

5 Análise de Resultados e discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas partes numérica e experimental do presente trabalho. A análise e discussão dos resultados será dividida em duas etapas. Assim, na primeira etapa serão avaliados os resultados obtidos com o CFX-10 para caracterizar a dinâmica do escoamento de um queimador tipo obstáculo em situações quimicamente inerte e reativa por comparação com dados experimentais encontrados na literatura [6]. Serão estudados os efeitos das escolhas dos modelos de turbulência e de combustão sobre a caracterização aerodinâmica do escoamento estudado. Os melhores resultados obtidos na simulação servirão de base para modelar os regimes de combustão do experimento desenvolvido na segunda etapa deste trabalho.

5.1 Comparações com os resultados experimentais de Schefer et al. [6]

Nesta primeira etapa será apresentada a caracterização aerodinâmica do escoamento, nos casos quimicamente inerte e reativo de um queimador tipo obstáculo, tomando como base de comparação o trabalho experimental de Schefer et al.[6]. Para a realização do trabalho utiliza-se a ferramenta computacional CFX-10, com a qual modela-se um escoamento, no caso inerte, utilizando-se três diferentes malhas computacionais, quatro modelos de turbulência tipo RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) e três diferentes tipos de condição de contorno de entrada. A combinação de malha, modelo e condição de entrada que melhor representa o escoamento é escolhido para o estudo do escoamento reativo. No caso em presença de combustão, se aplicam dois modelos de combustão, os quais são o modelo EDM (*eddy dissipation model*) e modelo de elementos de chama (*Flamelet*), com a finalidade de determinar aquele que melhor representa a chama turbulenta não pré-misturada.

5.1.1 Escoamento inerte

No escoamento quimicamente inerte do trabalho de Schefer et al.[6] foram encontradas duas zonas de recirculação como mostrado na **figura 5.1.1.1**, as quais envolvem dois pontos de estagnação localizados no eixo de simetria do queimador na vizinhança da saída do combustível sendo esta estrutura do escoamento a que se procura reproduzir neste estudo. Num primeiro momento é investigado o efeito da escolha da malha computacional sobre o resultado obtido. A **tabela 5.1.1.1** resume os modelos e condições de contorno adotadas.

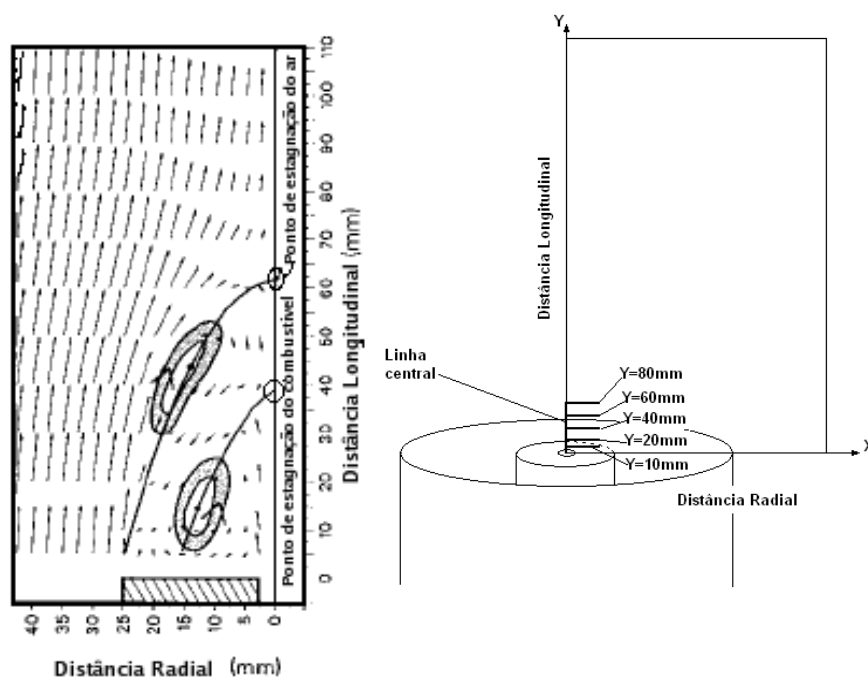


Figura 5.1.1.1 Campo de vetores do escoamento quimicamente inerte obtidos por Schefer et al. [6].

Os **casos 1 e 2** correspondem às duas primeiras malhas, mostradas no capítulo 3 deste trabalho, cuja diferença é a base do elemento central das mesmas, respectivamente triangular e trapezoidal. Na **figura 5.1.1.2** mostra-se a comparação entre os resultados experimentais e da modelagem para os casos 1 e 2 da componente longitudinal da velocidade ao longo da linha central. Pode-se observar nesta figura que a caracterização qualitativa da componente longitudinal da velocidade é razoavelmente representada, mostrando, em particular, a existência dos dois pontos de estagnação.

Tabela 5.1.1.1 Principais características dos casos 1 e 2, escoamento inerte.

Caso	Malha		Modelo de Turbulência	Condições de entrada na zona do combustível		Condições de entrada na zona de ar anular	
Nº				Massa e Momentum	Turbulência	Massa e Momentum	Turbulência
1	1	—	$\kappa-\epsilon$	Velocidade Normal=21 m/s	Baixa (intensidade=1%)	Velocidade Normal=25 m/s	Baixa (intensidade=1%)
2	—	2	$\kappa-\epsilon$	Velocidade Normal=21 m/s	Baixa (intensidade=1%)	Velocidade Normal=25 m/s	Baixa (intensidade=1%)

Os resultados mostrados na **figura 5.1.1.2** permitem verificar que a diferença entre as duas malhas não tem influência significativa na evolução longitudinal da velocidade obtida. Os pontos de estagnação fornecidos pelos dados experimentais situam-se a 40 e 70mm da face do queimador. Nestas primeiras simulações foram obtidos pontos de estagnação cujos valores das posições longitudinais são 20% e 10% inferiores em relação aos valores experimentais.

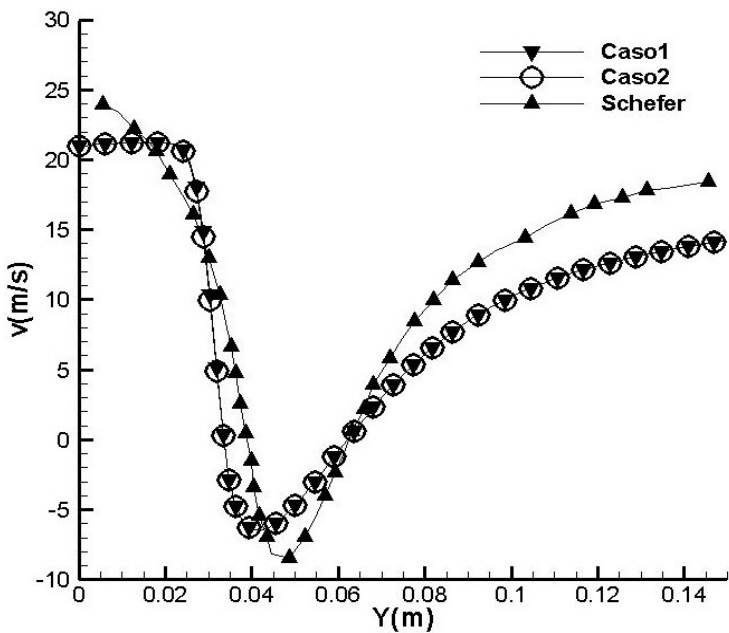


Figura 5.1.1.2 Componente longitudinal da velocidade ao longo da linha central do queimador comparação entre os casos 1 e 2 e os resultados experimentais.

Na **figura 5.1.1.3** se apresenta a evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade nas linhas $Y=10$ mm e 40 mm. Estas posições foram escolhidas por representarem situações no interior da região de

recirculação, mas com uma forte presença do jato de combustível, e no início da região de esteira, a jusante da zona de recirculação. Resultados experimentais existem para outras posições longitudinais, mas sua comparação com os resultados da modelagem não acrescenta informações suplementares. Nesta figura é possível constatar que os resultados obtidos com as duas malhas são idênticos.

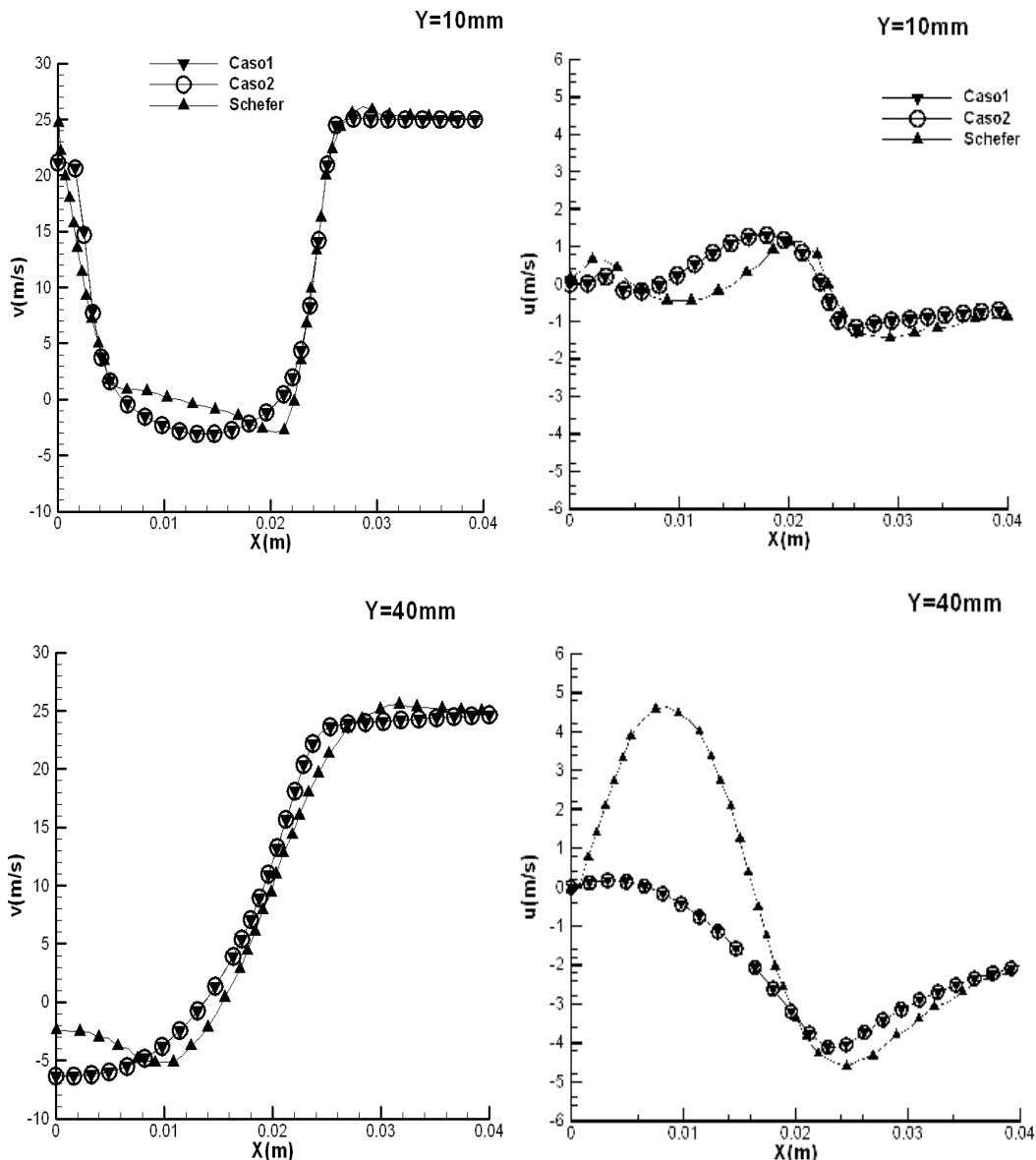


Figura 5.1.1.3 Evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade para $Y=10$ e 40 mm, escoamento inerte.

Assim, pode ser concluído que, para o nível de refinamento de malha adotado, a forma do elemento de malha vizinho a $X=0$ não influi sobre os resultados obtidos. Porém, discrepâncias na representação da velocidade entre a modelagem e os dados experimentais são apreciáveis. Em particular, (i)

$Y=10\text{mm}$ o espalhamento do jato calculado é menor do que nos experimentos e (ii) Para $Y=40\text{mm}$, o déficit de velocidade na vizinhança $X=0$ é incorretamente previsto pela modelagem. Como será mostrado mais adiante, estas discrepâncias serão reduzidas com uma escolha mais adequada de modelo de turbulência e de condição de contorno de entrada.

A malha 3, descrita no capítulo 3 do presente trabalho, foi usada para obter os resultados do caso 4 (o caso 3 pertence a um grupo de resultados que será examinado mais adiante), cujas características principais são mostradas na **tabela 5.1.1.2**. Esta malha é caracterizada por um maior refinamento na zona de recirculação e por uma menor dimensão longitudinal do domínio de cálculo. Os resultados mostrados na **figura 5.1.1.4** comparam as evoluções longitudinais da componente longitudinal da velocidade obtidas com as malhas 2 e 3 e os experimentos. Esta figura mostra que os pontos de estagnação são reproduzidos com uma melhor aproximação, reduzindo a 10% a diferença com os dados experimentais para o ponto de estagnação a montante enquanto que para o segundo ponto de estagnação ocorre um aumento a 11% da sua posição longitudinal, em comparação aos resultados obtidos com a malha 2.

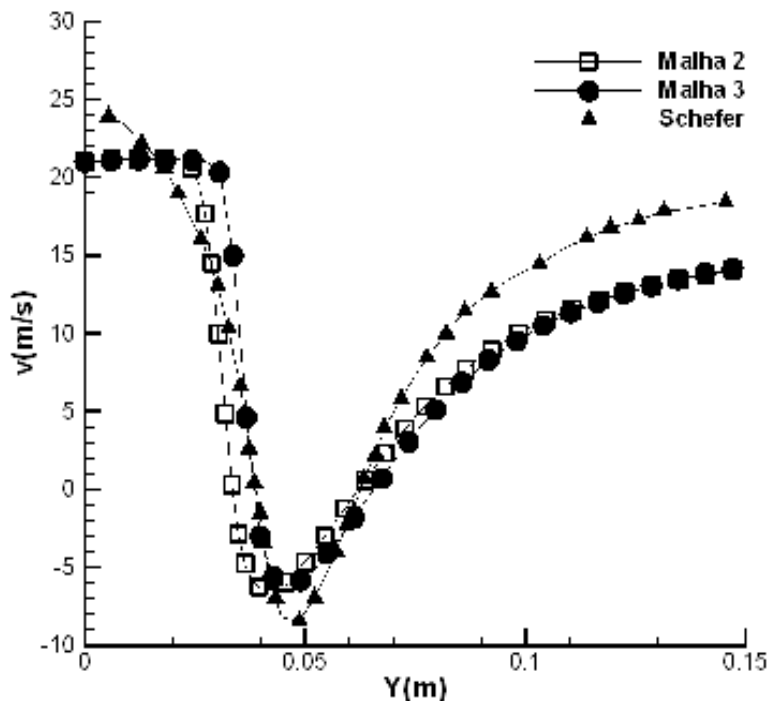


Figura 5.1.1.4 Representação da componente longitudinal da velocidade na linha central para as malhas 2 e 3 comparada aos dados experimentais da literatura [6].

Também cabe ressaltar que, após a região de escoamento reverso, os resultados apresentam uma esteira na qual a velocidade é inferior àquela obtida

experimentalmente. A **figura 5.1.1.5** mostra, para as malhas 2 e 3, a evolução das componentes longitudinal e radial da velocidade ao longo de duas linhas radiais situadas a 10 e 40 mm da face do queimador. Esta figura mostra que, muito embora um melhor acordo tenha sido obtido com a malha 3 no tocante à localização dos pontos de estagnação, a velocidade na vizinhança do queimador não apresenta uma melhora significativa na representação dos dados experimentais. Porém, uma melhora no acordo entre modelagem e experimento é observada em $Y=40\text{mm}$ na vizinhança de $X=0$.

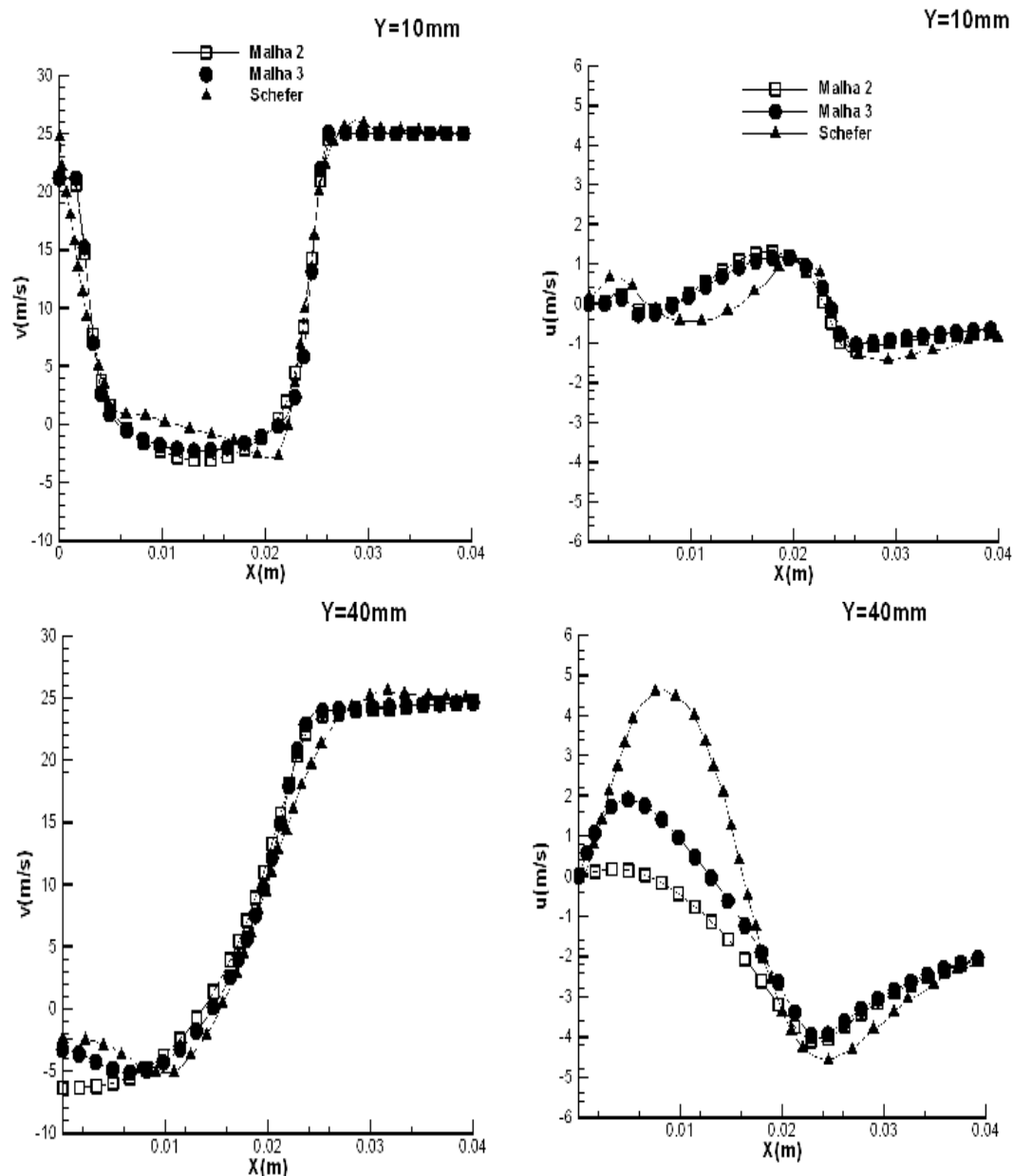


Figura 5.1.1.5 Evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade para as malhas 2 e 3 em duas linhas horizontais, $Y=10\text{mm}$, e $Y=40\text{mm}$.

Um estudo da sensibilidade do resultado calculado ao refinamento da malha não foi realizado. Entretanto, baseado na experiência adquirida, acredita-se que as malhas utilizadas são suficientes para a descrição do escoamento com os modelos utilizados. Uma vez que não foi observada diferença considerável entre as duas malhas empregadas inicialmente neste trabalho, e que uma grande discrepância entre modelagem e experimento no decaimento inicial do jato pode ser verificada nas **figuras 5.1.1.2 e 5.1.1.3**, decidiu-se estudar a influência das condições de entrada empregadas sobre a velocidade na zona de recirculação sobre o decaimento da velocidade ao longo da linha de centro. Uma discrepância sistemática entre todos os resultados de cálculo e os experimentos é a previsão incorreta da evolução radial da componente longitudinal da velocidade, o que pode ser observado, por exemplo, na **figura 5.1.1.5** para $Y=10\text{mm}$ e $5 \leq X \leq 25\text{mm}$. Esta discrepância pode ser atribuída à natureza anisotrópica das tensões turbulentas, a qual não pode ser restituída pelos modelos de turbulência empregados e necessitaria a utilização de modelos de segunda ordem, o que encontra-se fora do escopo deste trabalho. Assim, nos demais resultados aqui apresentados não será explorada esta discrepância.

Tabela 5.1.1.2 Descrição dos parâmetros empregados no caso 3, 4, 5, e 6 do escoamento inerte com diferentes modelos de turbulência.

Caso	Malha	Modelo de Turbulência	Condições de entrada na zona do combustível		Condições de entrada na zona de ar anular	
			Massa e Momentum	Turbulência	Massa e Momentum	Turbulência
3	3	SST	Velocidade Normal=21 m/s	Baixa (intensidade=1%)	Velocidade Normal=25 m/s	Baixa (intensidade=1%)
4	3	$\kappa-\epsilon$	Velocidade Normal=21 m/s	Baixa (intensidade=1%)	Velocidade Normal=25 m/s	Baixa (intensidade=1%)
5	3	RNG	Velocidade Normal=21 m/s	Baixa (intensidade=1%)	Velocidade Normal=25 m/s	Baixa (intensidade=1%)
6	3	$\kappa-\omega$	Velocidade Normal=21 m/s	Baixa (intensidade=1%)	Velocidade Normal=25 m/s	Baixa (intensidade=1%)

Com o intuito de estudar a influência do modelo de turbulência sobre a previsão da velocidade média, dois conjuntos de simulações foram realizados. Nestes, quatro modelos de turbulência foram testados para dois tipos de

condição de contorno de entrada. Os principais parâmetros correspondentes a estes encontram-se nas **tabelas 5.1.1.2 e 5.1.1.3**, aonde são mostrados os casos de entrada uniforme e prescrita sob a forma de lei de potencia, respectivamente.

