

AGUINALDO MARTINS SERRA JUNIOR

**Investigação da propagação de chamas pré-misturadas de etanol
anidro com ar a diferentes pressões**

Aguinaldo Martins Serra Junior

**Investigação da propagação de chamas pré-misturadas de etanol
anidro com ar a diferentes pressões**

Tese apresentada ao Conselho do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, área de Transmissão e Conversão de Energia da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Doutorado em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior

Coorientador: Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburu Zevallos

S487i Serra Junior, Aguinaldo Martins
Investigação da propagação de chamas pré-misturadas de etanol anidro com ar a diferentes pressões / Aguinaldo Martins Serra Junior – Guaratinguetá, 2019
100 f. : il.
Bibliografia: f. 89-92

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.
Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior
Coorientador: Prof. Dr. Andres Mendiburu Zevallos

1. Chama (Combustão). 2. Pressão. 3. Etanol. I. Título

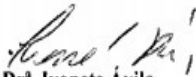
CDU 662.611(043)

AGUINALDO MARTINS SERRA JUNIOR

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JUNIOR
Orientador / UNESP/FEG


Prof. Dr. ELIANA VIEIRA CANETTIERI
UNESP/FEG


Prof. Dr. CRISTIANE APARECIDA MARTINS
ITA/SJC


Prof. Dr. CHRISTIAN JEREMI CORONADO RODRÍGUEZ
UNIFEI


Prof. Dr. MARCO ANTONIO ROSA DO NASCIMENTO
UNIFEI

DADOS CURRICULARES

AGUINALDO MARTINS SERRA JUNIOR

NASCIMENTO	19/10/1954 - Jundiaí/SP
FILIAÇÃO	Aguinaldo Martins Serra Geny Machado Martins Serra
1978/1982	Curso de Engenharia Industrial Mecânica, nível de Graduação Escola de Engenharia Industrial de São José dos Campos
1997/1998	Curso de Engenharia Mecânica, nível de Mestrado Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Campus de Guaratinguetá

Fomos criados por Deus, que nos deu inteligência e bom senso, para que pudéssemos escolher nossos caminhos com correção.

Agradeço a Deus por isso, que me possibilitou viver esta minha vida da maneira que vivo, plenamente satisfeito, realizado com minha família linda e maravilhosa.

A mais maravilhosa.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi possível graças a uma conjunção de pessoas boas, a quem eu devo muito, entre elas destaco algumas:

Em primeiro lugar, meu orientador e amigo, Dr. João Andrade de Carvalho Junior, que me empurrou para este trabalho e me pôs em contato com o Dr. Andres Armando Mendiburu Zevallos, que fez tudo o que pode para que eu terminasse esta tarefa. Tudo significa muito!

Agradeço aos meus amigos José Carlos de Andrade, pelo suporte técnico e auxílio na elaboração dos ensaios; ao José Carlos dos Santos, pelo apoio logístico e conversas sem fim; ao Lucas Silva, amizade nova, muito boa e promissora; ao Dr. Ricardo Vieira, pela disponibilização da câmera de alta velocidade (um dia eu vou ter uma); ao Dr. Christian Jeremi Coronado Rodriguez, pelo empréstimo de alguns componentes do equipamento utilizado; ao amigo sincero Alvaro Ribeiro Filho, pela disposição eterna de me aconselhar na montagem de tubulações e acessórios.

Agradeço ao INPE, que me possibilitou montar minha bancada de ensaios em um local ótimo e apropriado, com toda a infraestrutura necessária;

Agradeço à FAPESP pelo apoio através dos processos 2015/23351-9 e 2015/25435-5.

Agradeço, muito especialmente, a minha mulher Ana, que sempre me incentivou. Sinto-me pleno por estar com ela, meus seis filhos (três que trouxeram mais três) e meus três netos (por enquanto).

À

FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processos n°s 2015/23351-9 e 2015/25435-5) pelo apoio financeiro essencial para realização dessa pesquisa.

“Só sabemos com exatidão quando sabemos pouco; à medida que vamos adquirindo conhecimento, instala-se a dúvida.”

Goethe

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo a determinação experimental da velocidade laminar de chamas pré-misturadas de misturas de etanol anidro – ar na temperatura ambiente, em pressões variadas utilizando-se de uma bancada construída para este fim. Misturas com diferentes razões de equivalência, inclusive com valores próximos aos limites de inflamabilidade, foram testadas em pressões sub-atmosféricas utilizando-se a bancada cuja construção foi aqui desenvolvida. Os resultados obtidos para velocidades de combustão de chamas pré-misturadas, com diferentes razões de equivalência e diferentes pressões ambientes sub atmosféricas, são inéditos. Os experimentos foram realizados a 80, 60, 40 e 20 kPa. Este trabalho, portanto, é de importância geral em combustão. A maior inovação é a determinação da velocidade de chamas pré-misturadas de etanol anidro com ar, em atmosfera controlada e com pressões menores que a atmosférica e com razões de misturas próximas ao limite de inflamabilidade. É de importância também para futuros estudos de combustão de etanol e para o desenvolvimento de modelos de combustão de etanol.

PALAVRAS-CHAVE: Chama. Propagação de chamas. Velocidade de chamas. Pré mistura. Etanol. Combustão.

ABSTRACT

This work proposes as objective the experimental determination of the laminar velocity of premixed flames of anhydrous ethanol - air mixtures at room temperature, at varying pressures using the built for this bench. Mixtures with different equivalence ratios, including values close to flammability limits, were tested at sub-atmospheric pressures using this bench. The results obtained for pre-mixed flame combustion velocities with different equivalence ratios and different sub atmospheric ambient pressures are inedit. The experiments were performed at 80, 60, 40 and 20 kPa. This work, therefore, is of general importance in combustion. The major innovation is the determination of the rate of consumption of premixed anhydrous ethanol with air flames, in controlled atmosphere and with pressures lower than atmospheric and with mixing ratios close to the flammability limit. It is also of importance for future ethanol combustion studies and for the development of ethanol combustion models.

KEYWORDS: Flame. Flame propagation. Velocity of flames. Pre mixture. Ethanol. Combustion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Resultados observados por Xiao et al. (2013) para velocidade de uma onda de chama e a variação da pressão no interior do tubo de escoamento	26
Figura 2 - Posição da frente de chama entre os gases não queimados e os gases queimados (produtos) em um processo de combustão propagando-se em um tubo.....	28
Figura 3 - Sistema reativo, com $q > 0$, com os cinco regimes, conforme Hugoniot.	30
Figura 4 - Taxa de liberação de calor e perfis de temperatura para uma chama laminar estequiométrica de metano com ar a diferentes pressões	31
Figura 5 - Resultados plotados por Konnov e colaboradores para velocidades medidas de chamas de etanol.....	33
Figura 6 - Velocidades de chama laminar para misturas etanol-ar	35
Figura 7 - Esquema da bancada utilizada por Beeckmann et al.	36
Figura 8 - Velocidades laminares medidas para chamas de álcool com ar como função da taxa de equivalência; pressão inicial 10 bar, temperatura inicial de 373 K	36
Figura 9 - Primeiras imagens estroboscópicas de chamas tulipa	38
Figura 10 - Imagens Schlieren tomadas a cada 5 ms da propagação de chama em tubo horizontal	39
Figura 11 - Comparação entre dados experimentais e de modelagem numérica para chamas tulipa	40
Figura 12 - Sequência de fotografias que mostra a evolução da frente de chama, em um tubo	41
Figura 13 - Esquema da bancada de ensaios com tubo de 150 cm.....	48
Figura 14 - Esquema da bancada de ensaios com tubo de 265 cm.....	49
Figura 15 - Caixa de aço com o balão de vidro e a instrumentação e válvulas para os gases e vácuo para controle das misturas no interior do balão	50
Figura 16 - Painel com as válvulas para controle dos fluidos na câmara de misturas....	54
Figura 17 - Tubo para propagação da chama, com detalhe das tampas instaladas com instrumentação e controles.	56
Figura 18 - Sistema de aquisição de dados.....	58
Figura 19 - Câmera de alta velocidade.	58
Figura 20 - Velocidades de chama para pressão inicial de 20 kPa	65
Figura 21 - Velocidades de chama para pressão inicial de 40 kPa.	67
Figura 22 - Velocidades de chama para pressão inicial de 60 kPa	69

Figura 23 - Ensaio com razão de equivalência de 0,8.....	71
Figura 24 - Ensaio com razão de equivalência de 0,9.....	72
Figura 25 - Ensaio com razão de equivalência de 1,0.....	72
Figura 26 - Ensaio com razão de equivalência de 1,1.....	73
Figura 27 - Ensaio com razão de equivalência de 1,2.....	73
Figura 28 - Ensaio com razão de equivalência de 1,3.....	74
Figura 29 - Ensaio com razão de equivalência de 1,4.....	74
Figura 30 - Variação da pressão com o tempo.....	79
Figura 31 - Cinco instantes de um mesmo disparo. Razão de equivalência de 1,0 e pressão inicial de 20 kPa.....	80
Figura 32 - Velocidades adimensionais de chama para diferentes pressões iniciais e razões de equivalência.....	82
Figura 33 - Observação experimental da chama de etanol-ar com razão de equivalência igual a 1,00 e pressão inicial de 60 kPa.....	83
Figura 34 - Observação experimental da chama de etanol-ar com razão de equivalência igual a 1,10 e pressão inicial de 60 kPa.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Proporção entre grandezas para detonação e deflagração.	23
Tabela 2 - Propriedades de uma chama estequiométrica de metano-ar (velocidade de chama e taxa de consumo dos reagentes)	31
Tabela A1 - Dados utilizados durante a primeira fase dos ensaios, com o tubo menor (150 cm de comprimento)	91
Tabela A2 - Dados utilizados durante a segunda fase dos ensaios, com o tubo maior (265 cm de comprimento)	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DDT	transição de detonação para deflagração.
PIV	velocimetria por Imagem de Partículas (<i>Particle Image Velocimetry</i>)
ER	razão de equivalência (<i>Equivalence ratio</i>)
FAPESP	Fundação de Apoio a Pesquisa do Estado de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

U_u	velocidades dos gases não queimados
V_u	velocidade do som em gases não queimados
U_b	velocidade de gases produto da combustão
P_b	pressão dos gases produzidos na combustão
P_u	pressão dos gases não queimados
T_b	temperatura dos gases produzidos na combustão
T_u	temperatura dos gases não queimados
ρ_b	densidade dos gases produzidos na combustão
ρ_u	densidade dos gases não queimados
S_L	velocidade laminar
A	área de uma seção
v_u	velocidade de gases não queimados
v_b	velocidade de gases produzidos na combustão
u_1	velocidade do gás (subscrito 1 na entrada, subscrito 2 na saída)
P_1	pressão (subscrito 1 na entrada, subscrito 2 na saída)
c_p	calor específico
T_1	temperatura (subscrito 1 na entrada, subscrito 2 na saída)
R	constante dos gases perfeitos
γ	quociente entre calores específicos
q	quantidade de calor
\dot{m}	vazão mássica
δ_i	espessura da chama
ϕ	razão de equivalência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	CONCEITUAÇÃO DE CHAMAS.....	21
2.2	CHAMAS LAMINARES	24
2.3	PROPAGAÇÃO DE CHAMAS.....	25
2.4	TEORIA DE CHAMAS SE PROPAGANDO LIVREMENTE.....	30
2.5	MÉTODOS EXPERIMENTAIS PARA DETERMINAR A VELOCIDADE DE CHAMA.....	32
2.6	VELOCIDADE DE CHAMA LAMINAR DO ETANOL	33
2.7	O FENÔMENO DAS CHAMAS TULIPA.....	37
2.8	OUTROS TRABALHOS EXPERIMENTAIS.....	43
3	METODOLOGIA	45
3.1	PROCEDIMENTOS GERAIS	45
3.2	BANCADA DE ENSAIOS.....	48
3.3	CÂMARA PARA PREPARAÇÃO DE MISTURAS.....	49
3.4	TUBO PARA PROPAGAÇÃO DA CHAMA.....	55
3.5	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	57
3.6	CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE	58
3.7	PROCEDIMENTOS PARA REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS	59
3.8	AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS.....	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
4.1	TUBO DE 150 CM.....	63
4.2	TUBO DE 265 CM.....	81
5	CONCLUSÃO	85
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	86
	REFERÊNCIAS	87
	APÊNDICE	91

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho teve como objetivo a determinação experimental da velocidade de propagação laminar de chamas pré-misturadas de misturas de etanol anidro – ar na temperatura ambiente, em pressões variadas sub atmosféricas. Misturas com diferentes razões de equivalência, inclusive com valores próximos aos limites de inflamabilidade inferior, foram testadas em pressões sub-atmosféricas utilizando-se uma bancada dedicada construída para isto. As velocidades de combustão de chamas pré-misturadas, com diferentes razões de equivalência e diferentes pressões ambientes sub atmosféricas, foram determinadas. Os experimentos foram realizados a pressões iniciais de 80, 60, 40 e 20 kPa, em um cilindro com volume constante. Foi utilizado um método de ensaio com um cilindro semelhante ao utilizado no trabalho de Eisazadeh-Far et al. (2011). O objetivo principal aqui foi determinar-se a velocidade de chamas de misturas de etanol com ar com diferentes razões de mistura e pressões iniciais sub atmosféricas no interior de um tubo de borossilicato. Pretende-se, também, observar, visualmente, o comportamento da chama durante seu desenvolvimento no interior do tubo.

Portanto, o objetivo específico deste trabalho foi determinar a velocidade de chama laminar de misturas com diferentes razões de misturas de etanol anidro–ar na temperatura ambiente e em pressões entre 80 e 20 kPa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O etanol foi escolhido para o estudo deste trabalho por ser facilmente obtido e ser atualmente utilizado comumente como um combustível renovável, misturado a outros ou na sua forma pura. Com isso, o etanol é visto como um forte candidato a uma alternativa limpa aos combustíveis fósseis, como amplamente divulgado. A necessidade de se conhecer a fundo todos os processos existentes na combustão de etanol com ar devem ser, a cada dia, mais estudados e conhecidos para que seu processo de conversão seja plenamente conhecido e cada vez mais melhorado, do ponto de vista de eficiência energética e de emissão de poluentes

Com o aparecimento da necessidade de se substituir os combustíveis fósseis por outros menos poluentes e renováveis, vários autores (entre eles poderíamos citar Eisazadeh-Far, Konnov, Aghsaee, Broustail) começaram a pesquisar novos combustíveis, com alguns sugerindo alternativamente combustíveis baseados em biomassa, gases e até carvão como alternativa aos combustíveis líquidos. Uma troca como alguma das aqui citadas exigiria muitas modificações em motores de combustão interna com ignição por centelhas, por exemplo. Uma resposta rápida para esta questão de combustível alternativo sem alterações muito drásticas nos motores foi dada pelos álcoois, que também fornecem um aumento na potência graças às maiores cadeias carbônicas (octanos) que os combustíveis fósseis utilizados mundialmente. O etanol é facilmente misturado como aditivo em diversos combustíveis atualmente utilizados no mundo todo, como a gasolina e óleo diesel. O etanol pode ainda ser utilizado, no lugar destes combustíveis, com o objetivo de se reduzir a emissão de CO₂. Outros autores realizaram ensaios e estudos interessantes sobre a influência da temperatura na combustão de pré misturas de etanol com ar (EISAZADEH-FAR et al., 2011; KONNOV et al., 2011). Aqui, trataremos apenas da influência da razão de equivalência e da pressão inicial da mistura no processo de combustão.

Etanol é ainda o combustível líquido mais estudado como alternativa aos combustíveis de origem fóssil atualmente utilizados (KONNOV et al., 2011; AGHSAEE et al., 2015). A maior parte dos trabalhos publicados foca em etanol e metanol, com poucos voltados a outros álcoois, como propanol, butanol ou pentanol (BROUSTAIL et al., 2011). A British Petroleum e a Dupont anunciaram o desenvolvimento e início de vendas de um combustível alternativo a partir do butanol, chamado biobutanol. O biobutanol seria um composto desenvolvido para utilização em misturas com gasolina. Foi anunciado como permitindo menores atrasos no tempo de ignição e duração da combustão. Até hoje, poucos autores preocuparam-se em realizar estudos de desempenho de motores de combustão interna com o butanol como combustível, em sua forma pura ou como fazendo parte de misturas, inclusive com gasolina, para tentar aumentar

o potencial do butanol como alternativa aos combustíveis hoje utilizados. Por outro lado, o etanol é, hoje, largamente utilizado como combustível na sua forma pura, ou como aditivo na gasolina

Com o aumento do preço da matéria prima, a escassez de combustíveis fósseis e de seus derivados e o aquecimento global sendo uma questão de preservação de nosso meio ambiente, a utilização otimizada de combustíveis alternativos e limpos é inevitável. O etanol foi identificado como sendo uma fonte de energia limpa, renovável, que melhora a qualidade do ar quando utilizado como substituto aos combustíveis fósseis, graças as menores emissões de CO e hidrocarbonetos não queimados emitidos.(VOURLIOTAKIS et al., 2015; XU et al., 2013; LIAO et al., 2007). Além disso, a demanda por álcool como combustível para automóveis vem crescendo linearmente, também pelo fato de ser produzido a partir de espécies variadas de biomassa. (MITU e GERMANY, S.d.), principalmente cana de açúcar e milho. Na verdade, etanol vem sendo utilizado particularmente no Brasil como combustível de automóveis já há algum tempo, com muito sucesso na fabricação de motores e com uma rede de abastecimento perfeitamente implantada.

O etanol também pode ainda ser considerado um produto estrategicamente importante pela independência energética que oferece e estabilidade no setor de agronegócios atrelado à sua produção, distribuição e comercialização. Na realidade, o etanol é o mais promissor combustível para motores e queimadores, e breve deixará de ser uma alternativa para tornar-se o principal combustível líquido na produção de energia.

Atualmente existe muito interesse em se medir a velocidade de chamas de combustíveis líquidos. Uma enorme porção da energia utilizada no mundo provém de processos de combustão de líquidos, principalmente. Estes combustíveis líquidos provem em grande parte de reservas fósseis que estão se exaurindo e são fontes de poluição e aquecimento global. Há necessidade de conhecer todas as variáveis que fazem parte deste processo de combustão, para que se possa otimizá-lo para se obter o máximo nos processos de combustão que se utilizam deste combustível e para se desenvolver novos combustíveis a partir deste ou de misturas. Já que a combustão é o processo de obtenção de energia atualmente mais utilizado e mais poluente, precisa-se otimizá-lo ao máximo. Processos de combustão otimizados tem como produtos uma quantidade maior de calor fornecido, bem como menores níveis de agente poluidores, como óxidos de nitrogênio e de carbono.

Alguns autores (XIAO e AN et al., 2013) realizaram experimentos com misturas gasosas em dutos com o objetivo principal de observar a variação da velocidade da frente de chama e o aumento da pressão no interior do tubo de experimentos. A dinâmica de chamas pré misturadas

em vasos fechados representa com exatidão o desenvolvimento inicial de uma onda de detonação, como o início da queima em um processo de combustão em um motor de combustão interna. Nestes experimentos, os autores utilizaram-se de misturas de dois gases, hidrogênio e ar, que são facilmente miscíveis. Experimentos realizados com etanol e ar, como os aqui propostos, levam a uma dificuldade a mais, que é a composição da mistura ar-etanol. O etanol é líquido à temperatura ambiente e sua mistura com um gás, ar no caso deste trabalho, exigiu alguns procedimentos particulares. Há necessidade, por exemplo, de vaporizar o etanol antes de se preparar a mistura a ser queimada.

A determinação das velocidades de queima de chamas pré misturadas é interessante como uma das etapas na caracterização das mais importantes misturas de combustíveis com ar, assim como mecanismos da cinética química do combustível e para prever o desempenho e as emissões de processos com combustão interna e externa. Apesar da cinética química de chamas poder ser simulada através de modelos numéricos, e resolvendo-se equações de balanceamento de chamas unidimensionais, os dados de cinética química nestes modelos podem não ser suficientemente bem conhecidos para serem utilizados com confiança. Na verdade, dados de velocidades de queima de chamas laminares obtidos em ensaios são normalmente utilizados para se validar estes mesmos modelos (LIAO et al., 2007).

O trabalho aqui desenvolvido, portanto, é de importância geral em combustão. A maior inovação é a determinação da velocidade de chamas pré-misturadas de etanol anidro com ar, em atmosfera controlada e com pressões menores que a atmosférica e com razões de misturas próximas ao limite de inflamabilidade. É de importância também para futuros estudos de combustão de etanol e para o desenvolvimento de modelos de combustão de etanol mais eficientes e com produtos mais limpos.

A realização de ensaios no interior de tubo de vidro a pressões ambientes menores é necessária para se poder visualizá-los e registrá-los em tempo real. Já pressões menores que a atmosférica são necessárias, além de inéditas, já que o aumento da pressão dos produtos de combustão provocada pelo próprio processo de combustão de combustíveis líquidos pode levar a acidentes se não estiver sob controle absoluto e devem ser evitados.

Os ensaios foram feitos em um tubo de vidro (borossilicato) e filmados com uma câmera de alta velocidade para posterior visualização detalhada do fenômeno. A visualização posterior com detalhes permitiu que se tenha uma boa estimativa preliminar da velocidade de queima nas diversas condições de pressão ambiente e razão de mistura inicialmente utilizadas no início de cada sessão de ensaios. Experimentos realizados com temperaturas mais altas (350 a 650 K) e pressão atmosférica já foram realizados. A relação entre o acoplamento da temperatura e a

velocidade laminar foi determinada através da relação $S_u = S_{u,0} \left(\frac{T_u}{T_{u,0}} \right)^\alpha$ (KATOCH e colab., 2016), realizados com dados de combustão de misturas de metanol com ar. Os resultados obtidos conferem com aqueles existentes na literatura.

2.1 CONCEITUAÇÃO DE CHAMAS

Chama é a região de uma reação de combustão autossustentada, que se move com uma velocidade subsônica, na região entre o combustível e o oxidante dentro de uma mistura. Para que exista chama, é necessário que algumas características e condições sejam observadas, como a presença de uma mistura em proporções adequadas entre um combustível e um oxidante. Primeiramente, devemos ter uma chama em um local definido. Esta chama ocupará uma pequena região situada na periferia da mistura combustível em qualquer instante sempre.

A chama pode ser vista como uma mudança rápida na composição de uma mistura combustível que ocorre em uma fina camada no fluido, envolvendo um gradiente marcante de temperaturas e de concentrações, acompanhado de luminosidade. De um ponto de vista macroscópico, a chama pode ser vista como uma interface na mistura entre os gases queimados e os não queimados. Comparando-se os gases produzidos no processo de combustão com os ainda não reagidos, temos que os gases produzidos têm uma temperatura e um volume muito maiores e, conseqüentemente, uma densidade muito menor (LEFEBVRE e BALLAL, 2010).

Depois, devemos atentar para “velocidade subsônica”. Velocidade de chama laminar, uma característica de misturas combustíveis previamente misturadas, é a velocidade na qual uma chama vai deslocar-se entre os reagentes, isto é, na interface entre a mistura não queimada e os produtos da combustão. De acordo com as teorias de Mallard e Le Chatelier (CARVALHO et al., 2018), a velocidade da chama depende de três propriedades da mistura combustível: (a) a difusividade térmica da mistura, (b) a taxa de reação da mistura e (c) a temperatura na frente de chama.

A difusividade térmica da mistura vai determinar a taxa com a qual a mistura não queimada trocará calor com a frente de chama. Isso é determinante na propagação de frente de chama ou na sua extinção. Quanto maior a capacidade difusiva térmica da mistura, maior também será a velocidade de troca entre as duas frentes de mistura, a não queimada e a queimada e, portanto, a velocidade da frente.

A taxa de reação de combustão da mistura é um parâmetro que indica a velocidade de deslocamento da frente de chama. Quanto mais reativa a mistura, mais rapidamente os seus componentes se combinarão e a frente de chama caminhará mais rapidamente.

A temperatura da frente de chama determinará a velocidade das reações que estão ocorrendo na frente de chama, ou entre a frente de chama e a mistura não queimada.

A velocidade de propagação, influenciada pelas três propriedades anteriormente listadas, determinará outra característica da frente de chama. Um processo de combustão em que se tenha uma chama se movendo em uma mistura combustível com velocidade subsônica é chamada de deflagração. Deflagração é um processo reativo em que em menos de 1 ms, 80% da mistura combustível envolvida é consumida. É caracterizada pela presença de uma chama que se propaga através da mistura ainda não queimada.

É possível ter-se um outro processo em que se tenha uma onda de combustão, ou chama, movendo-se com velocidade supersônica, que seria então chamada de detonação. Na detonação, há a formação de ondas de choque que se propagam com velocidades entre 1 e 4 km/s.

Portanto, deflagração é uma onda que se move com velocidade subsônica que é mantida por uma reação química na interface entre os gases produzidos e os ainda não participantes da reação de combustão, enquanto a detonação é uma onda supersônica, também mantida por reações químicas. É prática comum chamar-se esta onda de combustão, quando não há detonação, simplesmente como “chama”. Assim, no caso aqui tratado, combustão, chama e deflagração serão utilizados indistintamente (GLASSMAN e YETTER, 2008) e referem-se a ondas de combustão subsônicas.

A compreensão do fenômeno de propagação é essencial para se observar o desenvolvimento de uma onda de chama em um duto fechado. A dinâmica de uma chama pré-misturada no interior de um tubo de paredes lisas é de fundamental importância para se entender o processo de combustão no interior de um motor de combustão interna, e para explicar os mecanismos por trás da aceleração de uma chama que podem levá-la da deflagração à detonação (XIAO et al., 2012). Na detonação, haverá um rápido aumento na temperatura e na pressão.

Dependendo de algumas condições ambientes e físicas, uma mistura combustível pode resultar, quando ignitada, em uma onda de deflagração ou detonação. Estas condições podem ser, por exemplo, confinamento, razão de mistura e fonte de ignição. (XIAO e colab., 2014), em estudos recentes, mostram que a fonte, ou o modo de ignição, são responsáveis em grande parte por esta origem da onda de detonação ligeiramente à frente da chama. Em fenômenos de detonação pode-se considerar que existem dois modos de iniciação, um mais lento e outro mais rápido. O mais lento caracteriza-se por uma iniciação térmica que produz uma onda de

deflagração com transição para a detonação a partir da deflagração inicial; o mais rápido caracteriza-se por iniciação em uma explosão, quer dizer, o processo, em virtude de uma iniciação com velocidade alta, já se inicia em detonação, não havendo, portanto, a transição de detonação para explosão (GLASSMAN e YETTER, 2008).

É um erro comum confundir-se explosão com detonação. Uma explosão não requer necessariamente uma passagem de uma onda de combustão através de um meio explosivo, onde exista necessariamente uma mistura gasosa que permita a ocorrência de combustão ou deflagração. Isto quer dizer que para que se tenha deflagração ou detonação, apesar de os dois processos necessitarem de uma quantidade de energia para acontecerem, no caso de explosão não há necessidade de se ter uma onda de chama. A Tabela 1 mostra qualitativamente a diferença entre detonação e deflagração.

Pode-se dizer que uma iniciação térmica normal produz uma onda de chama que se propaga com uma velocidade subsônica. Em escoamentos confinados quando surgem ou são provocadas condições que causam uma compressão adiabática da mistura ainda não consumida que está à frente da chama, a velocidade da chama aumenta. Observações mostraram que a velocidade da chama aumenta até igualar-se a uma onda de detonação. Neste caso, observa-se uma descontinuidade na velocidade medida da chama.

