

## 2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são discutidas as principais referências da literatura disponível que constituíram um aporte importante para a elaboração do presente trabalho. Em particular, são apresentados trabalhos que motivaram a investigação de um queimador tipo obstáculo com a finalidade de descrever a estrutura do escoamento reativo. Também são apresentados os trabalhos que analisam a utilização de modelos de turbulência para a predição das chamas estabilizadas por um corpo rombudo (Bluff Body). Alguns destes trabalhos desenvolvem, simultaneamente, análise experimental e modelagem computacional.

A maioria dos trabalhos experimentais encontrados é enfocada na análise do comportamento da estrutura da zona de recirculação dos gases encontrada na vizinhança do corpo rombudo, e de sua interação com o núcleo do jato. São quantificados os efeitos da combustão sobre o escoamento e as propriedades da turbulência. O estudo da estrutura das chamas turbulentas não pré-misturadas assim estabilizadas permite identificar a existência e estudar a influência de quatro parâmetros de controle principais:

- (i) A velocidade do ar anular,
- (ii) A velocidade do jato de combustível,
- (iii) A razão entre os diâmetros do jato de combustível e do obstáculo,
- (iv) O número de Reynolds.

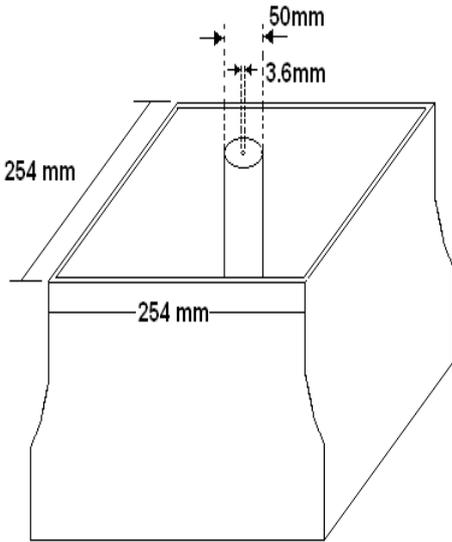
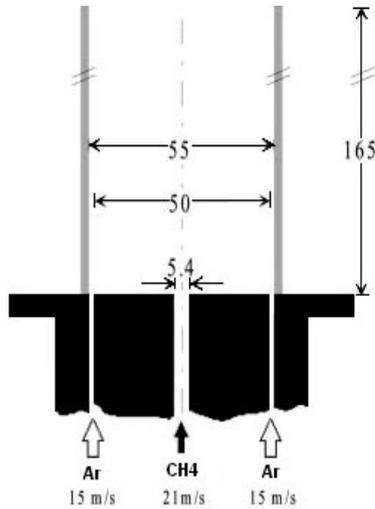
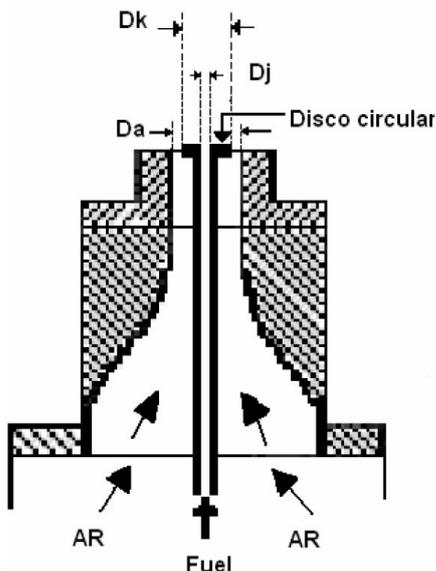
O presente capítulo é dividido em três partes. A primeira traz o resultado de uma pesquisa bibliográfica de experimentos de queimadores tipo obstáculo (Bluff Body). A segunda parte apresenta de uma revisão dos modelos numéricos utilizados para descrever um queimador tipo obstáculo (Bluff Body), enquanto que a terceira parte consiste em uma pesquisa sobre a influência dos modelos de turbulência em combustão turbulenta não pré-misturada.

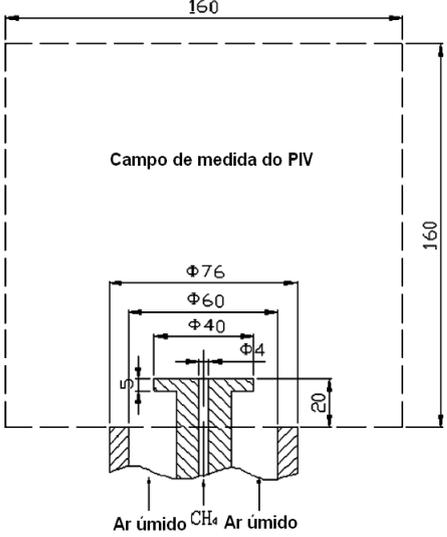
## 2.1. Estudos experimentais

Um esquema resumindo as principais características de estudos feitos sobre escoamento turbulentos em queimadores tipo obstáculo é apresentando na **Tabela 2.1.1**. Nesta tabela são mostrados um esquema de cada experimento e as características geométricas, representadas pela razão dos diâmetros de saída do jato central de combustível ( $D_j$ ) e do obstáculo ( $D_B$ ). Também são indicadas a razão da velocidade média de saída do jato central de combustível ( $U_j$ ) e do ar anular ( $U_a$ ), o combustível utilizado na experiência, as propriedades medidas e as técnicas utilizadas. A seguir serão discutidas as principais contribuições dos estudos apresentados nesta tabela.

**Tabela 2.1.1** Estudos de escoamentos turbulentos em queimadores tipo obstáculo.

<p><b>Schefer et al. (1987)</b>  <b>Combustível:</b> CH<sub>4</sub>  <math>D_j/D_B=5.4/50</math> (mm/mm)  <math>U_j/U_a=21/25</math> (<math>m \times s^{-1} / m \times s^{-1}</math>)  <b>Método:</b> L.D.V.  <b>Medidas:</b> Médias e flutuações r.m.s. da velocidade  <b>Características:</b> Queimador não confinado</p>	
<p><b>Correa e Gulati (1992)</b>  <b>Combustível:</b> 27,5%CO/32,3%H<sub>2</sub>                            /40,2%N<sub>2</sub>  <math>D_j/D_B=3.18/38.1</math> (mm/mm)  <math>U_j/U_a=80/6.5</math> (<math>m \times s^{-1} / m \times s^{-1}</math>)  <b>Método:</b> Espalhamento Raman-Rayleigh  <b>Medidas:</b> Flutuações de densidade, temperatura, espécies majoritárias.  <b>Características:</b> Queimador confinado</p>	

<p><b>Dally et al. (1998)</b></p> <p><b>Combustível:</b> CH<sub>3</sub>OH, H<sub>2</sub>/CO, e H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub></p> <p><math>D_j/D_B=3.6/50</math> (mm/mm)</p> <p><math>U_j/U_a=</math> Ver tabela 2.1.2</p> <p><b>Método:</b> Raman/Rayleigh/Laser induzida por fluorescência (LIF)</p> <p><b>Medidas:</b> Temperatura, espécies majoritárias, (O<sub>2</sub>,N<sub>2</sub>,CO<sub>2</sub>,CO,H<sub>2</sub>,H<sub>2</sub>O), assim como OH e NO.</p> <p><b>Características:</b> Queimador não confinado.</p>	
<p><b>Honoré et al. (2000)</b></p> <p><b>Combustível:</b> CH<sub>4</sub></p> <p><math>D_j/D_B=5.4/50</math> (mm/mm)</p> <p><math>U_j/U_a=21/15</math> (<math>m \times s^{-1} / m \times s^{-1}</math>)</p> <p><b>Método:</b> PIV</p> <p><b>Medidas:</b> Campos de velocidade.</p> <p><b>Características:</b> Queimador confinado.</p>	
<p><b>Huang e Lin (1994, 2000)</b></p> <p><b>Combustível:</b> 95%C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/3,5%C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>/1,5%C<sub>4</sub>H<sub>10</sub></p> <p><math>D_j/D_B=3,4/30</math> (mm/mm)</p> <p><math>U_j/U_a:</math> Ampla faixa de <math>U_j</math> como: 1.25, 2.45, 3.68, 4.42, 6.65, 8.59, 17.36, 103.86 (<math>m/s</math>) e mais, para <math>U_a=</math> uma faixa de 1 a 6 (<math>m/s</math>)</p> <p><math>D_k=20</math> mm (Diâmetro de o disco circular)</p> <p><b>Método:</b> Visualização direta (Fotografias), Schlieren e L.D.V.</p> <p><b>Medidas:</b> Campos de velocidade.</p> <p><b>Características:</b> Queimador não confinado</p>	

<p><b>Gu et al. (2006)</b></p> <p><b>Combustível:</b> CH<sub>4</sub></p> <p><b>D<sub>j</sub>/D<sub>B</sub></b>=4/60 (mm/mm)</p> <p><b>U<sub>j</sub>/U<sub>a</sub>:</b> Ampla faixa de U<sub>j</sub> como: 5, 7.5, 10, 12.5, 17.5, 25, 30, 37.5 (m/s) para U<sub>a</sub>=3.72, 5.29, 7.91, 9.78 e 12.5 (m/s)</p> <p><b>D<sub>k</sub></b>=40 mm (Diâmetro do disco circular)</p> <p><b>Método:</b> PIV</p> <p><b>Medidas:</b> Campos de velocidade.</p> <p><b>Características:</b> Queimador não confinado, ar anular com adição de umidade.</p>	
--	--

Schefer et al. [6] apresentam um estudo das chamas estabilizadas em um queimador tipo obstáculo. Para este fim realizam a medição não intrusiva da velocidade, usando um sistema laser Doppler (LDV). Desta forma os autores obtêm as três componentes da velocidade média, flutuações e suas correlações estatísticas. Os escoamentos quimicamente inerte e reativo foram caracterizados em situações nas quais ocorre predomínio do escoamento reverso na vizinhança do corpo rombudo. No caso inerte, dois pontos de estagnação existem ao longo da linha de centro, os quais são influenciados pelo jato central do combustível e pelo ar anular. 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. Na **figura 2.1.1** são mostrados os campos de vetores velocidade nos casos inerte e reativo. Em ambos casos o escoamento de ar anular converge em direção à linha central do queimador e sua interação com o escoamento do jato central forma uma região de esteira na vizinhança da face do queimador. No escoamento 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 gira em sentido horário, é localizado adjacente à camada cisalhante estabelecida ao longo do escoamento de ar anular externo, sendo por ela conduzido. O centro deste vórtice está localizado na linha de estagnação externa. No caso de escoamento reativo ocorre a convergência dos pontos de estagnação, os quais se encontram na linha de centro. A velocimetria Laser Doppler (LDV) foi usada para medir a

posição média dos pontos de estagnação da zona de recirculação e determina a variação na sua localização com mudanças nas condições de operação. A **figura 2.1.2** mostra uma comparação da evolução da velocidade longitudinal do escoamento nos casos inerte e reativo. O decaimento da velocidade média na linha central é mais rápido no caso não reativo. Este decaimento pode ser atribuído segundo Schefer et al. [6]

- Ao maior cisalhamento estabelecido pelo gradiente de velocidade média na região de separação do jato central da zona de recirculação.
- Ao gradiente de pressão adverso como resultado do escoamento reverso do ar anular ao longo da linha central.

