

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE PARTÍCULAS  
POR SONDA TERMOFORÉTICA PARA ANÁLISE MORFOLÓGICA  
DA FULIGEM PRODUZIDA EM CHAMAS DE DIFUSÃO

por

Felipe Bialeski Peng

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2015

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE PARTÍCULAS  
POR SONDA TERMOFORÉTICA PARA ANÁLISE MORFOLÓGICA  
DA FULIGEM PRODUZIDA EM CHAMAS DE DIFUSÃO

por

Felipe Bialeski Peng

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Eng. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Dr. Eng. Fernando Marcelo Pereira

Co-Orientador: Prof. Dr. Eng. Fabiano Disconzi Wildner

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Eng. Francis Henrique Ramos França

Prof. Dr. Eng. Eduardo Andre Perondi

Prof.<sup>a</sup> Dra. Eng. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 12 de junho de 2015.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por todo o amor, apoio e incentivo ao longo de todos meus desafios e conquistas, sendo esta uma delas. Em especial aos meus pais Renato Peng e Zoraia Bialeski Peng e ao meu primo Fernando Bialeski Machado pela ajuda na montagem da bancada experimental e na realização do experimento.

Agradeço ao meu orientador Fernando Marcelo Pereira pelos ensinamentos e pelo suporte no desenvolvimento deste e de outros trabalhos.

Agradeço ao meu co-orientador Fabiano Disconzi Wildner pela ajuda e pelo empréstimo de equipamentos necessários para a realização desse trabalho.

Agradeço aos integrantes do Laboratório de Combustão pela camaradagem e pela ajuda nesse e em outros projetos, com especial agradecimento ao Isaías Mortari Machado e ao Nattan Roberto Caetano.

Agradeço aos técnicos Rafael Quines da Silva e Henrique Wilson Werkhausen Filho pela ajuda na realização desse trabalho.

Agradeço à Tatiana Bendo, à Deise Rebelo Consoni e ao LCME (Laboratório Central de Microscopia Eletrônica) da UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina) pela ajuda e disponibilidade na análise das amostras no Microscópio Eletrônico de Transmissão.

Agradeço aos amigos que me apoiaram e que me ajudaram de uma maneira ou de outra para que esse projeto tomasse forma, em especial ao Fernando Barison Cardoso Barbosa e à Martina Ferrari Mallmann.

Agradeço ao Professor Rodrigo Rossi pelo empréstimo da câmera de alta velocidade.

Agradeço à UFRGS como um todo e especialmente aos bons e ótimos professores que tive por todos os conhecimentos, vivências, oportunidades e ensinamentos oferecidos.

Agradeço de forma mais geral a todos que contribuíram direta ou indiretamente na minha formação de Engenheiro Mecânico.

PENG, F. B. **Projeto e Construção de Sistema de Captação de Partículas por Sonda Termoforética para Análise Morfológica da Fuligem Produzida em Chamas de Difusão.** 2015. 26 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2015.

## **RESUMO**

A fuligem é um poluente comumente encontrado em sistemas de combustão que se relaciona a danos ambientais e riscos para a saúde. Por outro lado, a fuligem também pode ser benéfica quando o objetivo é aumentar a troca térmica por radiação em chamas. O estudo da morfologia da fuligem tem um papel relevante na compreensão dos processos de formação e consumo deste poluente. Este trabalho tem como objetivo projetar, construir e validar um sistema de captação de fuligem por sonda termoforética, que permita analisar as diferentes fases de crescimento e oxidação da fuligem produzida em chamas laminares de difusão. A análise das partículas é feita por microscopia eletrônica de transmissão. O sistema de coleta construído teve o tempo de residência da sonda dentro da chama regulado por um sistema de detecção especialmente desenvolvido. Através da análise de imagens obtidas por uma câmera de alta velocidade, verificou-se a perturbação na chama causada pela sonda e analisou-se o movimento do sistema de coleta da fuligem. A análise em microscópio eletrônico de transmissão das amostras coletadas permitiu obter dados de diâmetro das partículas de fuligem e calcular a fração volumétrica em cada ponto de medida, obtendo resultados condizentes com a literatura, tanto qualitativamente quanto quantitativamente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fuligem, chama de difusão, sonda termoforética, microscopia eletrônica de transmissão.

PENG, F. B. **Project and Construction of a Thermophoretic Particle Deposition System to Analyze the Morphology of Soot Produced in Diffusion Flames.** 2015. 26 pages. Monograph (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, 2015.

## **ABSTRACT**

Soot is a pollutant commonly found in combustion systems, which relates to environmental damage and health risks. On the other hand, soot may also be beneficial when the goal is to increase the heat exchange by radiation in flames. The study of soot morphology plays an important role in understanding the formation and consumption of this pollutant. This paper aims to design, build and validate a thermophoretic sampling soot deposition system in order to analyze the different stages of growth and oxidation of soot produced in laminar diffusion flames. The particle analysis is done by transmission electron microscopy. The probing system had its residence time inside the flame calibrated by a detection system especially developed. Through the analysis of images obtained with a high speed camera, it was observed the disruptions in the flame caused by the probe and it was analyzed the movement of the soot probing system. With the analysis of the samples in a transmission electron microscope it was possible to obtain diameter data of the soot particles and to calculate the volumetric fraction in each measuring point, obtaining results consistent with the literature, both qualitatively and quantitatively.

**KEYWORDS:** Soot, diffusion flame, thermophoretic probe, transmission electron microscopy.

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	OBJETIVOS .....	1
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
4	REFERENCIAL TEÓRICO CONCEITUAL .....	2
4.1	Fuligem e suas Etapas na Combustão .....	2
4.2	Termoforese .....	3
4.3	TSPD (Deposição de Partículas por Sonda Termoforética) .....	4
4.4	Microscopia Eletrônica de Transmissão .....	5
5	MÉTODO .....	5
5.1	Queimador e Sistemas de Alimentação de Gases .....	5
5.2	Sonda Termoforética .....	6
5.3	Sistema de Inserção e Retirada da Sonda de Dentro da Chama .....	6
5.4	Calibração do Tempo de Residência e Análise Cinemática do Movimento da Sonda ..	8
5.5	Parâmetros Experimentais .....	9
5.6	Análise das Sondas em MET e das Imagens Obtidas .....	10
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	11
6.1	Comprimento e Outras Características Visíveis da Chama .....	11
6.2	Sistema de Calibração: Tempo de Residência da Sonda Dentro da Chama .....	11
6.3	Deslocamento da Sonda .....	12
6.4	Efeitos da Inserção e Retirada da Sonda Sobre a Chama .....	13
6.5	Análise Morfológica da Fuligem .....	13
7	CONCLUSÕES .....	15
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
	APÊNDICE A – Balanço Energético e Cálculo da Temperatura da Sonda .....	16
	APÊNDICE B – Análise Cinemática do Avanço e Retorno da Sonda .....	17
	APÊNDICE C – Trabalhos Futuros e Melhorias no Aparato Experimental .....	19
	Trabalhos Futuros .....	19
	Melhorias no Aparato Experimental .....	19

## 1 INTRODUÇÃO

A fuligem é um dos principais poluentes provenientes de processos de combustão. Dado que tais processos são largamente utilizados em sistemas de transporte, processos de manufatura e geração de energia, a emissão de partículas na atmosfera pode gerar sérios problemas ambientais e de saúde. Conhecer mais sobre sua formação e consumo é uma das etapas necessárias para tentar diminuir sua emissão [Richter e Howard, 2000]. A fuligem pode também ter utilidades práticas como em produtos da indústria química para pneus e toners, e ainda ser utilizada em caldeiras, devido à alta emissividade da fuligem e à alta transferência de calor por radiação [Machado, 2015].

Dentre as várias técnicas existentes para caracterizar a fuligem formada em chamas, destaca-se a amostragem por sonda termoforética. Nela, uma superfície fria é inserida na chama e as partículas de fuligem são depositadas nessa superfície devido à força termoforética que age no sentido oposto ao gradiente de temperatura. Tal técnica é capaz de fornecer detalhes da morfologia das partículas de fuligem e também pode ser usada para estimar a fração volumétrica da fuligem.

O presente trabalho visa a construir e validar um sistema de amostragem de partículas por deposição termoforética para auxiliar na melhor compreensão e no estudo da formação, do crescimento, da aglomeração e da oxidação da fuligem produzida em chamas. O dispositivo construído também poderá ser utilizado e até mesmo aperfeiçoado para estudos futuros de termoforese, variando parâmetros experimentais como tipos de chamas e materiais depositados sobre as sondas.

## 2 OBJETIVOS

Os dois objetivos principais do presente trabalho são projetar, construir, calibrar e validar um sistema de deposição de partículas por sonda termoforética e também analisar a morfologia e a fração volumétrica da fuligem produzida em chamas de difusão de etileno (eteno).

Estes objetivos principais podem ser desmembrados em objetivos secundários:

- Revisar a literatura especializada no assunto;
- Projetar e construir a estrutura da bancada experimental;
- Projetar, montar, calibrar e analisar o sistema automático de inserção e retirada da sonda de dentro da chama;
- Analisar as sondas em MET (Microscópio Eletrônico de Transmissão);
- Analisar os resultados obtidos em termos de morfologia e fração volumétrica.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ho, 2010, fez um estudo utilizando técnicas laser e também a TSPD (*Thermophoretic Sampling Particle Deposition* - Deposição de Partículas por Sonda Termoforética) para caracterizar a fuligem em chamas de pré-mistura do tipo contracorrente de etileno com ar, em diferentes configurações e razões estequiométricas. Esse autor utilizou um cilindro pneumático de dupla ação e um timer para colocar a sonda dentro da chama por um período de 40 ms, com uma velocidade de deslocamento de  $2 \text{ m.s}^{-1}$ . A análise dos seus resultados foi feita utilizando um MET (Microscópio Eletrônico de Transmissão), usando magnificações de 10500 a 64000 vezes. Foi possível observar as diferentes etapas da fuligem: formação, crescimento, aglomeração e oxidação.

Dobbins e Megaridis, 1987, usaram diversos tipos de sondas em uma chama de difusão laminar de etileno e analisaram os resultados tanto com MET, como com microscópio eletrônico de varredura (MEV), concluindo que a microscopia eletrônica de transmissão é mais

adequada para a obtenção dos resultados de morfologia almejados. Eles verificaram que os tamanhos das partículas de fuligem aumentam com a altura da chama nas partes inferior e intermediária da chama e, após, diminuem à medida que se deslocam em direção ao topo da chama, devido à oxidação.

