

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE HIDROGÊNIO NA GERAÇÃO DE FULIGEM
EM CHAMAS LAMINARES DE ETILENO

por

César Figueiredo dal Gallo Faria

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, outubro de 2022

CIP - Catalogação na Publicação

Faria, César Figueiredo dal Gallo
ESTUDO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE HIDROGÊNIO NA GERAÇÃO
DE FULIGEM EM CHAMAS LAMINARES DE ETILENO / César
Figueiredo dal Gallo Faria. -- 2022.
26 f.
Orientador: Fernando Marcelo Pereira.

Coorientador: Rafael Perin.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2022.

1. Fuligem. 2. Extinção de luz. 3. Transformada
inversa de Abel. 4. Chamas laminares difusivas. 5.
Hidrogênio. I. Marcelo Pereira, Fernando, orient. II.
Perin, Rafael, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

César Figueiredo dal Gallo Faria

ESTUDO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE HIDROGÊNIO NA GERAÇÃO DE FULIGEM
EM CHAMAS LAMINARES DE ETILENO

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
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Fernando Marcelo Pereira

Comissão de Avaliação:

Prof. Fernando Marcelo Pereira

Prof. Andrés Armando Mendiburu Zevallos

Prof^a. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, outubro de 2022

AGRADECIMENTOS

É com um imenso prazer e satisfação que escrevo essa nota de agradecimento, pois é uma conquista que venho batalhando há muito tempo para que se concretizasse. Primeiramente, gostaria de agradecer a minha família pelo incondicional apoio, carinho e suporte em todos estes anos. Sem vocês, nada disso teria sido possível, meu sincero e mais profundo agradecimento a vocês, Renato, Kátia, Juliana, Alessandra e Maria Luiza.

Agradeço também ao meu orientador Fernando Marcelo Pereira que, apesar de termos planejado esta monografia com um bom tempo de antecedência, acabou nos tomando boas discussões (e tempo) para que pudéssemos caminhar para o caminho correto. Gostaria de agradecer-lo por me proporcionar não só uma oportunidade no Laboratório de Combustão, como também por ter sido esse mestre ao longo de toda minha trajetória na UFRGS, meu sincero muito obrigado ao senhor.

Agradeço também ao Rafael Perin, meu coorientador, que tive o privilégio de me aproximar neste último ano e que, com certeza, levarei como um amigo para vida. Gostaria de deixar aqui registrado meu muito obrigado pelos incontáveis dias que passamos no laboratório de combustão coletando dados. És um cara vitorioso e sei que terá muito sucesso nessa vida. Conte comigo para o que precisar.

Agradeço também ao Isaías Mortari, meu tutor no que se diz respeito à programação, além de ter sido parte fundamental neste processo lá atrás em 2017, quando tudo se iniciou. Muito aprendi com você, mestre, sabes disso. Deixo aqui meu agradecimento pela parceria e pelos conselhos.

Agradeço também a todos integrantes (e ex-integrantes) do Laboratório de Combustão: Rafael, Lucho, Manoel, Cristian, Diego, Thiago e outros que não me lembro o nome neste momento. Obrigado por terem compartilhado conhecimento e tornado o ambiente acadêmico mais descontraído.

Agradeço também a todos colegas de curso com os quais convivi desde o início da faculdade e que, junto a mim, em dezembro, receberão o grau de Engenheiro(a) Mecânico(a), desejo a todos muito sucesso!

FARIA, C. F. G. **Estudo do efeito da adição de hidrogênio na geração de fuligem em chamas laminares de etileno**. 2022. 26 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

RESUMO

É notória a busca dos seres humanos por processos de geração de energia que sejam menos nocivos ao planeta. Sabe-se que a fuligem, originada de processos de combustão incompletos, é um participante relevante neste processo. Deste modo, mostra-se pertinente o estudo da produção destes agentes em diversos tipos de chamas provenientes da queima de derivados do petróleo. Neste trabalho, aplicou-se a técnica de extinção de luz através da atenuação em linha de visão para se determinar quantitativamente a fração volumétrica de fuligem gerada em chamas difusivas laminares de etileno a partir do coeficiente de extinção e da aplicação da transformada inversa de Abel. Verificou-se ainda que a diluição de 20% de hidrogênio ao etileno reduz em aproximadamente 22% a altura da chama e suprime a geração de fuligem em determinadas alturas em até 60%. Os resultados da chama pura de etileno foram comparados com a literatura, demonstrando-se a correta aplicação do código numérico e da transformada inversa de Abel.

PALAVRAS-CHAVE: Fuligem, Extinção de luz, Transformada inversa de Abel, Chamas laminares difusivas, Hidrogênio.

FARIA, C. F. G. **Study of the effect of hydrogen addition on the generation of soot in ethylene laminar flames**. 2022. 26 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ABSTRACT

The search of human beings for energy generation processes that are less harmful to the planet is notorious. It is known that soot, originated from incomplete combustion processes, is a relevant participant in this process. Thus, it is relevant to study the production of these agents in different types of flames from the burning of petroleum derivatives. In this work, the light extinction technique was applied through line-of-sight attenuation to quantitatively determine the volumetric fraction of soot generated in laminar diffusive ethylene flames from the extinction coefficient and the application of the inverse Abel transform. It was also found that the dilution of 20% of hydrogen to ethylene reduces the flame height by approximately 22% and suppresses the generation of soot at certain heights by up to 60%. The results of the pure ethylene flame were compared with the literature, demonstrating the correct application of the numerical code and the inverse Abel transform.

KEYWORDS: Soot, Light Extinction, Inverse Abel Transform, Diffusive Laminar Flames, Hydrogen.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3. OBJETIVO	2
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
4.1. TIPOS DE CHAMAS E FULIGEM	2
4.2. TÉCNICA DE EXTINÇÃO DE LUZ.....	4
5. METODOLOGIA.....	6
5.1. APARATO EXPERIMENTAL.....	6
5.2. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS E PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO.....	7
5.3. TRANSFORMADA INVERSA DE ABEL	10
6. RESULTADOS	11
7. CONCLUSÃO.....	15
7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
APÊNDICE A	18
APÊNDICE B.....	20

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

HAB	<i>Height above the burner</i>
HeNe	Hélio e Neônio
PAH	<i>Polycyclic aromatic hydrocarbon</i>
ppm	Partes por milhão
CARS	Coherent anti-Stokes Raman spectroscopy
FMHW	<i>Full width at half maximum</i>
LOSA	<i>Line-of-sight-attenuation</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

f_v	Fração volumétrica de fuligem
N	Densidade do número de partículas
D_p	Diâmetro das partículas primárias
I_F	Intensidade de luz atenuada através da chama
$I_{F ref}$	Intensidade de luz de referência
I_{NF}	Intensidade “atenuada” de luz sem a chama
$I_{NF ref}$	Intensidade de referência de luz da medição sem a chama
I_{FOFA}	Intensidade incidente de luz com chama fora da área da chama
L	Caminho óptico percorrido pela luz
I_T	Intensidade de luz transmitida através do meio
I_0	Intensidade de luz incidente no meio
K_{ext}	Coefficiente de extinção local
K_{esp}	Coefficiente de espalhamento
K_{abs}	Coefficiente de absorção
λ	Comprimento de onda proveniente da fonte de excitação
m	Índice de refração complexo
$E(m)$	Função absorção
K_e	Coefficiente adimensional de extinção
$P(y)$	Projeção integral da linha de visão

1. INTRODUÇÃO

A combustão tem se mostrado ser um fenômeno de alto interesse por parte dos seres humanos desde seus primórdios. No início do século XIX surgia a Revolução Industrial, e com ela uma alta demanda por combustíveis, principalmente o carvão, visto que as máquinas da época eram em sua grande maioria a vapor. O carvão e a lenha eram tidos como recursos primordiais e essenciais para a manufatura da época. Com a descoberta do petróleo em 1850 pelo escocês James Young, um novo ciclo se iniciava. Até que em 1874, nos Estados Unidos, uma produção de aproximadamente 10 milhões de barris por ano impulsionava a indústria da época com a geração de energia a partir da combustão de derivados do petróleo [Souza, 2006].

A reação de combustão tem como um de seus produtos a formação do dióxido de carbono, CO_2 , um dos principais agentes responsáveis pelo aquecimento global. Com a crescente demanda de combustíveis fósseis nos últimos anos, a concentração de CO_2 na atmosfera do planeta vem crescendo consideravelmente. No início da Revolução Industrial, a concentração variava em torno de 280 ppm, partes por milhão, já a medição realizada em 2018, mostrava uma concentração de 408 ppm, um aumento de 45% da concentração do composto químico na atmosfera global [NOAA/ESRL].