Tabela 1 – Proporção entre grandezas para detonação e deflagração.

Grandeza	Detonação	Deflagração
U_u/V_u	5-10	0,0001-0,03
U_b/U_u	0,4-0,7	4-16
P_b/P_u	13-55	0,98-0,976
T_b/T_u	8-21	4-16
ρ_b/ρ_u	1,4-2,6	0,06-0,25

V_u é a velocidade do som nos gases não queimados; U_u/V_u é o número de Mach da onda de chama; índice subscrito u refere-se a porções não queimadas; b refere-se a produtos.

Fonte: Glassman e Yetter (2008).

A maior parte dos estudos de processos de combustão envolvendo chamas é feita com combustíveis gasosos ou previamente evaporados, como os aqui pretendidos. Porém, apesar de uma chama se propagar naturalmente em uma mistura gasosa estática, usualmente procura-se estabilizar a chama em um ponto fixo, e alimentá-la com um fluxo contínuo de mistura combustível. Chamas assim dividem-se em dois tipos, dependendo do modo como a mistura

combustível é conseguida: chamas pré misturadas, se o ar é misturado ao combustível previamente, ou chamas difusivas, de difusão ou por difusão, se o ar é adicionado na própria região da chama com o combustível vaporizado. Um bom exemplo de uma chama de difusão pode ser observado em chamas de velas: o calor da chama aquece e vaporiza o combustível ao seu redor, que é submetido ao processo de combustão quando mistura-se ao ar atmosférico ao seu redor. Neste caso, a taxa de combustão do combustível, que é fornecido pela vela, é limitada pela capacidade do combustível de se vaporizar e combinar-se ao ar nas vizinhanças da chama.

2.2 CHAMAS LAMINARES

As chamas podem também ser classificadas com base na sua velocidade de propagação em turbulentas ou laminares. Podem ainda ser consideradas homogêneas, quando os dois reagentes estão no mesmo estado físico antes da frente de chama, ou heterogêneas, em processos envolvendo dois reagentes líquidos vaporizados antes de se combinarem, por exemplo.

Em chamas laminares, como no caso que será aqui apresentado, o processo de combustão é influenciado em grande parte pelos processos químicos inerentes à chama (método de mistura do combustível com o ar, no nosso caso), transferências de calor e massa nas vizinhanças próximas e parâmetros que podem ser controlados externamente, como pressão e temperaturas ambientes e razão ar combustível (LEFEBVRE e BALLAL, 2010) (BRADLEY e colab., 2009).

Quando se fala em chamas pré-misturadas surgem questões significativas, tais como (McALLISTER et al., 2011): Qual a velocidade com que a frente de chama consumirá a mistura não queimada ainda existente? Como as condições de temperatura, de pressão e a razão de equivalência afetarão a propagação da frente de chama? Outra pergunta importante está relacionada à segurança: como poderíamos extinguir uma frente de chama? Além disso, chamas pré-misturadas têm muitas aplicações na indústria. Quando se deseja uma combustão rápida que permita grande capacidade térmica com um pequeno comprimento da chama, deve-se usar um queimador de chama pré-misturada (BAUKAL, 2003).

A velocidade das chamas pré-misturadas laminares é importante para poder-se estabilizar a chama e para se conhecer as taxas de calor liberadas. Pode-se, e é desejável, saber a eficiência de combustão em turbinas a gás, por exemplo, relacionando-se a velocidade laminar com a turbulenta (LEFEBVRE e BALLAL, 2010). As turbinas a gás têm um fluxo contínuo de combustível misturando-se com ar, que determina a sua capacidade, empuxo e eficiência na geração de energia. Esta vazão da mistura ar-combustível é determinada pela velocidade com

que a frente de chama, turbulenta neste caso, desloca-se na mistura. Frequentemente, a velocidade de chamas turbulentas é apresentada em função da velocidade laminar para a mesma mistura (EL-MAHALLAWY e colab., 2002).

2.3 PROPAGAÇÃO DE CHAMAS

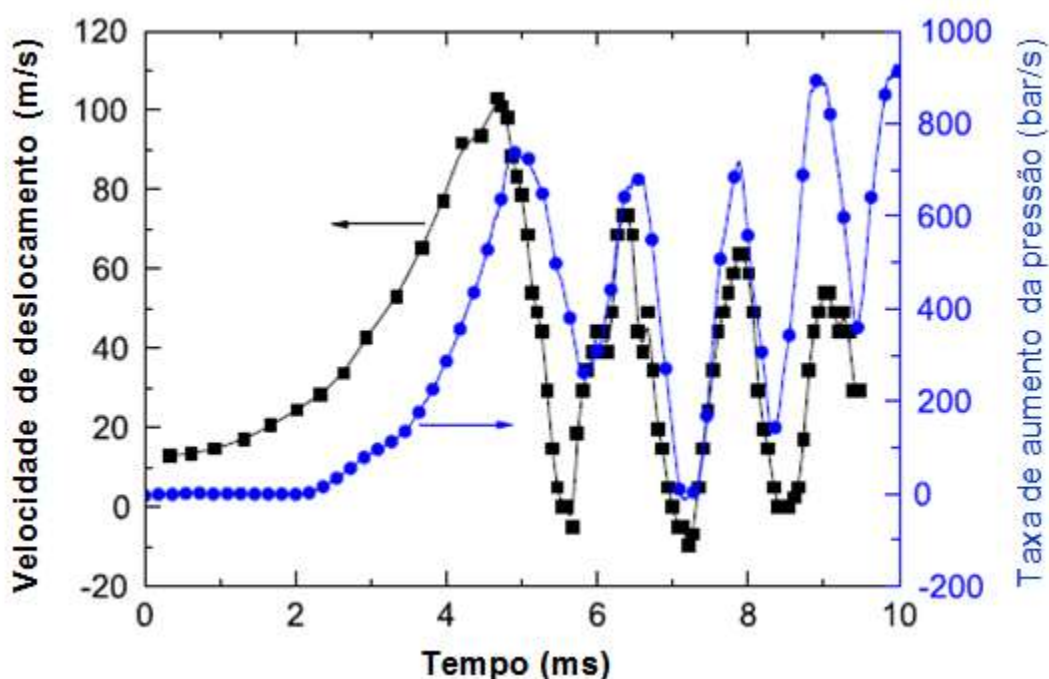
Em uma mistura combustível-oxidante em uma proporção com uma razão de equivalência dentro dos limites de inflamabilidade, podemos iniciar, por meio de uma fonte de ignição apropriada, um processo que nos forneça uma chama. Uma chama depende, entre outras coisas, das condições iniciais da pressão e da temperatura a que os reagentes (combustível e oxidante) estão expostos. Em condições ambientes, ou CNTP, esta mistura poderá até ser reativa, mas só acontecerá um processo de combustão, e uma frente de chama se formará, se houver uma fonte de ignição aplicada localmente, que aumente a temperatura local até um certo nível ou que permita a formação de certos radicais.

A frente de chama formada aquece os produtos, e faz com que a densidade dos produtos seja menor que a dos reagentes. Isto significa que a pressão na região onde estão os produtos é maior que na região dos reagentes. Esta diferença de pressões faz com que a onda de chama se encaminhe na direção dos reagentes. (TURNS, 2000). Processos de deflagração em hidrocarbonetos tem velocidade de propagação menor que 1m/s (LEFEBVRE e BALLAL, 2010). O princípio da continuidade requer então que a velocidade do gás queimado seja maior que a velocidade do gás não queimado, isto é: $\rho_u S_L A \equiv \rho_u v_u A = \rho_b v_b A$, onde u e b referem-se aos gases não queimados e queimados respectivamente. Para uma chama típica de um hidrocarboneto queimando com ar à pressão atmosférica, a razão entre as densidades é de aproximadamente sete. Pode-se, então, perceber que há uma grande aceleração do gás através da chama (TURNS, 2000).

Se uma mistura combustível-oxidante com uma razão de mistura dentro dos limites de inflamabilidade, é encerrada em um tubo e uma fonte de ignição é aplicada em uma das suas extremidades, uma frente de chama irá se propagar ao longo do tubo a partir do ponto de aplicação da fonte de ignição. Para um tubo com as duas extremidades livres, a velocidade da onda de chama ficará entre 20 e 200 m/s. Como exemplo, a onda de chama para misturas de hidrocarbonetos com ar terá uma velocidade de 40 m/s (GLASSMAN e YETTER, 2008). Quando aqui dizemos onda de chama, estamos nos referindo a propagação da frente de chama, ou da chama, ou da propagação da frente de reação, etc. Lembramos que estas expressões, dependendo do contexto, são sinônimas.

Em estudos realizados em dutos (XIAO et al., 2013) observaram, como objetivo principal de seus experimentos, a variação da velocidade da frente de chama e o aumento da pressão no interior do tubo de experimentos. Alguns resultados estão na Figura 1. Esse aumento da velocidade acoplado ao aumento da pressão observado conduz a outras características, que serão aqui objeto de comentários quando se falar sobre a formação de chamas tulipa.

Figura 1 – Resultados observados por Xiao et al. (2013) para velocidade de uma onda de chama e a variação da pressão no interior do tubo de escoamento.



Fonte: Xiao et al. (2013).

Na Figura 1 a velocidade está mostrada em preto e a pressão em azul. As velocidades destas aqui chamadas ondas são controladas por fenômenos de transporte, principalmente condução de calor e difusão de radicais. Por isso, as velocidades observadas são muito menores que a velocidades do som na mistura ainda não queimada. Neste processo de combustão em andamento, as reações que acontecem, depois de que a fonte de ignição foi removida, são impelidas para a camada de gás a ser queimada à frente da onda de chama através de mecanismos térmicos e difusivos. Como dito anteriormente, daqui para a frente chamaremos esta onda de chama como chama, simplesmente.

Consideremos agora um tubo com comprimento adequado e liso no seu interior, que encerra uma mistura inflamável e está fechado em uma extremidade. Quando esta mistura inflamável é ignitada a partir deste ponto onde o tubo está fechado, a frente de chama irá

acelerar-se até passar da velocidade subsônica para supersônica devido ao aumento da pressão no interior do tubo atrás da onda de chama. Os fenômenos físicos responsáveis por esta aceleração são os efeitos da expansão dos gases e o confinamento lateral (KURDYUMOV e MATALON, 2015). Após a ignição, o calor liberado pelas reações químicas envolvidas na queima da mistura produzirá um escoamento contínuo de gás queimado de encontro ao ponto onde foi iniciada a ignição, seguindo-se o aparecimento de um gradiente de pressão na direção do deslocamento da chama.

Esta onda com velocidade supersônica é chamada de detonação, como anteriormente dito. Em uma detonação, a transmissão de calor e a difusão de radicais não controlam a velocidade. Ao invés disso, a onda de choque formada pela onda supersônica desenvolvida no interior do tubo aumenta substancialmente a temperatura e a pressão e causa reações fortes e liberação de energia que mantém a propagação da chama.

(FAIRWEATHER, 1999) realizou experimentos em tubos cilíndricos transparentes para permitir visualização e registro das imagens da propagação de chamas pré misturadas em explosões. Os estudos forneceram a compreensão da propagação das chamas e do aumento da pressão em explosões. Destes experimentos, também, pode-se, baseado na análise dos dados experimentais, obter um modelo matemático, que se mostrou bem eficiente.

(GRUNE e colab., 2013) demonstraram, em experimentos e teoricamente, a transição da deflagração para detonação em misturas muito reativas de hidrogênio com oxigênio. Eles registraram as imagens da transição e do desenvolvimento da transição. Utilizando-se de equações bidimensionais de Navier-Stokes, incluindo os efeitos da viscosidade, condução térmica, difusão molecular e detalhando as reações químicas, chegaram a formulações numéricas. Observou-se a grande influência da aderência da chama com as paredes do tubo no desenvolvimento da chama e da transição de deflagração para detonação (chamado DDT).

Os mecanismos fundamentais de propagação dos dois fenômenos são diferentes. Aqui, trataremos apenas de deflagrações (TURNS, 2000).

Vamos considerar que uma onda se propaga em um tubo com um sentido de deslocamento oposto ao do deslocamento dos gases ainda não queimados. As duas frentes de gases se encontram no ponto onde está a frente de chama. Isto está esquematizado na Figura 2. Podemos considerar que a razão com que a mistura combustível é fornecida é numericamente igual à razão com que a frente de chama a consome.

Nessas condições, a chama está imóvel em relação ao tubo que a contém. Esta hipótese pode ser representada pelo seguinte sistema de equações de conservação; o subscrito 1 refere-se aos gases não queimados e o subscrito 2 aos gases produzidos.

$$\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2 \quad \text{Equação da continuidade} \quad (1)$$

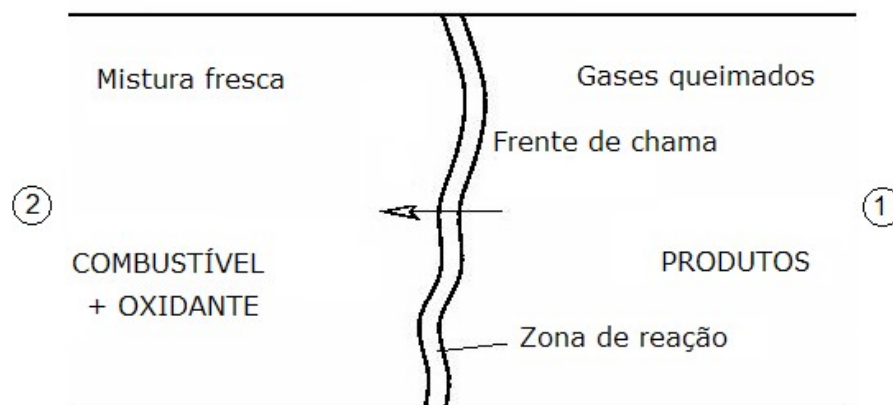
$$P_1 + \rho_1 u_1^2 = P_2 + \rho_1 u_2^2 \quad \text{Equação da quantidade de movimento} \quad (2)$$

$$c_p T_1 + \frac{1}{2} u_1^2 + q = c_p T_2 + \frac{1}{2} u_2^2 \quad \text{Equação da energia} \quad (3)$$

$$P_1 = \rho_1 R T_1 \quad \text{Equação de estado} \quad (4)$$

$$P_2 = \rho_2 R T_2 \quad \text{Equação de estado} \quad (5)$$

Figura 2 – Posição da frente de chama entre os gases não queimados e os gases queimados (produtos) em um processo de combustão propagando-se em um tubo.



Fonte: Autoria própria.

As equações (4) e (5) fazem a ligação entre as variáveis conhecidas: pressão, temperatura e densidade dos reagentes. Para o estudo aqui representado, u_1 é a velocidade com que os reagentes alcançam a onda de chama e u_2 é a velocidade de saída dos produtos da onda de chama. Para o sistema de coordenadas do experimento, a velocidade à frente da onda é zero, a velocidades da onda é u_1 , e $(u_1 - u_2)$ é a velocidade dos gases produzidos em relação ao tubo. As incógnitas no sistema são u_1, u_2, P_2, T_2 e ρ_2 . A energia liberada é q e a temperatura adiabática de chama é T_2 para $u_2 = 0$. A simbologia aqui utilizada é a usada internacionalmente (GLASSMAN e YETTER, 2008). Depois de alguma manipulação algébrica, teremos duas novas equações:

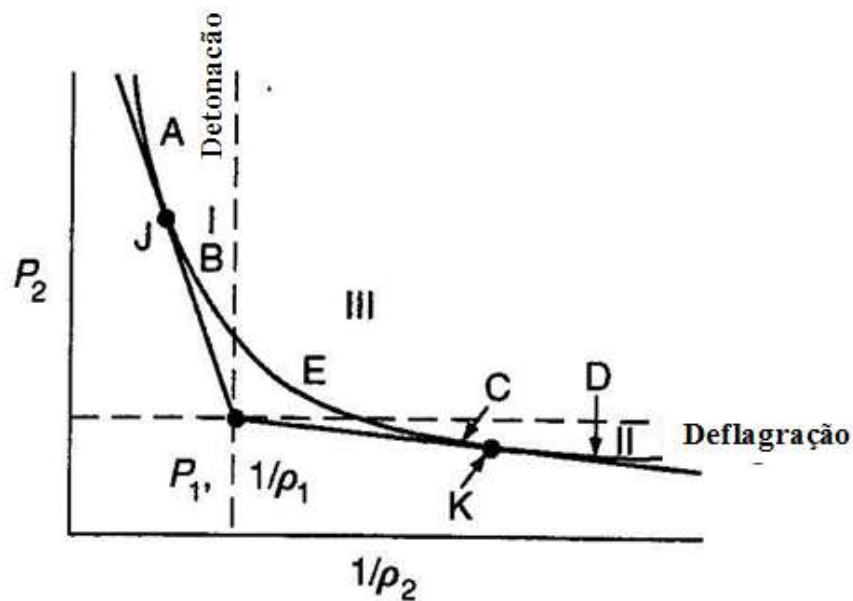
$$\frac{\gamma}{\gamma - 1} \left(\frac{P_2}{\rho_2} - \frac{P_1}{\rho_1} \right) - \frac{1}{2} (P_2 - P_1) \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) = q \quad (6)$$

$$\gamma M_1^2 = \frac{\left(\frac{P_2-1}{P_1}\right)^{\frac{1}{\gamma}}}{1 - \frac{P_2}{P_1}} \quad (7)$$

onde γ é o quociente entre os calores específicos e M é a velocidade da frente da chama dividido por $(\gamma RT_1)^{1/2}$, o número de Mach da frente de chama. Como simplificação, assumimos que os calores específicos são constantes; assim, γ é pouco dependente da composição e da temperatura dos reagentes e a consideração de que γ não se altera entre os gases queimados e os reagentes é uma consideração válida.

A equação (6) é chamada de relação de Hugoniot. Esta relação estabelece que para certas condições iniciais $\left(P_1, \frac{1}{\rho_1}, q\right)$ é possível ter-se várias soluções $\left(P_2, \frac{1}{\rho_2}\right)$. As soluções podem ser plotadas em um gráfico com a pressão (P) em relação ao inverso da massa específica dos produtos ($1/\rho_n$), como apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Sistema reativo, com $q > 0$, com os cinco regimes, conforme Hugoniot.



Fonte: Glassman e Yetter (2008).

Para cada q , teremos diferentes curvas, inclusive para $q=0$, isto é, não há liberação de energia. Esta curva cruza o ponto com as condições iniciais e, como representa a solução para ondas com um único choque, é chamada de choque Hugoniot.

Se traçarmos duas linhas, uma vertical e outra horizontal, passando pelo ponto com as condições iniciais, dividiremos a curva em três segmentos. Os segmentos I e II são então divididos pelos pontos J e K das duas linhas tangentes.

Da equação (7), podemos verificar o comportamento de M_1 nas regiões I e II. Na região I, P_2 é muito maior que P_1 . A diferença, então, é maior que 1. Verificamos, também, que $(1/\rho_2)$ é menor que $(1/\rho_1)$, então a razão entre os dois é menor que 1. Consequentemente, o denominador é bem pequeno, bem menor que 1. Daí, temos que o lado direito da equação (7) é positivo e bem maior que 1, com certeza maior que 1,4. Se assumirmos conservativamente que $\gamma = 1,4$, M_1^2 e M_1 são, ambos, maiores que 1. Consequentemente, a detonação pode ser definida como uma onda supersônica em decorrência da liberação de energia (combustão).

Podemos aplicar o mesmo método acima na região II da Figura 3. Como P_2 é um pouco menor que P_1 , o numerador da fração na equação (7) é negativo, $(1/\rho_2)$ é bem maior que $(1/\rho_1)$, e o denominador é negativo, com valor absoluto maior que 1. Nestas condições, o lado direito da equação (7) é menor que 1, e M_1 é menor que 1. Para estas condições, a região II compreende as ondas subsônicas e é chamada de região de deflagração. Aqui, ondas de deflagração são definidas como ondas subsônicas em decorrência de processos de combustão.

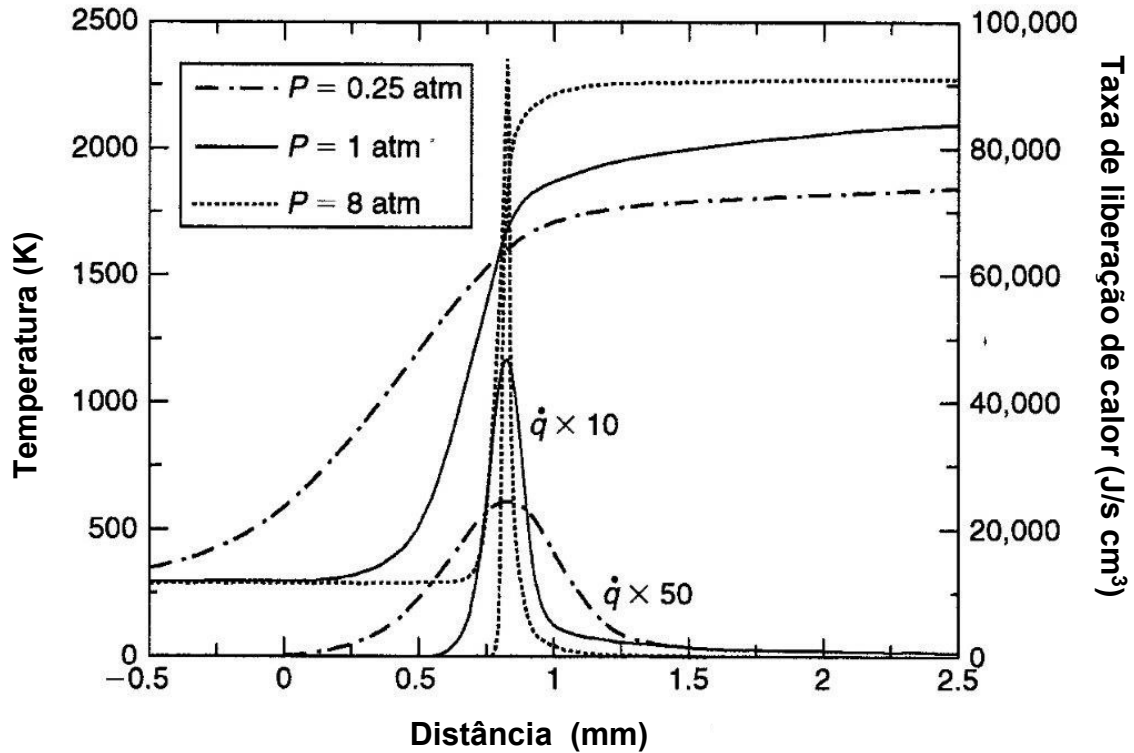
Na região III, $P_2 > P_1$ e $1/\rho_2 > 1/\rho_1$, então o numerador é positivo e o denominador é negativo. Neste caso, M_1 é imaginário na região III e, portanto, não representa um processo físico real, com uma solução real para a equação.

A definição de deflagração como uma onda subsônica decorrente de um processo de combustão em decurso é a única definição precisa. Alguns autores descrevem chama, ou onda de chama, como sendo uma reação química rápida, auto-sustentada, que ocorre em uma região discreta. Os reagentes podem ser introduzidos nesta zona de reação, ou a zona de reação pode se mover até os reagentes. Dependendo de qual situação, a zona de reação ou os reagentes tem a velocidade relativa maior.

2.4 TEORIA DE CHAMAS SE PROPAGANDO LIVREMENTE

A Figura 4 mostra o resultado da variação da pressão na estrutura de chammas estequiométricas de metano-ar. Na Tabela 2 estão as correspondentes velocidades de chama e taxas de consumo dos reagentes.

Figura 4 - Taxa de liberação de calor e perfis de temperatura para uma chama laminar estequiométrica de metano com ar a diferentes pressões.



Fonte: Glassman e Yetter (2008).

Tabela 2 - Propriedades de uma chama estequiométrica de metano-ar (velocidade de chama e taxa de consumo dos reagentes).

P (atm)	S_L (cm/s)	$\dot{m}_0 = \rho S_L$ (g/cm ² s)	δ_L (cm est.)	$\dot{m}_0 \delta_L$ (g/cm s)	$(\dot{m}_0 \delta_L) / (\lambda / c_p)_0$
0,25	54,51	0,015	0,250	0,0038	1,73
1,00	36,21	0,041	0,085	0,0035	1,59
8,00	18,15	0,163	0,022	0,0036	1,64

Fonte: Glassman e Yetter (2008).

Nota-se a partir da Tabela 2, que, com o aumento da pressão, a velocidade da chama diminui e taxa de consumo dos reagentes aumenta. O fato de os perfis de temperatura caírem rapidamente com o aumento da pressão, e a velocidade da chama diminuir parecem não intuitivos se olharmos as teorias térmicas simplesmente. Entretanto, a difusão térmica é dependente e inversamente proporcional à pressão. Isso faz com que os efeitos da difusão

térmica superem os efeitos da pressão na taxa de reação e de liberação de energia, que vão afetar a distribuição da temperatura. A taxa de consumo mássico aumenta com a pressão, apesar de em alguns poucos sistemas reativos nem a velocidade da chama ou a taxa de consumo dos reagentes segue o que foi aqui apresentado. Contudo, para os sistemas hidrocarbonetos com ar, vale o que foi aqui descrito.

2.5 MÉTODOS EXPERIMENTAIS PARA DETERMINAR A VELOCIDADE DE CHAMA

Velocidade de queima é definida como a velocidade na qual os gases não queimados movem-se contra a onda de combustão em uma direção normal à superfície da onda (Figura 2).

Vamos considerar uma frente de chama plana e infinita nas duas direções. Esta frente é considerada estacionária, quer dizer, o material em combustão vai em direção a ela, e dela saem os produtos da combustão. Considera-se agora um escoamento de gás combustível fluindo na direção da chama. A área de chama encampado pelo tubo não depende de como a superfície de chama ou onda de chama foi escolhida. As áreas de todas as superfícies paralelas a superfície em consideração são as mesmas, não importando qual propriedade foi escolhida para definir a superfície. Todas as áreas das superfícies paralelas são iguais a esta e aquela que está na camada mais interior da zona luminosa da chama. O experimento está sendo conduzido em um volume infinito com pressão constante.

Se a velocidade de queima é definida como sendo o volume de gás consumido por segundo dividido pela área superficial da frente de chama, o resultado dependerá da superfície selecionada. A única grandeza que se mantém constante no sistema é o produto $ur \cdot \rho r \cdot A_r$, onde ur é a velocidade do escoamento de raio r , a área da superfície é A_r e a densidade do gás é ρr . Este produto é igual à $\dot{m}r$, o fluxo mássico por unidade de tempo através da camada r , e deve ser constante para todos os valores de r .

Para se medir a velocidade da frente de chama, devemos fazê-lo no lado do gás não queimado, e \dot{m}/ρ será muito próximo da taxa de fornecimento deste gás.

A velocidade da chama é o final de um processo de queima, que passou por escolha do combustível, escolha do tipo de queimador, vaporização ou pulverização do combustível, iniciação, análise de produtos, entre outras etapas.