Köylü *et al.*, 1997, utilizaram a TSPD em chamas de difusão de etileno para analisar tanto a morfologia da fuligem, como sua fração volumétrica e propriedades fractais. Isso é possível através de um tratamento teórico da deposição de partículas por termoforese e das estimativas ou medições das temperaturas da chama e da sonda. As frações volumétricas encontradas estão de acordo com as encontradas com a técnica de extinção laser, com exceção da região inferior da chama, onde o autor obteve resultados maiores, devido à quase transparência das partículas de fuligem em seu estágio inicial para as técnicas laser.

Eisner e Rosner, 1985, obtiveram resultados de frações volumétricas em uma chama de pré-mistura plana, utilizando pequenas sondas de termopares e cálculos de balanço energético. Esses autores também comprovaram que o principal efeito agindo sobre a deposição de partículas em uma sonda fria é a termoforese e não o movimento Browniano. McEnally *et al.*, 1997, utilizaram essa mesma técnica (TPD – *Thermocouple Particle Densitometry*) em chamas de difusão de etileno.

Hu *et al.*, 2003, e Sunderland *et al.*, 1994, utilizaram técnicas laser e sondas termoforéticas em chamas difusivas laminares e turbulentas de etileno e acetileno, obtendo resultados similares a outros da literatura.

Santoro *et al.*, 1983, utilizaram diversas técnicas laser para obter frações volumétricas, concentrações e diâmetros médios das partículas de fuligem. Esses autores, juntamente com Köylü *et al.*, 1997, e McEnally *et al.*, 1997, utilizaram uma configuração de chama igual à deste trabalho.

Mais detalhes sobre trabalhos da literatura, conceitos e resultados importantes são mostrados na próxima seção.

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO CONCEITUAL

### 4.1 Fuligem e suas Etapas na Combustão

Ho, 2010, afirma que a fuligem, como resultado de uma mistura rica em combustível, em nível local ou global, em elevadas temperaturas, evolui de fragmentos moleculares e HPA (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos) que sofrem crescimento superficial e após se aderem para a formação de cadeias e aglomerados. Ela tem aparência preta e composição similar à da grafita. Forma-se em temperaturas entre 1000 e 2500 °C, com densidade média de 1,8 g.cm<sup>-3</sup> quando já desenvolvida, dependendo da razão de equivalência local. O elemento Hidrogênio está presente na fuligem também, mas em pequena quantidade (em torno de 10% nas fases iniciais de formação e em menor quantidade após). A fuligem na sua fase mais desenvolvida é formada por cadeias lineares ou ramificadas de esferas de diâmetro entre 20 e 60 nm de aproximadamente 10<sup>6</sup> átomos de carbono, que se aderem umas às outras, podendo haver de dezenas a centenas dessas esferas em uma cadeia. Entretanto, é a união dessas cadeias em aglomerados maiores que dá à fuligem seu caráter leigo e popular de pó ou poeira leve. Diversos são os trabalhos recentes na literatura tratando desse assunto, tanto experimentais quanto numéricos, como em Kholghy, 2012.

Segundo Richter e Howard, 2000, a formação da fuligem começa com as reações de formação de precursores moleculares da fuligem na forma gasosa (HPA de alto peso molecular, 500 a 1000 u.m.a.) que se formam a partir de componentes mais leves, principalmente o acetileno. Após, segue a fase de nucleação de partículas, que têm peso de aproximadamente 2000 u.m.a. e diâmetro de 1,5 nm. Depois vem a fase de crescimento mássico e superficial, em que moléculas gasosas se juntam às partículas através de regiões



em que há radicais livres. Paralelamente ao crescimento mássico, ocorre a coagulação de partículas e a aglomeração delas, formando cadeias e aglomerados de cadeias. Após, ocorre a oxidação da fuligem pela presença do OH, O e O<sub>2</sub>. Todas essas fases ocorrem à medida que as partículas de fuligem se deslocam ao longo do escoamento da chama. Os processos acima mencionados são influenciados por fatores como tipo de chama, combustível, razão de equivalência global e local, temperatura e pressão. Um esquema muito simplificado da formação da fuligem para o caso de chamas pré-misturadas é mostrado na Figura 4.1. O processo para chamas difusivas é muito semelhante.

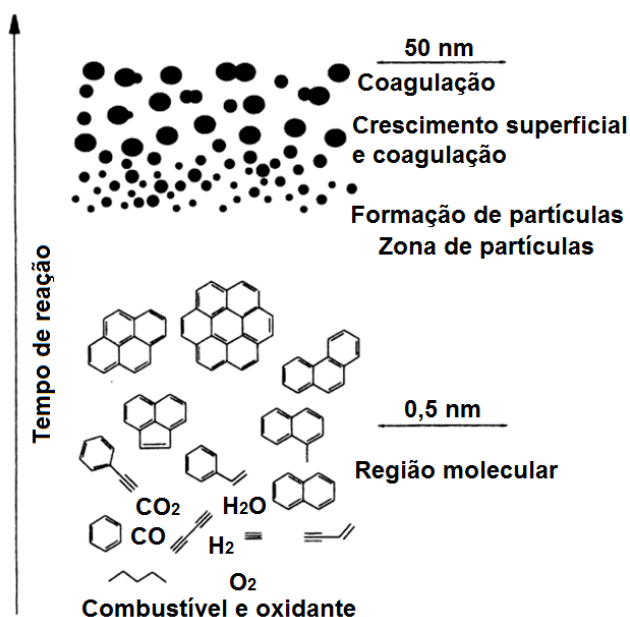


Figura 4.1 – Formação da fuligem [adaptado de Bockhorn, 1994].

Bockhorn, 1994, afirma que os tempos de formação, de mistura com o oxidante e de oxidação da fuligem determinam se haverá ou não a liberação de fuligem na exaustão, classificando assim as chamas entre *smoking* e *non-smoking*.

## 4.2 Termoforese

A Termoforese também é conhecida como termodifusão, termomigração, efeito Soret ou efeito Ludwig-Soret. Ho, 2010, baseado em outros trabalhos da literatura, define termoforese como o fenômeno onde pequenas partículas, suspensas em um gás, se deslocam na direção oposta ao gradiente de temperatura com uma velocidade  $u_T$  (Equação 4.1):

$$u_T = D_T \left( -\frac{\nabla T_g}{T_g} \right) \quad (4.1)$$

onde  $D_T$  é a difusividade termoforética (função da temperatura e difusividade do gás, mas independente do tamanho da partícula) ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $T_g$  é a temperatura do gás (K) e  $\nabla T_g$  o gradiente de temperatura ( $\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

Essa difusão ocorre devido à maior energia cinética das moléculas do gás quente que sofrem choques mais frequentes contra as partículas de fuligem do que as moléculas de menor temperatura, gerando assim uma força termoforética.

Há também na literatura trabalhos numéricos mais recentes envolvendo o fenômeno de termoforese, como em Cohan, 2010.

### 4.3 TSPD (Deposição de Partículas por Sonda Termoforética)

Baseado na seção precedente, pode-se afirmar que a inserção de uma sonda fria em um gás quente contendo partículas resulta no fluxo destas através da camada limite térmica, no sentido oposto ao do gradiente, ou seja, em direção à sonda. Este é o princípio do método TSPD [Ho, 2010]. A sonda é inserida à temperatura ambiente na chama e permanece por um tempo reduzido, que deve ser longo o suficiente para que uma quantidade significativa de fuligem seja capturada, mas não excessivo, evitando que a sonda aqueça e que o efeito da termoforese cesse. Dobbins e Megaridis, 1987, utilizaram tempos entre 30 a 120 ms, sendo os tempos maiores para a base da chama, onde a fração volumétrica de fuligem é menor. Nesse intervalo de tempo, os autores não notaram nenhuma diferença em termos de morfologia das partículas, desde que a cobertura da sonda por elas fosse menor que 10%. Um tempo de permanência na chama de 65 ms faz com que a sonda saia a temperaturas próximas a 100 °C. Devido a diversos fatores como: a elevada capacidade térmica da sonda em comparação à fuligem, o reduzido tempo de residência da sonda dentro da chama e o baixo tempo necessário para as partículas de fuligem se deslocarem da chama para a sonda, a temperatura das partículas é rapidamente reduzida após impactarem na sonda fria, fazendo com que as reações de crescimento superficial e oxidação sejam desaceleradas, “congelando” seu estado (sua morfologia) naquele ponto da chama [Dobbins e Megaridis, 1987, e Ho, 2010].

A inserção e retirada da sonda deve ser feita rapidamente, desde que não afete de maneira importante o regime de escoamento dos gases. Estudos da literatura usaram velocidades de aproximadamente 2 m.s<sup>-1</sup> [Ho, 2010; Dobbins e Megaridis, 1987]. Dobbins e Megaridis, 1987, fizeram um estudo e mostraram que nessas velocidades o escoamento não é afetado de maneira importante, desde que seja utilizado um defletor fixo entre a chama e o mecanismo de inserção e retirada da sonda. Isso valida os resultados que podem ser obtidos desse tipo de medida, mesmo que intrusiva. Ainda segundo esses autores, os resultados obtidos com essa técnica nas regiões ricas da chama, próximo ao eixo central, não são de alta confiabilidade, visto que a sonda passa pela região anular de maior presença de fuligem durante a inserção e a retirada da sonda. Nessas passagens por essa região, pode ocorrer a deposição de partículas de fuligem não pertencentes à região central de interesse, mascarando os resultados obtidos.

Ho, 2010, afirma que a principal vantagem da técnica TSPD é que ela consegue distinguir cada fase das partículas de fuligem, medindo tamanhos e analisando morfologias, não necessitando do conhecimento de parâmetros com alta incerteza como *refractive index* e *bulk density*, necessário em técnicas laser.

Köylü *et al.*, 1997, encontraram uma expressão analítica para a fração volumétrica da fuligem ( $f_v$ ) (adim.), Equação 4.2:

$$f_v \cong \xi \frac{V_p}{A_i t_r} \quad (4.2)$$

onde,

$$\xi \equiv \frac{2}{D_T Nu_x} \left[ 1 - \left( \frac{T_w}{T_g} \right)^2 \right]^{-1} \quad (4.3),$$

$$V_p = \frac{\pi d_p^3}{6} \sum_l N_l \quad (4.4),$$

$$N_l = k_a \left( \frac{A_a}{A_p} \right)^\alpha \quad (4.5),$$

$V_p$  é o volume total de partículas depositadas na fotografia analisada da sonda termoforética (m<sup>3</sup>),  $A_i$  é a área total da fotografia analisada (m<sup>2</sup>),  $t_r$  é o tempo de residência da sonda dentro da chama (s),  $D_T$  é a difusividade termoforética da partícula (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>),  $x$  é a posição vertical

analisada ao longo da sonda (m),  $Nu_x$  é o número de Nusselt local para a transferência de calor por convecção (adim.),  $T_w$  é a temperatura da parede da sonda (K),  $d_p$  é o diâmetro da partícula primária de fuligem (m),  $N_l$  é o número de partículas primárias por agregado (adim.),  $A_a$  é a área projetada de um agregado (m<sup>2</sup>),  $A_p = \pi d_p^2/4$  é a área projetada de uma partícula primária (m<sup>2</sup>) e  $k_a = 1,15$  e  $\alpha = 1,09$  são constantes (adim.) [Köylü *et al.*, 1995].