Nos **casos 3, 4, 5 e 6** utilizam-se as mesmas condições que nos casos 1 e 2. A componente longitudinal da velocidade ao longo da linha central do queimador correspondente, nestes casos é mostrada na **figura 5.1.1.6**.

Nesta figura observa-se que o modelo κ - ϵ RNG não consegue representar corretamente a velocidade do escoamento, pois o decaimento do jato calculado é muito mais lento do que observado experimentalmente e os pontos de estagnação encontram-se, conseqüentemente, mais a jusante do que o observado nos experimentos. Na **figura 5.1.1.6** também é mostrado que o modelo κ - ϵ e SST possuem uma melhor representação do escoamento quando comparados aos modelos κ - ϵ RNG e κ - ω , sendo que o modelo κ - ϵ é aquele que melhor consegue aproximar a localização dos pontos de estagnação.

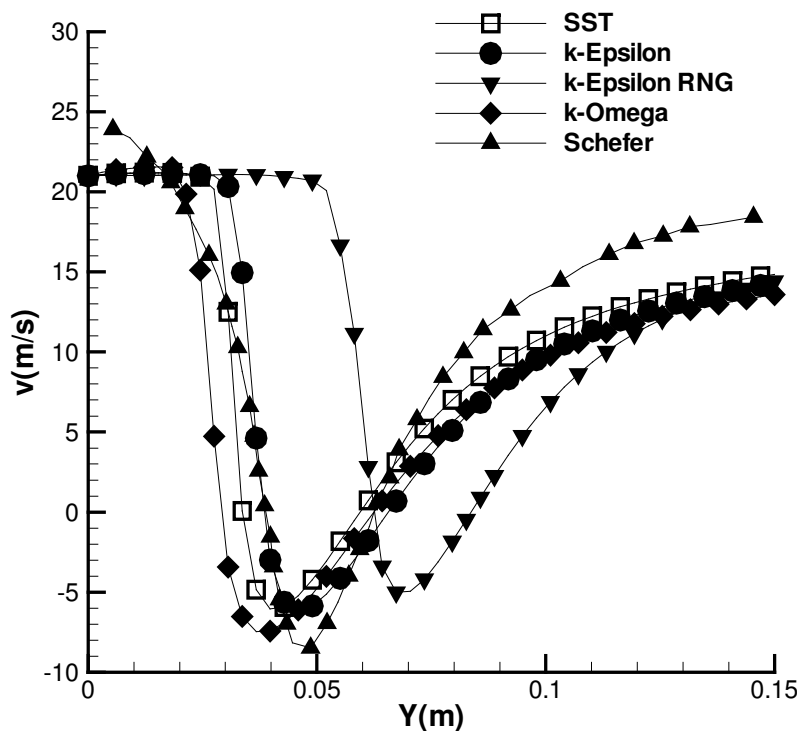


Figura 5.1.1.6 Representação da componente longitudinal da velocidade na linha central com os modelos de turbulência SST, κ - ϵ , RNG e κ - ω comparada aos dados experimentais da literatura [6].

As componentes longitudinal e radial da velocidade nas linhas $Y=10\text{mm}$ e $Y=40\text{mm}$ são mostradas na **figura 5.1.1.7**. Nesta figura, na posição $Y=10\text{mm}$ não é observada nenhuma diferença significativa entre os modelos empregados, os quais não conseguem fornecer uma boa representação da componente

longitudinal da velocidade na vizinhança da linha de centro. Mais a jusante, isto é, para $Y=40\text{mm}$, o modelo $\kappa-\epsilon$ é aquele que apresenta melhor acordo com os dados experimentais, seguido dos modelos SST, $\kappa-\omega$ e, por último, o modelo $\kappa-\epsilon$ RNG. Uma vez que a deficiência comum aos resultados apresentados nas **figuras 5.1.1.1 até 5.1.1.6** é a representação do decaimento e do espalhamento inicial do jato de combustível, procura-se obter uma representação mais adequada das condições de entrada no domínio de cálculo do que velocidade constante.

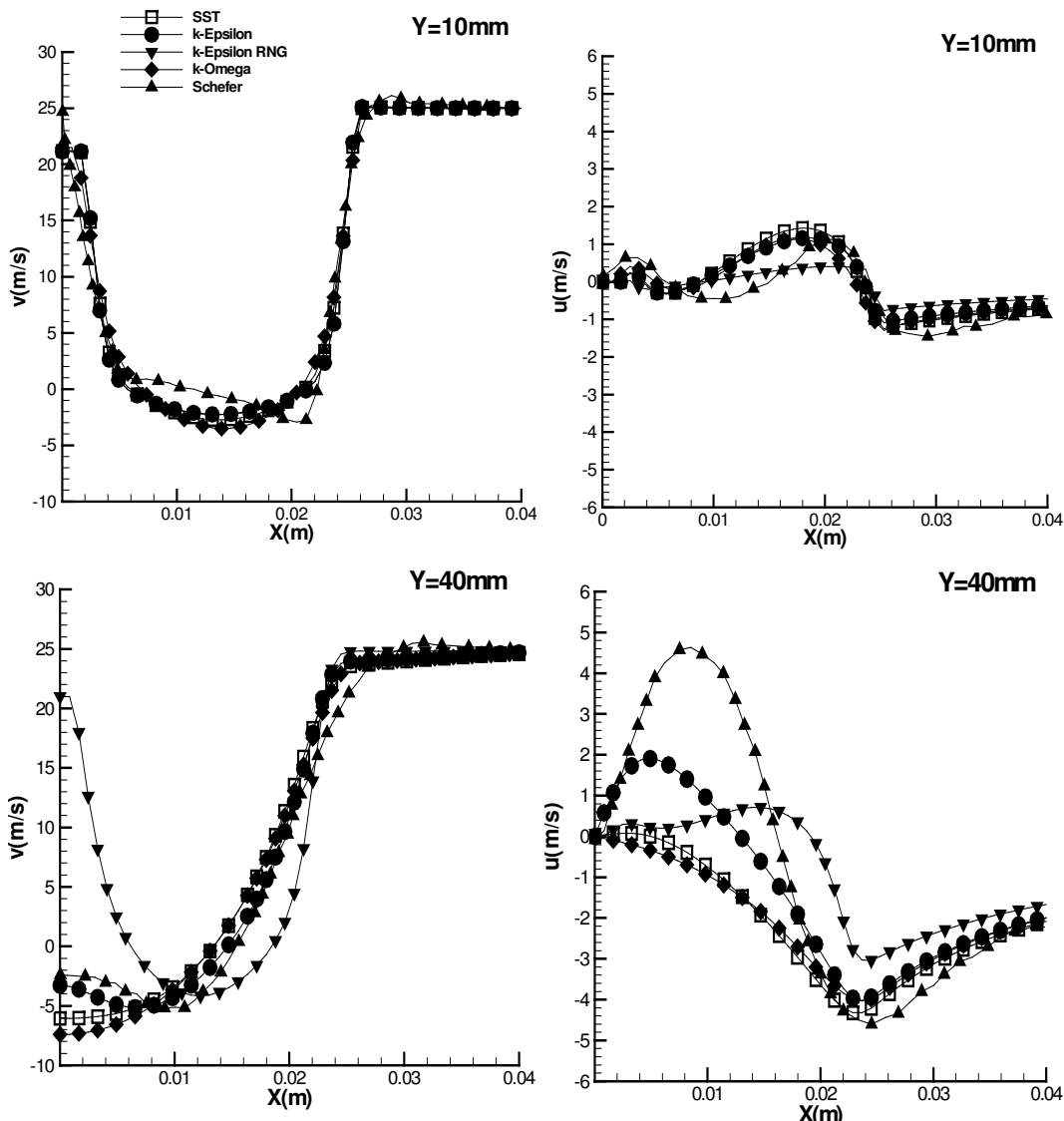


Figura 5.1.1.7 Evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade para os casos 3, 4, 5 e 6 em duas linhas horizontais, $Y=10\text{mm}$, e $Y=40\text{mm}$.

Na **tabela 5.1.1.3** apresenta-se a configuração dos **casos 7 e 8**, nos quais foram empregados dois expoentes para lei de potência da velocidade média do jato central ($1/5$ e $1/6$) e dois expoentes para velocidade do anular ($1/7$ e $1/50$). Além disso, conforme o descrito no capítulo 3, foi introduzida uma prescrição do

parâmetro de intensidade turbulenta e da escala de comprimento característica da turbulência baseada no trabalho de Correa e Gulati [7]. Os resultados correspondentes à evolução longitudinal e radial da velocidade média são mostrados nas **figuras 5.1.1.8 e 5.1.1.9**, respectivamente.

Tabela 5.1.1.3 Descrição dos parâmetros empregados no caso 7 e 8 do escoamento inerte com o modelo SST, intensidade turbulenta e escala de comprimento baseado no trabalho de Correa e Gulati [7].

Caso	Malha	Modelo de Turbulência	Condições de entrada na zona do combustível		Condições de entrada na zona de ar anular	
N°			Massa e Momentum	Turbulência	Massa e Momentum	Turbulência
7	3	SST	Vel. Normal=Perfil jato central (Perfil Turbulento 1/5)	Intensidade e Escala de compri. Int.=0.005. Escala de compri=0.000162 (Correa)	Vel. Normal=Perfil zona anular (Perfil Turbulento 1/7)	Baixa (intensidade=1%)
8	3	SST	Vel. Normal=Perfil jato central (Perfil Turbulento 1/6)	Intensidade e Escala de compri. Int.=0.005. Escala de compri=0.000162 (Correa)	Vel. Normal=Perfil zona anular (Perfil Turbulento 1/50)	Baixa (intensidade=1%)

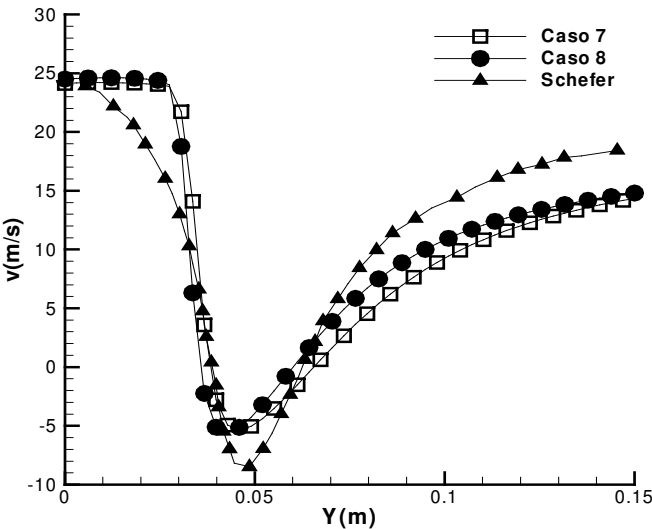


Figura 5.1.1.8. Representação da componente longitudinal da velocidade na linha central com o modelo de turbulência SST dos casos 10 e 11, comparada aos dados experimentais da literatura [6]

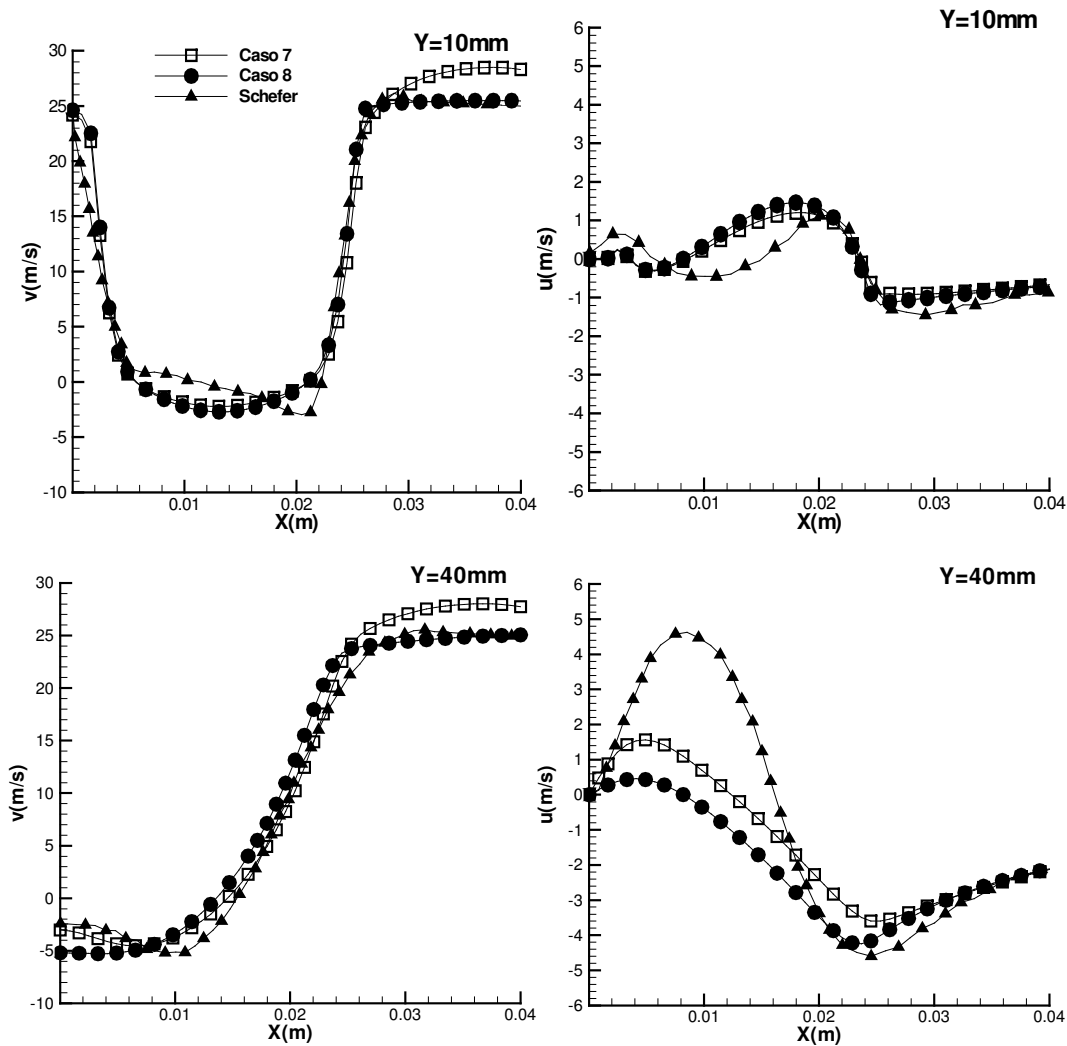


Figura 5.1.1.9 Evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade para os casos 7 e 8 em duas linhas horizontais, $Y=10\text{mm}$, e $Y=40\text{mm}$.

A comparação dos resultados obtidos mostra que a escolha do expoente $1/5$ para a lei de potência da velocidade média leva a uma melhor predição do ponto de estagnação. Por conseguinte, uma melhor distribuição da velocidade em $Y=40\text{mm}$ é obtida para o caso 7. Entretanto, o decaimento inicial do jato permanece sendo mais rápido, nos experimentos, do que nos cálculos em ambos os casos. Estas figuras também permitem verificar que o expoente $1/50$ para a lei de potência da velocidade do ar anular leva a um melhor acordo entre os déficits de velocidade e a posição do segundo ponto de estagnação e calculados e os resultados experimentais do que a escolha de expoente $1/7$. Além disto, a aceleração longitudinal do escoamento após a região de recirculação ao longo de $X=0$ é mais próxima dos experimentos no caso do expoente $1/50$.

Na **tabela 5.1.1.4** apresenta-se a configuração dos casos 9 e 10 nas quais foram utilizados dois expoentes para lei de potência da velocidade média

do jato central (1/5 e 1/6) e velocidade do ar anular constante e igual a 25m/s. Os casos apresentados aqui possuem as mesmas características da turbulência que os casos 7 e 8. Os resultados correspondentes à evolução longitudinal e radial da velocidade média são mostrados nas **figuras 5.1.1.10 e 5.1.1.11**, respectivamente.

Tabela 5.1.1.4 Descrição dos parâmetros empregados no caso 9 e 10 do escoamento inerte com o modelo κ - ϵ , intensidade turbulenta e escala de comprimento baseado no trabalho de Correa e Gulati [7].

Caso	Malha	Modelo de Turbulência	Condições de entrada na zona do combustível		Condições de entrada na zona de ar anular	
Nº			Massa e Momentum	Turbulência	Massa e Momentum	Turbulência
9	3	κ - ϵ	Vel. Normal=Perfil jato central (Perfil Turbulento 1/5)	Intensidade e Escala de compri. Int.=0.005. Escala de compri=0.000162 (Correa)	Vel. Normal=25m/s	Baixa (intensidade=1%)
10	3	κ - ϵ	Vel. Normal=Perfil jato central (Perfil Turbulento 1/6)	Intensidade e Escala de compri. Int.=0.005. Escala de compri=0.000162 (Correa)	Vel. Normal=25m/s	Baixa (intensidade=1%)

A comparação dos resultados obtidos mostra que com a velocidade constante de 25 m/s na zona anular se consegue uma aproximação tão boa como a alcançada com a lei de potência com expoente 1/50. Além disso, na figura 5.1.1.10 é mostrado que, com a mudança do modelo de turbulência, se consegue uma melhor aproximação dos pontos de estagnação. A escolha do expoente 1/6 para a lei de potência da velocidade média leva a uma melhor predição do ponto de estagnação do que a utilização do expoente 1/5. Por conseguinte, uma melhor distribuição da velocidade em $Y=40\text{mm}$ é obtida para o caso 10. Entretanto, o decaimento inicial do jato permanece sendo mais rápido, nos experimentos, do que nos cálculos em ambos os casos. Além disto, a aceleração longitudinal do escoamento após a região de recirculação ao longo de $X=0$ é muito próxima dos experimentos no caso de velocidade constante do ar anular.

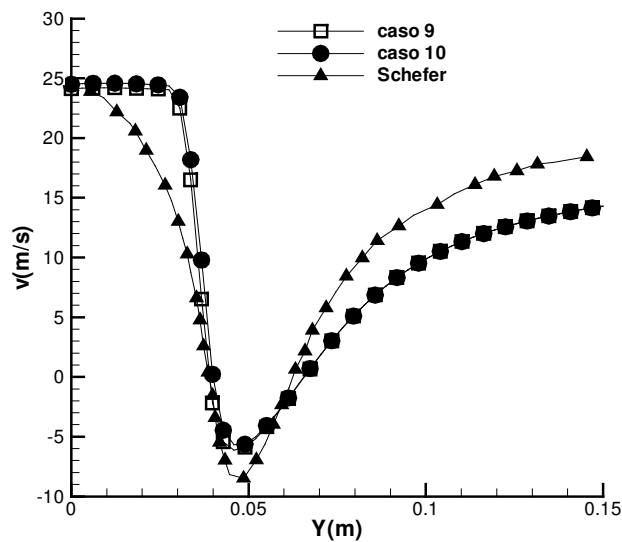


Figura 5.1.1.10 Representação da componente longitudinal da velocidade na linha central com o modelo de turbulência κ - ϵ dos casos 9 e 10, comparada aos dados experimentais da literatura [6]

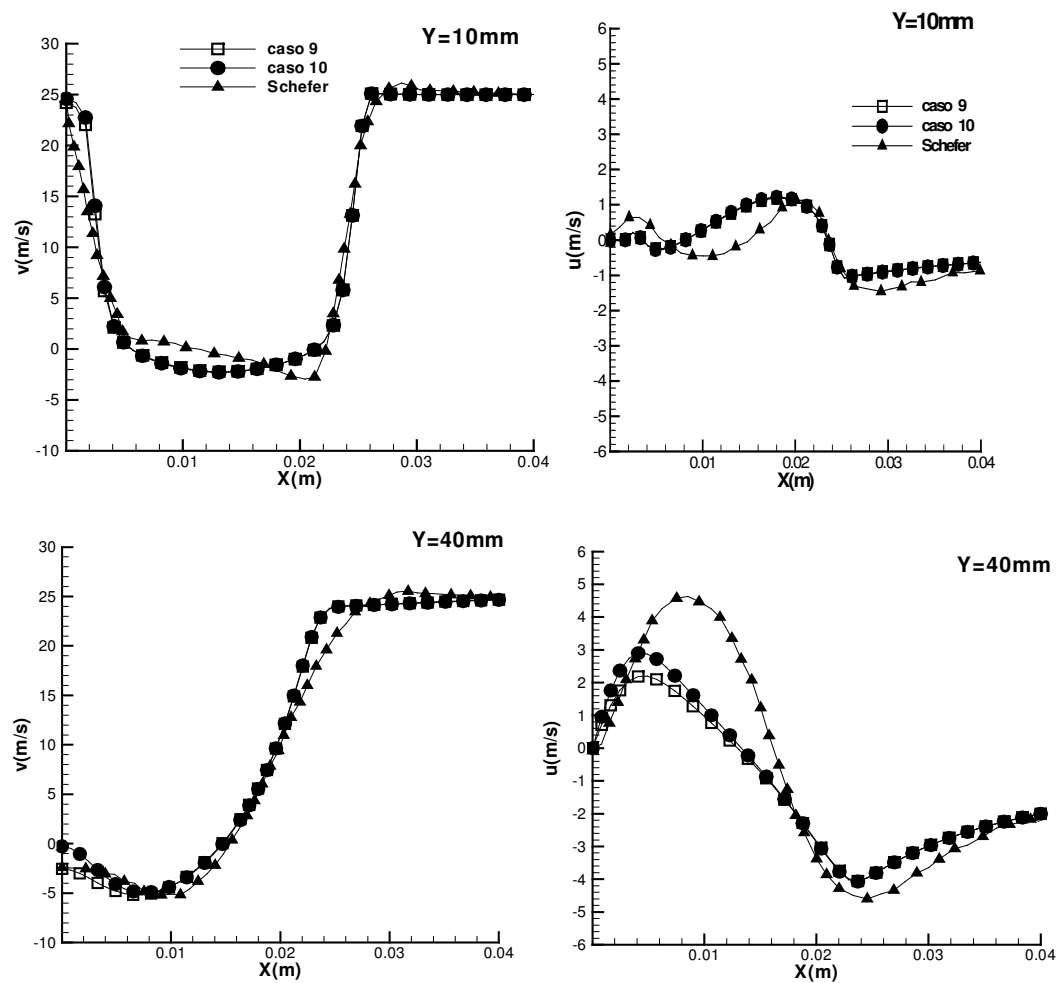


Figura 5.1.1.11 Evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade para os casos 9 e 10 em duas linhas horizontais, $Y=10\text{mm}$, e $Y=40\text{mm}$.