Nunca houve tanto interesse em se medir a velocidade de chama, pois este parâmetro influencia diretamente a vazão de combustível para determinado motor. Em motores com fluxo de combustível constante (turbinas e motores foguete, por exemplo), e em queimadores de fornos e caldeiras, isso é facilmente observável. Cada vez mais necessita-se de mais dados

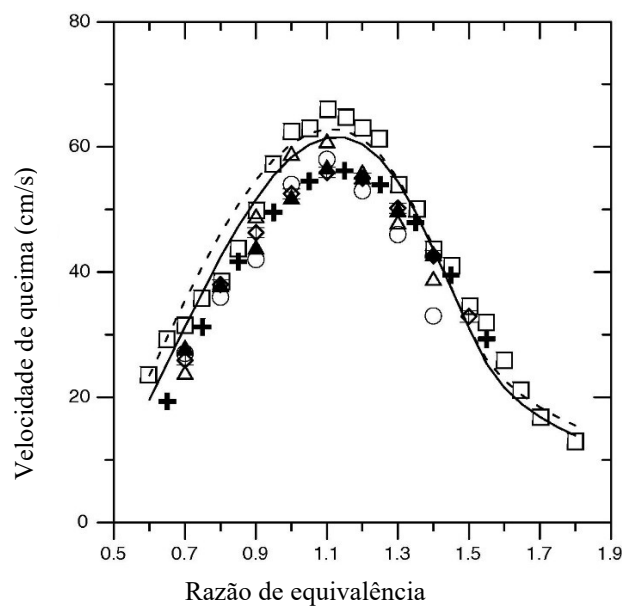
experimentais e teóricos para se caracterizar e otimizar processos de queima. Isso deve passar obrigatoriamente pela determinação da velocidade de queima dos combustíveis.

2.6 VELOCIDADE DE CHAMA LAMINAR DO ETANOL

A medição da velocidade de chama laminar de pré misturas já foi apresentada em diversos trabalhos.

(KONNOV e colab., 2011) utilizaram-se de um método com base em fluxo de calor em combustíveis líquidos para determinar a velocidade de combustão em situações em que a perda de calor da chama era nula. A pressão ambiente durante os ensaios era de 100 kPa. Os resultados obtidos por Konnov para etanol estão transcritos na figura 5.

Figura 5 – Resultados plotados por Konnov e colaboradores para velocidades medidas de chamas de etanol.



Fonte: Konnov et al., (2011).

A incerteza geral para as medidas foi estimada em valores menores do que ± 1 cm/s, com uma excelente reprodutibilidade comprovada experimentalmente. As medidas foram tomadas em experimentos feitos em temperaturas entre 298 e 358 K.

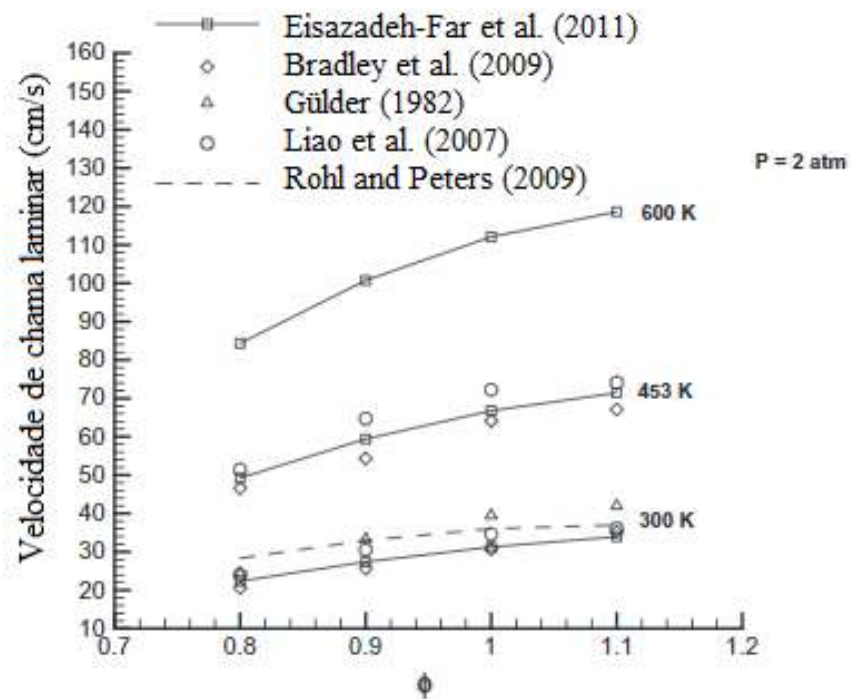
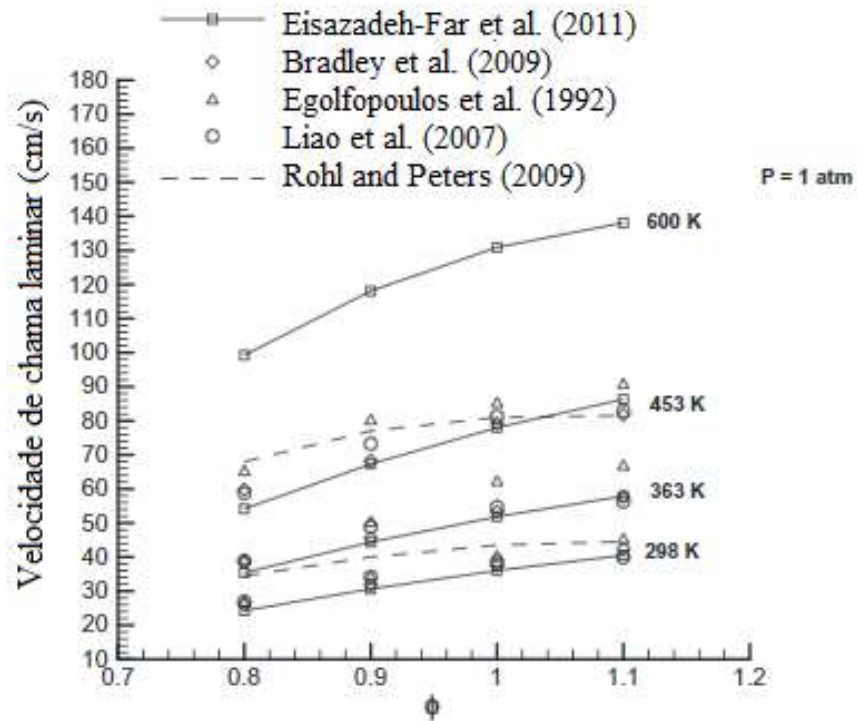
A determinação experimental da velocidade de queima de chamas pré-misturadas de etanol com ar foi realizada por (LIAO e colab., 2007) em uma câmara esférica com volume constante. A medição da velocidade de queima das misturas foi feita através de técnicas de

imageamento Schlieren aplicadas a experimentos com diversas razões de equivalência e temperaturas iniciais. Para uma chama laminar de etanol com ar, a velocidade foi determinada baseada na velocidade e na deformação circular da chama. Chegou-se a uma relação entre a velocidade laminar da chama não deformada como função da temperatura e da razão de equivalência, com resultados semelhantes aos encontrados na literatura.

(EISAZADEH-FAR e colab., 2011) realizaram a medição de velocidades de queima em misturas de etanol com ar em altas temperaturas e diferentes pressões iniciais, em diferentes razões de equivalência (ϕ) e com misturas gasosas adicionadas à mistura combustível para representar a capacidade térmica dos gases residuais em motores de funcionamento contínuo. A adição de gases inertes à mistura diminuiu significativamente a velocidade de queima laminar devido à redução da sua temperatura. As temperaturas iniciais das misturas variaram entre 300 e 650 K e as pressões ficaram entre 1 e 5 atm. O seu trabalho demonstrou que misturas ricas estão sujeitas a instabilidade quando submetidas a temperaturas e pressões iniciais mais baixas. A Figura 6 compara os experimentos realizados por Eisazadeh-Far (2011) com experimentos realizados por outros autores, para pressões de 1 e 2 atm.

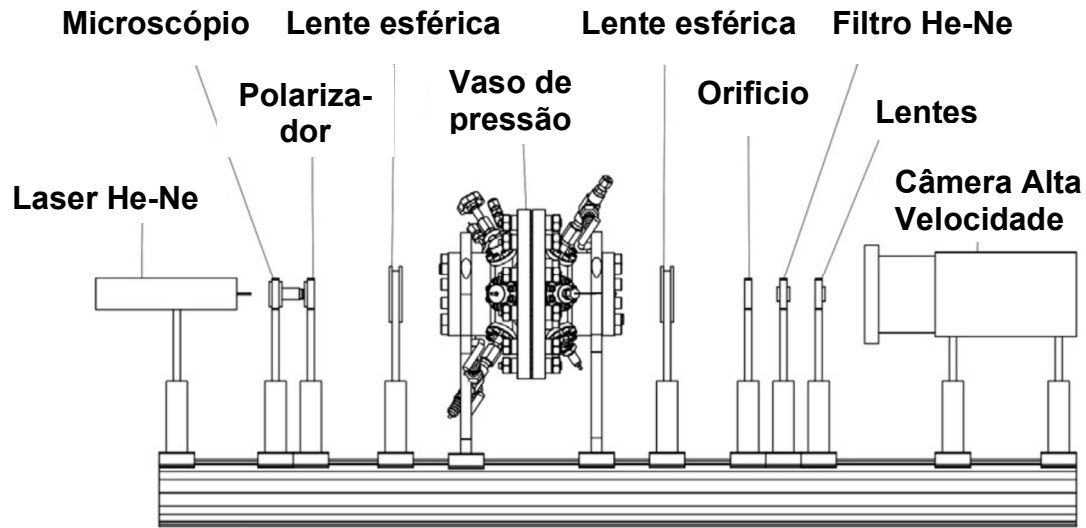
(BEECKMANN e colab., 2014) realizaram experimentos com queima de combustíveis alternativos, bioderivados e mais limpos. A velocidade de queima destes combustíveis foi determinada em um vaso esférico, com uma temperatura inicial de 373K e uma pressão de 10 bar. Para misturas de etanol com ar os resultados mostram que a velocidade aumenta com a razão de equivalência da mistura, até atingir seu máximo com uma razão de equivalência (ϕ) de 1,1. O equipamento utilizado por Beeckmann et al. (2014) é mostrado na Figura 7 e seus resultados são apresentados na Figura 8.

Figura 6 - Velocidades de chama laminar para misturas etanol-ar.



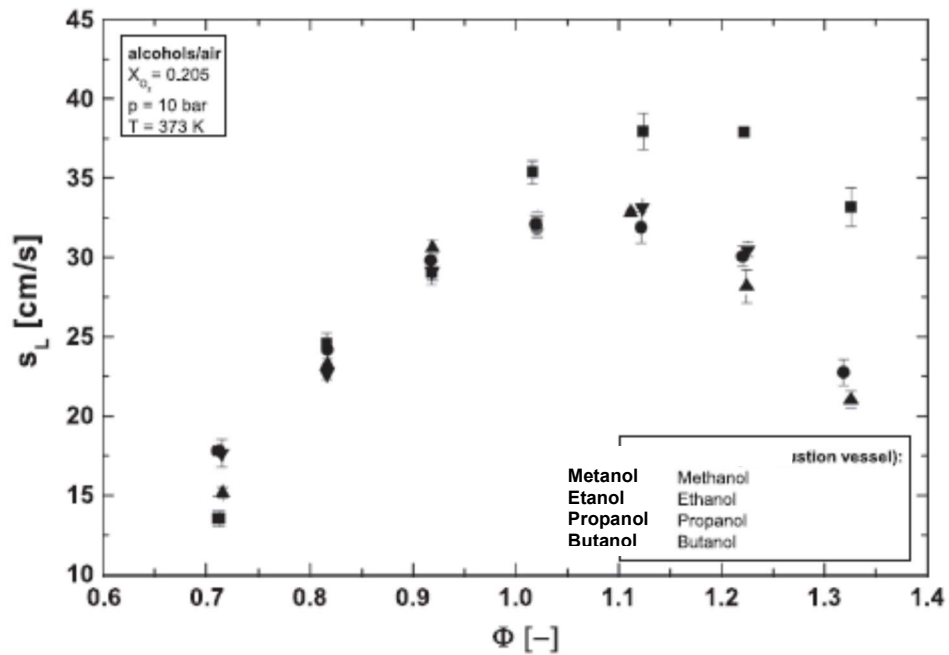
Fonte: Eisazadeh-Far (2011).

Figura 7 - Esquema da bancada utilizada por Beckmann et al. (2014).



Fonte: Beckmann et al. (2014).

Figura 8 - Velocidades laminares medidas para chamas de álcool com ar como função da razão de equivalência; pressão inicial de 10 bar, temperatura inicial de 373 K.



Fonte: Beckmann et al. (2014).

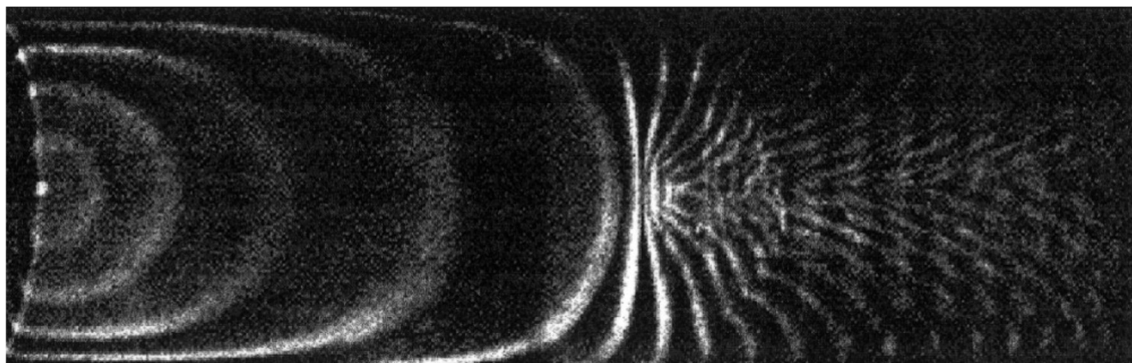
2.7 O FENÔMENO DAS CHAMAS TULIPA

É costumeiro considerar-se que fenômenos de combustão ocorrem de duas maneiras, de acordo com o método de iniciação: combustão homogênea, quando a iniciação se dá ao longo de todo o comprimento do vaso que contém a mistura combustível; ignição pontual, quando a ignição se dá em um ponto específico, seguida pela propagação da chama através do tubo. Esta diferenciação não é muito significativa em termos de velocidade de propagação, só modificará a direção da velocidade. Quando a iniciação se dá em uma extremidade do vaso, é possível observar-se o desenvolvimento da velocidade de escoamento da frente de chama, bem como as modificações em sua forma, se porventura ocorrerem. A influência de radicais formados durante o processo de combustão no seu desenvolvimento poderá ser melhor observada em percursos mais longos.

Para o trabalho aqui realizado foi utilizado um tubo de borossilicato com 1,5 m de comprimento e com a ignição inicial se dando em uma extremidade. Este equipamento será descrito com mais detalhes no Capítulo 3 desta tese. O caminhamento da chama no interior do tubo e as alterações na forma da frente de chama puderam ser bem observados e registrados com uma câmera de alta velocidade neste tubo de 1,5 m durante os ensaios aqui realizados. Durante a realização dos ensaios neste trabalho pôde-se observar, claramente, a alteração da forma durante o seu percurso pelo interior do tubo, até que mudasse de “*finger shape*” para formato de tulipa.

Esta deformação na forma da chama foi registrada pela primeira vez em 1925 por Ellis (1928) (DUNN-RANKIN e SAWYER, 1998). Ele conseguiu capturar imagens estroboscópicas de chamas desenvolvendo-se em recipientes fechados com uma câmera com obturador rotativo por ele desenvolvida. Com esta câmera, ele registrou chamas de CO-O₂ em vários tipos de vasos, inclusive esferas, cubos, cilindros com formas variadas e cilindros fechados. Estes registros históricos de imagens produziram resultados visuais que se tornaram conhecidos como chamas tulipa. Um exemplo histórico deste tipo de formação pode ser visto na Figura 9, adaptado de trabalhos de Ellis (1928).

Figura 9 - Primeiras imagens estroboscópicas de chamas tulipa, capturadas em 1925.



Fonte: Dunn-Rankin e Sawyer (1998).

A formação e o desenvolvimento, dentro de escoamentos reativos de chamas tulipa, foram simulados através de um modelo numérico baseado nas equações de Navier-Stokes e um modelo de um passo de Arrhenius (XIAO et al., 2015). Para a simulação, os autores enfatizaram a necessidade de se preocupar com o acoplamento entre a pressão gerada pela frente de chama, gradientes de pressão em sentido oposto, camadas limite e a propagação da frente de chama.

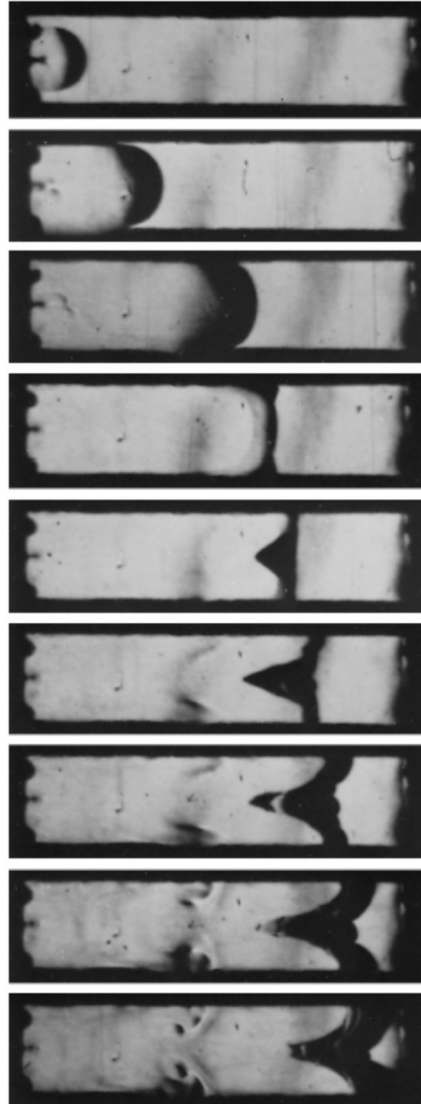
Resultados experimentais, obtidos através de imagens Schlieren feitas em câmaras com pressão variável, ajudaram a demonstrar os efeitos do comprimento da câmara, razão de equivalência e a geometria do ignitor utilizados na formação da chama tulipa (DUNN-RANKIN e SAWYER, 1998). As medições realizadas mostraram que a formação de chamas tulipa pode ser um fenômeno frequente que depende da geometria do vaso onde a chama está encerrada.

Imagens Schlieren obtidas por Dunn-Rankin e Sawyer (1998), que ilustram a formação da chama tulipa, são mostradas na Figura 10. As imagens são referentes a ensaios realizados com misturas estequiométricas de metano com ar, e foram tiradas com intervalo de 5 ms. A Figura 11 apresenta uma comparação entre os dados experimentais de Dunn-Rankin e Sawyer (1998) e os dados obtidos de um modelo numérico desenvolvido por (BARR e SAWYER, 1986).

Outro trabalho partindo das equações de Navier-Stokes, bidimensional, que incluiu efeitos da viscosidade, condutividade térmica, difusão molecular e mecanismos de reação química resolvidas numericamente, mostrou a transição de deflagração para detonação em sistemas com pré-misturas muito reativas (LIBERMAN et al., 2010). O mecanismo de aceleração da frente de chama até a velocidade de detonação ocorre em três passos: a produção de uma onda de choque; a redução da aceleração e a formação de choques à frente da onda de chama; e a transição para a detonação. Essas mudanças na pressão e velocidade durante o deslocamento da onda de choque produziram outras alterações na forma da onda, como pode

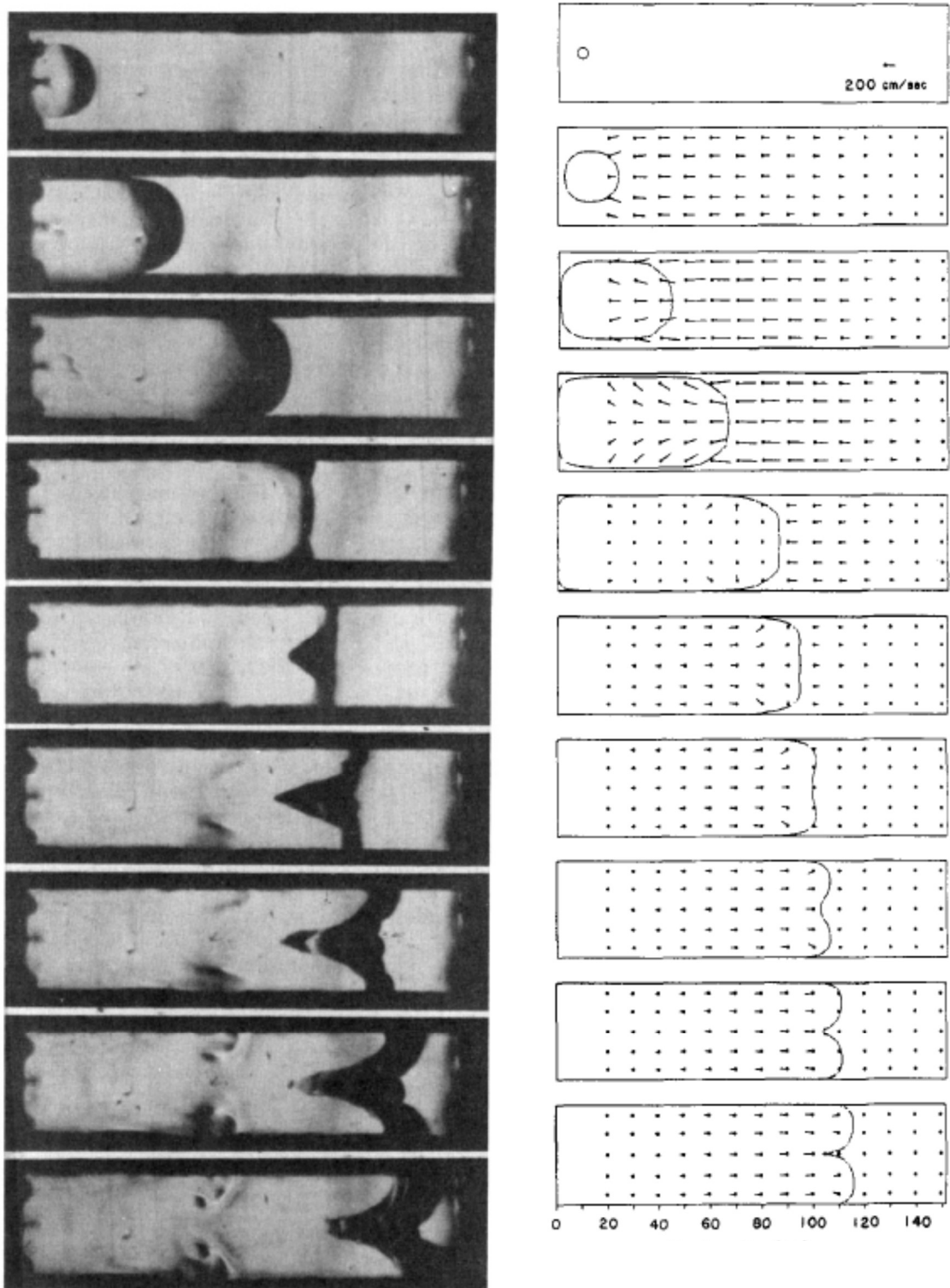
ser visto na Figura 12. As imagens referem-se a uma chama pré-misturada de hidrogênio e oxigênio, com pressão inicial de 0,2 Bar.

Figura 10 - Imagens Schlieren tomadas a cada 5 ms da propagação de chama em tubo horizontal.



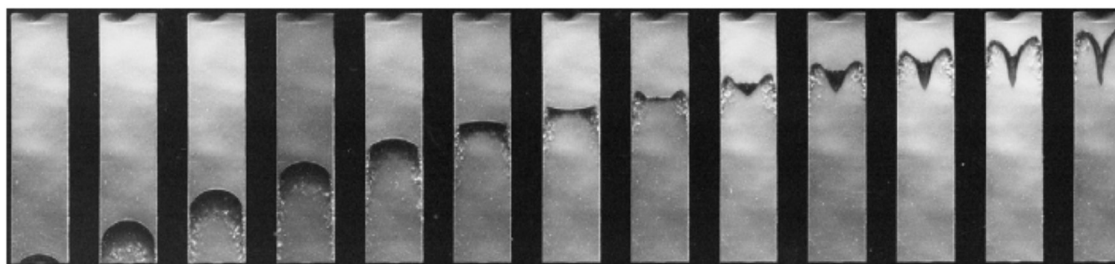
Fonte: Dunn-Rankin e Sawyer (1998).

Figura 11 - Comparação entre dados experimentais e de modelagem numérica para chamas tulipa.



Fonte: Dunn-Rankin e Sawyer (1998).

Figura 12 - Sequência de fotografias que mostra a evolução da frente de chama, em um tubo.



Fonte: Liberman et al. (2010).

(PONIZY e colab., 2014) realizaram estudos sobre inversão de forma de frentes de chama em tubos fechados, com mudança do ponto de ignição, inclusive. Em sua opinião, a inversão da frente de chama não se inicia na frente de chama. Na verdade, na opinião deles, a parte convexa da frente de chama não tem influência na formação da chama tulipa, mas as partes laterais, que sofrem uma expansão radial, sim. Da mesma forma, as instabilidades defendidas nas teorias de Rayleigh-Taylor, Richtmyer-Meshkov ou Darrieus-Landau não fazem parte deste fenômeno. Na opinião daqueles autores, a frente de chama próxima às paredes, que tem uma área maior, empurra para a frente os gases ainda não queimados, juntamente com a movimentação dos gases produzidos, auxiliados pela interação com as paredes do tubo. Quando a parte da frente de chama próxima às paredes tende a extinguir-se, sua forma começa a diminuir bem como sua ação em empurrar a frente de chama ao encontro da mistura não queimada, que ainda está sendo comprimida. Isso faz com que a parte central da frente de chama seja comprimida e desacelere, sendo empurrada para trás, formando a tulipa. Os estudos foram baseados em imagens obtidas com combustão de misturas estequiométricas de propano com ar, em condições ambientes. Dados foram obtidos com observações da velocidade de partículas (PIV), e tem valor para experimentos com câmaras com razão de aspectos pequenas, em experimentos realizados em CNTP.

O mecanismo de propagação de chamas confinadas com aceleração e formação de chamas tulipa em tubos é ainda considerado um dos mais interessantes fenômenos da ciência da combustão e da física não linear. Quando a combustão ocorre em ambiente confinado, a onda de chama gera ondas acústicas de grande, ou considerável, amplitude. A onda acústica gerada deforma a onda de chama, tornando-a mais irregular ou mais constante, dependendo de alguns parâmetros próprios do escoamento e da geometria do tubo. (CLANET e SEARBY, 1996) observaram que chamas rápidas podem formar ondas acústicas muito fortes e levar a processos de combustão muito turbulentos na segunda metade do tubo. Entretanto, este fenômeno aparentemente tão importante não foi totalmente explicado até agora. Algumas

hipóteses foram apresentadas, mas os efeitos considerados nas simulações foram consideravelmente mais fracos que os observados nos experimentos (PETCHENKO et al., 2006).