#### 4.4 Microscopia Eletrônica de Transmissão

A microscopia eletrônica de transmissão consiste em um feixe de elétrons que atravessa a amostra analisada, acelerado por uma diferença de potencial. Dependendo do tamanho e da densidade do material em análise, uma maior ou menor quantidade de elétrons pode ser absorvida ou espalhada pela amostra. O microscópio é composto de uma fonte de elétrons, de lentes e colimadores óticos e eletromagnéticos e de uma tela fluorescente com câmera para registro. Essa técnica permite ter resolução suficiente em imagens para poder visualizar objetos da ordem de 0,1 nm devido ao baixo comprimento de onda dos elétrons, o que não é possível com um microscópio ótico [Encyclopaedia Britannica, 2015 e Nobel Prize, 2015].

## 5 MÉTODO

O aparato experimental utilizado e detalhado nas próximas páginas é esquematizado na Figura 5.1. Ele é globalmente composto pelo queimador e sistemas de alimentação de gases, pelo dispositivo de movimentação da sonda e pelo sistema de controle.

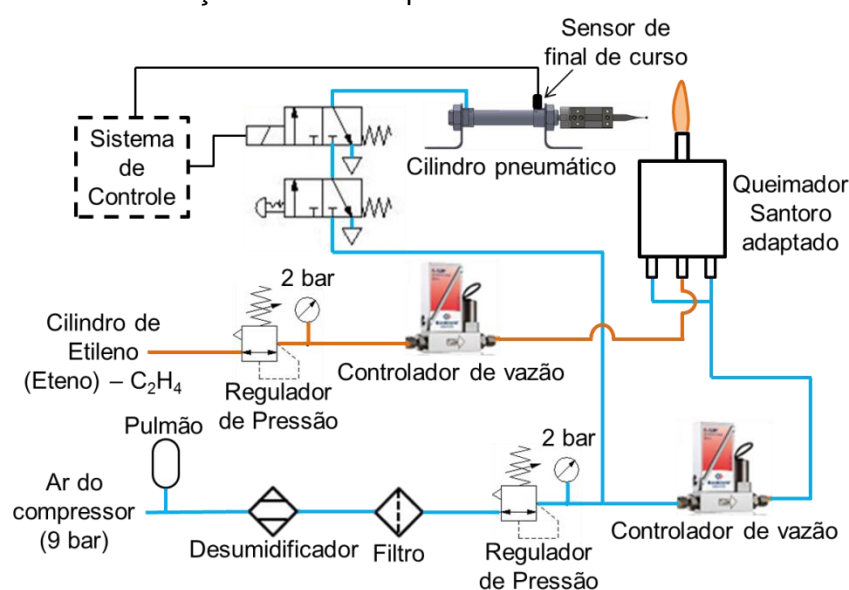


Figura 5.1 – Esquema geral do aparato experimental.

### 5.1 Queimador e Sistemas de Alimentação de Gases

O queimador utilizado é do tipo Santoro adaptado, similar ao utilizado em outros trabalhos da literatura [Santoro *et al.*, 1987, McEnally *et al.*, 1997, Köylü *et al.*, 1997, e Machado, 2015]. Ele é composto por um tubo central alimentado com o gás combustível, cercado de um *co-flow* (escoamento paralelo) de ar utilizado para estabilizar a chama, tornando-a a mais laminar e estável possível. O tubo central tem diâmetro interno de 11,11 mm e externo de 12,70 mm. O *co-flow* (coaxial ao tubo central e de diâmetro externo de 101,65 mm) é produzido fazendo o ar passar por um “pleno” (espaço vazio), seguido de telas

metálicas, um leito de esferas e uma colmeia cerâmica, de modo a ter um escoamento de ar uniforme.

O combustível utilizado é etileno (nome comercial do eteno) grau 2,5 (99,5% puro) a uma pressão de saída do regulador de pressão de 2 bar. O ar, estabilizado em 3 bar após o regulador de pressão, é fornecido por um compressor a 9 bar, seguido de um pulmão de 500 L e de um desumidificador.

Foram utilizados dois controladores de vazão mássica, um para o etileno e outro para o ar, marca Bronkhorst, série EL200, modelos F-201CV-500-AAD-22-V e F-004BI-IVU-55-V/F-112AC-M10-AAD-55-V, respectivamente, com vazões máximas de  $0,5 \text{ Ls.min}^{-1}$  e  $150 \text{ Ls.min}^{-1}$  (Ls significa litro *standard*, que representa um litro a  $20^\circ\text{C}$  e a 1 atm). O medidor utilizado para o etileno é calibrado para metano, sendo necessária a compensação segundo os fatores de conversão fornecidos pelo fabricante (baseados nas capacidades térmicas). A incerteza dos controladores é de 0,5% do valor de leitura mais 0,1% do valor de fundo de escala.

## 5.2 Sonda Termoforética

A sonda (*TEM Grid*), marca Ted Pella, modelo Pelco 01840-F, é uma tela porosa de cobre de 3,05 mm de diâmetro composta por fios de  $37 \mu\text{m}$ , formando furos quadrados de  $90 \mu\text{m}$  (200 mesh), tendo transparência de 50%, e é revestida por uma camada contínua de carbono de 15 a 25 nm de espessura. Esse mesmo tipo de sonda foi usado por Ho, 2010, e é correntemente utilizado para análises em MET e MEV. O revestimento por filme de carbono é recomendável devido à sua estabilidade e à qualidade da imagem obtida no MET, obtendo melhores relações de contraste que filmes de monóxido de silício e resultados idênticos em termos de morfologia [Dobbins e Megaridis, 1987]. O fornecedor da sonda garante uma cobertura de pelo menos 80% dos buracos da tela com a camada de carbono, mas a mesma pode apresentar enrugamento. A tela tem uma borda lisa, pela qual deve ser manuseada, evitando danificar o frágil filme de carbono. A sonda tem um lado brilhante, no qual é depositada a camada de carbono (de cor escura), sendo o outro lado fosco.

Após a retirada das sondas de dentro da chama, elas são armazenadas temporariamente em uma caixa de armazenamento graduada, marca Ted-Pella, modelo Pelco 160, até que sejam levadas para análise. Todo manuseio das sondas é feito utilizando uma pinça idêntica à utilizada no dispositivo de inserção e retirada da sonda de dentro da chama, mostrado na próxima seção.

## 5.3 Sistema de Inserção e Retirada da Sonda de Dentro da Chama

Esse sistema é composto de: dispositivo com pinça, estrutura de suporte do conjunto e cilindro pneumático com sistema de controle.

A pinça que leva a sonda até o interior da chama, marca Dumont (modelo High Precision, style 4, número 5721), de aço inoxidável não magnético, tem comprimento de 110 mm e largura máxima de 9 mm. O fechamento e a abertura da pinça são feitos através do aperto de dois parafusos de ajuste próximos à ponta da pinça.

A pinça é presa a um dispositivo que, por sua vez, é fixo no final da haste do cilindro pneumático. Esse dispositivo é composto de um corpo de polietileno de alta densidade (PEAD) torneado e fresado e de quatro chapas metálicas com furos rosqueados e 6 parafusos M6x10 de fixação e ajuste da pinça (Figura 5.2). Esse dispositivo foi projetado de modo a minimizar efeitos de inércia no avanço e no recuo da sonda. As chapas são de aço ABNT 1045, com 4 mm de espessura, para garantir uma durabilidade apropriada das roscas, e são presas ao dispositivo através de 4 parafusos M3x25 com porca. As dimensões externas do dispositivo são 30 mm de diâmetro por 75 mm de comprimento.

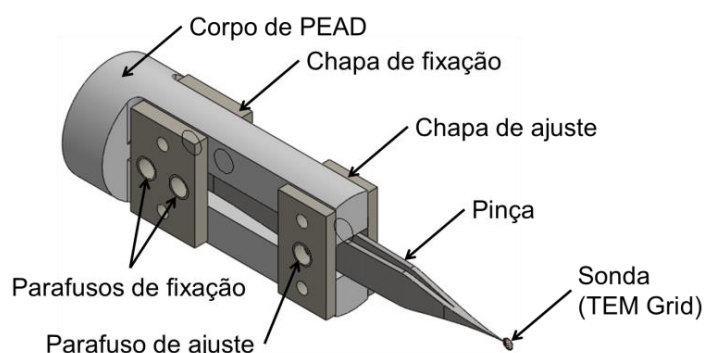


Figura 5.2 – Dispositivo para pinça e sonda. Parafusos e porcas não mostrados nessa imagem.

O cilindro pneumático com o dispositivo da pinça, as partes do sistema elétrico de controle mostrado a seguir e o queimador estão fixos em uma estrutura composta de perfis de alumínio de 45x45 mm, unidos por cantoneiras e fixos sobre uma base de madeira (Figura 5.3.a). Os calços utilizados embaixo da estrutura do queimador servem para regular a altura das coletas de fuligem. O posicionamento correto no plano horizontal entre o queimador e a pinça com a sonda é conseguido através das 4 vigas que unem a estrutura principal com as pernas do queimador.

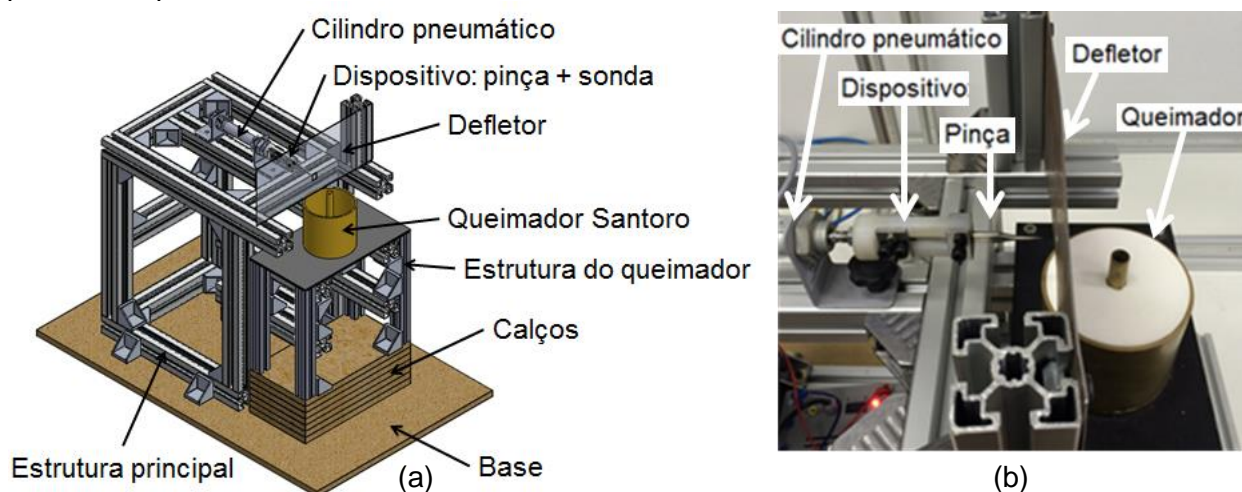


Figura 5.3 – Bancada experimental: a) vista esquemática; b) sistema de inserção e retirada.

