

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO EXPERIMENTAL DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE CHAMAS EM
UM DUTO FECHADO

por

Rafael Quines da Silva

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Maio de 2021

ESTUDO EXPERIMENTAL DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE CHAMAS EM UM DUTO FECHADO

por

Rafael Quines da Silva

Engenheiro Mecânico e de Segurança do Trabalho

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Andrés Mendiburu Zevallos

Aprovada por:

Prof. Dr. Christian Jeremi Coronado Rodríguez – UNIFEI

Prof. Dr. Felipe Roman Centeno – PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula – DEMEC / UFRGS

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 20 de Maio de 2021

“Aquilo que persistimos em fazer torna-se mais fácil de realizar; não que a natureza da tarefa mude, mas nossa capacidade aumenta.”

Ralph Waldo Emerson

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela oportunidade e pelo ensino de qualidade.

Agradeço ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) por apoiar esta dissertação através do Projeto 423369/2018-0 e à FAPERGS (Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de Rio Grande do Sul) por apoiar esta dissertação através do Projeto 21/2551-0000677-3.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburu Zevallos, pelos ensinamentos, compreensão e generosidade em sempre estar disposto a transmitir os conhecimentos necessários para a elaboração desta dissertação. A sua ajuda foi fundamental para concluir este trabalho.

Agradeço os meus amigos dos Laboratórios de Combustão, Hidropneumática, LETA e LIFE, especialmente a Henrique, Batista e Carlos. A ajuda de vocês foi muito importante para a montagem da bancada experimental.

Agradeço aos bolsistas de iniciação científica Rafael e Marcos, que contribuíram comigo para o projeto de alguns componentes essenciais para o funcionamento da bancada experimental e na realização dos testes experimentais.

Agradeço ao meu caro amigo Eng. Manuel Nzinga pelo apoio, ajuda e paciência em transmitir os conhecimentos da área de energia e principalmente cinética química. Sua ajuda foi extremamente importante pois me ajudou a elucidar melhor os fenômenos envolvidos nos processos de combustão.

Agradeço em especial à minha querida esposa Fernanda Belmonte, por todo seu carinho, amor e dedicação com nossos filhos Maria Eduarda e João Pedro no momento em que estive neste curso, assim como o apoio incondicional em toda nossa jornada juntos. Sei que vocês precisaram ter muita paciência comigo durante este curso, afinal foram horas de estudo dedicadas em prol deste projeto. Muito obrigado, amo vocês com toda fibra do meu ser.

Agradeço à Deus e ao Meu Salvador, sim, Jesus Cristo que sempre estiveram ao meu lado, mesmo diante das dificuldades pude sentir o consolo, ajuda e amor nesta jornada.

RESUMO

O desenvolvimento socioeconômico do mundo está intimamente relacionado com a demanda energética. Nesse sentido, a ciência da combustão vem desempenhando um papel preponderante no desenvolvimento de novas tecnologias. A propagação de uma chama pode ser classificada em deflagrações ($Ma < 1$) e detonações ($Ma > 1$). Este trabalho descreve o estudo experimental da propagação de chamas pré-misturadas envolvendo deflagrações de misturas de gás natural, hidrogênio e hélio, observando o efeito do número de Lewis e do número de Zeldovich na velocidade de propagação das chamas. Com esse intuito, foi construída uma bancada experimental a fim de realizar os testes para obter a velocidade de propagação da chama ao longo de um duto fechado. Assim também, os resultados experimentais foram comparados com um modelo analítico disponível na literatura. Portanto, foi verificado que o modelo de Valiev et al., 2013 apresentou uma acurácia aceitável para alguns casos, quando comparado com dados experimentais. Entretanto, foram observados casos em que o modelo teve uma acurácia extremamente baixa, apresentando erros relativos da ordem de 100% para misturas com a diluição de hélio. O modelo utiliza como um dos dados de entrada a distância adimensional teórica no duto. Devido ao pobre desempenho do modelo para as misturas com a adição de hélio, os cálculos foram repetidos utilizando a distância adimensional experimental, em vez da distância experimental calculada, de acordo as misturas estudadas neste trabalho. Desse modo, após a alterações realizadas, os resultados calculados da velocidade de propagação apresentaram uma melhor acurácia comparadas as velocidades de propagação calculadas pelo modelo de Valiev et al., 2013, principalmente em se tratando de misturas diluídas com hélio. Em relação aos números adimensionais observou-se que a velocidade de propagação das misturas estudadas aumenta quando $Le < 1$ e Ze for próximo a 7, enquanto para $Le > 1$, $Ze < 7$ ou $Ze > 7$ as velocidades de propagação da chama tendem a diminuir.

Palavras-chave: Chama; Combustão; Velocidade; Bancada; Propagação.

ABSTRACT

The socioeconomic development of the world is closely related to energy demand. In this sense, the science of combustion has been playing a leading role in the development of new technologies. The flame propagation can be classified into deflagrations ($Ma < 1$), and detonations ($Ma > 1$). This work describes the experimental study of flame propagation pre-mixed involving deflagrations of mixtures of natural gas, hydrogen and helium, observing the effect of the Lewis number and the Zeldovich number on the flame propagation. For this purpose, an experimental bench was built in order to carry out tests to obtain the flame propagation speed along a closed duct. Also, the experimental results were compared with an analytical model available in the literature. Therefore, it was verified that the Valiev et al., 2013 showed acceptable accuracy for some cases, when compared with experimental data. However, cases were observed in which the model had an extremely low accuracy, presenting relative errors of the order of 100% for mixtures with helium dilution. The model uses as one of the input data the theoretical dimensionless distance in the duct. Due to the poor performance of the model for the mixtures with the addition of helium, the calculations were repeated using the dimensionless experimental distance, instead of the calculated experimental distance, according to the mixtures studied in this work. Thus, after the changes made, the results calculated for the propagation velocity showed better accuracy compared to the propagation velocities calculated by the propagation model. Valiev et al., 2013, especially in the case of mixtures diluted with helium. Regarding the dimensionless numbers, it was observed that the propagation speed of the studied mixtures increases when $Le < 1$ and Ze is close to 7, while for $Le > 1$, $Ze < 7$ or $Ze > 7$ flame propagation speeds tend to decrease.

Keywords: Flame; Combustion; Velocity; Bench; Flame Propagation.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	1
1.2	Estado da Arte	3
1.3	Objetivos do trabalho	7
1.3.1	Objetivo geral	7
1.3.2	Objetivos específicos	7
1.4	Organização do Trabalho.....	8
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	9
2.1	Fenômeno de inversão de chama em dutos	9
2.2	Observação da aceleração de chamas pré-misturadas em dutos fechados	13
2.3	Efeito da razão de equivalência sobre a velocidade e aceleração de chamas.....	17
2.4	Efeito da pressão inicial na aceleração da chama.....	20
2.5	Efeito do enriquecimento com hidrogênio	22
2.6	Teoria disponível na literatura	23
2.6.1	Modelo analítico para previsão da velocidade de propagação da frente de chama ..	23
2.7	Efeito do número de Lewis na propagação da chama	26
2.8	Efeito do número de Zeldovich na propagação da chama.....	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	Bancada experimental da propagação de chamas.....	30
3.1.1	Duto de propagação	30
3.1.2	Câmara de Mistura.....	31
3.1.3	Sistema de Aquisição de Dados	34
3.2	Procedimento experimental	35
3.2.1	Preparação da mistura na câmara de mistura.....	35
3.2.2	Transferência da mistura para o duto e teste de propagação	36
3.3	Determinação da velocidade de propagação da chama	38
3.4	Validação com o modelo teórico disponível	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1	Velocidade de propagação da chama experimental.....	43

4.2	Comparação entre os valores da velocidade de propagação da chama experimental e teórica.....	56
5	CONCLUSÕES.....	66
5.1	Resultados experimentais da velocidade de propagação da chama.....	66
5.2	Comparação entre os resultados experimentais e o modelo disponível na literatura.....	67
5.3	Número de Lewis e Zeldovich.....	67
5.4	Sugestões para trabalhos futuros	70
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICE A – Artigos Publicados Sobre Propagação de Chamas em Dutos.....	73
	APÊNDICE B – Passo a Passo do Funcionamento da Bancada Experimental	75
	APÊNDICE C – Resultados da Propagação da Frente de Chamas para Algumas Misturas.....	77
	APÊNDICE D – Planilha de Preparação de Misturas	81
	ANEXO I – Certificados de Calibração dos Transdutores	82
	ANEXO II – Certificado de Calibração Bomba de Vácuo	90
	ANEXO III – Informações Câmera Phantom V411	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Imagens Schlieren da formação da chama tulipa.....	10
Figura 2.2	Fases da formação da chama tulipa e tulipa distorcida.....	12
Figura 2.3	Geometria de uma chama acelerando em forma de dedo.....	14
Figura 2.4	Resultados experimentais da velocidade de propagação de chama de misturas estequiométricas de etanol e ar.....	16
Figura 2.5	Estrutura assintótica da chama.....	28
Figura 3.1	Esquema da bancada experimental.....	31
Figura 3.2	Duto de propagação.....	32
Figura 3.3	Câmara de mistura.....	33
Figura 3.4	Procedimento experimental.....	36
Figura 3.5	Determinação da velocidade de propagação de chama passo a passo no <i>software</i> Tracker versão 6.0.2.....	39
Figura 3.6	Referência sobre a distância da fonte de ignição.....	39
Figura 4.1	Imagens representativas da propagação da frente da chama para mistura GN + ar (Mix 6)	45
Figura 4.2	Imagens representativas da propagação da frente da chama para mistura [75% GN + 25% H ₂] + ar (Mix 2)	46
Figura 4.3	Imagens representativas da propagação da frente da chama para mistura [50% GN + 50% H ₂] + ar (Mix 1)	47
Figura 4.4	Velocidade de propagação de [50% GN + 50% H ₂] + ar (Mix 1)	49
Figura 4.5	Análise da aceleração de chama das misturas de (a) GN + ar (Mix 6), (b) [75%GN + 25%H ₂] + ar (Mix 2), (c) [75%GN + 25%H ₂] + 10%He + ar (Mix 4) e (d) GN + 10%He + ar (Mix 8)	50
Figura 4.6	Análise da aceleração de chama das misturas de (a) [50%GN + 50%H ₂] + ar (Mix 1), (b) [15%GN + 85%H ₂] + 30%He + ar (Mix 5), (c) [15%GN + 85%H ₂] + 20%He + ar (Mix 3) e (d) [90%GN + 10%H ₂] + 10%He + ar (Mix 7).....	51
Figura 4.7	Velocidade máxima de propagação em função de <i>Le</i> e <i>Ze</i>	55

Figura 4.8	Resultados experimentais e calculados pelo modelo de Valiev et al., 2013 de aceleração de chama para misturas com hélio (A), misturas sem hélio (B) e todas as misturas estudadas (C).....	61
Figura 4.9	Análise da aceleração de chama das misturas de (a) GN + ar (Mix 6), (b) [75%GN + 25%H2] + ar (Mix 2), (c) [75%GN + 25%H2] + 10%He + ar (Mix 4) e (d) GN + 10%He + ar (Mix 8) pelo modelo de Valiev et al., 2013 calculado com $\xi_{tip\ exp}$	63
Figura 4.10	Análise da aceleração de chama das misturas de (a) [50%GN + 50%H2] + ar (Mix 1), (b) [15%GN + 85%H2] + 30%He + ar (Mix 5), (c) [15%GN + 85%H2] + 20%He + ar (Mix 3) e (d) [90%GN + 10%H2] + 10%He + ar (Mix 7) pelo modelo de Valiev et al., 2013 calculado com $\xi_{tip\ exp}$	64
Figura D.0.1	Planilha preparação de mistura dos testes experimentais.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Efeito da razão de equivalência na propagação de chamas.....	20
Tabela 2.2	Efeito da pressão inicial na propagação de chamas.....	21
Tabela 2.3	Efeito do enriquecimento com hidrogênio na propagação de chamas.....	23
Tabela 3.1	Misturas estudadas.....	34
Tabela 3.2	Determinação do intervalo da distância (Δx) e do tempo (Δt) de propagação da frente de chama de diferentes misturas na Janela 1.....	40
Tabela 3.3	Valores adimensionais da velocidade de propagação da chama/velocidade da chama laminar e distância percorrida pela chama/diâmetro hidráulico do duto.....	41
Tabela 4.1	Relação do Número de Lewis e Zeldovich para as Velocidades Máximas de Propagação das chamas.....	54
Tabela 4.2	Comparativo entre as velocidades máximas experimentais e velocidades máximas calculadas pelo modelo de Valiev et al., 2013.....	58
Tabela 4.3	Comparativo entre as velocidades máximas experimentais e velocidades máximas calculadas pelo modelo de Valiev et al., 2013 calculado com $\xi_{tip\ exp}$	60
Tabela A.1	Relação de artigos publicados sobre propagação de chamas em dutos.....	73
Tabela C.1	Imagens representativas da propagação da frente da chama para mistura [90% GN + 10% H ₂] + 10% He + ar.....	77
Tabela C.2	Imagens representativas da propagação da frente da chama para mistura GN + 10% He + ar.....	79

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

DDT	<i>Deflagration to Detonation Transition</i>
DEMEC	Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS
GN	Gás Natural
LC	Laboratório de Combustão
LETA	Laboratório de Ensaios Térmicos e Aerodinâmicos
LIFE	Laboratório de Inovação e Fabricação Digital da Escola de Engenharia
PROMECC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PU	Poliuretano
TP	Transdutor de Pressão
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

Ma	Número de Mach
AR	Razão de Aspecto
$^{\circ}C$	Grau Celsius
m	Metros
cm	Centímetros
mm	Milímetros
kPa	Quilo Pascal
D_h	Diâmetro Hidráulico do Duto
L	Comprimento do Duto
s	Segundos
ms	Mili Segundos
$V_{máx}$	Velocidade máxima da chama
D_{AB}	Difusividade de massa
E_a	Energia de ativação
R	Constante universal dos gases
U	Velocidade máxima da ponta da chama
S_L	Velocidade de chama laminar
$C_{s,0}$	Velocidade do som dos reagentes
Le	Número de Lewis
Ze	Número de Zeldovich
T_b	Temperatura do gás queimado
T_u	Temperatura do gás não queimado
ℓ°_R	Espessura da região de ativação da reação
ℓ°_D	Espessura da região de transporte
f°	Fluxo de massa
T_a	Temperatura de chama adiabática
V_{exp}	Velocidade de propagação experimental
V_{calc}	Velocidade de propagação calculada

V/S_L	Velocidade de propagação de chama/velocidade de chama laminar adimensional
x/D_h	Distância percorrida pela chama/diâmetro hidráulico do duto adimensional
$V_{tip\ max}$	Velocidade máxima de propagação da ponta da chama

Símbolos Gregos

ϕ	Razão de equivalência
θ	Coefficiente de expansão dos gases
ξ	Coordenada axial adimensional
τ_w	Tempo em que a chama toca as paredes laterais
γ	Capacidades caloríficas
ρ_u	Densidade do gás não queimado
ρ_b	Densidade do gás queimado
α	Difusividade térmica

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O desenvolvimento socioeconômico do mundo está intimamente relacionado com a demanda energética. Nesse sentido, a ciência da combustão vem desempenhando um papel preponderante no desenvolvimento de novas tecnologias. Desse modo, o estudo da propagação de chamas é de suma importância para se entender os fenômenos relacionados à combustão de combustíveis alternativos. Muitas pesquisas têm sido realizadas desde o início do século sobre o comportamento de chamas pré-misturadas em dutos fechados. Concomitantemente a isso, pode-se notar uma tendência mundial no interesse de energias renováveis e combustíveis alternativos visando a sustentabilidade. O gás natural enriquecido com hidrogênio é considerado um combustível alternativo promissor para reduzir os impactos dos gases de efeito estufa produzidos pela combustão de combustíveis convencionais. O aproveitamento dos combustíveis alternativos dar-se-á em motores de combustão interna, turbinas a gás e outros dispositivos de combustão interna [Verhelst et al., 2009]. Assim, o conhecimento das características da combustão desses combustíveis e da propagação das chamas são vitais para o aproveitamento dessas novas fontes de energia.

A propagação de uma chama pode ser classificada em deflagrações e detonações. As deflagrações ocorrem a velocidades subsônicas, é dizer, com número de Mach menor que um ($Ma < 1$), enquanto as detonações ocorrem a velocidades supersônicas, é dizer, com número de Mach maior que um ($Ma > 1$) [Kuo, 2005]. Este importante parâmetro está associado com a segurança das instalações industriais, pois quando uma deflagração se torna em uma detonação em misturas gasosas, o aumento de pressão pode atingir a escala de 20 vezes o valor da pressão inicial. Recentemente, Oran et al., 2019, apresentaram mecanismos fundamentais da transição entre a deflagração e a detonação (DDT) bem como o impacto causado em acidentes industriais. Portanto, melhorando a compreensão do comportamento da aceleração das chamas pode-se prevenir acidentes industriais que causam prejuízos financeiros, e acima de tudo, ceifar vidas.

Nos primeiros estudos experimentais, em meados da década de 30, foi descoberto que a forma da frente de chama passa de convexa para côncava quando a razão entre o comprimento e o diâmetro do duto for maior que dois [Ellis, 1928]. Anos mais tarde, Salamandra et al., 1959,

chamou essa chama de chama tulipa. Essa chama é uma forma particular da frente de chama com curvatura invertida, que pode ser frequentemente observada durante a propagação de deflagrações, tanto em dutos fechados como em dutos semiabertos [Yang et al., 2019a]. Desse modo, alguns estudos experimentais e simulações numéricas foram realizados para tentar explicar essa inversão da frente de chama [Ponizy et al., 2014; Yang et al., 2019a; Yang et al., 2019b; Yu et al., 2018]. As primeiras pesquisas relatam que essa inversão da frente de chama pode ser um resultado na interação entre a chama e uma onda de choque. Entretanto, as ondas de choque são dificilmente observadas até que a chama tulipa se forme.

Conforme Bychkov et al., 2007, a aceleração acontece devido à geometria da chama, que se desenvolve com uma frente de chama alongada, crescendo exponencialmente com o tempo. Esse incremento de área da frente de chama ocorre até que a chama toca as paredes laterais do duto e assim sua superfície diminua. Neste instante ocorre uma desaceleração da chama, que ocasiona a formação das chamas tulipa [Bychkov et al., 2007]. Ponizy et al, 2014, observaram que o processo da inversão da frente de chama resulta de um fenômeno puramente hidrodinâmico, porém não simples.

Valiev et al., 2013, estudaram o processo de aceleração inicial de uma chama envolvendo misturas de hidrogênio e oxigênio, utilizando a técnica *Schlieren* e observaram que a taxa da aceleração da chama diminui significativamente com o aumento do número de Mach inicial. Neste mesmo estudo foi desenvolvida uma teoria analítica por meio da expansão do número de Mach, demonstrando que a compressibilidade do gás reduz a taxa de aceleração e velocidade máxima de propagação da chama. Assim, foi proposta a teoria para os estágios iniciais da propagação e aceleração de chamas em deflagrações. Entretanto, esta teoria não foi explorada variando-se os números de Lewis e Zeldovich na velocidade de propagação de chamas pré-misturadas em um duto fechado.

O número de Lewis é um importante parâmetro adimensional que caracteriza o transporte de calor e massa em chamas pré-misturadas. Chakraborty e Cant, 2006, realizaram um estudo numérico sobre a influência do número de Lewis na propagação de chamas para analisar a geometria de chamas turbulentas pré-misturadas. De acordo com resultados obtidos neste estudo os autores observaram que para os números de Lewis não unitários, ocorrem variações de temperatura que influenciam no comportamento da velocidade de deslocamento da chama. Para Zitouni et al., 2022, o número de Lewis representa uma propriedade chave em

sistemas de combustão pré-misturados. Assim como o número de Lewis, o número de Zeldovich também é outro parâmetro importante na propagação de chamas. O número de Zeldovich é um número adimensional que proporciona uma medida quantitativa da energia de ativação de uma reação química, ou seja, sua reatividade.

O aproveitamento de combustíveis alternativos, como biocombustíveis e hidrogênio, envolve misturas de diferentes tipos de combustíveis e em diversas proporções, logo, o estudo desses combustíveis precisa considerar números adimensionais que representem diferentes misturas. Assim, os estudos experimentais e numéricos precisam ser comparados com modelos teóricos disponíveis na literatura. No conhecimento do autor, o modelo de Valiev et al., 2013, é o modelo teórico mais recente que busca caracterizar a aceleração de deflagrações nos instantes iniciais de propagação em dutos. A grande maioria dos estudos experimentais disponíveis na literatura, e publicados nos últimos 10 anos, que envolvem propagação de deflagrações em dutos fechados não tem comparado os seus resultados experimentais com o modelo analítico de Valiev et al., 2013. Assim também, o efeito dos números adimensionais de Lewis e Zeldovich na propagação de deflagrações em dutos fechados não tem sido considerado.

Nesse sentido, este trabalho tem por objetivo estudar a influência do número de Lewis e de Zeldovich sobre a velocidade de propagação de chamas pré-misturas. Para tanto, objetiva-se desenvolver um estudo experimental da propagação de chamas em um duto fechado livre de obstáculos, variando os números adimensionais de Lewis e Zeldovich nas diferentes misturas envolvendo gás natural, hidrogênio e hélio, e comparar os resultados experimentais com os resultados teóricos obtidos com o modelo teórico de Valiev et al., 2013.

1.2 Estado da arte

Neste tópico serão apresentados os estudos experimentais e os principais resultados obtidos sobre a velocidade de propagação de chamas em um duto fechado sem obstáculos.

No estudo experimental de aceleração e velocidade de propagação de chamas em dutos, os equipamentos comumente utilizados pelos diversos autores aqui citados foram: duto de propagação, câmera de alta velocidade, câmara de mistura, sistema de aquisição de dados, transdutores de pressão e um sistema de ignição. Da mesma forma, todos os testes foram

conduzidos em triplicata para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos. Os experimentos foram realizados para diferentes valores da razão de equivalência (ϕ) e da razão de aspecto (AR).

Xiao et al., 2011, realizaram um estudo experimental sobre o comportamento da propagação de chamas pré-misturadas em um duto fechado e semiaberto de misturas de hidrogênio-ar com ϕ entre 0,10 e 7,14. Os experimentos foram realizados em um duto de seção retangular de 82 mm e 530 mm de comprimento (AR = 6,47). Os resultados indicaram que a frente de chama acelera até atingir o valor máximo no momento em que ocorre o achatamento da frente de chama com uma posterior inversão da frente de chama e desaceleração. A propagação continua com uma velocidade oscilatória até o final da propagação da mistura. A amplitude da oscilação de desaceleração se mostrou menor para os casos em que não aconteceu a formação de uma chama tulipa distorcida. Assim, verificou-se que o início das deformações da frente de chama coincide com a desaceleração da velocidade da frente de chama.

Valiev et al., 2013, realizaram um estudo numérico e experimental para analisar a influência da aceleração da chama em dutos fechados de misturas estequiométricas ($\phi = 1$) de hidrogênio-oxigênio. Para registrar a evolução do comportamento de propagação de chama, o trabalho experimental é constituído de um duto retangular de 50 mm de diâmetro interno e 6,05 m de comprimento (AR = 8,27), com de 24 janelas para possibilitar a visualização. Neste estudo, as pressões iniciais de 0,2 a 0,75 bar foram consideradas. Os resultados obtidos indicaram que a taxa de aceleração da propagação da chama diminui consideravelmente com o aumento do número de Mach inicial. Neste estudo também foi proposto o modelo analítico da aceleração da frente de chama para os instantes iniciais da propagação, considerando chamas com geometria plana e axissimétrica.

Ponizy et al., 2014, realizaram um estudo experimental sobre a inversão da frente de chamas pré-misturadas de propano-ar com $\phi = 1$. O estudo foi realizado inicialmente nas condições atmosféricas em tubos com diferentes diâmetros e comprimentos com razões de aspecto entre 3,2 e 42,85. Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a inversão da frente de chama, ou chama tulipa, resulta de um fenômeno puramente hidrodinâmico, porém não simples. Esse processo hidrodinâmico ocorre pela competição entre o movimento dos gases queimados defletidos, que se expandem nas laterais da chama, e o movimento para a frente dos gases não queimados resultantes da fase inicial da propagação da chama.

Shen et al., 2015, realizaram um estudo experimental comparativo da propagação de chamas pré-misturadas de hidrogênio-ar com ϕ entre 1,17 e 5,07, e de propano-ar na condição estequiométrica, em um duto fechado. Neste estudo experimental foi utilizado um duto retangular de 82 mm de diâmetro interno e 530 mm de comprimento (AR = 6,47). Os resultados mostraram que a velocidade da ponta da chama diminui consideravelmente logo após a inversão da frente de chama (formação da chama tulipa) e continua oscilando até o final da propagação da chama no duto. Os autores verificaram também que a onda de pressão não é um parâmetro preponderante na inversão da frente de chama, mas sim para o aumento da aceleração, desaceleração e deformação da chama.