Deve-se considerar ainda a existência de processos de combustão incompletos, que dão origem a formação da fuligem, outro participante relevante para o efeito estufa. A fuligem é um aglomerado de partículas sólidas, aproximadamente esféricas, com dezenas de nanômetros, formadas por carbono e hidrogênio. O “carbono negro”, em grande parte dos processos de combustão espalha e absorve a radiação solar recebida, contribui para a má qualidade do ar e induz problemas respiratórios e cardiovasculares [Highwood e Kinnerslay, 2006]. Por essas razões, há uma grande tendência mundial por parte da comunidade científica no estudo da viabilidade da troca de matrizes fósseis por matrizes sustentáveis de geração de energia.

O hidrogênio, H_2 , teve seu interesse fomentado na década de 90, quando as mudanças climáticas e temas relacionados ao efeito estufa ganharam espaço em âmbito mundial. O hidrogênio pode ser produzido pela hidrólise da água empregando fontes de energia renováveis, constituindo-se, portanto, em um meio de armazenamento de energia limpa. Para fins energéticos, o hidrogênio tem plena utilização em motores de combustão interna e em células de combustível, além de desempenhar um papel importante em processos industriais. Este ainda possui a maior relação entre energia e peso que qualquer outro combustível. Além de ser um meio de energia menos poluente, o hidrogênio tem sido utilizado como aditivo a misturas combustíveis para que se tenha uma melhor eficiência da combustão e melhoria da queima [Fan *et al.*, 2018].

Portanto, verifica-se um interesse crescente nas últimas três décadas em estudar os efeitos da diluição de hidrogênio em chamas. Desta forma, neste trabalho, apresenta-se o estudo do efeito sobre a geração de fuligem em chamas laminares de etileno diluídas com hidrogênio.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Jans, 2008, utilizou a técnica de extinção de luz em conjunto com a técnica de incandescência induzida por laser para determinação da fração volumétrica de fuligem de uma chama de biocombustível, heptano vaporizado, gerada em um queimador contido dentro de um vaso de pressão.

Soares, 2016, aplicou a técnica de extinção de luz para obtenção de uma análise quantitativa de fração volumétrica de fuligem em conjunto com uma análise qualitativa através da técnica

de incandescência induzida por laser em um queimador do tipo McKenna para chamas pré-misturadas de etileno.

Santoro *et al.*, 1983, realizaram um estudo sobre a formação e crescimento de partículas de fuligem em chamas difusivas de etileno em um queimador do tipo Santoro e através da técnica de extinção de luz em conjunto com a técnica de dispersão de luz determinaram a fração volumétrica de fuligem e o tamanho médio de partícula.

Arana *et al.*, 2004, realizaram um estudo em chamas parcialmente pré-misturadas de etileno com ar em um queimador do tipo Santoro e com diversas razões de mistura. Foi feita uma análise ainda com diferentes valores para o coeficiente de extinção adimensional e seu respectivo impacto nos valores obtidos para fração volumétrica de fuligem.

Gardin, 2016, realizou o estudo quantitativo da produção de fuligem em chamas laminares de etileno não pré-misturadas e parcialmente pré-misturadas. O queimador utilizado foi do tipo Santoro e este estava em *coflow* com ar ambiente. Foi utilizada a técnica de extinção de luz para determinar quantitativamente a fração volumétrica de fuligem em razões de equivalência iguais às utilizadas por Santoro *et al.* e Arana *et al.*

Zhao *et al.*, 2014, aplicaram a técnica de espectrometria de três cores tomográfica de feixe cônico para medir temperaturas espacialmente distribuídas, diâmetros de fuligem, e fração volumétrica de fuligem em diversas chamas difusivas laminares de etileno diluídas com hidrogênio e hélio. Utilizaram um queimador do tipo Santoro e todas as chamas estavam em *coflow* com ar ambiente.

Gülde *et al.*, 1996, fizeram um estudo da influência da diluição de hidrogênio em chamas laminares difusivas de etileno, propano e butano, em *coflow* com ar ambiente, na formação de fuligem. Foi utilizada a técnica CARS para a análise da quantidade de fuligem, além de ter sido utilizado um queimador do tipo Gülde.

Zhu *et al.*, 2021, realizaram um estudo da formação de fuligem em chamas difusivas de etileno e de metano diluídas com hidrogênio baseado na técnica de extinção de luz em duas dimensões. Todas as configurações de chama foram feitas em um queimador do tipo Gülde e em *coflow* com ar ambiente.

3. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho compreende montar e validar uma bancada para o estudo da formação de fuligem em chamas difusivas laminares de etileno/ar e verificar os efeitos da diluição de hidrogênio sobre a geração de fuligem. Para isto, utiliza-se a técnica de extinção de luz para fornecer resultados quantitativos de fração volumétrica de fuligem.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. TIPOS DE CHAMAS E FULIGEM

As chamas podem ser classificadas em duas categorias: chamas não pré-misturadas e chamas pré-misturadas. A diferença entre estes dois tipos de chama é o meio como ocorre o transporte dos reagentes para a zona onde ocorrerá a reação. Em uma chama não pré-misturada, ou também conhecida como chama de difusão, o oxidante e o combustível se difundem um no outro somente na zona de reação, ou seja, a chama ocorre onde os reagentes se encontram, já para a chama pré-misturada, a mistura é realizada a nível molecular antes de se chegar na zona de reação. As chamas abordadas no presente trabalho são chamas difusivas.

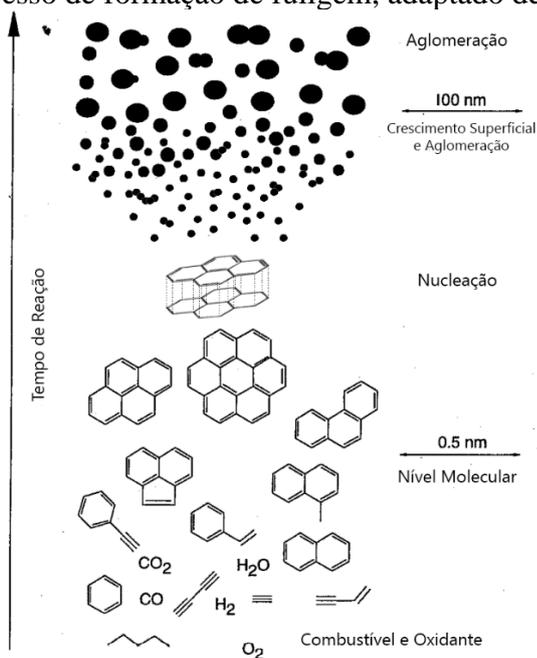
Para chamas difusivas, a formação de fuligem ocorre na faixa de temperatura entre 1300 K e 1600 K [Turns, 2000]. Inicialmente, para temperaturas abaixo às temperaturas adiabáticas, o que rege o processo de formação de fuligem é a decomposição química do combustível, já para regiões onde a temperatura é elevada, os produtos a partir da pirólise governam a produção de fuligem. A pirólise de um combustível que não contém anéis aromáticos pode ocorrer de duas formas: ou por transferência de um radical H, ou por fissão. Sendo a última a mais provável, pois as ligações são relativamente mais fracas. Por combustíveis apresentarem diferentes decomposições e, conseqüentemente, diferentes produtos provenientes da pirólise, explica-se a importância do tipo de combustível sobre a produção de fuligem [Karatas, 2009].

O combustível que não é completamente queimado e que se encontra em regiões com temperatura elevada da chama sofre o processo de pirólise, o qual forma partículas menores, e, dentre elas, o acetileno [Soares, 2016]. Na sequência, anéis aromáticos são formados a partir da decomposição destes produtos e estes dão origem aos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, conhecidos como PAH (*Polycyclic aromatic hydrocarbon*), precursores da fuligem.

Após a formação dos PAH, dá-se início a fase de nucleação, a qual é caracterizada pela junção de moléculas PAH e a formação dos primeiros núcleos com tamanho de aproximadamente 2 nm [Palmer e Cullis, 1965]. Como estes estão expostos a diferentes espécies de hidrocarbonetos, como por exemplo o acetileno, que tende a reagir com a superfície da fuligem e aglomerar ainda mais núcleos, dá-se início a uma nova fase denominada de crescimento superficial. Esta fase ocorre paralelamente ao processo de coagulação, que é caracterizado pela união de múltiplos núcleos de fuligem através da colisão entre eles.

Finalmente, assim que os processos de crescimento superficial e coagulação terminam, as partículas começam a se aglutinar e uma nova fase se inicia: a aglomeração. Nesse momento, as estruturas de partículas estão na ordem de dezenas a centenas de nanômetros, e as partículas destes aglomerados podem medir de 5 até 50 nm de diâmetro [Soares, 2016]. Apesar da complexidade, uma ilustração comparativa do tempo das fases de formação da fuligem em conjunto com sua respectiva escala pode ser observada na Figura 4.1.