As chamas não pré-misturadas estabilizadas nesta situação são, na maioria dos casos, caracterizadas pela recirculação de produtos de combustão a alta temperatura, o que resulta em uma melhor estabilização da chama do que no caso de um jato livre sem recirculação.

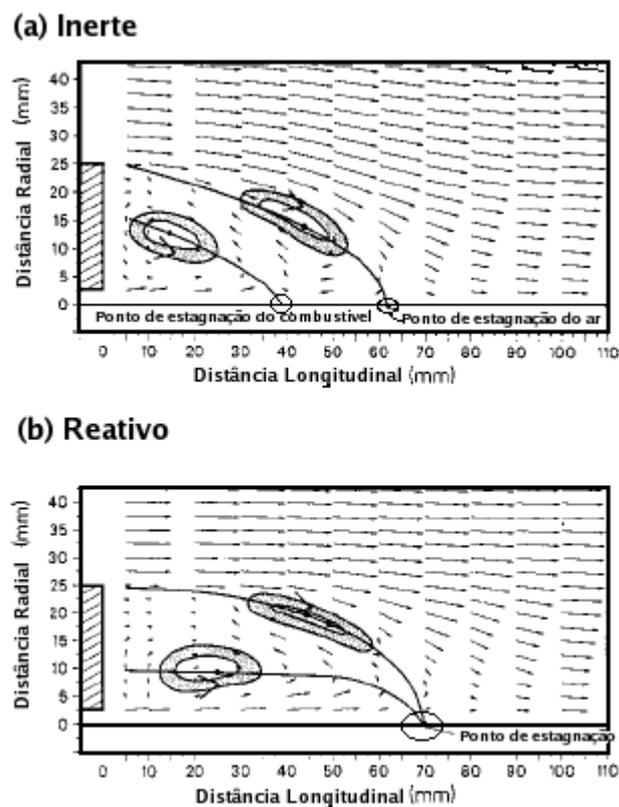


Figura 2.1.1 Campo de vetores da velocidade média para o escoamento (a) inerte (b) reativo, Schefer et al. [6].

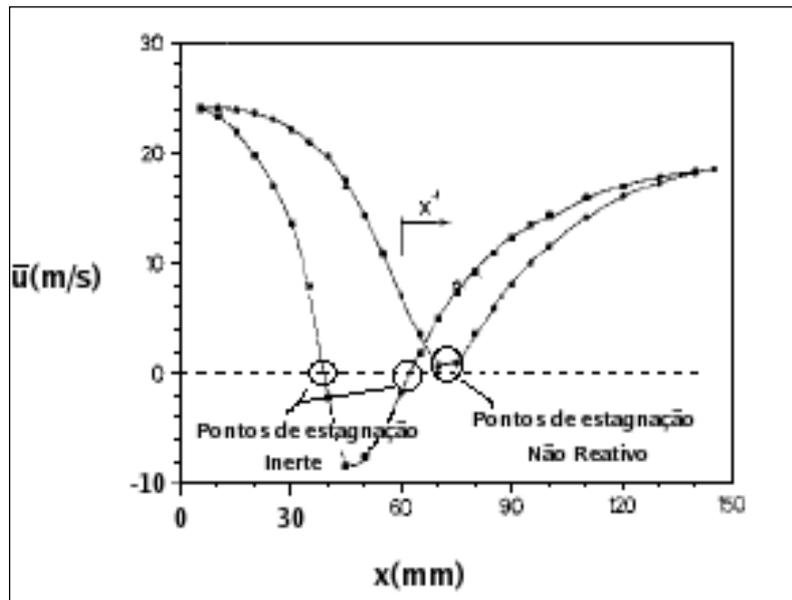


Figura 2.1.2 Variação da velocidade média na linha central nos casos inerte e reativo. [6]

Em função da velocidade do ar anular, a chama é categorizada em dois tipos, a dominada pelo jato de combustível ou a dominada pelo ar anular.

Determinou-se que o escoamento estabilizado por corpos rombudos é instável e que a chama é significativamente influenciada pelas flutuações do escoamento.

Correa e Gulati [7] apresentam os resultados de um estudo experimental e numérico. Os experimentos utilizaram a técnica de medição baseada no espalhamento Raman para a obtenção de propriedades termo-químicas, tais como temperatura e concentrações de algumas espécies químicas, em um queimador confinado cujas condições de operação e o esquema são mostrados na **tabela 2.1.1**. Com o objetivo de obter uma chama cuja zona de recirculação é livre de fuligem, o combustível usado foi uma mistura de CO, H<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>. Os resultados experimentais apresentados servem como ferramenta para validar o estudo numérico realizado para este queimador. Em particular, é enfocada a interação entre reação química e turbulência nestas chamas de gases não pré-misturados. Mistura combustíveis de CO e H<sub>2</sub> também foram empregadas pois a cinética química é bem conhecida razoavelmente simples. Medidas Raman foram comparadas com o modelo computacional nas três regiões apresentadas na **tabela 2.1.1**, estas são: a zona de recirculação, a de garganta e a do jato.

Foram realizadas medidas Raman das espécies químicas majoritárias  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ , as quais foram comparadas com o modelo numérico.

Huang e Lin [8] estudaram experimentalmente a estrutura das chamas não pré-misturadas estabilizadas por um disco circular utilizando fotografia direta e a técnica Schlieren para visualizar as formas das chamas, o que resultou na proposta de classificação das chamas em sete categorias, as quais foram obtidas variando-se as velocidades do combustível e do ar:

I Chamas com recirculação,

II Chamas em transição,

III Chamas separadas instáveis (destacadas do queimador),

IV Chamas com anel laminar,

V Chamas desenvolvidas,

VI Chamas de brilho dividido (split flashing),

VII Chamas descoladas (lifted),

A **figura 2.1.3** mostra a distribuição da classificação destas chamas num plano ( $U_j, U_a$ ) as quais representam a velocidade do combustível e a velocidade do ar anular, respectivamente. Esta figura mostra que é possível passar do regime I ao VII, progressivamente, ao se aumentar a velocidade do jato de combustível. As chamas da categoria I possuem uma zona de recirculação, e ocorrem para baixas velocidades do jato central de combustível. A chama encontra-se na zona de esteira, é iniciada na face do queimador aonde existe uma zona luminosa com formação de fuligem. Incrementando-se a velocidade do jato de combustível, a zona de iluminação aumenta de dimensão. Uma característica da categoria I é que combustão ocorre em uma região rica em combustível.

Na categoria II a chama na base do queimador começa a apresentar instabilidade ocorre um deslocamento intermitente desta da base do queimador, com geração de ruído.

Na categoria III é formada a chama tipo separada instável, na qual a chama é completamente separada da base do queimador e a combustão é fortemente instável. Aumenta o ruído produzido e a zona de iluminação devido à fuligem tem seu tamanho incrementado. Entretanto a distância de separação da face do queimador não é maior que do tipo da chama descolada.

Com o incremento do jato de combustível a chama separada é abruptamente estabilizada e novamente cola-se à base do queimador, formando a chama da categoria IV. Nesta categoria a chama é estável, desaparece o ruído, e é

formada uma coluna vertical de luminosa permanecendo colada na base do queimador.

A categoria V é obtida incrementando-se mais ainda a velocidade do jato de combustível, formando assim uma zona de garganta a jusante da zona de recirculação, após a qual a luminosidade aumenta.

A categoria VI aparece quando se aumenta a velocidade do jato de combustível. A zona de luminosidade, onde ocorre formação de fuligem, desaparece e uma pequena chama azul estável é encontrada na base do queimador.

A chama na categoria VII é a chama elevada, a qual é similar a uma chama de difusão elevada. A separação da base do queimador é muito maior que a chama separada instável da categoria III. Esta chama é encontrada quando a velocidade do jato de combustível alcança valores superiores a 30 m/s como mostrado na **figura 2.1.3**.

Nesse estudo o campo de temperatura foi medido com um termopar de fio fino, e foram comparadas as estruturas dos escoamentos reativo e inerte. Em todos os casos são os mecanismos de transporte presentes na zona de recirculação que controlam a dinâmica do escoamento. Foram encontrados dois limites de estabilidade estreitamente relacionados com a estrutura da chama, os quais representam o limite da presença da chama no queimador ou, simplesmente, a extinção da chama. O limite de estabilidade da velocidade do jato de combustível para um valor da velocidade do ar anular igual a zero é encontrado obtido para  $U_j=112\text{m/s}$ . Com o incremento da velocidade do ar anular, o limite superior de estabilidade, em termos da velocidade do jato de combustível, decresce ligeiramente. O limite de estabilidade inferior que é mostrado, na **figura 2.1.3**, pela linha tracejada, é alcançado se a velocidade do jato central de combustível é diminuída, a partir da categoria VII, quando a chama descolada é extinta. A velocidade anular na marca “x” da **figura 2.1.3** é de 1.45m/s. Para velocidades do jato de ar inferiores a este valor, o limite de estabilidade inferior não é observado.