Zheng et al., 2016, estudaram experimentalmente a deflagração de chamas pré-misturadas de hidrogênio-metano-ar em um duto fechado com cinco frações de hidrogênio (desde 0% até 100%), em condições estequiométricas ($\phi = 1$). Os experimentos foram realizados em um duto de vidro com extremos fechadas e cinco razões de aspecto (AR = 5, 6,7, 10, 12,5 e 20). Neste estudo, os resultados apresentaram a formação da clássica chama tulipa para todas as frações de hidrogênio. Os autores verificaram que para todas as razões de aspecto estudadas, a dinâmica da velocidade de propagação da chama estava relacionada à pressão, e ambas aumentavam significativamente com o aumento das frações de hidrogênio.

Jin et al., 2017, realizaram um estudo experimental comparando a propagação de chamas pré-misturadas de gás natural-ar (com ϕ entre 0,67 e 1,50), metano-ar (com ϕ entre 0,61 e 1,36) e acetileno-ar (com ϕ entre 0,40 e 1,70) em um duto fechado. Os testes experimentais foram realizados em um duto retangular com 82 mm de diâmetro interno e 530 mm de comprimento (AR = 6,47). Os resultados mostraram que a composição do combustível tem uma influência significativa na velocidade de propagação e no formato da chama, sendo que as pequenas quantidades de etano e propano presentes no gás natural aceleram a chama. Por outro lado, devido à maior reatividade química, o acetileno tem a velocidade de propagação de chama maior quando comparado ao gás natural e o metano.

Yu et al., 2018, estudaram experimentalmente a deflagração de chamas pré-misturadas de hidrogênio-monóxido de carbono-ar em um duto fechado. A pesquisa foi realizada em misturas de H₂-CO-ar com ϕ entre 1,0 e 3,0, e cinco concentrações volumétricas de hidrogênio (desde 0,1 até 0,9). A parte experimental foi realizada em um duto retangular de 100 mm de diâmetro interno e 1000 mm de comprimento (AR = 10,0). Os resultados mostraram que a

fração de hidrogênio na mistura teve influência significativa na velocidade de propagação de chama para todas as razões de equivalência estudadas. Desse modo, as maiores velocidades de propagação foram obtidas em misturas com maiores frações de hidrogênio.

Mendiburu et al., 2019, realizaram um estudo experimental em um duto fechado para analisar a formação da chama tulipa em misturas de etanol-ar com ϕ desde 0,9 até 1,4 e condições iniciais de pressão e temperatura entre 20 até 60 kPa e 32 ± 2 °C, respectivamente. O trabalho experimental foi realizado em um duto de seção circular de 9,7 cm de diâmetro e 150 cm de comprimento (AR = 15,47). Os resultados mostraram que a velocidade de frente da chama é 70 vezes a velocidade de chama laminar, e que esta velocidade é atingida a uma distância de aproximadamente 9 vezes o raio do duto de propagação.

Yang et al., 2019a, realizaram um estudo experimental comparativo da propagação de chamas pré-misturadas de hidrogênio-monóxido de carbono-ar em dutos fechados e semiabertos. O estudo experimental foi conduzido em um duto transparente com seção retangular de 100 mm de largura e 1000 mm de comprimento (AR = 10,0). Os experimentos foram realizados com $\phi = 0,8$ e com frações volumétricas de hidrogênio de 0,1 a 0,9. Os resultados mostraram que o comportamento da propagação de chama foi diferente para as configurações analisadas (duto fechado e semiaberto). A velocidade de propagação da frente de chama diminuiu à medida que a chama tocou as paredes laterais do duto fechado. Por outro lado, no duto semiaberto a velocidade de propagação da chama continuou a aumentar, pois a abertura do duto reduz a influência das ondas de pressão.

Yang et al., 2019b, desenvolveram um estudo experimental comparativo da propagação de chamas pré-misturadas de hidrogênio-monóxido de carbono-ar em dutos semiabertos com três ϕ entre 0,8 e 1,2, e duas frações volumétricas de hidrogênio (0,1 a 0,9). Os trabalhos experimentais foram realizados em um duto transparente com seção retangular de 80 mm de largura e 1600 mm de comprimento (AR = 20,0). Os resultados obtidos nesta pesquisa mostram que ocorre um alongamento da frente de chama no estágio onde a chama toca as paredes laterais, de forma que, esta etapa torna-se mais proeminente à medida que a fração de hidrogênio aumenta. Segundo os autores, esse alongamento da frente de chama ocorre devido aos movimentos de fluxo confinado dos gases, assim uma chama plana se forma após esse processo de alongamento.

Pelos trabalhos aqui apresentados observa-se que todos estes autores buscaram desenvolver um estudo considerando, entre os assuntos abordados, a velocidade de propagação de chama com diversas misturas. Entretanto, nenhum dos trabalhos citados considerou a influência do número de Lewis e Zeldovich sobre a velocidade de chama nos estágios iniciais da propagação. Nesse sentido, surge a necessidade de desenvolver um estudo sobre a velocidade de propagação de chamas em dutos fechados relacionando essas variáveis. Os principais trabalhos publicados sobre propagação de chamas em dutos podem ser encontrados no Apêndice A.

1.3 Objetivos do trabalho

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo estudar experimentalmente a propagação de chamas pré-misturadas envolvendo gás natural, hidrogênio e hélio, observando o efeito do número de Lewis e do número de Zeldovich na velocidade de propagação das chamas.

1.3.2 Objetivos específicos

A fim de realizar o estudo da velocidade de propagação de chamas em dutos fechados, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- a) Construir uma bancada experimental que permita determinar experimentalmente a velocidade de propagação de chamas pré-misturadas;
- b) Obter experimentalmente as curvas da velocidade de propagação de chamas pré-misturadas com diferentes números de Lewis e de Zeldovich;
- c) Avaliar o efeito do número de Lewis e do número de Zeldovich sobre a aceleração das chamas pré-misturadas em dutos fechados;

- d) Comparar os resultados experimentais da velocidade de propagação de chama com os resultados obtidos aplicando a teoria disponível.

1.4 Organização do trabalho

No tópico 1 são relatados os aspectos introdutórios do trabalho, motivação, estado da arte e os objetivos do estudo.

No tópico 2 apresenta-se a fundamentação teórica referente aos estudos da propagação de chamas em dutos fechados. Para isso, levam-se em consideração parâmetros como: velocidade de propagação da chama e efeito dos números de Lewis e de Zeldovich.

No tópico 3 são apresentados os materiais e métodos utilizados para desenvolver o estudo proposto, considerando a propagação de chamas pré-misturadas envolvendo gás natural, hidrogênio, e hélio, em um duto fechado livre de obstáculos.

O tópico 4 apresenta os resultados discussões derivados do estudo da velocidade de propagação da chama experimental e da sua comparação com o modelo teórico disponível na literatura.

Para concluir, no tópico 5 foram apresentadas as conclusões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados os temas mais relevantes do levantamento bibliográfico no que diz respeito à velocidade e aceleração de chamas pré-misturadas.

2.1 Fenômeno de inversão de chama em dutos

Os primeiros estudos sobre os fenômenos de inversão de chamas se propagando em dutos fechados foram relatados por Ellis, 1928. A inversão da frente de chama pode ser observada na Figura 2.1. Ellis, observou que em dutos fechados a razão de aspecto ($AR = L/D_h$) é um fator importante para caracterizar a inversão de uma chama se propagando em dutos fechados, ou seja, o mesmo verificou que se $AR > 2$, a forma da chama alterava de uma forma alongada para uma cúspide apontando no sentido contrário ao sentido de propagação da chama.

Os primeiros estudos alegavam que a chama tulipa era um resultado da interação entre a frente de chama com uma onda de choque [Salamandra et al., 1959]. Entretanto, os estudos experimentais conduzidos por Clanet e Searby, 1996, mostraram que a formação da chama da tulipa é uma manifestação da instabilidade de Rayleigh - Taylor impulsionada pela desaceleração na ponta da chama [Clanet et al., 1996]. Para Kratzel et al., 1998, o efeito físico mais importante na formação da chama tulipa parte da interação entre a chama e as ondas de pressão, as instabilidades de chama, e uma longa região de vórtices em grande escala atrás da área da frente de chama.

Xiao et al., 2011, realizaram um estudo experimental sobre o comportamento da propagação de chamas pré-misturadas em um duto fechado e semiaberto de misturas de hidrogênio-ar com ϕ entre 0,10 e 7,14. Os experimentos foram realizados em um duto de seção retangular de 82 mm e 530 mm de comprimento ($AR = 6,47$). Os resultados indicaram que para regiões pobres não obtiveram a formação da chama tulipa, enquanto que para chamas ricas foi verificada uma segunda inversão da frente de chama no duto fechado.

Ponizy et al., 2014, realizaram um estudo experimental sobre a inversão da frente de chamas pré-misturadas de propano-ar com $\phi = 1$. O estudo foi realizado inicialmente nas

condições atmosféricas em um tubo com razões de aspecto entre 3,2 e 42,85. Para monitorar o começo da propagação da chama, um medidor de ionização foi instalado próximo à ignição, e as variações de pressão foram registradas por um medidor piezoelétrico, enquanto as imagens foram obtidas através de uma câmera de alta velocidade. A Figura 2.1 apresenta a formação da chama tulipa em um duto. As imagens foram obtidas por meio de visualização com sistema *Schlieren*.

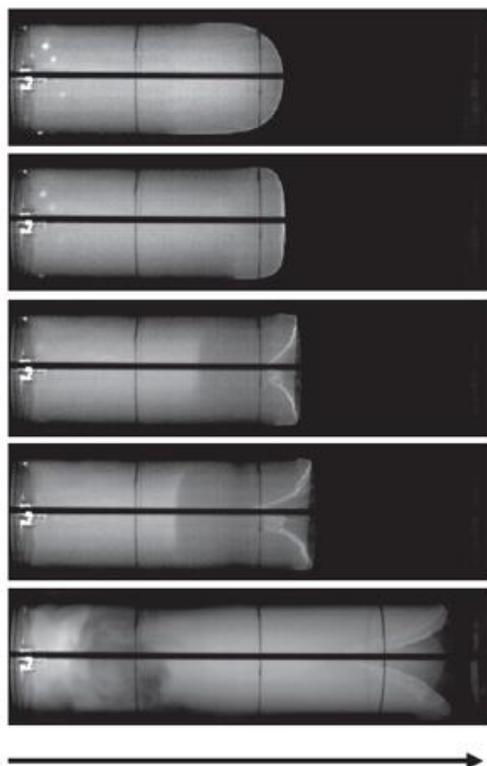


Figura 2.1 – Imagens Schlieren da formação da chama tulipa [Ponizy et al., 2014].

Segundo Ponizy et al., 2014, a inversão da frente de chama, ou chama tulipa, resulta de um fenômeno puramente hidrodinâmico, porém não simples. Esse processo hidrodinâmico ocorre pela competição entre o movimento dos gases queimados defletidos que se expandem nas laterais da chama e o movimento reverso dos gases queimados resultantes da fase inicial da propagação da chama. Estudos recentes mostraram que a velocidade da ponta da chama é quase constante à medida que a chama se propaga na forma de tulipa em experimentos realizados em dutos fechados [Yang et al., 2019a]. Outro comportamento interessante é o fato de que em dutos

fechados pode-se observar a formação de uma segunda chama tulipa logo após a formação da primeira tulipa, ou seja, a denominada tulipa distorcida [Yu et al., 2018].

Shen et al., 2015, realizaram um estudo experimental comparativo da propagação de chamas pré-misturadas de hidrogênio-ar, com ϕ entre 1,17 e 5,07, e propano-ar ($\phi = 1$) em um duto fechado. Neste estudo experimental foi utilizado um duto retangular de 82 mm de diâmetro interno e 530 mm de comprimento ($AR = 6,47$). Os resultados mostraram que a velocidade da ponta da chama diminui consideravelmente logo após a inversão da frente de chama (chama tulipa) e continua oscilando até o final da propagação da chama no duto. Shen et al., 2015, observaram que a chama tulipa não é uma característica exclusiva de misturas de hidrogênio-ar, mas também pode ser obtida para uma mistura estequiométrica de propano-ar. Os autores verificaram também que a onda de pressão não é um parâmetro preponderante que participa na inversão da frente de chama, mas sim para a aceleração, desaceleração e deformação da chama.

Yu et al., 2018, realizaram um estudo experimental de propagação de chama para analisar a influência da adição de monóxido de carbono em chamas pré-misturadas de hidrogênio-ar. Neste estudo, os autores verificaram que a formação da chama tulipa distorcida também pode ser observada em misturas de gás de síntese e ar. As ondas de pressão geradas são fortes o suficiente para desenvolver a instabilidade de Rayleigh – Taylor e, portanto, a chama tulipa distorcida muda de forma abrupta.

Yang et al., 2019a, desenvolveram um estudo experimental para analisar a evolução da frente de chamas pré-misturadas de misturas de gás de síntese e ar. Este estudo foi realizado em um duto fechado livre de obstáculos. A Figura 2.2 apresenta esquematicamente as fases do desenvolvimento e evolução da morfologia da chama tulipa. Com isso, os autores observaram as seguintes fases de uma propagação de chama:

- a) Na primeira fase ocorre uma expansão livre da chama com uma velocidade constante;
- b) Na segunda fase a chama assume a forma alongada ou “*finger flame*” e assim a área da superfície da chama aumenta rapidamente, acelerando esta no sentido axial;
- c) Na terceira fase a frente de chama se propagando lateralmente ou “*flame skirt*” atinge as paredes laterais do duto;

- d) Na quarta fase ocorre a formação da chama plana e nesse momento a frente de chama se inverte formando a chama tulipa;
- e) Na quinta fase ocorre a formação da chama tulipa distorcida.

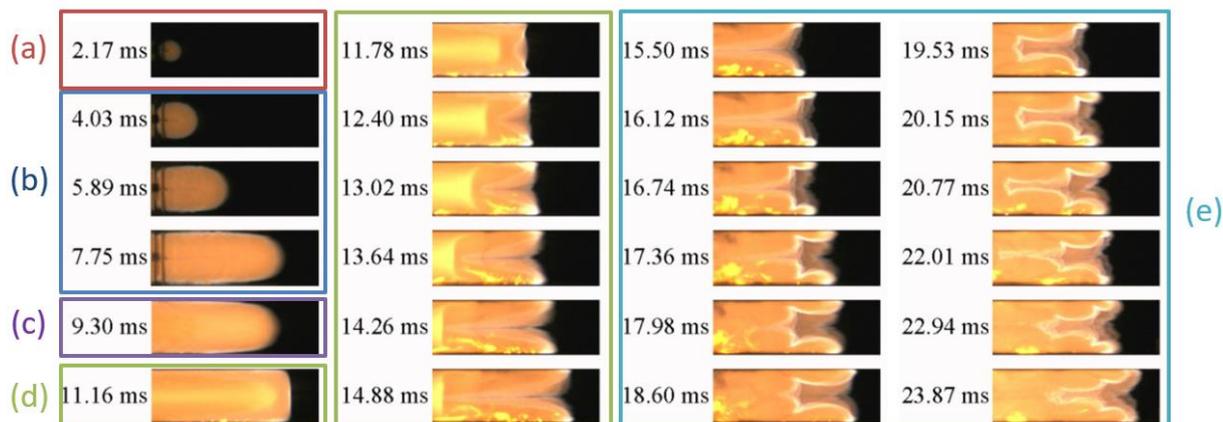


Figura 2.2 – Fases da formação da chama tulipa e tulipa distorcida [Adaptado de Yang et al., 2019a].

A última fase, ou a fase da formação da tulipa distorcida, resulta da iteração contínua das ondas de pressão com a frente de chama. Yang et al., 2019a, compararam os resultados obtidos de estudos de propagação de uma chama em dutos fechados e semi-abertos. Neste estudo, os autores verificaram que a velocidade de frente de chama é menor em dutos fechados, devido ao fato de que em dutos semiabertos a abertura na extremidade diminui a sobre pressão e aumenta a velocidade de propagação da chama. Em dutos semiabertos ocorre também um alongamento da frente de chama mais prolongado.

Yang et al., 2020, estudaram experimentalmente o efeito da razão de equivalência e da distância da fonte de ignição na propagação de chamas pré-misturadas de hidrogênio-ar adicionando monóxido de carbono. Neste estudo foi utilizado um duto transparente com seção retangular de 100 mm e 1200 mm de comprimento ($AR = 12,0$). O valor de ϕ variou entre 0,8 e 3,0 mantendo uma fração volumétrica de hidrogênio constante de 0,5. Os experimentos foram realizados para três distâncias distintas de ignição, sendo a primeira instalada junto à ignição original, a segunda no meio do comprimento do duto e a terceira oposta à ignição original. Os resultados obtidos neste trabalho indicam que a propagação da chama se comporta de forma diferente em função da localização da fonte de ignição. Assim, a oscilação da chama tornou-se

mais brusca quando a ignição foi instalada do lado oposto da ignição original. Do outro lado, quando a mistura foi ignizada com a fonte de ignição instalada junto à ignição original, foram obtidas todas as formas clássicas de propagação da frente de chama, ou seja, chama esférica, chama em forma de dedo, chama plana e a chama tulipa. Concomitantemente a isso, à medida que a razão de equivalência aumenta, a geometria da chama altera significativamente.

2.2 Observação da aceleração de chamas pré-misturadas em dutos fechados

Bychkov et al., 2007, realizaram um estudo numérico da aceleração da chama para avaliar o efeito da geometria. Segundo Bychkov et al., 2007, a geometria da frente da chama se desenvolve num formato de chama alongada (*finger flame*), crescendo a velocidade de propagação exponencialmente com o tempo. A geometria da chama é um fator preponderante para os primeiros estágios da aceleração da frente de uma chama, pois neste instante ocorre que a frente da chama toca as paredes laterais do duto e assim sua superfície e velocidade de propagação diminuem consideravelmente [Valiev et al., 2013].

A propagação de chamas em um duto fechado vem sendo estudado por diversos autores. De acordo com Dorofeev, 2011, o comportamento da aceleração da chama pode ser caracterizado por parâmetros importantes como a velocidade de queima laminar e a razão de densidades entre os reagentes e os produtos. Ainda, de acordo com o autor, a aceleração de chamas sofre influência das instabilidades da chama e suas interações com o confinamento, obstruções e turbulência. Assim, Ciccarelli e Dorofeev, 2008, estudaram os detalhes sobre essas propriedades básicas das chamas. Kurdyumov et al., 2015, afirmam que a aceleração da chama está condicionada principalmente a dois efeitos físicos: a expansão dos gases queimados e o confinamento lateral do duto.

Ciccarelli e Dorofeev, 2008, corroboraram que o principal mecanismo de aceleração de uma chama é a turbulência do escoamento devido ao atrito na parede ao longo de todo o processo, que pode levar à transição de uma deflagração para uma detonação. O fluxo torna-se não uniforme por causa da condição limite de não escorregamento na parede que, somada à turbulência, distorcem a frente da chama aumentando a taxa de reação, proporcionando a aceleração [Valiev et al., 2010].

Valiev et al., 2013, realizaram um estudo numérico e experimental para analisar a influência da aceleração da chama em dutos fechados de misturas estequiométricas de hidrogênio-oxigênio. Para registrar a evolução do comportamento da propagação de chama, o trabalho experimental foi realizado em um duto retangular de 50 mm de diâmetro interno e 6,05 m de comprimento ($AR = 8,27$). Neste estudo, as pressões iniciais de 0,2 e 0,75 bar foram consideradas. Os resultados obtidos não apresentaram uma inversão da frente de chama, pois, a propagação da frente de chama foi analisada nos instantes iniciais onde ela possui o formato de chama alongada. Nestas condições, a taxa de aceleração da propagação da chama diminuiu consideravelmente com o aumento do número de Mach [Valiev et al., 2013]. A Figura 2.3 apresenta a geometria de uma chama em formato de chama alongada se propagando em um duto fechado livre de obstáculos.

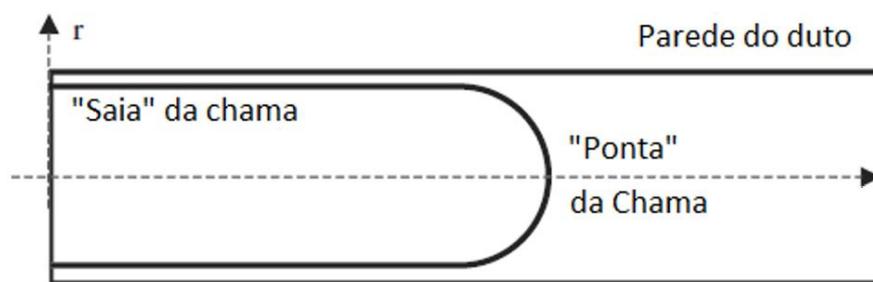


Figura 2.3 – Geometria de uma chama acelerando em forma de dedo [Adaptado de Valiev et al., 2013].

Shen et al., 2015, realizaram um estudo experimental de propagação de chamas pré-misturadas de hidrogênio-ar e propano-ar em um duto fechado. Os resultados mostraram que, após aumentar consideravelmente nos instantes iniciais, a velocidade da ponta da chama diminuiu consideravelmente logo após a inversão da frente de chama (chama tulipa) e continua oscilando até o final da propagação da chama no duto. Os autores observaram que a chama tulipa não é uma característica exclusiva de misturas de hidrogênio-ar, mas também pode ser obtida para uma mistura estequiométrica de propano-ar, e outros estudos mostram que a chama tulipa se manifesta para diferentes combustíveis.

Zheng et al., 2016, estudaram experimentalmente a deflagração de chamas pré-misturadas de hidrogênio-metano-ar em um duto fechado com cinco frações volumétricas de hidrogênio (entre 0% e 100%), em condições estequiométricas ($\phi = 1$). Os experimentos foram

realizados em um duto de vidro com extremidades fechadas com cinco valores de AR (5; 6,7; 10; 12,5 e 20). O sistema de ignição foi instalado junto à seção transversal direita do duto. Neste estudo, Zheng et al., 2016, verificaram que para todas as configurações de AR estudadas, a dinâmica da velocidade de propagação da chama estava relacionada à pressão, e ambas aumentavam significativamente com o aumento das frações de hidrogênio na mistura combustível.

Jin et al., 2017, realizaram um estudo experimental comparando a propagação de chamas pré-misturadas de gás natural-ar, com ϕ entre 0,67 e 1,50, metano-ar, com ϕ entre 0,61 e 1,36, e acetileno-ar, com ϕ entre 0,40 e 1,70, em um duto fechado. Os resultados mostraram que a composição do combustível tem uma influência significativa na velocidade de propagação e no formato da chama, sendo que as pequenas quantidades de etano e propano presentes no gás natural aceleram a propagação da chama. Por outro lado, devido à maior reatividade química, o acetileno tem a velocidade de propagação de chama maior quando comparado ao gás natural e ao metano.

Mendiburu et al., 2019, realizaram um estudo experimental em um duto fechado para analisar a formação da chama tulipa em misturas de etanol-ar com razões de equivalência de 0,9 a 1,4 e condições iniciais de pressão e temperatura de 20 a 60 kPa e 32 ± 2 °C, respectivamente. Neste estudo, os autores propuseram duas correlações para determinar a relação entre a distância da formação da chama plana e o diâmetro hidráulico para as misturas de etanol-ar. A partir dos resultados obtidos, os autores observaram que a velocidade de propagação da frente de chama é da ordem de 70 vezes a velocidade de chama laminar, e que esta velocidade é atingida a uma distância de aproximadamente 9 vezes o raio do duto de propagação. A Figura 2.4 apresenta os resultados experimentais da velocidade de propagação de chamas para as misturas estequiométricas de etanol-ar de algumas pressões e temperaturas iniciais.

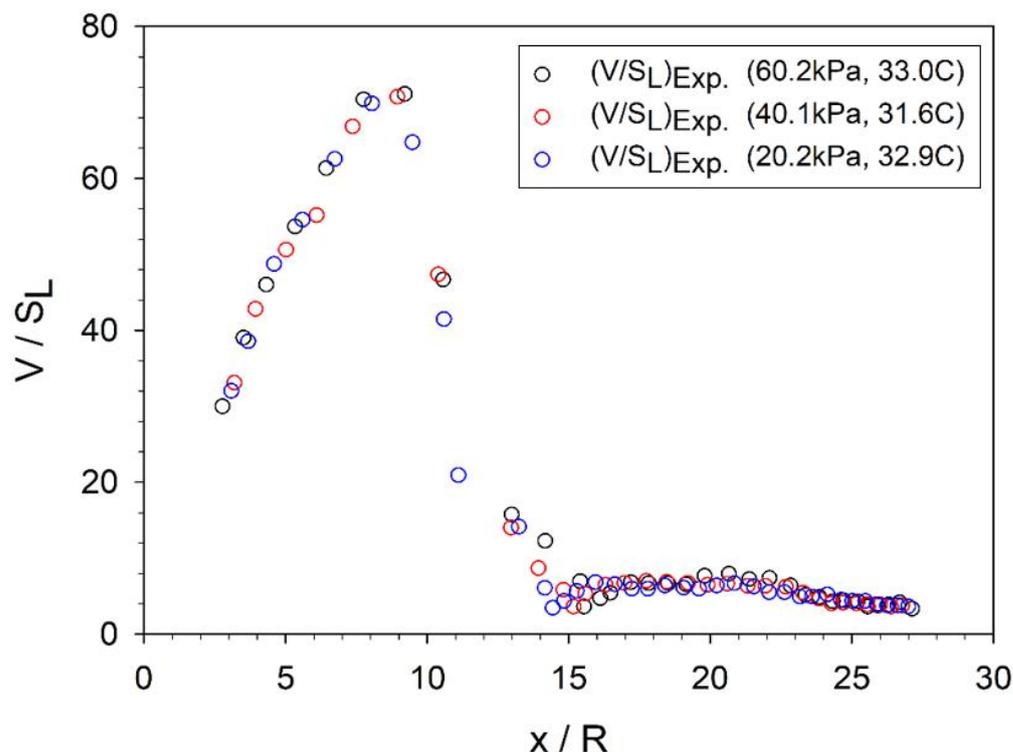


Figura 2.4 – Resultados experimentais da velocidade de propagação de chama de misturas estequiométricas de etanol e ar [Mendiburu et al., 2019].