Figura 4.1- Processo de formação de fuligem, adaptado de Bockhorn, 1994.



A fuligem pode ainda sofrer um processo de oxidação por espécies como O_2 , O e OH [Law, 2006]. Este processo de oxidação muitas vezes predomina sobre o processo de formação de fuligem, um exemplo notório e comum a todos é a chama de uma vela, onde toda fuligem produzida acaba por ser oxidada.

A fuligem pode ser caracterizada de diferentes maneiras, sendo que as mais predominantes na literatura são através da fração volumétrica, f_v , o diâmetro das partículas primárias, D_p , e a densidade do número de partículas, N . Assumindo-se que as partículas de fuligem são esféricas, a fração volumétrica de fuligem pode ser relacionada com os demais parâmetros da seguinte forma:

$$f_v = N \frac{\pi D_p^3}{6} \quad (4.1)$$

4.2. TÉCNICA DE EXTINÇÃO DE LUZ

A técnica de extinção de luz consiste em um método onde um feixe de laser é atenuado por um meio. O decaimento da energia do feixe de laser pode ser relacionado à fração volumétrica das partículas que absorvem esta luz no meio. É uma técnica relativamente simples que provê resultados quantitativos de fração volumétrica.

Assumindo-se que a fuligem é a única causa para que se tenha uma extinção do feixe laser, esta técnica pode ser aplicada para a determinação de medidas de fração volumétrica de fuligem ao longo do eixo de simetria de uma chama. Cada altura acima do bico de queimador, HAB (*height above the burner*), é varrida longitudinalmente pelo feixe laser. Para cada medição radial, duas leituras são obtidas ao mesmo tempo: um sinal da intensidade de luz atenuada através da chama, I_F , e um sinal da intensidade de referência, $I_{F ref}$, as quais são provenientes da mesma fonte e capturadas ao mesmo tempo devido a utilização de um divisor do feixe laser no aparato experimental. Estas intensidades são explicadas com mais detalhes na Seção 5.2.

De acordo com a lei de Beer-Lambert, a atenuação promovida por uma determinada amostra é diretamente proporcional ao comprimento do caminho óptico percorrido e ao coeficiente de extinção do meio, podendo ser expressa como

$$\ln\left(\frac{I_T}{I_0}\right) = - \int_0^L K_{ext} ds \quad (4.2)$$

em que L é o caminho óptico percorrido pela luz, I_T é a intensidade de luz transmitida através do meio, I_0 é a intensidade de luz incidente no meio, e K_{ext} é o coeficiente de extinção local.

A extinção consiste em dois fenômenos: espalhamento e absorção. Bohren e Huffman, 1998, afirmam que o coeficiente de espalhamento, K_{esp} , é dado pela Equação 4.3.

$$K_{esp} = \frac{\pi^4}{4\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 N D_p^6 \quad (4.3)$$

Sendo λ o comprimento de onda proveniente da fonte de excitação, D_p o diâmetro da partícula, N a densidade do número de partículas e m o índice de refração complexo.

O índice de refração complexo, m , é o que determina as propriedades óticas da partícula e é de extrema importância no estudo da emissão de radiação de partículas de fuligem, e este varia conforme a temperatura, comprimento de onda e também com a composição química empregada. De modo similar, a absorção é determinada pelo coeficiente de absorção, K_{abs} .

$$K_{abs} = -\frac{\pi^2}{\lambda} \text{Im} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) ND_p^3 = \frac{\pi^2 E(m)}{\lambda} ND_p^3 \quad (4.4)$$

Segundo Santoro *et al.*, 1983, o índice de refração complexo é fator preponderante no principal parâmetro para determinação de fração volumétrica de fuligem através de técnicas óticas, a função de absorção, $E(m)$. Esta depende unicamente do índice de refração complexo e pode ser observada na Equação 4.5.

$$E(m) = -\text{Im} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \quad (4.5)$$

Entretanto, em um estudo amplo, Krishnan *et al.*, 2000, observou que há uma fraca dependência entre comprimentos de onda e tipos de combustível. No espectro entre 400 e 1064 nm, verificaram que os dados de $E(m)$, tomando-se valores obtidos por eles e pela literatura, utilizando-se gás etileno como combustível, apresentavam uma convergência para a expressão linear observada na Equação 4.6.

$$E(m) = 0.232 + 1.2546 \times 10^5 \lambda \quad (4.6)$$

Nota-se também que o coeficiente de espalhamento é relacionado a $\frac{D_p^3}{\lambda}$, enquanto o coeficiente de absorção está relacionado a $\frac{D_p}{\lambda}$. Logo, quando se há uma relação pequena de $\frac{D_p}{\lambda}$, tem-se que $K_{abs} \gg K_{esp}$ e, portanto, pode-se negligenciar a influência do espalhamento, ou seja, $K_{ext} \approx K_{abs}$. Isto significa que o domínio considerado está dentro do limite de Rayleigh, ou seja, o tamanho das partículas de fuligem analisadas é muito menor que o comprimento de onda da fonte emissora responsável pela excitação do particulado. Portanto, tem-se que

$$K_{ext} \approx K_{abs} = \frac{\pi^2 E(m)}{\lambda} ND_p^3 \quad (4.7)$$

Aplicando a Equação 4.1 na Equação 4.7, obtém-se a Equação 4.8.

$$K_{ext} = 6\pi f_v \frac{E(m)}{\lambda} \quad (4.8)$$

Por fim, com a combinação das Equações 4.2 e 4.8, obtém-se a seguinte expressão

$$\ln\left(\frac{I_0}{I_T}\right) = \int_0^L \frac{E(m)6\pi}{\lambda} f_v(s) ds \quad (4.9)$$

Santoro *et al.*, 1983, ainda define o coeficiente adimensional de extinção, K_e , como

$$K_e = 6\pi E(m) \quad (4.10)$$

De acordo com a Equação 4.6, para um comprimento de onda de 632,8 nm, temos que o valor de $E(m) = 0,311$. Logo, da Equação 4.10 obtém-se o valor do coeficiente adimensional $K_e = 5,86$. Na literatura é possível encontrar diversos valores para K_e [Gardin, 2016]. Choi *et al.*, 1995, sugerem que valores de K_e entre 7,1 e 10,1 são válidos para o espectro do visível e para o limite superior do infravermelho. Arana *et al.*, 2004, comparam dois valores para o coeficiente adimensional de extinção, $K_e = 4,9$ e $K_e = 7,1$, e analisam a consideração de ambos os valores quanto ao impacto no cálculo da fração volumétrica de fuligem para chamas laminares de etileno.

5. METODOLOGIA

5.1. APARATO EXPERIMENTAL

A bancada experimental utilizada no presente trabalho pode ser observada na Figura 5.1. Seus componentes são detalhados na Tabela 5.1.

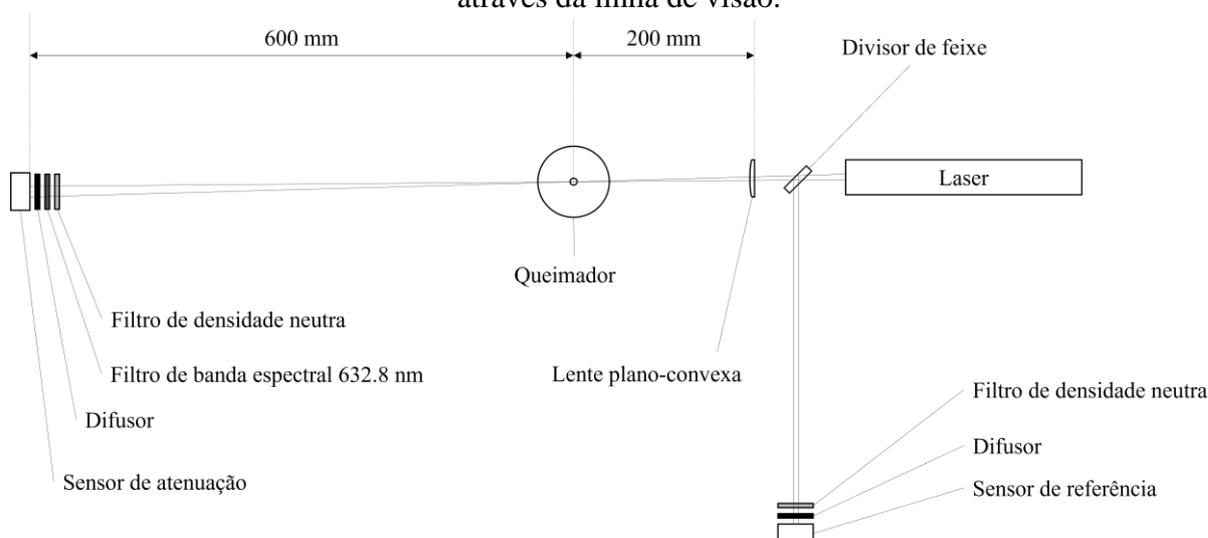
Tabela 5.1 – Lista de equipamentos para técnica de extinção de luz.