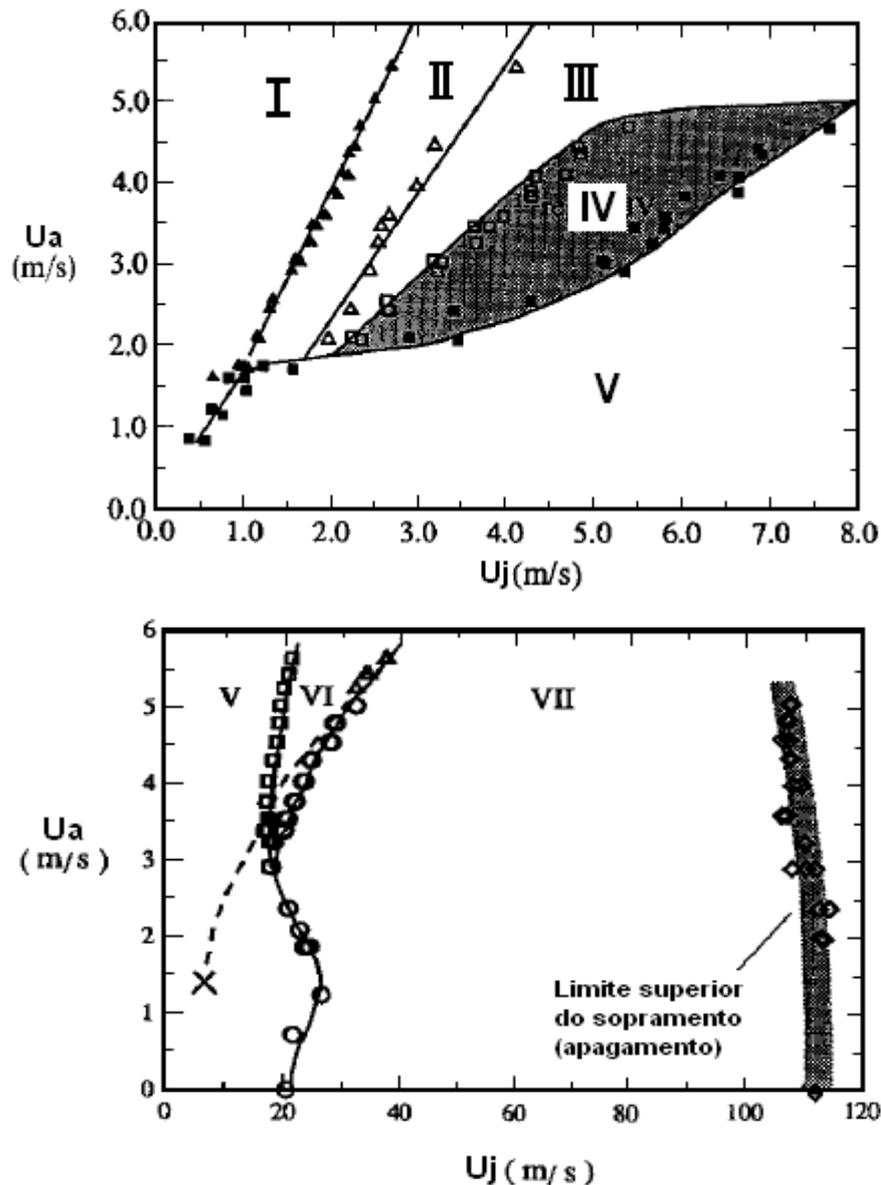


Figura 2.1.3 Classificação das chamas proposta por Huang e Lin (1994).

Dally et al. [9] apresentam um trabalho experimental realizado em um queimador tipo obstáculo, cujas características geométricas são mostradas na **tabela 2.1.1** e os seus respectivos dados dinâmicos são mostrados na **tabela 2.1.2**. Nesta Tabela  $Re_j$  é o número de Reynolds do jato de combustível, e %BO é a razão entre a velocidade do combustível e a velocidade limite onde ocorre a extinção. A técnica de espalhamento da luz por difusão Rayleigh é usada para medir a temperatura. A técnica de espectroscopia Raman é empregada para medir as concentrações de  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ , e  $CH_4$  ou  $CH_3OH$ . Para as medidas Raman/Rayleigh utilizaram-se dois lasers Nd:YAG, com uma faixa de duração de pulsos de 8 a 40ns. A energia liberada por pulso é de cerca de 600 mJ, a qual é direcionada para uma lente de focalização e um prisma de  $180^\circ$ , com o qual

dobra-se a energia Raman e Rayleigh para 1,2 mJ. Para as medidas de fluorescência do radical OH foi utilizado outro laser Nd:YAG o qual bombeia um laser de corante. O comprimento de onda de 289.9 nm foi utilizado para o OH e, para a fluorescência do NO escolhe-se 225.9 nm.

Tabela 2.1.2 Características dinâmicas dos tipos de chamas estudadas por Dally et al.[9].

Combustível	Chama	$U_j/U_a$	$Re_j$	%BO
<b>CH<sub>3</sub>OH</b>	ML1	80/40	23,700	55
	ML2	121/40	35,900	84
	ML3	134/40	39,700	93
<b>H<sub>2</sub>/CO</b>	HC1	134/40	17,500	18
	HC2	321/40	41,990	43
	HC3	536/40	70,120	74
<b>H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub></b>	HM1	118/40	15,800	50
	HM2	178/40	23,900	75
	HM3	214/40	28,700	91

Foram identificadas três camadas de mistura na zona de recirculação, como mostrado na **figura 2.1.4**: (i) uma camada externa, situada entre o vórtice externo e o ar anular, (ii) uma camada intermédia, entre o vórtice externo e interno e (iii) uma camada interna localizada entre a região interna e o jato de combustível.

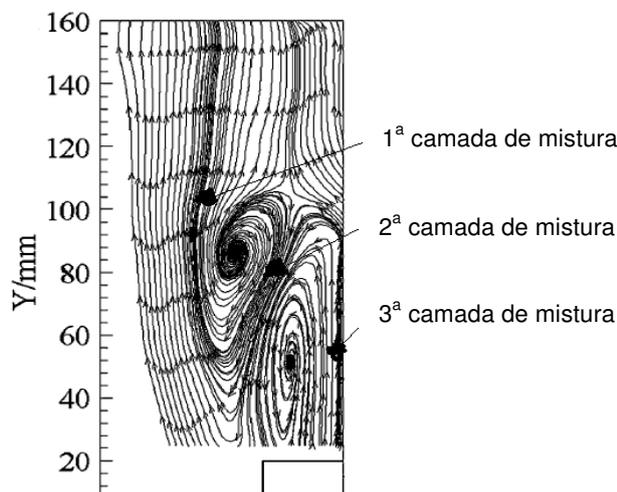


Figura 2.1.4 Localizações das três camadas de mistura [9].

Com o incremento da velocidade do jato de combustível, diminui a intensidade da mistura no vórtice externo e, para uma velocidade do jato suficientemente alta, a superfície estequiométrica desloca-se da região externa para a região interna da zona de recirculação. Isto faz com que a zona de reação mude

alternadamente de posição em direção ao jato de combustível, deixando produtos de combustão no vórtice externo. No caso da chama com combustível  $H_2/CO$  é mostrado, na **figura 2.1.5**, para dois valores da velocidade do jato 134 (HC1) e 321m/s (HC2), que a concentração de OH é afetada pelo movimento da zona de reação no interior da zona de recirculação. Os níveis de OH na chama HC1 são maiores do que aqueles da chama HC2 na a zona do vórtice externo. Os resultados obtidos para a chama HC1 apresentam valores máximos da concentração de OH são observados na zona rica em combustível. No caso da chama HC2, somente um máximo de OH é observado na vizinhança do vórtice interno. Na posição  $x/D_B = 1.8$ , que corresponde à zona mais a jusante da face do queimador, chamada de jato livre, as discrepâncias entre as duas chamas são mínimas.

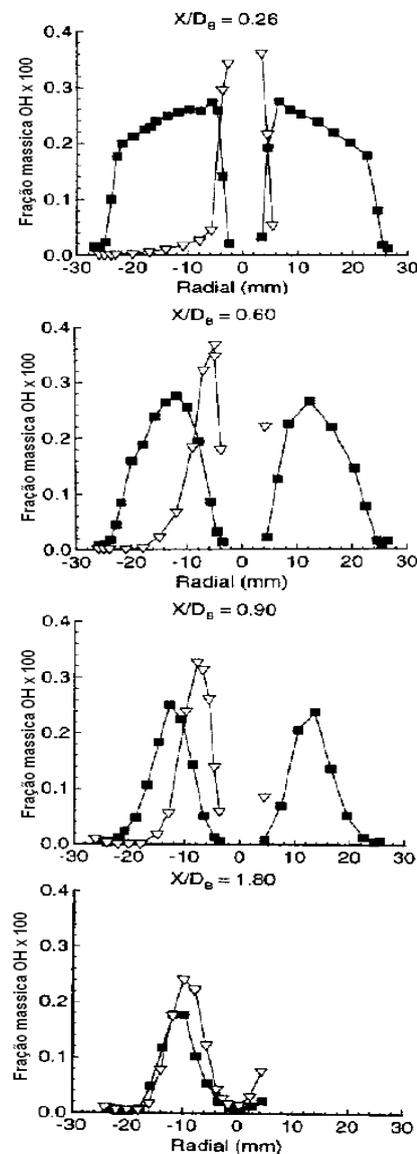


Figura 2.1.5 Evolução radial da média das frações mássicas de OH em diferentes localizações longitudinais da chama  $H_2/CO$ . HC1 ■ e HC2 ▽ [9].

Huang e Lin [10] revisam a classificação dos tipos chama feitas anteriormente e propõem a existência de apenas quatro regimes característicos do escoamento, estas são:

- 1) Pre-penetração,
- 2) Transição,
- 3) Penetração,
- 4) Escoamento cisalhante considerável.

Mostra-se, na **figura 2.1.6**, as relações entre estes regimes que aparecem nas diferentes categorias do escoamento como função da velocidade do ar anular ( $U_a$ ) e do jato de combustível ( $U_j$ ).

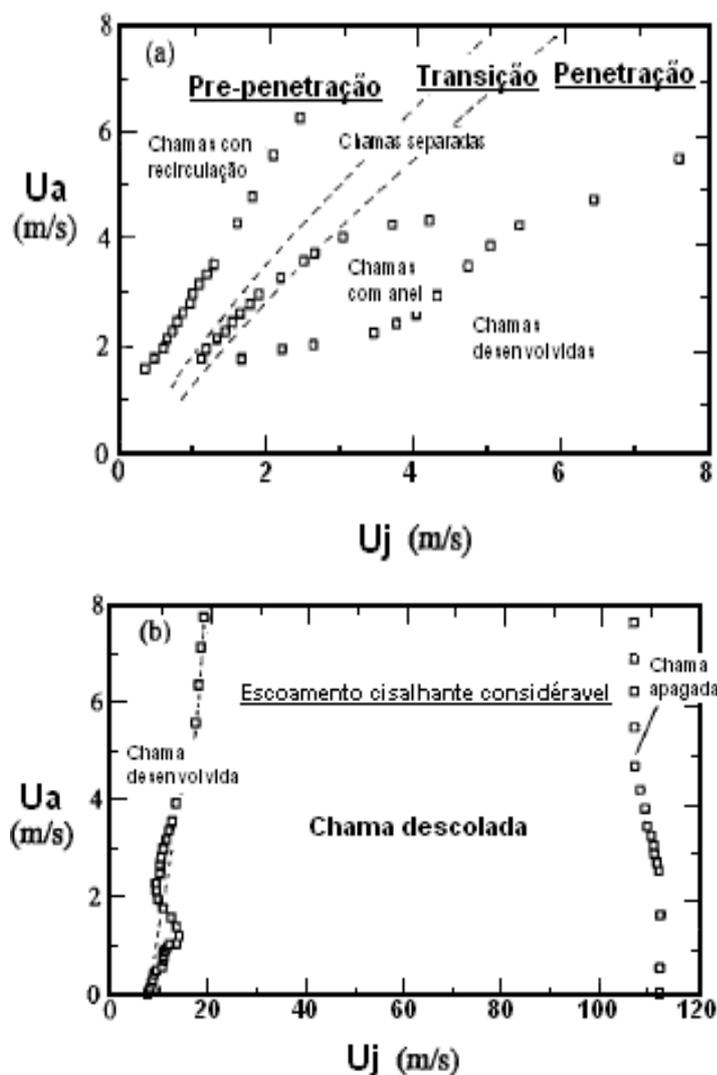


Figura 2.1.6 Regimes característicos do escoamento e chamas, segundo Huang e Lin (2000)

As medidas da velocidade foram feitas com a técnica não intrusiva de velocimetria laser Doppler (LDV) de dois componentes. Para este fim, foram

utilizadas partículas de óxido de magnésio (MgO) de 1  $\mu\text{m}$  de diâmetro médio. Na **figura 2.1.7** mostra-se o campo de velocidade obtido no regime de pré-penetração nas situações de chama recirculante e de chama separada. Na **figura 2.1.7a**, que mostra os vetores velocidade e as linhas de corrente, pode ser constatada a existência de dois pontos de estagnação, de um vórtice externo, de cor azul, e de uma parte interna da bolha de recirculação cor laranja devido à radiação da fuligem formada. A diminuição do número de Reynolds devido ao incremento da viscosidade induzida pela combustão dificulta a formação do vórtice interno quando comparado ao caso quimicamente inerte. A região interna é dominada pela combustão rica, e a região externa é estequiométrica ou pobre. A **figura 2.1.7b** traz a estrutura do escoamento para a chama separada que, quando comparada com aquela dada na **figura 2.1.7a** mostra que o ponto de estagnação anterior (FSP) está localizado mais a jusante do que no caso da chama recirculante e que o comprimento da zona de recirculação é aumentado.