Conforme recomendado por Dobbins e Megaridis, 1987, foi utilizada uma chapa com um pequeno orifício para passagem da pinça como defletor do escoamento do ar imposto pelo deslocamento do dispositivo da pinça (Figura 5.3.b), de modo a não influenciar o regime da chama. Para garantir isso, o queimador utilizado difere do tipo Santoro padrão por apresentar a saída do tubo central 28,00 mm acima da saída do *co-flow*, enquanto que no queimador original essa distância é nula. Essa diferença de altura no bico foi escolhida de modo a facilitar o acesso do dispositivo da pinça para alturas de medição baixas e também para melhorar o efeito de proteção do escoamento da chama pela utilização do defletor, principalmente em posições de medição mais altas, não permitindo assim que o ar movido pelo dispositivo da pinça passe por baixo do defletor e influencie no escoamento da chama.

A parte lógica e motora do sistema de avanço e retorno é composta de um circuito eletropneumático, mostrado na Figura 5.4, cujos componentes são listados na Tabela 5.1. Esse circuito tem como objetivo facilitar a coleta de fuligem e ajudar no alinhamento e configuração do sistema. Há 3 botões no sistema: um de *reset*, necessário para armar o sistema antes de cada coleta, garantindo assim que não seja realizado um duplo comando do sistema de coleta inadvertidamente, o que faria que a sonda entrasse duas vezes na chama; um de *start* que faz o cilindro avançar e retornar automaticamente pelo sensor de final de curso magnético; e um

de *setup*, com retenção, utilizado para alinhar o sistema, já que o cilindro fica avançado enquanto que esse botão esteja acionado. A válvula 3/2 vias com botão com retenção serve para alimentar o sistema pneumático.

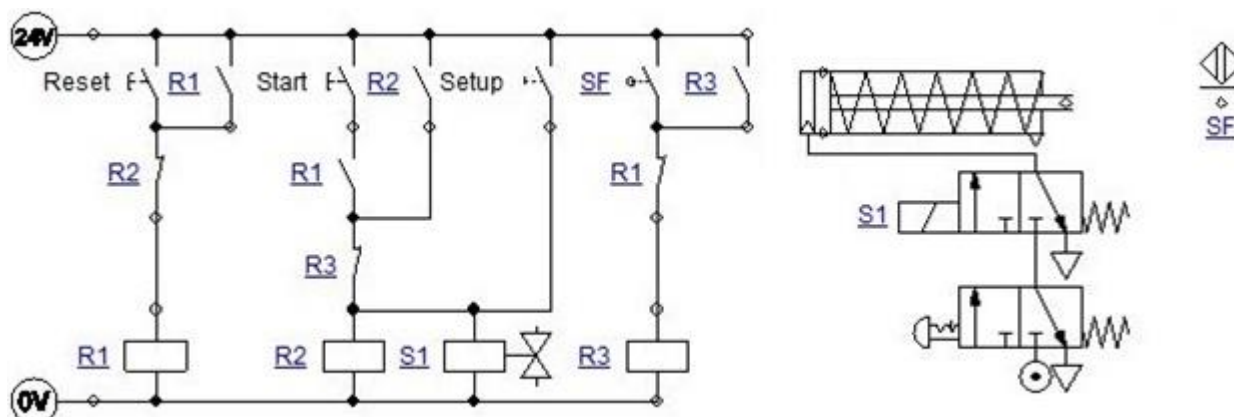


Figura 5.4 – Circuito eletropneumático de avanço e retorno da sonda.

Tabela 5.1 – Componentes do circuito eletropneumático.

Símbolo	Componente	Marca e Modelo
-	Alimentação de ar comprimido e seco (3 bar)	-
-	Cilindro de simples ação com retorno por mola (curso 50 mm)	FESTO ESNU-20-50-P-A
S1	Válvula pneumática 3/2 vias, avanço por solenoide, retorno por mola	FESTO MFH-3-1/8
-	Válvula pneumática 3/2 vias com botão com retenção	FESTO N-3-M5
Reset, Start, Setup	Módulo didático com 2 botões simples e 1 com retenção	FESTO EP-B2
R1, R2, R3	Módulo didático com 4 relés	FESTO EP-R1
-	Fonte de 24 Volts	FESTO 13022731
SF	Sensor magnético de final de curso de tipo Reed Switch	FESTO SMEO-4U-K-LED-24
-	Tubos flexíveis PU de 4 mm	-

#### 5.4 Calibração do Tempo de Residência e Análise Cinemática do Movimento da Sonda

A sonda deve ser rapidamente inserida na chama, ficar por um período determinado e ser retirada também o mais rapidamente possível. O controle desse período de residência dentro da chama é realizado pelo correto posicionamento do sensor magnético ao longo do corpo do cilindro pneumático. Isso é possível devido a não instantaneidade da atuação dos relés do sistema eletropneumático, da comutação da válvula pneumática e da atuação do cilindro pneumático, visto o caráter compressível do ar. A posição do sensor para um tempo pré-determinado é função dos comprimentos e diâmetros das mangueiras utilizadas e da pressão da linha de ar comprimido. O tempo de residência almejado é de 30 a 120 ms, conforme referências da literatura [Ho, 2010; Dobbins e Megaridis, 1987].

Utilizou-se um circuito emissor-receptor infravermelho (Figura 5.5.a), juntamente com um osciloscópio Tektronix TDS 2022C provido de *trigger*, para medir o tempo de parada da sonda no final do curso do cilindro. Para isso, o emissor e o receptor foram montados em uma estrutura de modo que ficassem alinhados com o centro do queimador e separados de uma distância de aproximadamente 150 mm, fazendo com que o avanço da pinça bloqueasse parcialmente a visão entre eles. Na ponta da pinça foi colocado um pedaço rígido de papel dobrado de 7 mm de altura por 15 mm de comprimento para poder realizar esse bloqueio de visão, já que a utilização da sonda translúcida de 3,05 mm de diâmetro não era suficiente.

Teve-se que tomar cuidado no posicionamento do papel com relação à pinça, pois essa posição influencia no sinal obtido no osciloscópio, obtendo tempos de residência maiores que os reais no caso do papel bloquear a visão entre o emissor e o receptor antes mesmo do cilindro pneumático chegar ao seu final de curso. Para evitar isso, foram feitas diversas

medidas recuando o papel até que o sistema de calibração não conseguisse mais detectar o avanço do cilindro.



Figura 5.5 – Sistemas de calibração: (a) circuito emissor-receptor infravermelho; (b) câmera de alta velocidade.

A queda de tensão elétrica no LED IV (infravermelho) (Figura 5.5) é de 1,50 V, permitindo uma passagem de 150 mA pelo mesmo, necessária para seu funcionamento, regulada pela resistência de 100  $\Omega$ . A tensão no fotodiodo é praticamente igual à zero (curto-circuito) quando não há nenhuma barreira entre ele o LED IV e é igual à tensão da fonte quando a barreira é completa. O bloqueio parcial pelo pedaço de papel na ponta da pinça faz com que haja uma tensão na saída para o osciloscópio de 0,90 V. O fato de o bloqueio ser parcial é benéfico, pois garante que o sistema tenha sensibilidade para detectar a presença da pinça de maneira eficaz, não ocorrendo saturação. A resistência de 10 k $\Omega$  do circuito é utilizada para limitar a corrente entre os polos da fonte. O tempo de resposta do fotodiodo é inferior a 1 ms.

Além da calibração descrita acima, filmou-se com uma câmera de alta velocidade, modelo Phantom V411 (Figura 5.5.b), o avanço e retorno da sonda, com e sem a presença da chama. Utilizou-se uma frequência de aquisição de 5000 *frames* por segundo com tempo de exposição de 189,87  $\mu$ s. Através de uma escala de referência, fotografada na mesma posição da filmagem, e da contagem das quantidades de *pixels* e *frames*, foram obtidos valores de distância, tempo e velocidade média para 5 diferentes momentos do avanço e retorno da pinça: avanço sem a chama; região de aproximação, tempo de residência e região de afastamento dentro da chama; retorno sem a chama. Além disso, traçaram-se gráficos de deslocamento por tempo para diferentes pressões de alimentação do ar comprimido.

## 5.5 Parâmetros Experimentais

Foi realizada uma única configuração de chama, isto é, uma vazão de combustível com uma vazão de *co-flow*. A vazão de etileno utilizada é de 0,231 Ls.min<sup>-1</sup>, que é equivalente a uma vazão mássica de 2,72.10<sup>-4</sup> kg.min<sup>-1</sup>, velocidade média de saída do bocal do queimador de 3,97.10<sup>-2</sup> m.s<sup>-1</sup> e Reynolds dentro de tubo igual a 60 (laminar). A vazão do *co-flow* é de 42 Ls.min<sup>-1</sup> (5,04.10<sup>-2</sup> kg.min<sup>-1</sup> e 8,76.10<sup>-2</sup> m.s<sup>-1</sup>). Essa chama é *non-smoking*. Esses valores de vazão são os mesmo utilizados por Santoro *et al.*, 1983, McEnally *et al.*, 1997, e Köylü *et al.*, 1997.

O comprimento de chama ( $L_f$ ) obtido foi analisado tirando-se uma foto sem a chama com uma escala graduada e outra com a chama, obtendo-se um valor de 96,5 mm.

As sondas foram inseridas em diferentes alturas acima do bico do queimador (HAB – *Height Above Burner*) ao longo do eixo da chama, num total de 5 pontos aproximadamente equidistantes entre si e entre o topo visível da chama, com o intuito de visualizar a evolução da fuligem. Uma distância um pouco maior foi deixada entre o bico do queimador e a primeira altura de medição, visto que nos primeiros milímetros da chama a fuligem ainda não está

presente de maneira significativa, dificultando a sua coleta e análise. As alturas de medição a partir do bocal do queimador foram: 19,0; 34,7; 50,4; 66,2 e 81,7 mm (Figura 5.6). A variação de altura foi feita através da utilização de calços, como já mencionado.