Aparato experimental	Qtd.
Bancada com sistema cartesiano de coordenadas	1
Queimador Santoro	1
Laser contínuo HeNe 632,8 nm	1
Sensor de intensidade luminosa (20pW – 2000mW)	2
Filtro de banda espectral 632,8 nm	1
Divisor de feixe laser	1
Lente plano-convexa f = 200mm	1
Filtro de densidade neutra (ND2-400)	2
Difusor de luz	2
Controlador de vazão	3
Datalogger	1
Computador	1

A bancada experimental utilizada possui um sistema cartesiano de posicionamento com precisão de 0,05 mm em cada um dos três eixos de coordenadas. O queimador utilizado é do tipo Santoro, o mesmo utilizado por Santoro *et al.*, 1983, o qual é formado por dois tubos

concêntricos de bronze, tais que o interno mede 11,1 mm no diâmetro e é por onde o combustível é transportado, enquanto o tubo externo mede 101,6 mm no diâmetro e é por onde o ar é transportado de maneira a se estabilizar a chama. Após sair do controlador de vazão, na entrada do queimador, o ar flui através, primeiramente, de uma tela de aço inoxidável com malha 70 e arame de 0,16 mm. Na sequência, atravessa um leito de esferas de vidro com diâmetros de 3,5 mm e, em seguida, escoo através de uma tela de aço inoxidável com malha 40 e arame de 0,25 mm. Por fim, atravessa uma “colmeia” antes de ser exaurido pelo queimador. Desta forma, o fluxo de ar ao redor da chama é mantido uniforme. A tubulação de bronze por onde escoo o combustível ainda se estende por 4 mm a mais do que o plano de saída do ar.

Figura 5.1 – Esquema do aparato experimental para técnica de extinção de luz atenuada através da linha de visão.



A fonte de luz utilizada neste trabalho é um laser contínuo de gás HeNe da marca Reo, modelo R-30990, com potência de saída de 10 mW e comprimento de onda de 632,8 nm. Os dois sensores fotovoltaicos utilizados são da marca Newport, modelo 818-SL, e têm uma escala de medição de 20 pW a 2000 mW. O *datalogger* é da marca Keysight, modelo 34970A. Os filtros de densidade neutra são da marca ZOMEI e têm variação de densidades que variam de 2 ND até 400 ND. Os controladores de vazão mássica são da marca Bronkhorst, modelo EL 200. Por se tratar de controladores de vazão para metano, foi aplicado um fator de correção para vazão dos gases a partir da base de dados da FLUIDAT®. O filtro de interferência espectral é para comprimento de onda de 633 nm e FMHW de 3 nm.

5.2. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS E PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO

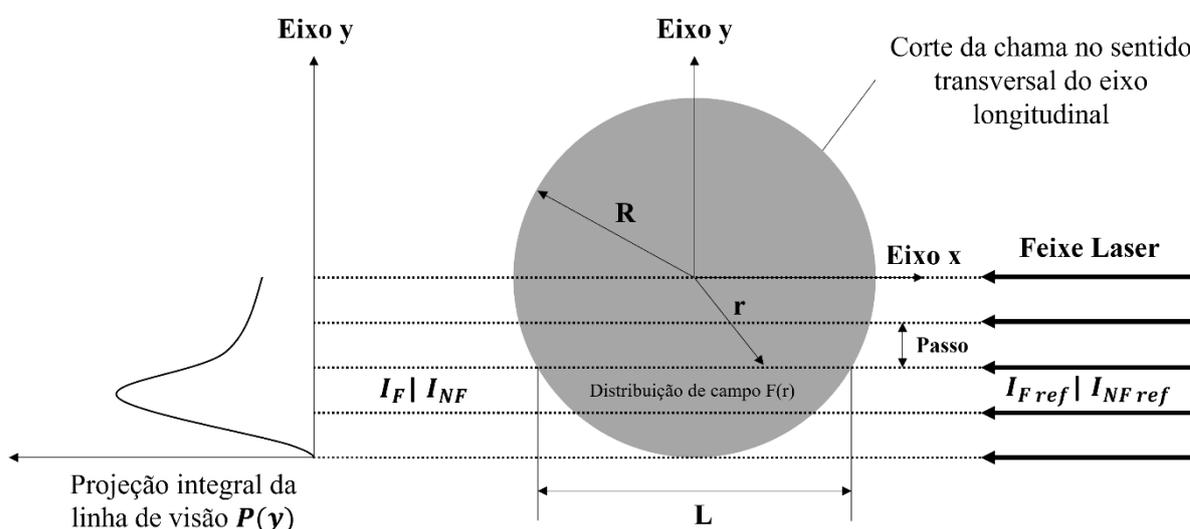
Para se realizar medições de atenuação de linha de visada, LOSA (*Line-of-sight-attenuation*), utilizando-se a técnica de extinção de luz, deve-se realizar medições da intensidade incidente e da intensidade transmitida de um laser em um determinado meio. O logaritmo natural da razão entre a intensidade de laser incidente e a intensidade de laser transmitida ($\ln(\frac{I_0}{I_T})$) são os dados de projeção integral da linha de visão $P(y)$. Esse parâmetro representa a integração do coeficiente de extinção através da seção transversal da chama como mostrado na Equação 4.9 e reescrito na Equação 5.1, na qual y é a posição da medição, conforme pode ser observado na Figura 5.2.

$$P(y) = \ln\left(\frac{I_0}{I_T}\right) \quad (5.1)$$

Para se obter a intensidade incidente proveniente do feixe laser deve-se coletar medições com e sem a chama através da técnica LOSA. Na Figura 5.2, pode-se observar uma vista superior do método de medição, bem como todos os parâmetros utilizados para se interpretar os dados. Este método foi desenvolvido por Smith *et al.*, 1988, utilizado por Jans, 2008, e é o método utilizado neste trabalho.

Figura 5.2 – Visão geral do método de medição e os principais parâmetros para a técnica de extinção de luz através da atenuação de linha de visão.

Vista superior



Quando coletada a intensidade do feixe laser para ambas as medições, com e sem a chama, considera-se que a transmitância dos filtros e a sensibilidade dos detectores devem ser constantes. Além do mais, para a medição com chama, a única diferença entre a intensidade atenuada, I_F , e a intensidade de referência, $I_{F ref}$, deve ser por causa da atenuação pela fuligem produzida pela chama. Diversos fatores podem ser levados em consideração, como por exemplo a intensidade constante de luz, a direção do feixe, reflexões do laser, mudanças na luz de fundo e variação espacial em filtros espectrais e/ou detectores [Jans, 2008].

Para garantir que se tenha uma intensidade de luz constante, utilizou-se uma fonte de luz monocromática para este trabalho, um laser. A grande vantagem de se utilizar laser é pelo fato do feixe de luz não ser divergente e se ter uma banda espectral estreita. Os lasers mais utilizados para aplicação do LOSA são os lasers de Argônio-Ion e os lasers HeNe, conhecidos por ter intensidade de luz constante [Mun e Kirk, 1998]. O laser utilizado no presente trabalho é o laser HeNe com comprimento de onda igual a 632,8 nm.

Embora o laser HeNe promova uma intensidade estável, pequenas variações de intensidade são inevitáveis [Jans, 2008]. Por conta disto, mudanças na intensidade do laser entre as medições com e sem chama podem resultar em medições incorretas de atenuação. Portanto,

faz-se necessária a utilização de um sensor de referência para que se corrija essa variação de intensidade. O feixe laser portanto deve ser dividido por um divisor de feixe para a obtenção de um sinal de referência.

A intensidade incidente de luz, I_0 , pode ser determinada através de duas medições, uma com chama e outra sem chama, e os respectivos sinais de referência a partir da seguinte expressão

$$I_0 = I_{F REF} * \frac{I_{NF}}{I_{NF REF}} \quad (5.2)$$

em que I_0 é a intensidade incidente do laser, I_{NF} é a intensidade “atenuada” do laser sem a chama, $I_{NF REF}$ é a intensidade de referência do laser da medição sem a chama, e $I_{F REF}$ é a intensidade de referência do laser da medição com a chama.