Por fim, os **casos 11, 12 e 13**, cujos parâmetros são apresentados na **tabela 5.1.1.5**, são destinados a avaliar a influência sobre o escoamento de outra escolha de prescrição de parâmetros turbulentos na fronteira do domínio de cálculo, a qual foi detalhada no capítulo 3.

Tabela 5.1.1.5. Descrição dos parâmetros empregados no caso 11, 12 e 13 do escoamento inerte com o modelo SST, intensidade turbulenta e escala de comprimento baseado no trabalho da Ansys [49]

Caso	Malha	Modelo de Turbulência	Condições de entrada na zona do combustível		Condições de entrada na zona de ar anular	
Nº			Massa e Momentum	Turbulência	Massa e Momentum	Turbulência
11	3	SST	Velocidade Normal=21 m/s	Intensidade e Taxa de dissipação viscosa (Flame D) Int.=TKI=u'/U Taxa dissipação viscosa=TVR=min (25,1000-TKI)	Velocidade Normal=25(m/s)	Baixa (intensidade=1%)
12	3	SST	Vel. Normal=Perfil jato central (Perfil Turbulento 1/5)	Intensidade e Taxa de dissipação viscosa (Flame D) Int.=TKI=u'/U Taxa dissipação viscosa=TVR=min (25,1000-TKI)	Vel. Normal=Perfil zona anular (Perfil Turbulento 1/50)	Baixa (intensidade=1%)
13	3	SST	Vel. Normal=Perfil jato central (Perfil Turbulento 1/6)	Intensidade e Taxa de dissipação viscosa (Flame D) Int.=TKI=u'/U Taxa dissipação viscosa=TVR=min (25,1000-TKI)	Vel. Normal=Perfil zona anular (Perfil Turbulento 1/50)	Baixa (intensidade=1%)

A **figura 5.1.1.12** apresenta a evolução longitudinal da velocidade na linha central. Com a presente escolha de condições de contorno para o jato, o decaimento inicial do jato é mais abrupto dentre todos os resultados obtidos. Assim, os pontos de estagnação encontram-se distantes de sua localização experimental, a maior discrepância sendo obtida no que diz respeito ao primeiro o ponto de estagnação. De modo análogo aos casos 7 e 8, a escolha da lei de potência para descrever a velocidade média do jato acarreta melhor

representação da componente longitudinal da velocidade do que a escolha da velocidade constante de 21m/s no jato central. Além disso, entre os casos 12 e 13, não é observada uma variação considerável.

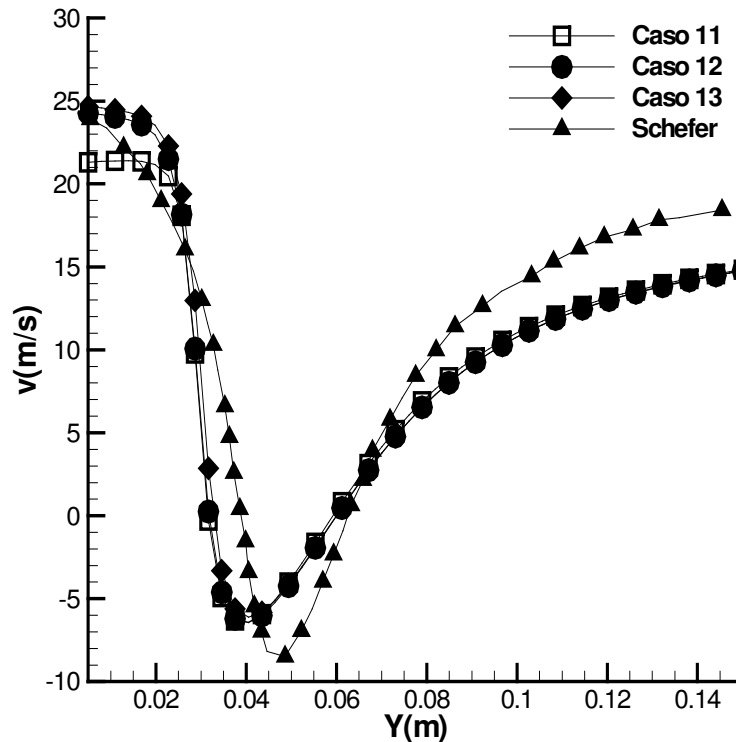


Figura 5.1.1.12 Representação da componente longitudinal da velocidade na linha central com o modelo de turbulência SST dos casos 11, 12 e 13, comparada aos dados experimentais da literatura [6]

Na figura 5.1.1.13 se apresenta a evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade para as linhas $Y=10$ e 40mm e para os casos 11, 12 e 13. Para os três casos simulados, apenas pequenas diferenças são observadas entre os três casos. Porém, uma vez que a posição dos pontos de estagnação não é corretamente prevista, nenhum dos resultados mostrados apresenta uma boa concordância com os experimentos na vizinhança da linha de centro para $Y=40\text{mm}$. Assim, baseado nas comparações apresentadas nesta seção, no restante deste trabalho a condição de contorno que será adotada para descrever a entrada jato no domínio de cálculo, para velocidade média, é a lei de potência com expoente $1/6$ e, para as quantidades turbulentas, a sugestão de Correa e Gulati[7] e o modelo de turbulência $\kappa-\varepsilon$.

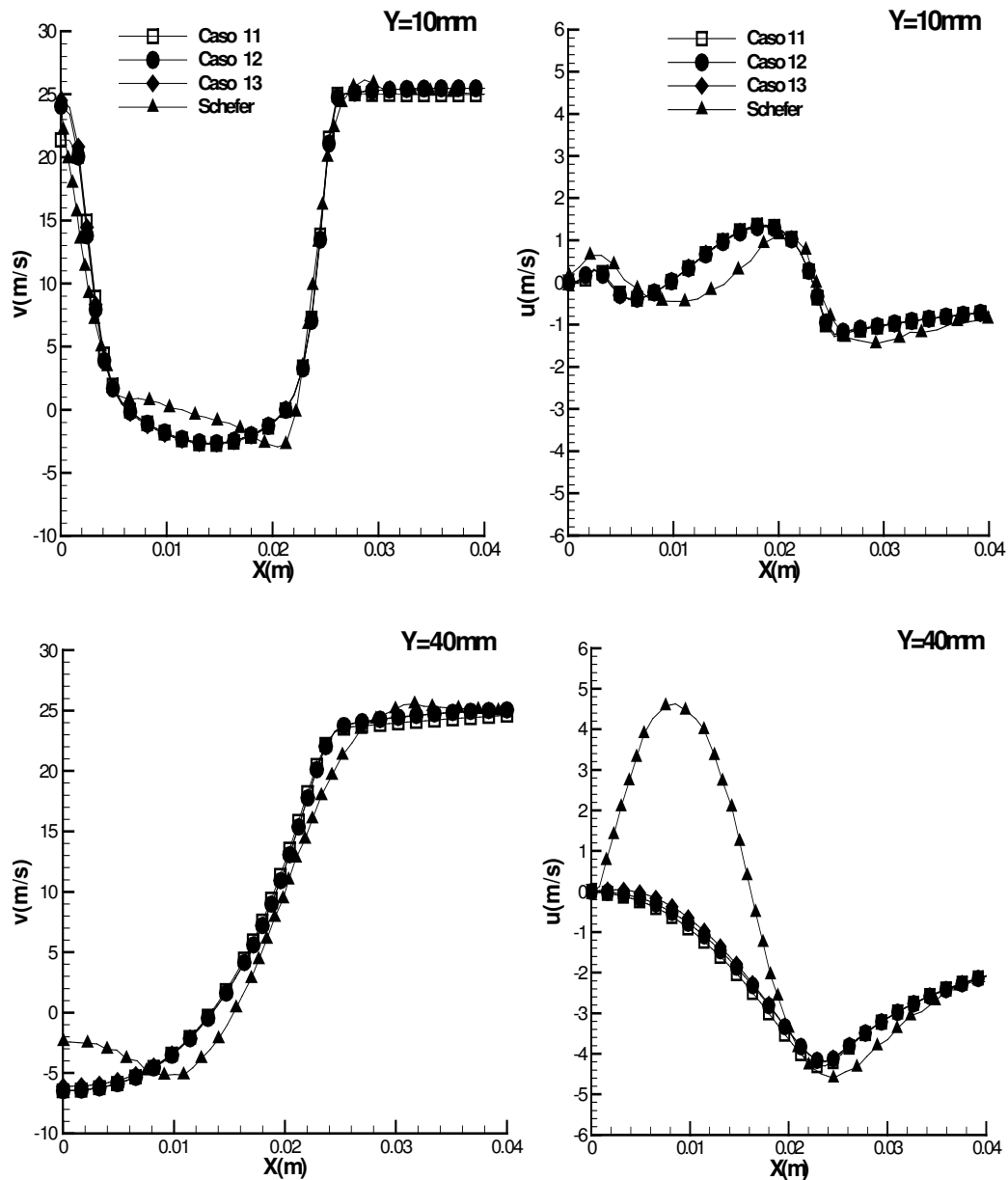


Figura 5.1.1.13 Evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade para os casos 11, 12 e 13 em duas linhas horizontais, $Y=10\text{mm}$, e $Y=40\text{mm}$.

Muito embora esta escolha não permita uma descrição adequada do decaimento inicial do jato observado experimentalmente é, dentre as condições de contorno testadas, aquela que melhor descreve os resultados experimentais. Testes recentes realizados [60] mostraram que uma descrição correta da interação entre o jato de combustível e a região de recirculação é possível apenas se for incluído na modelagem o canal de entrada do combustível.

5.1.2 Escoamento Reativo

No escoamento reativo estudado no trabalho de Schefer et al.[6] foram encontradas duas zonas de recirculação como mostrado na **figura 5.1.2.1**, as quais envolvem um ponto único de estagnação localizado no eixo de simetria do queimador na vizinhança da saída do combustível. Esta é a estrutura do escoamento que se procura reproduzir nesta seção.

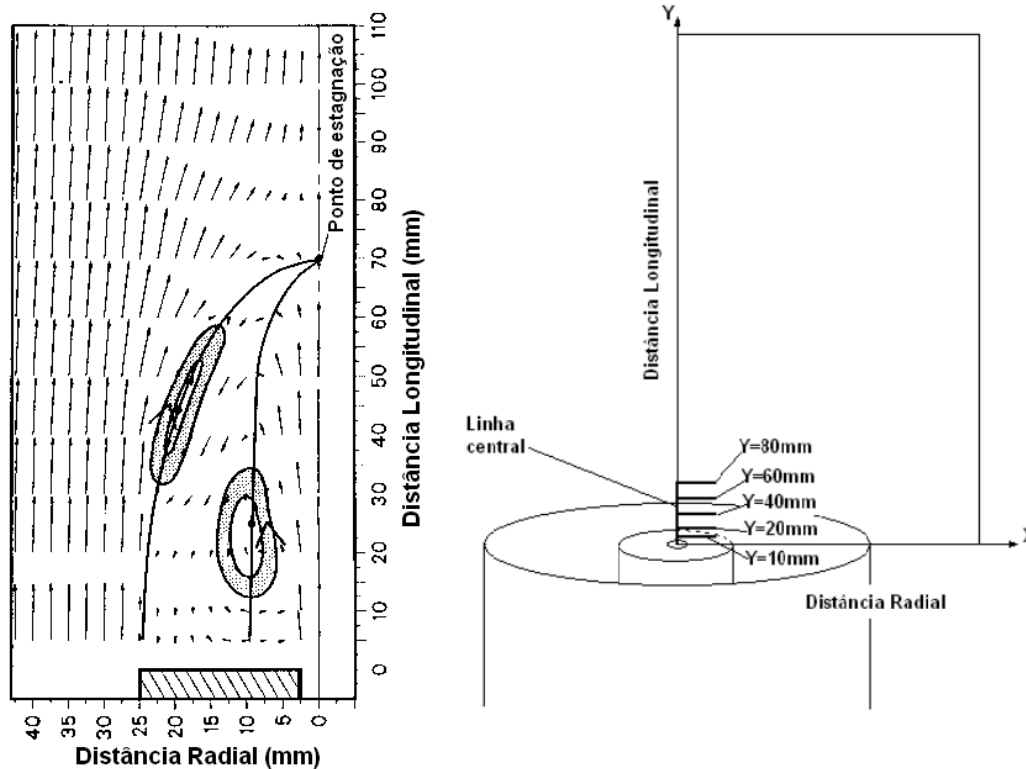


Figura 5.1.2.1 Campo de vetores do escoamento reativo obtidos por Schefer et al. [6].

A partir do estudo apresentado na seção 5.1.1 do escoamento quimicamente inerte se escolheu como melhores parâmetros para a modelagem os seguintes:

- Malha computacional utilizada : Malha 3
- Modelo de turbulência $\kappa-\epsilon$.
- Quantidades turbulentas a sugestão de Correa e Gulati [7].
- Lei de potência da velocidade média 1/6.
- Velocidade do ar anular constante=25m/s.

Não foi realizado um estudo da sensibilidade do resultado obtido ao nível de refinamento da malha. Admite-se que a malha computacional adequada para

o caso inerte, também o é para o caso reativo. Este ponto será estudado em trabalhos futuros. Utiliza-se agora, além destes parâmetros de turbulência e condições de contorno de entrada, dois modelos de combustão, o EDM (*Eddy Dissipation Modelo*) e o modelo de elementos de chama (Flamelet) para o escoamento reativo.

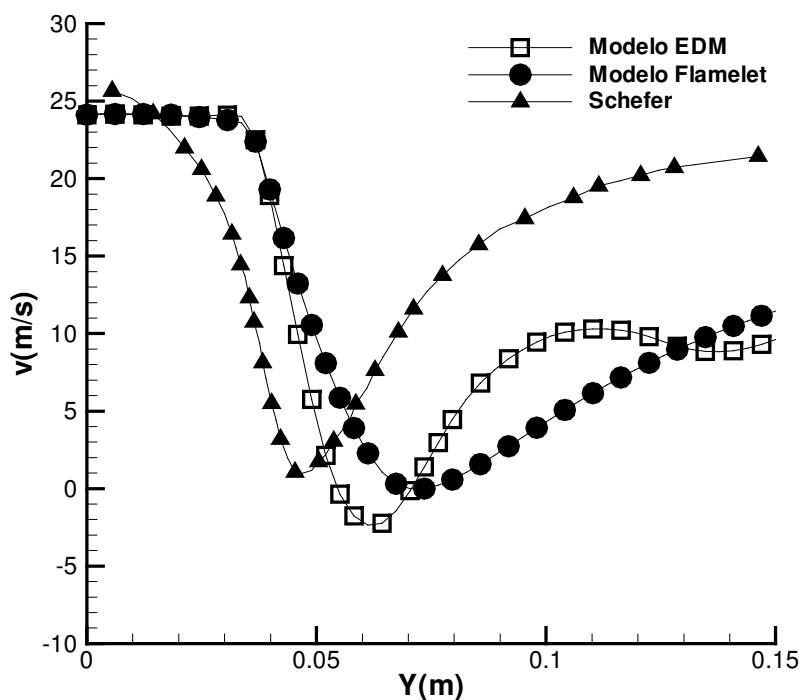


Figura 5.1.2.2 Componente longitudinal da velocidade ao longo da linha central do queimador comparação entre os casos reativos, simulados com dois modelos de combustão diferentes, e os resultados experimentais [6]

Na **figura 5.1.2.2** é observado que o comportamento do escoamento é modificado quando comparado com os resultados quimicamente inertes apresentados na seção anterior. A dinâmica do escoamento reativo encontrada nos dados experimentais mostra um maior aumento da velocidade na linha central na região de esteira quando comparado ao escoamento inerte, o que está relacionado à expansão dos gases quentes. Ambos os modelos de combustão utilizados descrevem incorretamente o aumento da velocidade nesta região. Só o modelo de elementos de chama consegue fornecer um ponto de estagnação, como o existente nos dados experimentais, mas em uma posição mais a jusante do que o medido.

Na **figura 5.1.2.3** se apresenta a evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade para as linhas $Y=10$ e 60mm e para os casos com modelo de combustão EDM e Flamelet. Para os dois casos simulados, apenas pequenas diferenças são observadas para a linha $Y=10\text{mm}$, mas, para a linha $Y=60\text{mm}$ é observado uma variação perceptível entre os dois modelos.

Uma melhor descrição do decaimento da componente longitudinal da velocidade na vizinhança de $X=0$ é obtida com o modelo de elementos de chama. Entretanto, mais perto da zona dominada pelo ar anular o modelo EDM obteve melhor descrição da componente radial da velocidade. Porém, uma vez que a posição do ponto de estagnação não foi corretamente prevista, e que o modelo de elementos de chama foi o que melhor aproximou o escoamento, é este modelo que será empregado para representar o experimento desenvolvido neste trabalho.

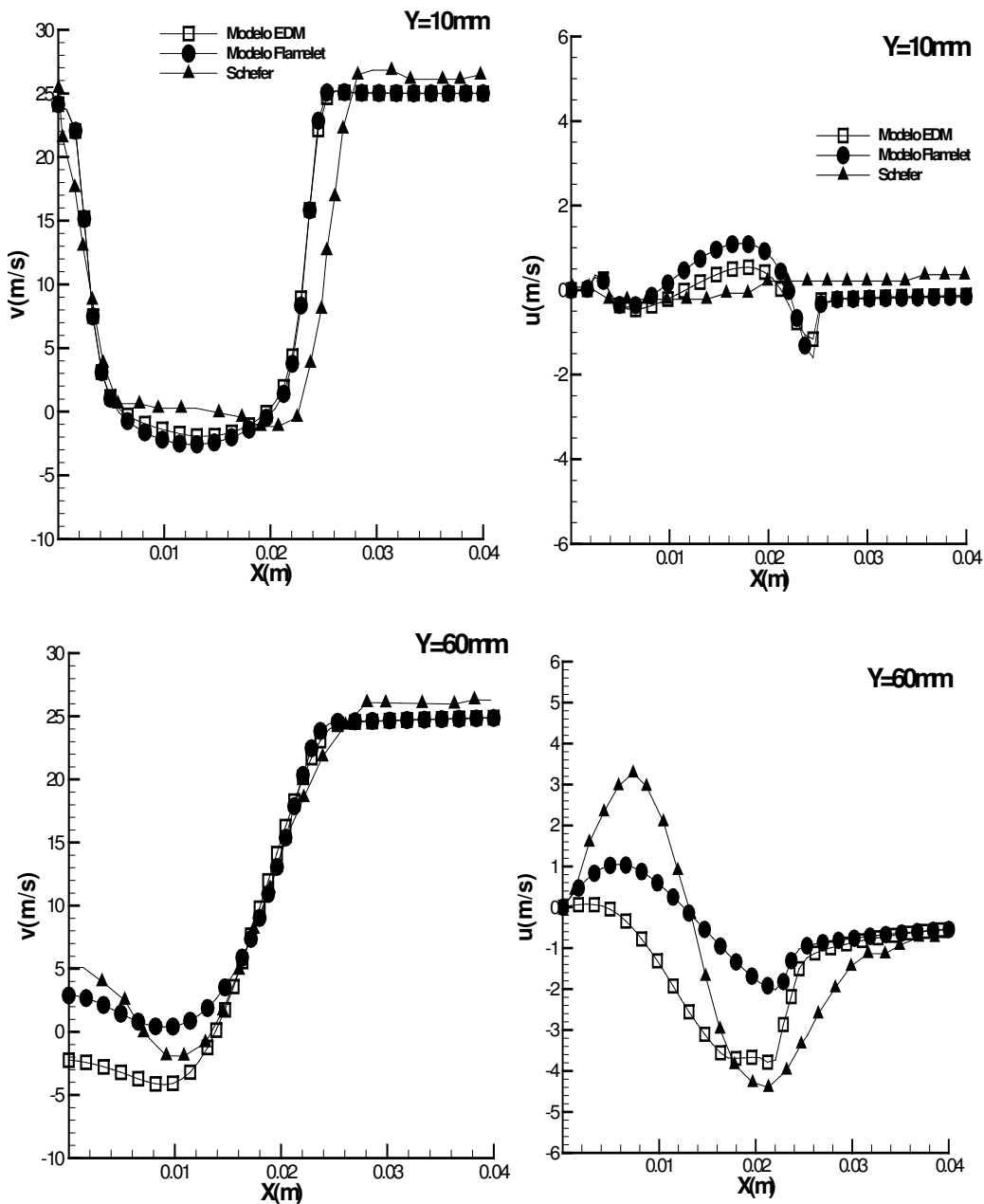


Figura 5.1.2.3 Evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade para $Y=10$ e 60mm , escoamento relativo.

5.2 Resultados experimentais

5.2.1 Classificação das chamas estudadas

Nesta seção serão apresentadas as medidas do radical hidroxila (OH) obtidas com o método de diagnóstico não intrusivo PLIF no plano de simetria do queimador. Foram realizadas onze medidas correspondentes às condições nominais de funcionamento mostradas na **tabela 5.2.1**.

Tabela 5.2.1.1 Velocidades dos escoamentos de combustível e de ar para cada caso estudado.

Caso	Vel. Jato de combustível (m/s)	Vel. do ar anular (m/s)	Classificação do tipo de chama	
			Huang e Lin	Gu et al.
1	1,31	1,24	Tipo V	-----
2	2,19		Tipo V	-----
3	2,92		Tipo V	-----
4	6,9		Tipo V	-----
5	1,31	6,6	-----	Tipo I
6	2,19		-----	Tipo I
7	2,92		-----	Tipo I
8	6,9		-----	Tipo II
9	2,19	11,7	-----	Tipo I
10	2,92		-----	Tipo I
11	6,9		-----	Tipo I

No capítulo II foram apresentadas as classificações das chamas propostas por Huang e Lin [8] e Gu et al. [13]. Na **figura 5.2.1.1** os 11 tipos de chamas encontradas no presente trabalho são identificados nestas classificações, segundo os valores de velocidade do jato central (U_j) e do ar anular (U_a). Nesta figura pode ser verificado que os casos 1, 2, 3 e 4 se localizam na região V que, segundo a definição de Huang e Lin [8], é a região onde a chama forma uma zona de garganta a jusante da zona de recirculação, após a qual a luminosidade aumenta.