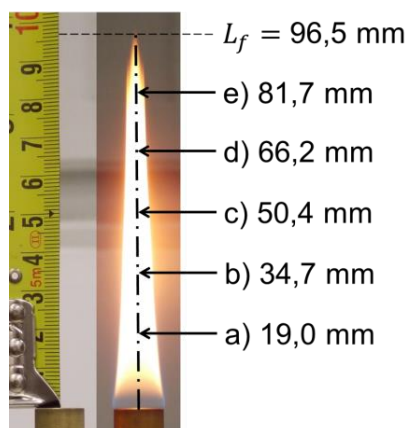


Figura 5.6 – Comprimento de chama e 5 alturas de coleta de fuligem.

Mesmo sendo a região anular (conhecida como frente de chama ou zona de reação) que apresenta as maiores concentrações de fuligem, escolheu-se analisar a região central da chama pela simplicidade de posicionar e também pela possibilidade de comparar os resultados com outros trabalhos da literatura mais facilmente.

## 5.6 Análise das Sondas em MET e das Imagens Obtidas

A análise das sondas utilizando microscopia eletrônica de transmissão foi realizada no equipamento MET JEM-1011, do LCME (Laboratório Central de Microscopia Eletrônica) da UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina). Utilizou-se uma tensão elétrica de aceleração dos elétrons de 80 kV, já que Dobbins e Megaridis, 1987, afirmam que os agregados de fuligem são extremamente estáveis nesse nível de tensão.

Foram obtidas imagens com magnificações de 30 mil vezes para as análises de diâmetro primário das partículas e para os cálculos de fração volumétrica. As imagens obtidas contêm escala de referência utilizada para obter o tamanho de cada pixel em nanômetros.

Utilizou-se o software ImageJ para a análise das imagens. Nas duas posições de coleta de fuligem mais baixas, foi possível realizar uma análise estatística das partículas isoladas, enquanto que nas outras 3 alturas foi feita uma medida manual dos diâmetros de aproximadamente 10 partículas nos extremos dos agregados. Essa escolha ficará clara nos resultados, devido à quantidade de partículas livres em cada posição de captura da fuligem.

Cálculos foram realizados, conforme a Equação 4.2, para obter a fração volumétrica da fuligem em cada altura analisada. As temperaturas ao longo da chama foram obtidas da literatura [Santoro *et al.*, 1983, e Köylü *et al.*, 1997] e as temperaturas médias da sonda foram obtidas conforme cálculos mostrados no APÊNDICE A – Balanço Energético e Cálculo da Temperatura da Sonda. Para obtenção do volume total das partículas depositados sobre a sonda presente na área de uma imagem, as imagens sofreram os tratamentos de: obtenção de contornos, binarização segundo limiar de tom de cinza variável de modo a facilitar a etapa posterior e determinação das partículas e agregados pelo software. Esse fornece a área de cada partícula e agregado listado. Os diâmetros das partículas livres, consideradas circulares, foram obtidos através das áreas fornecidas pelo software.



## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Comprimento e Outras Características Visíveis da Chama

Analisou-se o comprimento de chama conforme explicado anteriormente e obteve-se um valor de  $L_f = 96,5$  mm (conforme Figura 5.6 mostrada na seção anterior), quase 10% maior que os 88 mm reportados por Santoro *et al.*, 1983, e Köylü *et al.*, 1997, para as mesmas vazões de etileno e de ar utilizadas. Essa diferença pode ser explicada por duas razões: incertezas nas medidas das vazões, tanto no presente trabalho como nos trabalhos de 1983 e 1997, época em que medidores de vazão não tinham grande precisão; diferentes maneiras de definir o comprimento da chama, como mostrado por Machado, 2015.

Foi feita também uma comparação visual e em termos de comprimento de chama para o queimador com o bico ao nível do *co-flow* (como nos outros trabalhos da literatura) e 28,00 mm acima (como utilizado nesse trabalho). Não foi notada diferença perceptível entre esses dois casos, o que permite maior confiança nas comparações posteriores com os resultados da literatura.

A chama, por se tratar de etileno, tem uma forte luminosidade na região visível do espectro eletromagnético, característica da grande quantidade de fuligem produzida pela combustão desse combustível. A base da chama (0 ~ 10 mm de altura) não apresenta intensa luminosidade, visto que a fuligem ainda está em fase de formação. Essa região inicial é seguida de uma extensão de grande luminosidade amarela (10 ~ 60 mm), onde a fuligem está fortemente presente, e, após, uma luminosidade alaranjada menos intensa (60 ~ 95 mm, não bem representada na fotografia mostrada anteriormente na Figura 5.6 devido a uma saturação na imagem), onde a fuligem já está sendo oxidada. Mesmo que a fuligem seja a principal responsável pela radiação visível em chamas desse tipo, há também a contribuição de espécies intermediárias da combustão, que emitem majoritariamente no infravermelho, mas também em pequena quantidade na região do espectro visível [Machado, 2015].

Nota-se que a chama apresenta uma pequena instabilidade geométrica nos últimos 10 mm, mesmo no seu estado mais estabilizado. A chama é muito sensível a movimentos do ar ambiente, sendo necessário realizar as coletas com o mínimo de perturbações externas.

### 6.2 Sistema de Calibração: Tempo de Residência da Sonda Dentro da Chama

Na Figura 6.1 são mostrados 3 sinais do sistema de calibração obtidos com o osciloscópio no momento de avanço e retorno do cilindro pneumático. Na realidade, esses sinais são resultado da filtragem dos sinais brutos com um filtro digital passa baixa de modo a eliminar o ruído eletromagnético ambiente de alta frequência. Não foi feita nenhuma alteração no sistema entre os sinais, a única diferença é a posição do papel posicionado na ponta da pinça. O sinal em preto foi obtido com o papel mais recuado na pinça (mais afastado do queimador), onde se nota o impacto do cilindro no final do seu curso, seguido de um recuo como reação e após certa estabilização antes do retorno do cilindro, mesmo que em uma tensão diferente dos outros dois sinais. No sinal em azul, obtido com o papel um pouco mais avançado, o impacto no final do curso é pouco visível e um tempo de residência é mais fácil de ser definido. No sinal em vermelho, com o papel bem avançado na pinça, o impacto do final de curso não é visível e o aparente tempo de residência é bem maior que nos dois sinais obtidos anteriormente. À medida que se avança o papel, o mesmo acaba bloqueando parcialmente a visão entre o emissor e o receptor IV sem que o cilindro pneumático tenha chegado ao seu final de curso, ou seja, há uma variação na entrada do sistema de calibração (posição do papel na pinça), sem que haja variação na saída (tensão elétrica). Não é possível definir com precisão qual é o sinal mais adequado para definir o tempo de residência, mas ele se situaria entre o sinal em preto e o em azul. Mesmo que o sinal do sistema de calibração não possa ser diretamente convertido em posição do pistão, tem-se a impressão (que será confirmada

posteriormente com ajuda da câmera de alta velocidade), principalmente pelo sinal em preto, que o recuo do cilindro é lento, visto o crescimento gradual da tensão elétrica no momento do recuo do cilindro. Esse aumento gradual dificulta ainda mais a definição do tempo de residência.

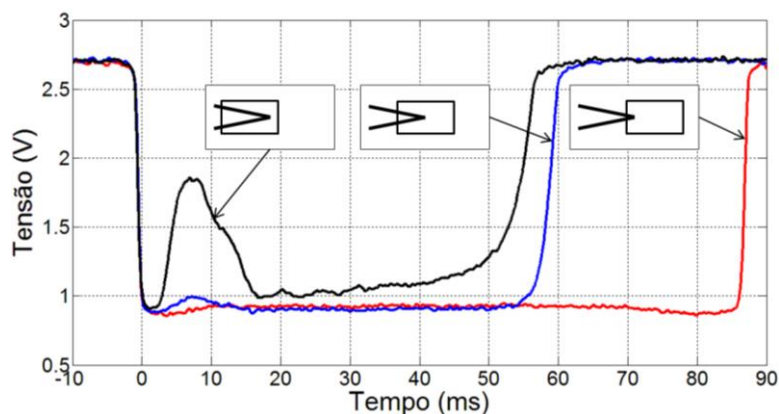


Figura 6.1 – Sinais do sistema de calibração obtidos com o osciloscópio.

Obtém-se então, como primeira aproximação, um tempo de residência entre 40 e 55 ms. Esse tempo será refinado a seguir com a análise da câmera de alta velocidade, mas está dentro do intervalo recomendado pela literatura, de 30 a 120 ms [Dobbins e Megaridis, 1987]. Tempos de residência maiores não foram conseguidos com a pressão utilizada, já que o sensor de final de curso estava na sua posição mais avançada, não permitindo o sensoriamento magnético do êmbolo do cilindro caso se avançasse mais o sensor.

Testes mostraram que o fluxo de ar do *co-flow* do queimador, mesmo na vazão máxima do controlador ( $150 \text{ Ls}\cdot\text{min}^{-1}$ ), não influenciava no tempo de residência da sonda dentro da chama, permitindo assim ser realizada a calibração sem o *co-flow* estar ativo. Essa influência poderia ter ocorrido devido a uma queda de pressão na linha não compensada em velocidade adequada pelo regulador de pressão.

### 6.3 Deslocamento da Sonda

Notou-se que o cilindro pneumático utilizado tem uma posição angular preferencial, ou seja, quando ele avança e retorna, ele tende a girar até que um determinado ponto fique virado para cima. Esse ponto é independente da posição angular em que é fixo o dispositivo da pinça, logo, precisou-se alinhar o dispositivo com esse ponto, de modo a garantir uma entrada e uma saída de dentro da chama sem o giro do dispositivo. Mesmo com esse alinhamento, é comum ocorrer um pequeno giro ao redor desse ponto de equilíbrio quando o cilindro avança e/ou recua. Como esse giro ocasional não passava de  $10^\circ$ , esse foi desconsiderado, ficando como uma incerteza experimental não quantificável.

Ao atingir o final do curso do cilindro pneumático em alta velocidade, a ponta da pinça balança aproximadamente  $\pm 0,5 \text{ mm}$  tanto na direção vertical quanto na horizontal (visualizado através da câmera de alta velocidade). Essa vibração é difícil de ser minimizada sem comprometer a velocidade de inserção e retirada da sonda, seja utilizando velocidades de aproximação menores, amortecimentos no final do curso ou guias para garantir o avanço correto da sonda.