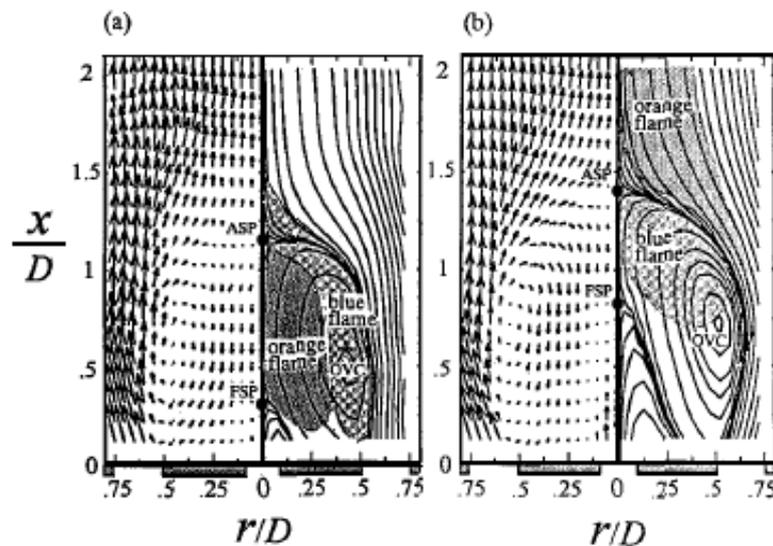


Figura 2.1.7 Vetores velocidade e linhas de corrente no regime de pré-penetração obtidos com  $U_a=3.24\text{m/s}$  (a) Chama recirculante,  $R_H=U_j/U_a=0.1$  (b) Chama separada,  $R_H=U_j/U_a=0.5$ .

Na figura 2.1.8 mostram-se resultados obtidos para o regime de penetração para as situações de chama desenvolvida e de chama descolada. A figura 2.1.8a mostra o campo de velocidade, o qual é caracterizado por um grande vórtice e outro pequeno, cujos centros externo e interno são notados OVC e IVC, respectivamente. Não foram encontrados pontos de estagnação ao

longo do eixo de simetria, apenas o ponto OSP, que é um ponto de estagnação fora do eixo central.

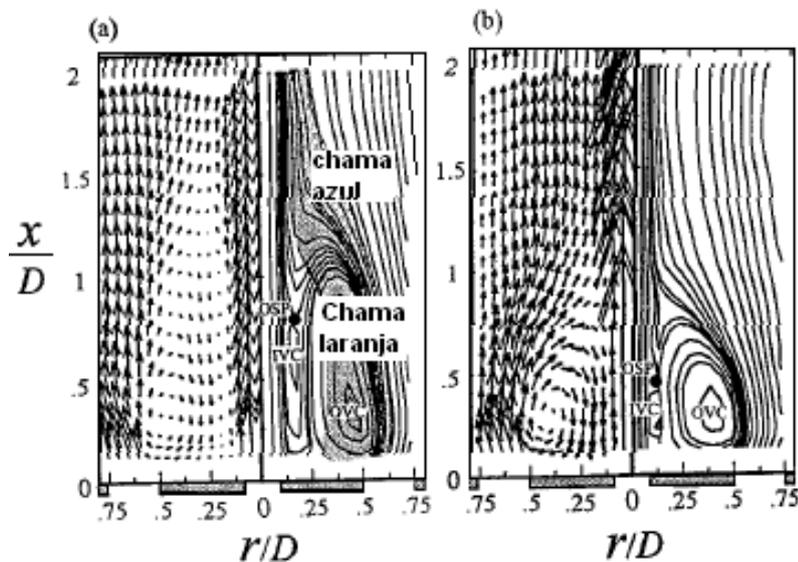


Figura 2.1.8 Vetores velocidade e linhas de corrente do regime de penetração obtidos com  $U_a=3.24\text{m/s}$  (a) chama desenvolvida,  $R_H=U_j/U_a=1.8$  (b) chama elevada,  $R_H=U_j/U_a=9.2$ .

Na **figura 2.1.8b** resultados obtidos no regime de escoamento em cisalhamento considerável são mostrados. Neste caso uma parcela de fluido anular ingressa penetrando a zona de recirculação, pelo efeito do cisalhamento considerável provocado pela alta velocidade do jato central de combustível. A chama, neste regime, é descolada. A operação deste tipo de queimador no regime de cisalhamento não é benéfica nem para a mistura entre combustível e ar nem para a estabilidade da chama.

Honoré et al. [11] apresentaram um estudo no qual foi utilizada a técnica não intrusiva de velocimetria por imagem de partículas (PIV) para caracterizar o escoamento de uma chama não pré-misturada gerada num queimador confinado cujas condições de operação e esquema de montagem são mostrados na **tabela 2.1.1**. Define-se o parâmetro BR (razão de obstrução) como a razão entre a área do corpo rombudo e a área do duto confinado. O valor deste parâmetro, 0.83, é considerado alto. Esta configuração de queimador confinado resulta em um escoamento fortemente recirculante, com dois pontos de estagnação na linha longitudinal central. A alta taxa de obstrução e a alta velocidade do ar anular, 15m/s, induzem o fechamento da zona de recirculação na direção longitudinal do escoamento. A técnica de medição PIV utilizada por Lecordier e Trinité [12]

emprega uma câmara (CORDIN 447/351) e um laser de vapor de cobre de 45W (Oxford laser ACL 45) com uma taxa de repetição de 10 kHz e uma energia por pulso de 6.5 mJ a qual permite uma alta resolução temporal, isto é, o campo de velocidade pode ser medido a cada 6.22 ms. Na **figura 2.1.9** onde é mostrada a velocidade longitudinal instantânea ao longo do eixo principal estes dois pontos de estagnação são claramente identificados.

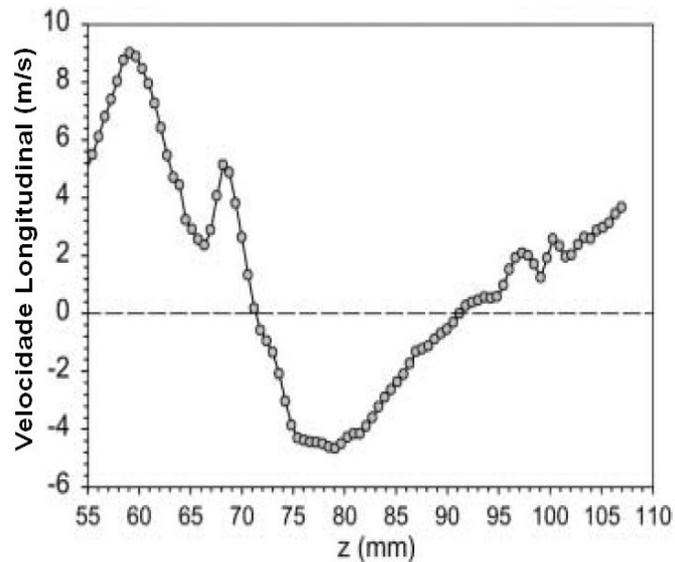


Figura 2.1.9 Evolução longitudinal instantâneo da componente longitudinal de velocidade, obtidas com o PIV [11].

Os resultados obtidos mostram que a posição destes pontos de estagnação tem movimento longitudinal de baixa frequência, porém, a amplitude deste movimento é pequena.

Gu et al. [13] apresentam um estudo experimental que visa determinar o efeito da umidade do ar anular no escoamento e no limite de estabilidade de uma chama turbulenta não pré-misturada. Também é examinado o comportamento dinâmico da estrutura aerodinâmica instável observada no queimador tipo obstáculo. Foi usada a técnica PIV para caracterizar os vórtices e obter o campo da velocidade. Uma análise de linhas de corrente e contornos da velocidade é realizada para identificar a estrutura da chama e determinar o efeito do vapor adicionado ao ar na estrutura dos vórtices.

A **figura 2.1.10** mostra o diagrama de estabilização da chama em combustão com ar úmido, na qual se apresenta os regimes I, II, III, e IV correspondentes, respectivamente, a chama de zona de recirculação, chama em transição, chama dominada pelo jato central e chama parcialmente apagada ou extinta. Nesta figura  $U_j$  é a velocidade do jato de combustível, e  $U_a$  a velocidade do ar anular. A

chama tipo jato e a chama descolada não foram encontradas porque a velocidade do jato de combustível não é suficientemente alta.

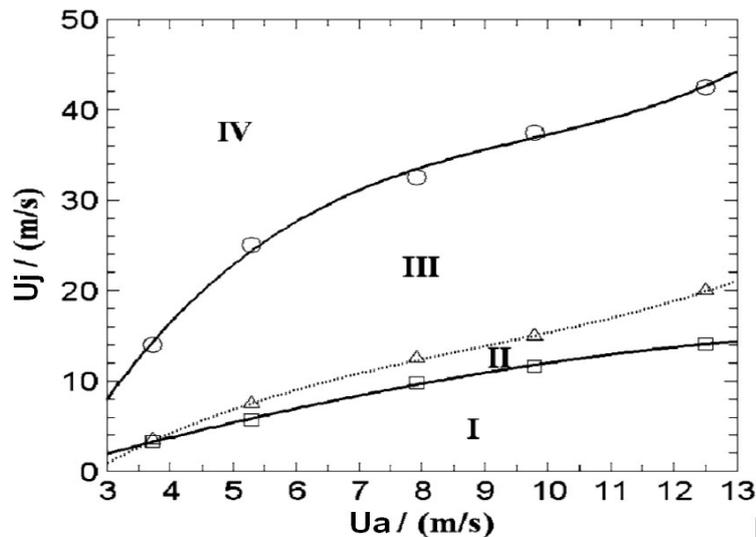


Figura 2.1.10 Diagrama dos regimes de estabilização para combustão com ar úmido, I chama de zona de recirculação, II chama de transição, III chama dominada pelo jato central IV chama parcialmente apagada [13].