O mecanismo de aceleração da chama nos primeiros estágios da propagação em tubos confinados foi estudado experimentalmente em chamas de propano e ar por Clanet e Searby (1996). Eles partiram de observações realizadas por Mallard e Le Chatelier em 1883, e notaram que as chamas iniciadas em uma extremidade fechada de um tubo longo mudavam rapidamente a sua direção de propagação. Nas primeiras fotografias de Ellis, feitas em 1928, conforme anteriormente citado, ele observou que, em tubos fechados com uma relação entre comprimento e diâmetro > 2 , a forma da frente de chama mudava rapidamente da forma de um dedo apontado pra frente para um pico voltado para trás. Depois desta mudança, a forma da frente de chama permanece inalterada.

Este mecanismo de aceleração de chamas nos estágios iniciais em tubos foi estudado e elucidado analítica e computacionalmente no limite de incompressibilidade dos gases em escoamentos (AKKERMAN et al., 2006). Outros estudos foram realizados quando a compressibilidade dos gases se torna um fator importante no escoamento de gases no interior de tubos (VELOO e colab., 2010). Para estes casos, foi desenvolvida uma teoria com números de Mach mais baixos, demonstrando que a compressão dos gases reduz a taxa de aceleração e a velocidade máxima na ponta da chama. Isto é uma importante diferença quando olhamos para trabalhos anteriormente publicados. Para ensaios com número de Mach maiores, com misturas de hidrogênio e oxigênio, ficou demonstrado que a aceleração ficou bem menor que as obtidas para chamas de hidrocarbonetos, o que não era esperado. Nestes casos, observou-se uma boa aderência entre os experimentos e os valores calculados com modelos computacionais.

Algumas outras variáveis observadas em escoamentos que tem como resultado a formação de chamas tulipa são a velocidade da frente de chama e a pressão dentro do vaso de ensaios. Observações nesta direção foram realizadas por (XIAO e colab., 2015). A análise dos resultados foi conseguida através da análise de imagens Schlieren utilizando velocidades altas para se calcular as mudanças nas velocidades das frentes de chama e através de dados de pressão obtidos durante o desenvolvimento da chama. Os autores observaram a formação de uma segunda onda em forma de tulipa imediatamente antes do colapso da primeira, e com um comportamento muito parecido ao da onda inicialmente originada. A interação da frente de chama inicial com a onda de pressão formada fica bem evidente. A onda de chama em contato com as paredes do duto sofre uma desaceleração. Este contato e consequente desaceleração provocam um aumento na pressão, que por sua vez, desacelera a onda de chama em fase com

o aumento da pressão. Esta interação da chama com a onda de pressão é bem forte. A variação na pressão da onda de chama provoca a periódica variação da velocidade da onda de chama. A súbita desaceleração da chama provoca o aparecimento da chama tulipa distorcida. A formação da onda de chama distorcida pode ser uma manifestação da instabilidade de Taylor.

Este tipo de escoamento reativo, confinado, com mais de um componente, com gradientes de pressão e temperatura, com interação com as paredes do duto de confinamento e dependendo da forma do container vem sendo estudado já há algum tempo e deverá ser objeto de recomendação para estudos futuros.

O problema de propagação de chama com aceleração seguida de detonação em um ambiente semi confinado é muito importante em reatores nucleares e ambientes quando hidrogênio é liberado em virtude de vazamentos e acumula-se no topo juntamente com ar. A ignição destas misturas pode levar a grandes pressões, com prejuízo das estruturas. Existem, ainda, poucos dados experimentais sobre condições críticas que levem a acelerações de chamas e a transição de deflagração para detonação em ambientes fechados (GRUNE e colab., 2013).

2.8 OUTROS TRABALHOS EXPERIMENTAIS

Chamas laminares de misturas de etanol com ar tiveram a sua velocidade de queima medidas em variadas condições de temperatura, pressão e razões de equivalência por Eisazadeh-Far e colab. (2011). Suas instalações de testes dispunham de um tubo cilíndrico e um vaso esférico com capacidade de resistir a pressões de até 425 atm. Os ensaios eram realizados com uma temperatura inicial de até 500 K. As chamas foram observadas com um sistema capaz de adquirir até 40.000 quadros por segundo. A velocidade das chamas laminares durante a queima foi calculada a partir da observação do aumento da pressão no interior dos recipientes utilizando-se um modelo termodinâmico. Uma mistura de nitrogênio e dióxido de carbono foi utilizada para simular a influência dos gases residuais na velocidade de queima em motores de combustão interna. Uma correlação para a velocidade de queima laminar como função de temperatura, pressão, razão de equivalência e presença de gás residual foi explorada. Os experimentos foram conduzidos com pressões variando entre 1 e 5 atmosferas, temperaturas entre 300 e 650K, razão de equivalência entre 0,8 e 1,1 e com adição de gases residuais entre 5 e 10%. Os valores medidos são coerentes com os disponíveis na literatura.

(XU e colab., 2011) realizaram ensaios utilizando espectrofotômetro de massa para detectar os produtos intermediários e as frações molares durante a reação de combustão de uma pré mistura, estequiométrica, de etanol com ar. Foram identificados e analisados os perfis de

temperatura e frações molares dos subprodutos durante o andamento da combustão, comparando-os com os existentes. As conclusões dos autores sugeriram uma alteração na compreensão dos mecanismos aceitos na época do trabalho nos processos de combustão para etanol com ar e dimetil éter com ar.

(EGOLFOPOULOS e colab., 1992) publicaram um estudo detalhado experimental mostrando as reações de oxidação presentes na combustão de etanol com ar atmosférico. A velocidade de chama laminar, a 1 atm de pressão ambiente, com a temperatura inicial entre 363 e 453 K, foi medida experimentalmente e comparada com a velocidade medida de chamas de metano, metanol e outros hidrocarbonetos baseados em uma cadeia de C₂. A velocidade a 298 K não foi medida, mas extrapolada a partir dos dados obtidos em outras temperaturas. Os dados mostraram claramente o aumento da velocidade com o aumento da razão de mistura. A maior velocidade para uma mistura de ar com etanol foi obtida com uma razão de mistura de 1,15 aproximadamente. Este valor é semelhante aos valores anteriormente relatados. Para misturas com ar e alcanos a razão de mistura com os resultados com velocidades maiores foi um pouco menor, em virtude da presença de um átomo de O a mais na molécula do etanol, que fornece um pouco a mais de oxidante na própria molécula em misturas mais ricas.

3 METODOLOGIA

3.1 PROCEDIMENTOS GERAIS

Os experimentos foram realizados nas instalações do Laboratório Associado de Combustão e Propulsão (LABCP) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em Cachoeira Paulista, SP. Foi montada uma bancada dedicada para preparação das misturas de etanol com ar com as razões de equivalência e realizada a combustão nas pressões desejadas, que é o primeiro objetivo do trabalho. A construção do equipamento de ensaio fez parte deste trabalho. Esta construção foi realizada em local próprio e com os melhores materiais disponíveis no mercado. Foram utilizados materiais para *tubing* padrão aeroespacial, para se garantir a não contaminação das misturas testadas por vazamentos, bem como a durabilidade de todo o aparato para futuros ensaios. A execução dos ensaios foi feita no local próprio para isso construído com muita segurança e critério. Nunca devemos nos esquecer de que manipulamos etanol, vapores de etanol, produtos de combustão tóxicos, gases pressurizados sufocantes e ondas de chama em um ambiente confinado com graves consequências em caso de acidentes. O local onde foram instalados os subsistemas é um espaço no Laboratório de Aplicações de Combustão de Gases (LACG) do INPE, em Cachoeira Paulista, SP, dedicado para isso. O isolamento foi necessário para se controlar condições de iluminação próprias necessárias para se filmar, pois as imagens têm a sua própria luminosidade e é preciso haver um contraste com o ambiente. Todo o trabalho foi realizado levando-se em conta todos os procedimentos de segurança necessários inerentes ao trabalho realizado.

As misturas preparadas são transferidas para o tubo de vidro borossilicato para a realização da queima e observação do deslocamento da onda de chama, com a pressão no interior do tubo controlada.

As premissas iniciais consideradas na concepção e construção da bancada de preparação das misturas e realização dos ensaios são descritas no parágrafo a seguir.

Ensaio foram realizados com pressão inicial abaixo da atmosférica. Isto, apesar de ser um complicador, não é usual e forneceria mais segurança às pessoas envolvidas nos experimentos. O aumento na pressão inicial após o início dos ensaios era esperado, mas a interação entre a onda de chama e o equipamento ainda não era muito conhecido. Iniciando com uma pressão sub atmosférica, a ocorrência de um acidente com rompimento do tubo de vidro causado pela diferença entre as pressões interna e externa ao tubo fica reduzida. Além disso, ensaios de combustão de etanol com ar a pressões controladas sub atmosféricas, além de

inéditos, permitem que se varie a pressão ambiente inicial até valores maiores que a pressão atmosférica normal, sempre levando-se em conta aspectos de segurança. Ensaios realizados com pressão inicial mais baixa que a atmosférica podem ter seus resultados extrapolados para outras pressões iniciais. Além disso, ensaios iniciados com pressões menores que a atmosférica não estão disponíveis na literatura, o que é uma motivação para este trabalho.

A instrumentação necessária instalada na bancada deve fornecer os seguintes dados, coletados em tempo real durante a realização e a preparação dos ensaios:

- Valor da pressão interna do tubo durante todo o tempo, incluindo durante a limpeza e descontaminação do tubo de vidro e transferência da mistura preparada para seu interior. Esta será a pressão inicial de cada ensaio, sempre sub atmosférica. A amplitude de medição deve ser de 0 até 100 kPa absolutos. O sensor deverá ser provido de uma válvula para isolá-lo durante os ensaios, quando a pressão aumenta e pode danificar o sensor e fornecer leituras erradas das pressões internas.
- Valor da pressão interna do tubo durante os ensaios. Este é o valor de pressão originado pelo processo de combustão em curso no interior do tubo. Deverá iniciar-se na pressão inicial da mistura e ter seu valor máximo ao final da queima da mistura ensaiada. A amplitude de medição esperada deverá variar entre 0 e 1 MPa. Apesar de poder-se medir a pressão interna até 1 MPa não poderemos ter valores maiores 300 kPa, que é o limite do tubo de vidro, indicado pelo fabricante.
- Valor da temperatura da mistura no interior do tubo. A temperatura inicial da mistura e durante o desenvolvimento da onda de chama deverá ser adquirida. Apesar de ser adquirida com termopares que tem um tempo de resposta alto, a temperatura durante o desenvolvimento do processo de combustão não pode ser perdido. Para as situações em que não há escoamento, este dado é muito confiável. Este dado de temperatura inicial é muito importante no início de cada experimento.

O registro do deslocamento da onda de chama deve ser realizado com um equipamento que seja capaz de adquirir o deslocamento da chama quadro a quadro durante o processo de queima e deslocamento. Deverá utilizar-se uma câmara de filmagem com alta velocidade, que permita a aquisição de até 1000 quadros por segundo. A obtenção de imagens com boa resolução e pouco espaçadas no tempo permitirá que se tenha um bom registro da velocidade da frente de chama.

As misturas deverão ser preparadas no interior de um balão de vidro, que permita uma análise visual para observação de possível condensação, com volume suficiente para que as misturas sejam preparadas em lotes grandes e suficientes para vários ensaios. Isso deverá

permitir que os ensaios com as mesmas características sejam feitos com misturas homogêneas. A temperatura durante a preparação das misturas deverá ser mantida, no interior do balão, acima de 57°C para evitar-se a condensação do etanol e permitir a homogeneização com o ar sintético adicionado. A pressão no interior do balão deverá ser mantida mais alta que no tubo de queima para permitir a transferência das misturas para o seu interior. Além disso, o balão com as misturas deverá ser mantido no interior de uma caixa de aço isolada termicamente, para possibilitar o controle de temperaturas, além de garantir a segurança dos envolvidos nos ensaios.

Além da instrumentação acima descrita para visualização e registro dos ensaios em tempo real, a câmara de misturas deverá ter, ao menos, um sistema de aquisição de dados que colete, em tempo real:

- A temperatura das misturas.
- A pressão interna do balão. A medição da pressão interna do balão será importante para permitir a preparação das misturas, a movimentação das misturas prontas por diferença de pressões para o interior do tubo de queima, o preenchimento do balão com os gases para a confecção das misturas, para a rinsagem e limpeza do balão e para permitir a composição correta das misturas.

O método utilizado para a preparação das misturas foi o de pressões parciais, com a necessidade de se medir com precisão a pressão antes e depois da adição do metanol evaporado para o interior do balão. Para isso foi instalado um aquecedor para a evaporação de etanol que era injetado na câmara de misturas;

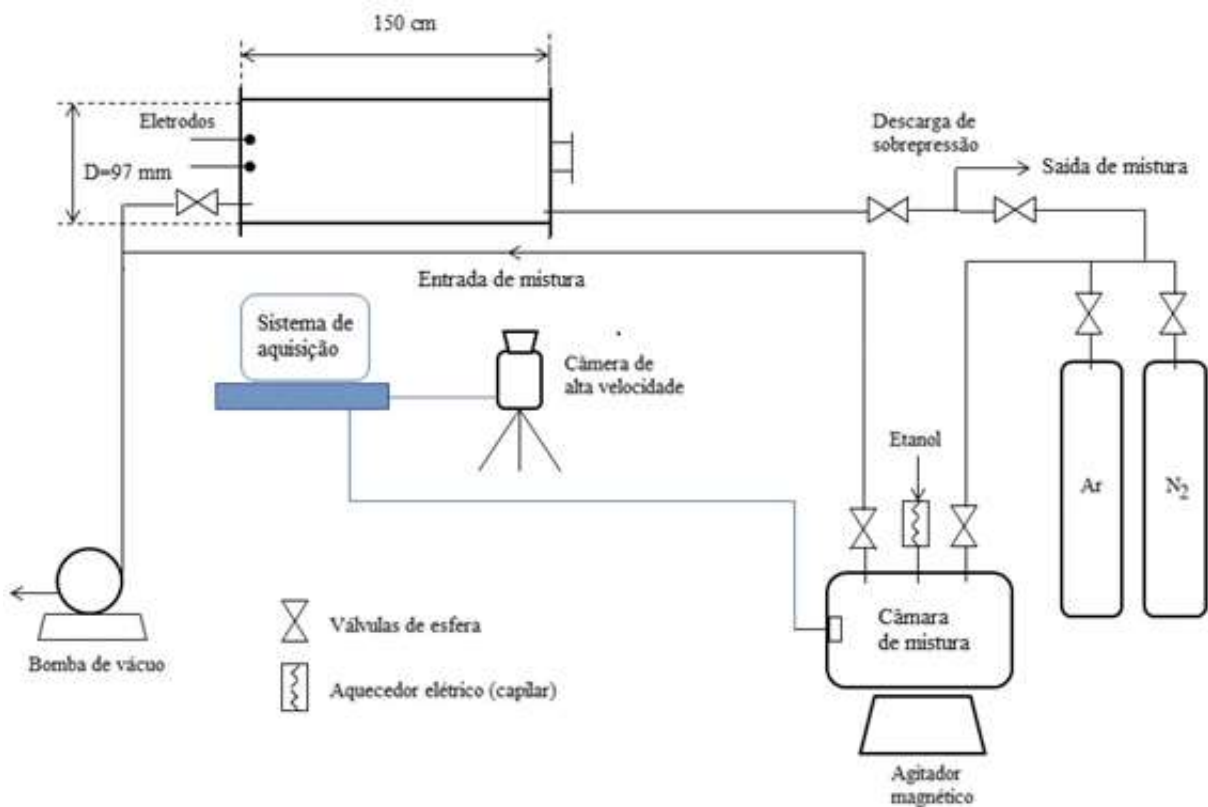
As misturas foram preparadas no balão acima citado e transferidas para o interior do tubo por diferença de pressão até o valor desejado para o ensaio a ser realizado. É importante que não haja nenhum ponto de vazamento no balão, no tubo e nas ligações para que a mistura pronta não seja contaminada com ar ou umidade do ambiente externo. A bomba de vácuo utilizada é intrinsecamente segura para permitir a movimentação de gases combustíveis sem que haja qualquer risco de acidentes.

3.2 BANCADA DE ENSAIOS

A bancada de ensaios bem como seus componentes e acessórios, está esquematizada na Figura 13. Uma segunda configuração da bancada de ensaios, apresentada na Figura 14, com comprimento maior do tubo de propagação da chama também foi testada.

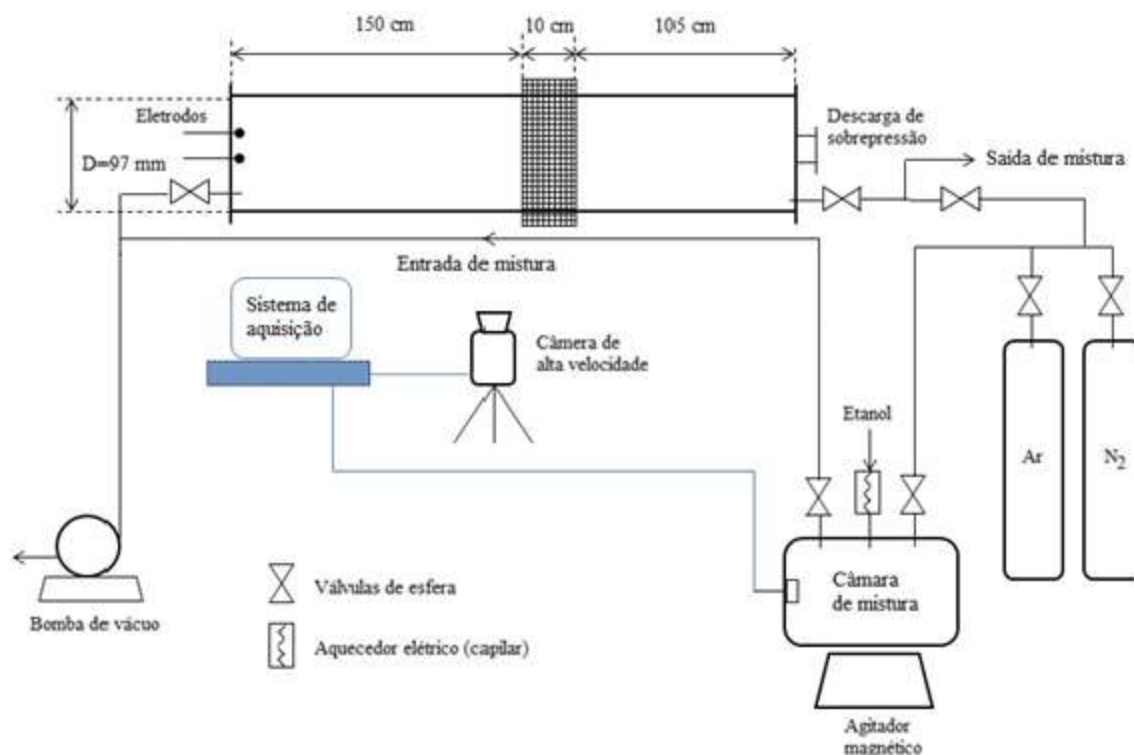
A bancada foi concebida para ser autossuficiente para composição das misturas nas proporções e pressões desejadas e para a realização de ensaios confinados de propagação de chamas, com recursos provenientes de auxílio da FAPESP. Sua construção obedeceu aos pré requisitos acima descritos e levou-se em consideração, sempre, cuidados com a segurança na construção e na operação. Deve-se sempre lembrar de que foi idealizada para operação com materiais combustíveis e eventualmente perigosos.

Figura 13 - Esquema da bancada de ensaios com tubo de 150 cm.



Fonte: Autoria própria.

Figura 14 - Esquema da bancada de ensaios com tubo de 265 cm.



Fonte: Autoria própria.

A seguir, serão descritos os subsistemas da bancada.

3.3 CÂMARA PARA PREPARAÇÃO DE MISTURAS

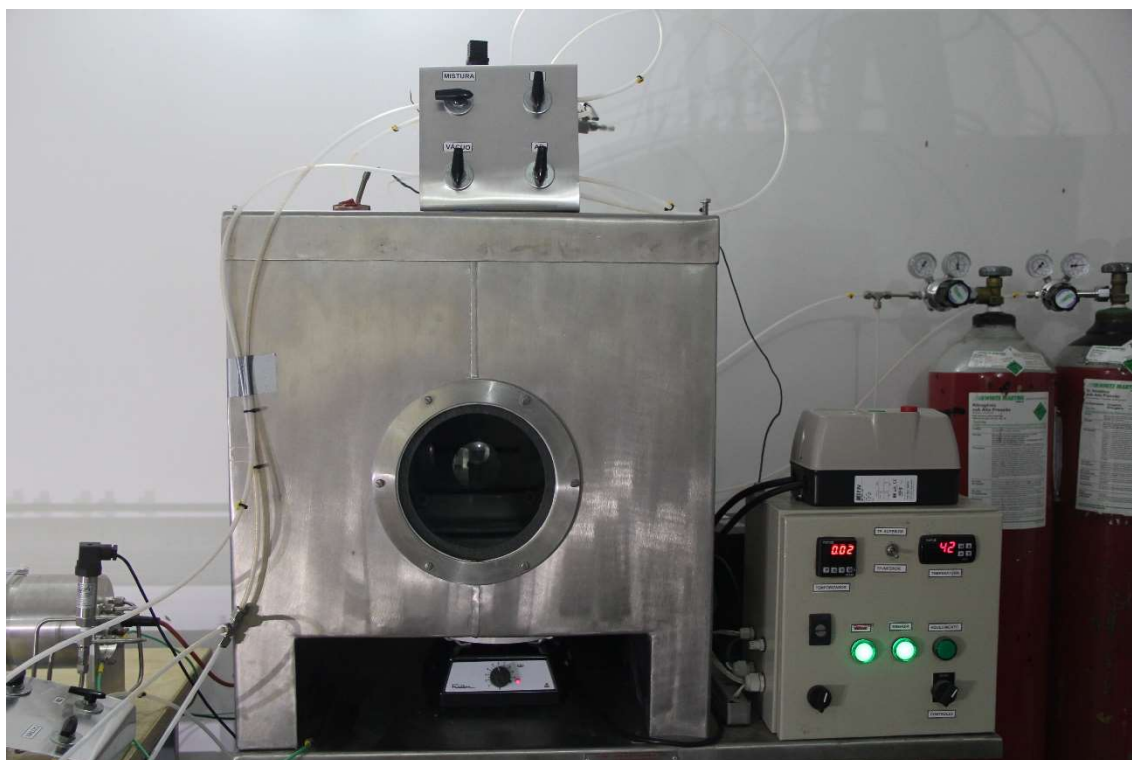
A câmara de mistura, esférica, formada por um vaso esférico de borossilicato, faz parte do subsistema de preparação das misturas de etanol com ar. Está montada, por razões de segurança, no interior de uma caixa de aço, de paredes grossas, com um acesso único através do tampo superior firmemente fixado ao corpo da caixa, conforme mostra a Figura 15. Esta câmara para a preparação das misturas já existia. Foi utilizada anteriormente em experimentos para determinação de limites de flamabilidade (superior e inferior) de misturas de etanol com ar (CORONADO e colab., 2014).

O balão esférico de vidro borossilicato tem um volume útil de 20 l. O balão está assentado sobre o fundo da caixa de aço, devidamente isolados termicamente entre si para evitar redução de temperatura provocada pela perda de calor através do contato entre o fundo do balão e a caixa de aço, que levaria à condensação da mistura, o que prejudicaria a realização dos ensaios. A manutenção da mistura na forma gasosa sempre foi uma preocupação durante os ensaios. Além de garantir a razão de equivalência correta e a homogeneidade da mistura no balão,

também permitia que a quantidade de mistura transferida era a desejada, sem fase líquida e idêntica à do resto do balão, e a mesma inicialmente preparada.

A montagem do balão esférico no interior de uma caixa de aço é bem conveniente por razões de segurança, como dito anteriormente, e para permitir o controle da temperatura desejada na preparação e utilização das misturas. A manutenção de uma temperatura homogênea no interior de toda a caixa e por fora do balão, é conseguida por uma ventoinha instalada no tampo da caixa. Sob a caixa de aço e o balão esférico está instalado, externamente, o agitador magnético utilizado durante a preparação e distribuição das misturas.

Figura 15 - Caixa de aço com o balão de vidro e a instrumentação e válvulas para os gases e vácuo para controle das misturas no interior do balão.



Fonte: Autorial própria.

Na Figura 15, é possível ver-se as quatro válvulas manuais (para controle de N₂, ar sintético, vácuo e retirada da mistura pronta) sobre a caixa de aço. Sob a caixa, o agitador magnético, e ao lado direito, o controle da temperatura no interior da caixa, controle de ligamento da bomba de vácuo e do agitador de ar no interior da caixa.

No topo da câmara esférica estão instalados os sensores de pressão e de temperatura, conectados ao sistema de aquisição de dados. Não é possível vê-los na Figura 15; estão atrás do painel com as válvulas.

O sensor de pressão instalado na câmara de misturas tem uma faixa de trabalho entre 0 e 2 atmosferas absolutas. Essa faixa de operação é bastante conveniente para se controlar as pressões baixas e o vácuo necessários para a preparação das misturas para os ensaios que se pretende. Através dele controla-se a pressão durante a elaboração das misturas e sua transferência para o interior do tubo de propagação. Além disso, é utilizado durante as operações de limpeza e descontaminação do balão, conforme dito acima.

As temperaturas das misturas que se pretende controlar deverão variar entre a temperatura ambiente e 50 °C. São adquiridas e registradas através de um termopar conectado ao sistema de aquisição de dados, que será visto mais abaixo. Há um aquecedor no interior da caixa de aço e uma ventoinha para homogeneização do ar aquecido interiormente

O acesso ao interior da caixa se dá exclusivamente pelo seu tampo superior, que envolve o bocal do balão esférico. O bocal do vaso esférico é tamponado com uma rolha cônica de silicone de dimensões convenientes. A rolha tem forma cônica apropriada para se obter uma vedação perfeita quando se necessita evacuar o interior do balão. O vácuo em seu interior faz com que a rolha seja aspirada de encontro ao bocal, o que aumenta o contato e a vedação entre eles. Por outro lado, permite que uma sobrepressão a empurre para fora e libere o conteúdo para a atmosfera, sem prejuízo ao equipamento.. A rolha de silicone é a única interface com o meio ambiente já que a câmara de vidro não permite orifícios passantes, e é através dela que foram instaladas toda as tubulações para passagem para o seu interior para ligação com a bomba de vácuo, fornecimento dos insumos necessários para a realização das misturas para os ensaios, para limpeza e descontaminação interior e para a transferência das misturas prontas para o tubo de ensaios.

As interfaces com o exterior acima citadas instaladas na tampa superior do balão compreendem:

- Tubulação em aço inox para fixação e suporte da instrumentação para controle das pressões e temperaturas no interior do balão de vidro. A pressão absoluta no interior do vaso varia de vácuo limite da bomba de vácuo utilizada (em torno de 0,02 kPa) até a pressão máxima utilizada durante a preparação das misturas, que ficava em torno de 140 kPa. Pressões maiores que 140 kPa forçariam a rolha de silicone, cônica, para cima e para fora. Este valor já é suficiente para forçar a movimentação da mistura para o interior do tubo de queima. A temperatura desejada para a mistura ar etanol deveria ser tal que garantisse que não haveria

condensação do etanol no interior do balão (controle visual pela escotilha da caixa de aço que encerra o balão), mas que não oferecesse perigo de se aumentar a pressão até surgisse um vazamento, pois os vapores de etanol são tóxicos e inflamáveis. A temperatura foi mantida em torno de 58°C durante a preparação das misturas. Para auxiliar a evaporação com temperaturas mais baixas e dificultar a condensação, utilizou-se um agitador magnético, que permanecia ligado, em rotação, durante todo o transcorrer da preparação da mistura e realização dos ensaios. Após a preparação de cada lote de misturas, o agitador permanecia ligado por 20 minutos para garantir-se a homogeneidade da mistura.