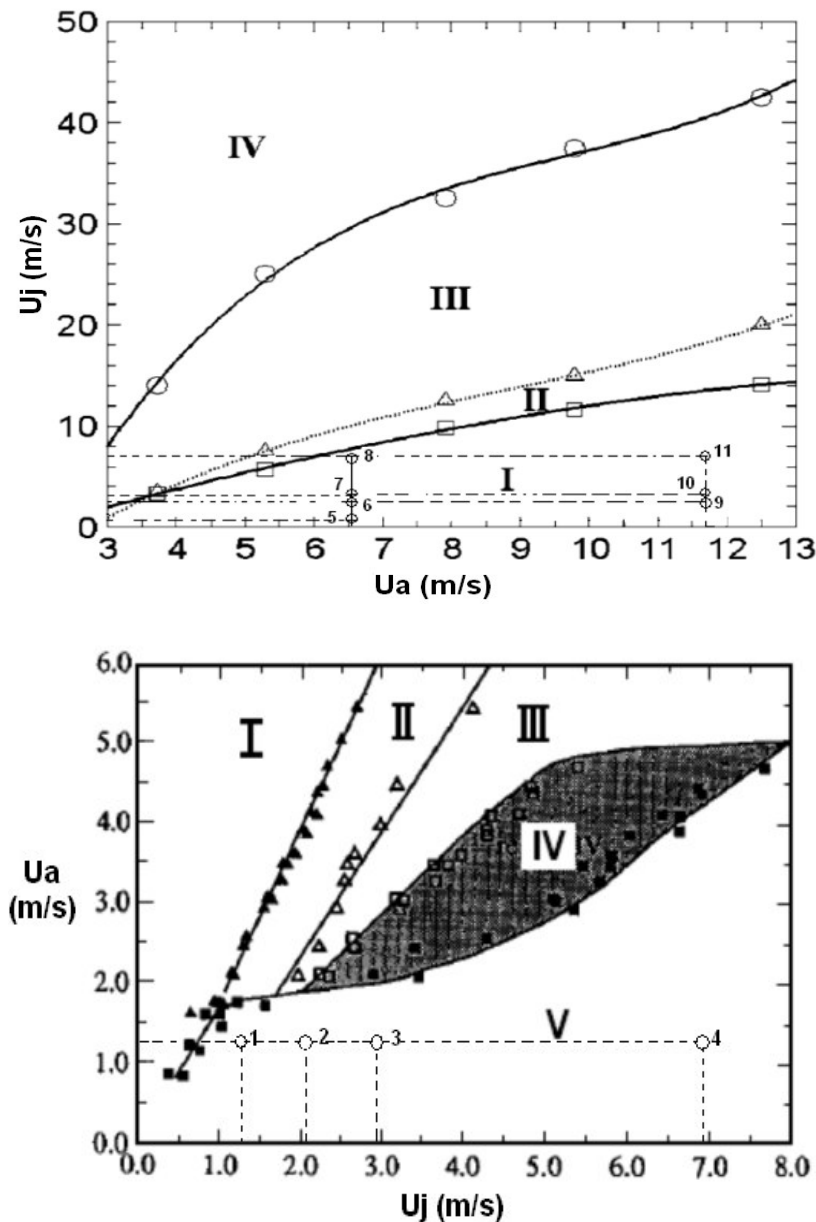


Figura 5.2.1.1 Identificação das chamas estudadas segundo a classificação proposta por Gu et al.[13] e Huang et al. [8].

Como mostra a **figura 5.2.1.1** os casos do 5 até 11 localizam-se, na região I, a qual é a zona de chamas que possuem uma zona de recirculação. A chama encontra-se na zona de esteira, é iniciada na vizinhança da 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. Note-se, porém que o caso 8, apesar de se encontrar na região I possui características da chama distintas dos demais casos, assemelhando-se mais a uma chama de tipo II. Assim, este caso será discutido separadamente dos demais.

Esta classificação a priori dos ensaios realizados permite verificar, a necessidade de se adaptar o aparato experimental de modo a obter resultados representativos de todos os regimes de combustão, o que será objeto de trabalhos futuros.

5.2.2 Processo de filtragem

Antes de analisar os resultados obtidos nos diferentes regimes de combustão foi realizada uma série de testes visando determinar a influência do processo de filtragem sobre os resultados obtidos. Os filtros são usados para eliminar as altas frequências características de ruídos do processo de aquisição, tomando uma média sobre a vizinhança de um pixel, mediante a uma combinação linear dos valores ao redor do pixel central. Para tal, escolhe-se uma imagem instantânea de uma chama quase laminar obtida da experiência, correspondente ao caso 1, e aplicam-se os filtros lineares disponíveis no software DAVIS 7.2. Em seguida, como mostrado na **figura 5.2.2.1**, uma região de chama plana é escolhida na imagem e uma linha horizontal, praticamente normal à chama é extraída.

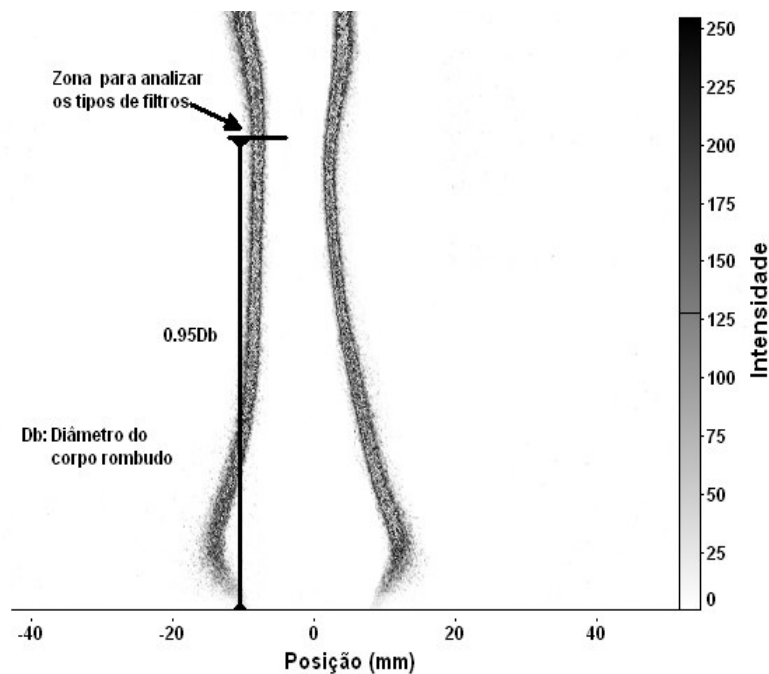


Figura 5.2.2.1 Chama quase laminar tomada como referência para aplicação dos diferentes filtros lineares.

Neste estudo, foram empregados os filtros tipo “smoothing” e os “Gaussianos”. A aplicação de filtros não lineares não é indicada, pois valores negativos de concentração de OH podem resultar.

Na **figura 5.2.2.2** apresentam-se os resultados obtidos com os filtros “smoothing” utilizados. Observa-se que, quando a matriz do filtro aumenta (3x3, 5x5, 7x7 e 9x9) a intensidade máxima obtida na imagem é diminuída. Simultaneamente, a evolução radial da intensidade luminosa da chama torna-se mais suave.

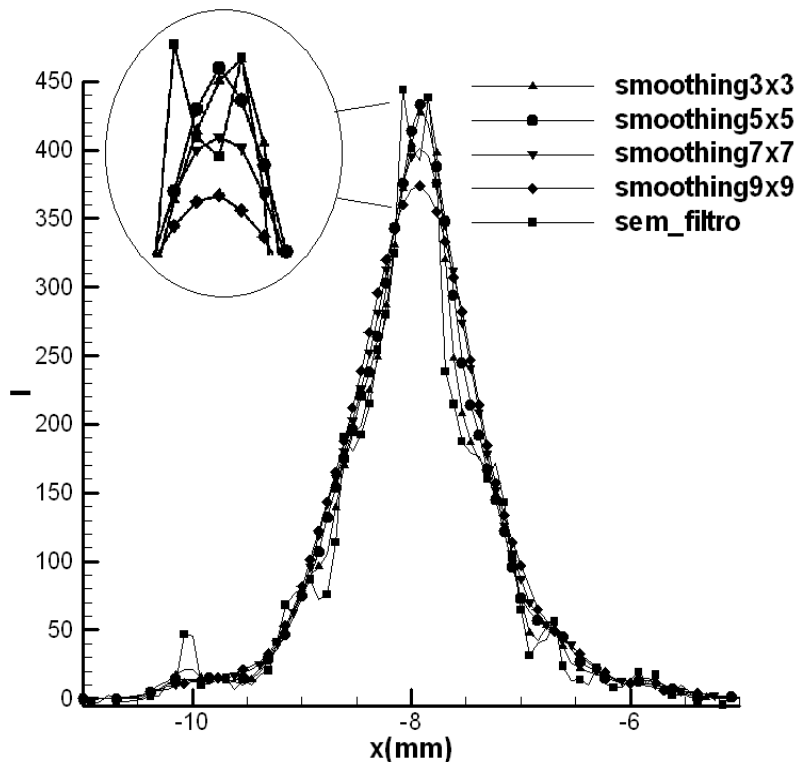


Figura 5.2.2.2 Filtros lineares “smoothing” aplicados sobre uma imagem instantânea da intensidade de fluorescência de OH em uma chama turbulenta não pré-misturada.

Na **figura 5.2.2.3** se apresentam os resultados da aplicação dos filtros gaussianos (3x3, 5x5, 7x7 e 9x9) o qual modifica o valor do pixel central por uma combinação de valores dos pixel adjacentes que obedece a uma distribuição de pesos gaussianiana. A comparação dos resultados mostrados na **figura 5.2.2.2** e **5.2.2.3** permite verificar que a influência dos filtros gaussianos sobre a redução do valor máximo de intensidade e sobre a suavização é menor do que a dos filtros lineares. Ainda assim, as oscilações de alta frequência são removidas com a utilização de quaisquer destes filtros.

Um outro aspecto a ser observado nas **figuras 5.2.2.2** e **5.2.2.3** é que a espessura da região de variação de intensidade luminosa, que será admitida neste estudo como sendo a espessura da chama, é de cerca de 3mm. Uma vez

que a dimensão de cada pixel na imagem obtida é de $70\mu\text{m}$, tem-se cerca de 43 pixel ao longo da direção normal e no interior da frente de chama.

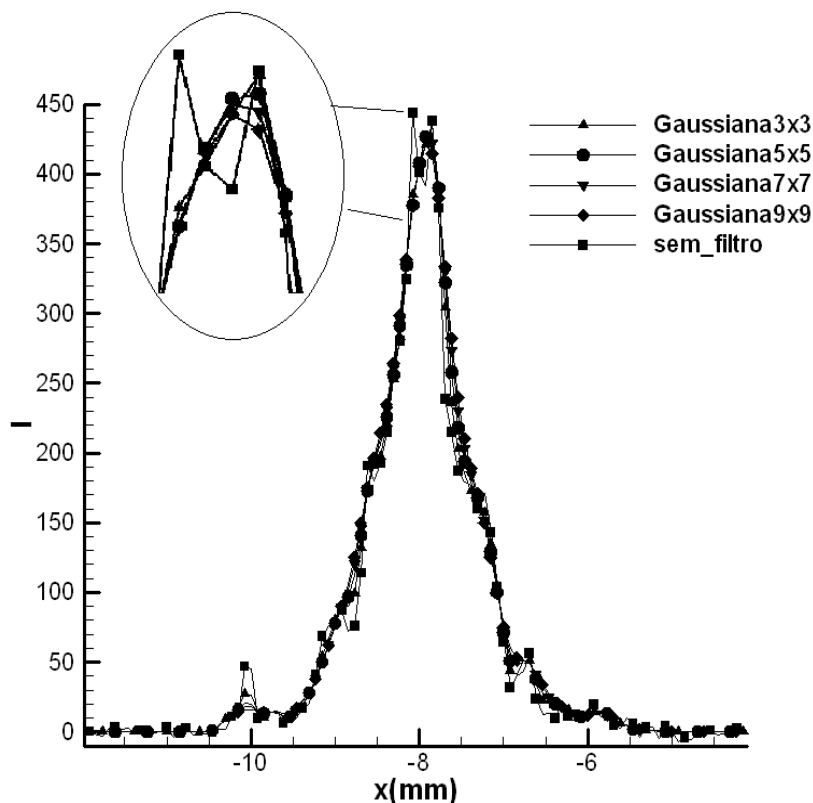


Figura 5.2.2.3 Filtros lineares “Gaussianas” aplicados sobre uma imagem instantânea da intensidade de fluorescência de OH em uma chama turbulenta não pré-misturada.

5.2.3 Chamas do tipo V

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para as chamas do tipo V. Para cada uma das 4 condições de escoamento são mostradas duas fotografias correspondentes aos tempos de obturação de $1/200$ e $1/1000$ s, 4 instantâneos da intensidade luminosa da fluorescência do radical OH, a imagem obtida a partir da média de 1000 imagens instantâneas, assim como a respectiva imagem do RMS e 7 cortes radiais da imagem média em linhas distantes de 10mm entre si.

Na **figura 5.2.3.1** correspondente ao caso 1 pode ser verificada a formação de uma zona de garganta a jusante da zona de recirculação, após a qual se observa que a luminosidade aumenta.

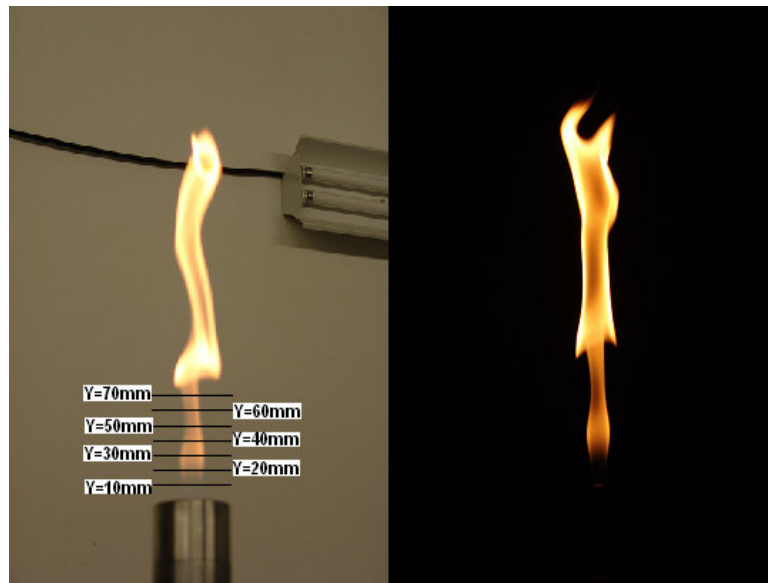


Figura 5.2.3.1 Fotografia da chama do caso 1 ($U_j=1,31\text{m/s}$ e $U_a=1,24\text{m/s}$).

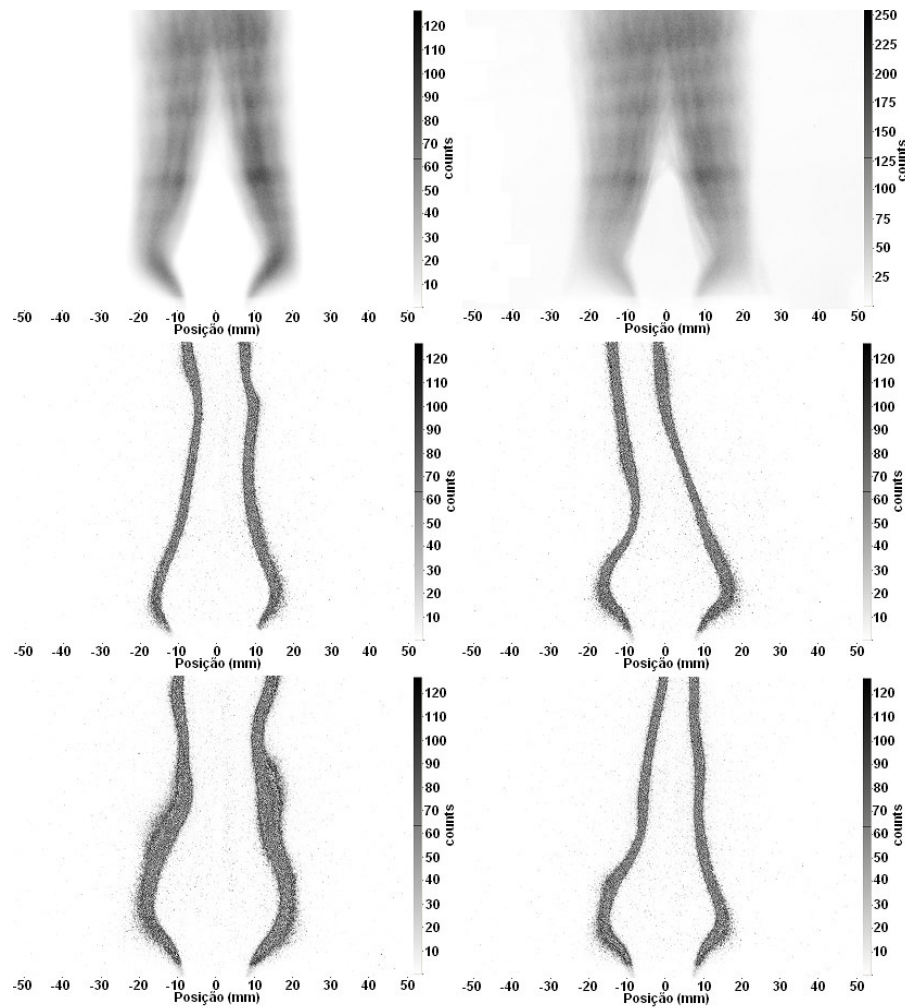


Figura 5.2.3.2 Imagem média, o RMS e instantânea da concentração de OH obtidas com PLIF.

Na **figura 5.2.3.2** observa-se que a frente da chama caracterizada pela presença do radical OH é pouco perturbada e poderia ser chamada de quase laminar. Muito embora a imagem média mostrada nesta figura não seja idêntica às instantâneas, percebe-se na média uma semelhança com o comportamento instantâneo. Além disso, a imagem média comparada com as imagens instantâneas tem pouca semelhança qualitativa.

A partir das linhas horizontais mostradas na **figura 5.2.3.1** realizam-se gráficos da intensidade luminosa do OH em função da distância radial, os quais são mostrados na **figura 5.2.3.3**. Observa-se que a espessura da camada de OH aumenta de 10 para 20mm quando a altura varia de 10 para 60mm na imagem média da chama, muito embora a espessura da chama laminar seja praticamente invariante com a altura. Isto é uma indicação do aumento da agitação turbulenta que ocorre da base para o topo da chama. Note-se, também, que a superfície de chama parece se fechar para $Y=50\text{mm}$ indicando que nesta região, em média, todo o combustível foi consumido, o que não é óbvio a partir do exame das imagens instantâneas.

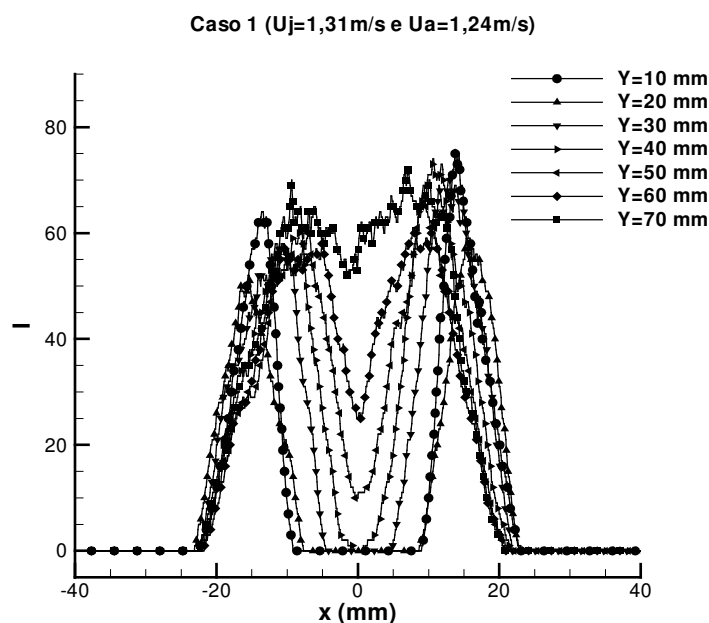


Figura 5.2.3.3 Evolução vertical na chama da intensidade média de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para o caso 1.

Os resultados obtidos para as demais chamas do tipo V, correspondentes aos casos 2, 3 e 4 são mostrados nas **figuras 5.2.3.4 e 5.2.3.12**. A análise das fotografias destas chamas mostra que, a medida que a velocidade do jato de combustível aumenta, o comprimento e amplitude das flutuações da chama visível aumenta. Este comportamento é idêntico àquele, clássico de Lewis e von

Elbe [61], obtido para chamas tipo jato em situações de número de Reynolds relativamente baixo.

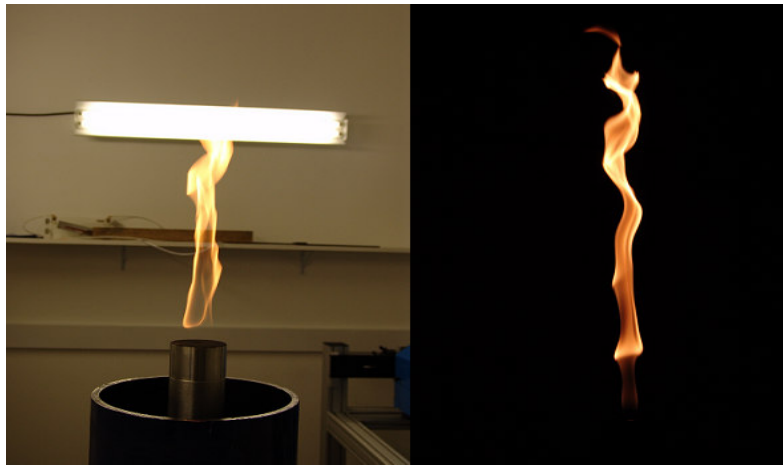


Figura 5.2.3.4 Fotografias da chama do caso 2 com tempo de exposição de 1/200 e 1/1000 respectivamente.