Yang et al., 2019a, realizaram um estudo experimental comparativo da propagação de chamas pré-misturadas de hidrogênio e monóxido de carbono em ar, em dutos fechados e semiabertos fabricados de aço inoxidável. O estudo experimental foi conduzido em um duto transparente com seção retangular de 100 mm de largura e 1000 mm de comprimento ($AR = 10,0$). Os experimentos foram realizados com $\phi = 0,8$, frações volumétricas de hidrogênio de 0,1 a 0,9 e inserindo as misturas diretamente no duto através de controladores de fluxo de massa. Os resultados mostraram que a velocidade de propagação de chama foi similar para ambas as configurações (fechado e semiaberto) até o instante em que a frente de chama toca as paredes laterais do duto. Entretanto, após este instante, ocorre uma discrepância entre as velocidades de propagação, onde o duto semiaberto permite uma maior velocidade de propagação da frente de chama. Os autores relacionaram isso aos maiores valores de sobre pressão que foram obtidas na configuração do duto fechado, causando assim uma série de ondas de pressão que impedem o movimento de aceleração da frente de chama para esta configuração.

Luo et al., 2020, realizaram um estudo numérico e experimental para analisar o efeito da sobre pressão na velocidade de propagação de chamas pré-misturadas de metano-ar e etano-ar em duto fechado. Os resultados mostraram que no instante inicial da propagação da chama, a velocidade de propagação tem um crescimento exponencial, seguido por uma segunda fase em que a velocidade de propagação diminui consideravelmente após a formação da tulipa. À medida que uma chama tulipa é gerada, a frente de chama desordenada causa uma grande perturbação no processo de propagação da chama. Os autores também observaram que para chamas contendo maiores frações volumétricas de etano a velocidade de propagação da frente de chama foi maior.

Li et al., 2021, desenvolveram um trabalho experimental para estudar a propagação de chamas pré-misturadas de metano-ar, etano-ar, etileno-ar e hidrogênio-ar em um duto fechado com obstáculos. As frações de mistura utilizados nos experimentos foram de 7% ($\phi = 0,80$), 9,5% ($\phi = 1,00$) e 11% ($\phi = 1,20$) em volume de metano. Um obstáculo com razão de bloqueio de 18% foi instalado na extremidade direita do duto, no lado oposto à ignição. Neste estudo, Li et al., 2021, observaram que a mistura que obteve a maior velocidade de propagação foi a mistura estequiométrica de metano com 2% de fração volumétrica de hidrogênio. Esta observação está em consonância com outros trabalhos experimentais, assim a adição de hidrogênio na mistura torna a velocidade de propagação da chama mais elevada [Jin et al., 2017; Yang et al., 2019a]. Os autores observaram que o obstáculo altera o formato da chama, aumentando a turbulência e conseqüentemente a velocidade de propagação da chama. Entretanto, neste estudo o obstáculo foi instalado após a formação da chama tulipa, sendo que esse efeito não foi muito significativo [Li et al., 2021].

2.3 Efeito da razão de equivalência sobre a velocidade e aceleração de chamas

A razão de equivalência de uma mistura indica a quantidade de combustível presente nos reagentes, em relação à quantidade de combustível necessária para obter-se uma mistura estequiométrica. Assim, quando os valores da razão de equivalência são maiores que 01 existe um excesso de combustível presente na mistura (mistura rica) e para valores menores que 01,

existe um excesso de oxidante (mistura pobre) [Law, 2006]. A razão de equivalência pode ser descrita matematicamente pela equação 2.1:

$$\phi = \frac{(F/A)}{(F/A)_{esteq}} \quad (2.1)$$

onde F/A é definida como a razão entre a massa de combustível pela massa de oxidante na mistura e o subscrito “esteq” designa a composição estequiométrica da mistura. (Law, 2006)

Bradley et al., 2008, realizaram um estudo numérico para avaliar a transição deflagração-detonação de chamas turbulentas variando a razão de equivalência para misturas de hidrogênio-ar. Os resultados obtidos mostram que à medida que a razão de equivalência aumenta, as velocidades de chama aumentam consideravelmente, ultrapassando os valores de Chapman-Jouguet quando $\phi > 0,47$. A partir deste valor, tem-se o início da transição da deflagração-detonação (DDT) em chamas pré-misturadas de hidrogênio-ar [Bradley et al., 2008].

Assim, de acordo com Turns, 2012, a razão de equivalência pode ser considerada como um dos fatores mais importantes na determinação do desempenho de um sistema que envolvem processos de combustão. Ainda, Turns, 2012, observou que nas misturas levemente ricas obtém-se os maiores valores de velocidade da chama. Segundo Coelho e Costa, 2007, misturas com hidrogênio apresentam velocidades de propagação mais elevadas frente às demais, isso ocorre porque o hidrogênio apresenta uma velocidade de propagação de chama laminar superior à dos hidrocarbonetos, tanto pela maior difusividade térmica, quanto pela maior taxa de reação do hidrogênio [Coelho e Costa, 2007].

No estudo de Shen et al., 2015, a maior velocidade de propagação da chama pode ser obtida com uma razão de equivalência de 1,17, ou seja, em uma mistura levemente rica. Entretanto, conforme a razão de equivalência tende para misturas muito ricas ($\phi \geq 3,34$), a velocidade de propagação da chama tende a diminuir. Assim, evidenciando que a razão de equivalência é um fator preponderante na propagação de chamas.

Jin et al., 2017, observaram que para todas as misturas por eles estudadas, as velocidades máximas de propagação da ponta da chama foram obtidas nas misturas próximas das estequiométricas. Do mesmo modo, as máximas pressões dinâmicas e os menores tempos em que a chama toca as paredes laterais ocorrem nas misturas próximas das estequiométricas.

Os resultados obtidos por Yu et al., 2018, mostram que a velocidade máxima de propagação se manifesta para uma razão de equivalência de 1,5 e fração de hidrogênio de 0,9 (113,10 m/s), enquanto para a mistura estequiométrica com a mesma fração de hidrogênio esse valor foi de 87,71 m/s. Por outro lado, a menor velocidade de propagação foi observada para a mistura com $\phi = 3,0$ (62,57 m/s), ou seja, muito rica. Assim como em estudos anteriores, a razão de equivalência também se demonstrou um fator significativo nos parâmetros da velocidade máxima de propagação de chamas e no tempo em que a chama toca as paredes laterais.

Yang et al., 2019b, observaram que para propagação de misturas de hidrogênio, monóxido de carbono e ar em um duto semiaberto, a variação da razão de equivalência da mistura resultava na diminuição ou elevação na velocidade de propagação de uma chama. Conforme a mistura combustível de hidrogênio, monóxido de carbono e ar torna-se mais rica, conseqüentemente a propagação atinge maiores valores de velocidades de chama. Recentemente, Yang et al., 2020, apresentaram um estudo comparativo do efeito da razão de equivalência e o local da ignição de chamas pré-misturadas de hidrogênio, monóxido de carbono e ar em um duto semiaberto. A razão de equivalência tem um efeito muito importante na propagação, principalmente no tempo em que a frente de chama se propagando lateralmente toca as paredes laterais do duto. Conforme a mistura combustível torna-se mais rica, a tendência é que este tempo diminua. Entretanto, para valores de misturas muito ricas ($\phi = 3,0$) a tendência é que o tempo em que a chama toca as paredes laterais aumente novamente. Assim, os menores valores de tempo obtidos nesta pesquisa foram com razões de equivalência variando entre 1,6 e 2,0 [Yang et al., 2020].

Luo et al., 2020, realizaram um estudo experimental das deflagrações de chamas pré-misturadas de metano, etano e ar em um duto fechado. Neste estudo, os autores observaram que para as misturas de metano-ar e etano-ar, os resultados em relação as velocidades de propagação foram elevadas para misturas levemente ricas. Assim, torna-se evidente que a razão de equivalência tem um papel muito importante na velocidade máxima de propagação de uma chama. A Tabela 2.1 apresenta um resumo dos principais estudos relatados na literatura.

Tabela 2.1 – Efeito da razão de equivalência na propagação de chamas.

Autor	Mistura	$V_{m\acute{a}x}/S_L$	Razão de equivalência	τ_w (s)
[Bradley et al., 2008]	H ₂ e ar	-----	Levemente rica	-----
[Shen et al., 2015]	H ₂ e ar	44,21	Levemente rica	0,0032
[Jin et al., 2017]	GN, CH ₄ , C ₂ H ₂ e ar	50,59	Estequiométricas	0,0840
[Yu et al., 2018]	H ₂ , CO e ar	32,31	Levemente rica	0,0500
[Yang et al., 2020]	H ₂ , CO e ar	33,74	Rica	0,0850
[Yang et al., 2019b]	H ₂ , CO e ar	35,90	Levemente rica	0,0390
[Luo et al., 2020]	CH ₄ , C ₂ H ₆ e ar	17,00	Levemente rica	-----

2.4 Efeito da pressão inicial na aceleração da chama

Segundo Law, 2006, a pressão inicial tem efeito significativo na propagação de uma chama. Conforme a pressão aumenta, a velocidade de propagação de chama tende a diminuir [Law, 2006; Coelho e Costa, 2007]. Valiev et al., 2013, estudaram a influência da compressão nos primeiros instantes de propagação de uma chama. Neste estudo, as pressões iniciais variaram entre 0,2 e 0,75 bar. Assim, a partir da variação da pressão inicial tem-se à oscilação do coeficiente de expansão dos gases (θ), que é a relação entre a densidade dos gases queimados e não queimados. Entre os resultados obtidos, pode-se observar que, para os instantes iniciais de uma propagação, quanto menor for a pressão inicial, maior é a espessura térmica da chama, conseqüentemente, o efeito puro da curvatura torna-se mais evidente. Entretanto, pela teoria proposta pelos autores, foi constatado que a variação da pressão tem uma influência mínima sobre da propagação inicial de uma chama.

Estudos recentes publicados por Mendiburu et al., 2019, avaliaram, dentre outros aspectos, o efeito da pressão inicial na propagação de chamas pré-misturadas de etanol e ar em um tubo fechado. As pressões iniciais nos testes variaram entre 0,2 e 0,6 bar, e as razões de equivalência variaram de 0,9 a 1,4. Pelos resultados obtidos, observa-se que a oscilação da

pressão não causou um impacto significativo na propagação de chamas pré-misturadas de etanol e ar.

Recentemente, Shen et al., 2019, estudaram a evolução da propagação de uma chama estequiométrica pré-misturada de hidrogênio e ar em um duto fechado. Neste trabalho, as pressões iniciais variaram entre 0,3, 0,6 e 1,5 bar. Pelos resultados obtidos pode-se inferir que a pressão inicial tem efeito sobre a velocidade de propagação da chama, pois as velocidades máximas obtidas para as pressões estudadas foram 61,3, 73,2 e 101,2 m/s, respectivamente. Por outro lado, a onda de pressão seria intensificada com o aumento da pressão inicial em uma propagação. Outro fato importante relatado pelos autores é que a onda de pressão atua de forma subordinada na inversão da tulipa, ou seja, a variação da pressão inicial tem efeito na formação da chama tulipa para chamas pré-misturadas de hidrogênio e ar.

A partir dos estudos analisados, pode-se inferir que a pressão inicial pode ter efeito no comportamento da propagação de algumas misturas de chamas pré-misturadas, principalmente quando comparados resultados considerando uma faixa mais ampla de pressões. Dessa forma, a pressão inicial pode ter efeito no comportamento da chama, tornando a velocidade de propagação maior para uma maior pressão inicial, afetando a formação da chama tulipa, e tornando a chama tulipa distorcida mais regular ou irregular. Entretanto, poucos estudos foram realizados com base no efeito da pressão inicial na velocidade de propagação de chamas em dutos. As informações citadas podem ser observadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Efeito da pressão inicial na propagação de chamas.

Autor	Mistura	Pressão Inicial	Velocidade de propagação da chama
[Valiev et al., 2013]	H ₂ e O ₂	Baixa	Efeito mínimo
[Mendiburu et al., 2019]	C ₂ H ₅ OH e ar	Baixa	Efeito mínimo
[Shen et al., 2019]	H ₂ e ar	Baixa	Aumenta

2.5 Efeito do enriquecimento com hidrogênio

Zheng et al., 2016, estudaram experimentalmente a deflagração de chamas pré-misturadas de hidrogênio-metano-ar em um duto fechado variando a fração volumétrica de hidrogênio entre 0%, 25%, 50%, 75% e 100% na mistura estequiométrica. Os resultados obtidos apresentaram as seguintes velocidades de propagação das misturas: 14,01, 16,35, 22,77, 40,87 e 93,43 m/s, respectivamente. Assim, para todas as misturas estudadas, a velocidade de propagação chama aumentou significativamente com o aumento das frações de hidrogênio na mistura combustível.

Yang et al., 2019a, realizaram um estudo experimental comparativo da propagação de chamas pré-misturadas de hidrogênio-monóxido de carbono-ar em dutos fechados e semiabertos. Os experimentos foram realizados com uma razão de equivalência de 0,8 e as frações volumétricas de hidrogênio variaram entre 10%, 30% e 90% na mistura. A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se notar que a posição da formação da chama plana e o tempo em que a chama toca as paredes laterais do duto diminuem à medida que ocorre um incremento na fração volumétrica de hidrogênio na mistura combustível tanto no duto fechado quanto no duto semiaberto. A velocidade de propagação da chama e as pressões obtidas aumentaram consideravelmente quando as frações de hidrogênio aumentam, chegando a atingir velocidades máximas de propagação no duto fechado de 18,98, 25,95 e 83,05 m/s para 10%, 30% e 90% de hidrogênio na mistura, respectivamente.

Yang et al., 2019b, desenvolveram outro estudo experimental comparativo da propagação de chamas pré-misturadas de hidrogênio-monóxido de carbono-ar em dutos semiabertos variando as frações volumétricas de hidrogênio de 10% a 90% na mistura, e as razões de equivalência de 0,8 a 1,2. Os resultados nesta pesquisa mostram que ocorre um alongamento da frente de chama no estágio onde a chama toca as paredes laterais, de forma que, esta etapa torna-se mais proeminente à medida que a fração de hidrogênio aumenta. Segundo os autores, esse alongamento da frente de chama ocorre devido ao movimento de fluxo confinado dos gases. Na Tabela 2.3 é apresentado um resumo dos principais estudos relatados na literatura.

Tabela 2.3 – Efeito do enriquecimento com hidrogênio na propagação de chamas.

Autor	Mistura	Fração de Hidrogênio	Velocidade de propagação da chama	Sobre pressão	Tempo em que as saias da chama tocam as paredes laterais
[Zheng et al., 2016]	H ₂ e ar	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Diminui
[Yang et al., 2019a]	GN, CH ₄ , C ₂ H ₂ e ar	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Diminui
[Yang et al., 2019b]	H ₂ , CO e ar	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Diminui

2.6 Teoria disponível na literatura

Nesta seção será apresentado o modelo analítico de Valiev et al., 2013, que permite prever o comportamento da velocidade e aceleração da chama no estágio inicial da propagação, dentro de um duto livre de obstáculos. Vale ressaltar que poucos são os modelos disponíveis na literatura que abordam a propagação de chamas em dutos fechados nos instantes iniciais.

2.6.1 Modelo analítico para previsão da velocidade de propagação da frente de chama

Valiev et al., 2013, apresentaram a teoria mais recente da aceleração de chamas nos instantes iniciais de uma propagação para um duto sem obstáculos. Neste estudo foram apresentadas relações matemáticas para representar os instantes iniciais da aceleração de chamas em dutos.

Valiev et al., 2013, sistematizaram essas equações de forma a relacionar, dentre outros aspectos, o instante em que a chama toca as paredes laterais do duto e a velocidade máxima de propagação de uma chama. A partir do instante em que a chama toca as paredes laterais de um

duto pode-se determinar qual a distância a partir da fonte de ignição em que ocorre uma desaceleração da propagação de chama dentro de um duto livre de obstáculos [Mendiburu et al., 2019]. A teoria proposta por Valiev et al., 2013, tem por base as seguintes hipóteses simplificadoras:

- a) o duto possui paredes adiabáticas que permitem o não-deslizamento do escoamento;
- b) a propagação da chama é estudada em duas dimensões;
- c) o duto encontra-se fechado no lado da ignição;
- d) o escoamento é considerado incompressível na primeira parte, porém na segunda parte é considerada uma compressibilidade moderada;
- e) as geometrias plana e axissimétrica são consideradas;
- f) o escoamento é considerado como potencial, ou seja, é incompressível, irrotacional e em regime permanente.

Assumindo uma chama com a geometria plana, a análise proposta por Valiev et al., 2013, se inicia pela equação diferencial apresentada na Equação 2.2 abaixo:

$$\frac{d\xi}{d\tau} = -Ma\gamma(\theta - 1)^2\xi^2 + \sigma_{1,pl}\xi^2 + \theta_1 \quad (2.2)$$

O tempo estimado em que a frente de chama se propaga lateralmente no duto pode ser obtido pela Equação 2.3 por:

$$\tau_w = \frac{\ln\theta}{\theta - 1} \quad (2.3)$$

A solução da equação diferencial apresentada como Equação 2.2, fornece a posição axial da ponta da chama, conforme mostrado na Equação 2.4:

$$\xi = \frac{2\theta_1[\exp(\sigma_2\tau) - 1]}{(\sigma_2 - \sigma_{1,pl})\exp(\sigma_2\tau) + (\sigma_2 + \sigma_{1,pl})} \quad (2.4)$$

A velocidade máxima de propagação da ponta da chama é dada pela Equação 2.5 por:

$$\frac{U}{S_L} = -Ma\gamma(\theta - 1)^2\xi_w^2 + \sigma_{1,pl}\xi_w + \theta_1 \quad (2.5)$$

Alguns parâmetros auxiliares são obtidos pelas Equações 2.6, 2.7 e 2.8:

$$\sigma_{1,pl} = (\theta - 1)[1 - Ma(\theta + 2(\gamma - 1)(\theta - 1))] \quad (2.6)$$

$$\theta_1 = \theta - Ma(\gamma - 1)(\theta - 1)^2 \quad (2.7)$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\sigma_{1,pl}^2 + 4Ma\gamma\theta_1(\theta - 1)^2} \quad (2.8)$$

onde ξ , τ_w , e U são a coordenada axial adimensional, o tempo adimensional e a velocidade máxima da ponta da chama, respectivamente.

As Equações 2.6, 2.7 e 2.8 utilizam parâmetros auxiliares para o cálculo, como o coeficiente de expansão dos gases ($\theta = \rho_u/\rho_b$) que relaciona as densidades dos gases queimados e não queimados, o coeficiente das capacidades caloríficas ($\gamma = c_p/c_v$) e o número de Mach inicial da propagação da chama ($Ma = S_L/C_{s,0}$), que relaciona a velocidade de chama laminar e a velocidade do som dos reagentes.

Assim, tem-se o modelo analítico para a previsão da velocidade de propagação de uma frente de chama nos instantes iniciais da propagação. Entretanto, não foram realizados muitos estudos para validar esse modelo existente, com isso tem-se uma oportunidade de comparar

dados experimentais aos adquiridos numericamente e validar a proposta apresentada por Valiev et al., 2013.

2.7 Efeito do número de Lewis na propagação da chama

O número de Lewis (Le) é um número adimensional que define a razão entre difusividade térmica (α) e a difusividade de massa (D_{AB}) de uma mistura combustível [Glassman et al., 2008]. A Equação 2.9 apresenta a relação. Sua expressão matemática é dada por:

$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} \quad (2.9)$$

Chakraborty e Cant, 2006, realizaram um estudo numérico sobre a influência do número de Lewis na propagação de chamas para analisar a geometria de chamas turbulentas pré-misturadas. Neste estudo, foram utilizados três números de Lewis (0,8; 1,0 e 1,2) para chamas planas. De acordo com os autores, para os números de Lewis não unitários, ocorrem variações de temperatura que influenciam no comportamento da velocidade de deslocamento da chama.

Turns et al., 2012, consideram o número de Lewis como sendo um valor unitário. Entretanto, a variação da composição do combustível confere mudanças nas propriedades químicas e de transporte, que por sua vez alteram a reatividade e as características de queima da mistura combustível [Zitouni et al., 2022]. Assim, o número adimensional de Lewis representa uma propriedade chave para a caracterização da propagação de chamas.

Recentemente, Li et al, 2022, estudaram o efeito dos diluentes na velocidade de chama laminar e instabilidade celular das chamas de 2-metiltetraidrofurano e ar. Dentre os diluentes estudados, o hélio apresentou maior influência na intensidade da instabilidade térmica difusiva da mistura. Assim, quanto mais diluente (hélio) era adicionado na mistura, maior se tornava o número de Lewis. Os resultados obtidos mostram que a velocidade de chama laminar reduz

com o aumento de diluente na mistura. Por outro lado, tanto a temperatura adiabática de chama e a difusividade térmica aumentaram com o incremento de diluente na mistura.

Nesse sentido, o trabalho atual aborda uma variação do número adimensional de Lewis para algumas misturas combustíveis utilizando o hélio como diluente na mistura.

(Zitouni, et al., 2022) (Li, et al., 2022)

2.8 Efeito do número de Zeldovich na propagação da chama

O número de Zeldovich (Ze) é um número adimensional que proporciona uma medida quantitativa da energia de ativação de uma reação química, ou seja, sua reatividade. A Equação 2.10 apresenta a equação que determina este parâmetro. Sua expressão matemática é dada por:

$$Ze = \frac{E_a}{RT_b} \left(\frac{T_b - T_u}{T_b} \right) \quad (2.10)$$

onde E_a é energia de ativação da reação, R é a constante universal dos gases, T_b é a temperatura do gás queimado e T_u é a temperatura do gás não queimado.

Assim, para calcular o número de Zeldovich é necessário calcular o valor da energia de ativação por meio de valores obtidos das velocidades de chama laminar pelos mecanismos de cinética química.

Considere uma chama se propagando hipoteticamente dentro de um duto. A partir da Figura 2.5 observa-se as três regiões principais da estrutura da chama, a mencionar: região de transporte, região da reação e região de equilíbrio.

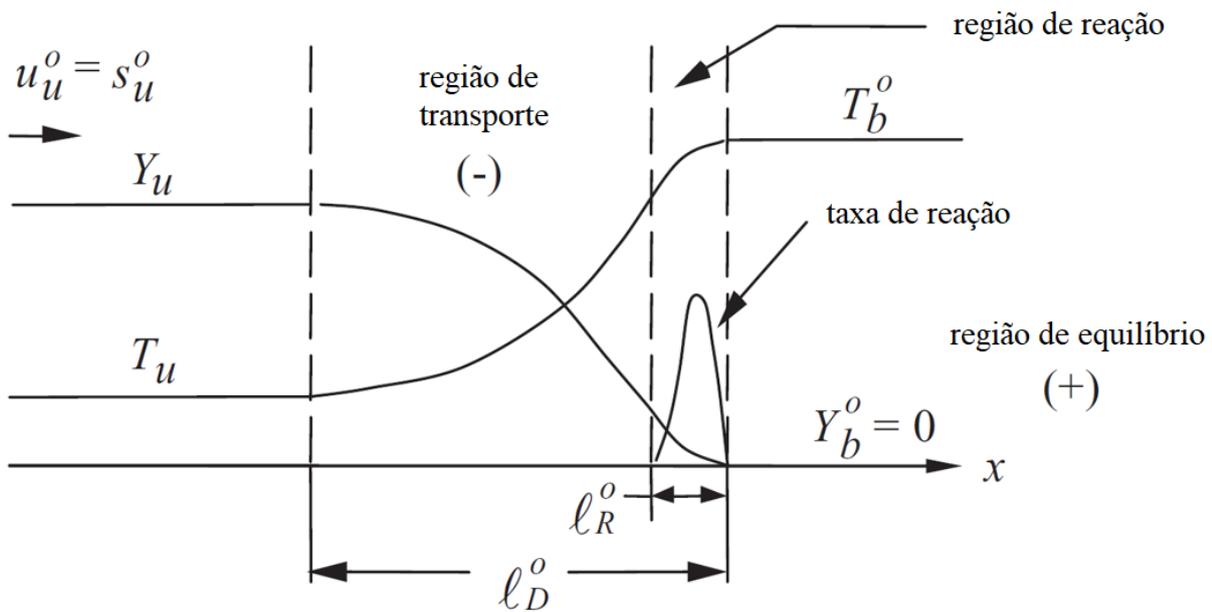


Figura 2.5 – Estrutura assintótica da chama [Adaptado de Law, 2006].