A chama no regime parcialmente apagado é aquela para qual extinção parcial ocorre na região de garganta, a jusante da zona de recirculação, devido ao aumento da velocidade do jato de combustível. Esta chama é instável e pode ser bruscamente extinta com um aumento da velocidade do jato de combustível.

Na **figura 2.1.11** mostram-se as características da chama para combustão com ar úmido. A **figura 2.1.11a** apresenta uma chama na zona de recirculação, no interior do qual onde o combustível é completamente consumido. O ponto de estagnação a montante é formado na zona de recirculação devido à baixa quantidade de movimento do jato central de combustível. Quando a velocidade do combustível aumenta, a reação dentro da bolha de recirculação ainda domina a chama, porém na **figura 2.1.11b** o jato central de combustível encontra-se no limiar de penetração da zona de recirculação. Neste caso, tem-se uma chama de transição na qual somente um ponto de estagnação é formado. Quando mais se aumenta a velocidade do jato central, mais este penetra a bolha de recirculação, reduzindo assim a intensidade do vórtice. A partir de um dado valor de  $U_j$  uma chama dominada pelo jato de combustível é formada, a qual pode apresentar re-ignição mais a jusante, no caso de ocorrerem extinções locais, como mostra a **figura 2.1.11c**.

As principais características combustão com ar úmido são similares às da combustão com ar seco. A influência do ar úmido se manifesta na variação da

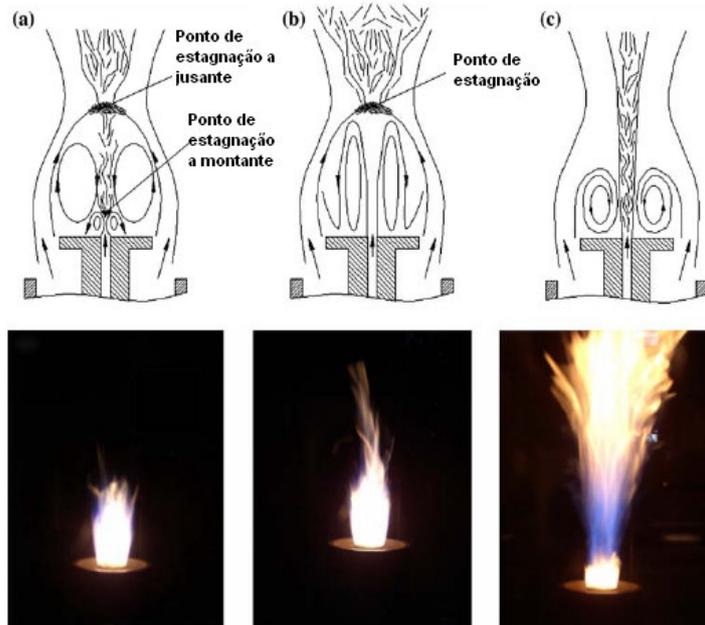


Figura 2.1.11 Características da chama para combustão com ar úmido, a) Chama da zona de recirculação, b) Chama de transição, c) Chama dominada pelo jato central.

posição dos pontos de estagnação. Esta variação está ligada a uma mudança no limite de penetração do jato de combustível ( $\gamma_p$ ), o qual é definido como a linha que divide a zona I da zona II do diagrama de regimes de estabilização mostrado na **figura 2.1.12**. Outra mudança que ocorre quando o ar é úmido diz respeito ao limite inferior da zona parcialmente apagada, ou extinta, (IV) denominada  $\gamma_L$ , como é mostrado na **figura 2. 1.12**.

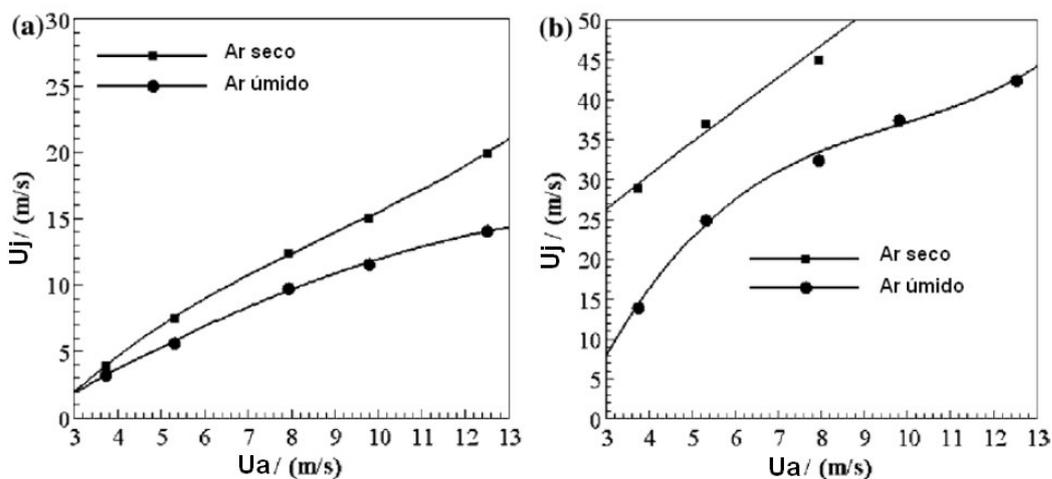
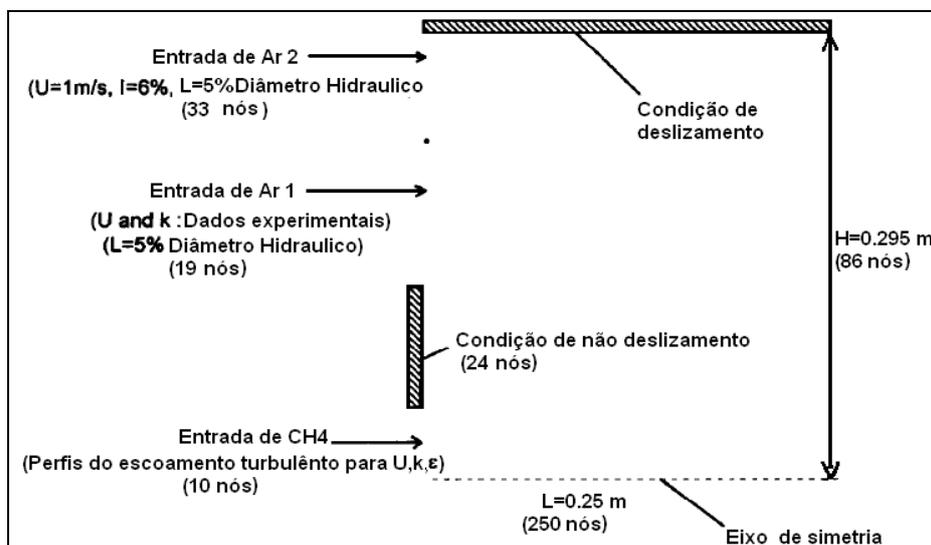


Figura 2.1.12 Comparações dos limites para casos de ar úmido e seco: a)  $\gamma_p$  : Limite de penetração do jato de combustível, b)  $\gamma_L$  : Limite inferior da zona parcialmente extinta.

## 2.2. Estudos Numéricos para um queimador tipo obstáculo

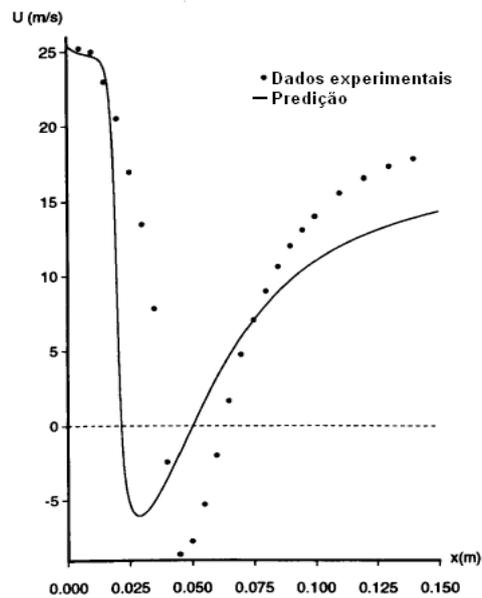
Fallot et al. [14] apresentam uma validação do modelo de combustão turbulenta M.I.L. (Modelo Intermitente Lagrangiano) em queimadores tipo obstáculo. Este modelo, desenvolvido para combustão não pré-misturada com efeitos de taxa de reação química finita, descreve a distribuição de escalas de tempo turbulentas e faz uso de uma biblioteca de tempo químico. Este estudo demonstra a capacidade do modelo de simular diferentes regimes de funcionamento, os quais correspondem a diferentes valores da velocidade do combustível e do ar. Para pequenos valores da razão destas velocidades encontram-se chamas separadas, porém, quando  $U_f/U_a > 2.8$  as chamas são unidas à base do queimador.

A **figura 2.2.1** mostra um esquema do domínio computacional e indica as condições de contorno empregadas. Neste estudo é mostrado que a estrutura da chama calculada é sensível à escolha das condições de entrada do ar e à construção da biblioteca do tempo químico, isto é, se esta é derivada de um mecanismo de reação global ou detalhado.



**Figura 2.2.1** Domínio computacional e condições de contorno Fallot et al. [14].

Resultados de simulações realizadas no caso quimicamente inerte, tais como a evolução longitudinal da velocidade na linha de centro do queimador mostrada na **figura 2.2.2**, apresentam apenas concordância qualitativa com os dados experimentais de Schefer et al. [6]. Em particular, a simulação não reproduz corretamente a localização dos pontos de estagnação nem o valor mínimo da velocidade longitudinal.



**Figura 2.2.2** Velocidade longitudinal na linha central da base do queimador Fallot et al.[14].

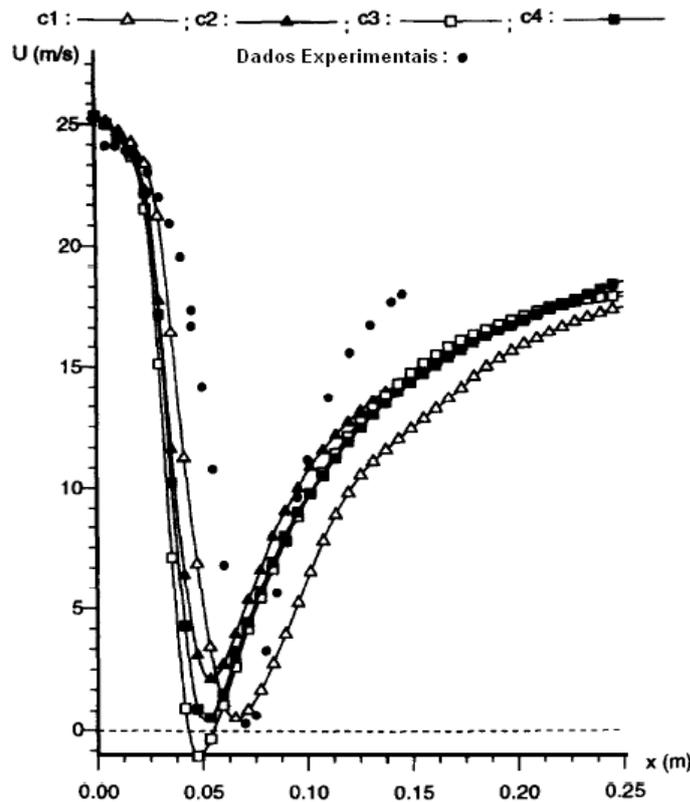
A **figura 2.2.3** mostra a evolução da velocidade longitudinal ao longo da linha de centro do queimador, para diferentes escolhas de mecanismo químico e de condição de contorno de entrada do ar anular, para uma mesma velocidade turbulenta do jato de combustível central. A influência da razão entre as escalas de tempo características do transporte turbulento de escalar e de velocidade,  $R$ , e investigadas nos seguintes casos:

C1:  $R=0.5$ ; biblioteca de tempo químico derivada de um mecanismo global; velocidade uniforme na entrada de ar.