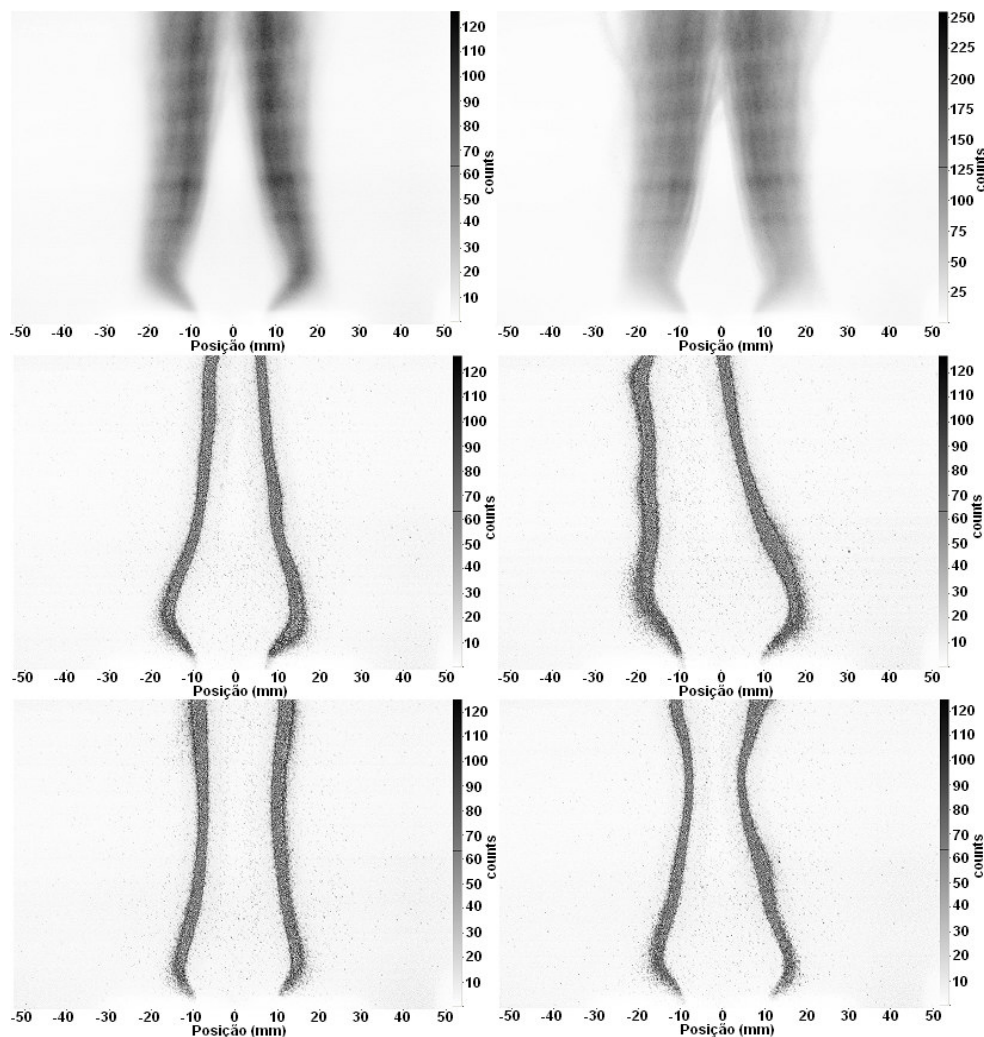


Figura 5.2.3.5 Imagem média, RMS e instantânea da intensidade de fluorescência de OH obtidas com PLIF para $U_j=2,19\text{m/s}$ e $U_a=1,24\text{m/s}$ (caso 2).

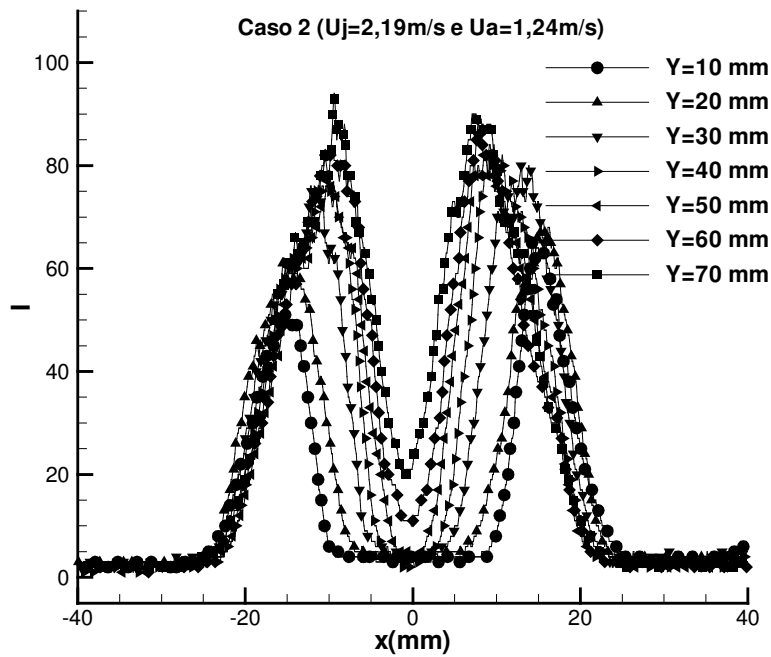


Figura 5.2.3.6 Evolução vertical na chama da intensidade média de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para o caso 2.

Um exame das imagens médias de intensidade de fluorescência do radical OH obtidas para os casos 1 a 4 mostra que este aumento de comprimento da chama visível é acompanhado de um progressivo alongamento da região central aonde OH é encontrado.

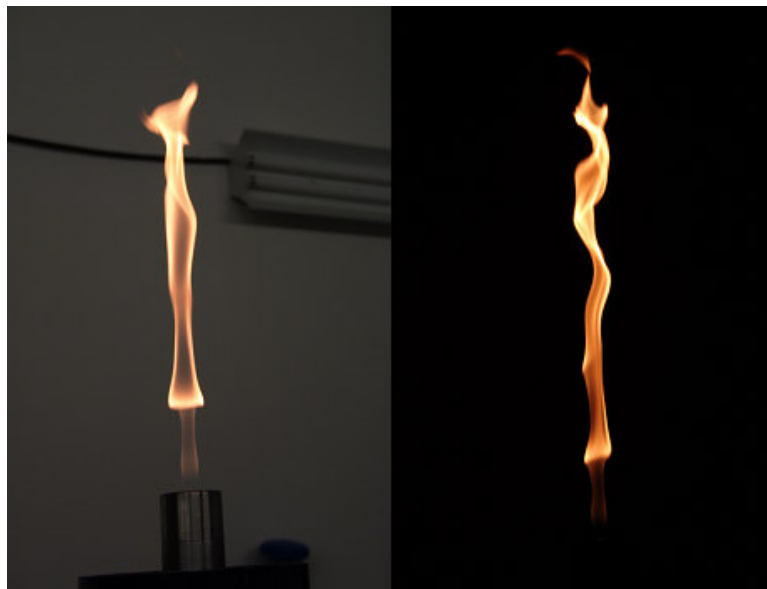


Figura 5.2.3.7 Fotografias da chama do caso 3 com tempo de exposição de $1/200$ e $1/1000$ segundos respectivamente.

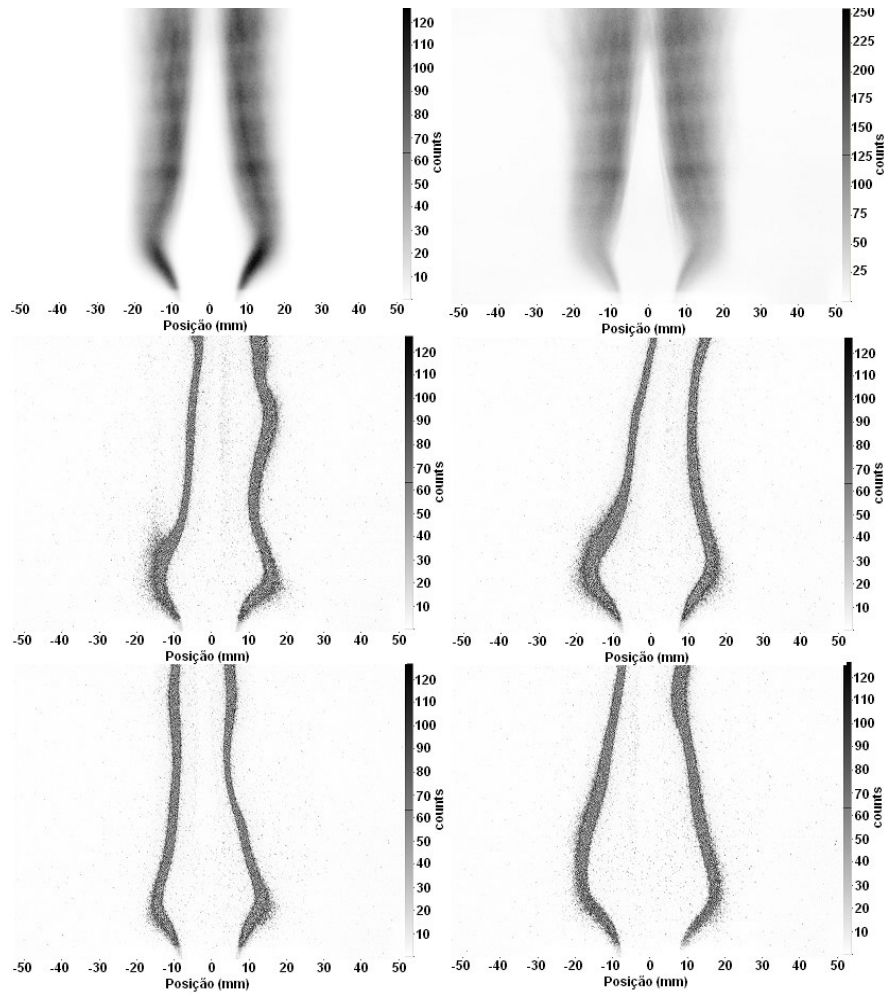


Figura 5.2.3.8 Imagem média de 1000 imagens, RMS e as outras 4 imagens seguintes são as instantâneas da intensidade de fluorescência de OH obtidas com PLIF para $U_j=2,92\text{m/s}$ e $U_a=1,24\text{m/s}$ (caso 3).

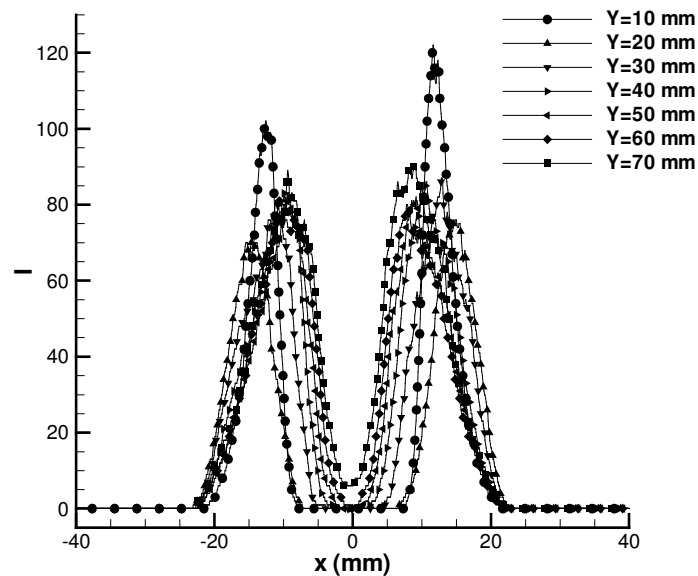


Figura 5.2.3.9 Evolução vertical na chama da intensidade de fluorescência de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para o caso 3.

Assim, como era de se esperar, as chamas tornam-se progressivamente mais dominadas pelo jato central à medida que sua velocidade aumenta. Uma correspondência também existe entre o comportamento da chama observado nas fotografias e aquele da intensidade instantânea do radical OH. Trata-se o aumento da agitação turbulenta na chama que se traduz por uma maior curvatura da frente de chama instantânea.

A observação das imagens de intensidade de fluorescência instantânea também permite verificar que a curvatura da frente de chama está relacionada a um aumento da espessura aparente da região onde OH é encontrado. Este efeito de espessamento da frente de chama instantânea poderia estar ligado a uma compressão local do escoamento, entretanto, a verificação deste fenômeno de compressão requer a medição simultânea da velocidade, fora do escopo do presente estudo. A análise das figuras aonde são mostradas a evolução radial da média de intensidade de fluorescência para diferentes valores de altura do queimador permite verificar que a espessura aparente da chama média aumenta com a altura. Este aumento de espessura é menos perceptível à medida que se incrementa a vazão de combustível, o que é esperado, uma vez que o comprimento da chama aumenta com a vazão. No tocante ao valor máximo de intensidade do radical OH um comportamento não monotônico com a altura o qual é particularmente visível nas **figuras 5.2.3.9 e 5.2.3.12**. Na vizinhança da superfície do queimador, para $Y=10\text{mm}$, o valor máximo da média de I é superior a 100, diminuindo em seguida para valores em torno de 80 a 90 quando $Y>20\text{mm}$. Este comportamento pode estar relacionado ao estiramento aerodinâmico da chama ou à pré-mistura parcial dos reagentes que ocorre na vizinhança da superfície do queimador.

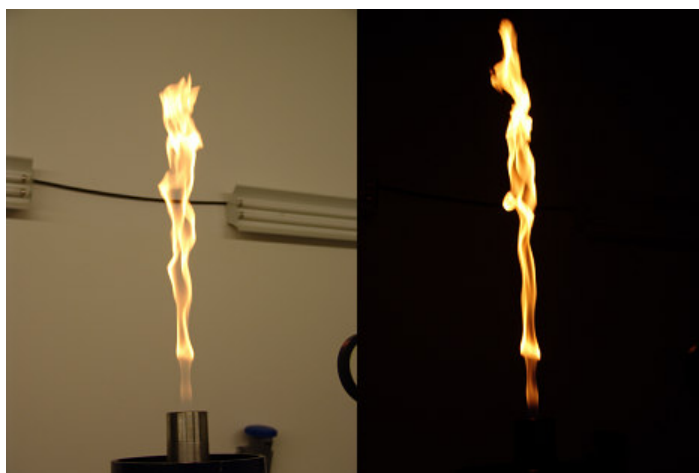


Figura 5.2.3.10 Fotografias da chama do caso 4 com tempo de exposição de 1/200 e 1/1000 segundos respectivamente.

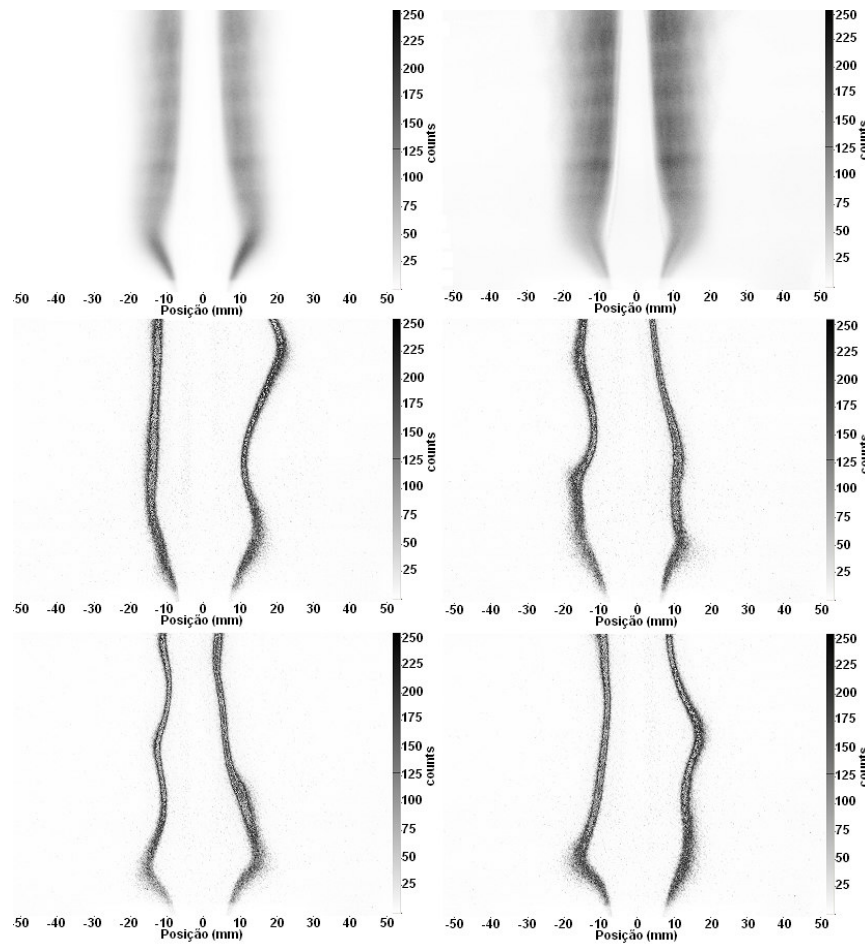


Figura 5.2.3.11 Imagem média de 1000 imagens, seu RMS e as outras 4 imagens seguintes são as instantâneas da intensidade de fluorescência de OH obtidas com PLIF para $U_j=6,9\text{m/s}$ e $U_a=1,24\text{m/s}$ (caso 4).

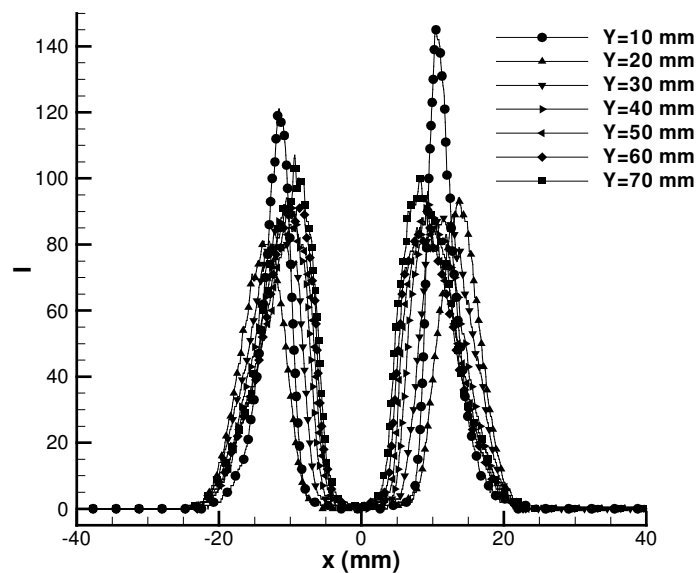


Figura 5.2.3.12 Evolução vertical na chama da intensidade de fluorescência de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para o caso 4.

Note-se enfim, que todos os resultados obtidos apontam para uma chama média com elevado grau de simetria em torno do eixo $X=0$, o que permite realizar a modelagem destas utilizando a hipótese de simetria axial.

5.2.4 Chamas do tipo I

Nesta seção são discutidos os resultados obtidos para as chamas do tipo I. Para cada um dos casos estudados, são apresentadas uma fotografia em luz direta com tempo de exposição 1/1000s, quatro instantâneos da intensidade de fluorescência de OH no plano de simetria do queimador, a média e o RMS correspondente a 1000 destes instantâneos e, por fim, a evolução da intensidade de fluorescência em 7 linhas distantes de 10mm entre si.

Conforme o mostrado na **tabela 5.2.1.1** e na **figura 5.2.1.1** os resultados obtidos para as chamas do tipo I podem ser divididos em dois grupos, correspondentes a um dado valor para a velocidade do ar anular para o qual a velocidade do jato de combustível é crescente. Segundo Gu et al. [13] e Huang e Lin [8], nesta situação a chama encontra-se estabilizada na zona de esteira, sendo iniciada na face do queimador aonde existe uma zona luminosa com formação de fuligem como observado na **figura 5.2.4.1**. Isto ocorre pois no caso das chamas da categoria I, a combustão ocorre em uma região rica em combustível. Esta imagem mostra claramente que a estrutura da chama obtida quando a velocidade do ar é de 6,6m/s é totalmente diferente daquela examinada na seção anterior, correspondente a uma velocidade do ar de 1,24m/s. Esta modificação da estrutura da chama também pode ser apreciada na **figura 5.2.4.2**.



Figura 5.2.4.1 Fotografia direta da chama para o caso 5 com tempo de exposição de 1/1000 segundos.

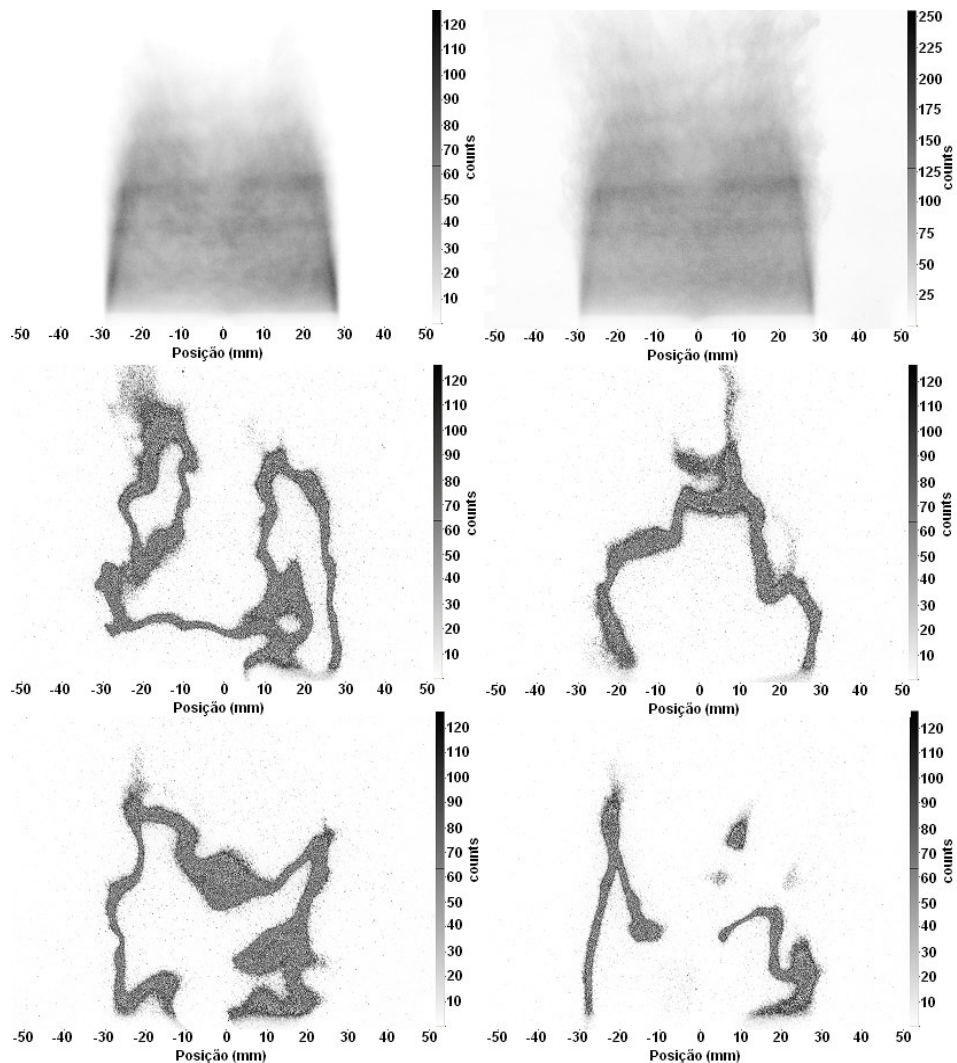


Figura 5.2.4.2 A primeira imagem é a média de 1000 imagens, o RMS e as outras 4 imagens seguintes são as instantâneas da concentração de OH obtidas com PLIF para $U_j=1,31\text{m/s}$ e $U_a=6,6\text{m/s}$ (caso 5).