A região de reação é uma região muito estreita que tem uma mudança rápida e brusca devido à ativação da reação [Law, 2006]. Esta rápida taxa de mudança de propriedades dentro dessa estreita região implica que o transporte por difusão tem uma influência maior do que o transporte por convecção. Partindo da equação da conservação de massa e da conservação de energia, assumindo algumas condições de contorno, obtém-se a relação entre os gases queimados e não queimados. A equação 2.11 apresenta a relação entre os comprimentos característicos da região de reação e da região de transporte, com as temperaturas dos gases queimados e não queimados. Sua expressão matemática é dada por:

$$\frac{\ell_R^o}{\ell_D^o} \sim \frac{(T_b^o)^2}{(T_b^o - T_u)T_a} = Ze^{-1} \quad (2.11)$$

onde ℓ_R^o é espessura da região de ativação da reação, ℓ_D^o é a espessura da região de transporte, T_b^o é a temperatura do gás queimado e T_u é a temperatura do gás não queimado, T_a é a temperatura de chama adiabática e Ze é o número adimensional de Zeldovich.

Assim, por $Ze^{-1} \ll 1$, percebe-se que a zona de reação é muito fina. Inserindo a relação do fluxo de massa, percebendo que a convecção e a difusão se equilibram na zona de pré-aquecimento, e rearranjando os termos, obtemos a equação 2.12, dada por:

$$\frac{f^\circ}{\ell_D^\circ} \sim \frac{w_b^\circ}{Ze} \quad (2.12)$$

onde f° é fluxo de massa, ℓ_D° é a espessura da região de transporte, w_b° é a taxa de reação avaliada na temperatura da fina zona de reação e Ze é o número adimensional de Zeldovich.

A partir do equacionamento proposto por Law, 2006, percebe-se que o fluxo de massa aumenta com o aumento da taxa de transporte da reação, enquanto a espessura da região de ativação da reação aumenta com o aumento da taxa de transporte, mas diminui com a taxa de reação. Nesse contexto, neste trabalho relaciona-se os números de Lewis e Zeldovich com a aceleração de chama mensurada experimentalmente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas as descrições dos materiais, métodos e equipamentos utilizados na pesquisa de propagação de chamas em um duto livre de obstáculos. A bancada experimental foi montada no Laboratório de Combustão da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Os métodos utilizados apresentam uma forma de avaliar o efeito dos números adimensionais de Lewis e Zeldovich na velocidade de propagação de chamas em misturas estequiométricas. Os números de Lewis e Zeldovich das misturas estudadas foram definidos e obtidos por Laueremann, no prelo.

3.1 Bancada experimental da propagação de chamas

A bancada experimental é composta por um duto de propagação, uma câmara de mistura, um agitador magnético, transdutores de pressão, uma bomba de vácuo, um sensor de temperatura tipo K, um sistema de aquisição de sinais modelo NOVUS, um sistema de ignição, válvulas, mangueiras e conexões. A Figura 3.1 apresenta o esquema da bancada experimental, onde os cilindros de gás natural (GN), ar sintético, hidrogênio, hélio e nitrogênio são conectados por tubos de poliuretano de 10 mm de diâmetro nas válvulas instaladas no painel de controle da bancada. A partir das válvulas instaladas neste painel de comando tem-se o controle da inserção dos gases na câmara de mistura e no duto de propagação. Maiores detalhes sobre o funcionamento da bancada experimental podem ser encontrados no Apêndice B.

3.1.1 Duto de propagação

A Figura 3.2 apresenta o duto de propagação composto de três módulos de seção quadrada de 100 x 100 mm e 1050 mm de comprimento total. Cada módulo possui dimensão de 350 mm de comprimento de fabricação em aço inox. O duto possui visores de vidro borossilicato de 25 mm de espessura e 250 mm de comprimento que permitem a visualização da

propagação da chama. Assim, para registrar o histórico de pressão, foram instalados dois transdutores de pressão do modelo Warme (TP-6367 de 10 bar e TP-6419 de 1 bar) de pressão absoluta, um sensor de temperatura de modelo Omega (tipo K) e um sistema de ignição que compreende uma vela de ignição modelo NGK tipo R e um transformador, fornecendo uma tensão de 8 kV e uma corrente de 30 mA.

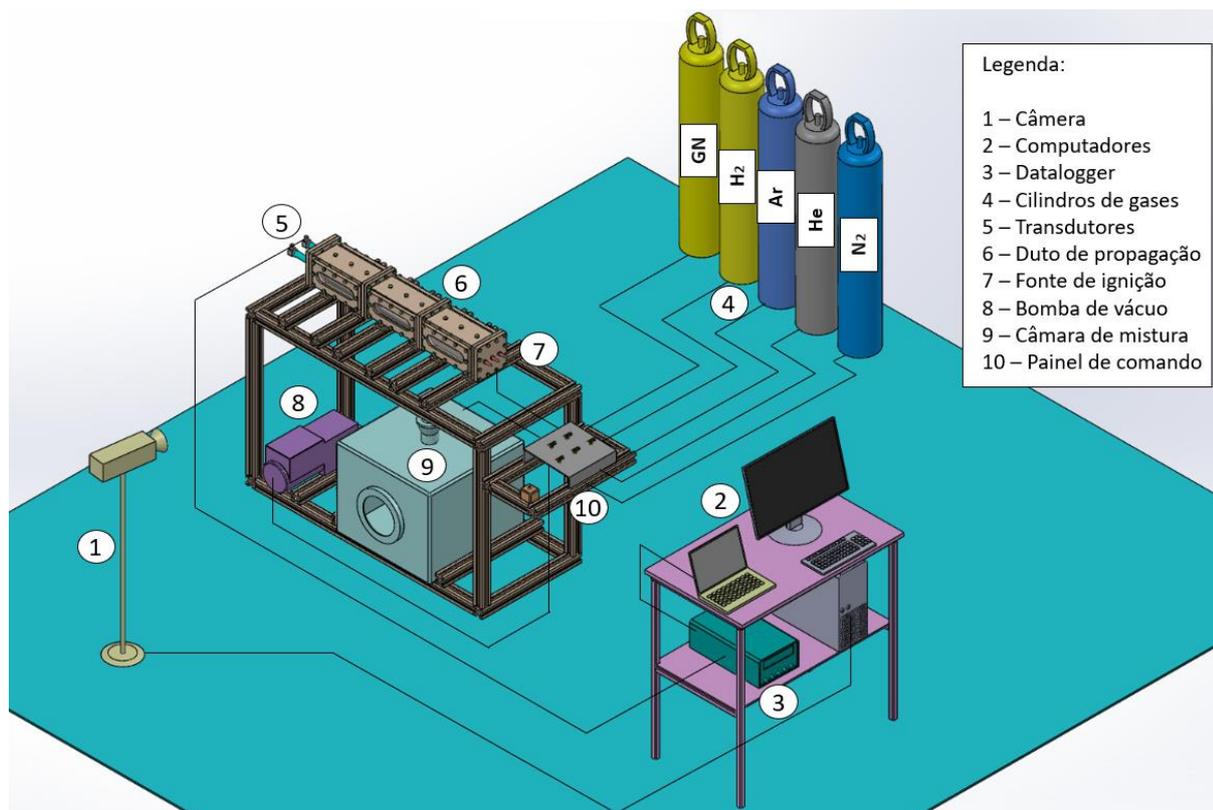


Figura 3.1 – Esquema da bancada experimental.

3.1.2 Câmara de mistura

A Figura 3.3 apresenta a câmara de mistura que é composta por uma caixa de aço de 600 mm de largura, 600 mm de comprimento e 500 mm de altura. Nesta caixa existe um visor de vidro temperado que permite a visualização da mistura combustível que é preparada em um balão de vidro temperado com capacidade volumétrica de 20 litros. Este balão se encontra

dentro da caixa com um agitador magnético na sua base que faz com que a mistura combustível se torne uniforme após um determinado intervalo de tempo. Os gases são inseridos na câmara de mistura através de dutos de aço inox que estão conectados em válvulas e reguladoras de pressão que são instaladas nos cilindros de gás natural, ar sintético, hidrogênio e hélio. O método utilizado para realizar as misturas é o método de pressões parciais.



Figura 3.2 – Duto de propagação.

No presente estudo, foram utilizados como combustíveis o GNV comercial e o hidrogênio. O ar sintético foi utilizado como oxidante e o hélio como agente diluente nas misturas. A composição química do GNV utilizado como combustível é: 90,8% de CH_4 , 6,1% de C_2H_6 , 1,2% de C_3H_8 , 0,5% de CO_2 e 1,5% de N_2 [GasNet, 2020]. O hidrogênio empregado neste estudo possui pureza de 99,999%, assim como o ar sintético utilizado como oxidante possui pureza acima de 99,999%. O hélio, aplicado como diluente na mistura, possui pureza de 99,995% e o gás utilizado para a limpeza interna da câmara de mistura e do duto de propagação foi nitrogênio.

A Tabela 3.1 apresenta as misturas estudadas neste trabalho obtidas a partir do método de pressões parciais. Assim, a partir do número de mols de cada mistura e a razão de equivalência ($\phi = 1$) foram obtidos os valores do número de Lewis (Le) e Zeldovich (Ze), os quais dependem do valor da energia de ativação e das velocidades de chama laminar dadas

pelos mecanismos de cinética química, utilizando o mecanismo de San Diego através do *software* Cantera [Goodwin et al., 2021]. No intuito de variar os parâmetros adimensionais de Lewis e Zeldovich, neste estudo foi utilizado hélio como diluente na mistura combustível [Lauermann, no prelo]. Os testes experimentais para caracterizar a velocidade de propagação da chama em um duto fechado foram realizados pelo menos três vezes para cada composição de mistura. Como pode ser observado na Tabela 3.1, o número de Zeldovich ficou na faixa de 5,71 até 8,85. Por outro lado, o número de Lewis variou no intervalo desde 0,60 até 1,36.

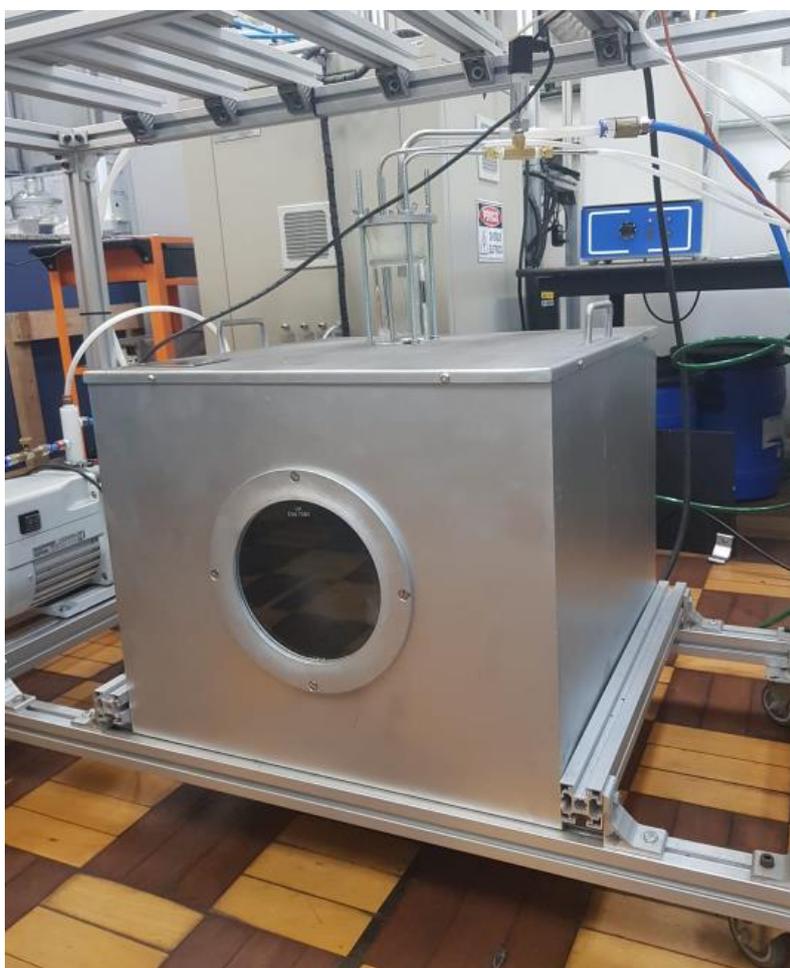


Figura 3.3 – Câmara de mistura.

Tabela 3.1 – Misturas Estudadas.

Código	Mistura	Número de Zeldovich	Número de Lewis
Mix 1	[50% GN + 50% H ₂] + ar	7,17	0,60
Mix 2	[75% GN + 25% H ₂] + ar	8,13	0,75
Mix 3	[15% GN + 85% H ₂] + 20% He + ar	5,23	0,81
Mix 4	[75% GN + 25% H ₂] + 10% He + ar	8,39	0,93
Mix 5	[15% GN + 85% H ₂] + 30% He + ar	5,71	0,99
Mix 6	GN + ar	8,70	1,09
Mix 7	[90% GN + 10% H ₂] + 10% He + ar	8,67	1,14
Mix 8	GN + 10% He + ar	8,85	1,36

3.1.3 Sistema de aquisição de dados

Para a coleta de dados, foi utilizado um sistema de aquisição de dados *FieldLogger* da marca Novus com 8 entradas analógicas de 24 bits, de tensão, corrente ou termopares, configuráveis por software. O registro dos canais possui uma taxa máxima de 1000 coletas por segundo. Nos testes a coleta foi realizada a cada 100 ms. O equipamento possui conexão USB (*Universal Serial Bus*) para transmissão de dados para o computador. Assim, os valores de pressão e temperatura foram obtidos via *software* FLConfig versão 1.6.9.03 instalado em um notebook da marca Acer, Aspire E15, processador AMD Quad-Core 3,30 GHz, 4 GB de memória RAM e 1 TB de HD.

A fim de obter vídeos da propagação da chama, foi utilizado uma câmera de alta velocidade da marca Phantom Vison Research, versão v411, que tem capacidade para captar 100.000 *frames* por segundo, foi também necessário utilizar uma fonte de luz. Entretanto, nos testes desta pesquisa foram utilizados 12.000 *frames* por segundo. O equipamento possui conexão via cabo de rede *ethernet* para transmissão de imagens para o computador. Desse modo, a captação dos vídeos foi realizada via *software* Phantom Camera Control (PCC) versão 3.6 instalado em um computador da marca Razor, com 6 núcleos, processador i7 3,5 GHz, 16 Gb de memória RAM e 2 TB de HD. Dentro das questões que afetam a visualização da imagem

e excesso de luz, neste estudo foram definidos os parâmetros óticos como: abertura 1.8, 12000 *fps* e ISO SAT T 20.000.

Devido as instabilidades apresentadas pelas chamas diluídas com hélio, verificou-se que os parâmetros inicialmente estabelecidos não foram capazes de detectar a frente da chama. Com isso, foi necessário introduzir filtros no momento do processamento das imagens para a obtenção da velocidade de propagação da chama no *software* Tracker [Physlets, 2022].

Para coleta de dados da pressão, foi utilizado um transdutor de pressão do modelo Warme (TP-6367 de 10 bar), localizado na parte oposta do duto a 103 cm a jusante do ponto de ignição. Os valores da pressão foram obtidos separadamente no final para cada mistura definida na Tabela 3.1.

3.2 Procedimento experimental

O procedimento experimental foi conduzido pelo sistema de batelada. Nesse sentido, antes de se iniciar o teste experimental, definiu-se a mistura combustível desejada em cada teste. Para isso, foi criada uma planilha eletrônica que relaciona a fração de combustível utilizada na mistura com sua respectiva pressão parcial. Assim, utilizou-se o método de pressões parciais para realizar a mistura. Maiores detalhes a planilha eletrônica de preparação de mistura podem ser encontrados no Apêndice E. A Figura 3.4 apresenta um fluxograma resumido do procedimento experimental.

3.2.1 Preparação da mistura na câmara de mistura

Após definida a mistura combustível, foi realizado o vácuo na câmara de mistura até atingir a pressão de 0,5 kPa ou inferior. A pressão foi lida pelos transdutores de pressão e visualizada diretamente na tela do computador por meio do *software* do *FieldLogger*. Nesse momento, somente a válvula de acesso do vácuo para a câmara de mistura permaneceu aberta,

as demais válvulas foram mantidas fechadas. Assim, realizou-se somente o vácuo na câmara de mistura, evitando a entrada dos demais gases na câmara no momento do vácuo.

A partir da realização do vácuo na câmara de mistura, a válvula de vácuo foi fechada e a bomba de vácuo foi desligada. Neste momento a câmara de mistura foi preenchida com as quantidades desejadas dos gases, utilizando-se o método de pressões parciais, na seguinte ordem: gás natural, hidrogênio, hélio e ar sintético. Após atingir a mistura desejada, as válvulas de acesso à câmara de mistura foram fechadas e o agitador magnético que está instalado abaixo do balão da câmara de mistura foi acionado por 25 minutos, assegurando assim a homogeneização da mistura.

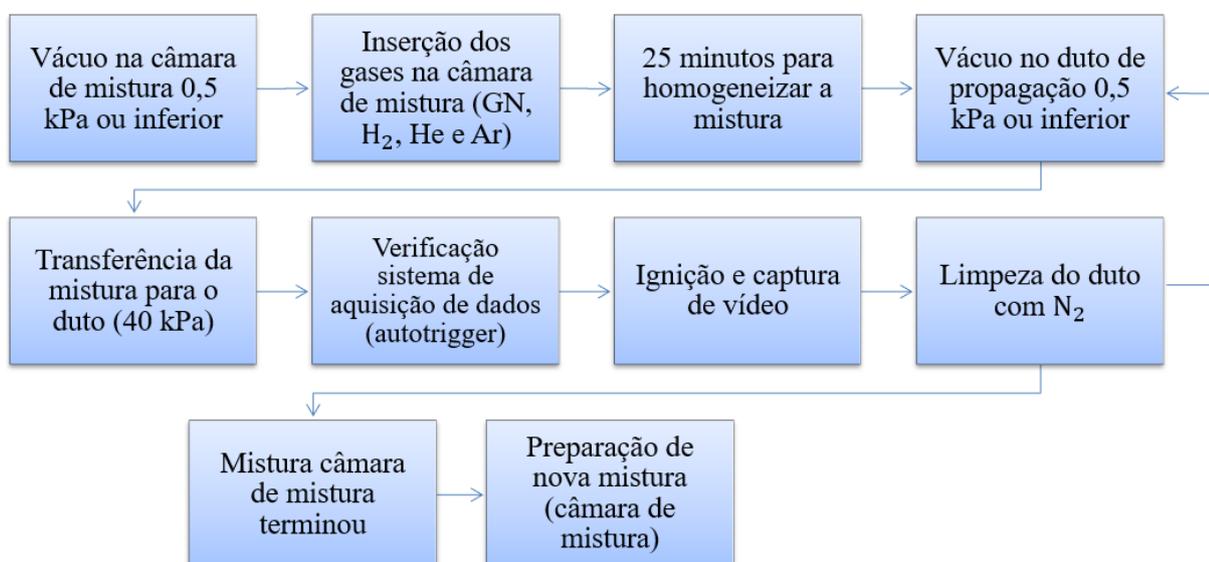


Figura 3.4 – Procedimento experimental.

3.2.2 Transferência da mistura para o duto e teste de propagação

Quando estava próximo ao término destes 25 minutos de agitação, foi iniciado o vácuo no duto de propagação, onde a bomba de vácuo foi acionada novamente e a válvula de acesso que liga a bomba de vácuo ao duto de propagação foi aberta. Nesse mesmo instante, a válvula de acesso ao transdutor de pressão de 1 bar que está instalado junto ao duto de propagação foi aberta. O transdutor de 1 bar foi utilizado para realizar a correta medição da pressão no interior

do duto de propagação. Quando a pressão no interior do duto foi menor ou igual que 0,50 kPa, a válvula de acesso da bomba de vácuo para o duto foi fechada e a bomba de vácuo foi desligada.

O próximo passo foi desligar o agitador magnético e abrir a válvula que liga a câmara de mistura ao duto de propagação. Neste momento, parte da mistura combustível que foi preparada na câmara de mistura foi inserida no duto de propagação. A pressão inicial desejada no duto de propagação para todos os testes foi de 40 kPa. A leitura dessa pressão foi realizada pelo transdutor de pressão de capacidade de 1 bar instalado no duto de propagação. Cabe salientar que, após obter a pressão desejada tornou-se muito importante sempre fechar a válvula de acesso ao transdutor de pressão de 1 bar, pois caso contrário esse transdutor seria danificado no ato da ignição e propagação da chama devido ao elevado gradiente de pressão proveniente da combustão da mistura inflamável.

Após isso, por precaução, conferiu-se o sistema de *autotrigger* do *software* de aquisição de imagens para não desperdiçar testes de propagação, e na sequência acionou-se a ignição. Ao término da propagação da chama, a válvula de exaustão do duto para aliviar a pressão interna foi aberta para evacuar os gases queimados. Na sequência, com o objetivo de realizar a limpeza interna do duto de propagação, a válvula de acesso do nitrogênio ao duto de propagação foi aberta.

Logo após o término da limpeza interna do duto, as válvulas de acesso do nitrogênio e de exaustão foram fechadas. Assim, o procedimento de vácuo no duto foi realizado novamente por meio do acionamento da bomba de vácuo e da válvula de acesso do vácuo ao duto. Nesse instante, a válvula de acesso do transdutor de 1 bar foi acionada e o processo de enchimento da mistura combustível da câmara de mistura para o duto de propagação foi realizado novamente.

Quando a quantidade de gases na câmara de mistura era insuficiente para realizar mais testes no duto de propagação, foi necessário realizar a limpeza da câmara de mistura antes da preparação de uma nova mistura. Para executar este procedimento, primeiramente o gás inerte nitrogênio foi inserido na câmara de mistura até uma pressão de 150 kPa dentro do balão com o objetivo de diluir a mistura. Assim, garantiu-se a segurança ao acionar a bomba de vácuo para retirar os gases do balão. Logo após o vácuo ser realizado, o gás ar sintético foi inserido dentro

da câmara de mistura até uma pressão de 100 kPa. Somente após esta etapa, o procedimento de preparação da próxima mistura era realizado e os testes eram retomados.

3.3 Determinação da velocidade de propagação da chama

Inúmeras técnicas são utilizadas para caracterizar a velocidade de propagação de chamas pré-misturadas. Porém, a grande dificuldade se concentra quando essas chamas são diluídas com hélio ou quando estas envolvem hidrogênio puro, pois nestes casos verificou-se dificuldade para visualizar a ponta da chama. Uma alternativa para observar a propagação de chamas deste tipo de mistura seria utilizar um sistema de imagem *Schlieren*. Salienta-se que esse sistema não esteve disponível para este estudo.

Os vídeos da propagação da chama foram utilizados para medir quantitativamente a velocidade de propagação da chama, a qual foi extraída de uma série de vídeos gravados pela câmera mantida a uma distância de aproximadamente 750 mm da janela de visualização. Trabalhos anteriores, como descritos por Mendiburu et al., 2019, basearam-se principalmente na observação visual para determinar a velocidade de propagação da chama.

Mendiburu et al., 2019, utilizou uma metodologia fundamentada numa série de vídeos de propagação de chamas de diferentes misturas gravadas durante os testes experimentais. Assim, utilizando o *software* PCC versão 3.6, que faz a leitura das imagens capturadas pela câmera, utilizou-se o *software* Tracker versão 6.0.2 para determinar a velocidade de propagação da chama. Primeiramente os vídeos obtidos no *software* PCC foram convertidos do formato original “.*cine*” para o formato “.*mov*” para poder realizar o processamento das imagens no *software* Tracker.

Utilizando o *software* Tracker versão 6.0.2, todas as respectivas velocidades de propagação de chama foram coletadas com base no tempo e no deslocamento da frente de chama de cada mistura. Foram definidos 20 pontos distintos de captura para cada janela, sendo o parâmetro para definição da distância entre esses pontos a quantidade de *frames* capturados em cada mistura. Verificou-se que para misturas contendo H₂-GN-He resultaram em menor quantidades de *frames* por vídeo. Assim, para vídeos contendo 291 *frames* resultavam em 14

frames por intervalo para misturas de GN-ar, enquanto para misturas de H₂-GN-He resultaram em 210 frames por vídeo, ou seja, em torno de 10 frames por intervalo. A Figura 3.5 apresenta a determinação da velocidade de propagação de chama no *software* Tracker versão 6.0.2.