- Tubulação conectada ao cilindro de fornecimento de ar sintético ((80 ±0,5) % N₂ e (20±0,5)% O₂), através de válvulas e demais acessórios. Os cilindros de ar sintético são adquiridos com pressão normal de 20 MPa, suficiente para ser transferido naturalmente. A admissão do ar sintético era controlada através de válvula de esfera manual, e a quantidade era medida através da pressão parcial lida no sistema de aquisição de dados, nas quantidades exigidas para a razão de mistura pretendida e a pressão final desejada. As pressões parciais de etanol evaporado e ar sintético eram calculadas considerando-se a razão de equivalência e a pressão final desejadas para o ensaio a ser realizado.
- Tubulação conectada ao cilindro de fornecimento de nitrogênio superpuro (5.0), sob alta pressão (em torno de 20MPa), através de válvulas e demais acessórios. O nitrogênio gasoso era utilizado para rinsagem do vaso esférico e dos acessórios antes da preparação das misturas e para neutralização de misturas quando sua pressão muito baixa impossibilitava sua aspiração para o interior do tubo de propagação e precisavam ser descartadas. O nitrogênio foi bastante utilizado na fase de preparação da bancada de ensaios para verificar o funcionamento dos diversos componentes, checar possíveis vazamentos e sua interação com a instrumentação para medição de temperaturas e pressões. As pressões presentes nas tubulações de N₂ e de Ar sintético são constantemente monitoradas e adquiridas pelo sistema de aquisição de dados.
- Tubulação de pequeno diâmetro (3 mm) para introdução do etanol vaporizado para preparação das misturas na quantidade necessária para a razão de equivalência e a pressão ambiente desejada. As quantidades de etanol e de ar sintético eram calculadas para cada mistura a ser preparada pelo método das pressões parciais, como já foi aqui dito. A vaporização do etanol para a mistura que se encontrava em preparação era feita imediatamente antes da injeção do etanol no interior do balão de boro-silicato, antes da adição do ar sintético. A câmara de mistura era aquecida através de aquecedores montados por fora do balão de boro-silicato e com circulação forçada do ar aquecido dentro da caixa

de aço, para possibilitar manutenção do etanol evaporado em seu interior. Após a adição do ar sintético na quantidade correta, a mistura em preparação era agitada até que não houvesse sinal de etanol condensado no interior do balão. A verificação da existência de condensação na mistura era feita visualmente pela escotilha da caixa de aço e através da parede do balão. A presença de etanol condensado era facilmente vista pela existência de líquido no fundo do balão e nas paredes do balão.

- Linha conectada à bomba de vácuo, para evacuação em operações de limpeza e preparação de misturas e para a transferência da mistura para o interior do tubo de ensaios. Na preparação das misturas, o vácuo é importante para que o etanol a ser misturado ao ar sintético no interior do balão seja aspirado e não tenha contato com o meio ambiente. Isto evita contaminação e possibilita o controle exato das quantidades. O etanol é aspirado para o interior do balão de vidro até que sua pressão parcial atinja o valor desejado. A verificação da pressão parcial só deve ser realizada após a evaporação do etanol injetado na câmara de mistura. Após a pressão parcial do etanol evaporado atingir o valor calculado para a mistura em preparação, o ar sintético é injetado na quantidade correta para que se alcance a pressão final da mistura, calculada para a razão de equivalência pretendida. Uma vez combinados na razão de mistura correta, ar e etanol vaporizado são misturados por 30 minutos no balão de vidro antes de se iniciar a transferência da mistura para o tubo de ensaios. A bomba de vácuo é o item principal para limpeza do balão de vidro. É a única interface mecânica do balão de mistura com o meio externo durante os ensaios. Periodicamente, o equipamento completo deve ser desmontado para se permitir a limpeza interna do balão de vidro. Durante a fase em que estão sendo realizados ensaios, toda a limpeza é feita com auxílio da bomba de vácuo. A mistura que restou na câmara de mistura após a realização de ensaios, quando a pressão já está muito baixa para se transferir e carregar o tubo de propagação, deve ser neutralizada com nitrogênio, removida e descartada através de aspiração com a bomba de vácuo. Em seguida, a câmara de mistura deve ter seu conteúdo novamente neutralizado com nitrogênio ultrapuro em grande quantidade e evacuada até o vácuo limite da bomba de vácuo. Antes de cada nova mistura ser preparada, toda a câmara de mistura deve ser limpa e rinsada novamente, várias vezes, com nitrogênio ultrapuro e vácuo alternadamente. As operações de limpeza e descontaminação são importantes para se garantir a composição desejada exata das misturas preparadas, sem que haja contaminantes remanescentes das misturas anteriores.
- Tubulação com válvula para alívio rápido da pressão no interior do balão em caso de necessidade e para descarte de misturas neutralizadas. A válvula para alívio rápido é

utilizada sempre para se esvaziar a câmara de mistura durante o processo de limpeza e preparação de nova mistura. Pode ser usada para se esvaziar com rapidez a câmara de mistura em caso de necessidade. Não foi usada nem uma vez com este propósito.

- Tubulação para transferência da mistura preparada para o interior do tubo de ensaios. A tubulação para captura da mistura tinha um comprimento suficiente apenas para transpassar a rolha. Desta forma, coletava apenas a parte da mistura gasosa que estava na parte alta do balão e que não era formada também pela fase líquida da mistura.

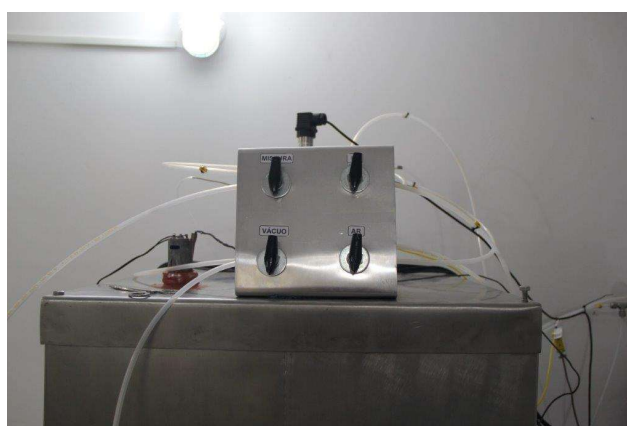
As tubulações que estavam conectadas ao balão de vidro através da rolha de silicone eram controladas manualmente por válvulas instaladas em painéis e perfeitamente identificadas. O painel com as válvulas estava fixado em cima da caixa da câmara de misturas. A Figura 16 apresenta o painel que estava sobre a caixa de aço.

Resumo do item

a) Instrumentação instalada na câmara de mistura e conectada ao sistema de aquisição de dados.

- Sensor de pressão absoluta com faixa de trabalho de 0 a 2 bar, no balão de mistura;
- Sensor de temperatura ambiente no interior do balão de mistura (termopar);
- Sensor de temperatura no interior da caixa, externamente ao balão.

Figura 16 - Painel com as válvulas para controle dos fluidos na câmara de misturas.



Fonte: Autoria própria.

b) Válvulas e acessórios.

- Entrada de ar sintético para limpeza do balão e preparação de misturas;

- Entrada de nitrogênio 99,999% de pureza para limpeza, neutralização das misturas para descarte e descontaminação do balão;
- Saída para bomba de vácuo, para limpeza e preparação das misturas;
- Saída da mistura pronta para o tubo de propagação.

c) Outros acessórios.

- Sistema para evaporação e injeção de etanol para o interior do balão durante a preparação das misturas;
- Ventoinha para garantir a circulação do ar aquecido pelo interior da caixa de aço e externamente ao balão esférico;
- Agitador magnético;
- A câmara de mistura conectada ao tubo onde serão realizados os ensaios, à bomba de vácuo e aos cilindros de ar sintético e nitrogênio através de mangueiras identificadas de Nylon, e um conjunto identificado de válvulas tipo esfera, em aço inoxidável liga 304 L.

3.4 TUBO PARA PROPAGAÇÃO DA CHAMA

Trata-se de um tubo de vidro borossilicato, com 1500 mm de comprimento, com 120 mm de diâmetro e 7 mm de espessura nas paredes. Foram projetadas e fabricadas tampas apropriadas em alumínio exclusivamente para estes ensaios, nas oficinas do INPE. A montagem do tubo foi realizada pensando-se na realização dos ensaios e possibilidade de observação e registro das imagens das chamas produzidas em tempo real.

Na Figura 17 é possível ver-se alguns detalhes das tampas de alumínio fabricadas para acomodar, fixar, vedar, permitir a fixação de instrumentação e dar suporte ao tubo. Pelas tampas são introduzidas as misturas para cada um dos experimentos, é realizada a evacuação para limpeza entre os experimentos, a rinsagem com nitrogênio ultrapuro para eliminação dos resíduos de cada experimento, além da fixação de toda a instrumentação e das válvulas para controle do conteúdo no interior. As tampas são presas sobre a bancada de trabalho para fixação e sustentação do conjunto montado.

Figura 17 - Tubo para propagação da chama, com detalhe das tampas instaladas com instrumentação e controles.



Fonte: Autoria própria.

O tubo pode suportar uma pressão interna de até 800 kPa, conforme o fabricante. Por razões de segurança, trabalhou-se com pressões no interior do tubo de até 300 kPa, controladas pela presença de uma válvula de alívio calibrada com este valor instalada no tubo.

No tubo de propagação estão instalados os seguintes instrumentos e acessórios:

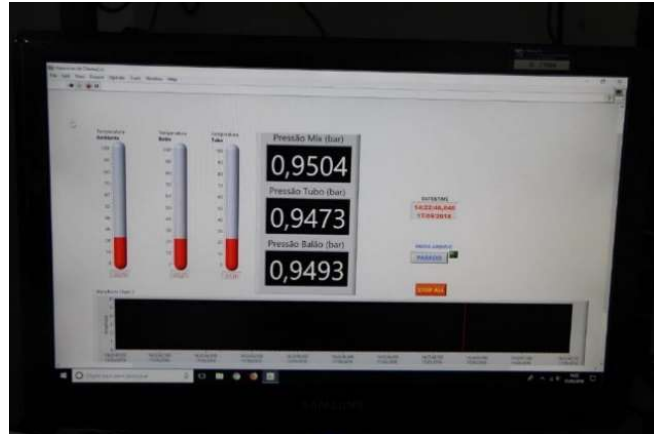
- Sensor de pressão, de 0 a 200 kPa. O sensor com fundo de escala de 200 kPa é apropriado para se medir as pressões sub atmosféricas como as que se pretende aqui para o início dos ensaios de combustão. Após o disparo, o sensor é isolado do tubo de combustão através de uma válvula, pois a pressão interna aumentará bastante, podendo danificar o sensor. Os valores de pressão captados por este sensor serão armazenados no sistema de aquisição de dados.
- Sensor de pressão de 0 a 1000 kPa. Durante os ensaios, a pressão deverá atingir valores bem mais altos que as iniciais. Estes valores seriam medidos com o sensor de fundo de escala de 1000kPa. O valor máximo de 300 kPa no interior do tubo era garantido por uma válvula de alívio calibrada para este valor. Os valores de pressão captados por este sensor serão armazenados no sistema de aquisição de dados.

- Termopar tipo E (cromel/constantan), para medição da temperatura ambiente no interior do tubo. Os dados de temperatura a serem adquiridos não serão altos. Optou-se por um termopar com resposta rápida, e não por um termopar para altas temperaturas. O termopar tipo E tem uma sensibilidade elevada, da ordem de $68 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, o que o deixa com uma resposta bem rápida para a faixa que se pretende aqui medir. É indicado para temperaturas, de -270°C a 1000°C , o que é suficiente para o que aqui se pretende.
- Válvula para admissão de N_2 para neutralização de misturas e rinsagem do tubo entre ensaios;
- Válvula para admissão da mistura pronta. A mistura pronta vem do balão de mistura. A válvula de controle da admissão da mistura é operada manualmente conforme a pressão parcial controlada pelo sistema de aquisição de dados, e observada em tempo real;
- Válvula de segurança, calibrada para abrir-se com 300 kPa, para preservação da integridade do tubo de vidro e prevenção de acidentes;
- Válvula para alívio da pressão interna do tubo após ensaios, operada manualmente, e com saída para a atmosfera externa do laboratório;
- Sistema de ignição, composto por um transformador capaz de fornecer uma tensão de 15 kV e uma corrente de 30 mA. O tempo de ignição está configurado para 0,2 s, e foi suficiente por todo o período dos ensaios. Descargas maiores danificaram sensores de pressão, sensíveis a descargas elétricas. Através de tentativas chegou-se ao valor mínimo confiável para a ignição, sem prejuízo aos sensores de pressão.

3.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema de aquisição de dados é modular, marca National Instruments, com módulo de pressão e de temperatura (Figura 18). Este sistema é controlado pelo software LabView, e os dados são armazenados no próprio computador disponibilizado para os ensaios. Tem capacidade de adquirir dados com frequência de até 50 kHz para canais de temperatura e pressão. Todos os dados coletados podem ser observados em tempo real no monitor do computador dedicado para os dados adquiridos dos ensaios.

Figura 18 - Sistema de aquisição de dados.



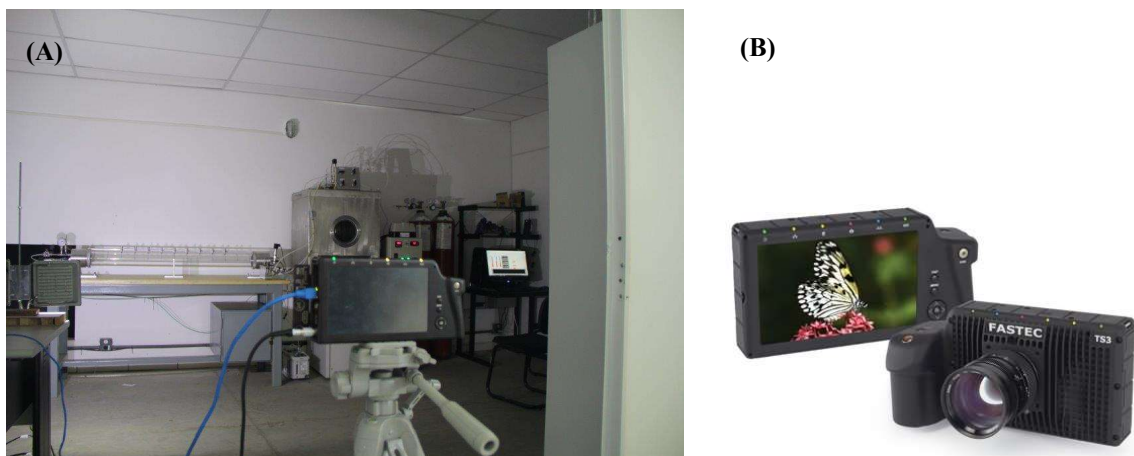
Fonte: Autoria própria.

3.6 CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE

A câmera, marca Fastec, modelo TS3 (Figura 19) foi utilizada para capturar imagens numa frequência de 1000 fps (frames por segundo). Esta câmara tem capacidade de adquirir até 60000 fps em resoluções A configuração da abertura do obturador da câmera, com a velocidade de aquisição e com a luz ambiente foram obtidas localmente, em ensaios preliminares.

As imagens dos ensaios foram armazenadas em PC, e as velocidades das ondas de chama foram obtidas analisando-se as imagens adquiridas com a câmera durante os ensaios com o software Tracker, fornecido junto com a câmera.

Figura 19 - Câmera de alta velocidade.



Fonte: (A) Autoria própria; (B) Fastec (2019).

3.7 PROCEDIMENTOS PARA REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Para a realização dos ensaios foram definidos procedimentos para cada fase. Há sempre necessidade de duas pessoas para seguir-se os procedimentos traçados, como será visto em seguida.

Materiais Utilizados

O etanol utilizado na queima é do tipo PA, com pureza de 99,8%. Todo o etanol utilizado era do mesmo lote do fabricante, foi adquirido no mesmo fornecedor e no mesmo dia para se garantir a repetibilidade dos ensaios. O ar para as misturas é sintético, com uma formulação de 80% de nitrogênio e 20 % de oxigênio, com certificado de garantia de composição fornecido pelo fornecedor em cada cilindro adquirido. O nitrogênio utilizado para a limpeza e neutralização da câmara de mistura e do tubo de queima das misturas era do tipo superpuro com 99,999% de pureza, com certificado de garantia da composição. A transferência das misturas para o interior do tubo de queima com pressão controlada foi realizada sempre por aspiração; para isso, a pressão interna de cada componente do equipamento de ensaios era controlada pelo sistema de aquisição de dados e cada um deles estava conectado à uma bomba de vácuo, através de um conjunto de válvulas e acessórios convenientemente montado. A bancada com os componentes principais e acessórios necessários para a preparação e movimentação das misturas entre a câmara de mistura e o tubo de queima foram montados e estão descritos e mostrados nos itens a seguir.

Preparação da mistura

As misturas etanol - ar foram preparadas conforme o procedimento apresentado a seguir.

- A câmara de preparação das misturas (balão) é previamente evacuada, descontaminada e rinsada com nitrogênio 5.0. Em seguida, é evacuada novamente até o vácuo limite do sistema de vácuo. Isto representa uma pressão máxima de 0,5 kPa. A descontaminação inicial, com eliminação dos gases remanescentes de outras misturas é necessária para se garantir a composição exata final da mistura;
- Em seguida, com a câmara em vácuo aquecida até 55°C, o etanol é gotejado para o interior da câmara até que seja atingida a pressão parcial calculada para o etanol para a mistura pretendida. A pressão parcial desejada do etanol vaporizado deve ser calculada considerando-se que existe uma porção de N₂ remanescente do processo de limpeza

realizado imediatamente antes. O gotejamento do etanol deve ser feito lentamente para permitir a sua evaporação no interior da câmara. A medição da pressão parcial alcançada era feita após a evaporação de todo o etanol gotejado para o interior da câmara, observado através da escotilha e pela temperatura. Este procedimento era realizado com cuidado para evitar-se a condensação do etanol no interior do balão;

- Abre-se, manualmente, a válvula de controle de admissão do ar sintético (80% N₂, 20%O₂) até que seja atingida a pressão calculada para a mistura pretendida. A pressão final da mistura não pode exceder a 160 kPa por razões de segurança, pois a câmara é de vidro, o que limita a pressão máxima admitida na preparação das misturas. Além disso, sua rolha de silicone (cônica) pode facilmente, com uma pequena sobrepressão, sair do lugar, o que significa a perda do lote de mistura pronto;
- Aguarda-se até que a pressão atinja o valor previamente calculado. É possível que após o fechamento da válvula de admissão de ar, a pressão final aumente um pouco, pois pode haver uma pequena elevação da temperatura final da mistura visto que o ar admitido está a temperatura ambiente e a mistura está no balão aquecido.
- Com o agitador magnético e o sistema de aquecimento ligados, aguarda-se ao menos 30 min para homogeneização da mistura, observando-se sempre se houve a formação de condensados no fundo ou nas paredes do balão.

Este procedimento foi melhorado com o aquecimento do etanol durante a injeção para o interior da câmara para 57°C. Isso acelerou a evaporação do etanol.

Transferência da mistura pronta para o tubo de propagação

- Faz-se vácuo no tubo de propagação, através da bomba de vácuo, até o vácuo limite da bomba e abrindo-se a válvula identificada apropriada;
- Após alcançado o vácuo limite (< 0,5 kPa) no interior do tubo, deve-se abrir a válvula que permite a saída da mistura do balão (sobre a câmara de mistura) para o tubo;
- Abrir a válvula que está na tampa do tubo de propagação que permite a entrada da mistura para o tubo. Esta operação deve ser realizada lentamente para que se possa controlar com fineza a quantidade de mistura que está sendo transferida para o interior do tubo através do sistema de aquisição de dados;
- Controlar a pressão no interior do tubo através do sistema de aquisição de dados; essa operação é manual e deve ser controlada pela leitura da pressão dentro do tubo no sistema de aquisição de dados.

- Imediatamente antes de se alcançar o valor previamente calculado para a pressão final da mistura, fechar a válvula de admissão de mistura e aguardar até que o valor da pressão final no interior do tubo se estabilize;
- Se necessário, permitir que seja admitido um pouco a mais de mistura para se alcançar o valor previamente estabelecido. Prestar atenção para que o valor observado da pressão não ultrapasse o valor desejado inicialmente. A remoção de mistura da câmara para redução da pressão não é possível, já que o etanol e o ar estão misturados e a uma pressão menor que a atmosférica.

Para todos os passos aqui citados, deve-se atentar para a identificação das válvulas.

Realização do ensaio de propagação

- Após a transferência da mistura pronta para o tubo de propagação, controlada pela leitura da pressão observada no sistema de aquisição (sensor de baixa pressão) deve-se fechar a válvula de isolamento do sensor de baixa pressão para evitar danos ao sensor durante o ensaio, quando a pressão aumenta;
- Certificar-se de que a válvula de transferência da mistura para o tubo esteja fechada;
- Verificar se todas as válvulas do tubo e da câmara de mistura estejam fechadas;
- Iniciar a gravação dos dados no sistema de aquisição de dados;
- Armar o disparador do sistema de ignição;
- Iniciar a gravação na câmara de alta velocidade;
- Iniciar o ensaio;
- No final do ensaio, interromper gravação das imagens e a aquisição de dados do ensaio (stop all);
- Controlar visualmente se as imagens foram adquiridas corretamente.

Descontaminação após cada ensaio

- Abrir a válvula de liberação dos produtos de combustão;
- Ligar a bomba de vácuo;
- Abrir a válvula de evacuação do tubo de propagação;
- Aguardar a pressão atingir 0,5 kPa;
- Fechar a válvula do vácuo e desligar a bomba de vácuo;
- Encher o tubo com N₂, através da válvula identificada com N₂;
- Aguardar a pressão atingir 0,1 MPa;

- Ligar a bomba de vácuo;
- Abrir a válvula de evacuação do tubo de propagação;
- Aguardar a pressão atingir 0,5 kPa;
- Fechar a válvula do vácuo e desligar a bomba de vácuo;
- Iniciar o procedimento para o próximo ensaio transferindo a mistura para o tubo de propagação.

3.8 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

Os dados foram adquiridos utilizando-se o software LabView. As taxas de aquisição foram de 1000 pontos por segundo. A taxa de gravação foi de um ponto a cada 10 lidos, isto é, 100 pontos por segundo. Durante as operações de limpeza e de enchimento do tubo de propagação e da câmara de mistura, as pressões foram observadas, em tempo real, no sistema de aquisição.

Os vídeos das chamas se propagando foram registrados utilizando o software FastMotion, fornecido com a câmera de alta velocidade. A taxa de gravação dos vídeos foi de 1000 quadros por segundo.

As velocidades das frentes de chama foram obtidas a partir dos vídeos registrados em cada um dos testes. Os vídeos foram analisados no software científico TRACKER, que permite a determinação da velocidade de um ponto em uma frente da chama.

Os valores das pressões no interior do tubo de vidro não foram adquiridos, pois, por motivos de segurança e por se tratar de vidro, foi instalada uma válvula de segurança que se abria quando a pressão interior chegava a 300 kPa. Portanto, as pressões máximas adquiridas durante os ensaios no interior do tubo foram de 300 kPa, que não são reais. Durante os ensaios, a válvula de segurança abriu-se frequentemente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a realização deste trabalho, foram realizados 204 ensaios com as razões de equivalência (ϕ) variando entre 1,6 e 0,6. Ensaios com razão de equivalência 0,4 foram tentados, mas não houve ignição. Em pressões mais baixas, a concentração de etanol ficou fora ou muito próximo ao limite de inflamabilidade inferior. Tabelas especificando os parâmetros de cada teste encontram-se no Apêndice 1. O número do teste é sequencial na ordem em que foram realizados, as razões de equivalência foram as efetivamente usadas, por isso os valores são fracionados.

4.1 TUBO DE 150 CM

Na primeira fase, com o tubo de 150 cm, foram realizados 157 ensaios com resultados considerados bons. Estão descritos no Apêndice. Após uma série de ensaios com pressão inicial de 80 kPa, com o aumento esperado da pressão interna e com o surgimento de uma onda sonora de alta intensidade inesperada no interior do tubo, este quebrou-se. Foi substituído a partir do ensaio de número 141 por outro idêntico, sem prejuízo algum para o trabalho. Para a apresentação das velocidades medidas durante os ensaios, foram consideradas e estão apresentadas abaixo as velocidades que foram plenamente registradas. Em ensaios com razões de equivalência menores que 1,0 e em pressões menores que 10 kPa não houve ignição em todos os ensaios. Estão apresentados na Figuras 20 a 22 os gráficos das velocidades dos ensaios realizados com misturas com razão de equivalência variando entre 0,8 e 1,5, com pressões ambientes iniciais variando entre 20 e 60 kPa. Pressões maiores que 80 kPa estão muito próximas da pressão atmosférica e não fazem parte do escopo deste trabalho, que tem como foco os experimentos iniciados em pressão inicial menor que a atmosférica.

O comportamento observado na velocidade de deslocamento da frente de chama entre os ensaios foi bem parecido. Dados como taxas de aumento da pressão até o limite da válvula de segurança e variação da temperatura poderão ser diferentes devido à variação da razão de equivalência e da pressão inicial. As curvas para a razões de equivalência maiores parecem mais estáveis, mas existem poucos dados adquiridos para se afirmar isso com certeza, apenas três para cada par.

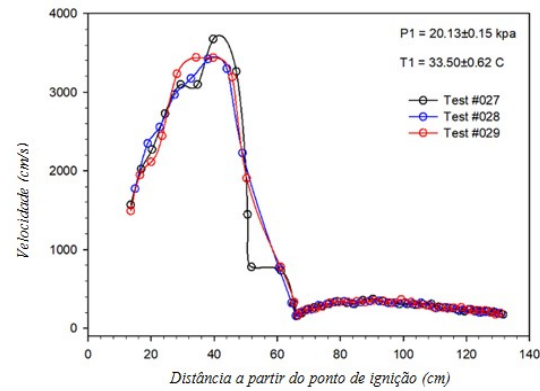
A apresentação dos resultados abaixo está dividida em duas partes, na primeira foram mantidas as pressões iniciais, e variou-se os valores para as razões de equivalência; na segunda parte manteve-se a razão de equivalência e variou-se as pressões iniciais. Com os gráficos

agrupados desta forma, pode-se perceber com mais clareza qual a influência de cada variável no comportamento da frente de chama na mistura.

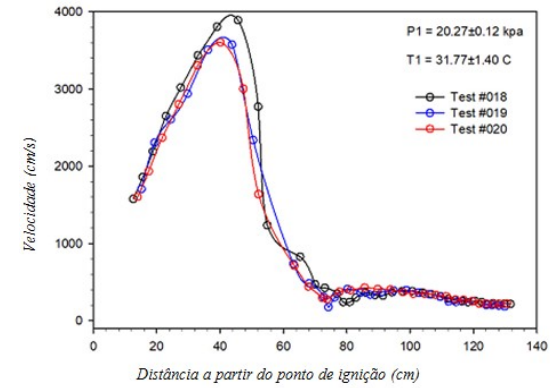
Observou-se, por exemplo que apesar de as misturas com valores de razão de equivalência próximas à estequiométrica alcançarem sempre as velocidades mais altas, como era esperado, a velocidade diminui com a pressão inicial. Os valores mais altos para as velocidades foram, em sua grande maioria obtidos com razões bem próximas as das misturas estequiométricas.