O procedimento de medição começa antes de se realizar as medições de fato. Todos os instrumentos devem ser limpos e alinhados de maneira que não haja reflexão chegando aos sensores. O laser deve ser ligado 1 hora antes de cada medição para que se tenha uma intensidade boa e estável do sinal. Os controladores da vazão devem ser acionados e a chama acesa por pelo menos 30 minutos antes das medições para que a temperatura do sistema e da tubulação se mantenha estável. Logo após, o feixe de laser deve ser colocado na sua posição inicial, ou seja, na linha de centro do queimador, visto que as medições ocorrem do centro do queimador até uma das extremidades, e na respectiva altura a ser analisada (HAB = 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm ou 60 mm). Dois sinais são obtidos ao mesmo tempo, uma leitura é feita pelo sensor principal, que lê a atenuação do sinal (I_F), e outro sinal é obtido pelo sensor de referência ($I_{F ref}$). Para cada ponto na chama, 100 leituras são realizadas para cada um dos sensores com um intervalo de 0,25 segundos entre elas. Na sequência, o queimador é deslocado no eixo y com um passo de 0,1 mm e novamente as medições são realizadas, assim sucessivamente até cruzar uma das extremidades da chama e a análise radial para aquela determinada altura estar completa, observar Figura 5.2. Para a medição sem a chama, foi considerada apenas uma medição de 100 pontos. Desta maneira, para a medição sem a chama, coleta-se as intensidades I_{NF} e $I_{NF ref}$, e estes valores serão utilizados para calcular I_0 ao longo de todas as posições radiais para aquela determinada altura, conforme visto na Equação 5.2. Os dois escaneamentos, com e sem a chama, formam uma medição. Conforme Jans, 2008, após analisar as medições com e sem chama, foi observado que a diferença entre a intensidade de uma medição com chama medida fora da área da chama, I_{FOFA} , e a intensidade incidente de laser, I_0 , é exatamente igual a emissão da chama. Portanto, a emissão de chama não precisa ser calculada toda vez. Desta maneira, tem-se que

$$I_T = I_F - Flame\ emission \quad (5.3)$$

sendo a emissão da chama obtida através da Equação 5.4.

$$Flame\ emission = (I_{FOFA} - I_0) \quad (5.4)$$

Todos os sinais foram capturados por sensores, enviados para um *datalogger*, o qual compilou esses sinais em uma planilha eletrônica para cada passo dado na respectiva altura. Essas planilhas foram armazenadas em um computador e os dados foram tratados e interpretados com um código numérico em GNU Octave. O tratamento dos dados tem seu início com o cálculo de I_0 e de I_T a partir das Equações 5.2 e 5.3. Logo após calcula-se $P(y)$ a partir da Equação 5.1. O código numérico utilizado para este tratamento pode ser visualizado no Apêndice A.

Para que possa se aplicar a transformada inversa de Abel, os dados devem ser suavizados, então aplica-se a técnica de regularização de Tikhonov para a função $P(y)$ obtida. Em seguida, aplica-se a transformada inversa de Abel (explicada em detalhes na Seção 5.3), a qual resultará na distribuição espacial, $F(r)$, sendo $F(r)$ o integrando da Equação 4.9. Assim, pode-se reescrever a Equação 4.9 em

$$f_v(r) = F(r) \frac{\lambda}{K_e} \quad (5.5)$$

e a distribuição radial de fração volumétrica de fuligem é obtida.

5.3. TRANSFORMADA INVERSA DE ABEL

A transformada inversa de Abel é uma forma de conversão de uma projeção integral da linha de visão de uma medição em um campo com eixo axissimétrico para uma distribuição de campo espacialmente resolvida. Desenvolvida por Niels Henrik Abel em 1826, a transformada e sua inversa possuem relações com as transformadas de Fourier, Hankel e também com a de Radon.

A transformada de Abel foi primeiramente utilizada para calcular a distribuição de massa radial de galáxias e na inversão de dados de ocultação de rádio planetária visando obter informações atmosféricas em função da altura [Binney e Tremaine, 1987]. No presente estudo, utiliza-se a transformada inversa de Abel para obter a fração volumétrica de fuligem no campo espacial ao longo do raio de uma chama de etileno em *coflow* com ar ambiente.

Dada uma certa distribuição radial de uma função derivada $F(r)$, a projeção desta função em um plano alinhado com a direção x é dada por

$$P(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\sqrt{x^2 + y^2}) dx \quad (5.6)$$

A transformada inversa de Abel é dada por

$$F(r) = -\frac{1}{\pi} \int_{y=r}^{y=y_{max}} \frac{P'(y)}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy \quad (5.7)$$

Na Equação 5.7, $P'(y) = \frac{dP}{dy}$, assim, a transformada inversa de Abel permite recuperar a distribuição radial $F(r)$, dada a sua projeção $P(y)$.

Para resolver numericamente a transformada inversa de Abel, a integral é substituída por um somatório com segmentos entre y_i . Da mesma forma, $P'(y)$ é considerado constante entre os pontos y_i , conforme pode ser observado na Equação 5.8.

$$F(r) = \sum_{y_i=r}^{y_i=y_{max}} -\frac{1}{\pi} P'(y_i) \int_{y=y_i}^{y=y_i+y_{step}} \frac{dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} \quad (5.8)$$

Resolvendo-se analiticamente o restante da integral, tem-se a Equação 5.9, a qual foi empregada no código numérico deste trabalho para se calcular os valores de $F(r)$, que representa a distribuição espacial.

$$F(r) = \sum_{y_i=r}^{y_i=y_{max}} -\frac{1}{\pi} P'(y_i) \ln \left\{ \frac{y_i + y_{step} + \sqrt{(y_i + y_{step})^2 - r^2}}{y_i + \sqrt{y_i^2 - r^2}} \right\} \quad (5.9)$$

5.4. PARÂMETROS EXPERIMENTAIS

Com o intuito de se comparar os resultados deste trabalho com os de Arana *et al.*, 2004, Santoro *et al.*, 1983, e também com os de Gardin, 2016, o coeficiente de extinção adimensional utilizado é de $K_e = 7,1$. Este trabalho também utilizou os mesmos parâmetros experimentais utilizados pelos autores para a chama de etileno puro (C_2H_4). Após a validação da chama de etileno puro, manteve-se a mesma vazão total de combustível, porém desta vez com proporções de 80% de etileno (C_2H_4) e 20% de hidrogênio (H_2) a fim de se analisar os efeitos na geração de fuligem e no tamanho da chama com a diluição de hidrogênio. A pureza dos combustíveis utilizados para este trabalho, tanto para o etileno, quanto o hidrogênio, é de 99,5 %. Os dados comparativos foram obtidos através da base de dados disponibilizada pelo *International Sooting Flame Workshop*, da Universidade de Adelaide.

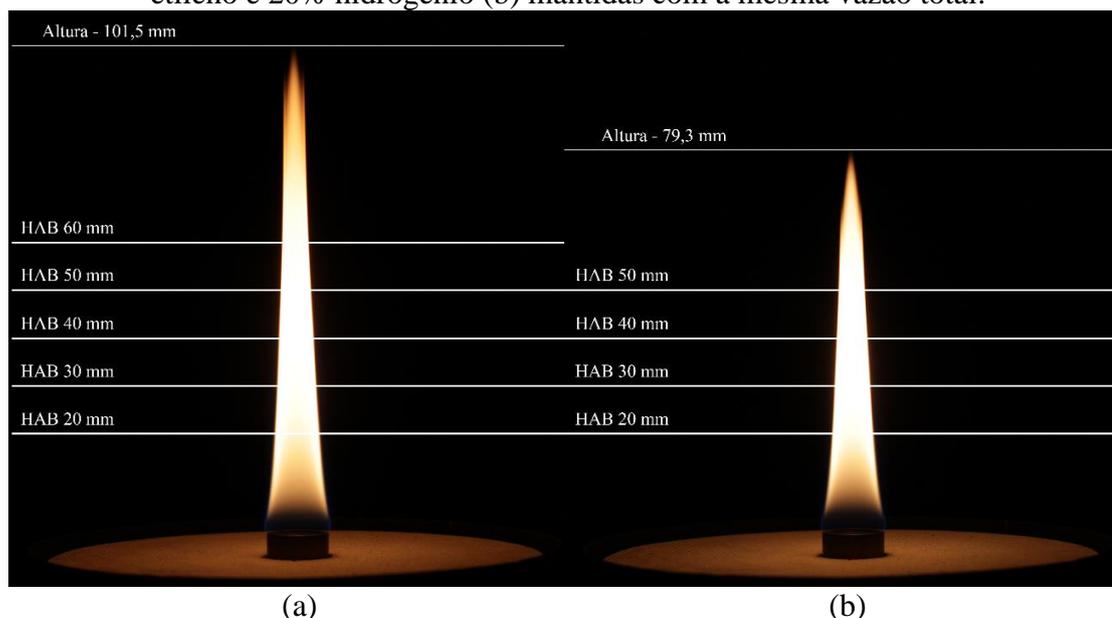
A vazão de ar no *coflow* foi mantida constante e igual a 42,7 l/min (713,3 cm³/s). Para a configuração com etileno puro, a vazão de combustível foi definida em 0,231 l/min (3,85 cm³/s). Para a configuração da chama de etileno diluída com hidrogênio manteve-se a vazão total constante ($V_t = 0,231$ l/min), porém com uma proporção de 80% etileno e 20% hidrogênio. A vazão de etileno para a chama diluída é de 0,185 l/min (3,08 cm³/s) e a vazão de hidrogênio é de 0,046 l/min (0,77 cm³/s).