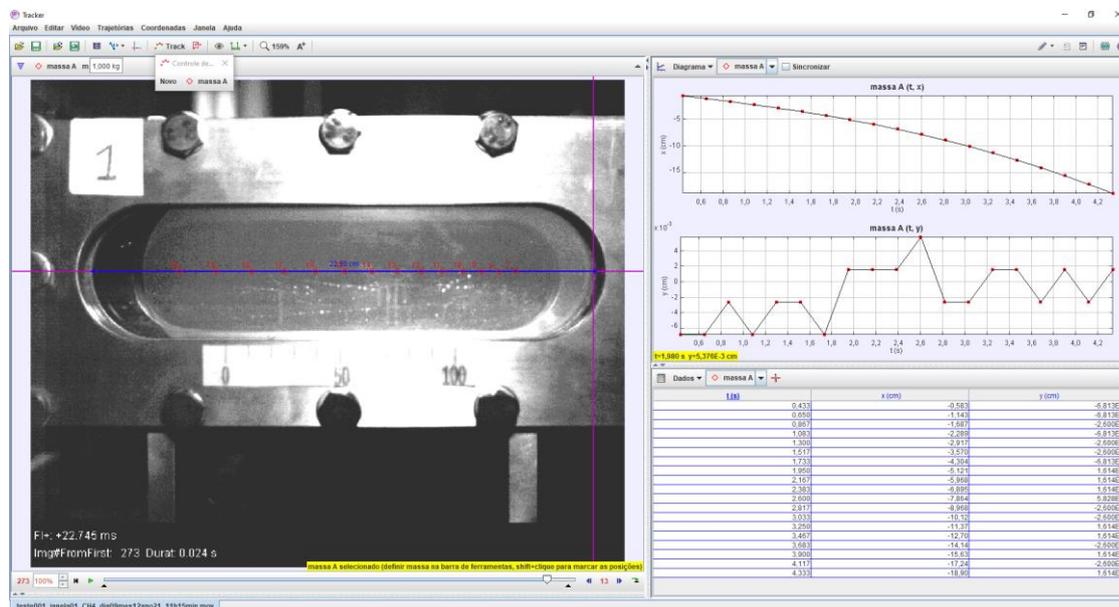


Figura 3.5 – Determinação da velocidade de propagação de chama passo a passo no *software* Tracker versão 6.0.2.

Com base no intervalo da distância (Δx) e do tempo (Δt) de propagação da frente de chama, as respectivas velocidades de propagação foram calculadas como mostra na Tabela 3.2. Vale ressaltar que para informar o valor da velocidade de propagação ao longo do duto, levaram-se em conta os valores da distância desde a origem (0 cm) adicionando 4,5 cm da janela 1, 39,5 cm da janela 2 e 74,5 cm referente à janela 3 conforme apresentado na Figura 3.6.

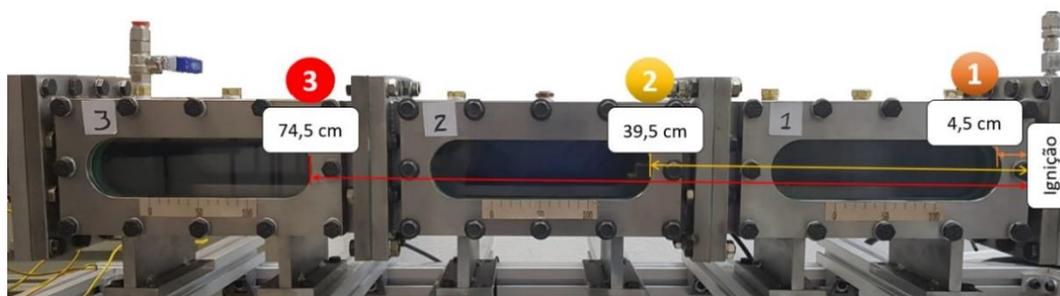


Figura 3.6 – Referência sobre a distância da fonte de ignição.

Com base nisso, determinou-se a velocidade de propagação da chama em posições específicas de todas as janelas, em referência à distância até o ponto de ignição.

Tabela 3.2 – Determinação do intervalo da distância (Δx) e do tempo (Δt) de propagação da frente de chama de diferentes misturas na Janela 1.

GN + ar (Mix 6)			[50% GN + 50% H ₂] + ar (Mix 1)			[15% GN + 85% H ₂] + 20% He + ar (Mix 3)		
Δx (cm)	Δt (ms)	V_{exp} (cm/s)	Δx (cm)	Δt (ms)	V_{exp} (cm/s)	Δx (cm)	Δt (ms)	V_{exp} (cm/s)
0,527	1,083	486,61	0,494	0,667	740,63	0,464	0,800	580,00
0,526	1,083	485,68	0,522	0,666	783,78	0,953	0,800	1144,06
0,632	1,084	583,02	0,604	0,667	905,55	0,684	0,800	820,14
0,579	1,083	534,62	0,632	0,667	947,67	0,733	0,800	879,95
0,631	1,083	582,64	0,604	0,666	906,77	0,666	0,800	792,31
0,737	1,083	680,51	0,687	0,667	1031,53	1,051	0,800	1261,70
0,842	1,083	777,47	0,769	0,667	1152,92	0,855	0,800	1026,41
0,869	1,083	802,40	0,769	0,666	1154,65	0,977	0,800	1172,86
0,894	1,083	825,48	0,934	0,667	1400,29	1,051	0,800	1260,19
1,000	1,083	923,36	0,961	0,667	1442,94	1,148	0,800	1378,15
1,079	1,083	996,30	1,044	0,666	1565,21	1,296	0,800	1555,82
1,189	1,083	1097,87	1,098	0,667	1648,65	1,420	0,800	1704,68
1,210	1,084	1116,23	1,213	0,667	1818,59	1,630	0,800	1956,78
1,365	1,083	1255,77	1,260	0,666	1891,89	1,810	0,800	2172,86
1,400	1,083	1292,70	1,260	0,667	1889,05	1,390	0,800	1666,66
1,535	1,083	1412,74	1,400	0,666	2102,10	1,670	0,800	2004,80
1,551	1,083	1431,21	1,490	0,667	2233,88	1,490	0,800	1788,71
1,712	1,083	1578,94	1,620	0,667	2428,78	1,490	0,800	1380,55
1,712	1,083	1578,94	1,620	0,666	2432,43	1,150	0,800	1250,66
1,683	1,083	1551,24	1,670	0,667	2505,74	1,160	0,800	1168,56

Os valores obtidos para as velocidades de propagação da frente de chama e da distância percorrida pela chama, foram adimensionalizados dividindo pela velocidade da chama laminar das respectivas misturas, no primeiro caso, e pelo diâmetro hidráulico do duto, no segundo caso. A Tabela 3.3 apresenta os resultados adimensionais conforme V/S_L e x/D_h .

Tabela 3.3 – Valores adimensionais da velocidade de propagação da chama/velocidade da chama laminar e distância percorrida pela chama/diâmetro hidráulico do duto.

GN + ar (Mix 6)		[50% GN + 50% H ₂] + ar (Mix 1)		[15% GN + 85% H ₂] + 20% He + ar (Mix 3)	
V/S_L	x/D_h	V/S_L	x/D_h	V/S_L	x/D_h
9,89	0,51	9,54	0,53	4,86	0,48
9,87	0,56	10,09	0,58	9,59	0,53
11,85	0,62	11,66	0,63	6,88	0,62
10,86	0,68	12,20	0,69	7,38	0,69
11,84	0,74	11,68	0,75	6,64	0,77
13,83	0,80	13,28	0,81	10,58	0,83
15,80	0,87	14,84	0,88	8,61	0,94
16,30	0,96	14,87	0,96	9,83	1,02
16,77	1,04	18,03	1,04	10,57	1,12
18,76	1,13	18,58	1,13	11,55	1,22
20,24	1,23	20,15	1,22	13,04	1,34
22,31	1,34	21,23	1,33	14,29	1,47
22,68	1,46	23,42	1,44	16,41	1,61
25,51	1,58	24,36	1,56	18,22	1,77
26,26	1,72	24,32	1,69	13,97	1,96
28,70	1,86	27,07	1,81	16,81	2,09
29,08	2,01	28,76	1,95	15,00	2,26
32,08	2,17	31,27	2,10	11,57	2,41
32,08	2,34	31,32	2,26	10,49	2,56
31,52	2,51	32,26	2,43	9,80	2,67

3.4 Validação com o modelo teórico disponível

Na literatura foi proposto um modelo analítico para prever a velocidade de propagação. Este modelo será aplicado para comparação com os dados experimentais obtidos na presente pesquisa. E, para avaliar as discrepâncias existentes entre os modelos fornecidos na literatura e os dados experimentais de um grande número de medições, foi empregada a definição de média de desvios entre a velocidade de propagação da chama obtidas experimentalmente e o modelo disponível na literatura, desenvolvido por Valiev et al., 2013. Adotam-se as seguintes hipóteses:

- frente de chama infinitamente fina;
- escoamento potencial na mistura não queimada;
- escoamento potencial para os gases queimados próximo à parede final;

- a chama é plana na proximidade da linha central; assim, o escoamento pode ser considerado potencial;
- o escoamento à frente da chama é isentrópico;
- o duto é semiaberto.

Para facilitar a comparação entre o valor da velocidade da propagação da chama obtidos experimentalmente, V_{exp} , e o valor da velocidade de propagação proposta pelo modelo de Valiev et al., 2013, V_{calc} , foram utilizados, o valor absoluto do erro relativo (ARE) conforme a Equação 3.1 e a média do valor absoluto do erro relativo (AARE) conforme a Equação 3.2. onde N representa o número de dados nesse intervalo. A representação matemática desses parâmetros é dada por:

$$ARE = \frac{|V_{exp} - V_{calc}|}{V_{calc}} \times 100 \quad (3.1)$$

$$AARE = \frac{\sum_{i=1}^N ARE}{N} \quad (3.2)$$

Aplicando o ARE e AARE será avaliada a aplicabilidade do modelo analítico desenvolvido por Valiev et al., 2013.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção mostra os resultados experimentais e discussões sobre a velocidade de propagação da chama para diferentes valores de Le e Ze . A seção 4.1 se destina a apresentação dos resultados e discussões referentes a velocidade de propagação de chama experimental, enquanto a seção 4.2 apresenta resultados e discussões relativas à comparação dos resultados sobre a velocidade de propagação de chamas obtidas experimentalmente e as velocidades de propagação de chamas obtidas pelo modelo proposto por Valiev et al., 2013.

As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 mostram imagens representativas da velocidade de propagação da chama em um duto fechado, obtidas para diversas misturas estequiométricas e diluições de hélio, levando a diferentes valores dos números adimensionais Le e Ze .

4.1 Velocidade de propagação da chama experimental

O comportamento da velocidade de propagação chamas com as misturas Mix 6, Mix 1 e Mix 2 são apresentadas nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 respectivamente. Observa-se que para todas as misturas analisadas tem-se um aumento progressivo da velocidade de propagação da frente de chama na janela 1. Os resultados do comportamento da velocidade de propagação de chama estão em concordância os trabalhos experimentais de Xiao et al., 2011; Shen et al., 2015; Yu et al., 2018 e Mendiburu et al., 2019.

Sendo que, para mistura Mix 6 tem-se as menores velocidades de propagação de chama obtidas, enquanto para as misturas de Mix 2 e Mix 1 tem-se um aumento significativo da velocidade de propagação de chama, chegando inclusive a superar o valor de 2000 cm/s quando se tratando do último caso apresentado. Assim, infere-se que a composição do combustível e o incremento da fração de hidrogênio ocasionam o aumento da velocidade de propagação da chama. Este resultado está em consonância com o citado por outros trabalhos experimentais [Zheng et al., 2016; Jin et al., 2017; Yang et al., 2019; Yang et al., 2019a].

Por outro lado, tanto para a janela 2, como para a janela 3, em todos os casos analisados observa-se uma oscilação e conseqüente desaceleração da propagação da frente de chama. O

comportamento da frente de chama para as janelas analisadas tem um formato celular e irregular para todos os casos. Isso está em consonância com o apresentado nas observações experimentais e na teoria disponíveis na literatura, pois após a formação da chama tulipa, a frente de chama apresenta uma geometria irregular e com velocidades oscilantes [Xiao et al., 2011; Shen et al., 2015; Yang et al., 2019a; Mendiburu et al., 2019]. A formação da chama tulipa acontece na região não visível entre as janelas 1 e 2, causando assim um decréscimo da velocidade de propagação da frente de chama na janela 2 e posteriormente na janela 3. Observou-se também que há uma diferença significativa na qualidade das imagens quando adicionado hidrogênio na mistura combustível. Isso se deve em parte à diminuição das moléculas de carbono que contém essas misturas. Assim, tanto o brilho quanto a coloração da propagação da frente de chama se modificam quando comparadas com misturas que contenham somente gás natural e ar na mistura combustível.

Como citado anteriormente, a propagação de uma chama dentro de um duto fechado tem fases características nos seus estágios iniciais. Conforme Ponizy et al., 2014, as quatro fases a seguir podem ser identificadas neste processo:

- a) A expansão esférica da chama na ignição;
- b) A aceleração axial de uma chama laminar no formato de chama alongada, ou *finger flame*;
- c) A desaceleração da frente de chama e a inversão da frente de chama, ou formação da chama tulipa;
- d) Uma propagação oscilatória da frente de chama até o final do duto.

As etapas da chama laminar no formato de chama alongada, ou *finger flame*, e da propagação oscilatória da frente de chama ficam muito evidentes nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3. Entretanto, a formação do núcleo da ignição em torno do eletrodo, quanto a inversão da frente de chama, ou formação da chama tulipa, não foram observadas devido às chapas de aço inox que ocultam as respectivas regiões onde ocorrem esses fenômenos.

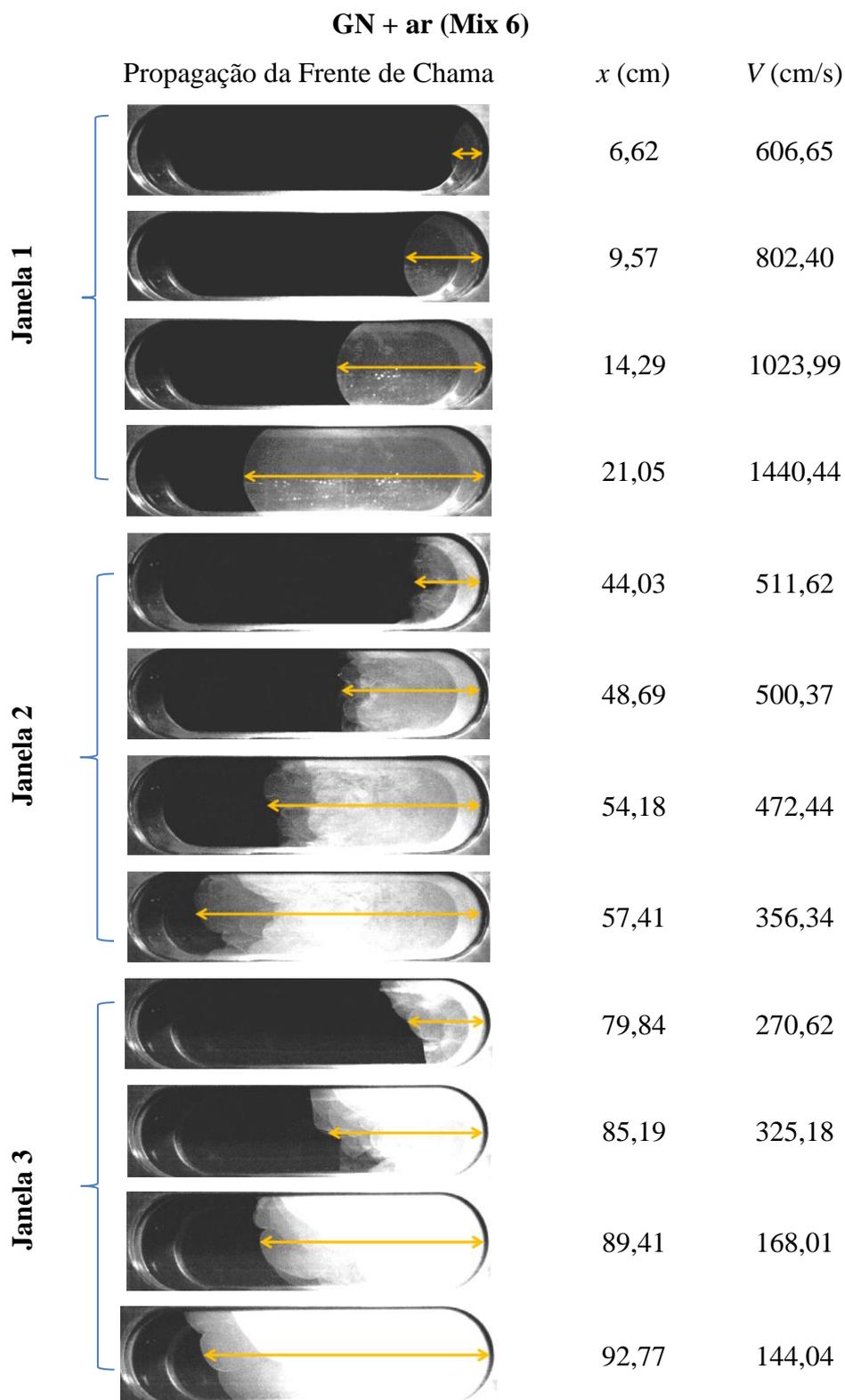


Figura 4.1 – Imagens representativas da propagação da frente da chama para mistura GN + ar (Mix 6).

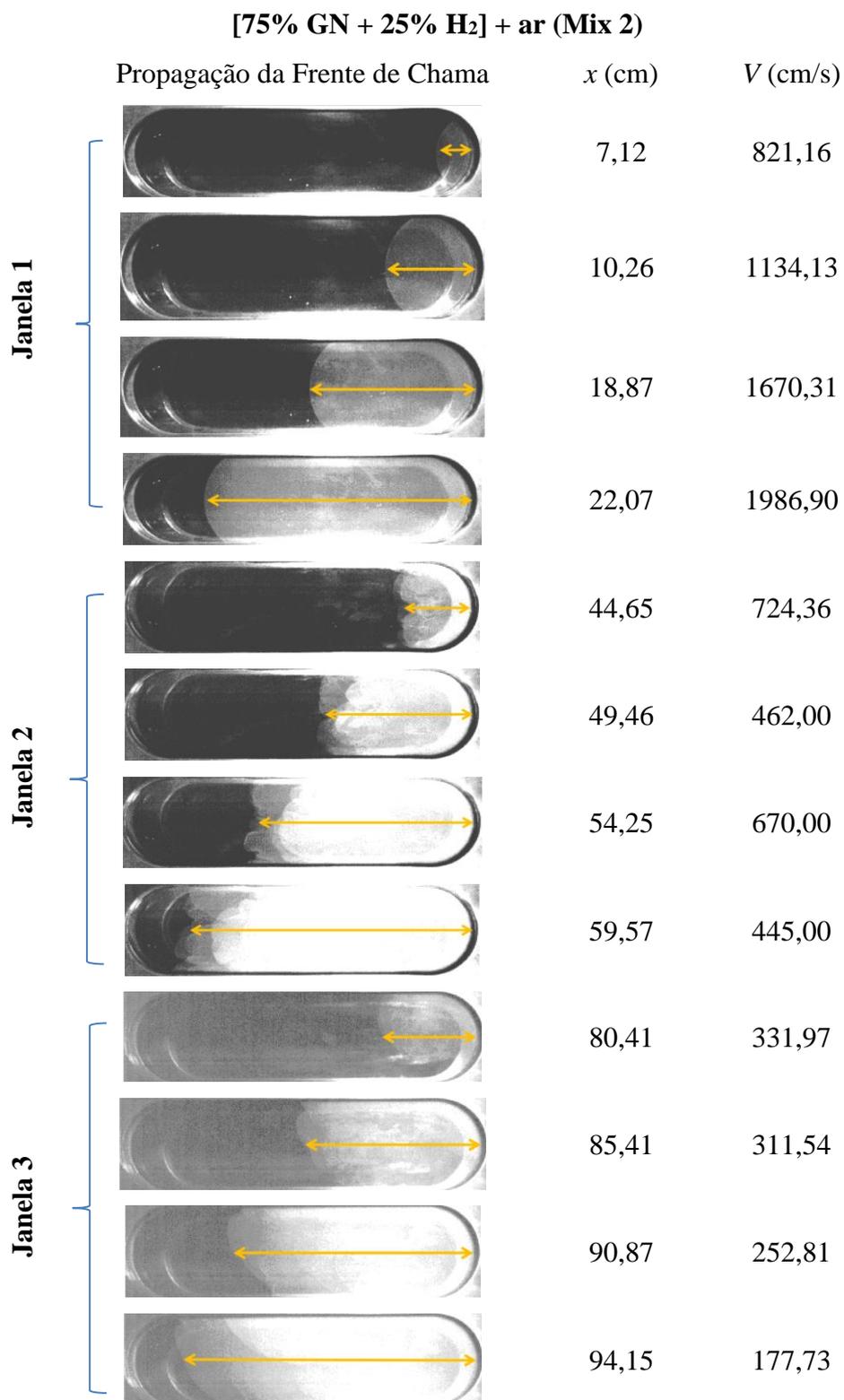


Figura 4.2 – Imagens representativas da propagação da frente da chama para mistura [75% GN + 25% H₂] + ar (Mix 2).

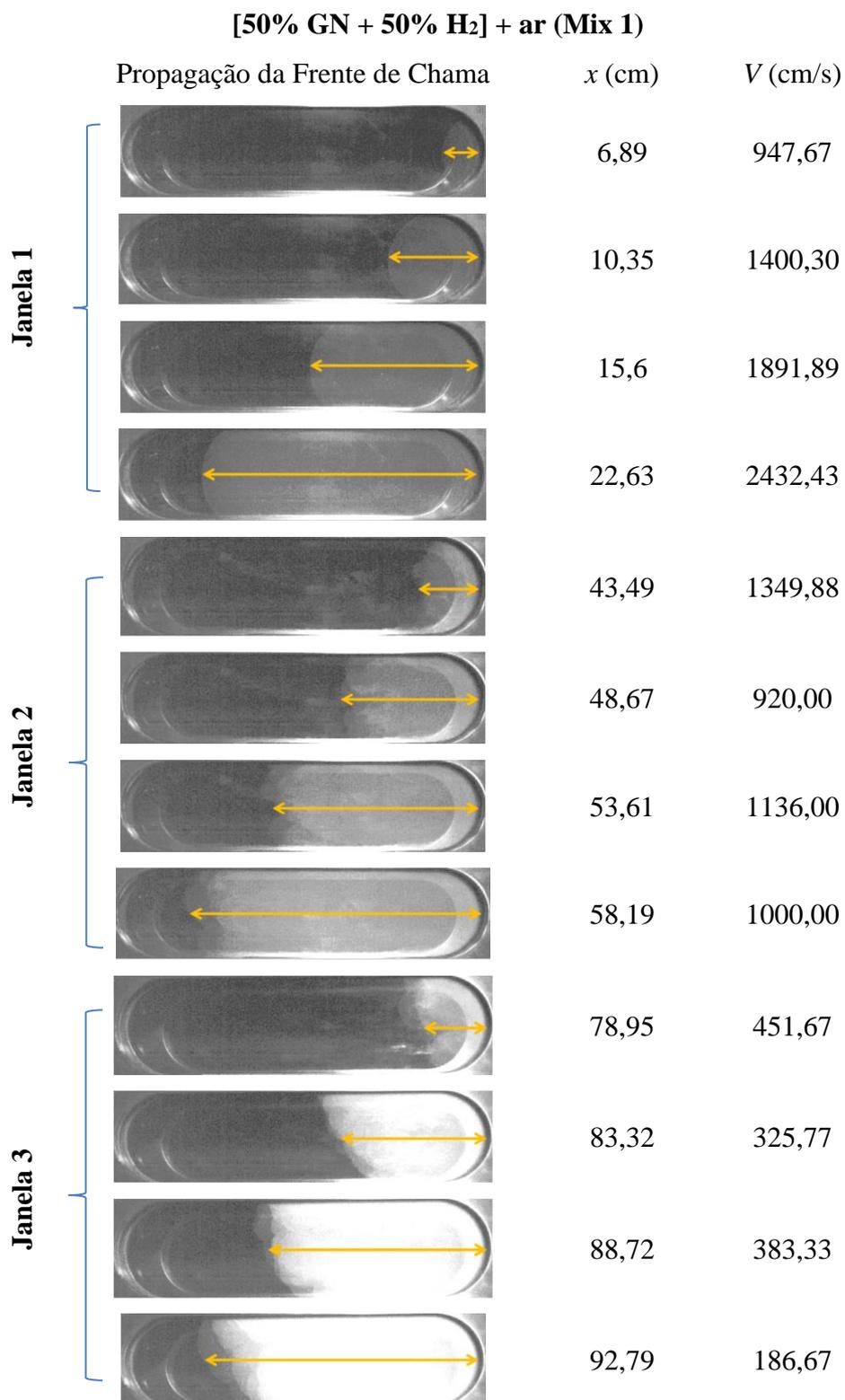


Figura 4.3 – Imagens representativas da propagação da frente da chama para mistura [50% GN + 50% H₂] + ar (Mix 1).