Figura 20 - Velocidades de chama para pressão inicial de 20 kPa, observando-se a variação da velocidade com a razão de equivalência.

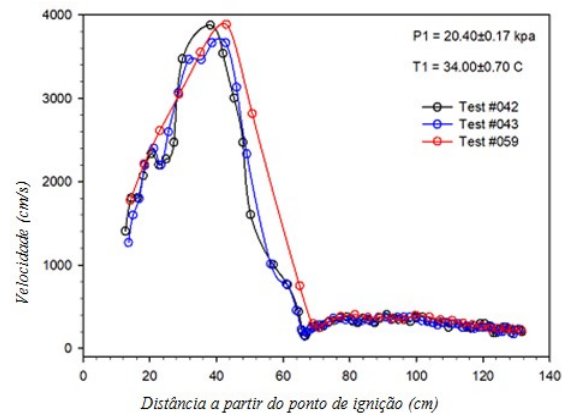
(continua)



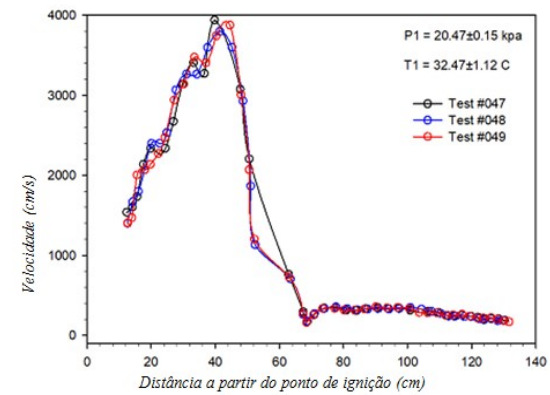
Razão de equivalência: 0,9.



Razão de equivalência: 1,0.



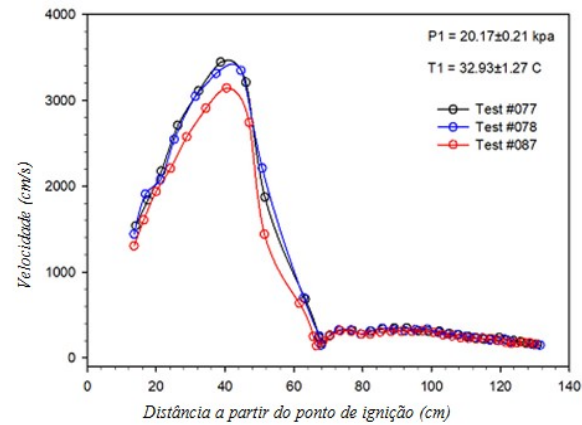
Razão de equivalência: 1,1.



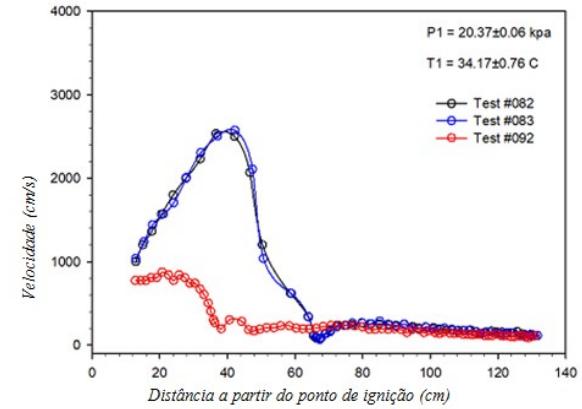
Razão de equivalência: 1,2.

Figura 20 - Velocidades de chama para pressão inicial de 20 kPa, observando-se a variação da velocidade com a razão de equivalência.

(conclusão)



Razão de equivalência: 1,3.

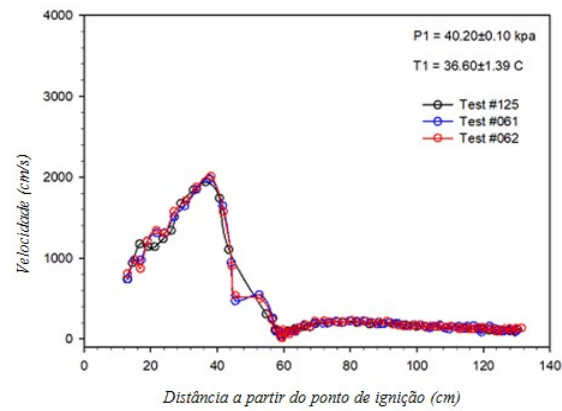


Razão de equivalência: 1,4.

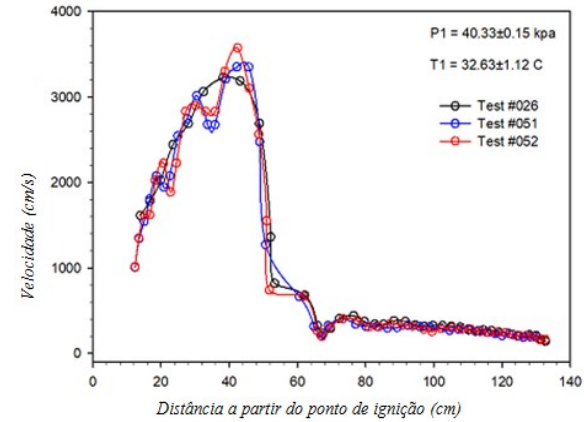
Fonte: Autoria própria.

Figura 21 - Velocidades de chama para pressão inicial de 40 kPa

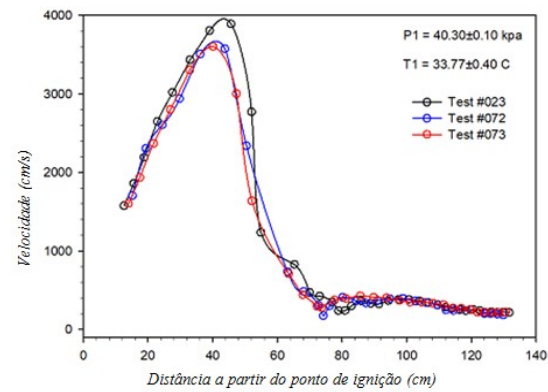
(continua)



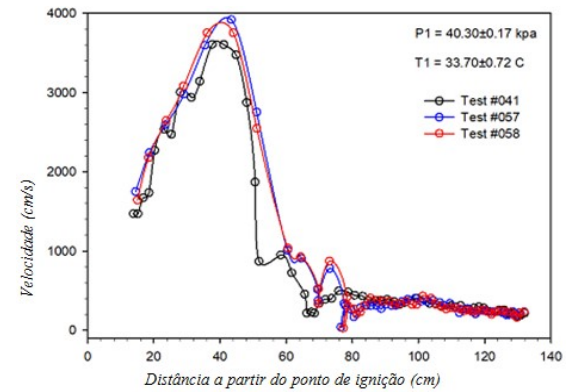
Razão de equivalência: 0,8.



Razão de equivalência: 0,9.



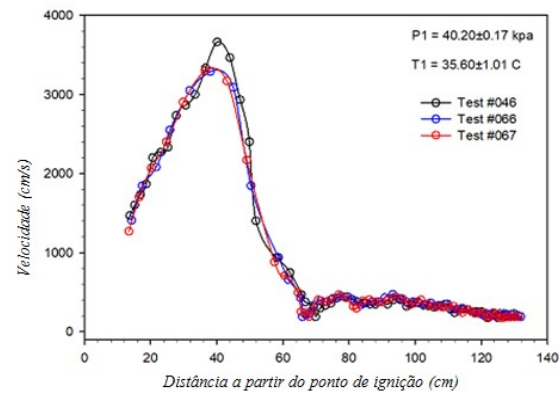
Razão de equivalência: 1,0.



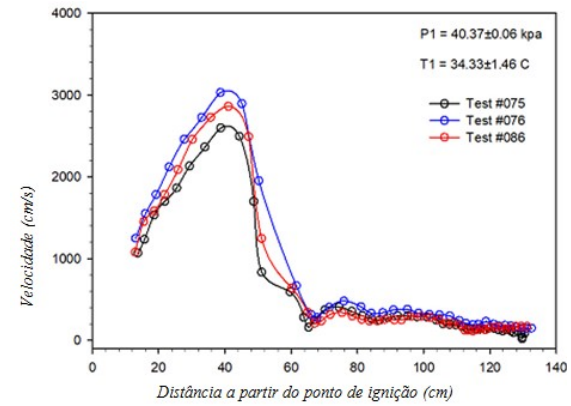
Razão de equivalência: 1,1.

Figura 21 - Velocidades de chama para pressão inicial de 40 kPa

(conclusão)



Razão de equivalência: 1,2.

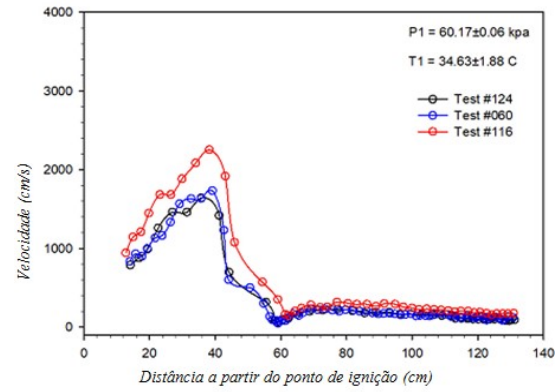


Razão de equivalência: 1,3.

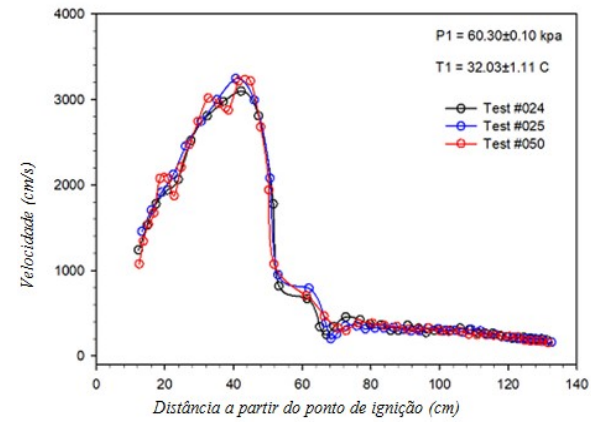
Fonte: Autoria própria.

Figura 22 - Velocidades de chama para pressão inicial de 60 kPa.

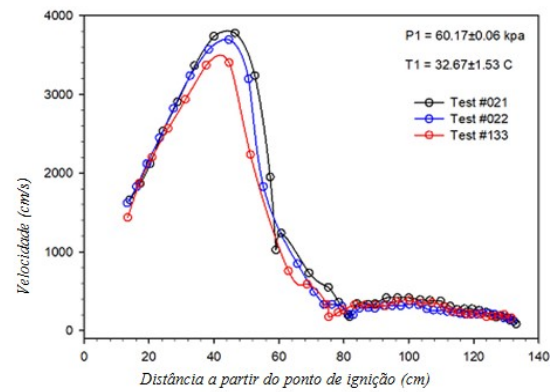
(continua)



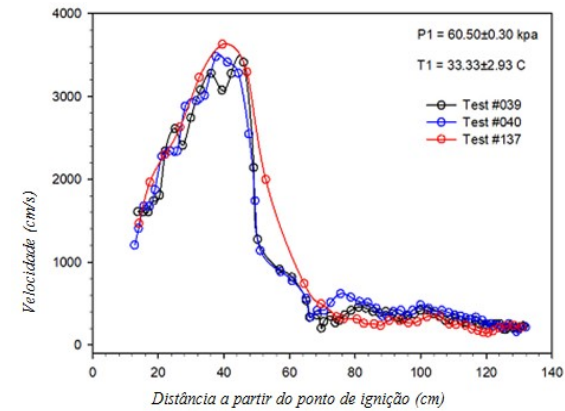
Razão de equivalência: 0,80.



Razão de equivalência: 0,90.



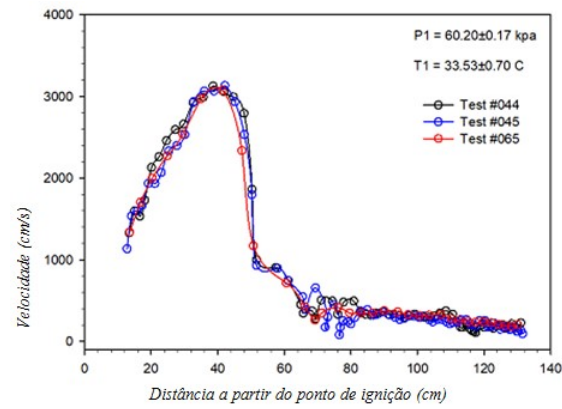
Razão de equivalência: 1,00.



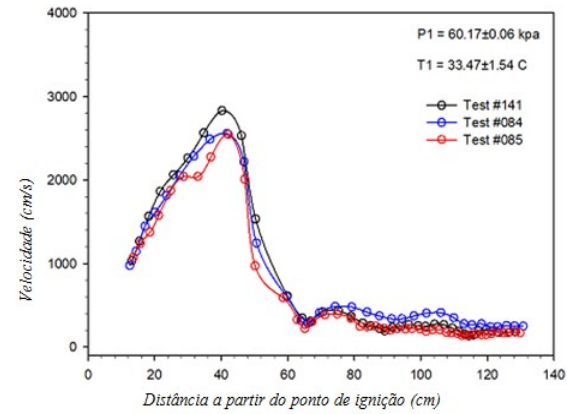
Razão de equivalência: 1,10.

Figura 22 - Velocidades de chama para pressão inicial de 60 kPa.

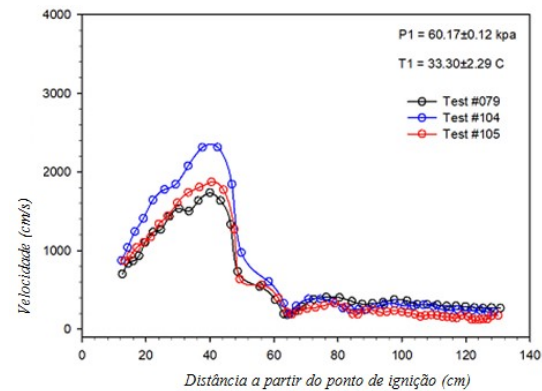
(conclusão)



Razão de equivalência: 1,20.



Razão de equivalência: 1,30.

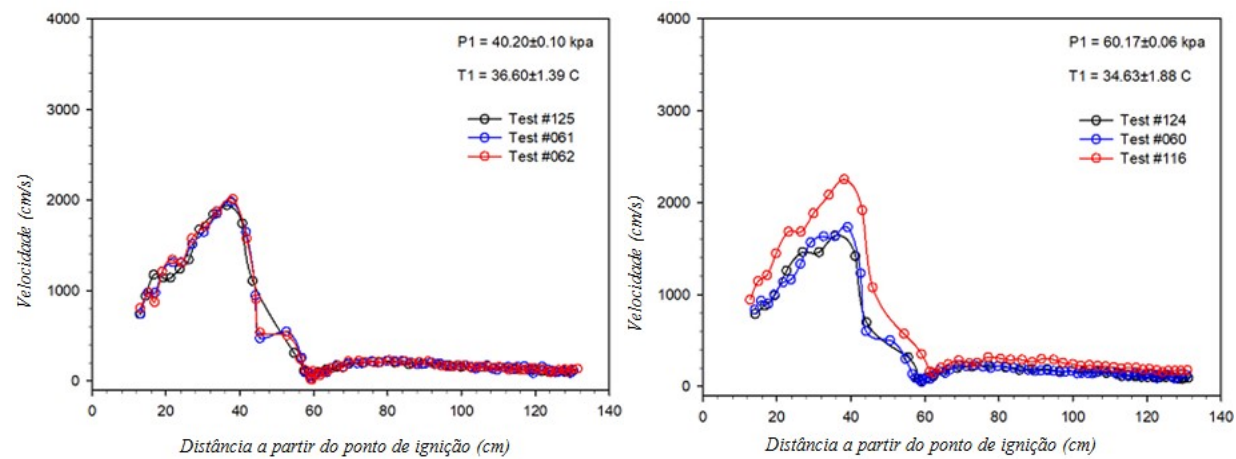


Razão de equivalência: 1,40.

Fonte: Autoria própria.

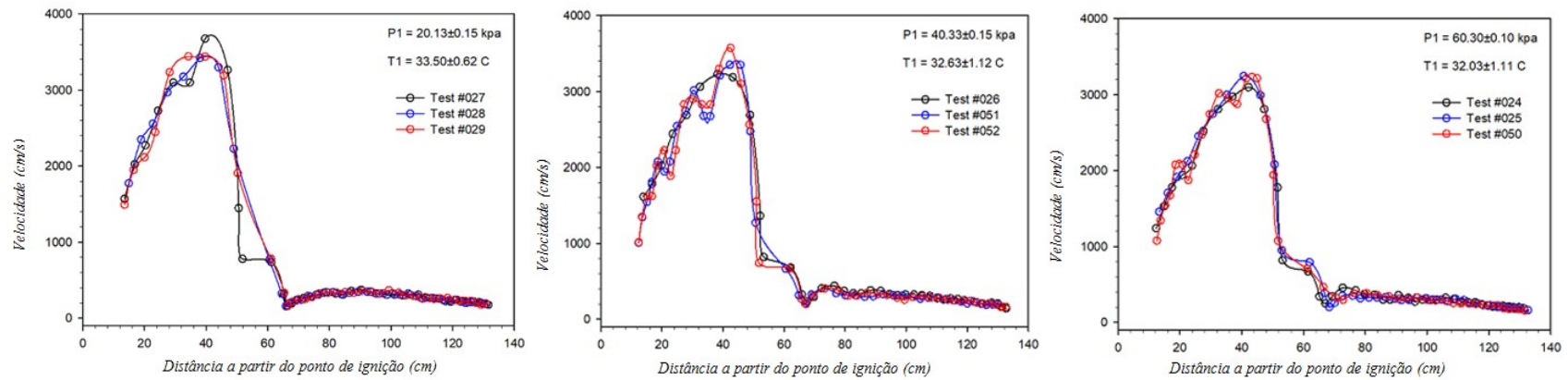
Nas figuras seguintes, vamos olhar, para cada valor para a razão de equivalência, como se comporta a frente de chama com a variação da pressão inicial.

Figura 23 - Ensaios com razão de equivalência de 0,8. Pressões iniciais de 40 e 60 kPa; com 20 kPa não houve ignição.



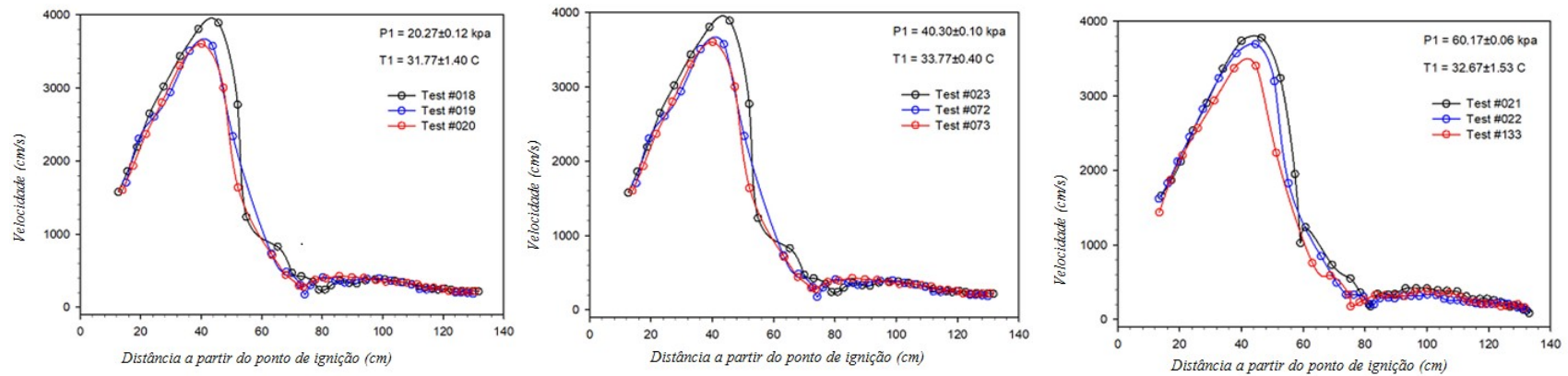
Fonte: Autoria própria.

Figura 24 - Ensaio com razão de equivalência de 0,9. Pressões iniciais de 20, 40 e 60 kPa.



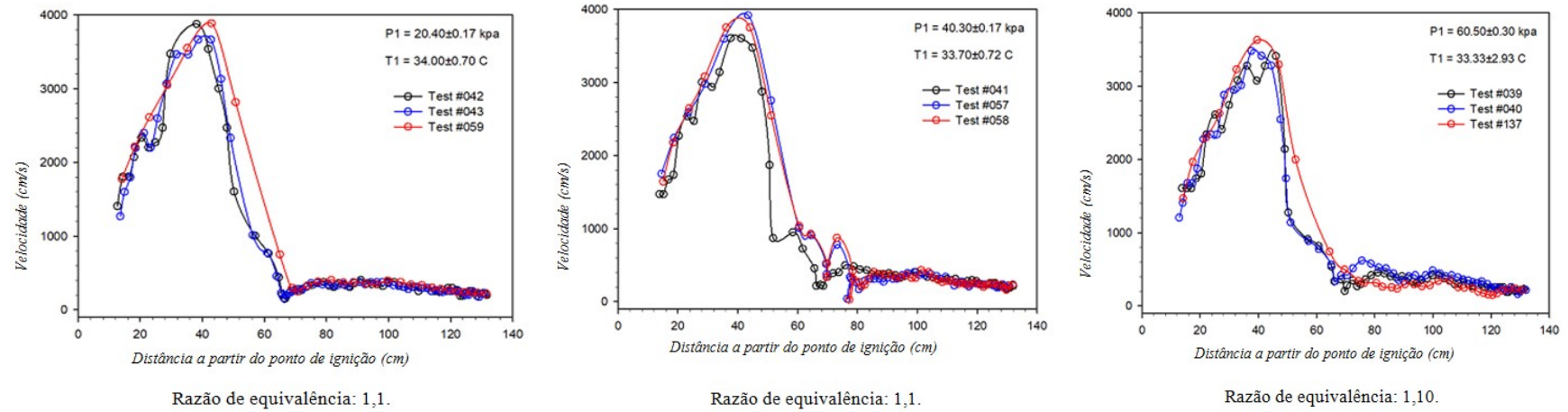
Fonte: Autoria própria.

Figura 25 - Ensaio com razão de equivalência de 1,0, pressões iniciais de 20, 40 e 60 kPa.



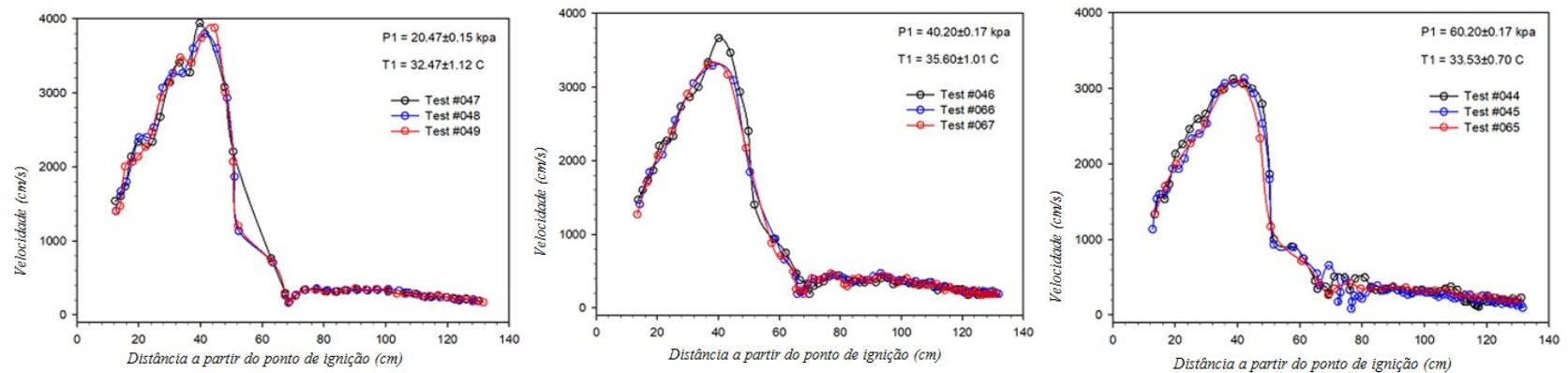
Fonte: Autoria própria.

Figura 26 - Ensaio com razão de equivalência de 1,1, pressões iniciais de 20, 40 e 60 kPa.



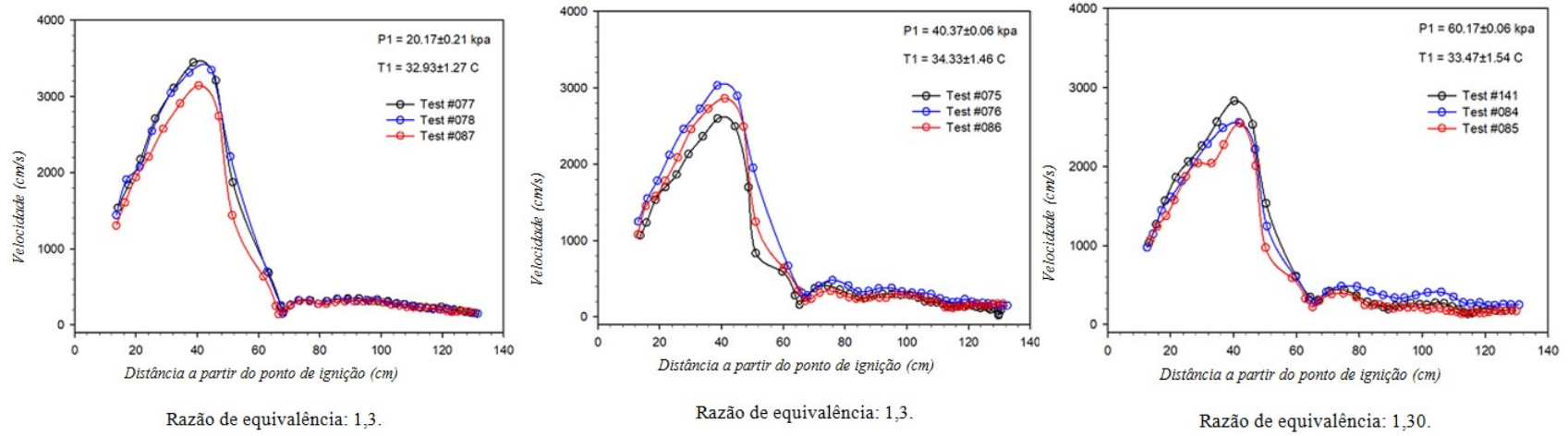
Fonte: Autoria própria.

Figura 27 - Ensaio com razão de equivalência de 1,2, pressões iniciais de 20, 40 e 60 kPa.