A estrutura de cada uma das chamas instantâneas é diferente entre si, e nenhum dos instantâneos remete à chama média. A frente de chama instantânea é caracterizada por uma espessura variável e pela presença de regiões cuja curvatura é da mesma ordem de grandeza do que a espessura. A frente de chama também mostra sinais de interrupção, o que sugere a existência de regiões onde combustível e ar se misturam em ausência de combustão. Estas modificações da estrutura da frente de chama são resultados característicos da interação com um campo turbulento intenso [2,3]. A redução do comprimento da chama com o aumento da velocidade do ar anular pode claramente ser observada na **figura 5.2.4.3**. Esta figura mostra que a jusante da face do queimador, entre $Y=10$ e 40mm , a concentração de OH é praticamente constante, decaindo rapidamente em seguida, para chegar a praticamente zero em $Y=70\text{mm}$. Esta uniformidade de concentração de OH, quebrada pelos

extremos situados $X = \pm 30\text{mm}$, isto é, na vizinhança da borda do queimador, é um traço característico da intensa agitação turbulenta.

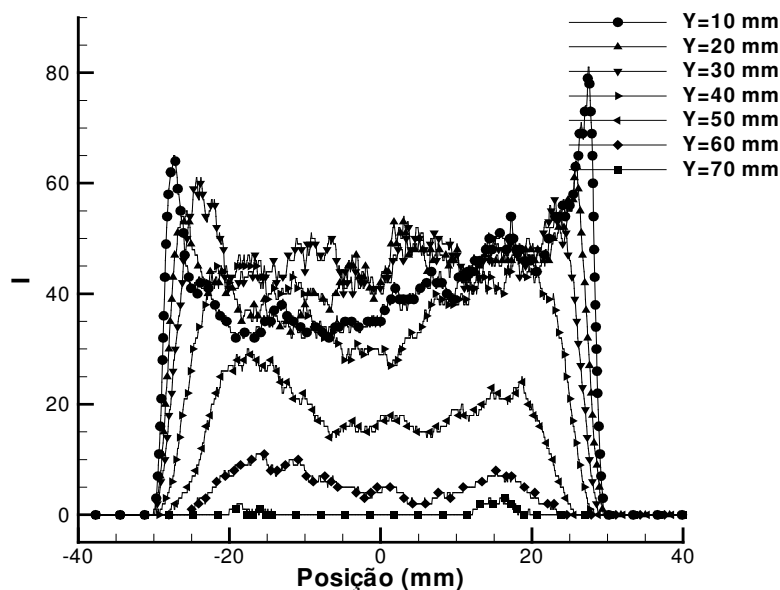


Figura 5.2.4.3 Evolução vertical na chama da intensidade de fluorescência de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para o caso 5.

Os resultados obtidos para o caso 6 são mostrados nas **figuras 5.2.4.4, 5.2.4.5 e 5.2.4.6**. A imagem média de fluorescência do radical OH indica que a frente de chama turbulenta média encontra-se numa posição mais a jusante do que no caso 5. Isto é confirmado pelo exame dos resultados mostrados na **figura 5.2.4.6**. Esta figura mostra que a concentração de OH possui um mínimo na vizinhança de $X=0$ para $Y=10\text{mm}$, o que indica que há uma ligeira predominância do jato de combustível em relação ao caso 5. Além disto, a medida que Y aumenta, a intensidade média de OH cresce, para em seguida diminuir, caracterizando assim o deslocamento vertical da frente de chama turbulenta.



Figura 5.2.4.4 Fotografia direta da chama para o caso 6 com tempo de exposição de $1/500$ segundos.

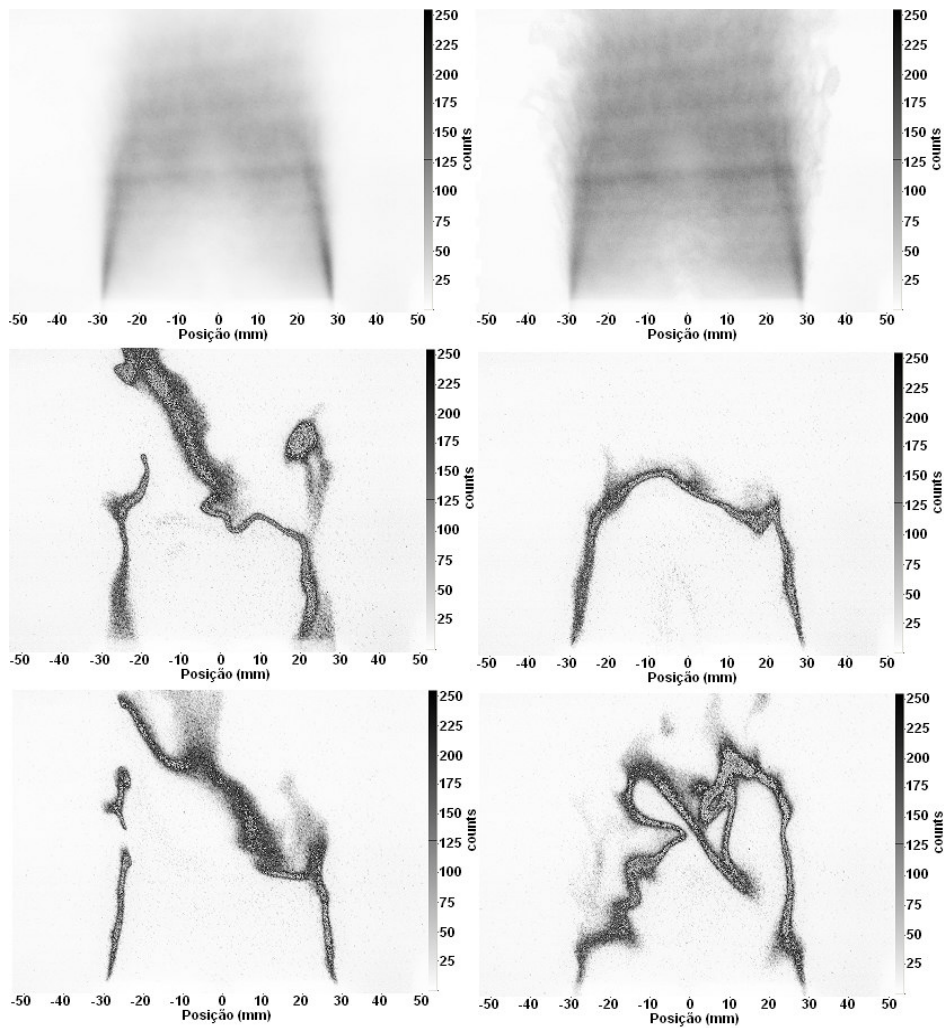


Figura 5.2.4.5 A primeira imagem é a média de 1000 imagens, a seguinte é a imagem do RMS e as outras 4 imagens seguintes são as instantâneas da concentração de OH obtidas com PLIF para $U_j=2,19\text{m/s}$ e $U_a=6,6\text{m/s}$ (caso 6).

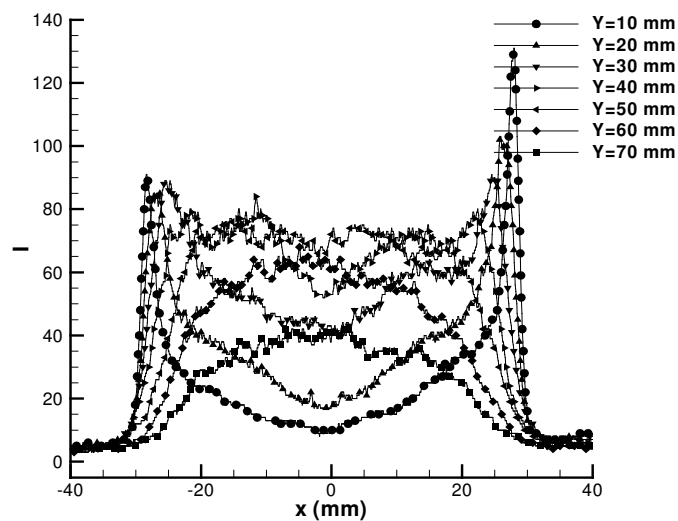


Figura 5.2.4.6 Evolução vertical na chama da intensidade de fluorescência de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para o caso 6.

A penetração do jato de combustível na região de recirculação aumenta no caso 7, para o qual a velocidade do jato de combustível é 2,92m/s, como pode ser percebido nos resultados correspondentes, mostrados nas **figuras 5.2.4.7, 5.2.4.8 e 5.2.4.9.**



Figura 5.2.4.7 Fotografia direta da chama para o caso 7 com tempo de exposição de 1/500 segundos.

Estas figuras mostram que a chama turbulenta média desloca-se para valores de Y maiores quando U_j cresce, e que a intensidade de fluorescência de OH na vizinhança de $X=0$ é praticamente nula até $Y=20\text{mm}$, indicando ausência de combustão e presença do combustível. O aumento da velocidade do combustível parece corresponder a uma maior quantidade de chamas instantâneas com a zona de reação interrompida e fortemente distorcida. Por fim, a **figura 5.2.4.8** mostra um progressivo descolamento da chama instantânea da face lateral do queimador, o que pode-se traduzir por uma pré-mistura parcial entre combustível e ar sem presença de combustão.

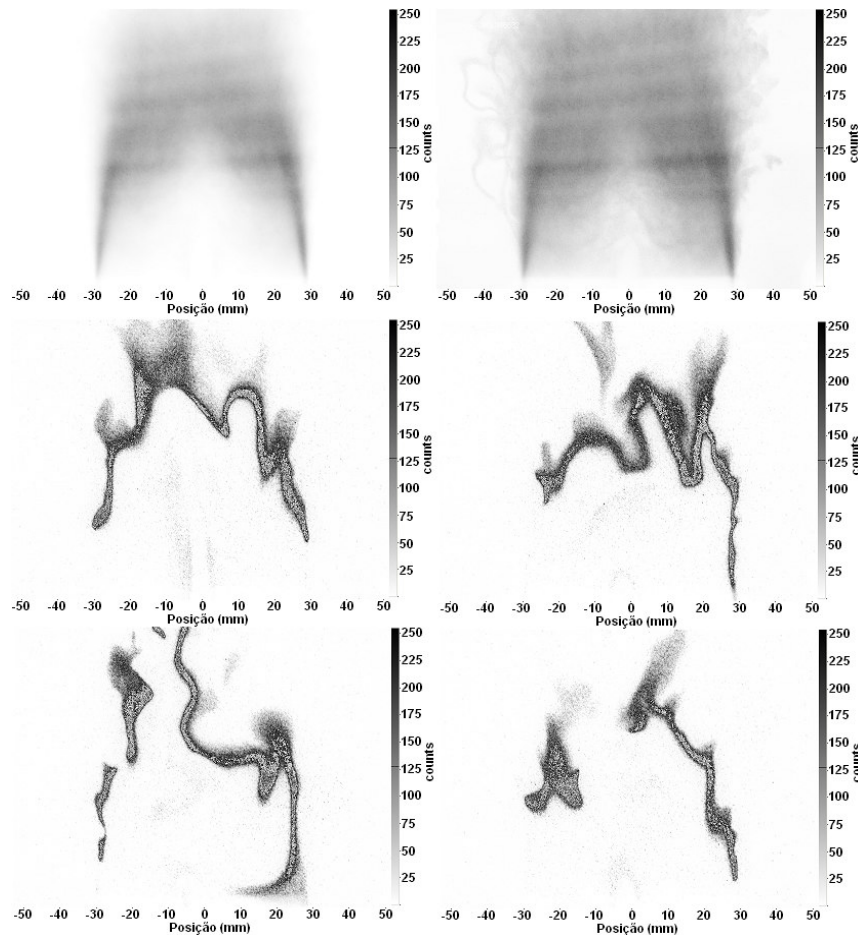


Figura 5.2.4.8 A primeira imagem é a média de 1000 imagens, a seguinte é a imagem do RMS e as outras 4 imagens seguintes são as instantâneas da concentração de OH obtidas com PLIF para $U_j=2,92\text{m/s}$ e $U_a=6,6\text{m/s}$ (caso 7).

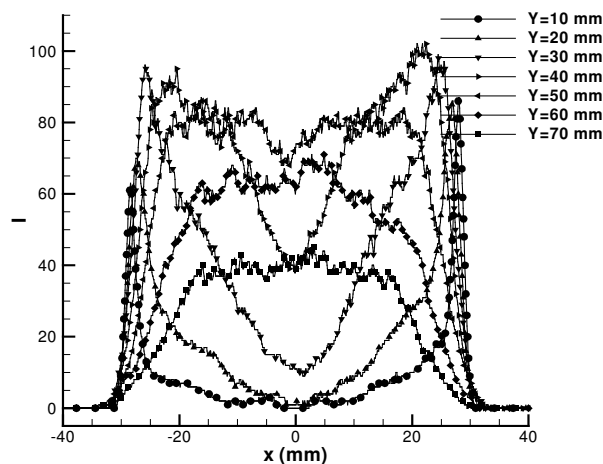


Figura 5.2.4.9 Evolução vertical na chama da intensidade de fluorescência de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para o caso 7.

Os casos 9,10 e 11 correspondem ao maior valor da velocidade do ar anular, $11,7\text{m/s}$, e as velocidades progressivamente crescentes do jato de combustível. Cabe notar que, contrariamente aos demais valores da velocidade do ar, não foi possível obter chamas estáveis para $U_j=1,31\text{m/s}$. As **figuras**

5.2.4.10 a 5.2.4.18 mostram que a evolução com U_j da estrutura da chama turbulenta obtida para este valor de velocidade do ar anular é em tudo semelhante àquela obtida quando $U_a=6,6\text{m/s}$.



Figura 5.2.4.10 Fotografia direta da chama para o caso 9 com tempo de exposição de 1/1000 segundos.

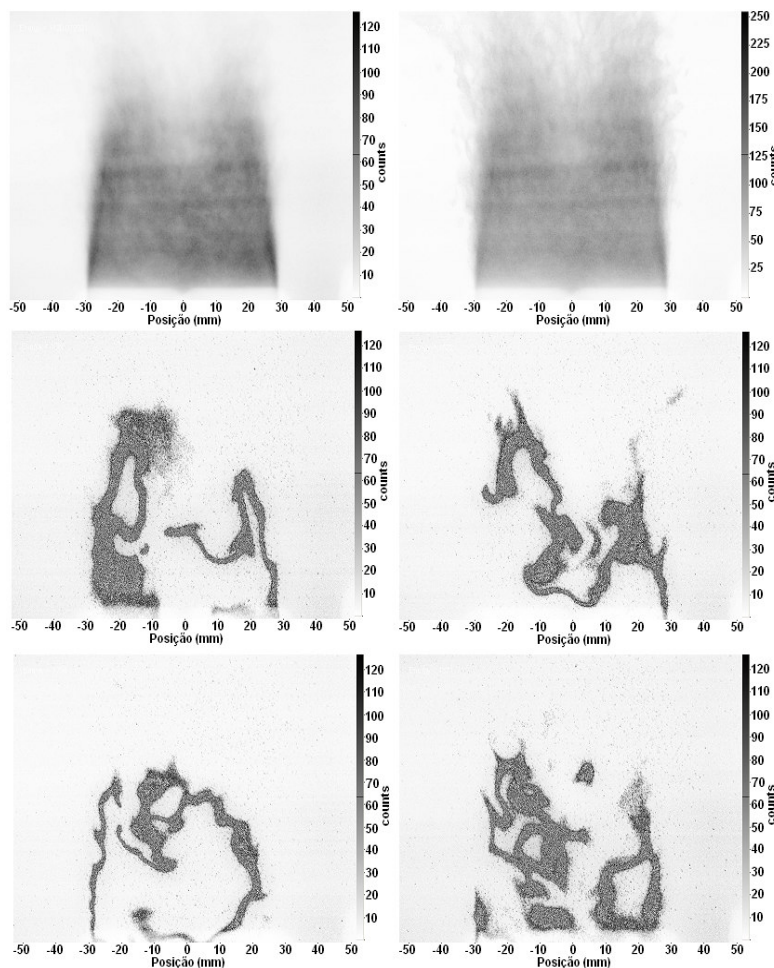


Figura 5.2.4.11 A primeira imagem é a média de 1000 imagens, o RMS e as outras 4 imagens seguintes são as instantâneas da concentração de OH obtidas com PLIF para $U_j=2,19\text{m/s}$ e $U_a=11,7\text{m/s}$ (caso 9).

Para o menor valor de $U_j=2,19\text{m/s}$, a chama média encontra-se praticamente colada à face do queimador e uma grande uniformidade é observada no valor médio de intensidade de fluorescência. A medida que U_j aumenta, aumenta a distância da chama turbulenta em relação à face do queimador devido à progressiva predominância do jato de combustível, o que pode ser claramente observado pela comparação dos resultados mostrados nas **figuras 5.2.4.12, 5.2.4.15 e 5.2.4.18**. As imagens instantâneas mostradas nas **figuras 5.2.4.11, 5.2.4.14 e 5.2.4.17** mostram que a estrutura da chama é fortemente perturbada pela turbulência, e de maneira ainda mais ampla do que nos casos 5, 6 e 7.

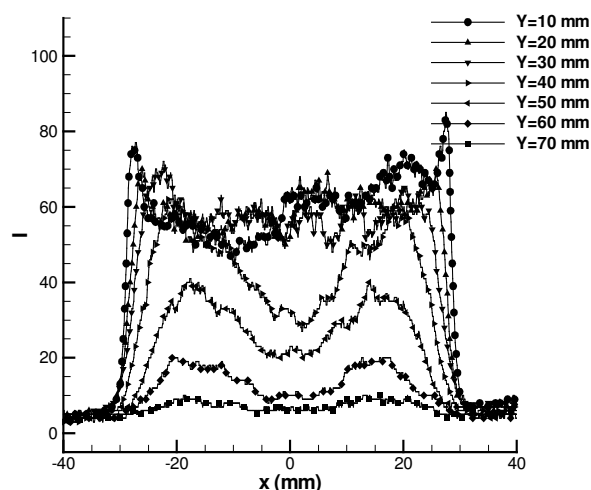


Figura 5.2.4.12 Evolução vertical na chama da intensidade de fluorescência de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para o caso 9.

Em quase todas as imagens instantâneas aparecem descontinuidades na superfície de chama, cuja espessura e curvatura são variáveis de mais de uma ordem de grandeza. Nestes três casos 9, 10 e 11 a concentração média de OH encontrada em $Y=70\text{mm}$ é sempre inferior àquelas medidas em posições mais a montante.



Figura 5.2.4.13 Fotografia direta da chama para o caso 10 com tempo de exposição de $1/1000$ segundos.

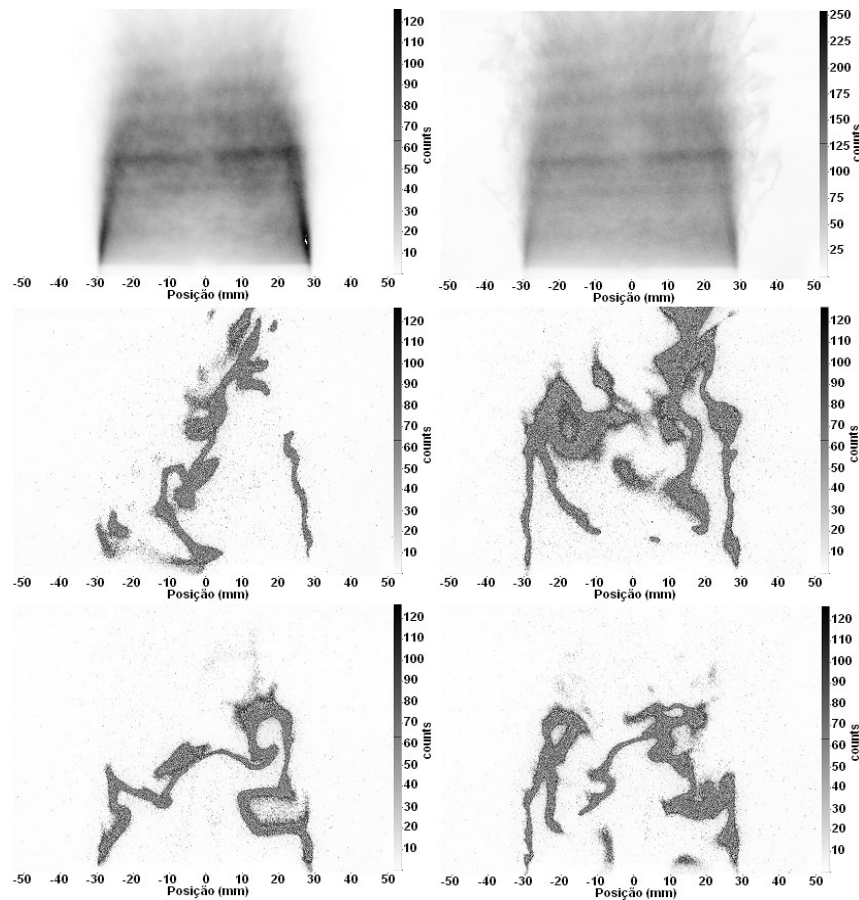


Figura 5.2.4.14 A primeira imagem é a média de 1000 imagens, o RMS e as outras 4 imagens seguintes são as instantâneas da concentração de OH obtidas com PLIF para $U_j=2,92\text{m/s}$ e $U_a=11,7\text{m/s}$ (caso 10).