C2:  $R=0.5$ ; biblioteca de tempo químico derivada de um mecanismo global; velocidade não uniforme na entrada de ar interpolada de dados experimentais.

C3:  $R=0.5$ ; biblioteca de tempo químico derivada de um mecanismo detalhado; velocidade não uniforme na entrada de ar.

C4:  $R=0.4$ ; biblioteca de tempo químico derivada de um mecanismo detalhado; velocidade não uniforme na entrada de ar, interpolada de dados experimentais.



**Figura 2.2.3** Velocidade longitudinal na linha central para os casos [14]

Observa-se, na **figura 2.2.3**, que o caso c3 tem dois pontos de estagnação, enquanto que o caso c4 possui só um ponto de estagnação, o que indica que a escolha do valor de R exerce influência sobre os resultados do modelo. A comparação dos resultados obtidos nos casos c1 e c2 mostra a escolha das condições de entrada de velocidade do ar anular, uniformes ou não uniformes, também influencia os resultados obtidos.

Hossain et al. [15] apresentam os resultados da modelagem de um queimador tipo obstáculo utilizando a técnica de elementos de chama (Flamelet) na qual a influência da transferência por radiação é incorporada. Esta incorporação é baseada no conceito de entalpia “imperfeita”, a qual é definido como

$$\Delta h = h - [h_0 + Z(h_f - h_0)], \quad 2.2.1$$

onde  $\Delta h$ ,  $h$ ,  $h_0$ ,  $h_f$  são as entalpias imperfeita, da mistura, do combustível e do ar, respectivamente, e  $Z$  é a fração de mistura.

A biblioteca de elementos de chama (flamelet) possui como parâmetro de entrada a entalpia imperfeita. A radiação emitida pela chama é modelada pelo método de transferência discreta [16]. A **figura 2.2.4** mostra uma comparação entre a modelagem e os resultados experimentais de Dally et al. [17] para um

jato de combustível  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  com velocidade de 118 m/s. O modelo de turbulência  $\kappa-\varepsilon$  foi utilizado e a biblioteca de elementos de chama foi gerada com o código RUN-1DL [18], com o mecanismo de reação Warnatz [19]. Os resultados obtidos mostram que, para a chama considerada, o efeito da transferência de calor por radiação na temperatura e nas espécies majoritárias é pequeno. Contudo, conforme mostrado na **figura 2.2.4**, uma melhoria significativa na predição da concentração do radical OH ocorre quando o modelo de transferência de calor por radiação é considerado.

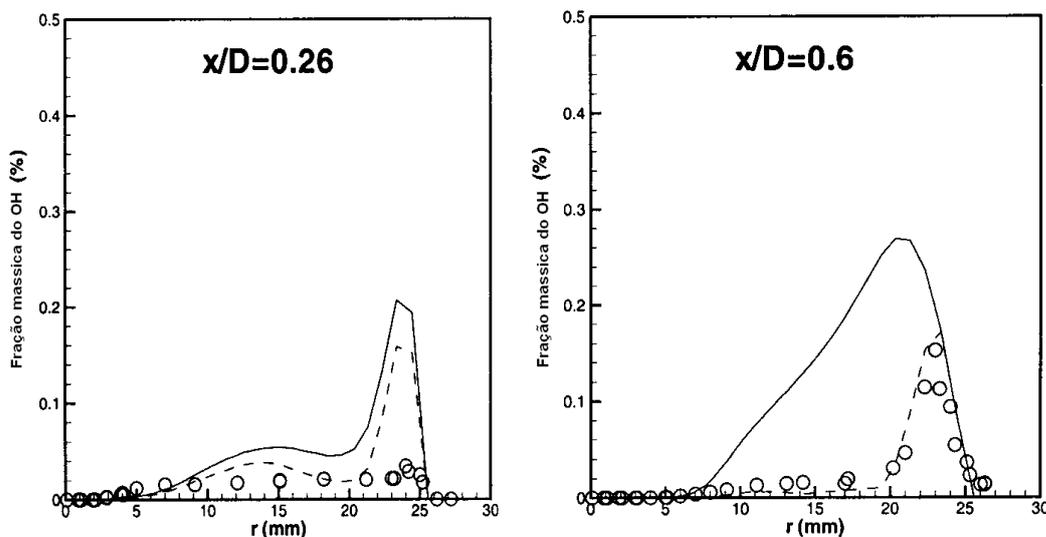


Figura 2.2.4 Evolução radial da fração mássica de OH. Círculo aberto, medidas [17]; linha sólida, cálculo sem radiação; linha tracejada, cálculo com radiação [15].

Hossain et al. [20] estudaram a estabilização da chama num queimador tipo obstáculo que utiliza uma mistura de  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  como combustível. Foi empregado o modelo de elementos de chama e foi dada ênfase na predição da formação de NO. Além disto, esse estudo procura incorporar, nas bibliotecas de elementos de chama, efeitos da difusão diferencial que ocorre devido à presença de espécies químicas com números de Lewis diferentes da unidade. A **figura 2.2.5** mostra uma comparação entre a evolução radial da concentração de NO, medida por Masri et al. [21] e aqueles obtidos pela modelagem com e sem efeito de difusão diferencial. Se uma modificação no valor da concentração calculada de NO ocorre quando a difusão diferencial é levada em conta, uma boa concordância com o experimento não é obtida. Note-se que, por se tratar de efeito de segunda ordem sobre as espécies químicas, a velocidade do escoamento calculado não é alterada quando se leva em conta o efeito de difusão diferencial.

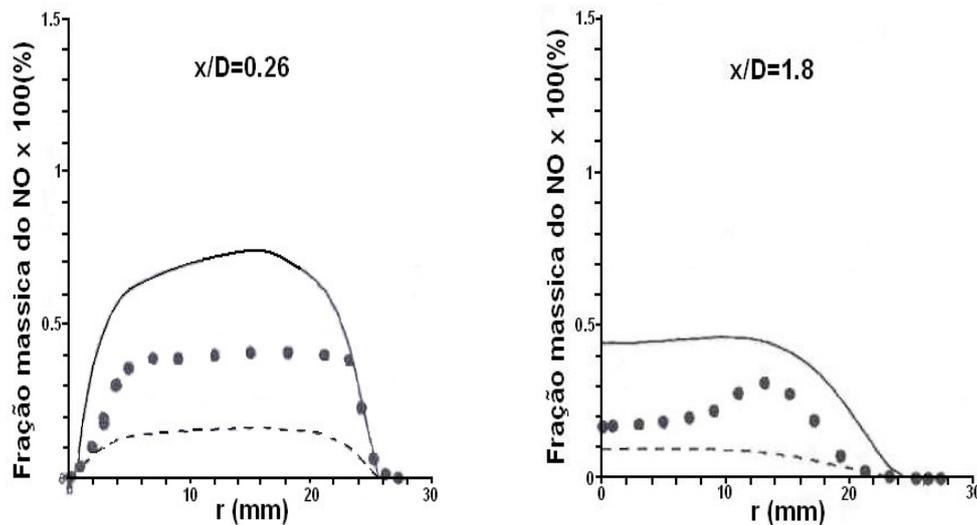


Figura 2.2.5 Evolução radial da fração mássica do NO: ● Experimental; — modelo flamelet com difusão diferencial; ---Modelo flamelet com número de Lewis unitário [20].

Guoxiu et al. [22] apresentam uma investigação numérica dos escoamentos inertes e reativos em um queimador tipo obstáculo, na qual foram empregados modelos diferenciais de tensores de Reynolds. A hipótese de equilíbrio químico é utilizada para descrever o processo químico elementar e uma função densidade de probabilidade de tipo beta representa a interação entre turbulência e reação química. O fluxo de Reynolds da fração de mistura é modelado por uma da equação de transporte. Os modelos empregados para descrição do campo turbulento são o LRR-IP (Launder et al. [23]), o modelo JM (Jones e Musonge [24]), o modelo SSG proposto por Speziale et al.[25], e o modelo LRR-IP com duas modificações nas suas constantes, (BM-M1, BM-M2). O modelo LRR-IP sobreestima a taxa de decaimento da velocidade na linha central do eixo do queimador, mostrando um comportamento não satisfatório. O modelo BM-M1 prevê melhores resultados para a velocidade média, entretanto, no caso não reativo, isto não leva à melhoria da predição das flutuações de velocidade, em particular. A modificação (BM-M2) acarreta melhorias significativas na predição do escoamento no caso não reativo, porém, no caso reativo, a predição do campo do escoamento é da mesma qualidade que aquela obtida com BM-M1, o que mostra que alguns DRSMs têm diferentes comportamentos no caso inerte e reativo. No caso reativo os melhores resultados obtidos, em termos da média e da variância, são oriundos dos modelos BM-M1 e SSG.

Kai et al. [26] Utilizaram uma função densidade de probabilidade conjunta de velocidade, da frequência turbulenta, e da composição (frações mássicas das

espécies químicas e entalpia) para modelar chamas estabilizadas por um corpo rombudo, comparando seus resultados com aqueles obtidos por Masri et al. [27] em três situações, correspondentes a diferentes valores da velocidade do jato de combustível, tal como mostrado na **tabela 2.2.1**. A variação de velocidade encontra-se relacionada à variação do número de Damkhöler, efeito estudado nesse trabalho.

Tabela 2.2.1 Características das diferentes chamas estudadas por Masri et al. [27].