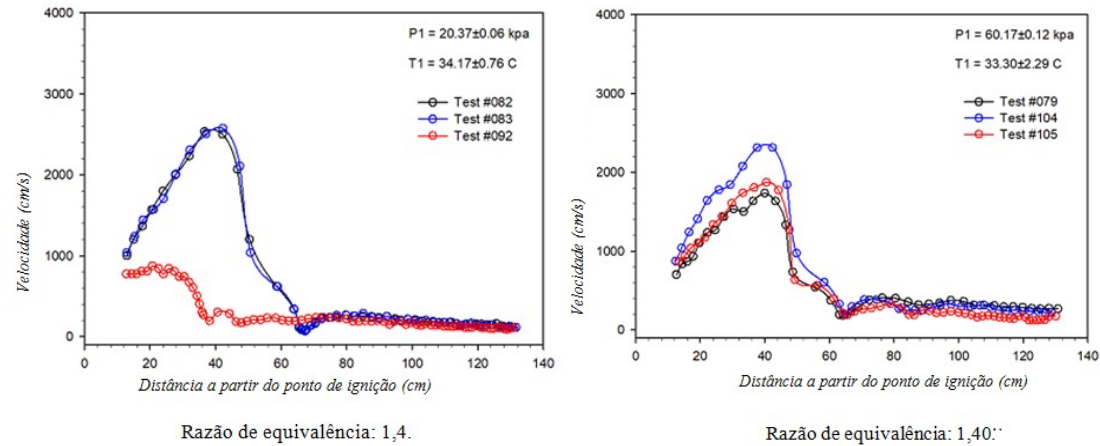
Fonte: Autoria própria.

Figura 28 - Ensaios com razão de equivalência de 1,3, pressões iniciais de 20, 40 e 60 kPa.



Fonte: Autoria própria.

Figura 29 - Ensaios com razão de equivalência de 1,4, pressões iniciais de 20, 40 e 60 kPa.



Fonte: Autoria própria.

Analisando-se os resultados dos ensaios realizados, percebemos a variação das velocidades em função da variação da razão de equivalência da mistura e da pressão inicial (SILEGHEM et al., 2014). O aumento da razão de equivalência não representa exatamente um aumento na concentração volumétrica do combustível na mistura. Isto vai depender da pressão. Se estamos sob uma pressão menor que a normal, a concentração por unidade de volume da mistura torna-se menor para uma mistura inicialmente dita estequiométrica. Mas, é sabido que sob pressões menores a velocidade de ondas de chama é maior. Se considerarmos que a taxa de combustão é constante para determinada mistura, se estivermos em um ambiente com pressão menor, onde as moléculas combustíveis estão mais distantes entre si, a velocidade com que a frente de chama se desenvolverá será necessariamente maior para alcançar toda a mistura que será queimada. Então é necessário determinar-se qual é o ponto no qual sob determinada concentração e pressão, teremos o pico de velocidade para temperatura normal (em torno de 300K), ou outra. Nos experimentos aqui realizados a temperatura foi a ambiente sempre. É sabido pela literatura existente que o pico de velocidade de combustão em misturas (pré) ocorre com razão de equivalência igual a 1,1, ou entre 1,0 e 1,1. Nos experimentos realizados pode-se observar a alteração das velocidades com a mudança de pressão inicial para mesma razão de equivalência. O pico de velocidade ocorreu entre razão de equivalência situada entre 1,0 e 1,1, em experimentos com pressões mais baixas, ficando em torno de 4000 cm/s com a pressão inicial de 40 kPa, com pouca variação com a pressão inicial em outros experimentos com a pressão inicial próxima a este valor. Entretanto, apesar de o pico ser praticamente o mesmo, ele ocorre mais cedo em experimentos com pressões mais baixas.

Durante os ensaios, no desenvolvimento das frentes de chama observou-se o surgimento de chamas em forma de tulipa. A formação de chamas tulipa merece ser bem estudada. Seu desenvolvimento foi objeto de muitos trabalhos publicados, experimentais, numéricos e teóricos. Para analisar-se este comportamento de uma onda de chama, deve-se escolher se isso será do ponto de vista experimental, numérico, teórico ou pela observação (XIAO et al., 2015). Para este trabalho, optou-se por uma observação através de experimentos.

Observando-se o comportamento da frente de chama no interior do tubo, pode-se imaginar que a instabilidade de Rayleigh-Taylor é a causa principal da formação de chamas tulipa. Isto condiz com a teoria na qual um fluido com densidade menor e velocidade maior (onda de chama) encontra-se com um fluido com densidade maior, que está em repouso ou em velocidade menor (KULL, 1991). Este fenômeno é válido e pode ser bem observado em incêndios de combustíveis de grandes proporções, onde existe uma interação grande dos

produtos de combustão com os gases mais frios e, conseqüentemente, mais densos da atmosfera. Para tubos confinados, como no nosso caso, existem outras variáveis, como veremos à frente.

A teoria de Rayleigh-Taylor pode explicar, mas não entenderemos o fenômeno da formação da chama tulipa somente sabendo o fundamento teórico. Esta deformação da chama aparece em vários fenômenos que envolvem combustão com liberação ou encontro de frentes de gases. Exemplos são explosões e combustão em motores (XIAO et al., 2017; XIAO et al., 2015). Uma frente de chama pré misturada confinada em um tubo com as extremidades fechadas é na verdade um processo complexo, que envolve ignição, desenvolvimento de uma chama laminar e complicações da interação entre a chama e as camadas limites viscosas e térmicas que existem entre a frente de chama e as paredes do tubo que a encerra. Além disso, a frente de chama deslocando-se provoca uma onda acústica no interior do tubo confinado. Esta onda acústica interage com a onda de chama até o final do tubo, quando o aumento da velocidade provoca uma onda sonora perfeitamente audível no interior do tubo.

A dinâmica de chamas tulipa em tubos confinados foi investigada por Xiao e outros em várias oportunidades. Através de imagens Schlieren, (XIAO et al., 2013) perceberam que uma segunda chama tulipa aparece com uma série de frentes secundárias logo após o colapso da primeira. Concluíram que a mudança na pressão com o contato da chama com as paredes do tubo é responsável pela periódica desaceleração da chama e participa da formação das chamas tulipa distorcidas que daí aparecem. Analogamente, o fenômeno da inversão da chama quando do surgimento da chama convexa sugere que a súbita desaceleração da chama atua da mesma maneira que a instabilidade de Taylor na formação das chamas tulipa.

Nos ensaios realizados, teve-se uma preocupação maior com as variáveis inicialmente programadas para serem analisadas, principalmente a pressão inicial e a razão de equivalência das misturas. Entretanto, a literatura faz muita referência a influência da pressão sobre o comportamento da frente de chama, como visto acima. Neste trabalho, a realização de experimentos com pressões mais altas não era possível, pois a pressão interna da mistura em combustão era limitada pela resistência mecânica do tubo de vidro. Aqui, como proposto inicialmente, deu-se uma importância maior à medição da velocidade e observação do desenvolvimento da frente de chama no interior do tubo. Por isso, foi escolhido o tubo de vidro, que acabou tornando-se um limitante para as pressões internas. Desta forma, a observação de ensaios com pressões iniciais superiores ficou comprometida, e não pôde ser feita.

Para se observar o comportamento em pressões mais altas sem comprometimento com a segurança dos envolvidos e do equipamento, aumentou-se o comprimento do tubo inicialmente utilizado, de maneira que o próprio deslocamento da frente de chama causasse um aumento da

pressão interna na zona não queimada de material. Assim, chegaríamos a uma pressão maior, com este aumento sendo mais progressivo e provocado pelo próprio fenômeno em observação. Para evitar-se acidentes, foi instalada uma válvula limitadora de pressão em uma extremidade do tubo, regulada para abrir-se quando a pressão interna alcançasse 300 kPa. A válvula limitadora foi instalada na extremidade final do tubo, para onde a frente de chama se deslocava. Este novo tubo, com comprimento maior, foi acoplado ao inicial através de uma seção metálica onde futuramente poderia ser montado um extintor de chamas (*flame arrester*). Este é um dos desdobramentos deste trabalho.

A oportunidade de modificarmos o duto de confinamento do experimento sem modificarmos o restante do aparato pode nos mostrar qual é a influência da alteração apenas de comprimento, mantendo-se a razão de aspecto, na formação e desenvolvimento de chamas pré-misturadas confinadas. Logicamente, quando alteramos o comprimento do tubo de confinamento estamos alterando a massa de mistura no experimento.

Com este tubo de comprimento maior pôde-se observar mais frequentemente o aparecimento de chamas tulipa. Se entendermos melhor o porque deste aumento da frequência de surgimento das chamas tulipa em tubos mais longos poderemos conhecer melhor o fenômeno e sua interação com o tubo, as paredes do tubo e com a mistura gasosa remanescente à frente e já queimada atrás da chama. Chamas tulipa são largamente estudadas por vários autores, como tentou-se mostrar acima, porém as causas de sua formação e seu desenvolvimento são apresentadas diferentemente por muitos deles. Não existe ainda uma teoria fechada sobre seu surgimento e desenvolvimento, mas consegue-se saber que muitas são as variáveis que influenciam uma chama tulipa. As principais encontradas na literatura são: razão de equivalência, pressões inicial e ambiente, razão de aspecto do tubo que contém a mistura, tipo de mistura gasosa, temperaturas envolvidas e algumas outras. Em artigos publicados, dependendo do enfoque do autor, alguma das variáveis citadas vai ser considerada a dominante, ou não. Isto leva a conclusões e teorias sobre a formação das chamas tulipa distintas entre si.

Outro fato digno de nota foi a variação (oscilação) da velocidade da frente de chama na região próxima ao final do tubo. Claramente, apareceu uma perturbação acústica, que foi aumentando com a redução da seção de tubo disponível e que interferiu muito na velocidade da chama no final do tubo. Isto pôde ser observado e poderia ser medido principalmente para experimentos com razão de equivalências mais altas.

Seguindo o raciocínio acima adotado, podemos observar a influência que a pressão inicial provoca na velocidade da chama, que é mais percebido para as misturas com as razões de equivalência mais altas. Isso nos mostra o comportamento das misturas com a variação da razão

de mistura e da pressão inicial. Razões de mistura mais altas, isto é, misturas mais ricas, tem sua velocidade de queima menor que as misturas próximas as razões estequiométricas, assim como quando iniciadas sob uma pressão maior.

Os resultados para pressão medidos encontram-se na Figura 30. A pressão medida refere-se ao valor da pressão à frente de onda de chama. Estes valores para a pressão interna foram medidos até que alcançasse um valor máximo de 3,0 bar. Este é o máximo que o tubo de vidro suporta antes de se romper. Uma válvula reguladora de pressão evitava que o valor alcançado ultrapassasse o limite de resistência do tubo de vidro.

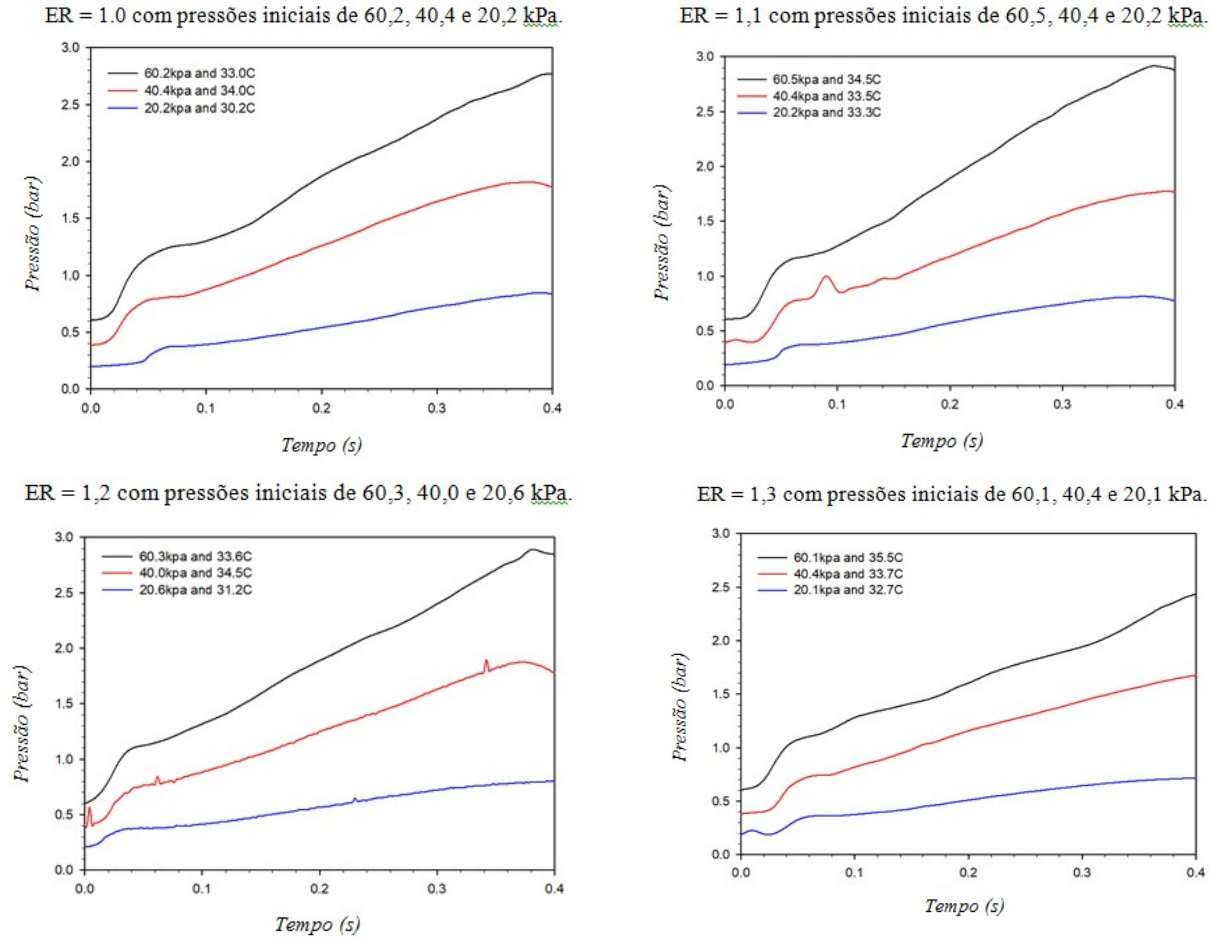
A pressão medida atrás da frente de chama não é a única responsável pela sua aceleração. A aceleração da frente de chama é causada pela diferença entre a pressão atrás da frente de chama e em sua frente. Esta diferença acelerará a frente de chama. Devemos olhar a variação da velocidade da frente de chama com olhos no aumento da pressão na massa de gases queimados devido à queima do etanol no interior do tubo e a pressão dos gases frescos à sua frente, que aumenta com o aumento da pressão dos gases aquecidos.

Pode-se considerar os ensaios apresentados para as velocidades de duas maneiras: a partir da pressão inicial para uma certa razão de equivalência e sob o ponto de vista da variação da razão de equivalência para uma certa pressão inicial.

Durante os ensaios com misturas mais ricas, percebeu-se a formação mais frequente de chamas tulipa e o aparecimento de ondas sonoras no interior do tubo, com uma frequência relativamente alta, como relatado na literatura. O mecanismo de formação de chamas tulipa foi explicado por alguns autores como sendo um fenômeno hidrodinâmico apenas (PONIZY et al., 2014). Outros, através de imagens Schlieren, mostram que uma segunda chama tulipa aparece como consequência da chama em andamento (XIAO et al., 2013) e a interação com as paredes do tubo.

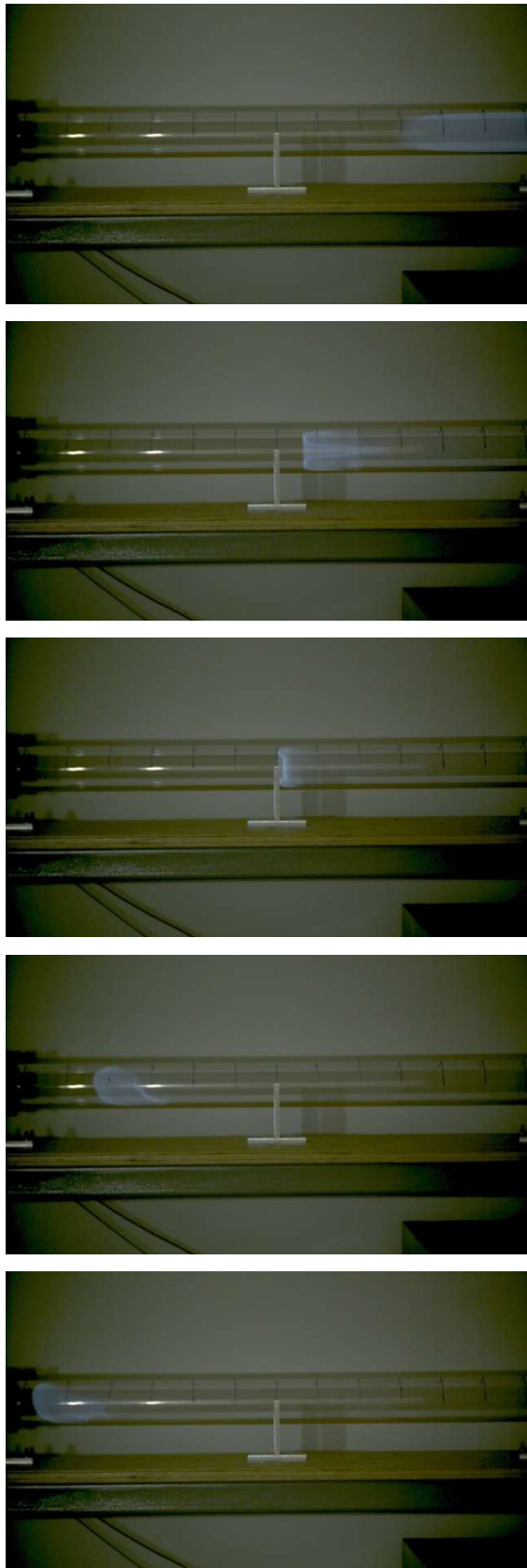
Como exemplo, algumas imagens de chamas tulipa observadas durante os ensaios estão na Figura 31. Todas foram feitas durante o mesmo disparo em momentos distintos. O intervalo entre as imagens não é constante, mas procurou-se ilustrar a formação da chama tulipa. Foram escolhidos instantes para se observar representativos do desenvolvimento da chama. O disparo foi feito em uma mistura estequiométrica, e com pressão inicial de 20 kPa.

Figura 30 - Variação da pressão com o tempo no interior do tubo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 31 - Cinco instantes de um mesmo disparo. Razão de equivalência de 1,0 e pressão inicial de 20 kPa.



Fonte: Autoria própria.

4.2 TUBO DE 265 CM

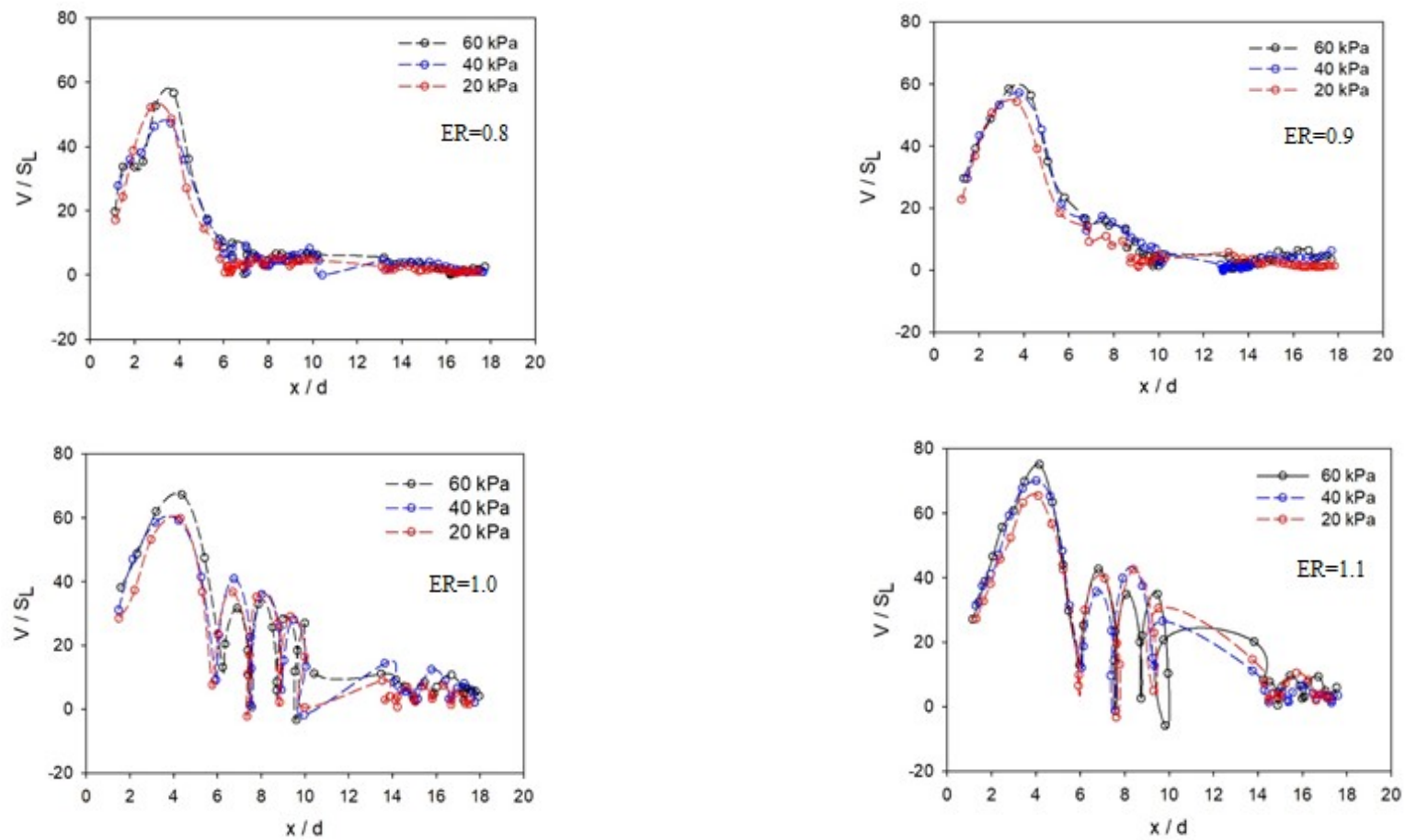
Na segunda fase, com o tubo de 265 cm, foram realizados 47 ensaios. Com os dados obtidos com o tubo de comprimento maior, pode-se analisar o comportamento da frente de chama novamente sob as novas condições (com alteração no comprimento do tubo), e esta mudança no tubo mostrou-se muito significativa. Os dados obtidos encontram-se na Figura 32. Pensando em aproveitar estes dados em um artigo em preparação, usaram-se valores adimensionalizados para as velocidades. Pode-se perceber claramente a grande desaceleração da chama quando se aproxima do final do tubo. Isto é bem visível nas imagens adquiridas durante os ensaios, apresentadas nas Figuras 33 e 34.

Esta desaceleração merece ser melhor estudada em trabalhos futuros. Aparentemente, esta desaceleração acontece devido a fatores hidrodinâmicos, provocados pelo deslocamento da onda de chama e sua interação com as paredes e o fundo do tubo. Quando a onda de chama caminha na direção do final do tubo, a massa gasosa de mistura que está a sua frente é empurrada e comprimida. O aumento da pressão causa esta desaceleração na frente de chama. O aumento da pressão “freia” a frente de chama que, ao desacelerar-se alivia a pressão sobre os gases no fundo do tubo. Com este alívio, a pressão novamente aumenta e a onda de chama acelera-se novamente para frente, e assim sucessivamente. Como são gases compressíveis encapsulados, isto pode repetir-se até que o fenômeno se complete, quer dizer, a frente de chama atinja o fundo do duto. Tem-se, então, este movimento cíclico até a extinção da frente de chama. Isto merece ser melhor estudado, em uma bancada de testes que consiga medir vários dados de variação da pressão e deslocamentos pequenos, com precisão.

As figuras abaixo (figuras 33 e 34) foram retiradas de uma filmagem feita em alta velocidade (640 quadros por segundo) e copiadas para este trabalho. A frente de chama visualmente freia-se e acelera-se novamente. Os instantes registrados são variados conforme a conveniência para que se obtenha um melhor registro.

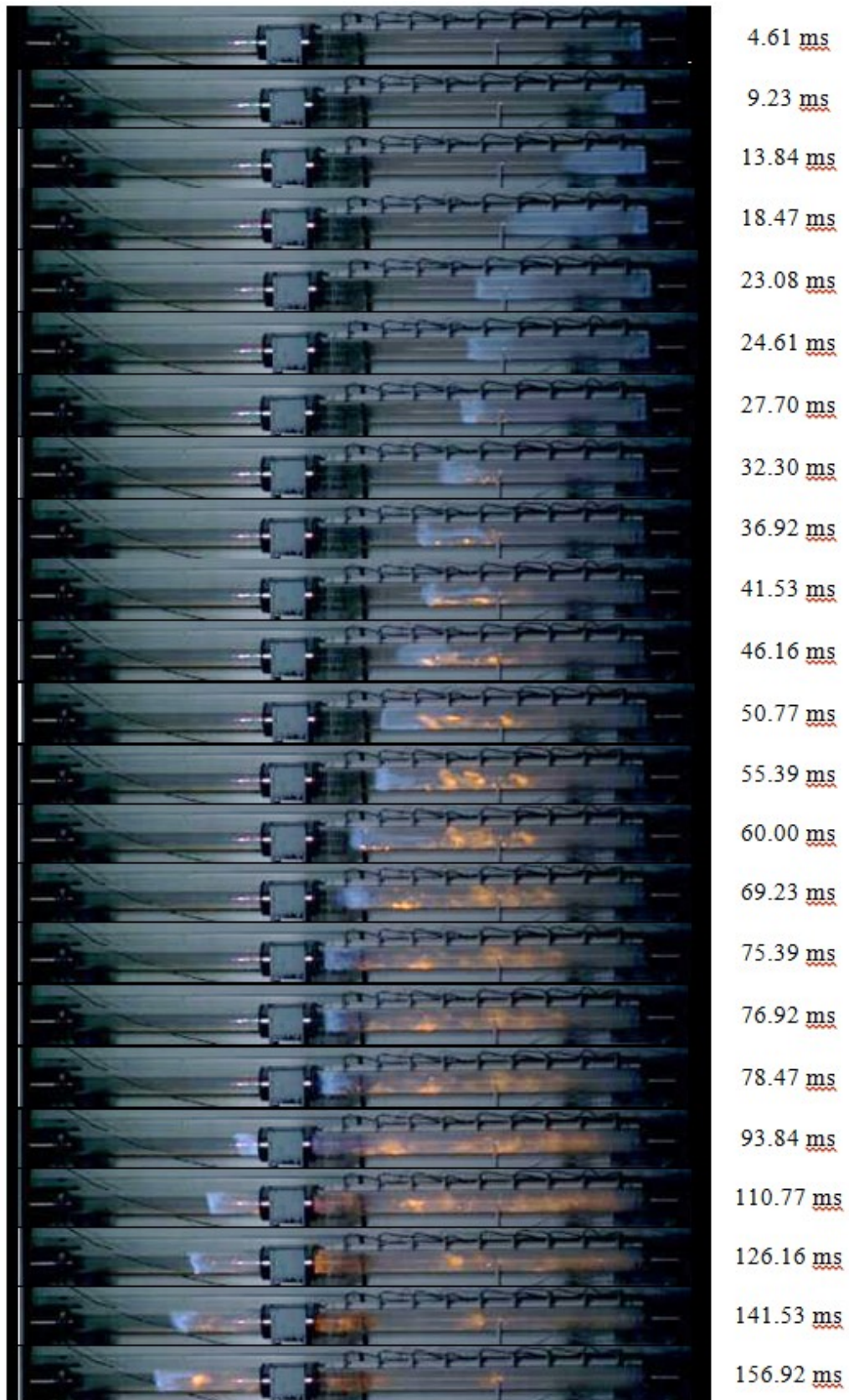
Pode-se também observar como a velocidade da frente de chama varia com a razão de equivalência. Isto já foi objeto de registro anteriormente, mas aqui pôde-se ter um registro visual deste efeito.