Foi feita uma análise cinemática do movimento de avanço e retorno da sonda. Os gráficos de deslocamento por tempo para o cilindro de simples ação nas pressões da linha pneumática de 3 (utilizada nas coletas de fuligem), 5 e 7 bar, bem como para um cilindro de dupla ação nas pressões de 2 e 6 bar, são mostradas no APÊNDICE B – Análise Cinemática do Avanço e Retorno da Sonda. Foi a partir dessa análise que se escolheu utilizar o cilindro de simples ação com uma pressão de 3 bar. Também baseado nessa análise é que se pôde definir o tempo de

residência de 57 ms, valor esse muito próximo do intervalo encontrado anteriormente com o sistema de calibração.

#### 6.4 Efeitos da Inserção e Retirada da Sonda Sobre a Chama

Com as filmagens em câmera lenta, observou-se uma redução no comprimento de chama quando a sonda foi inserida, de 96,5 mm para aproximadamente 80 mm (Figura 6.2). Isso é provavelmente em grande parte devido ao cisalhamento imposto ao escoamento pela sonda e parte da pinça. Essa redução do comprimento e consequente mudança das características da chama devem ser consideradas na análise posterior das sondas, sendo que a comparação de resultados com outras técnicas não intrusivas deve ser feita com cautela. Ainda olhando as imagens obtidas com a câmera de alta velocidade, pode-se notar que quando a sonda está sendo retirada de dentro da chama, há uma espécie de língua de chama que se forma devido ao fluido deslocado pela sonda e pelo cisalhamento imposto por esse movimento (quinta imagem da Figura 6.2). Após a retirada da sonda de dentro da chama, nota-se certa instabilidade por cerca de um segundo até a chama se estabilizar novamente.

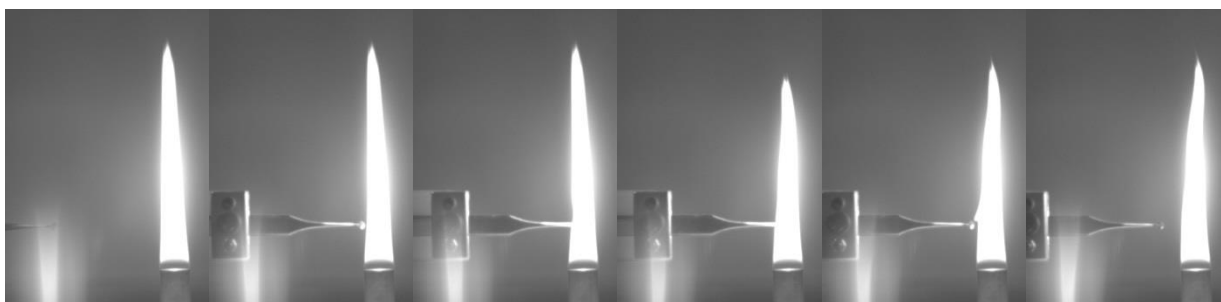


Figura 6.2 – Sequência de imagens da inserção e retirada da sonda de dentro da chama.

Ao contrário do que é afirmado por Dobbins e Megaridis, 1987, não se verificou diferença significativa no comportamento da chama com ou sem o uso do defletor. Essa quase independência é devida às dimensões reduzidas do dispositivo da pinça utilizado. Como o defletor já estava disponível, as coletas foram feitas com o uso do mesmo.

Aparentemente, o escoamento da chama só é fortemente influenciado na região à jusante da posição de inserção da sonda, o que leva a crer que os resultados de morfologia posteriormente obtidos têm sim validade.

#### 6.5 Análise Morfológica da Fuligem

As 5 imagens obtidas no MET para as 5 alturas de medição (HAB), em ordem crescente, são mostradas na Figura 6.3. Nota-se na primeira imagem a presença de pequenas partículas e de alguns aglomerados, assim como na segunda imagem. Acredita-se que esses aglomerados provenham da região anular da chama, principalmente pelo fato dos mesmos apresentarem partículas primárias de diâmetro muito superior à das partículas livres. Da primeira para a segunda imagem nota-se o fenômeno do crescimento superficial e do aumento do diâmetro das partículas primárias. Nessas duas imagens o fenômeno de nucleação de novas partículas é predominante. Já na terceira imagem, a presença de aglomerados é muito mais pronunciada e a de partículas livres menos, mostrando a aglomeração das partículas livres provenientes das partes inferiores da chama. Na quarta imagem praticamente não se nota a presença de partículas livres, mas só de agregados. Nessa altura, a nucleação de novas partículas parece não acontecer, talvez por ser menos importante que o fenômeno de oxidação das mesmas ou pela ausência dos predecessores moleculares nesse ponto da chama. Na quinta imagem é claramente visível o efeito da oxidação das cadeias de partículas, com a diminuição dos diâmetros.

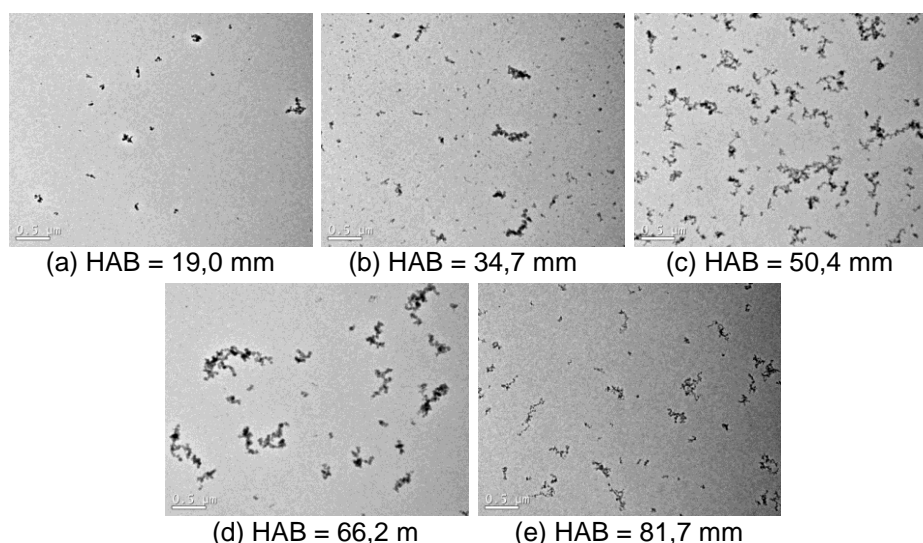


Figura 6.3 – Imagens das 5 alturas de medição (HAB). Magnificação de 30.000 vezes. Escalas de referência de 0,5 µm nas imagens.

Os diâmetros primários e os resultados dos cálculos da fração volumétrica em função das alturas de medição são mostrados na Figura 6.4 e Figura 6.5, respectivamente.

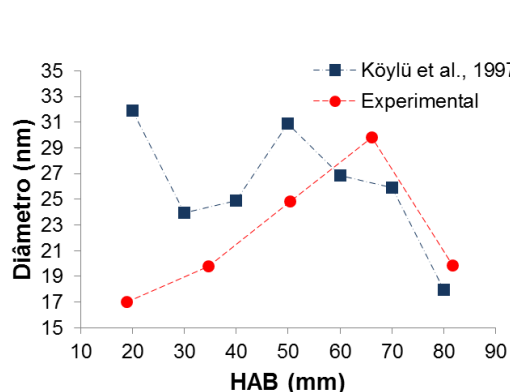


Figura 6.4 – Diâmetro primário em função da altura de medição (HAB).

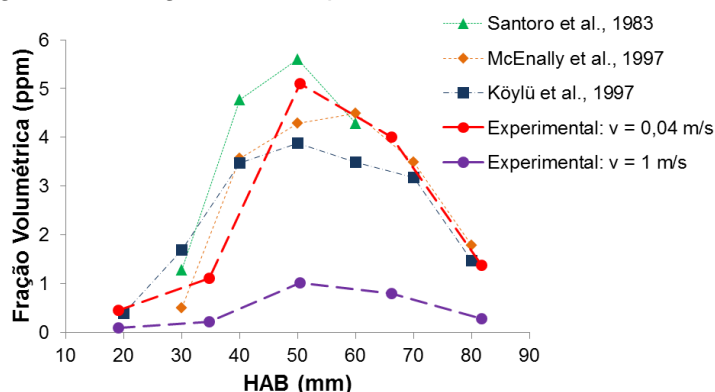


Figura 6.5 – Fração volumétrica em função da altura de medição (HAB).

Na Figura 6.4, nota-se que a ordem de grandeza dos resultados experimentais desse trabalho sobre o diâmetro primário das partículas é a mesma encontrada por Köylü *et al.*, 1997, porém o comportamento é bem diferente. Esse autor tem dificuldades em explicar essa complexa variação nos seus resultados. Todavia, o comportamento dos resultados encontrados é consistente com o mencionado por Ho, 2010, e Dobbins e Megaridis, 1987, em que as partículas, depois de nucleadas, sofrem crescimento superficial aumentando de diâmetro para depois sofrerem oxidação até serem completamente consumidas.

Nos cálculos de fração volumétrica mostrados na Figura 6.5, caso se utilize uma velocidade dos gases igual a  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , como é o recomendado por Köylü *et al.*, 1997, encontra-se resultados muito inferiores aos da literatura, mostrados nessa mesma figura. Utilizando uma velocidade dos gases constante e igual ao da saída do bocal do queimador, encontra-se valores mais condizentes com os da literatura. Entretanto, sabe-se que devido principalmente ao aumento da temperatura dos gases e à sua expansão, a velocidade cresce ao longo do eixo da chama. Um estudo mais aprofundado e medições diretas ou cálculos numéricos da velocidade do escoamento devem ser realizados para se obter resultados mais corretos em trabalhos futuros.