Nome	Combustível	U <sub>j</sub> (m/s)	U <sub>c</sub> (m/s)
HM1	Gás natural:H <sub>2</sub> (1:1)	118	40
HM1	CH <sub>4</sub> :H <sub>2</sub> (1:1)	118	40
HM2	CH <sub>4</sub> :H <sub>2</sub> (1:1)	178	40
HM3	CH <sub>4</sub> :H <sub>2</sub> (1:1)	214	40
HM1e	CH <sub>4</sub> :H <sub>2</sub> (1:1)	108	35
HM3e	CH <sub>4</sub> :H <sub>2</sub> (1:1)	195	35

Na **figura 2.2.6** mostra-se um esquema do domínio computacional empregado na simulação, onde o  $D_B$  é o diâmetro do corpo rombudo, a origem do sistema de coordenadas se encontra na linha central do eixo do corpo rombudo,  $(x,y)=(0,0)$ ,  $x$  e  $y$  são as direções longitudinal e radial, respectivamente. A modelagem utilizada é baseada na equação de transporte da PDF conjunta. Utilizam-se dois modelos de mistura para o cálculo da PDF, o modelo de iteração por troca com a média (IEM) e um modelo baseado em árvores euclidianas (EMST). A reação química do metano com ar é descrita por um mecanismo reduzido que contém 19 espécies químicas. A **figura 2.2.7** mostra que a evolução radial da velocidade longitudinal é corretamente prevista na imediação do corpo rombudo. Porém, mais a jusante, o acordo entre modelagem e experimento deteriora-se.

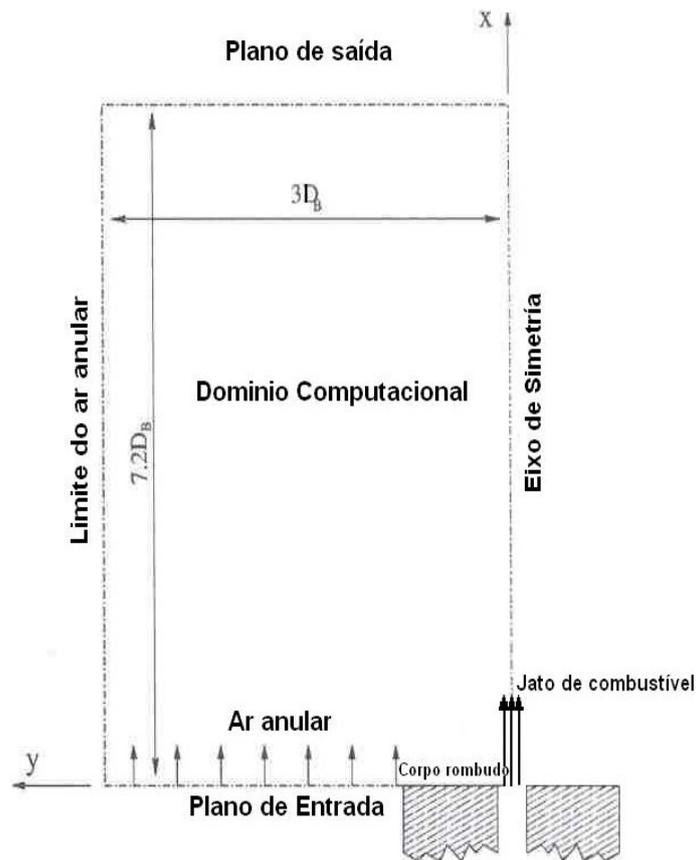


Figura 2.2.6 Esquema do domínio computacional [26].

Os resultados de cálculo mostram que ocorre mistura inerte na camada de cisalhamento existente entre a zona de recirculação, onde existem os produtos de combustão oriundos de uma queima rica e o ar anular, apenas no caso da chama HM1. Os resultados de cálculo obtidos para as chamas HM2 e HM3 não exibem extinções locais, contrariamente ao que é verificado nos experimentos. Esta discrepância é atribuída à deficiência do modelo utilizado para o cálculo da fração de mistura na zona de recirculação.

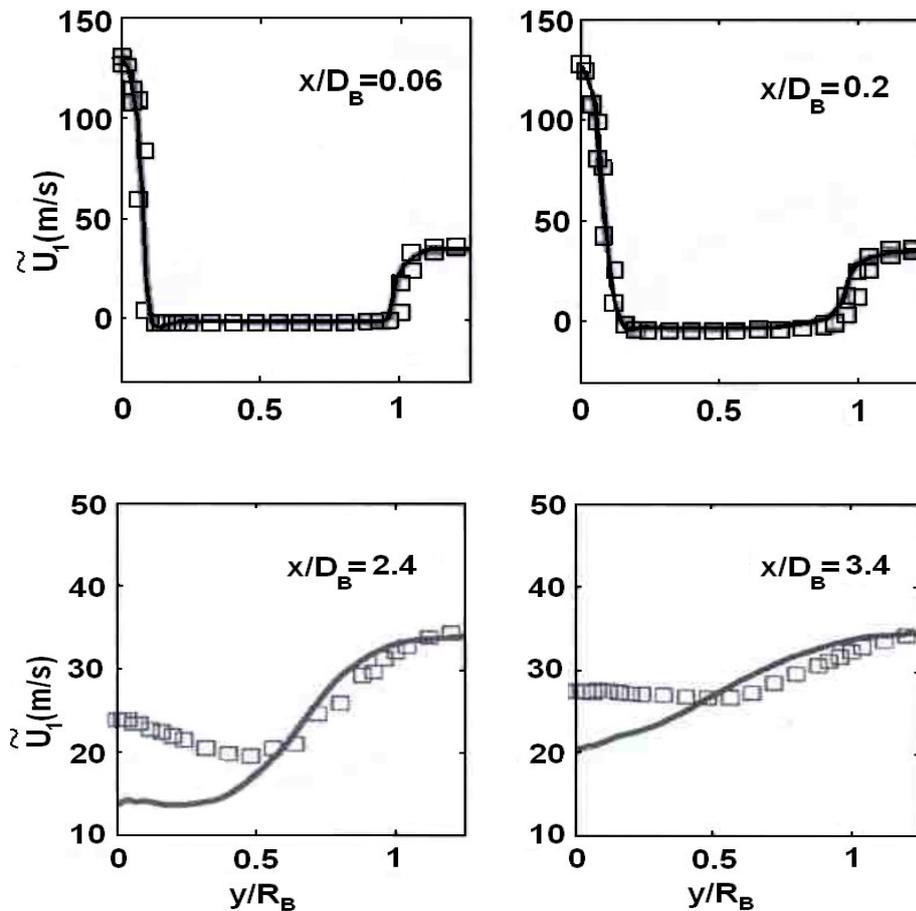


Figura 2.2.7 Evolução radial da velocidade longitudinal média a jusante do corpo rombudo caso HM1 [26].

Hossain e Malalasekera [28] aplicaram o modelo de elementos de chama laminares para modelar a chama de um queimador tipo obstáculo e estudar o escoamento, a mistura e a estrutura da chama. O modelo de turbulência  $\kappa - \varepsilon$  foi empregado para descrever a turbulência, foram utilizadas para validar os resultados da modelagem as chamas HM1 e HM3, estudadas experimentalmente por Dally et al. [17]. O mecanismo utilizado para descrição da cinética química consta de 16 espécies e 40 etapas de reação (Warnatz). Os resultados mostram que a velocidade do jato de combustível exerce um efeito considerável sobre a estrutura do escoamento. A **figura 2.2.8** mostra a estrutura do escoamento obtida para as duas chamas estudadas, os comportamentos das linhas de corrente são claramente diferentes.

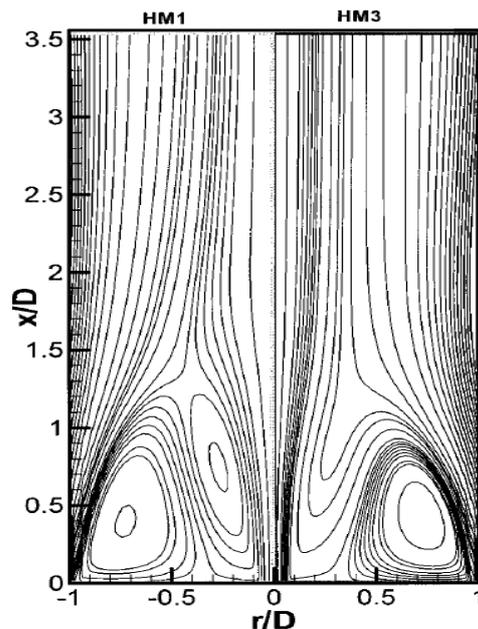


Figura 2.2.8 Linhas de corrente calculadas para os casos HM1 e HM3 [28].

Além disto, os resultados mostram que o modelo de elementos de chama é adequado para determinar a temperatura e a composição de  $H_2O$ ,  $CO_2$  e  $OH$  na zona de recirculação. Entretanto, este modelo não é capaz de prever corretamente as extinções locais na zona de garganta.

Merci et al. [29] estudaram numericamente uma chama turbulenta tipo jato estabilizada a jusante de um corpo rombudo. A interação entre turbulência e combustão é modelada com uma equação de transporte para PDF conjunta de velocidade, de frequência turbulenta e das frações mássicas das espécies químicas, como proposto por Kai et al. [26]. Merci et al. [29] consideram as propriedades termoquímicas como variáveis independentes na PDF, utilizando-se para sua solução uma técnica lagrangeana. É aplicado um modelo de turbulência de segunda ordem para o fechamento dos tensores de Reynolds, é também aplicado um modelo químico detalhado [30]. São comparados os resultados obtidos com diferentes modelos de mistura, isto é, um modelo baseado em árvores euclidianas [31] e o modelo de Curl modificado [32]. Os resultados obtidos colocam em evidência que a escolha do modelo de mistura influencia a presença de extinções locais na chama.

Na **figura 2.2.9** mostra-se as evoluções radiais das componentes longitudinal e radial média na posição  $x=0.2D_b$  onde  $D_b$  é o diâmetro de corpo rombudo, igual a 50mm. Esta posição encontra-se na zona de recirculação.

Note-se que não é observada uma diferença significativa entre os resultados com os modelos de mistura empregados no tocante à dinâmica do escoamento.

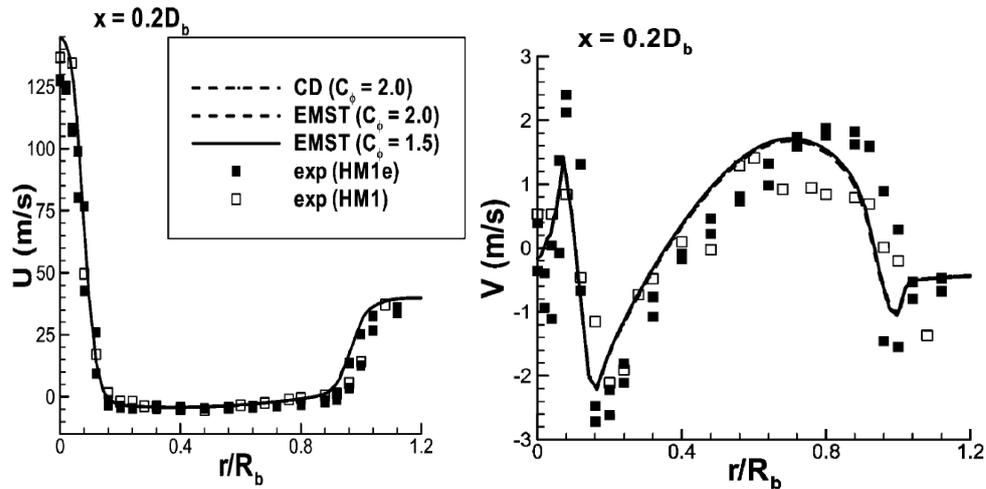


Figura 2.2.9 Evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade média [29].