Figura 32 - Velocidades adimensionais de chama para diferentes pressões iniciais e razões de equivalência.



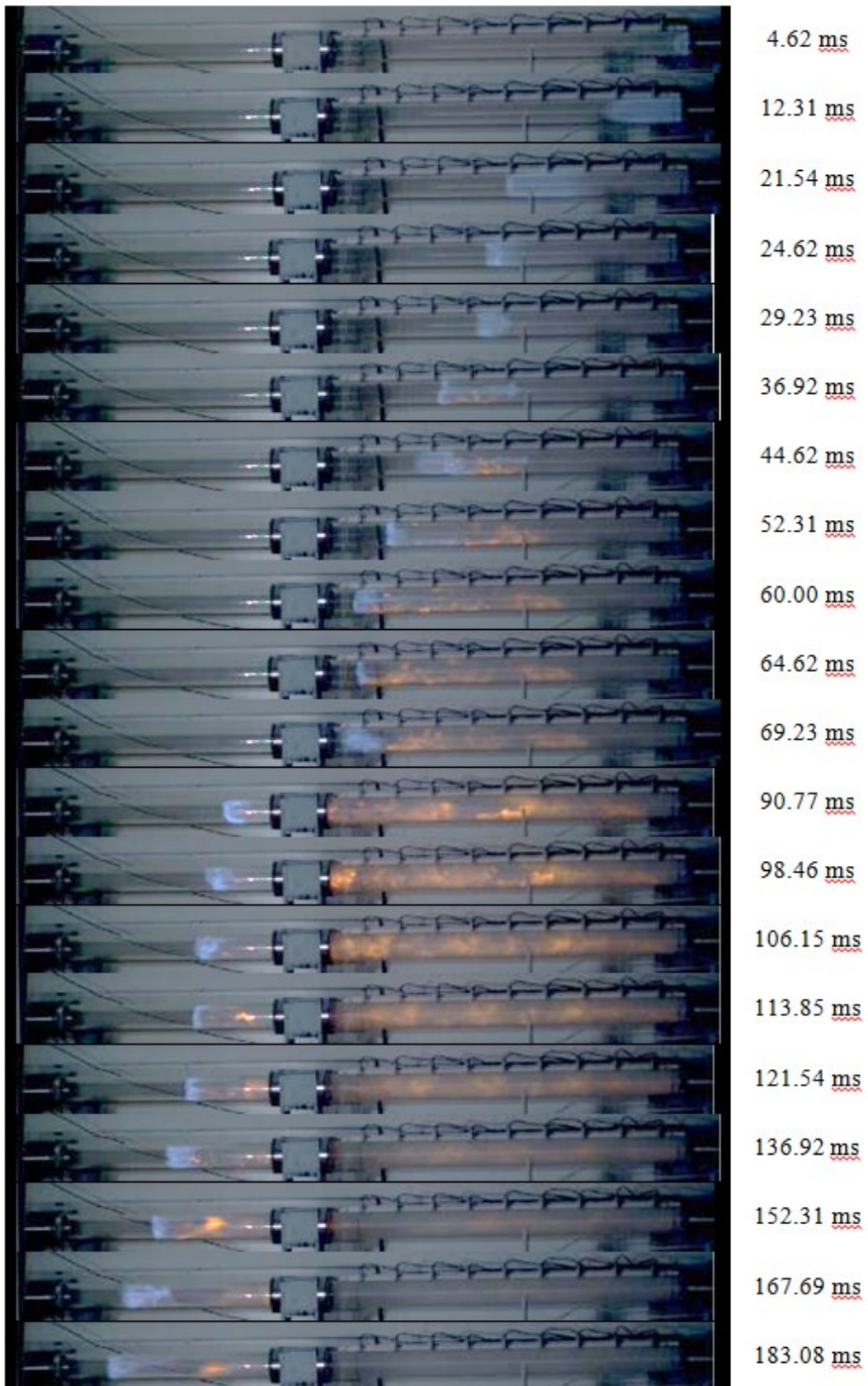
Fonte: Mendiburu et al., (2019).

Figura 33 – Observação experimental da chama de etanol-ar com razão de equivalência igual a 1,00 e pressão inicial de 60 kPa.



Fonte: Autoria própria.

Figura 34 – Observação experimental da chama de etanol-ar com razão de equivalência igual a 1,10 e pressão inicial de 60 kPa.



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como foco principal a análise dos efeitos da razão de equivalência e da pressão inicial na velocidade de queima de misturas de etanol com ar em um tubo confinado. A medição da velocidade foi feita em frentes de chama se desenvolvendo no interior do tubo de vidro que permitiu observar e filmar todo o processo de combustão que se desenrolou a partir da ignição, feita através de uma centelha elétrica em um extremo do tubo. As imagens foram obtidas com uma câmera CCD de alta velocidade e posteriormente analisadas com o software Tracker para determinação das velocidades para diferentes razões de equivalência e pressões iniciais. A pressão final, por questões de segurança e por estar no interior de um tubo de vidro, foi limitada a 300 kPa.

Para um tubo com uma extremidade aberta, pode-se demonstrar que no início da onda de chama, logo após a ignição, a chama acelera primeiro à uma taxa constante, mas logo depois a chama começa a acelerar rapidamente a uma taxa exponencial, até o final do tubo que a encerra. Este processo de auto aceleração é resultado de efeitos combinados de expansão térmica e confinamento lateral (KURDYUMOV e MATALON, 2015). Não é este o nosso caso, em que as duas extremidades do tubo são fechadas e o aumento da pressão a frente da onda de chama provoca uma redução em sua aceleração.

A interação da frente de chama com o fundo do tubo produz uma onda acústica, que interfere no caminhamento da onda de chama, modificando sua forma e sua velocidade. Esta onda acústica pode ser facilmente percebida no exterior do tubo.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

- Produzir ensaios com chamas tulipa, com possibilidade de medição da pressão na região dos reagentes.
- Observar a formação de ondas acústicas no interior do tubo durante a propagação da chama e sua influência na aceleração da onda de chama.
- Projetar e construir um equipamento para ensaios com pressões iniciais maiores.
- Realizar ensaios comparativos com outros combustíveis e oxidantes.
- Realizar ensaios com iniciação no centro do tubo.
- Medir-se a pressão à frente e atrás da frente de chama.
- Medir-se a variação da temperatura e da pressão diretamente na frente de chama.
- Utilizar-se o equipamento construído para ensaios com supressores de chamas.
- Realizar-se ensaios com tubo aberto em uma das extremidades.

REFERÊNCIAS

- AGHSAEE, M. *et al.* Experimental study of the kinetics of ethanol pyrolysis and oxidation behind reflected shock waves and in laminar flames. **Proceedings of the Combustion Institute**, Pittsburg, PA, USA, v. 35, n. 1, p. 393–400, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2014.05.063>. Acesso em: 19 ago. 2018.
- AKKERMAN, V'Yacheslav *et al.* Accelerating flames in cylindrical tubes with nonslip at the walls. **Combustion and Flame**, Pittsburgh, v. 145, n. 1–2, p. 206–219, 2006.
- BARR, P. K.; SAWYER, R. F. Numerical and experimental study of "tulipe" flame formation in a closed vessel. **Proceedings of Symposium (International) on Combustion**, Pittsburgh, p. 1291-1301, 1996.
- BEECKMANN, J.; CAI, L.; PITSCH, H. Experimental investigation of the laminar burning velocities of methanol, ethanol, n-propanol, and n-butanol at high pressure. **Fuel**, Amsterda, p. 340–350, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.09.025>. Acesso em: 19 ago. 2018.
- BRADLEY, D.; LAWES, M.; MANSOUR, M. S. Explosion bomb measurements of ethanol-air laminar gaseous flame characteristics at pressures up to 1.4 MPa. **Combustion and Flame**, Pittsburgh, p. 1462-1470. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.02.007>. Acesso em: 19 ago. 2018.
- BROUSTAIL, G. *et al.* Experimental determination of laminar burning velocity for butanol and ethanol iso-octane blends. **Fuel**, Amsterdã, v. 90, n. 1, p. 1–6, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2010.09.021>. Acesso em: 19 ago. 2018.
- CARVALHO, J.A. *et al.* **Combustão aplicada**, Florianópolis: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, 2018. 372 p.
- CLANET, C.; SEARBY, G. On the “tulip flame” phenomenon. **Combustion and flame**, Pittsburgh, v. 105, I 4, n. 95, p. 225–238, 1996.
- CORONADO, C. J. R. *et al.* Flammability limits of hydrated and anhydrous ethanol at reduced pressures in aeronautical applications. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 280, p. 174-184, 2014.
- DUNN-RANKIN, D.; SAWYER, R. F. Tulip flames: changes in shape of premixed flames propagating in closed tubes. **Experiments in Fluids**, v. 2, p. 130-140, Cambridge, 1998. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s003480050160>. Acesso em: 28 nov. 2017.
- EGOLFOPOULOS, Fokion N.; DU, D. X.; LAW, Chung K. A study on ethanol oxidation kinetics in laminar premixed flames, flow reactors, and shock tubes. **Proceedings of Symposium (International) on Combustion**, Pittsburgh, v. 24, n. 1, p. 833–841, 1992. Acesso em: 28 jan. 2018.
- EISAZADEH-FAR, Kian *et al.* Laminar burning speeds of ethanol/air/diluent mixtures. **Proceedings of the Combustion Institute**, Pittsburgh, v. 33, n. 1, p. 1021–1027, 2011.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2010.05.105>. Acesso em: 09 set. 2015.

EL-MAHALLAWY, Fawzy *et al.* Combustion fundamentals. *In*: Fawzy El-Mahallawy; Saad El-Din Habik. **Fundamentals and technology of combustion**. Elsevier Science: Amsterdã, 2002. cap 1, p. 1-75.

FAIRWEATHER, M. Studies of premixed flame propagation in explosion tubes. **Combustion and Flame**, Pittsburgh, PA, USA, v. 116, p. 504–518, 1999.

FASTEC. **Câmeras de alta velocidade**. Disponível em: <https://www.fastecimaging.com/fastec-high-speed-cameras-ts-series/>. Acesso em: 18 mar. 2019.

GLASSMAN, Irvin; YETTER, Richard. **Combustion**. 5th ed. New York: Academic Press, 2015. 575 p.

GRUNE, J. *et al.* Experimental investigation of hydrogen-air deflagrations and detonations in semi-confined flat layers. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, Amsterdã, v. 26, n. 2, p. 317–323, 2013.

KATOCH, Amit *et al.* Measurement of laminar burning velocities of methanol-air mixtures at elevated temperatures. **Fuel**, Amsterdã, v. 182, p. 57-63, 2016.

KONNOV, A. A.; MEUWISSEN, R. J.; GOEY, L. P.H. The temperature dependence of the laminar burning velocity of ethanol flames. **Proceedings of the Combustion Institute**, Pittsburgh, v. 33, n. 1, p. 1011–1019, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2010.06.143>. Acesso em: 15 jul. 2018.

KULL, H. J. Theory of the Rayleigh-Taylor instability. **Physics Reports**, Fed. Rep. Germany, v. 206, n. 5, p. 197–325, 1 ago. 1991. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037015739190153D>. Acesso em: 8 nov. 2018.

KURDYUMOV, Vadim N.; MATALON, Moshe. Self-accelerating flames in long narrow open channels. **Proceedings of the Combustion Institute**, Pittsburgh, v. 35, n. 1, p. 921–928, 1 jan. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1540748914000856?via%3Dihub>. Acesso em: 23 ago. 2018.

LEFEBVRE, Arthur H.; BALLAL, Dilip R. Gas turbine combustion: alternative fuels and emissions, 2010. Disponível em: <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Gas+Turbine+Combustion#0%5Cnhttp://www.lavoisier.fr/livre/notice.asp?ouvrage=1795973%5Cnhttps://www.crcpress.com/Gas-Turbine-Combustion>. Acesso em: 15 jul. 2018.

LIAO, S. Y. *et al.* Determination of the laminar burning velocities for mixtures of ethanol and air at elevated temperatures. **Applied Thermal Engineering**, Amsterdã, v. 27, n. 2–3, p. 374–380, 2007.

LIBERMAN, M. A. *et al.* Acta Astronautica Deflagration-to-detonation transition in highly reactive combustible mixtures. **Acta Astronautica**, Amsterdã, v. 67, n. 7–8, p. 688–701, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2010.05.024>. Acesso em: 23 ago. 2018.

MENDIBURU, A. Z. *et al.* Characterization of the flame front inversion of ethanol–air deflagrations inside a closed tube, **Energy**, Pittsburgh, v. 187, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019>. Acesso em: 15 jun. 2019.

MITU, M. *et al.* Characteristics of ethanol. **Safety**, Bucureste, p. 6–9, 2006.

PETCHENKO, Arkady *et al.* Violent folding of a flame front in a flame-acoustic resonance. **Physical Review Letters**, New York, v. 97, n. 16, p. 5–8, 2006.

PONIZY, Bogdan; CLAVERIE, Alain; VEYSSIÈRE, Bernard. Tulip flame: the mechanism of flame front inversion. **Combustion and Flame**, Pittsburgh, v. 161, n. 12, p. 3051–3062, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.06.001>. Acesso em: 28 jan. 2014.

SILEGHEM, L. *et al.* Laminar burning velocities of primary reference fuels and simple alcohols. **Fuel**, Pittsburgh, v. 115, jan 2014, p. 32-40. Acesso em: 31 ago. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236113006030>.

URNS, Stephen. **An introduction to combustion**. 2nd. ed. New York: McGraw Hill, 2000.

VELOO, Peter S. *et al.* A comparative experimental and computational study of methanol, ethanol, and n-butanol flames. **Combustion and Flame**, Pittsburgh, v. 157, n. 10, p. 1989–2004, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.04.001>. Acesso em: 04 set. 2015.

VOURLIOTAKIS, George; SKEVIS, George; FOUNTI, Maria A. Some aspects of combustion chemistry of C1-C2 oxygenated fuels in low pressure premixed flames. **Proceedings of the Combustion Institute**, Pittsburgh, v. 35, n. 1, p. 437–445, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2014.06.060>. Acesso em: 13 jun. 2016.

XIAO, Huahua *et al.* An experimental study of distorted tulip flame formation in a closed duct. **Combustion and Flame**, Pittsburgh, v. 160, n. 9, p. 1725–1728, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.03.011>. Acesso em: 19 nov. 2017.

XIAO, Huahua *et al.* Dynamics of premixed hydrogen/air flame in a closed combustion vessel. **International Journal of Hydrogen Energy**, Amsterdã, Netherlands, v. 38, n. 29, p. 12856–12864, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.07.082>. Acesso em: 30 out 2017.

XIAO, Huahua *et al.* Effects of ignition location on premixed hydrogen/air flame propagation in a closed combustion tube. **International Journal of Hydrogen Energy**, Amsterdã, Netherlands, v. 39, n. 16, p. 8557–8563, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.164>. Acesso em: 30 out 2017.

XIAO, Huahua *et al.* Experimental and numerical investigation of premixed flame

propagation with distorted tulip shape in a closed duct. **Combustion and Flame**, Pittsburgh, v. 159, n. 4, p. 1523–1538, 2012.

XIAO, Huahua; HOUIM, Ryan W.; ORAN, Elaine S. Effects of pressure waves on the stability of flames propagating in tubes. **Proceedings of the Combustion Institute**, Pittsburgh, v. 36, n. 1, p. 1577–1583, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2016.06.126>. Acesso em: 30 out. 2017.

XIAO, Huahua; HOUIM, Ryan W. ; ORAN, Elaine S. Formation and evolution of distorted tulip flames. **Combustion and Flame**, Pittsburgh, v. 162, n. 11, p. 4084–4101, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.08.020>. Acesso em: 30 out. 2017.

XU, Hanjun *et al* Experimental and modelling studies of the effects of methanol and ethanol addition on the laminar premixed low-pressure n-heptane/toluene flames. **Combustion and Flame**, Pittsburgh, v. 160, n. 8, p. 1333–1344, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.02.018>. Acesso em: 13 jun. 2016.

XU, Hanjun *et al*. Measurements and modeling study of intermediates in ethanol and dimethyl ether low-pressure premixed flames using synchrotron photoionization. **Combustion and Flame**, Pittsburgh, v. 158, n. 9, p. 1673–1681, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.01.004>. Acesso em: 04 set. 2015.

APÊNDICE

No APÊNDICE estão os dados adquiridos durante a preparação dos ensaios. São dados que podem ser necessários para que se consiga repetir, ou melhorar, o que aqui está apresentado. Na tabela A1, estão os dados utilizados na preparação dos ensaios com o tubo de 150 cm, na Tabela A2, os dados utilizados com o tubo de 265 cm.

Tabela A1 – Dados utilizados durante a primeira fase dos ensaios, com o tubo menor (150 cm de comprimento).

Número Teste	Razão Equiv.	Fuel %	T balao (C)	T tubo (C)	Pressão Inicial (kPa)
1	1,002	6,56	38,4	-	418
2	1,002	6,56	36,7	-	412
3	1,002	6,56	35,4	-	213
4	1,002	6,56	34,3	-	216
5	1,002	6,56	33,7	-	217
6	0,798	5,29	33,2	28,0	416
7	0,798	5,29	37,9	28,0	413
8	0,798	5,29	37,3	27,3	216
9	0,798	5,29	36,0	27,4	217
10	0,798	5,29	34,6	27,6	217
11	0,798	5,29	33,0	28,8	210
12	0,604	4,06	50,6	28,3	414
13	0,604	4,06	50,2	29,8	614
14	0,604	4,06	48,3	28,8	230
15	1,000	6,54	35,0	27,0	545
16	1,000	6,54	58,0	31,3	598
17	1,000	6,54	50,8	32,6	400
18	1,000	6,54	55,5	30,2	202
19	1,000	6,54	52,4	32,2	204
20	1,000	6,54	50,6	32,9	202

Número Teste	Razão Equiv.	Fuel %	T balao (C)	T tubo (C)	Pressão Inicial (kPa)
21	1,000	6,55	48,1	31,0	602
22	1,000	6,55	50,2	34,0	601
23	1,000	6,55	50,8	34,0	402
24	0,900	5,93	50,7	31,9	602
25	0,900	5,93	50,1	33,2	603
26	0,900	5,93	48,1	33,9	402
27	0,900	5,93	47,0	34,2	201
28	0,900	5,93	51,0	33,0	203
29	0,900	5,93	48,7	33,3	200
30	0,800	5,31	52,3	32,0	602
31	0,800	5,31	52,2	32,7	401
32	0,800	5,31	51,0	32,9	201
33	0,800	5,31	49,5	32,9	201
34	0,700	4,67	60,0	32,0	601
35	0,700	4,67	52,4	33,5	602
36	0,700	4,67	51,2	31,9	405
37	0,700	4,67	54,4	33,7	203
38	0,700	4,67	53,9	31,8	203
39	1,100	7,16	46,7	34,5	605
40	1,100	7,16	47,7	35,5	608
41	1,100	7,16	48,5	33,1	404
42	1,100	7,16	48,8	34,0	205
43	1,100	7,16	51,6	34,7	205
44	1,200	7,75	45,2	32,8	600
45	1,200	7,75	50,1	34,2	603
46	1,200	7,75	49,4	34,5	400
47	1,200	7,75	49,1	33,3	203
48	1,200	7,75	46,8	32,9	205
49	1,200	7,75	50,2	31,2	206
50	0,900	5,93	50,8	31,0	604

Número Teste	Razão Equiv.	Fuel %	T balao (C)	T tubo (C)	Pressão Inicial (kPa)
51	0,900	5,93	49,2	31,8	403
52	0,900	5,93	48,7	32,2	405
53	1,400	8,93	63,7	33,9	606
54	1,400	8,93	67,0	35,0	605
55	1,400	8,93	64,0	36,0	406
56	1,100	7,16	61,0	32,5	602
57	1,100	7,16	57,4	33,5	404
58	1,100	7,16	53,5	34,5	401
59	1,100	7,16	51,7	33,3	202
60	0,800	5,31	42,63	33,7	602
61	0,800	5,31	54,0	35,9	403
62	0,800	5,31	52,9	35,7	402
63	0,800	5,31	54,5	34,3	203
64	0,800	5,31	53,0	34,6	203
65	1,200	7,75	63,1	33,6	603
66	1,200	7,75	59,8	36,5	403
67	1,200	7,75	58,0	35,8	403
68	1,200	7,75	55,7	36,0	203
69	1,200	7,75	53,7	35,5	203
70	1,200	7,75	52,4	35,0	101
71	1,000	6,54	59,7	32,5	803
72	1,000	6,54	56,4	34,0	404
73	1,000	6,54	52,7	33,3	403
74	1,300	8,34	54,5	32,3	603
75	1,300	8,34	56,0	33,3	403
76	1,300	8,34	54,3	33,7	404
77	1,300	8,34	51,4	31,8	200
78	1,300	8,34	49,5	32,7	201
79	1,400	8,93	50,3	34,2	601
80	1,400	8,93	48,5	36,6	402

Número Teste	Razão Equiv.	Fuel %	T balao (C)	T tubo (C)	Pressão Inicial (kPa)
81	1,400	8,93	47,0	37,0	402
82	1,400	8,93	46,4	35,0	204
83	1,400	8,93	45,9	34,0	203
84	1,300	8,34	60,6	32,7	602
85	1,300	8,34	55,7	35,2	602
86	1,300	8,34	54,3	36,0	404
87	1,300	8,34	55,9	34,3	204
88	1,300	8,34	55,8	35,0	202
89	1,400	8,92	52,9	33,5	603
90	1,400	8,92	53,5	34,2	603
91	1,400	8,92	54,6	33,0	402
92	1,400	8,92	53,3	33,5	204
93	1,600	10,08	52,0	36,0	600
94	1,600	10,08	52,8	38,0	603
95	1,600	10,08	52,2	39,0	401
96	1,600	10,08	53,8	37,7	202
97	1,600	10,08	53,7	37,4	203
98	1,800	11,19	51,0	33,0	603
99	1,800	11,19	50,0	33,0	405
100	1,800	11,19	49,7	31,6	203
101	1,800	11,19	49,1	32,0	201
102	1,600	10,08	50,4	33,3	604
103	1,600	10,08	50,0	34,0	602
104	1,400	8,92	55,3	30,7	603
105	1,400	8,92	49,4	35,0	601
106	1,500	9,51	48,8	34,3	601
107	1,500	9,51	49,7	35,3	403
108	1,500	9,51	50,0	36,0	402
109	1,500	9,51	50,4	34,3	203
110	1,500	9,51	49,2	35,5	205

Número Teste	Razão Equiv.	Fuel %	T balao (C)	T tubo (C)	Pressão Inicial (kPa)
111	1,500	9,51	49,5	35,6	202
112	1,500	9,51	57,5	34,9	601
113	1,500	9,51	52,7	36,0	601
114	1,500	9,51	50,4	36,8	402
115	1,500	9,51	49,0	37,1	377
116	0,800	5,31	46,2	33,4	602
118	1,200	7,75	46,7	30,9	200
119	1,200	7,75	45,6	32,5	590
120	1,600	10,08	54,3	33,5	600
121	1,600	10,08	52,9	34,5	401
122	1,600	10,08	53,4	34,9	202
123	0,800	5,31	48,4	36,2	803
124	0,800	5,31	50,5	36,8	601
125	0,800	5,31	50,4	38,2	401
126	0,800	5,31	57,3	36,4	201
127	0,900	5,93	46,9	31,3	805
128	0,900	5,93	45,5	34,3	602
129	1,100	7,15	46,0	33,5	801
130	1,200	7,75	46,6	34,2	803
A PARTIR DAQUI O SENSOR DE PRESSAO DE 10 BAR FOI PARA O LADO DA IGNIÇÃO					
131	0,700	4,67	48,4	31,3	805
132	1,000	6,54	46,9	31,1	802
133	1,000	6,54	45,8	33,0	602
134	0,900	5,93	45,3	31,0	804
135	0,900	5,93	45,3	34,3	602
136	1,100	7,15	45,8	31,3	805
137	1,100	7,15	46,6	29,7	602
138	1,200	7,75	47,3	31,7	803
139	1,200	7,75	45,7	33,5	603

Número Teste	Razão Equiv.	Fuel %	T balao (C)	T tubo (C)	Pressão Inicial (kPa)
140	1,300	8,34	51,1	35,4	801
141	1,300	8,34	49,5	35,5	601
A PARTIR DESTE PONTO COMEÇAM OS TESTES COM O NOVO TUBO DE 150 CM					
142	1,000	6,54	51,1	29,2	602
144	1,000	6,54	54,6	31,6	401
145	1,000	6,54	53,3	33,7	400
146	1,000	6,54	53,1	33,1	202
147	1,000	6,54	52,1	33,8	202
148	1,400	8,92	49,1	33,0	605
149	1,400	8,92	48,3	35,2	600
150	1,400	8,92	49,5	34,6	402
151	1,400	8,92	50,3	34,5	201
152	1,400	8,92	49,6	33,2	201
153	1,300	8,34	50,8	33,2	601
154	1,300	8,34	50,0	33,7	400
155	1,300	8,34	47,6	36,8	403
156	1,300	8,34	50,7	33,6	201
157	1,300	8,34	50,1	34,3	202

Tabela A2 – Dados utilizados durante a segunda fase dos ensaios, com o tubo maior (265 cm de comprimento).

Numero Teste	Razão Equiv.	Pressão inicial (kPa)	Pressão máxima (kPa)
1	0,7	20,1	
2	0,7	20	399
3	0,7	23	1400
4	0,7	40	920
5	0,7	41	880
6	0,7	42	
7	0,7	40	1005
8	0,7	60	1600
9	0,7	40	920
10	0,7	60	1480
11	0,7	61	1409
12	0,7	60	1353
13	0,8	60	
14	0,8	20	
15	0,8	40	
16	0,8	20	
17	0,8	60	
18	0,8	40	
19	0,8	60	
20	0,8	20	
21	0,8	40	
22	0,9	60	
23	0,9	60	
24	0,9	20	
25	0,9	20	
26	0,9	60	
27	0,9	20	
28	0,9	40	

Numero Teste	Razão Equiv.	Pressão inicial (kPa)	Pressão máxima (kPa)
29	0,9	40	
29	0,9	40	
30	1,0	60	
31	1,0	20	
32	1,0	20	
33	1,0	60	
34	1,0	20	
35	1,0	40	
36	1,0	40	
37	1,0	60	
38	1,0	40	
39	1,1	40	
40	1,1	40	
41	1,1	20	
42	1,1	40	
43	1,1	20	
44	1,1	20	
45	1,1	60	
46	1,1	60	
47	1,1	60	