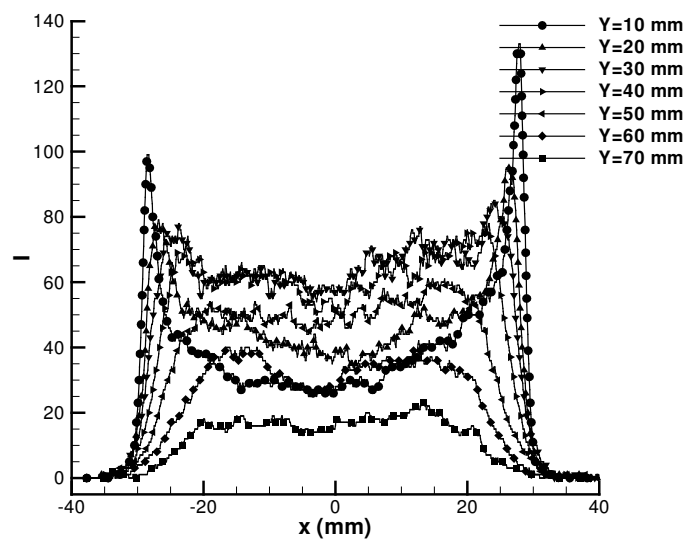


Figura 5.2.4.15 Evolução vertical na chama da intensidade de fluorescência de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para o caso 10.

A chama mais turbulenta estudada é aquela correspondente ao caso 11. Neste caso as imagens da **figura 5.2.4.17** mostra que a chama instantânea encontra-se quase sempre descolada da superfície do queimador, o que sugere a existência de um elevado grau de pré-mistura parcial entre combustível e oxidante.



Figura 5.2.4.16 Fotografia direta da chama para o caso 11 com tempo de exposição de 1/1000 segundos.

Cabe ressaltar que as imagens instantâneas das chamas turbulentas dos casos 5, 6, 7, 9, 10 e 11 mostram a difícil missão de simular numericamente uma chama turbulenta devido à grande variação da estrutura interna das frentes de chama e da presença de descontinuidades com conseqüente interpenetração dos reagentes na ausência de combustão. Esta estrutura instantânea impossibilita a utilização de modelos do tipo elementos de chama (Flamelet) estacionários para a descrição da combustão.

Um exame mais aprofundado da estrutura da chama necessita que as imagens instantâneas sejam tratadas de forma a obter quantidades significativas para o desenvolvimento de novos modelos, tais como a espessura ou a densidade de superfície de chama.

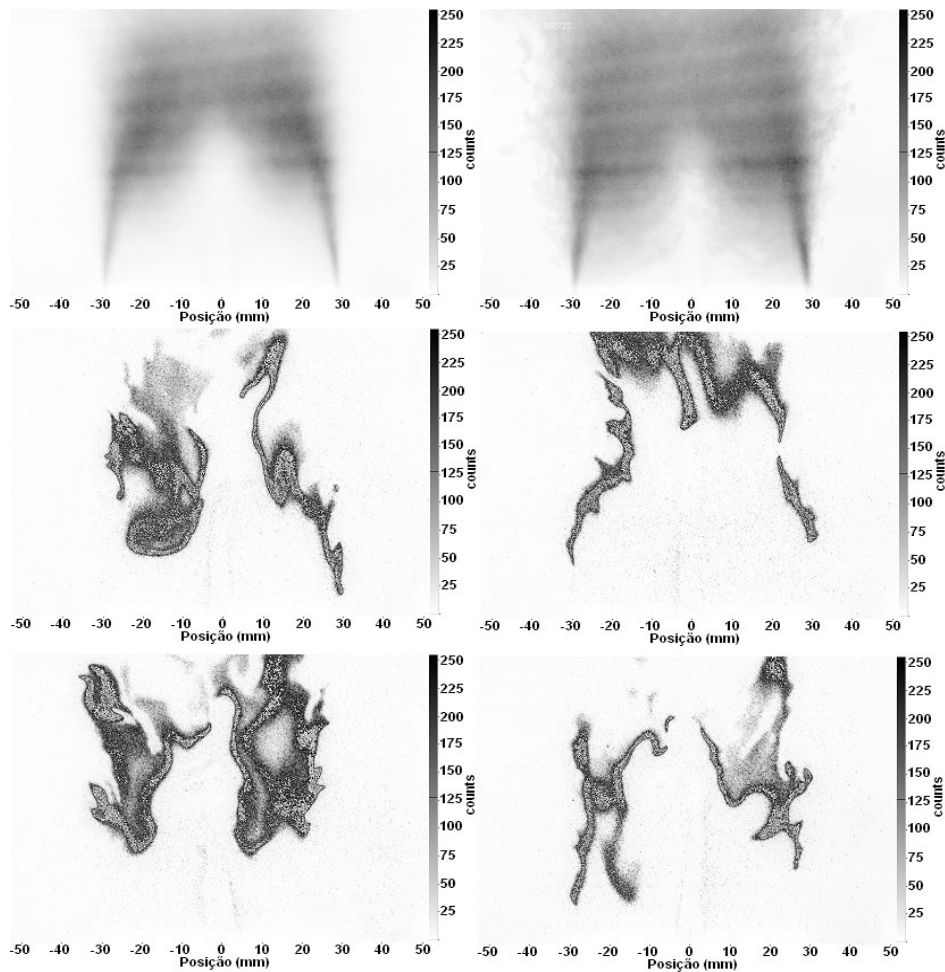


Figura 5.2.4.17 A primeira imagem é a média de 1000 imagens e as outras 4 imagens seguintes são as instantâneas da concentração de OH obtidas com PLIF para $U_j=6,9\text{m/s}$ e $U_a=11,7\text{m/s}$ (caso 11).

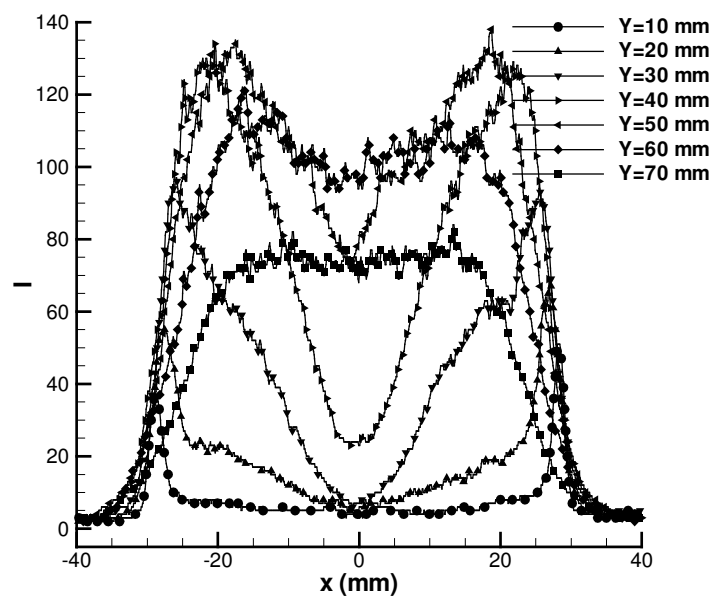


Figura 5.2.4.18. Evolução vertical na chama da intensidade de fluorescência de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para o caso 11.

5.2.5 Chamas do tipo II

O caso 8, cujos resultados são amostrados nas **figuras 5.2.5.1, 5.2.5.2 e 5.2.5.3** se enquadra em uma situação distinta daquelas obtidas nos casos anteriores.



Figura 5.2.5.1 Fotografia direta da chama para o caso 8 com tempo de exposição de 1/1000 segundos.

O exame das imagens instantâneas mostra que a chama instantânea é fortemente dobrada e interrompida, tal como nas chamas do tipo I. Além disto, tal como no caso 11, esta chama instantânea encontra-se deslocada da face do queimador. Isto se traduz num valor de intensidade média de OH inferior a 20 na vizinhança de $X=\pm 30\text{mm}$ quando $Y\leq 20\text{mm}$. Valores de intensidade média superiores a 60 são encontrados a partir de $Y=40\text{mm}$, e apenas nas regiões situadas distantes de $X=0$. Por fim, é notável neste tipo de chama que a intensidade média em $X=0$ é crescente com a coordenada longitudinal, contrariamente aos casos anteriores isto sugere que parte do combustível atravessa a região de recirculação sem queimar, reagindo somente na esteira desta em contato com o ar.

A caracterização detalhada da chama turbulenta passa pela necessária mediação da velocidade do escoamento, que está fora do escopo do presente estudo. O estudo da distribuição de velocidade e de sua correlação com a posição da frente de chama permitiria o desenvolvimento de novos modelos preditivos capazes de descrever os diferentes regimes de combustão encontrados.

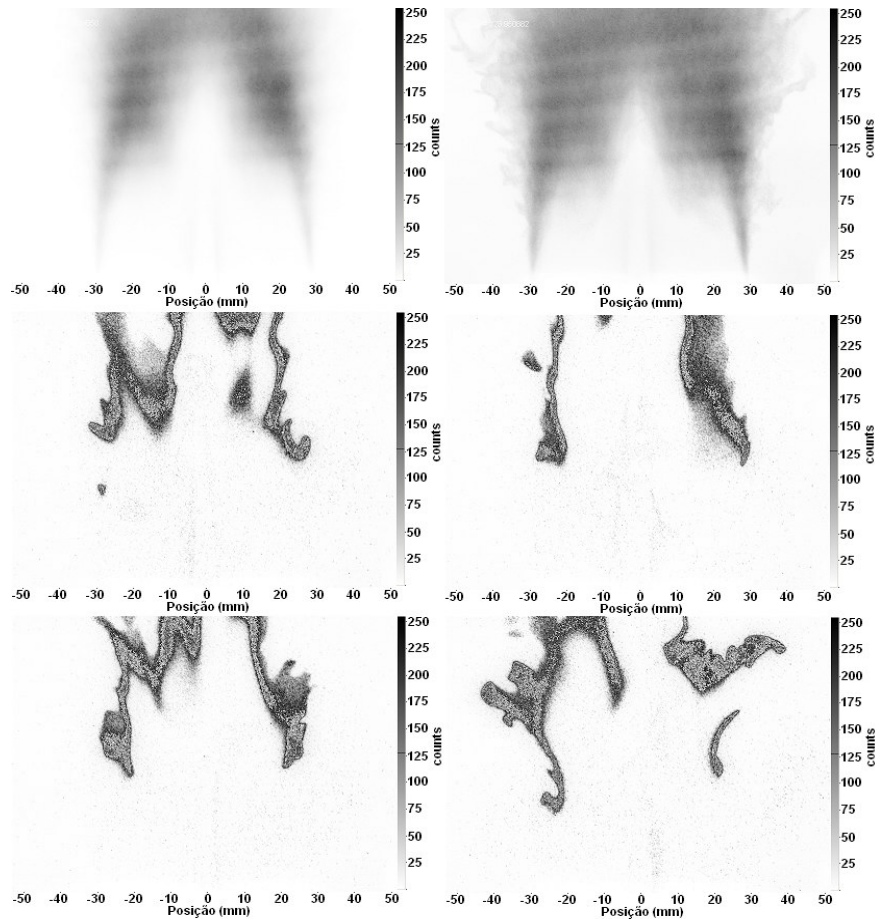


Figura 5.2.5.2 A primeira imagem é a média de 1000 imagens e as outras 4 imagens seguintes são as instantâneas da concentração de OH obtidas com PLIF para $U_j=6,9\text{m/s}$ e $U_a=6,6\text{m/s}$ (caso 8).

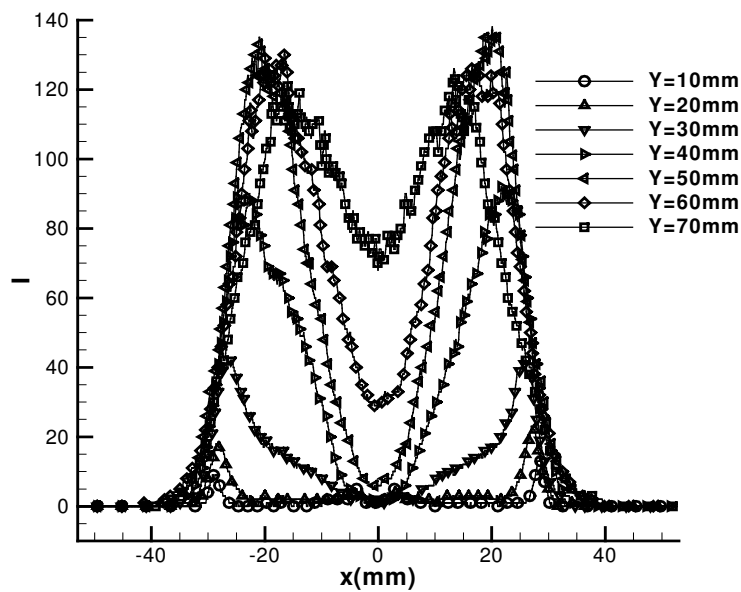


Figura 5.2.5.3 Evolução vertical na chama da intensidade de fluorescência de OH segundo as linhas $Y=10, 20, 30, 40, 50, 60$ e 70mm para o caso 8.

5.3 Comparação dos resultados experimentais com a modelagem numérica

Nesta seção os resultados experimentais obtidos da intensidade de fluorescência do radical OH são comparados com a simulação numérica realizada com o modelo de combustão de elementos de chama (Flamelet). Esta comparação foi realizada considerando-se um caso representativo de cada um dos três tipos de chamas estudadas no presente trabalho. Em particular, o comportamento do escoamento quimicamente reativo é examinado baseado na estrutura da frente de chama média definida pela variação de intensidade de fluorescência e de concentração do OH. Também serão apresentadas as componentes longitudinais e radiais da velocidade obtidas na modelagem, as quais não foram medidas no experimento, para fins de análise dos resultados obtidos.

5.3.1 Chamas tipo V

Para este tipo de chama, foi feita uma simulação numérica da chama menos turbulenta (caso 1), na qual se utilizam as condições de contorno na entrada apresentadas na seção 5.1.2 para:

Velocidade do jato de combustível: 1,31m/s.

Velocidade do ar anular: 1,24m/s.

Na **figura 5.3.1.1** apresenta-se a comparação entre as imagens médias da intensidade de fluorescência do OH e a da simulação da concentração de OH. Na simulação supõe-se que a chama seja simétrica, hipótese que não é inteiramente verificada nos experimentos. Esta figura mostra que a estabilização da chama não é corretamente prevista pela modelagem. Nos experimentos a estabilização ocorre na vizinhança da saída do jato de combustível, enquanto que, na modelagem, a chama encontra-se estabilizada na coroa externa do corpo rombudo. Como consequência, os resultados de cálculo não representam corretamente a zona de garganta característica deste tipo de chama. Além disto, é observado que na imagem média experimental a superfície da chama parece se fechar para $Y=50\text{mm}$, o que não é percebido na simulação.

Na **figura 5.3.1.2** mostra-se a comparação entre a evolução vertical da intensidade média de OH experimental e fração mássica de OH oriunda da simulação, segundo as linhas horizontais mostradas na **figura 5.3.1.1** da simulação.

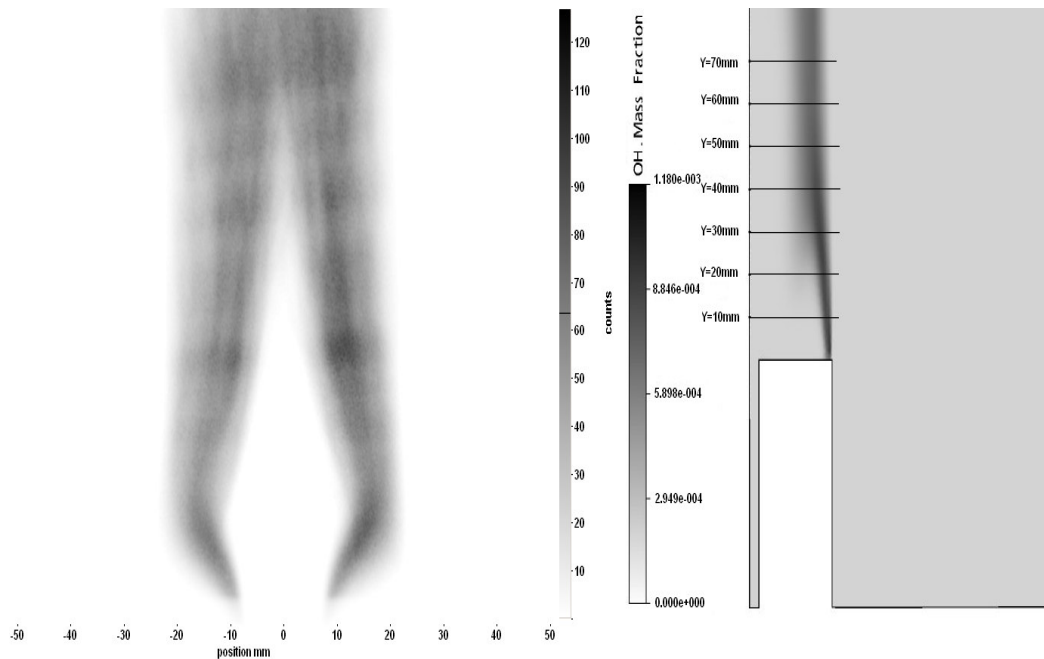


Figura 5.3.1.1 Imagem média da intensidade de fluorescência do OH obtida no experimento (esquerda), e imagem da simulação para a concentração do OH (direita)

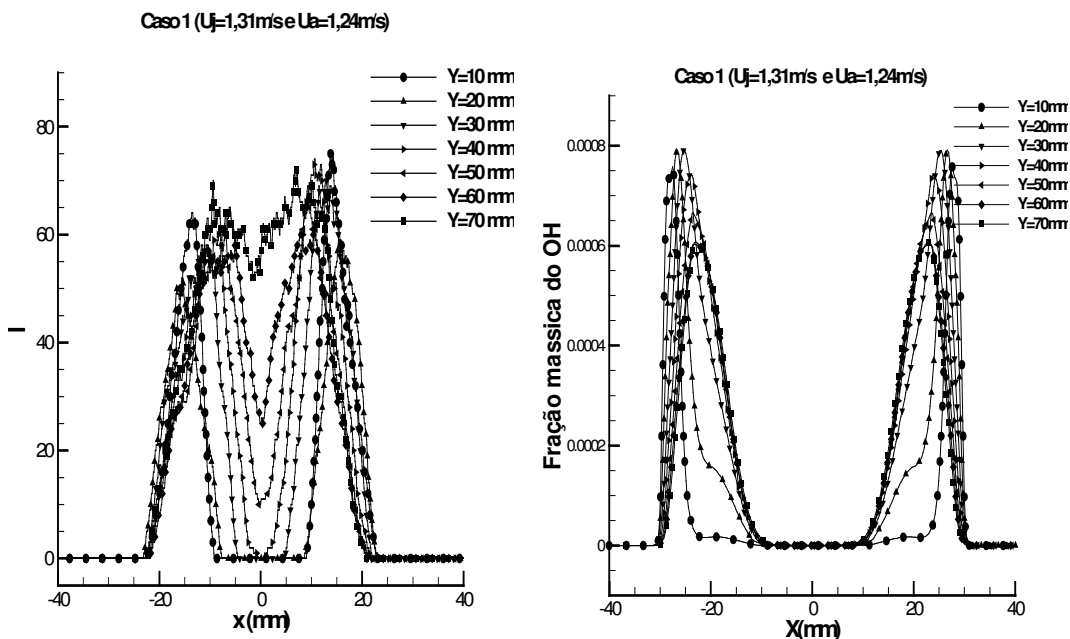


Figura 5.3.1.2 Comparações das linhas horizontais traçadas na chama. Imagem média obtida do experimento (esquerda), simulação (direita).

Nesta figura é claramente observada a não simetria da chama segundo a intensidade de fluorescência de OH para a imagem média experimental. Nesta figura também se observa que a espessura da frente de chama aumenta com a altura e, para $Y=50\text{mm}$, a chama parece se fechar. Na simulação é observado que a espessura também aumenta com a altura, mas não é observado o fechamento da frente de chama obtido no experimento, além disso, a fração mássica de OH aumenta até $Y=30\text{mm}$, para em seguida diminuir com a altura.

Uma possível razão para esta discrepância seria a escolha da condição de contorno de parede adiabática para a face do queimador a qual, durante o processo de convergência, poderia favorecer o modo de estabilização observado. Porém, a especificação da temperatura da parede do corpo rombudo como sendo igual à temperatura do escoamento de ar não acarretou modificações apreciáveis na estrutura da chama. A origem da discrepância entre resultados da modelagem e experimentais será objeto de estudos futuros.

Na **figura 5.3.1.3** se mostra a velocidade longitudinal na linha do centro do jato de combustível obtida com a simulação numérica. Nesta figura se observa que não se encontram pontos de estagnação no eixo de simetria do queimador, o que era de se esperar uma vez que, para este tipo de chama, o ponto de estagnação se encontra fora do eixo de simetria, segundo o trabalho de Huang e Lin [10]. A chama do tipo V é caracterizada por um vórtice externo, e outro interno de menor tamanho e pela localização do ponto de estagnação fora do eixo de simetria [10].

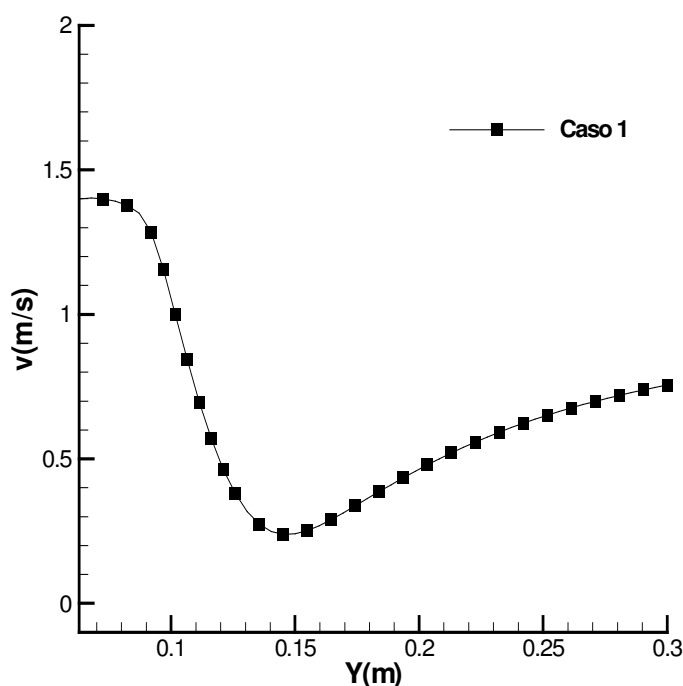


Figura 5.3.1.3 Velocidade longitudinal calculada na linha do centro do queimador.