Analisando as imagens da janela 1 das Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 pode-se observar que a propagação da chama apresenta uma frente de chama no formato alongado (*finger flame*) representado pela aceleração axial da chama conforme descrito por Bychkov et al., 2007. Neste instante, a velocidade de propagação da frente de chama aumenta consideravelmente ao longo da seção da janela 1, atingindo sua velocidade máxima de propagação. Para a mistura Mix 6 foi de 1600 cm/s, para a mistura Mix 2 foi de 2000 cm/s e para a mistura Mix 1 foi de 2600 cm/s aproximadamente, ou seja, da ordem de 30 vezes a velocidade de chama laminar para este último caso. O comportamento da geometria da frente de chama na janela 1 apresenta um leve achatamento da frente de chama ao longo da propagação na janela 1, buscando assim a formação da chama plana e posterior formação da chama tulipa, estando assim em conformidade com o relatado em estudos anteriores de Xiao et al., 2011; Shen et al., 2015; Zheng et al., 2016; Jin et al., 2017; Yang et al., 2019a; Mendiburu et al., 2019 e Yang et al., 2020.

A etapa de propagação oscilatória da frente de chama pode ser observada na janela 2, onde tem-se uma diminuição e aumento da aceleração ao longo dessa seção. Assim, o formato da chama nesta etapa tem uma oscilação ao longo da seção da janela 2 variando a velocidade de propagação entre 900 e 1400 cm/s aproximadamente. A geometria da frente de chama possui uma forma celular irregular que corrobora para uma maior interação entre os gases queimados e não queimados, causando assim uma oscilação da velocidade de propagação da frente de chama para essa mistura combustível.

De maneira genérica, percebe-se uma aceleração gradual da velocidade de propagação da frente de chama na janela 1 para todas as misturas estudadas. Do mesmo modo, a velocidade de propagação da chama tem um decréscimo à medida que a propagação da frente de chama atravessa as seções das janelas 2 e 3 do duto, respectivamente.

Em todas as misturas estudadas não se pode observar duas etapas da propagação da frente de chama nos estágios iniciais: a chama esférica e o fenômeno da inversão da frente de chama, ou chama tulipa. Contudo, o objetivo do presente trabalho é observar a aceleração da chama num duto livre de obstáculos. A chama esférica inicial não se pode observar devido a fonte de ignição estar localizada a 4,5 cm do visor de boro silicato que permitia a visualização da propagação da chama. A inversão da frente de chama esteve localizada na região não observada entre as janelas 1 a 2. Entretanto, devido à presença de uma desaceleração na janela 1, nas

misturas com hélio, pode-se verificar que provavelmente a inversão da frente de chama ocorreu nos instantes finais da região visível da janela 1. Devido às limitações na visualização das chamas envolvendo essas misturas, não se pode observar com clareza esse fenômeno. A Figura 4.4 apresenta os resultados da propagação da frente de chama da Mix 1 nas janelas 1, 2 e 3, respectivamente.

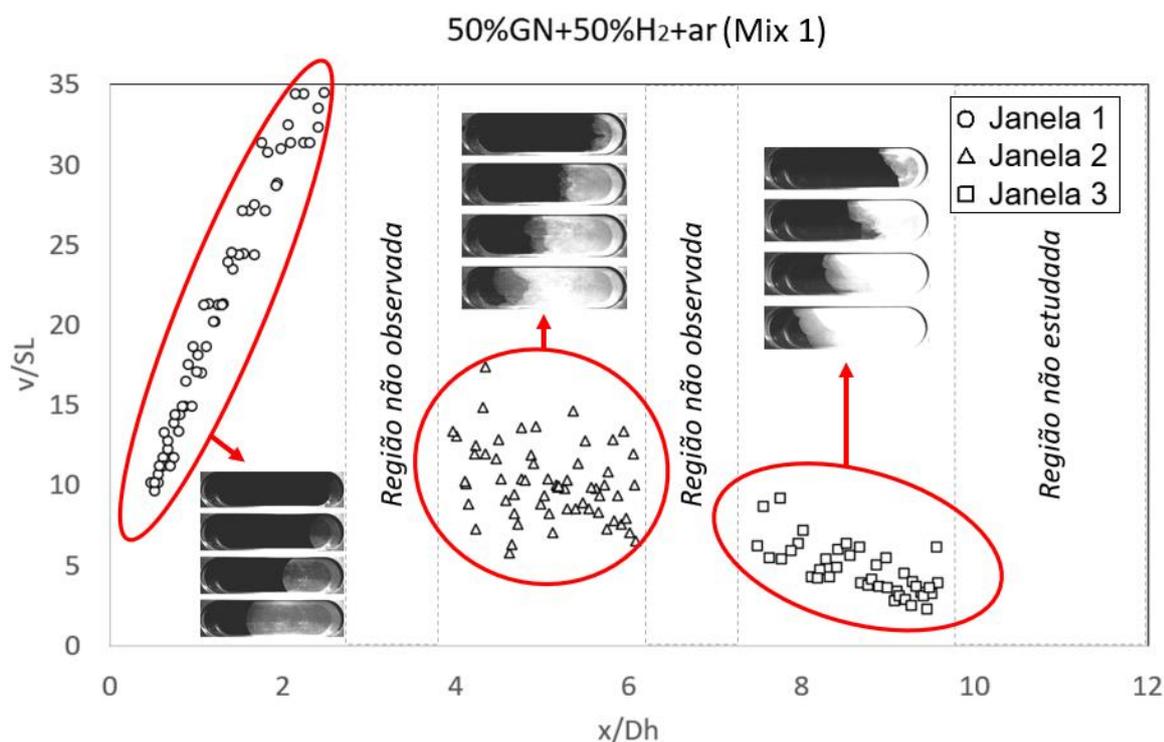


Figura 4.4 – Velocidade de propagação de 50% GN + 50% H₂ + ar (Mix 1).

Desse modo, para que os estágios da formação da chama esférica e o fenômeno da inversão da frente de chama pudessem ser observados, os experimentos deveriam ser conduzidos com o eletrodo de ignição em uma posição mais avançada comparada à posição atual. Com isso, a formação da chama esférica seria observada na janela 1 e a inversão da frente de chama seria observada na janela 2.

A Figura 4.5 apresenta os resultados da aceleração da frente de chama para as misturas Mix 6, Mix 2, Mix 4 e Mix 8. A Figura 4.6 apresenta a aceleração da frente de chama para as misturas de Mix 1, Mix 5, Mix 3 e Mix 7. A fim de facilitar a visualização da aceleração da frente de chama ao longo do duto, todos os resultados das velocidades de propagação das chamas foram plotados em um único gráfico para cada mistura estudada.

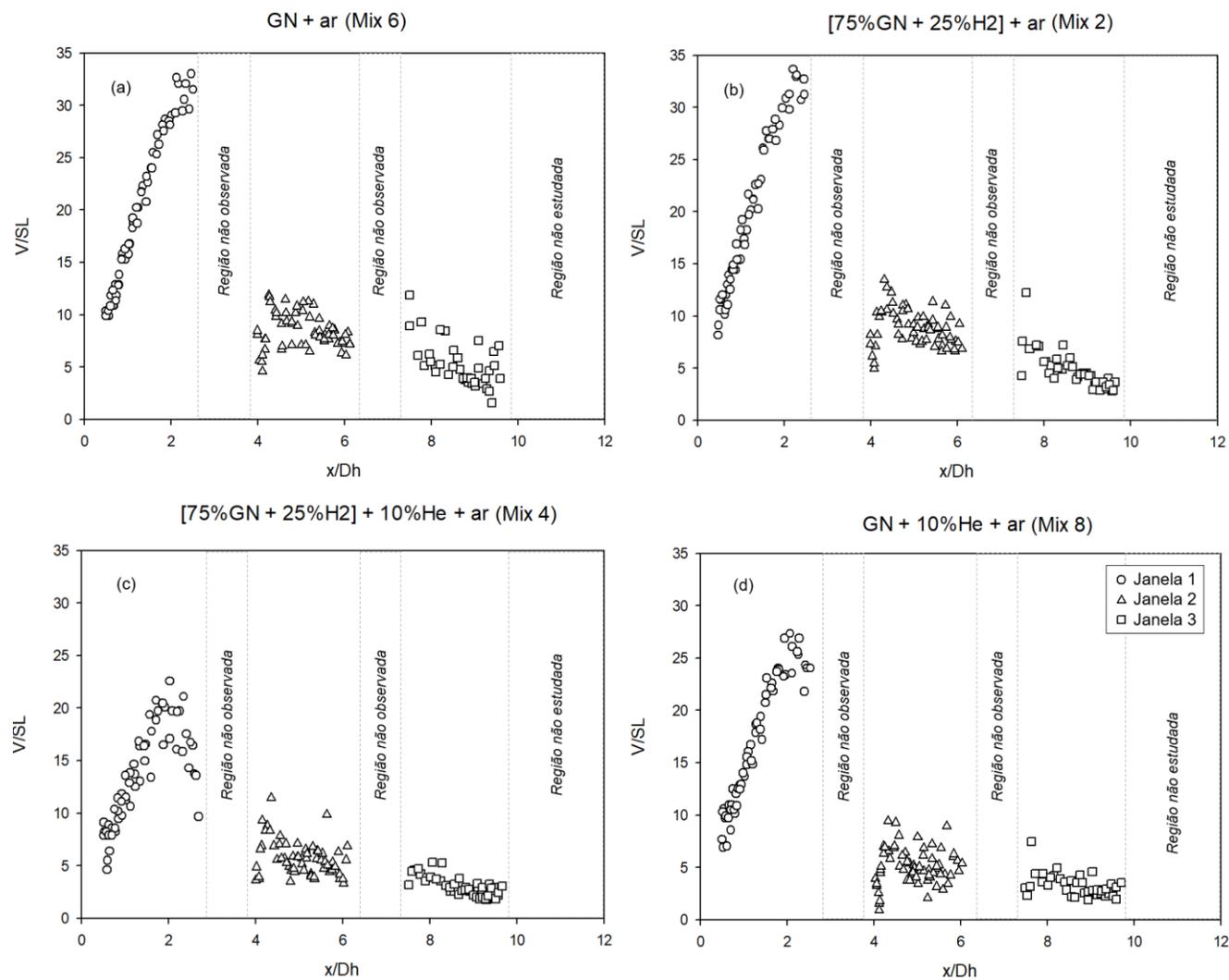


Figura 4.5 – Análise da aceleração de chama das misturas de (a) GN + ar (Mix 6), (b) [75%GN + 25%H₂] + ar (Mix 2), (c) [75%GN + 25%H₂] + 10%He + ar (Mix 4) e (d) GN + 10%He + ar (Mix 8).

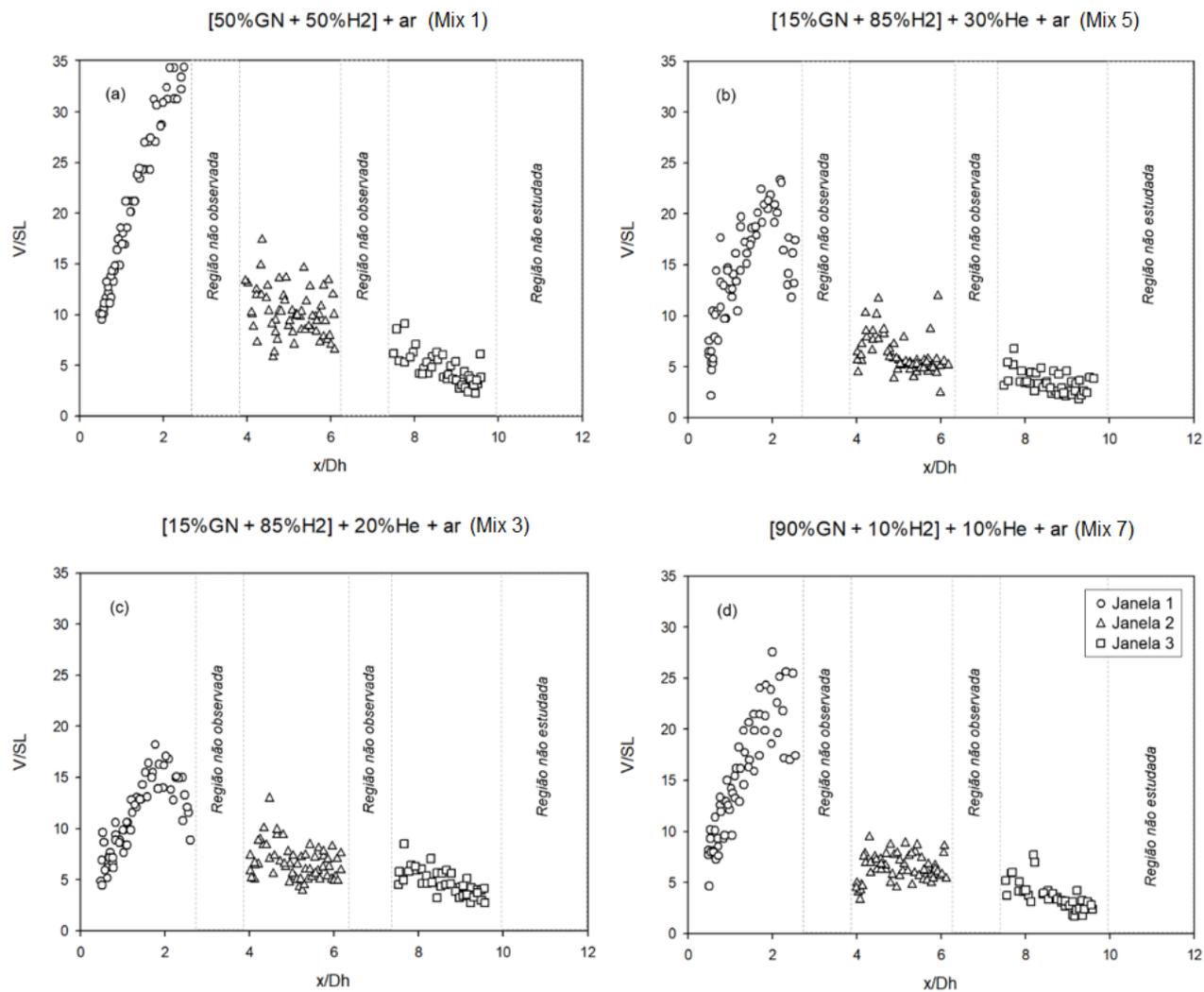


Figura 4.6 – Análise da aceleração de chama das misturas de (a) [50%GN + 50% H_2] + ar (Mix 1), (b) [15%GN + 85% H_2] + 30%He + ar (Mix 5), (c) [15%GN + 85% H_2] + 20%He + ar (Mix 3) e (d) [90%GN + 10% H_2] + 10%He + ar (Mix 7).

A partir dos resultados obtidos verifica-se que as misturas (a), (b) e (d) da Figura 4.5 e (a) da Figura 4.6 apresentam uma semelhança na reprodutibilidade dos valores da velocidade de propagação adimensional V/S_L obtidos na janela 1. Enquanto, as misturas (c) da Figura 4.5 e (b), (c) e (d) da Figura 4.6 apresentam uma leve dispersão, porém, não comprometendo a reprodutibilidade das velocidades de propagação observadas. De maneira geral, para todas as misturas combustíveis estudadas o comportamento característico apresentado na janela 1 foi de uma rampa de aceleração da propagação da mistura ao longo desta seção, enquanto para as janelas 2 e 3 foi de uma desaceleração e oscilação da velocidade de propagação da mistura ao longo do duto. Desse modo, o comportamento apresentado nas janelas 1, 2 e 3 estão em concordância conforme reportado pelos autores Xiao et al., 2011; Ponizy et al., 2014; Shen et al., 2015; Zheng et al., 2016; Jin et al., 2017; Yang et al., 2019; Mendiburu et al., 2019 e Yang et al., 2020, de acordo com a geometria da frente de chama que seria a aceleração axial de uma chama laminar no formato de chama alongada (*finger flame*), com uma posterior propagação oscilatória da frente de chama até o final do duto de propagação.

Pelos resultados obtidos pode-se observar que a mistura que teve uma maior velocidade de propagação de chama adimensional foi a Mix 1, onde a velocidade máxima de propagação da chama na primeira janela foi de aproximadamente 2600 cm/s (33,67 V/S_L). Por outro lado, a mistura que teve uma menor velocidade máxima de propagação foi a Mix 8, da ordem de 1200 cm/s (26,52 V/S_L). Assim, torna-se perceptível a influência da adição de hidrogênio na mistura combustível, tornando-a mais reativa e consequentemente atingindo uma velocidade de propagação bem maior que a mistura Mix 6, onde se obteve uma velocidade máxima de propagação em torno de 1500 cm/s (31,58 V/S_L) na janela 1. Portanto, com o incremento da fração de hidrogênio na mistura combustível tem-se um aumento significativo na velocidade máxima de propagação da chama. Este resultado está em consonância com o observado por Zheng et al., 2016; Yang et al., 2019a e Yang et al., 2019b.

As misturas Mix 1, Mix 8 e Mix 6 tem números Lewis de 0,60, 1,09 e 1,36, respectivamente. Dessa forma, observa-se que a maior velocidade máxima de propagação da chama foi obtida para o número de Lewis menor do que 1. Por outro lado, a menor velocidade máxima de propagação foi obtida para o número de Lewis maior que 1. Assim, os efeitos de difusão de massa e de difusão térmica estão relacionados com as velocidades de propagação das misturas, onde o número de Lewis pode ser uma chave para caracterizar a propagação de

chamas. Este resultado está em concordância com o relatado por Zitouni et al., 2022. Considerando o número de Zeldovich, pode-se observar que a mistura Mix 1 tem valor igual a 7,17 e as misturas Mix 8 e Mix 6 tem números de Zeldovich iguais a 8,85 e 8,70, respectivamente. Assim, observa-se que a velocidade máxima de propagação foi atingida com o valor de Zeldovich próximo a 7.

De forma análoga, a diluição da mistura combustível com hélio torna a velocidade de propagação mais lenta pois age como um inerte interrompendo a propagação da chama para as misturas Mix 2 e Mix 4. Os resultados obtidos da velocidade máxima de propagação nas misturas Mix 2 e Mix 4 foram aproximadamente 1986 cm/s ($33,24 V/S_L$) e 1186 cm/s ($20,49 V/S_L$), respectivamente. Isso corrobora o que foi dito anteriormente, ou seja, que a diluição da mistura combustível com hélio torna a velocidade máxima de propagação mais lenta. No caso comparado, a redução foi da ordem de 40%, aproximadamente.

As misturas Mix 2 e Mix 4 tem números Lewis de 0,75 e 0,93, respectivamente. Assim, observa-se que a maior velocidade máxima de propagação da chama foi obtida para o menor número de Lewis. Os números de Zeldovich dessas misturas são iguais a 8,13 e 8,39, respectivamente. De forma que, a maior velocidade máxima de propagação foi obtida para o menor número de Zeldovich.

Entretanto, para as misturas Mix 3 e Mix 5 as velocidades máximas de propagação obtidas foram 2172 cm/s ($17,17 V/S_L$) e 2293 cm/s ($22,77 V/S_L$), respectivamente. O incremento da diluição com hélio nessas misturas resultou em um pequeno aumento da velocidade de propagação da mistura, porém não muito significativo. A partir da comparação entre os resultados das misturas de Mix 3 e Mix 5, pode-se inferir que com o aumento da diluição de hélio na mistura tem-se uma maior oscilação e dispersão na aceleração nos estágios iniciais da propagação da chama.

As misturas Mix 3 e Mix 5 tem números Lewis de 0,81 e 0,99, respectivamente. Assim, observa-se nesse caso que a maior velocidade máxima de propagação da chama foi obtida para o maior número de Lewis. Os números de Zeldovich dessas misturas são iguais a 5,23 e 5,71, respectivamente. Assim como nas comparações anteriores, a maior velocidade máxima de propagação foi obtida o número de Zeldovich mais próximo a 7.

Em todas as misturas combustíveis diluídas com hélio a aceleração da chama na janela 1 apresentou um o comportamento característico de decréscimo na velocidade de propagação da frente de chama ao final deste trajeto. De acordo com Ponizy et al., 2014, a inversão da frente de chama, ou formação da chama tulipa, está diretamente relacionada à desaceleração da frente de chama nos instantes iniciais da propagação de uma chama em dutos. No entanto, este fenômeno não pode ser observado devido à baixa qualidade das imagens obtidas para as misturas diluídas com hélio neste estudo.

A Tabela 4.1 apresenta uma relação entre os números de Lewis e Zeldovich das misturas estudadas e suas respectivas velocidades máximas de propagação. A Figura 4.7 apresenta os resultados experimentais das velocidades máximas de propagação das misturas em função dos números de Lewis e Zeldovich.

Tabela 4.1 – Relação do Número de Lewis e Zeldovich para as Velocidades Máximas de Propagação das chamas.

Código	Mistura	<i>Le</i>	<i>Ze</i>	<i>V_{tip max}</i> (cm/s)	Desvio Padrão (cm/s)	<i>V/S_L</i>	Desvio Padrão
Mix 1	[50% GN+50% H ₂] + ar	0,60	7,17	2615,03	93,39	33,67	1,24
Mix 2	[75% GN+25% H ₂] + ar	0,75	8,13	1961,43	22,73	33,24	0,39
Mix 3	[15% GN+85% H ₂] + 20% He + ar	0,81	5,23	2048,00	120,34	17,17	1,01
Mix 4	[75% GN+25% H ₂] + 10% He + ar	0,93	8,39	1078,34	99,07	20,49	1,88
Mix 5	[15% GN+85% H ₂] + 30% He + ar	0,99	5,71	2235,56	78,12	22,77	0,79
Mix 6	GN + ar	1,09	8,70	1554,33	85,80	31,58	1,74
Mix 7	[90% GN+10% H ₂] + 10% He + ar	1,14	8,67	1112,82	180,03	23,77	3,85
Mix 8	GN+10% He + ar	1,36	8,85	1163,80	46,81	26,52	1,06

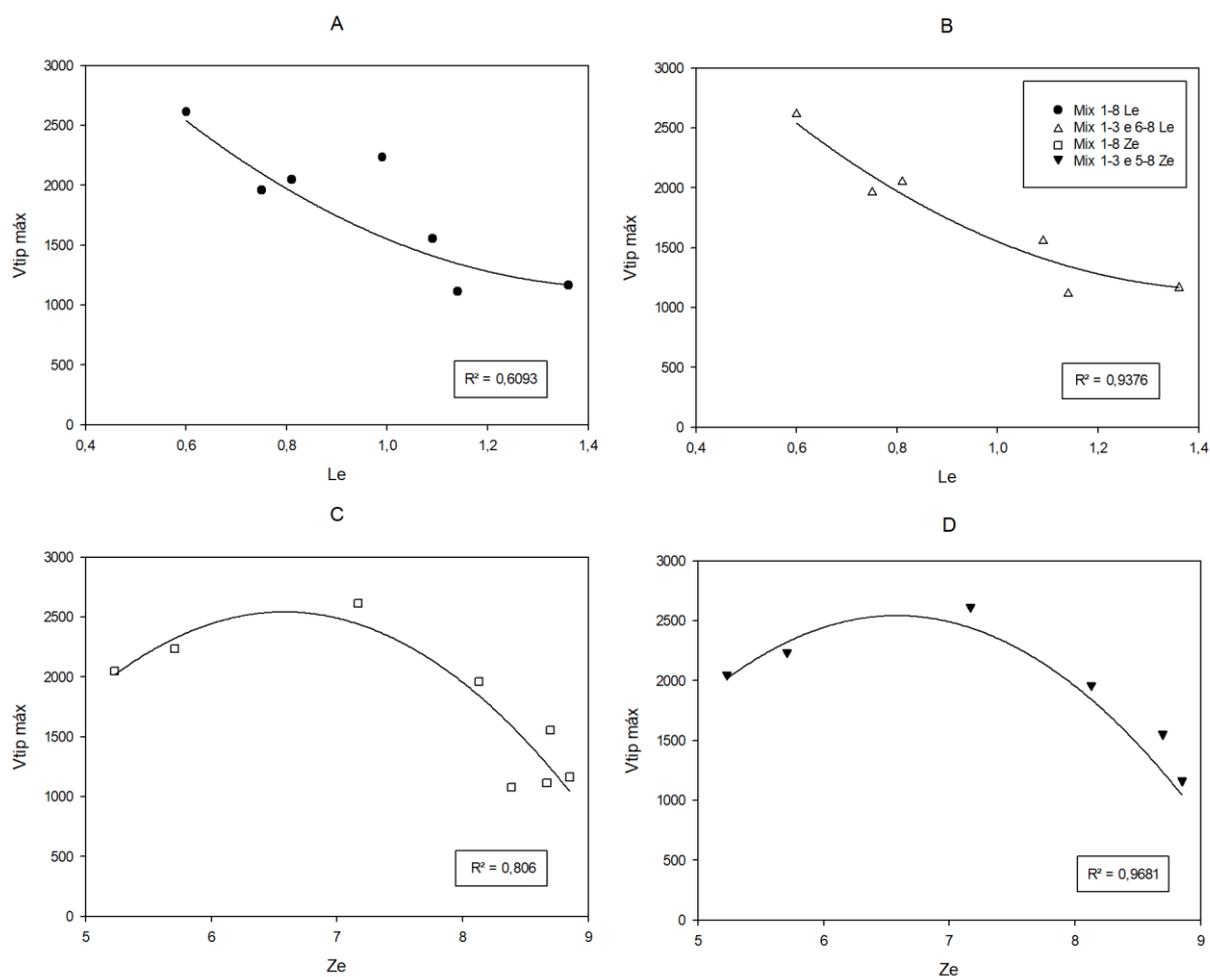


Figura 4.7 – Velocidade máxima de propagação em função de Le e Ze .