## 7 CONCLUSÕES

Baseado na revisão bibliográfica sobre o assunto, conseguiu-se alcançar os dois principais resultados almejados, que se desmembram no projeto, construção, validação, calibração do tempo de residência e análise cinemática do sistema de deposição de partículas por sonda termoforética, bem como na análise da morfologia da fuligem, em termos de diâmetro das partículas, e no cálculo da fração volumétrica. Conforme testes realizados, comprovou-se o bom funcionamento desse sistema e puderam-se antever possibilidades de melhorias futuras para o mesmo, mostradas no APÊNDICE C – Trabalhos Futuros e Melhorias no Aparato Experimental. Analisou-se também o comprimento e as características visíveis da chama, bem como os efeitos da inserção e da retirada da sonda sobre ela. Realizou-se também um balanço térmico sobre a sonda, de modo a obter sua temperatura em função do tempo de residência. Os resultados de morfologia e fração volumétrica são consistentes com a literatura qualitativamente e quantitativamente, porém estudos mais aprofundados ainda são necessários, principalmente no que se refere aos cálculos de fração volumétrica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bockhorn, H.; **"Soot Formation in Combustion"**, Springer-Verlag, 1<sup>st</sup> edition, 1994.
- Cohan, B. D.; **"Verification and Validation of a Candidate Soot Deposition Model in Fire Dynamics Simulator Version 5.5.1"**, Monografia, University of Mariland, Estados Unidos, 2010.
- Dobbins, R. A.; Megaridis, C. M.; **"Morphology of Flame-Generated Soot as Determined by Thermophoretic Sampling"**, Langmuir, vol. 3, pp 254-259, 1987.
- Eisner, A. D.; Rosner, D. E.; **"Experimental Studies of Soot Particle Thermophoresis in Nonisothermal Combustion Gases Using Thermocouple Response Techniques"**, Combustion and Flame, vol. 61, pp 153-166, 1985.
- Encyclopaedia Britannica, **"Transmission Electron Microscopy (TEM)"**, www.global.britannica.com, acessado em 02/06/2015.
- Hankinson, G.; Lowesmith, B. J.; **"A Consideration of Methods of Determining the Radiative Characteristics of Jet Fires"**, Combustion and Flame, vol. 159, pp 1165-1177, 2012.
- Ho, J. K.; Soot Morphology, In: **"Soot Measurements and Species Simulation in Laminar Premixed Flames"**, Dissertação, University of Adelaide, Austrália, pp 69-82, 2010.
- Hu, B.; Yang, B.; Köylü, Ü. Ö.; **"Soot Measurements at the Axis of an Ethylene/Air Non-Premixed Turbulent Jet Flame"**, Combustion and Flame, vol. 134, pp 93-106, 2003.
- Kholghy, M. R.; **"The Evolution of Soot Morphology in Laminar Co-Flow Diffusion Flames of the Surrogates for Jet A-1 and Synthetic Kerosene"**, Dissertação, University of Toronto, Canadá, 2012.
- Köylü, Ü. Ö.; Faeth, G. M.; Farias, T. L.; Carvalho, M. G.; **"Fractal and Projected Structure Properties of Soot Aggregates"**, Combustion and Flame, vol. 100, pp 621-633, 1995.
- Köylü, Ü. Ö. *et al.*; **"Simultaneous Measurements of Soot Volume Fraction and Particle Size / Microstructure in Flames Using a Thermophoretic Sampling Technique"**, Combustion and Flame, vol. 110, pp 494-507, 1997.
- Machado, I. M.; **"Caracterização Experimental da Radiação Térmica Emitida por Chamas não Pré-Misturadas de Metano Diluído com CO<sub>2</sub>"**, Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2015.
- McEnally, C. S. *et al.*; **"Soot Volume Fraction and Temperature Measurements in Laminar Nonpremixed Flames Using Thermocouples"**, Combustion and Flame, vol. 109, pp 701-720, 1997.
- Nobel Prize, **"The Transmission Electron Microscopy"**, www.nobelprize.org, acessado em 02/06/2015.
- Richter, H.; Howard, J. B.; **"Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and their Growth to Soot"**, Progress in Energy and Combustion Science, vol. 26, pp 565-608, 2000.
- Rosner, D. E.; **"Flame Synthesis of Valuable Nanoparticles: Recent Progress / Current Needs in Areas of Rate Laws, Population Dynamics, and Characterization"**, Ind. Eng. Chem. Res., vol. 44, pp 6045-6055, 2005.
- Roth, P.; **"Particle Synthesis in Flames"**, Proceedings of the Combustion Institute, vol. 31, pp 1773-1788, 2007.
- Santoro, R. J.; Semerjian, H. G.; Dobbins, R. A.; **"Soot Particle Measurements in Diffusion Flames"**, Combustion and Flame, vol. 51, pp 203-218, 1983.
- Sunderland, P. B.; Köylü, Ü. Ö.; Faeth, G. M.; **"Soot Formation in Weakly Buoyant Acetylene-Fueled Laminar Jet Diffusion Flames Burning in Air"**, Combustion and Flame, vol. 100, pp. 310-322, 1995.

## APÊNDICE A – Balanço Energético e Cálculo da Temperatura da Sonda

Para os cálculos de fração volumétrica da fuligem, é necessário se estimar ou medir a temperatura da sonda. Para isso, realizou-se uma modelagem das transferências de calor sobre a sonda termoforética e um balanço energético de forma a obter a temperatura da sonda em função do tempo de residência dentro da chama. Essa modelagem considerou a convecção do gás quente, a radiação trocada entre a chama e a sonda e a retirada de calor pela pinça.

Utilizaram-se as seguintes hipóteses simplificativas:

- Modelo de capacitância global para regime transiente, visto o baixo valor encontrado para o número de Biot:  $Bi \approx 10^{-2}$ .
- Convecção: foi considerado o modelo de placa plana em um escoamento forçado com a sonda de geometria quadrada e de mesma área superficial; a temperatura do gás passando pela sonda é de 1900 K [Dobbins e Megaridis, 1987]; a velocidade do fluido é o mesmo da saída do bocal do queimador; as propriedades do gás são as do ar. A convecção tem a maior contribuição para o aumento de temperatura dentre os fenômenos estudados.
- Radiação: a fração radiante ( $X_r$ ) da chama foi considerada igual a 0,3; a chama foi considerada um cilindro de diâmetro  $0,085.L_f$  emitindo radiação igualmente ao longo de toda a lateral do cilindro [Hankinson e Lowesmith, 2012]; o fluxo de calor incidente na sonda é igual à metade do recebido se ela estivesse na borda desse cilindro (porém mesma taxa de calor recebida, metade em cada lado da sonda); a emissividade da sonda é igual a  $\varepsilon = 0,525$  (média entre 0,3 do cobre e 0,75 do filme de carbono). A radiação tem contribuição importante, mas menor que a convecção, no aumento de temperatura.
- Condução: utilizou-se o modelo de aleta infinita, de dimensão igual ao da ponta da pinça, multiplicada por dois (dois lados da pinça). A condução praticamente não tem impacto na temperatura final, comparado com os efeitos da convecção e da radiação, ao menos para tempos de residência pequenos (menores que 120 ms).
- Foi desconsiderado o aporte de energia e de massa advindo das partículas de fuligem que aderem à sonda.

Obteve-se a seguinte relação para a temperatura da sonda ( $T_s$  [K]) em função do tempo de residência ( $t_r$  [s]):

$$T_s = \frac{A + (B.T_{amb} - A).exp\left(-\frac{B.A_s.t_r}{m_s.c}\right)}{B} \quad (A.1)$$

onde

$$A = h.T_g + \varepsilon.q_r'' + \frac{C}{A_s}.T_{amb} \quad (A.2),$$

$$B = h + \sigma.T_m^3.\varepsilon + \frac{C}{A_s} \quad (A.3),$$

$$C = \sqrt{h.P_p.\kappa_p.2.A_{tr,p}} \quad (A.4),$$

$T_{amb}$  é a temperatura ambiente e inicial da sonda (K),  $A_s$  é a área superficial total da sonda ( $m^2$ ) (ambos os lados),  $m_s$  é a massa da sonda (kg),  $c$  é o calor específico da sonda ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ),  $h$  é o coeficiente de transferência térmica por convecção ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ ),  $\varepsilon$  é a emissividade média da sonda (adim.),  $q_r''$  é o fluxo de calor radiativo incidente na sonda dentro da chama (W),  $\sigma \cong 5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$  é a constante de Stefan-Boltzmann,  $P_p$  é o perímetro de cada um dos dois lados da ponta da pinça (m),  $\kappa_p$  é a condutividade térmica da pinça ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ ) e  $A_{tr,p}$  é a área da seção transversal de cada um dos dois lados da ponta da pinça ( $m^2$ ).

O cálculo realizado foi incremental, calculando-se propriedades, coeficientes de transferência de calor e temperaturas a cada 0,1 ms. O gráfico da temperatura da sonda em função do tempo de residência é mostrado na Figura A.1. Um ajuste de curva com polinômio de segundo grau foi suficiente para representar bem o comportamento para um tempo de residência de até 120 ms, conforme limite estudado na literatura [Dobbins e Megaridis, 1987].

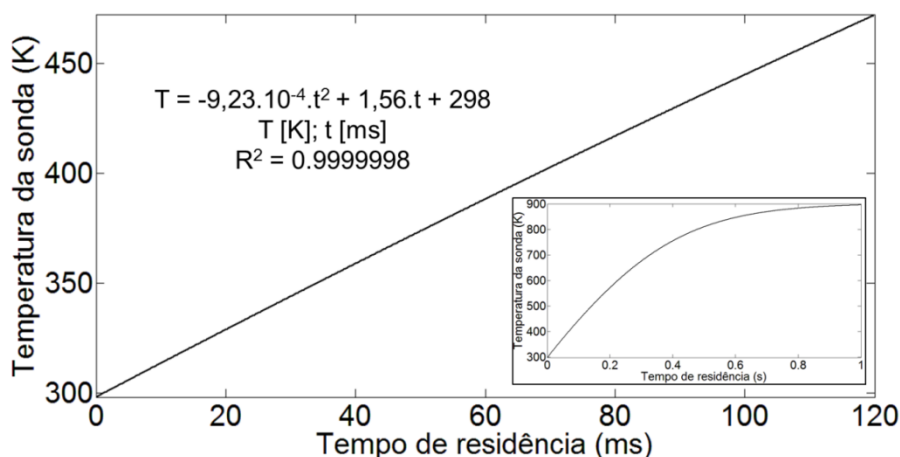


Figura A.1 – Temperatura da sonda em função do tempo de residência.

Como era de se esperar, obteve-se um coeficiente negativo para o termo do  $t^2$  do ajuste de curva, característico do crescimento assintótico da temperatura. Entretanto, esse termo é muito pequeno, visto que para o tempo de residência estudado, o aumento de temperatura é quase linear.

Para um temperatura de chama de 1900 K e tempo de exposição de 65 ms, obteve-se um aumento da temperatura da sonda de 298 K para 395,2 K. Dobbins e Megaridis, 1987, fizeram medições da temperatura da sonda, para os mesmos valores de temperatura de chama e tempo de residência, e encontraram 385 K. A pequena diferença com o valor calculado é devida às simplificações feitas no cálculo analítico e às incertezas dos parâmetros utilizados e da medição experimental realizada pelos autores.