6. RESULTADOS

Para a parametrização da altura das duas chamas, utilizou-se uma máquina fotográfica Canon, modelo EOS Rebel T5i, um paquímetro analógico Mitutoyo, modelo Universal com precisão de 0,05 mm, além de um tripé para fixar a câmera e mantê-la estável no mesmo lugar em todas as imagens. Os parâmetros da câmera foram mantidos os mesmos. Uma imagem de cada chama foi tomada tendo seu foco no centro do queimador. Uma terceira imagem ainda foi capturada com o paquímetro posicionado no centro do queimador para que se pudesse referenciar a escala dimensional para as imagens. Todas as imagens foram sobrepostas por meio do “software” CS6 Photoshop para que se pudesse parametrizar a escala do paquímetro às imagens das chamas a partir da quantidade de pixels das imagens.

Determinou-se o tamanho de cada chama a partir da leitura da variação RGB na linha central de cada imagem. Tomou-se como medida o fim da chama quando a variação R atingiu o valor de 10 para cada uma das imagens. Para a chama de etileno puro, a chama apresentou uma altura de 101,5 mm, enquanto a chama com 20% de diluição com hidrogênio apresentou uma altura de 79,3 mm, resultando numa diminuição de 21,87% da altura de chama. As fotografias de ambas as chamas, devidamente dimensionadas, são apresentadas na Figura 6.1.

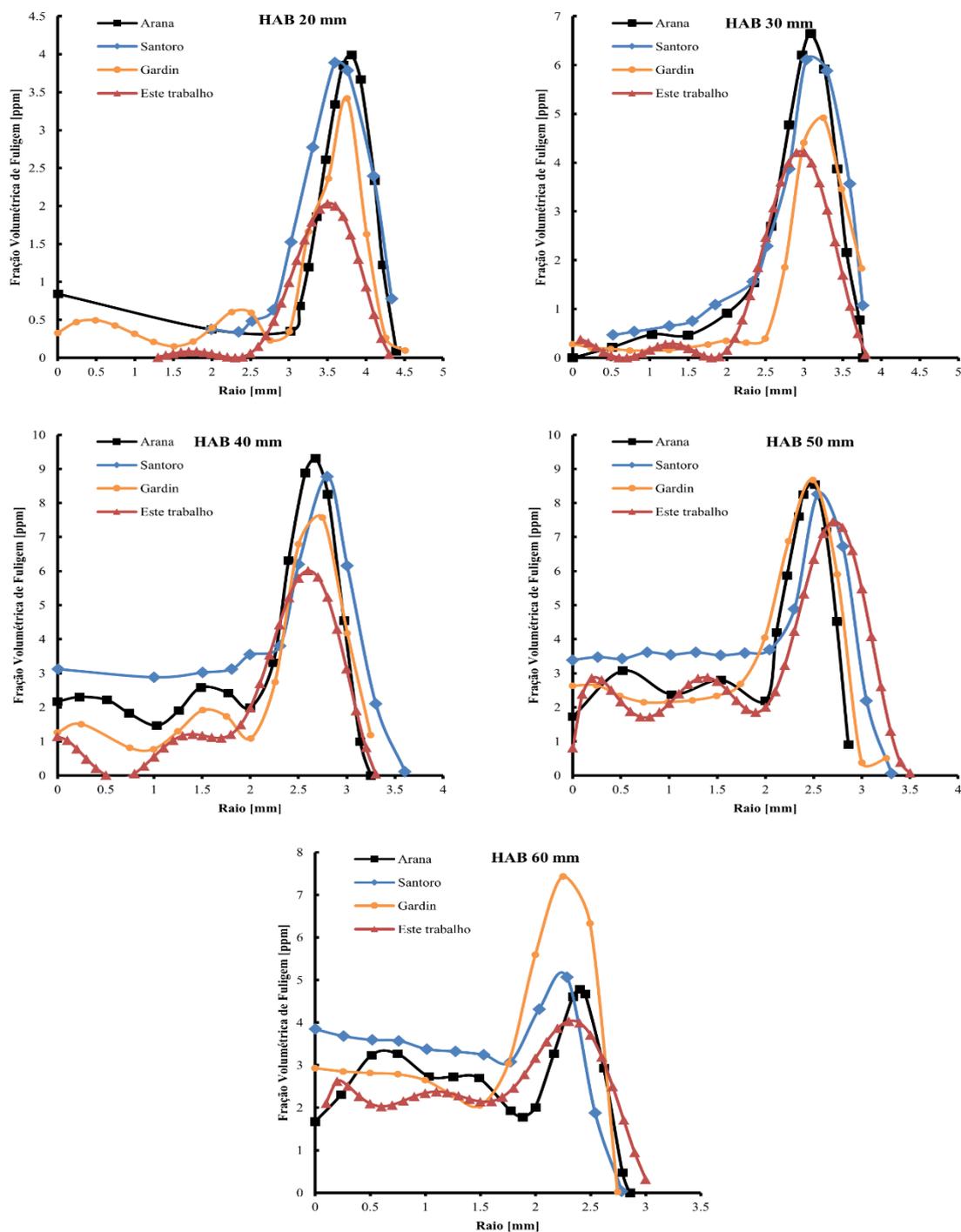
Figura 6.1 – Parametrização da altura das chamas. Chama de etileno puro (a), e chama 80% etileno e 20% hidrogênio (b) mantidas com a mesma vazão total.



Com a configuração apresentada na Figura 5.1, para a chama de etileno de puro, foram coletados dados para as alturas acima do queimador de 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm e 60 mm. Os dados obtidos neste trabalho são comparados com Santoro *et al.*, 1983, Arana *et al.*, 2004, e com Gardin, 2016, e apresentados na Figura 6.2.

Como pode ser observado, este trabalho apresenta valores de fração volumétrica de fuligem ao longo do raio do queimador na mesma ordem de grandeza que a literatura. Além disso, o comportamento de maior atenuação na proximidade da borda da chama, em função da maior fração volumétrica de fuligem nessa posição, mostra-se coerente com os resultados apresentados por Arana *et al.*, 2004, Gardin, 2016, e também por Santoro *et al.*, 1983, para todas as alturas acima do queimador. Nota-se, no entanto, que os valores obtidos no presente trabalho são menores do que os demais resultados na literatura, sobretudo para $HAB \leq 40$ mm. Essa discrepância pode ter várias origens, como a ineficiência do difusor empregado para espalhar a luz do laser na área do sensor ou uma atenuação insuficiente do filtro de densidade neutra.

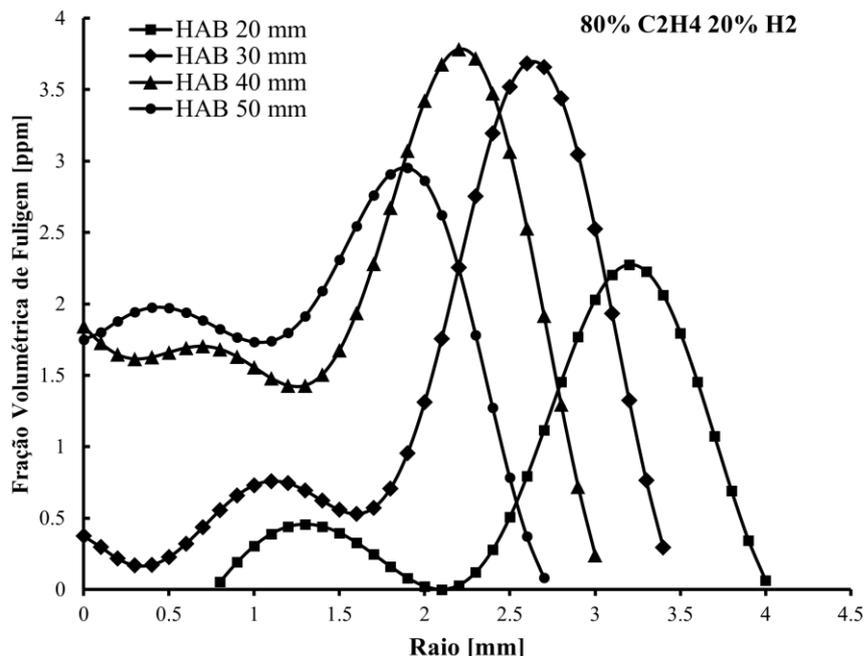
Figura 6.2 – Medições de fração volumétrica de fuligem em uma chama de etileno puro em *coflow* com ar comparadas com Arana et al., 2004, Santoro et al. e Gardin, 2016.