Outra característica deste tipo de chama é que o jato de combustível penetra a zona de recirculação e faz com que o ponto de estagnação seja localizado fora do eixo de simetria do queimador. Na **figura 5.3.1.4** se mostra a componente longitudinal da velocidade no eixo situado a $X=0,0128$ m do centro do queimador. Nesta figura é observado o ponto de estagnação típico dos vórtices desta chama tipo V. A localização do ponto de estagnação é $X=0,0128$ m

e $Y=0,11\text{m}$. Assim, a caracterização da dinâmica do escoamento para este tipo de chama possui semelhança com a descrição do Huang e Lin [10].

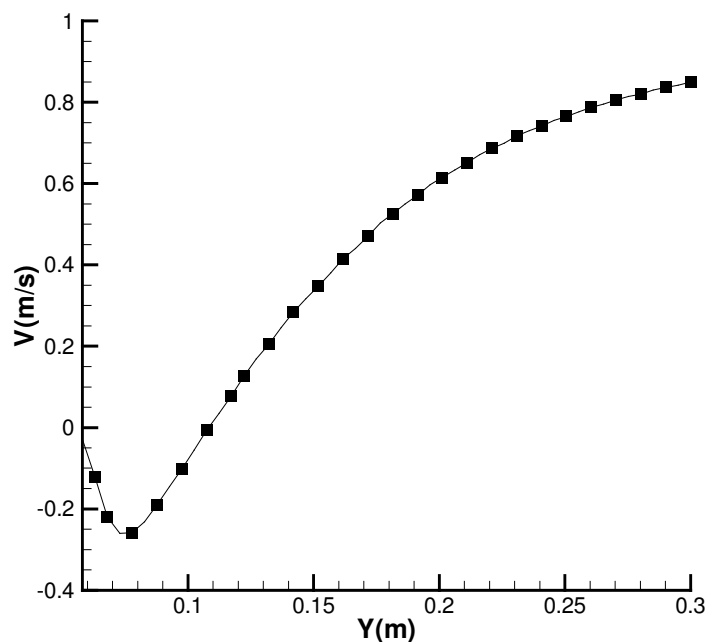


Figura 5.3.1.4 Componente longitudinal da velocidade calculada na linha situada a $X=0,128\text{m}$ do centro do queimador.

Na **figura 5.3.1.5** apresentam-se as componente longitudinal e radial da velocidade nas posições $Y=10$ e 60mm . Observa-se, da evolução da componente longitudinal para $Y=10\text{mm}$, que o jato de combustível domina o escoamento. Porém, mais a jusante da face do queimador, para $Y=60\text{mm}$, é observado um decaimento da componente longitudinal da velocidade. Porém, no tocante à componente radial da velocidade, a variação em termos de ordem de grandeza, é pequena.

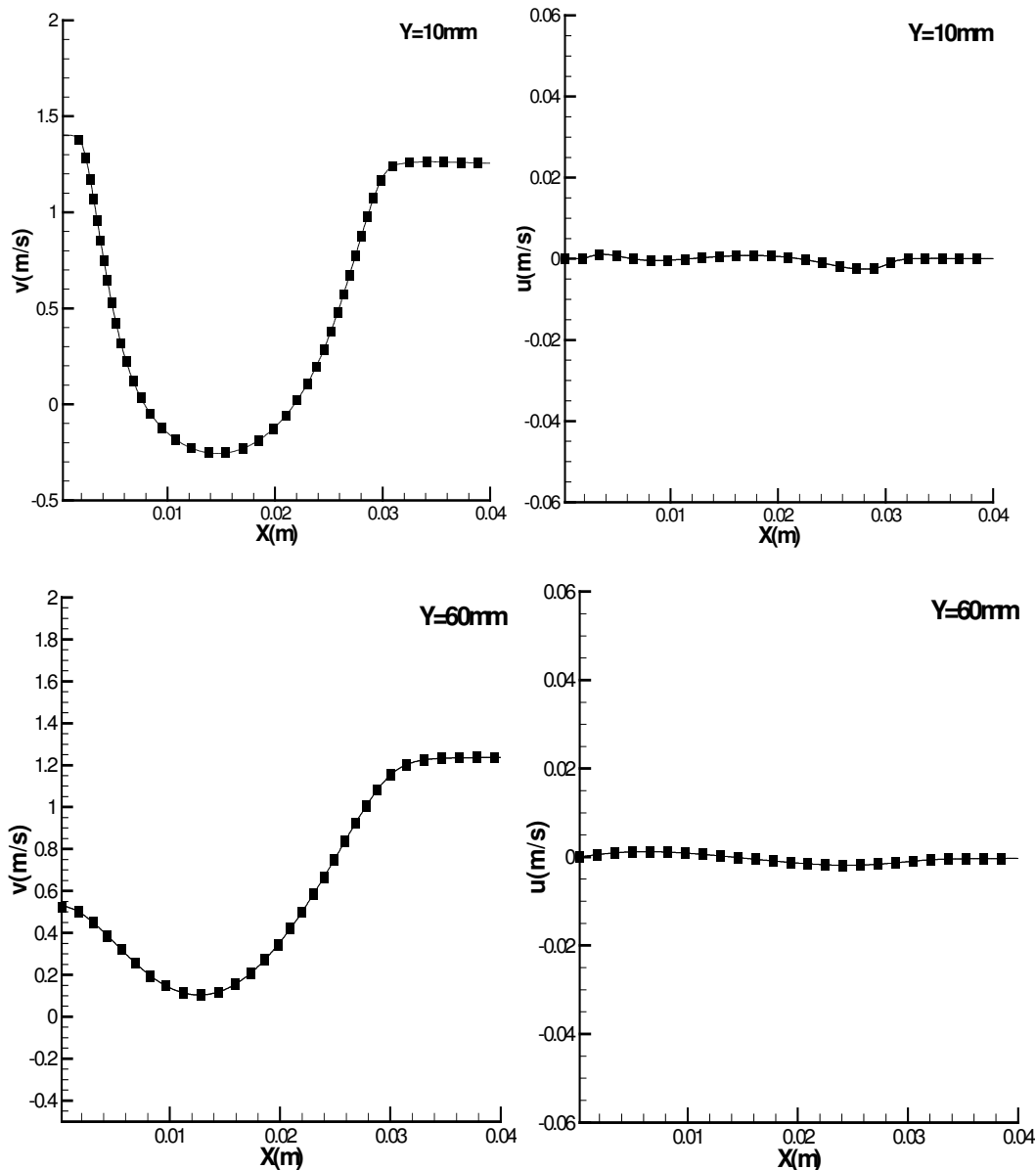


Figura 5.3.1.5 Evolução radial das componentes longitudinal e radial da velocidade calculada para $Y=10$ e 60mm .

5.3.2 Chamas tipo I e II

As chamas tipo I e II ocorrem quando, para uma dada velocidade do jato de combustível, se aumenta a velocidade do ar anular, o que também tem por efeito aumentar a turbulência do escoamento. Nas chamas tipo I, também conhecidas como chamas com recirculação [10], a chama é situada na zona de recirculação e o comprimento visível da chama é pequeno. Este tipo de chama é ancorada na face do queimador, com formação de fuligem, que emite radiação de cor laranja, uma vez que a combustão é rica em combustível. A chama tipo II

é uma chama de transição que ocorre com o aumento da velocidade do jato de combustível, e é caracterizada por instabilidades quanto a sua localização na face do queimador [10]. Neste estudo foram realizadas simulações para estes dois tipos de chama. Na **figura 5.3.2.1**, mostra-se o resultado da simulação da concentração do OH para a uma chama tipo I, correspondente ao caso 9.

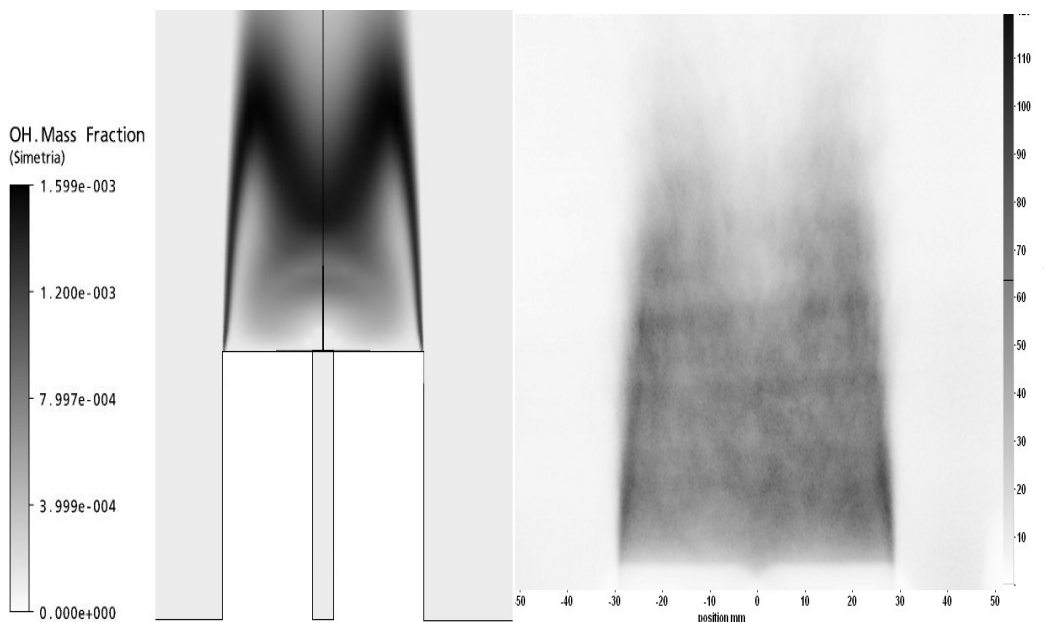


Figura 5.3.2.1 Concentração de OH imagem da simulação (esquerda) e imagem média do experimento (direita) para a chama do caso 9, tipo I.

Nesta figura é claramente observado que, o ponto de ancoramento foi corretamente previsto pela modelagem na periferia do obstáculo. A simulação consegue obter bons resultados para a distribuição de concentração do radical OH mais a jusante da face do queimador, observando-se uma chama curta similar àquela observada na imagem média experimental. Nos demais casos modelados para este tipo de chama, encontra-se uma chama mais alongada do que a obtido nos experimentos.

A comparação, mostrada na **figura 5.3.2.2**, das evoluções radiais de intensidade de fluorescência do radical OH e da sua concentração modelada permite verificar que, na vizinhança do obstáculo, a espessura da frente de chama média é similar nos experimentos e na modelagem. Isto indica que a hipótese de elementos de chama laminares é uma boa aproximação para a interação entre combustão e turbulência nesta região. Mais a jusante, os resultados experimentais e de modelagem apresentam pequenas discrepâncias. No estado atual da análise dos resultados, esta discrepância pode ser devida tanto à incapacidade do modelo de elementos de chama em reproduzir os

fenômenos relacionados à extinções e re-ignições instantâneos observados na seção 5.2, quanto à incapacidade dos modelos baseados na hipótese de Boussinesq de modelar nesta região as tensões de Reynolds e, por conseguinte, o transporte de escalar. Estes pontos deverão ser explorados em trabalhos futuros.

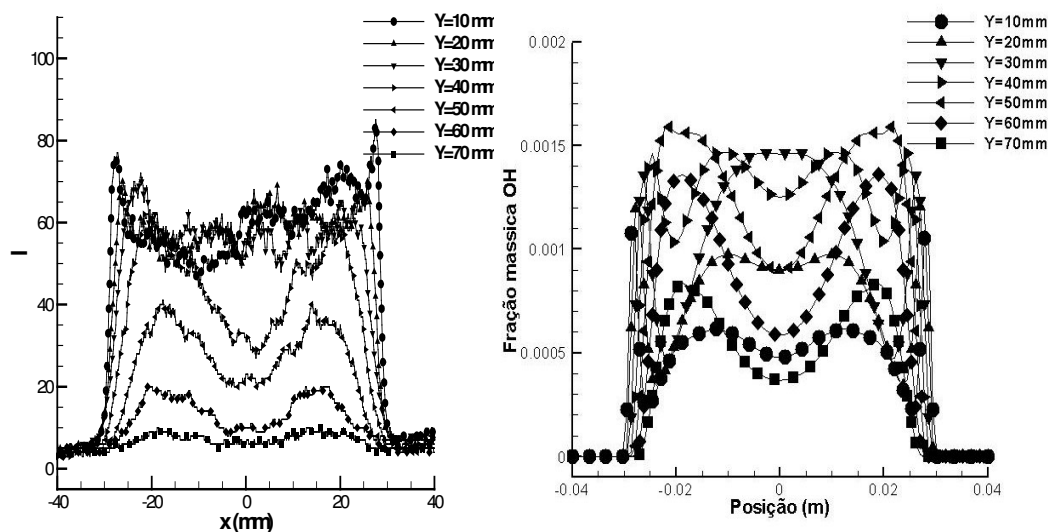


Figura 5.3.2.2 Comparações das linhas horizontais traçadas na chama para o caso 9. Imagem média obtida do experimento (esquerda), simulação (direita).

A dinâmica do escoamento característico deste tipo de chamas, as quais ocorrem para baixas velocidades do jato de combustível, é caracterizada por uma recirculação com dois vórtices, um interno de pequeno tamanho, e outro externo de maior tamanho. O vórtice externo é situado a jusante do interno, e dois pontos de estagnação são encontrados ao longo da linha central [10].

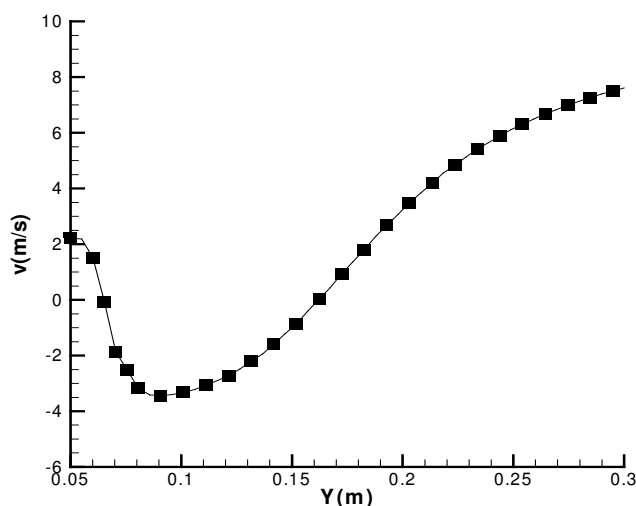


Figura 5.3.2.3 Componente longitudinal da velocidade calculada ao longo da linha central do queimador para o caso 9.

Na **figura 5.3.2.3** mostra-se a componente longitudinal da velocidade calculada ao longo do eixo central do queimador obtida para o caso 9. Nesta

figura observa-se claramente a existência de dois pontos de estagnação. Assim, a estrutura da frente de chama turbulenta é qualitativamente bem prevista.

As chamas tipo II, chamadas de transitivas, são instáveis e podem tanto estar ancoradas à face do queimador quanto ligeiramente descoladas desta. Na **figura 5.3.2.4** se mostra o resultado da simulação realizada e a comparação com os resultados experimentais. Observe-se que, da imagem média da intensidade de fluorescência do OH, a frente de chama é fechada a cerca de 70mm de altura da face do queimador, enquanto que na simulação não ocorre este fechamento.

Com respeito à dinâmica do escoamento reativo, na **figura 5.3.2.5** se mostra a componente longitudinal da velocidade ao longo do eixo de simetria do queimador obtida da simulação numérica. Não são encontrados pontos de estagnação, o que é condizente com este tipo de chama.

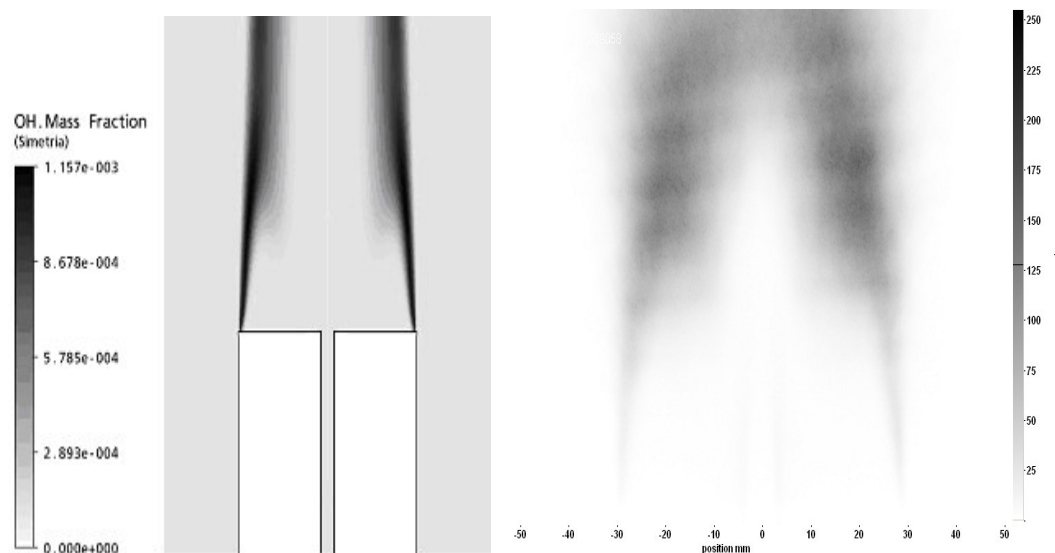


Figura 5.3.2.4 Imagem média da intensidade de fluorescência do OH obtida no experimento (esquerda), e imagem da simulação para a concentração do OH (direita).

Por fim, a **figura 5.3.2.6** apresenta uma comparação entre resultados experimentais e de simulação da evolução radial da intensidade de fluorescência e da concentração do radical OH. Esta figura mostra que um bom acordo entre modelagem e experimento é obtido apenas na vizinhança da face do queimador. Uma vez que nesta situação as imagens instantâneas apresentadas na seção 5.2 também mostram extinções da frente de chama, as razões possíveis para as discrepâncias obtidas mais a jusante são idênticas às das chamas do tipo I.

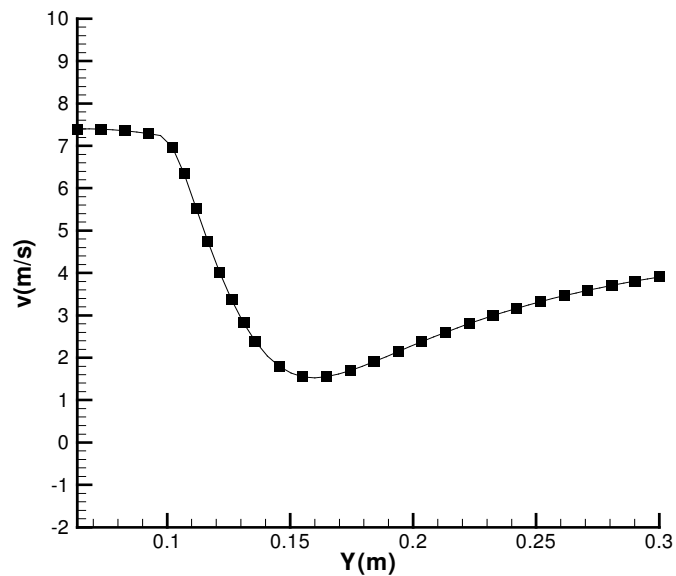


Figura 5.3.2.5 Componente longitudinal da velocidade ao longo da linha central do queimador experimental para o caso 8 realizada via simulação numérica.

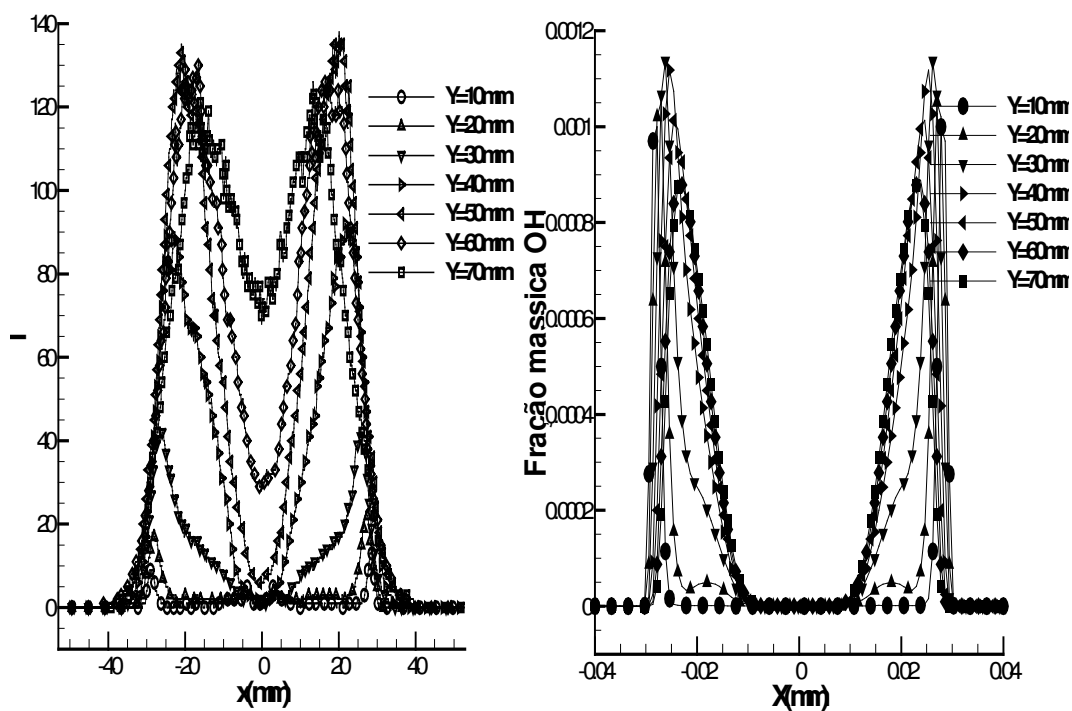


Figura 5.3.2.6 Comparações das linhas horizontais traçadas na chama em ambos os casos para o caso 8. Imagem média obtida do experimento (esquerda), e da simulação (direita).