Na figura 2.2.10 mostra-se a variância das flutuações da fração de mistura e da temperatura em uma região localizada a jusante da zona de recirculação. É observada uma diferença notória entre as previsões alcançadas com os diferentes modelos de mistura. Em todos os casos, o valor calculado da variância da fração de mistura é superior aquele obtido experimentalmente, o que acarreta a respectiva super-estimação no cálculo da variância da temperatura.

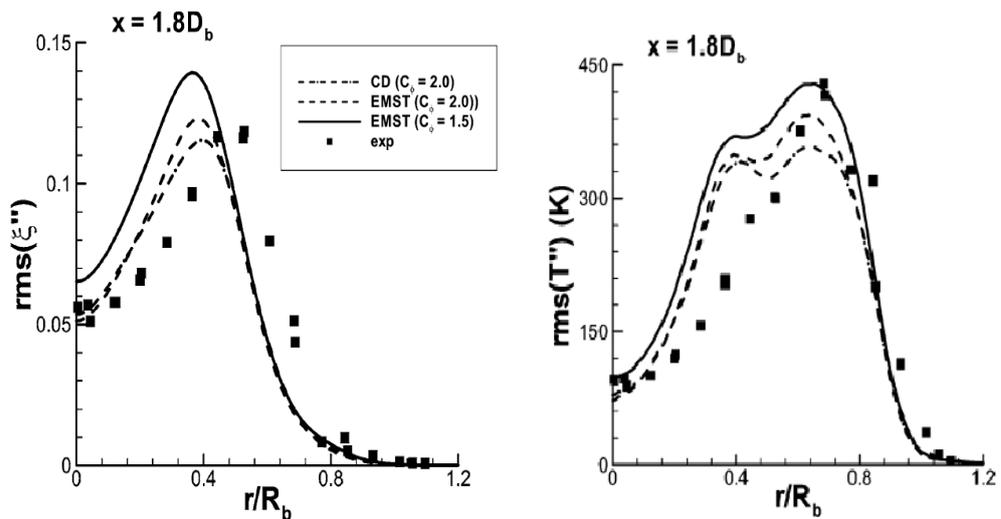


Figura 2.2.10 Evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade média na posição  $x=1.8D_b$ , posição fora da zona de recirculação [29].

### 2.3. Influência da escolha dos modelos de turbulência na predição da combustão turbulenta

Inge et al. [33] apresentam um trabalho onde se estuda a influência dos modelos de turbulência na predição da combustão em escoamento turbulento. Os dados experimentais que serviram para realizar as comparações foram obtidos por Correa e Gulati [7]. O domínio computacional possui dimensão longitudinal de 174,9 mm e radial de 19,08 mm. O combustível utilizado é uma mistura de CO/H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, a velocidade do jato de combustível é de 80 m/s, e do ar anular de 6,5 m/s. Os modelos empregados para o fechamento dos fluxos turbulentos são:

- a) O modelo  $\kappa-\varepsilon$  padrão para escoamentos com alto número de Reynolds [34],
- b) Um modelo de tensor de Reynolds (RSM) para alto número de Reynolds (modelo básico) [35],
- c) O modelo  $\kappa-\varepsilon$  para baixo número de Reynolds desenvolvido por Launder e Sharma [36],
- d) O modelo RSM para baixo número de Reynolds desenvolvido por Kebede et al. [37].

Dois modelos de combustão foram empregados:

- a) Modelo com uma PDF presumida, utilizando a hipótese de reação química rápida.
- b) Modelo baseado no conceito de dissipação de turbilhão (EDC).

Os resultados obtidos não são significativamente afetados pela escolha realizada das condições de contorno de entrada do ar anular e pela posição da parede externa que limita o domínio de cálculo. Os diferentes tratamentos empregados perto da parede do corpo rombudo nos modelos de baixo número de Reynolds também não influenciam os resultados obtidos. Na **figura 2.3.1** mostra-se a evolução longitudinal na linha do centro do queimador da média de Favre da fração de mistura,  $\tilde{f}$ , obtida quando é empregado o modelo de combustão baseado no conceito de dissipação de turbilhão, e os diferentes modelos de turbulência utilizados. Os resultados obtidos com o modelo  $\kappa-\varepsilon$  exibem um rápido decréscimo da fração de mistura, enquanto que o modelo RSM resulta no melhor acordo com os dados Raman [7]. As diferenças observadas no tocante à taxa de decaimento de  $\tilde{f}$  com a distância foram atribuídas ao comportamento de cada modelo na zona de recirculação.

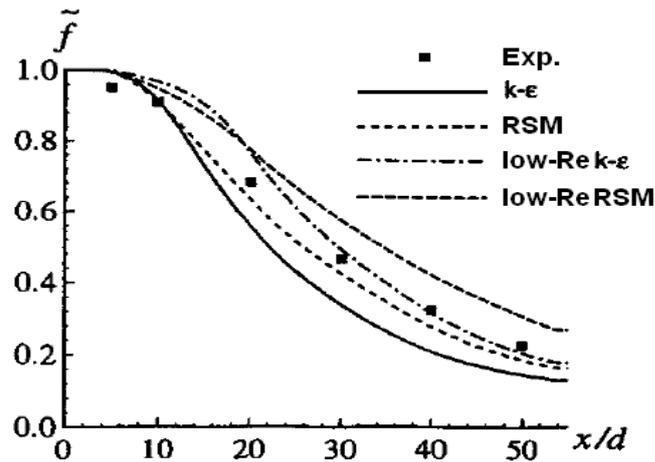


Figura 2.3.1 Evolução longitudinal na linha central do queimador da média da fração de mistura [33], influência dos diferentes modelos de turbulência considerados.

Yan et al. [38] avaliam a utilização de diferentes modelos de turbulência em chamas de difusão turbulenta quando o processo químico é descrito pelo modelo de elementos de chama. Os modelos de turbulência empregados são:

- Modelo  $\kappa - \varepsilon$  padrão [34].
- Modelo tensor algébrico explícito (EASM) [39].
- Modelo com variação anisotrópica do parâmetro  $C_\mu$  (LEA  $\kappa - \varepsilon$ ).

Na **figura 2.3.2** apresenta-se um esquema da configuração do domínio computacional utilizado para o cálculo da chama estabilizada por um corpo rombudo na configuração conhecida como “Sydney/Sandia” [40].

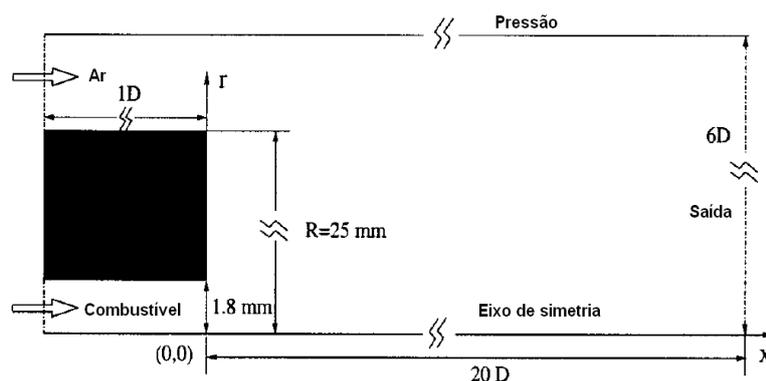


Figura 2.3.2 Domínio computacional da configuração “Sydney/Sandia” [38].

Estes modelos de turbulência são aplicados, inicialmente ao caso inerte, demonstrando a sua capacidade em reproduzir os resultados experimentais. Em seguida, são usados em simulações de chamas turbulentas estabilizadas por um corpo rombudo. Os resultados numéricos foram comparados com os valores experimentais da fração de mistura, campo de velocidade, temperatura e das

frações mássicas. Os resultados obtidos mostram que existe uma forte dependência do tipo de modelo usado e indicam que os modelos EASM e LEA  $\kappa-\varepsilon$  possuem melhor desempenho que o modelo  $\kappa-\varepsilon$  padrão. De forma a ilustrar as diferenças das predições entre os diferentes modelos se mostra, na **figura 2.3.3**, a evolução da componente longitudinal da velocidade média (i) na posição  $x/D=0.1$ , onde  $D$ =diâmetro do corpo rombudo, que corresponde a uma localização dentro da zona de recirculação e (ii) na posição  $x/D=1.8$ , que se encontra localizada na zona a jusante da recirculação. Observa-se que os diferentes modelos de turbulência não apresentam diferenças na zona de recirculação, porém, na zona mais a jusante, a escolha do modelo é determinante na qualidade da predição.

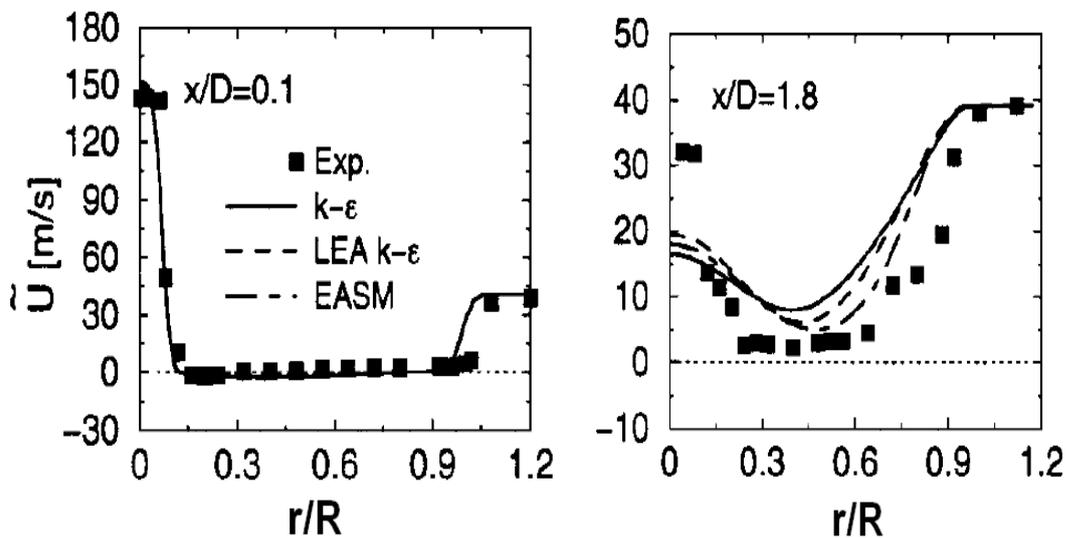


Figura 2.3.3 Comparações dos perfis de velocidade longitudinal com dados experimentais, nas posições  $x/D=0.1$  e  $x/D=1.8$  [38].