Assumindo que o tratamento dos dados e o aparato experimental está validado, tanto em termos qualitativos, quanto em termos quantitativos, foram coletados dados para alturas acima do queimador de 20 mm, 30 mm, 40 mm e 50 mm para a chama com 20% de diluição de hidrogênio (mantendo-se a mesma vazão total), conforme descrito na Seção 5.4. Os resultados

obtidos de fração volumétrica de fuligem ao longo do raio da chama podem ser observados na Figura 6.3.

Figura 6.3 – Medições de fração volumétrica de fuligem em uma chama de com 80% de etileno e 20% de hidrogênio em *coflow* com ar.



A partir da análise da Figura 6.3, observou-se que a diluição de hidrogênio em etileno, promove a supressão da geração de fuligem em praticamente todas as alturas, exceto para a altura de 20 mm, a qual permaneceu com valores similares de fração volumétrica de fuligem da chama de etileno puro. No entanto, a posição de máxima fração volumétrica passou de $r \approx 3,5 \text{ mm}$, da chama de etileno puro, para $r \approx 3,2 \text{ mm}$ na chama diluída com hidrogênio.

Para a altura de 30 mm, a posição de máxima fração volumétrica de fuligem ao longo do raio deslocou de $r \approx 3 \text{ mm}$, da chama de etileno puro, para $r \approx 2,6 \text{ mm}$ na chama diluída com hidrogênio. Além do mais, houve uma redução de cerca de 12% no pico máximo de fuligem nesta região.

Para a altura de 40 mm acima do queimador, a posição de máxima fração volumétrica de fuligem ao longo do raio deslocou de $r \approx 2,6 \text{ mm}$, da chama de etileno puro, para $r \approx 2,2 \text{ mm}$ na chama diluída com hidrogênio. Obteve-se ainda uma redução de cerca de 47% no seu valor máximo de fuligem.

A altura que obteve maior variação foi a de 50 mm acima do queimador. A posição de máxima fração volumétrica de fuligem ao longo do raio deslocou de $r \approx 2,7 \text{ mm}$, da chama de etileno puro, para $r \approx 1,9 \text{ mm}$ na chama diluída com hidrogênio, e obteve uma redução de cerca de 60% no seu valor máximo de fuligem nessa posição.

A fim de se fazer uma comparação mais fidedigna das chamas, alturas proporcionais ao tamanho de chama ainda foram analisadas. Para cada altura e para cada uma das duas chamas, determinou-se um valor F_{vHAB} , o qual representa a integral dos valores de fração volumétrica de fuligem, f_v , ao longo do raio da chama para a respectiva altura HAB, e este possui a unidade em metros. Proporcionalmente, para a chama de etileno puro, observa-se que a medição em $HAB = 50 \text{ mm}$ representa um valor de $\frac{50}{101,5} = 49,3\%$ da sua altura total. Para a chama diluída com hidrogênio, observa-se que a medição em $HAB = 40 \text{ mm}$ representa um valor de $\frac{40}{79,3} =$

50,4% da sua altura total. Essa análise foi feita para todas as alturas de ambas as chamas, e verificou-se que a melhor comparação (com menor erro) seria realizar um somatório da F_v das alturas de 40 mm e 50 mm para a chama de etileno puro, e um somatório da F_v das alturas de 30 mm e 40 mm para a chama diluída com hidrogênio.

Assumiu-se, portanto, para fins de comparação, que a fração volumétrica da chama de etileno puro seja $F_{v_{C_2H_4}} = F_{v_{40}} + F_{v_{50}}$. Da mesma maneira, realizou-se para a chama diluída com hidrogênio, $F_{v_{C_2H_4+H_2}} = F_{v_{30}} + F_{v_{40}}$. A partir da análise proposta, obtiveram-se os seguintes resultados: $F_{v_{C_2H_4}} = 176,56 \times 10^{-9} m$ e $F_{v_{C_2H_4+H_2}} = 109,45 \times 10^{-9} m$. Conclui-se, portanto, que houve uma redução de aproximadamente 38% na geração de fuligem com a diluição do hidrogênio para alturas proporcionais entre 37% e 50% do tamanho total de chama.

7. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvida uma bancada experimental a qual pôde ser validada a partir dos dados apresentados na Seção 6, visto que estes se mostraram na mesma grandeza e estão coerentes com os resultados apresentados por Arana *et al.*, 2004 e por Santoro *et al.*, 1983.

Verificou-se ainda que a diluição de hidrogênio ao etileno levou a uma redução na altura de chama de aproximadamente 22%. Isto se dá pelo fato de a diluição de hidrogênio em etileno aumentar a difusividade da chama, além de também aumentar a fração estequiométrica da mistura, o que contribui para a diminuição do comprimento da chama.

Com relação ao valor máximo de fuligem, para $HAB = 20$ mm, não se obteve variações significativas de fração volumétrica ao longo do raio da chama entre a chama de etileno puro e a chama diluída. De maneira similar, para $HAB = 30$ mm, verificou-se uma diminuição em 12% com relação a chama diluída. Para $HAB = 40$ mm, verificou-se uma redução em 37% no valor máximo de fuligem ao longo do raio. Para a última altura acima do queimador analisada, $HAB = 50$ mm, foi onde obteve-se a maior variação, uma redução de 60% no valor máximo de fuligem ao longo do raio da chama.

Analisou-se também que a diluição de hidrogênio ao etileno reduziu significativamente a fração volumétrica de fuligem na chama, chegando a 38% de supressão de fuligem para alturas proporcionais entre 37% e 50% do tamanho total de chama. Isto se dá pelo efeito combinado da diluição em si e da inibição química do hidrogênio.

Isto vai de acordo com o estudo apresentado por Zhao *et al.*, 2014, onde a substituição de 25% de etileno por hidrogênio mostrou reduzir o número total de fuligem em até 66%. Isso se deve não apenas aos efeitos de diluição e inibição química, mas também ao número reduzido de átomos de carbono.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se, para trabalhos futuros, a utilização de uma *integrating sphere* de forma a uniformizar a intensidade luminosa que chega ao sensor de atenuação, além de se utilizar uma fonte luz branca para atenuação da fuligem em todos os comprimentos de onda, não só em 632,8 nm. Para o sensor de referência, recomenda-se ainda a utilização de uma lente negativa antes do difusor para que se espalhe o feixe laser e este ilumine a área do sensor de maneira mais uniforme.

Recomenda-se ainda o aprimoramento do código numérico adicionando-se um *smoothing* variável, onde tenha-se parâmetros de regularização diferentes para borda e para o centro da curva, o que traria um menor ruído aos resultados, principalmente para um melhor desempenho da aplicação de transformada inversa de Abel.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arana, C.P.; Pontoni, M.; Sen, S.; Puri, I.K.; (2004) “**Field Measurements of Soot Volume Fractions in Laminar Partially Premixed Coflow Ethylene/Air Flames**”, *Combustion and Flame* 138, p. 362–372, 2004.
- Bohren, C. F.; Huffman, D. R.; (1998) “**Absorption and scattering of light by small particles**”, New York: Wiley, 1998.
- Binney, J. and Tremaine, S.; (1987) “**Galactic Dynamics**”, Princeton, NJ: Princeton University Press, p. 651, 1987.
- Fan B.; Zhang Y.; Pan J.; Liu Y.; Chen W.; Otchere P.; (2018) “**The influence of hydrogen injection strategy on mixture formation and combustion process in a port injection (PI) rotary engine fueled with natural gas/hydrogen blends**”, *Energy Convers. Manage.* 173, p. 527-538, 2018.
- Choi, M.Y.; Mulholland G.W.; Hamins A.; Kashiwagi T.; (1995) “**Comparisons of the soot volume fraction using gravimetric and light extinction techniques**”. *Combustion and Flame.* 102, p. 161–169, 1995.
- Gardin, T.; (2016) “**Estudo Quantitativo da Produção de Fuligem em Chamas Laminares de Etileno Não Pré-Misturadas e Parcialmente Pré-Misturadas**”, Monografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.
- Highwood, E. J.; Kinnersley, R. P.; (2006) “**When smoke gets in our eyes: The multiple impacts of atmospheric black carbon on climate, air quality and health**”, *Environment International*, v. 32, p. 560-566, 2006.
- Jans, G.T.; (2008) “**Development of an Experimental Setup for Soot Volume Fraction Measurements in Laminar Diffusion Flames of Gaseous and Liquid (Bio)-Fuels**”, thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2008.
- Karatas, A. E.; (2009) **Soot Formation in Co-flow and Counterflow Laminar Diffusion Flames of Fuel Mixtures**. University of Toronto. [S.l.], p. 5-8, 2009.
- Krishnan, S. S.; Lin, K. C.; Faeth, G. M.; (2000) “**Optical properties in the visible of overfire soot in large buoyant turbulent diffusion flames**”. *Journal of Heat Transfer*, v. 122, p. 517-524, 2000.
- Law, C. K.; (2006) **Combustion Physics**. New York: Cambridge University Press, p. 26-28, 2006.
- NOAA/ESRL Global Monitoring Laboratory. (2018) “**Average concentration of carbon dioxide (CO₂) in the atmosphere, measured in parts per million (ppm)**”, <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/data.html>. Acessado em: 11/03/2021.