Para a mistura de Mix 1, com número de Lewis de 0,60 e Zeldovich igual a 7,17, a velocidade máxima de propagação da mistura na primeira janela foi de 2615,03 cm/s. No outro extremo, para a mistura de Mix 8, com número de Lewis de 1,36 e Zeldovich igual a 8,85, a velocidade máxima de propagação da mistura foi de 1163,80 cm/s, ou seja, um decréscimo da ordem de mais de 50%, aproximadamente. Entretanto, para as demais misturas estudadas essa correlação entre os números de Lewis e de Zeldovich e as velocidades de propagação não fica muito evidente. A relação entre o número de Le e Ze e a velocidade máxima de propagação de chama é apresentada na Figura 4.7, onde uma função potencial foi adotada para representar a relação funcional entre Le , Ze e $V_{tip\ máx}$.

A partir dos resultados obtidos infere-se que quando todas as misturas estão em função de Le e Ze (Figura A e C), tem-se os valores de R^2 de 0,6093 e 0,806 respectivamente. Por outro lado, o valor do R^2 atinge um valor de 0,9376 quando as misturas 4 e 5 não são consideradas para o caso do número de Lewis (Figura B). Do mesmo modo, quando a mistura 4 não é considerada para o caso do número de Zeldovich, o valor do R^2 aumenta consideravelmente, atingindo um valor de 0,9681 (Figura D).

Desse modo, buscando uma relação entre as misturas estudadas, com relação ao número de Lewis pode-se perceber que a mistura 4 tem um valor de 0,93 com teor de 10% de diluente hélio na composição. Enquanto a mistura 5 tem um valor de 0,99 para o número de Lewis com teor de 30% de diluente hélio na sua composição. Assim, nessas misturas o efeito da difusividade mássica é maior do que o efeito da difusividade térmica. Porém, em ambos os casos o Le é próximo ao valor unitário.

4.2 Comparação entre os valores da velocidade de propagação da chama experimental e teórica

Como apresentado anteriormente, Valiev et al., 2013, desenvolveram um modelo teórico para a aceleração de chamas nos instantes iniciais de uma propagação dentro de um duto sem obstáculos. Esta teoria é a base de comparação para os resultados experimentais encontrados neste estudo. Os autores sistematizaram essas equações de forma a relacionar, dentre outros aspectos, o instante em que a chama toca as paredes laterais do duto e a velocidade máxima de propagação de uma chama. A teoria proposta pelos autores, tem por base as seguintes hipóteses simplificadoras consideradas neste estudo:

- o duto possui paredes adiabáticas;
- a propagação da chama é estudada em duas dimensões;
- o duto encontra-se fechado no lado da ignição;
- o escoamento é considerado incompressível inicialmente, porém, o efeito de compressibilidade moderada é adicionado na segunda parte do desenvolvimento;
- a geometria é considerada plana;

- o escoamento é considerado como potencial, ou seja, é incompressível, irrotacional e em regime permanente.

Assumindo estas hipóteses simplificadoras propostas por Valiev et al., 2013, e aplicando às equações apresentadas no capítulo 2 deste estudo, a Tabela 4.2 apresenta o comparativo das velocidades máximas experimentais, V/S_{Lexp} , e as velocidades máximas calculadas, V/S_{Lcalc} , pelo modelo de Valiev et al., 2013 em função dos números de Lewis e Zeldovich para todas as misturas do presente estudo nos instantes iniciais da propagação da chama, ou seja, na janela 1. Do mesmo modo, a comparação entre o valor da velocidade da propagação da chama obtidos experimentalmente, V/S_{Lexp} , e pelo modelo de Valiev et al., 2013, V/S_{Lcalc} , apresenta-se em termos do valor absoluto do erro relativo (ARE) e da média do valor absoluto do erro relativo (AARE).

A partir dos resultados obtidos na Tabela 4.2 observa-se que os menores valores do AARE foram obtidos para as misturas Mix 1, Mix 2 e Mix 6, onde tais valores foram 9,48%, 17,18% e 28,94%. Por outro lado, os maiores valores do AARE foram obtidos para as composições de Mix 8, Mix 4 e Mix 3 atingindo os valores de 64,84%, 104,47% e 106,92%, respectivamente. A mistura Mix 5 apresentou o valor intermediário de AARE de 38,59%.

Com respeito ao número de Lewis, pode-se observar que as misturas que obtiveram os menores valores de AARE foram Mix 1 e Mix 2 onde seus números de Lewis são 0,60 e 0,75 respectivamente. Assim, por este estudo pode-se inferir que o modelo de Valiev et al., 2013, tem uma melhor correlação para misturas com baixos números de Lewis onde o efeito da difusividade mássica é maior do que o efeito da difusividade térmica.

Percebe-se também que os melhores resultados obtidos para o modelo de Valiev et al., 2013, ocorrem nas misturas sem a presença do diluente hélio. No entanto, mesmo para misturas sem hélio o modelo de Valiev et al., 2013, não possui uma boa exatidão aos resultados experimentais. Por isso, o presente trabalho seguiu a proposta apresentada por Quines et al., 2021, onde buscou-se substituir os valores calculados da coordenada axial adimensional por seus respectivos valores experimentais na equação 2.4 de Valiev et al., 2013. Com isso, tem-se o modelo de Valiev et al., 2013, calculado com $\xi_{tip\ exp}$. (Quines, et al., 2021)

Tabela 4.2 – Comparativo entre as velocidades máximas experimentais e velocidades máximas calculadas pelo modelo de Valiev et al., 2013.

Mistura	Le	Ze	Teste 1			Teste 2			Teste 3			AARE (%)
			V/S_{Lexp}	V/S_{Lcalc}	ARE (%)	V/S_{Lexp}	V/S_{Lcalc}	ARE (%)	V/S_{Lexp}	V/S_{Lcalc}	ARE (%)	
[50% GN + 50% H ₂] + ar	0,60	7,17	32,24	37,38	15,94	34,36	36,59	6,49	34,41	36,48	6,02	9,48
[75% GN + 25% H ₂] + ar	0,75	8,13	33,67	39,83	18,30	32,93	38,75	17,67	33,11	38,27	15,58	17,18
[15% GN + 85% H ₂] + 20% He + ar	0,81	5,23	18,21	35,83	96,76	17,09	35,36	106,90	16,20	35,17	117,10	106,92
[75% GN + 25% H ₂] + 10% He + ar	0,93	8,39	18,86	43,02	128,10	20,07	40,44	101,49	22,55	41,45	83,81	104,47
[15% GN + 85% H ₂] + 30% He + ar	0,99	5,71	23,36	32,42	38,78	21,87	31,45	43,80	23,09	30,75	33,17	38,59
GN + ar	1,09	8,70	32,08	41,50	29,36	29,64	40,56	36,84	33,02	39,83	20,62	28,94
[90% GN + 10% H ₂] + 10% He + ar	1,14	8,67	27,56	43,32	57,18	23,87	42,61	78,51	19,87	42,33	113,03	82,91
GN + 10% He + ar	1,36	8,85	26,88	42,83	59,34	25,32	43,67	72,47	27,35	44,50	62,71	64,84

Com base nisso, a Tabela 4.3 apresenta o comparativo das velocidades máximas experimentais, V/S_{Lexp} , e as velocidades máximas calculadas, V/S_{Lcalc} , pelo modelo modificado de Valiev et al., 2013, em função dos números de Lewis (Le) e Zeldovich (Ze) para todas as misturas na janela 1. Da mesma forma, apresentam-se os valores absolutos do erro relativo (ARE) e as respectivas médias do valor absoluto do erro relativo (AARE).

A partir dos resultados obtidos na Tabela 4.3 observa-se que os menores valores do AARE foram obtidos para as misturas Mix 6, Mix 2, Mix 1, Mix 5 e Mix 8. Os valores do AARE para essas misturas foram 1,07%, 2,49%, 3,46%, 5,59% e 9,83%, respectivamente. As demais misturas, Mix 4 e Mix 3, apresentaram um AARE de 28,21% e 28,90%, respectivamente.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.3, pode-se observar que o modelo de Valiev et al., 2013, calculado com $\xi_{tip\ exp}$ para o presente estudo apresenta AARE abaixo de 30% em todas as misturas. Nesse sentido, pode-se inferir que o valor da variável ξ se torna um elemento chave para a melhoria do modelo de Valiev et al., 2013. Isso está em consonância com trabalhos anteriores [Mendiburu et al., 2019; Quines, et al., 2021].

As misturas não contendo o hélio como diluente tiveram uma redução significativa do AARE quando comparadas ao modelo de Valiev et al., 2013. Do mesmo modo, as misturas que possuem hélio como diluente reduziram drasticamente o AARE, principalmente por no caso do modelo de Valiev et al., 2013, ter AARE de mais de 100% para algumas misturas. Assim, uma melhoria no modelo consistiria em considerar o efeito dos diluentes, como o He, no desenvolvimento.

Com relação ao número de Lewis, observa-se que as misturas que obtiveram os menores valores de AARE foram Mix 6, Mix 2, Mix 1, Mix 5 e Mix 8 onde seus números de Lewis são 1,09, 0,75, 0,60, 0,99 e 1,36 respectivamente. Desse modo, no presente trabalho pode-se inferir que o modelo de Valiev et al., 2013, calculado com $\xi_{tip\ exp}$ tem uma excelente correlação para misturas de variados números de Lewis. Com isso, acredita-se que a correlação do modelo de Valiev et al., 2013, calculado com $\xi_{tip\ exp}$ está mais associada com as misturas e seus respectivos diluentes do que com os valores adimensionais de Lewis.

Tabela 4.3 – Comparativo entre as velocidades máximas experimentais e velocidades máximas calculadas pelo modelo de Valiev et al., 2013, calculado com $\xi_{tip\ exp}$.

Mistura	Le	Ze	Teste 1			Teste 2			Teste 3			AARE (%)
			V/S _{Lexp}	V/S _{Lcalc}	ARE (%)	V/S _{Lexp}	V/S _{Lcalc}	ARE (%)	V/S _{Lexp}	V/S _{Lcalc}	ARE (%)	
[50% GN + 50% H ₂] + ar	0,60	7,17	32,24	33,17	2,88	34,36	32,81	4,51	34,41	33,38	2,99	3,46
[75% GN + 25% H ₂] + ar	0,75	8,13	33,67	32,41	3,74	32,93	32,47	1,40	33,11	32,34	2,33	2,49
[15% GN + 85% H ₂] + 20% He + ar	0,81	5,23	18,21	20,35	11,75	17,09	23,76	39,03	16,20	22,02	35,93	28,90
[75% GN + 25% H ₂] + 10% He + ar	0,93	8,39	18,86	23,75	25,93	20,07	25,94	29,25	22,55	29,19	29,45	28,21
[15% GN + 85% H ₂] + 30% He + ar	0,99	5,71	23,36	24,26	3,85	21,87	24,30	11,11	23,09	23,51	1,82	5,59
GN + ar	1,09	8,70	32,08	32,58	1,56	29,64	29,74	0,34	33,02	33,45	1,30	1,07
[90% GN + 10% H ₂] + 10% He + ar	1,14	8,67	27,56	29,62	7,47	23,87	24,60	3,06	19,87	23,14	16,46	9,00
GN + 10% He + ar	1,36	8,85	26,88	28,81	7,18	25,32	27,73	9,52	27,35	30,85	12,80	9,83

A Figura 4.8 apresenta os resultados experimentais e calculados pelo modelo de Valiev et al., 2013 e pelo modelo de Valiev et al., 2013, calculado com $\xi_{tip\ exp}$ da aceleração de chama para todas as misturas estudadas neste trabalho.

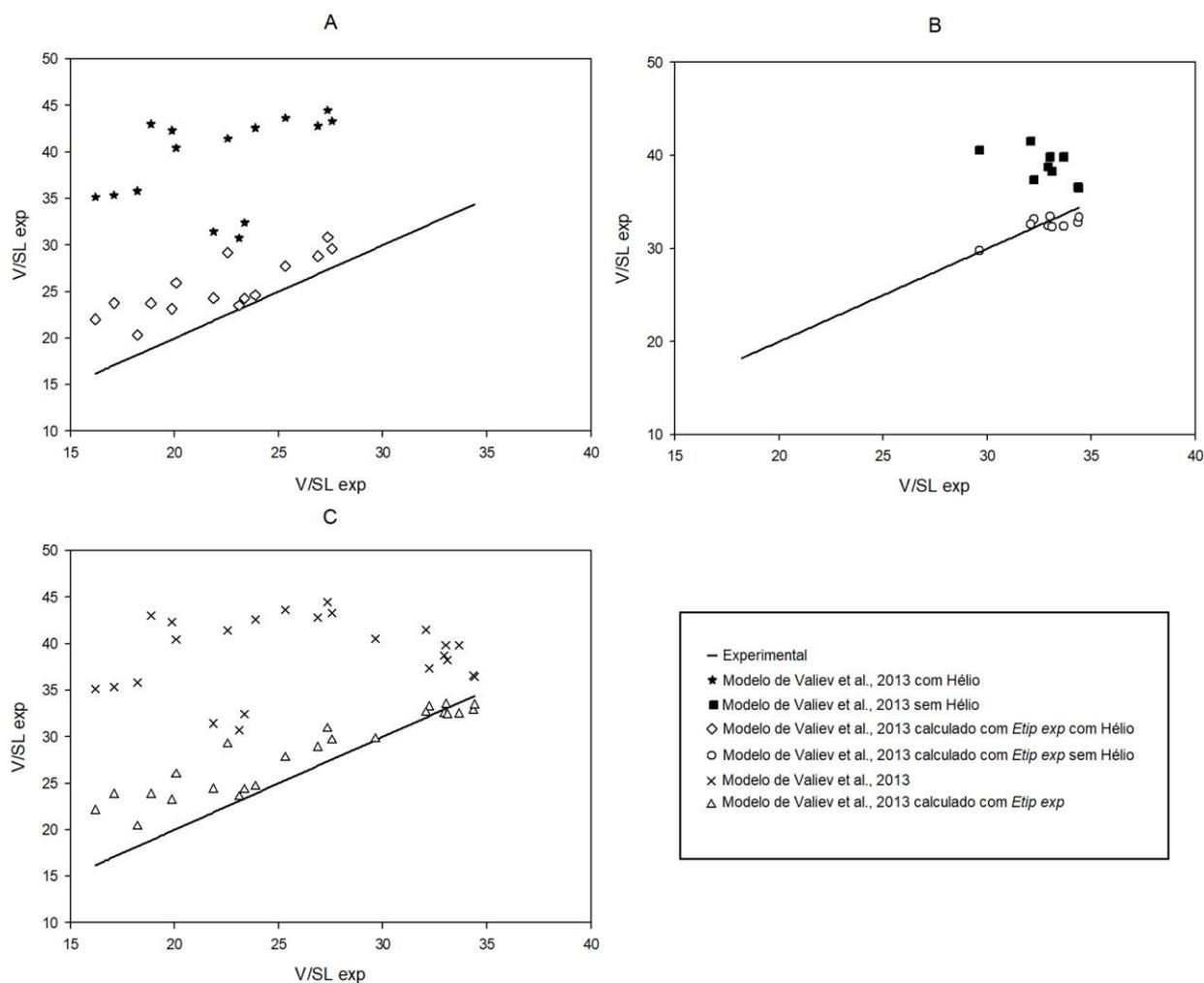


Figura 4.8 – Resultados experimentais e calculados pelo modelo de Valiev et al., 2013, de aceleração de chama para misturas com hélio (A), misturas sem hélio (B) e todas as misturas estudadas (C).

A partir da Figura 4.8 (A) percebe-se que para misturas envolvendo diluição com hélio o modelo de Valiev et al., 2013, calculado com $\xi_{tip\ exp}$ apresentou uma melhor concordância entre os resultados de $V/S_L\ calc$ e $V/S_L\ exp$. Do mesmo modo, pela Figura 4.8 (B) percebe-se que para misturas sem diluição com hélio o modelo de Valiev et al., 2013, calculado com $\xi_{tip\ exp}$ apresentou

uma melhor concordância entre os resultados de $V/S_L calc$ e $V/S_L exp$. Entretanto, neste último caso, a divergência entre os valores obtidos é visivelmente menor do que para o primeiro. Outra maneira, observa-se também pelas Figuras 4.8 (A) e 4.8 (B) que as misturas contendo hélio como diluente foram mais lentas, ou seja, obtiveram menores valores de V/S_L comparadas as misturas sem diluição com hélio.

A partir da Figura 4.8 (C) observa-se que o modelo de Valiev et al., 2013, calculado com $\xi_{tip exp}$ apresentou uma melhor concordância entre os resultados de $V/S_L calc$ e $V/S_L exp$ para todas as misturas estudadas. De igual modo, torna-se evidente uma maior exatidão dos valores calculados e experimentais quando se tratando das misturas que não contenham hélio como diluente.

A Figura 4.9 apresenta os resultados da aceleração de chama das misturas de Mix 6, Mix 2, Mix 4 e Mix 8 pelo modelo de Valiev et al., 2013 calculado com $\xi_{tip exp}$. A partir dos resultados experimentais e calculados do modelo de Valiev et al., 2013 calculado com $\xi_{tip exp}$ pode-se observar a acurácia dos resultados.

A partir dos resultados obtidos na Figura 4.9 (a), observa-se que para a mistura de Mix 6 o modelo de Valiev et al., 2013, calculado com $\xi_{tip exp}$ apresentou uma boa exatidão aos dados coletados experimentalmente. Do mesmo modo, pela Figura 4.9 (b), percebe-se que para a mistura Mix 2 tem-se uma boa correlação entre os dados calculados e experimentais. Por se tratar de misturas semelhantes, percebe-se também que os valores adimensionais de x/Dh obtidos foram semelhantes para essas misturas. Entretanto, as velocidades máximas foram levemente maiores para as misturas com a presença de hidrogênio.

A partir dos resultados apresentados na Figura 4.9 (c), percebe-se que a adição do diluente hélio na mistura causa uma desaceleração na propagação da chama. Da mesma forma, a distância em que a chama toca as paredes laterais diminui para um valor abaixo de dois. O modelo de Valiev et al., 2013, calculado com $\xi_{tip exp}$ apresenta uma boa relação qualitativa com relação aos dados experimentais. Entretanto, percebe-se que para uma melhor exatidão esse modelo necessita de ajuste. Um comportamento semelhante foi observado na Figura 4.9 (d), onde verifica-se que com o incremento do diluente hélio na mistura de gás natural tem-se uma desaceleração da velocidade de propagação da mistura. A Figura 4.10 apresenta uma análise da aceleração de chama das misturas de Mix 1, Mix 5, Mix 3 e Mix 7 pelo modelo de Valiev et al., 2013, calculado com $\xi_{tip exp}$.

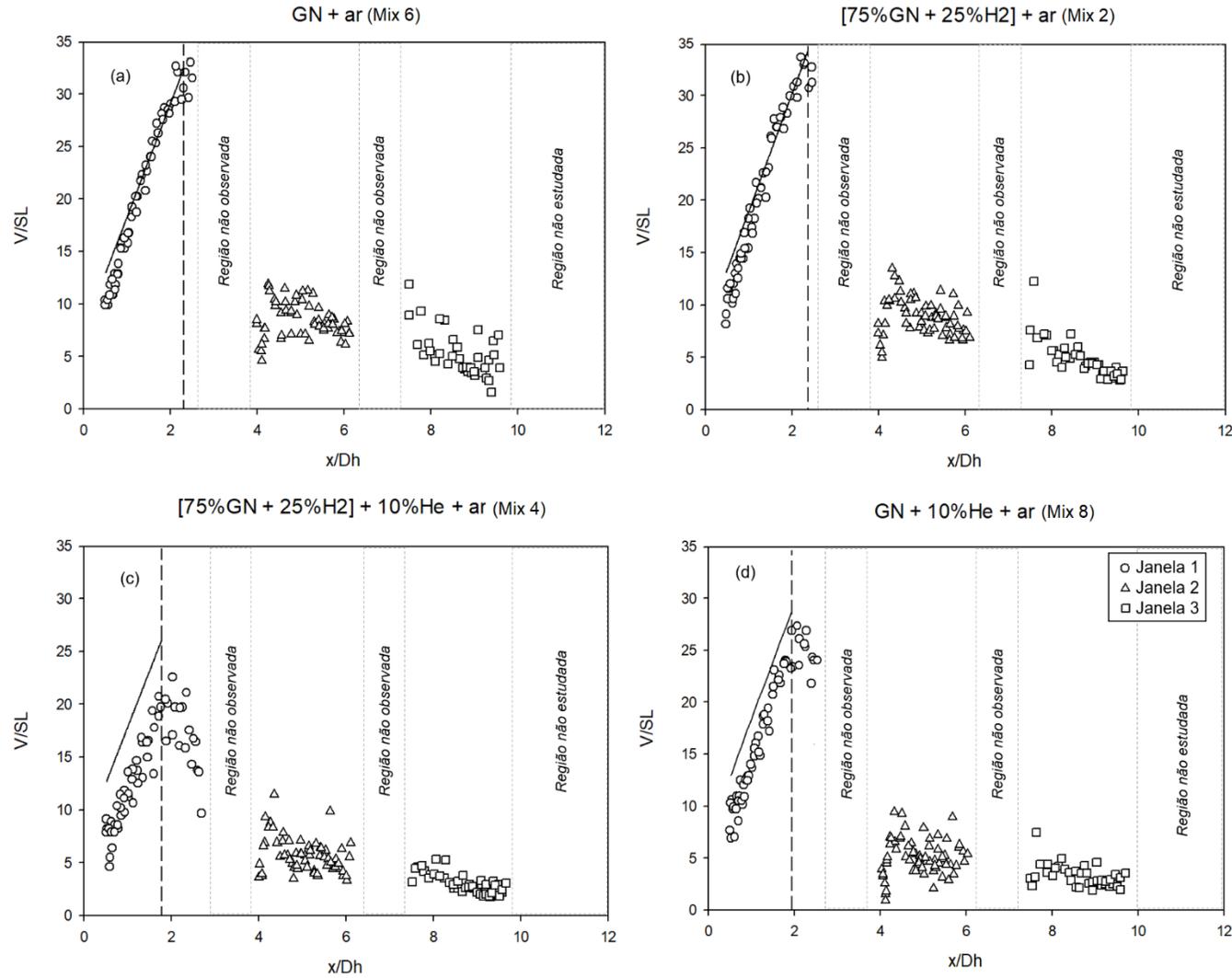


Figura 4.9 – Análise da aceleração de chama das misturas de (a) GN + ar (Mix 6), (b) [75%GN + 25%H₂] + ar (Mix 2), (c) [75%GN + 25%H₂] + 10%He + ar (Mix 4) e (d) GN + 10%He + ar (Mix 8) pelo modelo de Valiev et al., 2013, calculado com $\xi_{tip\ exp}$.

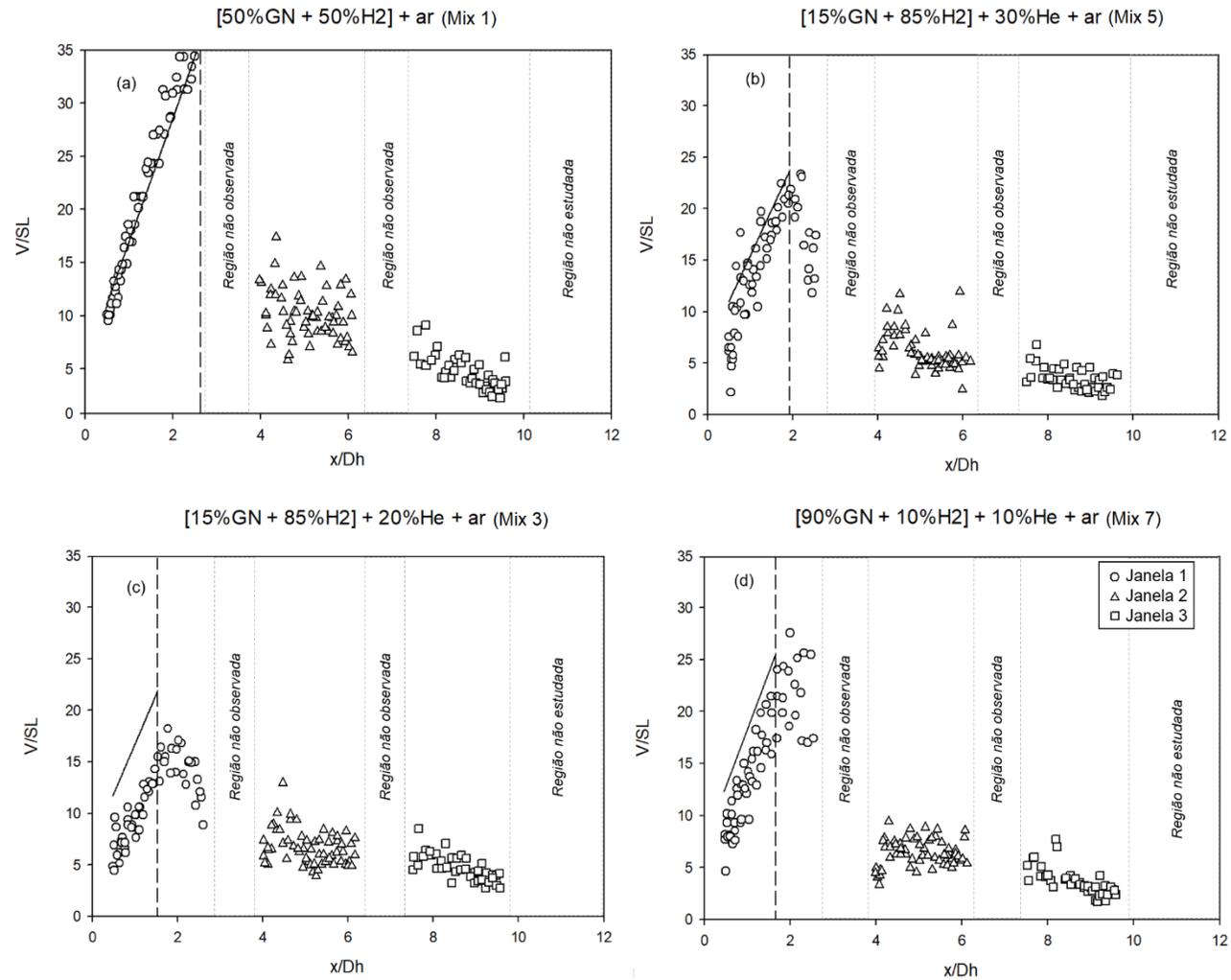


Figura 4.10 – Análise da aceleração de chama das misturas de (a) [50%GN + 50%H₂] + ar (Mix 1), (b) [15%GN + 85%H₂] + 30%He + ar (Mix 5), (c) [15%GN + 85%H₂] + 20%He + ar (Mix 3) e (d) [90%GN + 10%H₂] + 10%He + ar (Mix 7) pelo modelo de Valiev et al., 2013 calculado com $\xi_{tip\ exp}$.