Para um tempo de residência dentro da chama de 57 ms, como foi utilizado nesse trabalho, a temperatura final da sonda varia de 363,9 a 375,7 K para temperaturas de chama de 1400 a 1700 K, temperaturas mínimas e máximas das posições analisadas nessa chama [Santoro *et al.*, 1983, e Köylü *et al.*, 1997]. A partir de 1 segundo de residência dentro da chama, a temperatura da sonda não se altera, atingindo uma temperatura de regime estacionário de 902,7 K (Figura A.1).

## APÊNDICE B – Análise Cinemática do Avanço e Retorno da Sonda

Foi analisado o deslocamento em função do tempo para um cilindro de dupla ação de curso de 100 mm nas pressões de 2 e 6 bar e para um cilindro de simples ação com retorno por mola de curso de 50 mm nas pressões de 3, 5 e 7 bar (Figura B.1). A utilização de uma pressão menor que 3 bar não permitia o avanço do pistão desse cilindro, visto que a força exercida no êmbolo do pistão era menor que a força da mola.

A aquisição desses dados foi feita pela filmagem em alta velocidade e pela aquisição a cada 1 a 2 ms da posição da pinça, em relação a uma referência conhecida.

Pode-se ver que o cilindro de dupla ação, por possuir amortecimento nos finais de curso, mesmo que reguláveis, tem uma grande redução de velocidade próxima à região anular da chama e tempos de aproximação elevados, coletando assim muita fuligem dessa região e não da região central, como é o objetivo. Esse fato inviabiliza a utilização desse cilindro.

Para as situações analisadas, quanto maior a pressão, maior a velocidade de avanço, resultado esse válido para cada tipo de cilindro pneumático. Nos cilindros de simples ação, visto a inexistência de amortecimento no final de curso, quanto maior a pressão e velocidade de avanço, maior o impacto no final de curso e a vibração que ocorre.

Foi separado o avanço e o retorno do pistão em 5 etapas: ida (avanço longe da chama), aproximação (entrada na chama), residência (tempo parado dentro da chama), afastamento

(saída da chama) e volta (retorno longe da chama). As distâncias, tempos e velocidades médias de ida e volta, bem como os tempos de aproximação, residência e afastamento são mostrados na Tabela B.1 para os dois tipos de cilindros pneumáticos e pressões analisadas.

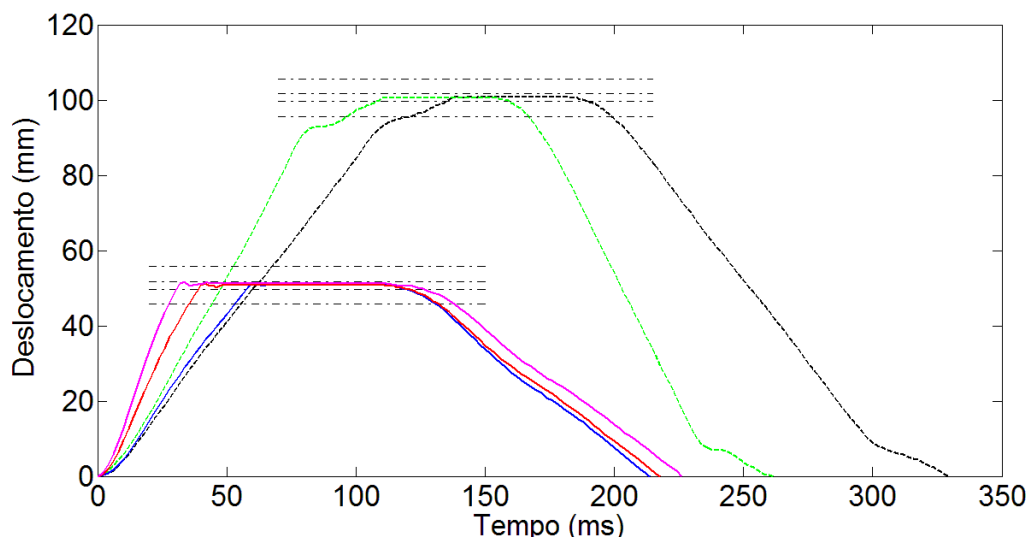


Figura B.1 – Deslocamento em função do tempo para cada tipo de cilindro pneumático e pressão da linha. Linhas tracejadas: cilindro de dupla ação de 100 mm de curso (2 e 6 bar); Linhas contínuas: cilindro de simples ação de 50 mm de curso (3, 5 e 7 bar). As maiores pressões são as de maior velocidade de avanço e as menores o contrário. As linhas horizontais representam a chama (~10 mm de diâmetro) e a região de medição (~2 mm de diâmetro).

Tabela B.1 – Resumo do desempenho cinemático de cada tipo de cilindro pneumático (CDA – Cilindro de Dupla Ação; CSA – Cilindro de Simples Ação) e pressão da linha (número seguido do tipo de cilindro, em bar), em relação às fases de ida, aproximação, residência, afastamento e volta.

		CDA2	CDA6	CSA3	CSA5	CSA7
Ida	Distância (mm)	90		45		
	Tempo (ms)	121	96	52	35	26
	Velocidade Média ( $m.s^{-1}$ )	0.74	0.94	0.87	1.29	1.73
Aproximação	Tempo (ms)	13	11	6	5	5
Residência	Tempo (ms)	57	53	57	76	84
Afastamento	Tempo (ms)	9	7	17	17	22
Volta	Distância (mm)	90		45		
	Tempo (ms)	130	95	82	86	88
	Velocidade Média ( $m.s^{-1}$ )	0.69	0.95	0.55	0.52	0.51

No cilindro de dupla ação, quanto maior a pressão, menores os tempos de aproximação, residência e afastamento, visto que o aumento da pressão aumenta as forças envolvidas e diminui o tempo de resposta ocasionado em parte pela inércia do sistema. Já no cilindro de simples ação, o resultado para o tempo de residência é o oposto, já que é a mola que tem que fazer o recuo do cilindro e quanto maior a pressão na câmara do pistão, maior é a quantidade de ar que deve ser removida através dos tubos pela válvula que controla o cilindro pneumático para que ocorra o retorno do pistão. Esse mesmo efeito pode ser visto nos tempos e velocidades médias de volta.



É difícil a definição precisa do tempo de residência, visto que no início do retorno as velocidades são muito baixas (tempo de afastamento considerável) e a região de análise não é facilmente distinguida da região de afastamento.

Visto o tempo de permanência obtido (~57 ms), a baixa vibração no final do curso e os razoavelmente baixos tempos de aproximação e afastamento, escolheu-se utilizar o cilindro de simples ação com uma pressão de 3 bar. Essa opção não é a melhor, mas por questão de disponibilidade de materiais no momento da coleta de dados, foi a escolhida. Uma solução melhor seria a utilização de um cilindro de dupla ação sem amortecimento de final de curso, de pequeno volume, e sendo operado a uma pressão mais elevada, além da utilização de uma válvula de maior vazão, fazendo assim que os transientes de aproximação e afastamento diminuíssem de tempo. As velocidades de ida e volta estão abaixo das utilizadas na literatura (~ 2 m.s<sup>-1</sup>) [Ho, 2010; Dobbins e Megaridis, 1987], o que reafirma a necessidade da sugestão acima mencionada para trabalhos futuros.

O cilindro de simples ação utilizado também possui amortecimento não regulável no final de curso, proveniente da deformação elástica de anéis e placas, porém esse amortecimento é muito menor que o que apresenta o cilindro de dupla ação com amortecimento regulável, feito por restrição do ar que está saindo do cilindro.

## APÊNDICE C – Trabalhos Futuros e Melhorias no Aparato Experimental

### Trabalhos Futuros

Além da análise da fuligem em outros tipos de configuração de chama (plana pré-misturada, de contracorrente difusiva até completamente pré-misturada, entre outros), pode-se utilizar o sistema de deposição de partículas por sonda termoforética desenvolvido nesse trabalho para analisar outros tipos de nanopartículas que são produzidas na combustão a partir de predecessores [Rosner, 2005 e Roth, 2007].

Um trabalho mais aprofundado deve ser feito no cálculo da fração volumétrica, tanto utilizando um software mais específico para a análise das imagens obtidas, como obtendo valores de velocidade de escoamento dos gases mais precisos.

### Melhorias no Aparato Experimental

Seguem sugestões de melhorias possíveis de serem feitas no aparato experimental de modo a facilitar sua utilização, dando ao mesmo tempo robustez ao sistema e flexibilidade ao uso do mesmo. Essas sugestões são baseadas em dificuldades encontradas durante a fase de construção e de utilização:

- Melhorar o sistema de posicionamento vertical do queimador, para facilitar as coletas de fuligem em qualquer altura desejada;
- Usar cilindro de dupla ação sem amortecimento no final de curso, de pequeno volume, e uma válvula que permita grande vazão, com o objetivo de ter altas velocidades de avanço e de retorno;
- Utilizar uma guia para garantir o avanço da pinça sem giro, possivelmente utilizando roletes ou uma superfície de baixo atrito e/ou lubrificada para não alterar de maneira significativa os tempos de avanço e retorno do cilindro pneumático. O uso de pesos em um dos lados do dispositivo não garante que ao avançar até o final do curso o cilindro não gire, mesmo que ao retornar para a posição recuada fique na posição correta. Outra solução mais simples é a utilização de um cilindro pneumático antigiro, disponível comercialmente;

- Bloquear um dos parafusos de ajuste do fechamento da pinça e limitar o deslocamento do outro parafuso, de modo a garantir que a pinça quando fechada fique centrada no dispositivo e alinhada com a chama;
- Fazer o controle do sistema de inserção e retirada da sonda por *arduino* com *timer* por potenciômetro e com o sensor de presença não muito próximo do final de curso do cilindro pneumático. O timer servirá para dar maior flexibilidade na obtenção do tempo de residência da sonda dentro da chama. Ainda assim será necessário fazer a medição direta desse tempo de alguma maneira;
- Desenvolver um dispositivo de calibração do tempo de residência mais robusto e com possibilidade de alteração de altura em relação ao queimador, para facilitar o alinhamento com a pinça. Esse sistema pode ser composto por uma barreira laser [Köylü *et al.*, 1997], ideia similar ao emissor-receptor IV utilizado nesse trabalho, porém mais confiável. Outra opção é o uso de uma resistência linear ou de um LVDT (*Linear Variable Differential Transformer* - Transformador Diferencial Variável Linear) conectado ao êmbolo do cilindro pneumático para poder acompanhar todo o percurso do cilindro [Dobbins e Megaridis, 1987] e obter resultados semelhantes aos obtidos com a câmera de alta velocidade;
- Utilizar *TEM Grids* com marcação central, para facilitar posicionamento entre centro da chama e região analisada no MET;
- Utilizar software específico para análise de partículas.