- Gülder O.L.; Snelling D.R.; Sawchuk R.A.; (1996) **“Influence of hydrogen addition to fuel on temperature field and soot formation in diffusion flames”**, Symp. (Int.) Combust. 26, p. 2351-2358, 1996.
- Palmer, H. B.; Cullis, H. F.; (1965) **“The chemistry and physics of carbon”**, New York: Dekker, v. 1, 1965.
- Santoro, R. J.; Semerjian, H. G.; Dobbins, R. A.; (1983) **“Soot Particle Measurements in Diffusion Flames”**, Combustion and Flame 51, p. 203-218, 1983.
- Smith, L. M.; Keefer, D. R.; Sudharsanan, S. I.; (1988) **“Abel Inversion Using Transform Techniques”**, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, Vol. 39, No. 5, pp. 367-373, 1988.
- Soares, D.; (2016) **“Estudo Experimental da Produção de Fuligem em Chamas Laminares”**, Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.
- Souza, F. R.; (2006) **“Impacto do preço do petróleo na política energética mundial”**, Dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- Turns, S.R.; (2000) **“An Introduction to Combustion: Concepts and Applications”**, McGraw-Hill Education, 2 edition, p. 676, 2000.
- Zhao, H.; Stone, R.; Williams, B.; (2014) **“Investigation of the Soot Formation in Ethylene Laminar Diffusion Flames When Diluted with Helium or Supplemented by Hydrogen”**, Energy Fuels 28, 3, p. 2144-2151, 2014.
- Zhu, Y.; Wu, J.; Zhu, B.; Wang, Y.; Gu, M.; (2021) **“Experimental study on the effect of hydrogen addition on methane/ethylene diffusion flame soot formation based on light extinction measurement”**, Energy Reports, Vol. 7, Sup. 7, p. 673-683, 2021.

APÊNDICE A

O código numérico utilizado neste trabalho é uma adaptação do código proposto por Jans, 2008. O seguinte algoritmo apresentado foi o utilizado para se calcular a fração volumétrica de fuligem para HAB = 60 mm.

```

clc; clear all; close all;
pkg load io
pkg load data-smoothing
% STEP CONFIG -----
step=0.1
% LEITURA PARA FLAME EMISSION-----
folder10 = './fundo\';
theFiles10 = glob(strcat(folder10,'HAB 60 mm - com laser com chama fora da
chama.csv'));
oute10 = fopen('com_laser_com_chama_fora_da_chama_HAB60.txt','w+')
nfile=1
for i = 1:1:nfile
    B = csvread(theFiles10{i},'B6:C105');
    IOAF_F_ref = mean(B(:,2));
    STD_IOAF_F_ref = std(B(:,2));
    IOAF_F = mean(B(:,1));
    STD_IOAF_F = std(B(:,1));
    fprintf(oute10,'%10.9f %10.9f %10.9f %10.9f \r\n' ,IOAF_F_ref, STD_IOAF_F_ref,
IOAF_F, STD_IOAF_F);
end
fclose(oute10)
% LEITURA DADOS SEM CHAMA-----
folder00 = './fundo\';
theFiles00 = glob(strcat(folder00,'HAB 60 mm - com laser sem chama.csv'));
oute00 = fopen('sem_chama_HAB60.txt','w+')
nfile=1
for i = 1:1:nfile
    B = csvread(theFiles00{i},'B6:C105');
    I_NF_ref = mean(B(:,2));
    STD_I_NF_ref = std(B(:,2));
    I_NF = mean(B(:,1));
    STD_I_NF = std(B(:,1));
    fprintf(oute00,'%10.9f %10.9f %10.9f %10.9f \r\n' ,I_NF_ref, STD_I_NF_ref,
I_NF, STD_I_NF);
end
fclose(oute00)
% LEITURA DADOS COM CHAMA-----
folder = './dados\';
theFiles = glob(strcat(folder, 'HAB 60*.csv'));
oute01=fopen('com_chama_HAB60.txt','w+')
for k = 1 : length(theFiles);
    Pos(k)=(k-1)*step;
    A1 = csvread(theFiles{k},'B6:C105');
    I_F_ref = mean(A1(:,2));
    STD_I_F_ref = std(A1(:,2));
    I_F = mean(A1(:,1));
    STD_I_F = std(A1(:,1));
    % DETERMINANDO I0-----
    I_0 = I_NF*(I_F_ref/I_NF_ref);
    % DETERMINANDO A FLAME EMISSION-----
    FLAME_EMISSION = IOAF_F - I_0;
    % DETERMINANDO IT-----
    I_T = I_F - FLAME_EMISSION;
    % DETERMINANDO P(Y)-----
    P_y = log(I_0/I_T);
    VALORES_Abel(k) = P_y;

```

```

        fprintf(oute01,'%3.2f %10.9f %10.9f %10.9f %10.9f %10.9f %10.9f %10.9f %10.9f
\r\n',Pos(k), I_F_ref, STD_I_F_ref, I_F, STD_I_F, I_0, I_T, P_y, fv);
end
fclose(oute01)
% SMOOTHING COM CHAMA-----
x = Pos; % gerando o eixo X
y = VALORES_Abel; % gerando o eixo y
xh = x;
oute02 = fopen('Tikhonov.txt','w+')
[yh, lambda] = regdatasmooth(x,y,"d",6,"lambda",.00001); % APLICANDO TIKHONOV
fprintf(oute02,'%5.4f \r\n',yh);
fclose(oute02)
% PLOT SMOOTH-----
figure(1);
grid on
hold on
plot(x,y,'o','markersize',6,xh,yh,'m')
box on
title("HAB 60 mm")
xlabel('Raio[mm]')
ylabel('P(y)')
legend("noisy","smoothed");
hold off
% APLICANDO A TRANSFORMADA INVERSA DE ABEL-----
% DADOS GERAIS-----
lambda = 632.8; % Comprimento de onda do laser em nm
ke = 7.1; % Coeficiente adimensional de extinção
R = 3.5; % Raio da chama em mm
ybegin = 0; % Começo dos dados em y
ystep = 0.1; % Passo em y em mm
ymax = R; % Valor máximo de y
y1 = (ybegin:ystep:ymax)';
% FUNÇÃO P(yh)-----
y_Abel = VALORES_Abel; % gerando o eixo y
[yh_Abel, lambda] = regdatasmooth(x,y_Abel,"d",6,"lambda",.00001); % APLICANDO
TIKHONOV
P = yh_Abel;
yas = [ybegin:ystep:ymax]; % Número de dados no vetor y
h = length(yas); % Número de pontos medidos
rmax = ymax; % Máximo raio da chama
rstep = ystep; % Passo na direção do raio
Der = diff(P)/ystep; % Derivada da função P(y)
for i = [1:floor(rmax/rstep)] % Número de termos em r
r(i) = i.*rstep; % r real para a função i
dF = 0;
for ii=[round(r(i)./ystep):floor(ymax./ystep)] % y=r
y = ii.*ystep; % y real para a função ii
dF = dF + (-Der(ii)./pi).*(log((y + ystep + sqrt((y+ystep).^2-r(i).^2))./(y +
sqrt((y).^2-r(i).^2)))); % Transformada de Abel inversa
end
F(i) = (dF); % Distribuição especial
end
F1 = (632.8/7.1)*F; % cálculo da fração volumétrica de fuligem
r1 = r; % radial axis
d = diff(P);
% Resultado final-----
Ar1 = r1;
AF1 = F1;
figure(2);
grid on
hold on
plot(Ar1,AF1,'k','Linewidth',1.5);
xlabel('Raio[mm]')
ylabel('Fv [ppm]')
title('Transformada Inversa de Abel - HAB 60 mm')

```

APÊNDICE B

As regularizações de Tikhonov aplicadas para as projeções integrais de linha de visão, $P(y)$, para cada HAB da chama 100% de etileno, podem ser observadas na Figura B.1.

Figura B.1 – Regularização de Tikhonov através do código numérico em GNU Octave.

