâmetros do jato de combustível e do obstáculo, que controla a forma da chama estabilizada na face do queimador.

Quando a velocidade do jato aumenta, a tendência é aumentar a extensão da região da garganta, ocorrendo então uma extinção local [18] na zona onde a intensidade turbulenta aumenta.

Baseado no trabalho de Mungal et al. [18] sobre chamas estabilizadas na vizinhança do obstáculo, Masri et al. [17] afirma que podem ser distinguidas três zonas principais: (1) a de estabilização, (2) a de extinção e (3) a reignição.

Para fins de classificação Masri et al. [17] propuseram que é conveniente separar as chamas com obstáculo em dois tipos principais, baseado nos estudos de Roquemore et al. [25] e Chen et al. [7]:

- (a) Chamas dominadas pelo jato de combustível, as quais são cônicas e estão estabilizadas no queimador por gases quentes.
- (b) Chamas dominadas pelo jato de ar, na qual uma chama luminosa recirculante é observada à jusante da face do obstáculo. Neste caso, onde a quantidade de movimento do jato de combustível é muito menor que a do jato de ar, o jato central não atravessa a zona de recirculação completamente.

Masri et al. [17] sustentam que, para fins da análise na modelagem numérica da interação entre turbulência e combustão, é conveniente separar o funcionamento deste tipo de queimador até em três regimes de combustão:

- (i) O primeiro regime é aquele de chamas longe da extinção, onde é justificada a hipótese de tempo característico da cinética química pequeno diante do tempo da turbulência.
- (ii) O segundo regime é aquele com chamas próximas à extinção, onde os efeitos de taxa finita da cinética química são significativos.
- (iii) O terceiro correspondente à transição entre estes regimes, que é diretamente controlada pela razão entre escalas de tempo do escoamento e do processo químico.

O estudo de Dally et al. [10] é baseado na continuação de seus trabalhos anteriores [9], e descreve detalhadamente a estrutura da composição média das chamas estabilizadas com obstáculo, utilizando para isto resultados obtidos com a

técnica de medição Raman/Rayleigh/LIF, sob as condições do escoamento mostrado na **Tabela 2.1**. Neste estudo é apresentado um mapeamento da localização aproximada das regiões de recirculação, de garganta e de propagação livre de jato. Esta repartição é mostrada na **Figura 2.9**; onde estas localizações axiais são normalizadas pelo diâmetro do obstáculo (D_B).

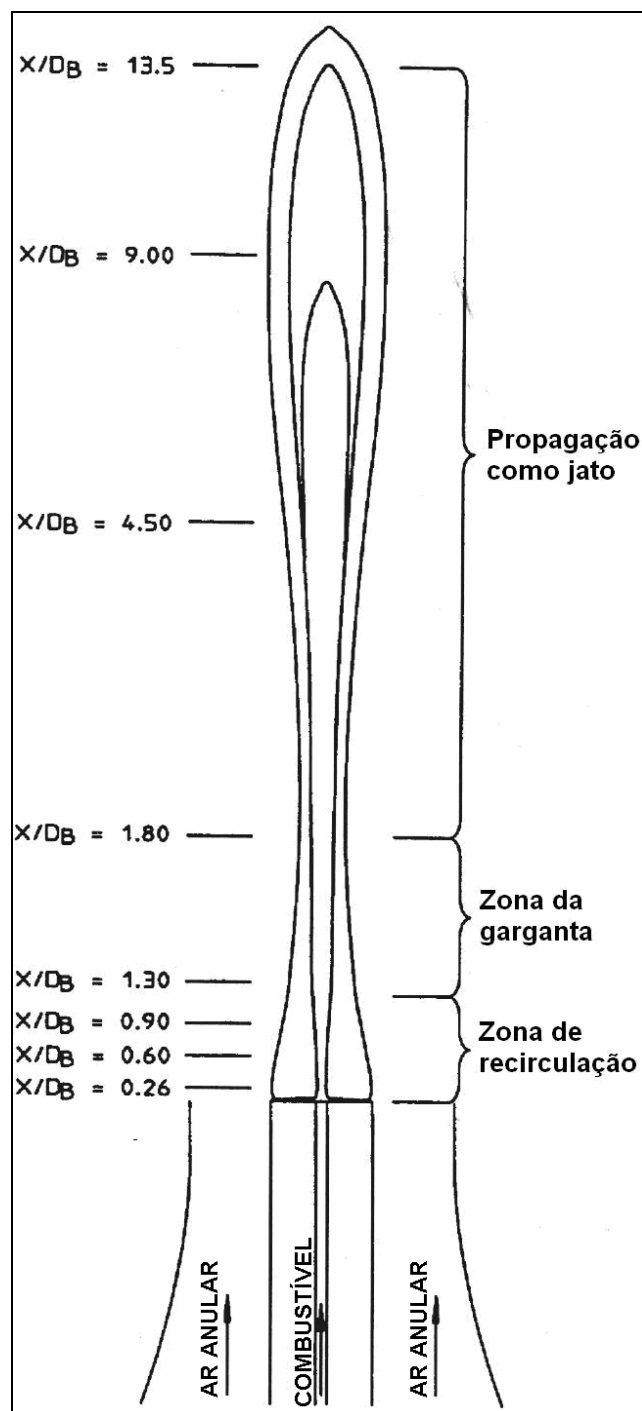


Figura 2.9 – Regiões da chama turbulenta não pré-misturada observadas no estudo experimental de Dally et al. [10].

São utilizadas diferentes composições do combustível (ver composições na **Tabela 2.1**), e valores de velocidade do jato central, com o intuito de investigar os

efeitos do número de Damköhler nas emissões de gás na extinção localizada na zona da garganta e na estrutura da zona de recirculação. O aporte importante deste trabalho é a descrição da formação de três camadas de mistura na zona de recirculação:

- (i) Uma camada exterior entre o vórtice exterior e o ar anular.
- (ii) Uma camada intermediária entre o vórtice exterior e o vórtice interior.
- (iii) Finalmente, uma camada interior entre a região interior e o jato de combustível. A contribuição relativa de cada camada à mistura total varia com a velocidade do jato central e com o combustível empregado.

Liu et al. [12] utilizaram, no seu trabalho de modelagem, os dados experimentais do trabalho de Masri et al [16] para fins de comparação. Foram examinadas diferentes condições de velocidade do jato e do ar anular, nos casos em que a composição do combustível era uma mistura de Hidrogênio com gás natural GNV ou metano. Segundo estes autores, a acurácia das simulações numéricas de chamas turbulentas depende principalmente de dois fatores: os modelos físicos, incluindo os modelos de turbulência e da química, e o algoritmo de solução numérica.

Neste trabalho [12], foi utilizado um modelo de reação química de elementos de chama laminar. Com respeito à comparação dos resultados experimentais e numéricos concluíram que:

- (i) Para uma chama de Metano com Hidrogênio misturados na mesma proporção volumétrica, a camada cisalhante externa mostra uma mistura essencialmente inerte entre o ar anular e a zona de recirculação, esta última rica em produtos de combustão.
- (ii) Usando chama de combustível misturado de Metano e GNV com fração de mistura estequiométrica, os cálculos numéricos não têm boa concordância com os resultados experimentais, pois não podem reproduzir as extinções locais observadas no experimento. Tais inexatidões são atribuídas ao cálculo da fração de mistura média na zona de recirculação.