A partir dos resultados obtidos da Figura 4.10, observa-se que para todos os casos estudados a aceleração da chama é representada pela inclinação da reta apresentada na janela 1. Na Figura 4.10 (a) observa-se que para a mistura Mix 1 tem-se um aumento considerável da aceleração e da velocidade de propagação da chama frente às outras misturas. A adição de hidrogênio torna a mistura mais reativa e conseqüentemente mais rápida. Do mesmo modo, os maiores valores de x/Dh neste estudo foram obtidos nesta mistura. O modelo de Valiev et al., 2013, calculado com $\xi_{tip\ exp}$ apresentou boa exatidão para a mistura Mix 1.

Pelas Figuras 4.10 (b) e (c) percebe-se novamente que o incremento do diluente hélio torna as misturas mais lentas. Assim como, os valores de x/Dh encontrados nessas misturas estão abaixo de dois. Devido ao fato de a desaceleração dessas misturas ocorrer antes do final da primeira janela de visualização, infere-se que o fenômeno da inversão da frente de chama, ou chama tulipa, possa ter ocorrido nessas misturas. No entanto, esse fenômeno não pode ser observado de forma clara.

De forma análoga, observa-se na Figura 4.10 (d) a desaceleração da mistura Mix 7. Assim como nas misturas anteriores, observou-se que a presença de hélio como diluente ocasionou uma maior dispersão dos resultados obtidos experimentalmente.

5 CONCLUSÕES

A pesquisa apresentada se destinou a estudar experimentalmente a propagação de chamas pré-misturadas envolvendo gás natural, hidrogênio e hélio, observando o efeito do número de Lewis e do número de Zeldovich na aceleração das chamas. Para tal, esta análise foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa do trabalho, realizou-se um estudo sobre da aceleração da frente de chama, seu comportamento nos instantes iniciais de uma propagação em dutos fechados e o modelo disponível na literatura para caracterizar essa aceleração.

Na segunda parte, construiu-se uma bancada experimental para determinar as curvas da velocidade de propagação de chamas pré-misturadas de algumas misturas variando o número de Lewis e Zeldovich. Assim, buscou-se avaliar o efeito do número de Lewis e do número de Zeldovich sobre a aceleração das chamas pré-misturadas em dutos fechados e comparar os resultados experimentais da velocidade de propagação de chama com os resultados obtidos aplicando a teoria disponível.

5.1 Resultados experimentais da velocidade de propagação da chama

Com relação a aceleração de chamas, as seguintes conclusões foram obtidas:

- a) Todas as misturas estudadas no presente trabalho apresentaram o comportamento característico da aceleração da frente de chama, iniciando por uma rampa de aceleração nos estágios iniciais da propagação e culminando em uma desaceleração oscilatória até o final da propagação da chama. Entende-se que esta desaceleração está associada à perda de calor com as paredes do duto à medida que ocorre a propagação, e à redução da superfície da chama;
- b) A mistura de Mix 1 atingiu a maior velocidade de propagação, enquanto a mistura de Mix 3 atingiu a menor. Assim, infere-se que nas misturas onde teve a participação do hélio ocorreu a inibição da reação de combustão;
- c) Concomitantemente ao observado no item “b”, todas as misturas envolvendo o gás hélio obtiveram menores valores das velocidades de propagação. De modo que, os resultados

encontrados tiveram maiores dispersões de valores de velocidade de propagação em relação às outras misturas estudadas.

5.2 Comparação entre os resultados experimentais e o modelo disponível na literatura

Para o modelo de Valiev et al., 2013, as seguintes conclusões seguem abaixo:

- a) O modelo de Valiev et al., 2013, apresentou uma exatidão aceitável para alguns casos, quando comparado com dados experimentais. Entretanto, foram observados casos em que o modelo teve uma exatidão extremamente baixa, apresentando erros relativos da ordem de 100% para misturas com a diluição de hélio;
- b) A determinação do parâmetro ξ_{calc} do modelo de Valiev et al., 2013, é um fator preponderante que causa a maioria das divergências com os valores das velocidades máximas da ponta da chama;
- c) Devido a não adaptação do modelo para as misturas com a adição de hélio, o modelo de Valiev et al., 2013, foi calculado com $\xi_{tip\ exp}$ de acordo as misturas estudadas neste trabalho. Assim, após a alterações realizadas, os resultados calculados da velocidade de propagação apresentaram uma melhor exatidão comparadas às velocidades de propagação calculadas pelo modelo de Valiev et al., 2013, principalmente em se tratando de misturas diluídas com hélio.

5.3 Número de Lewis e Zeldovich

As seguintes conclusões foram obtidas com relação aos números de Lewis e Zeldovich:

- a) Quando número de Lewis foi menor que 1, observaram-se as maiores velocidades de propagação das misturas estudadas. Assim, para essas misturas os efeitos de difusão de massa são predominantes;
- b) Quando o número de Lewis foi maior que 1, observaram-se menores velocidades de propagação. Para essas misturas, os efeitos de difusão térmica são predominantes;

- c) Com relação ao número de Zeldovich, observou-se que à medida que o número de Zeldovich diminui, a velocidade de propagação tende a aumentar. Entretanto esse aumento ocorre até o número de Zeldovich igual a 7, aproximadamente, onde abaixo deste valor a velocidade máxima de propagação tende a diminuir.

5.4 Sugestões para trabalhos futuros

Por fim, as seguintes sugestões são apresentadas para trabalhos futuros relacionados a obtenção da velocidade de propagação de chamas na bancada experimental:

- a) Aferir a composição da mistura combustível com cromatografia gasosa para certificar a composição da mistura estudada;
- b) Automatizar o processo de preparação da mistura na câmara de mistura objetivando melhorar a reprodutividade dos testes experimentais;
- c) Realizar testes com outras composições que forneçam os mesmos números de Lewis e/ou de Zeldovich das misturas estudadas para validar as relações da propagação de chamas e os números adimensionais apresentadas nesta pesquisa.

6 REFERÊNCIAS

Bradley D., Lawes M. e Liu K. Turbulent flame speeds in ducts and the deflagration-detonation transition, **Combustion and Flame**. vol. 154, p. 96-108, 2008.

Bychkov, Vitaly et al. Flame acceleration in the early stages of burning in tubes, **Combustion and Flame**. v. 150, n. 4, p. 263-276, 2007.

Chakraborty N. e Cant R.S. Influence of Lewis number on strain rate effects in turbulent premixed flame propagation. **International journal of heat and Mass Transfer**, v. 49, n. 13-14, p. 2158-2172, 2006.

Ciccarelli G. e Dorofeev S. Flame acceleration and transition to detonation in ducts. **Progress in Energy and Combustion Science**. v. 34, n. 4, p. 499-550, 2008.

Clanet C. e Searby G. On the "Tulip Flame" Phenomenon. **Combustion and flame**, v. 105, n. 1-2, p. 225-238, 1996.

Coelho P. e Costa M. Combustão.Orion, Porto 1ª ed. 2007.

Dorofeev S. Flame acceleration and explosion safety applications. **Proceedings of the combustion Institute**. v. 33, n. 2, p. 2161-2175, 2011.

Ellis OC de C. Flame movement in gaseous explosive mixtures, **J. Fuel Sci.**, v. 7, p. 502-508, 1928.

Friedman R. Kinetics of the combustion wave. **American Rocket Society Journal.**, v. 23, n. 6, p. 349-354, 1953.

GasNet. Gás Natural. **Composição do Gás Natural Comercial.** <https://www.gasnet.com.br/GasNatural/OGasCompleto#gas12>, 2022, acessado em: 20-01-2022.

Glassman I. e Yetter R. Combustion. Elsevier, San Diego, 4ª ed. 2008.

Goodwin D. et al. **Cantera: An object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes.** <https://www.cantera.org>, 2021, acessado em: 15-02-2022.

Jin K. et al. Experimental study on a comparison of typical premixed combustible gas-air flame propagation in a horizontal rectangular closed duct. **Journal of Hazardous Materials**, v. 327, p. 116-126, 2017.

Kratzel T., Pantow E. e Fischer M. On the transition from a highly turbulent curve flame into a tulip flame. **International journal of hydrogen energy**, v. 23, n. 1, p. 45-51, 1998.

Kuo Kenneth K. Principles of Combustion - 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, Inc., 2005.

Kurdyumov V. e Matalon M. Self-accelerating flames in long narrow open channels. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 35, n. 1, p. 921-928, 2015.

Lauermann, C. H. **Estudo da extinção de chamas pré-misturadas de combustíveis alternativos**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, no prelo.

Law C. K. Combustion Physics. New York : Cambridge University Press, 2006.

Lee J. The Detonation Phenomenon. New York : Cambridge, 2008.

Li R et al. A comparative investigation of premixed flame propagating of combustible gases-methane mixtures across an obstructed closed tube. **Fuel**, v. 289, p. 119766, 2021.

Li Ya et al. Effects of diluents on laminar burning velocity and cellular instability of 2-methyltetrahydrofuran-air flames. **Fuel**, v. 308, p. 121974, 2022.

Luo Z. et al. Experimental study on the deflagration characteristics of methane-ethane mixtures in a closed duct. **Fuel**, v. 259, p. 116295, 2020.

Mendiburu A. et al. Characterization of the flame front inversion of Ethanol-Air deflagrations inside a closed tube. **Energy**, v. 187, p. 115932, 2019.

Oran Elaine S., Chamberlain Geoffrey e Pekalski Andrzej. Mechanisms and occurrence of detonations in vapor cloud explosions. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 77, p. 100804, 2019.

Physlets. **Tracker Version 6.0.6**. <https://www.physlets.org/tracker>, 2022, acessado em: 12-01-2022.

Ponizy B., Claverie A. e Veyssi re Tulip flame - the mechanism of flame front inversion. **Combustion and flame**, v. 161, n. 12, p. 3051-3062, 2014.

Quines R., Nzinga M. e Mendibru A. Study of flame acceleration in closed and half-open ducts. **COBEM**, Porto Alegre, 2021.

Salamandra G.D., Bazhenova T.V. e Naboko I.M. Formation of detonation wave during combustion of gas in combustion tube. Em: **Symposium (International) on Combustion**. Elsevier, 1959. p. 851-855.

Shen X. et al. Evolution of premixed stoichiometric hydrogen/air flame in a closed duct. **Energy**, v. 176, p. 265-271, 2019.

Shen X., He X. e Sun J. A comparative study on premixed hydrogen–air and propane–air flame propagations with tulip distortion in a closed duct. **Fuel**, v. 161, p. 248-253, 2015.

Turns S. An Introduction to Combustion: Concepts and Applications. New York : McGraw-Hill, 2012.

Valiev et al. Influence of gas compression on flame acceleration in the early stage of burning in tubes. **Combustion and Flame**, v. 160, n. 1, p. 97-111, 2013.

Valiev. et al. Flame acceleration in channels with obstacles in the deflagration-to-detonation transition. **Combustion and Flame**, v. 157, n. 5, p. 1012-1021, 2010.

Verhelst S. e Wallner T. Hydrogen-fueled internal combustion engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 35, n. 6, p. 490-527, 2009.

Wenhu H., Gao Yang e Chung K. Flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in micro- and macro-channels: An integrated mechanistic study. **Combustion and flame**, v. 176, p. 285-298, 2016.

Xiao H. et al. Effects of ignition location on premixed hydrogen/air flame propagation in a closed combustion tube. **International journal of hydrogen energy**, v. 39, n. 16, p. 8557-8563, 2014.

Xiao H. et al. Experimental study on the behaviors and shape changes of premixed hydrogen-air flames propagating in horizontal duct. **International journal of hydrogen energy**, v. 36, n. 10, p. 6325-6336, 2011.

Yang et al. An experimental study on premixed syngas-air flame propagating across an obstacle in closed duct. **Fuel**, v. 267, p. 117200, 2020.

Yang X. et al. A comparative investigation of premixed flame propagation behavior of syngas-air mixtures in closed and half-open ducts. **Energy**, v. 178, p. 436-446, 2019a.

Yang X. et al. An experimental investigation into the behavior of premixed flames of hydrogen/carbon monoxide/air mixtures in a half-open duct. **Fuel**, v. 237, p.619-629, 2019b.

Yang X. et al. Effect of equivalence ratio and ignition location on premixed syngas-air explosion in a half-open duct. **Fuel**, v. 288, p. 119724, 2020.

Yao Z. et al. On explosion characteristics of premixed syngas/air mixtures with different hydrogen volume fractions and ignition positions. **Fuel**, v. 288, p. 119619, 2021.

Yu M. et al. Experimental study of premixed syngas/air flame deflagration in a closed duct. **International journal of hydrogen energy**, v. 43, n. 29, p. 13676-13686, 2018.

Yu M. et al. Scale effects on premixed flame propagation of hydrogen/methane deflagration. **International journal of hydrogen energy**, v. 40, n. 38, p. 13121-13133, 2015.

Zheng K. et al. Comparative study of the propagation of methane/air and hydrogen/air flames in a duct using large eddy simulation. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 120, p. 45-56, 2018.

Zheng K. et al. Experimental study on premixed flame propagation of hydrogen/methane/air deflagration in closed ducts. **International journal of hydrogen energy**, v. 42, n. 8, p. 5426-5438, 2016.

Zitouni S. et al. Lewis number effects on lean premixed combustion characteristics of multi-component fuel blends. **Combustion and Flame**, v. 238, p. 111932, 2022.

APÊNDICE A – Artigos publicados sobre propagação de chamas em dutos

Tabela A.1 – Relação de artigos publicados sobre propagação de chamas em dutos.

Autores	Tipo de estudo	Razões de Equivalências estudadas	Espécies investigadas	Ano da Publicação	Referência
Li et al.	Experimental	0.9, 1.0, 1.1	CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ , CO, H ₂ e ar	2021	(Li, et al., 2021)
Yao et al.	Experimental	1.0	H ₂ , CO e ar	2021	(Yao, et al., 2021)
Yang et al.	Experimental	0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.5, 3.0	H ₂ , CO e ar	2021	(Yang, et al., 2021)
Luo et al.	Experimental e Numérico	0.72, 1.0, 1.12, 1.13	CH ₄ , C ₂ H ₆ e ar	2020	(Luo, et al., 2020)
Yang et al.	Experimental	1.0	H ₂ , CO e ar	2020	(Yang, et al., 2020)
Yang et al.	Experimental	0.8	H ₂ , CO e ar	2019	(Yang, et al., 2019)
Mendiburu et al.	Experimental	0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4	C ₂ H ₅ OH e ar	2019	(Mendiburu, et al., 2019)
Yu et al.	Experimental	1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0	H ₂ , CO e ar	2018	(Yu, et al., 2018)
Zheng et al.	Numérico	1.0	CH ₄ e misturas de H ₂ e ar	2018	(Zheng, et al., 2018)

Yang et al.	Experimental	0.8, 1.0, 1.2	H ₂ , CO e ar	2018	(Yang, et al., 2018)
Jin et al.	Experimental	0.4 – 1.7	GN, CH ₄ , C ₂ H ₂ e ar	2017	(Jin, et al., 2017)
Zheng et al.	Experimental	1.0	H ₂ , CH ₄ e ar	2016	(Zheng, et al., 2016)
Yu et al.	Experimental	1.0	H ₂ , CH ₄ e ar	2015	(Yu, et al., 2015)
Shen et al.	Experimental	1.0, 1.17, 1.82, 2.24, 3.34, 4.10, 5.07	H ₂ , C ₃ H ₈ e ar	2015	(Shen, et al., 2015)
Xiao et al.	Experimental	1.58	H ₂ e ar	2014	(Xiao, et al., 2014)
Bradley et al.	Numérico	0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3	CH ₄ , H ₂ e ar	2008	(Bradley, et al., 2008)

APÊNDICE B – Passo a passo do funcionamento da bancada experimental

Passo a passo do funcionamento da bancada experimental

Antes de se iniciar o teste experimental, deve-se definir a mistura combustível desejada. Para isso, foi criada uma tabela de excel que relaciona a fração de combustível utilizada na mistura com sua respectiva pressão, assim utiliza-se o método de pressões parciais para realizar a mistura. Após definida a mistura, deve-se realizar o vácuo na câmara de mistura até atingir a pressão de 0,5 kPa ou inferior. A pressão é lida pelos transdutores de pressão e visualizada diretamente na tela do computador por meio do *software* do *FielLogger*. Nesse momento somente a válvula de acesso do vácuo para a câmara de mistura deve estar aberta, as demais válvulas devem estar fechadas.

A partir da realização do vácuo na câmara de mistura, deve-se fechar a válvula de vácuo e desligar a bomba de vácuo. Neste momento deve-se preencher a câmara de mistura com as quantidades desejadas das pressões dos gases utilizando o método de pressões parciais. Após atingir a mistura desejada, deve-se fechar as válvulas de acesso à câmara de mistura e ligar o agitador magnético que está instalado abaixo do balão da câmara de mistura por 10 minutos, isso assegura que a homogeneização da mistura ocorra.

Quando estiver próximo ao término desses 10 minutos, deve-se iniciar o vácuo no duto de propagação, ligando a bomba de vácuo e abrindo a válvula de acesso que liga a bomba de vácuo ao duto de propagação. Após isso, deve-se abrir a válvula de acesso ao transdutor de pressão de 1 bar que está instalado junto ao duto de propagação. Quando a pressão no interior do duto estiver próxima ao vácuo, deve-se fechar a válvula de acesso da bomba de vácuo para o duto e desligar o equipamento.

O passo seguinte é desligar o agitador magnético e abrir a válvula que liga a câmara de mistura ao duto de propagação. Neste instante, parte da mistura combustível que foi preparada na câmara de mistura será inserida no duto de propagação. A pressão inicial desejada no duto de propagação é de 40 KPa. A leitura dessa pressão é realizada pelo transdutor de pressão de capacidade de 1 bar instalado junto ao duto de propagação. Após obter a pressão desejada torna-se muito importante que a válvula de acesso ao transdutor de pressão de 1 bar seja fechada, pois caso contrário esse transdutor será danificado no ato da ignição e propagação da chama devido ao elevado gradiente de pressão proveniente da combustão da mistura inflamável.

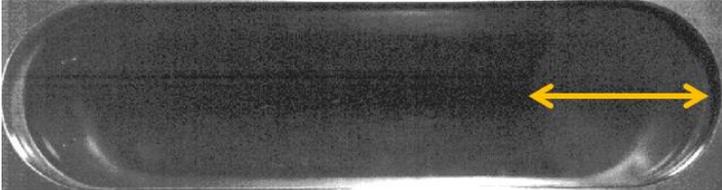
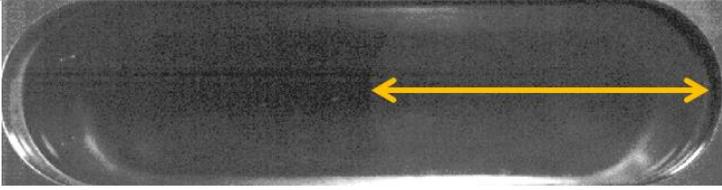
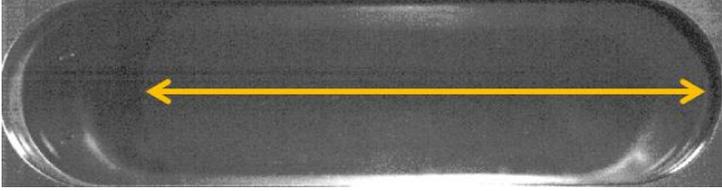
Após isso, por precaução, confere-se o sistema de *autotrigger* do *software* de aquisição de imagens para não desperdiçar o teste de propagação, e na sequência aciona-se a ignição. Ao término da propagação da chama, deve-se abrir a válvula de exaustão do duto para aliviar a pressão interna e evacuar os gases queimados, após isso deve-se abrir a válvula de acesso do nitrogênio ao duto com o objetivo de realizar a limpeza interna do duto de propagação.

Logo após o término da limpeza interna do duto, deve-se fechar as válvulas de acesso do nitrogênio e de exaustão, respectivamente. Com isso, inicia-se novamente o procedimento de vácuo no duto ligando a bomba de vácuo e abrindo-se a válvula de acesso do vácuo ao duto. Nesse momento, deve-se abrir a válvula de acesso do transdutor de 1 bar ao duto e repetir novamente o processo de enchimento da mistura combustível da câmara de mistura para o duto de propagação.

Quando a quantidade de gases na câmara de mistura for insuficiente para realizar mais testes no duto de propagação, antes preparar uma nova mistura, deve-se realizar a limpeza da câmara de mistura. Para realizar este procedimento, primeiro deve-se inserir o gás inerte nitrogênio até uma pressão de 150 KPa dentro do balão com o objetivo de diluir a mistura, assim pode-se com segurança acionar a bomba de vácuo para retirar os gases inseridos dentro do balão da câmara de mistura. Logo após o vácuo ser realizado, deve-se inserir ar sintético 5.0 até uma pressão de 100 KPa dentro da câmara de mistura. Somente após isso, o procedimento de preparação da próxima mistura pode ser realizado e os testes podem ser retomados.

APÊNDICE C – Resultados da propagação da frente de chamas para algumas misturas

Tabela C.1 – Imagens representativas da propagação da frente da chama para mistura [90% GN + 10% H₂] + 10% He + ar.

[90% GN + 10% H₂] + 10% He + ar			
Propagação da Frente de Chama		x (cm)	V (cm/s)
Janela 1		6,62	340,73
		10,44	449,57
		15,64	743,85
		22,77	804,32
Janela 2		43,26	278,20
		48,86	360,09

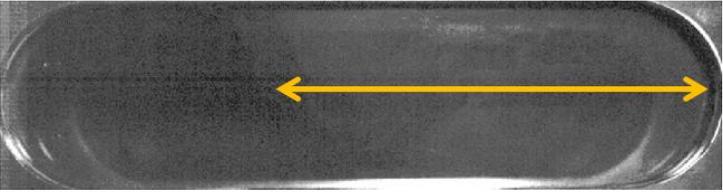
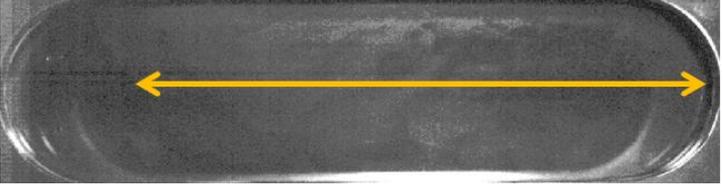
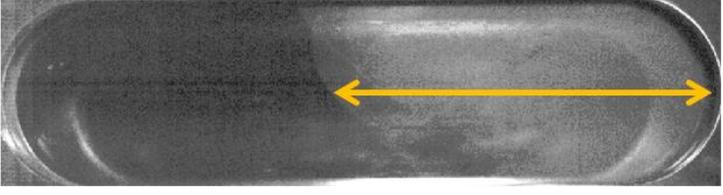
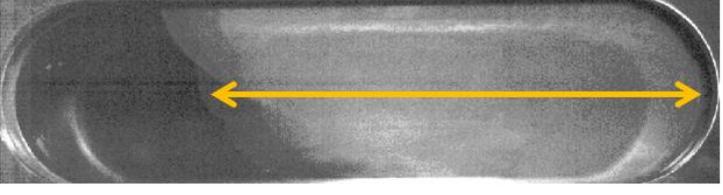
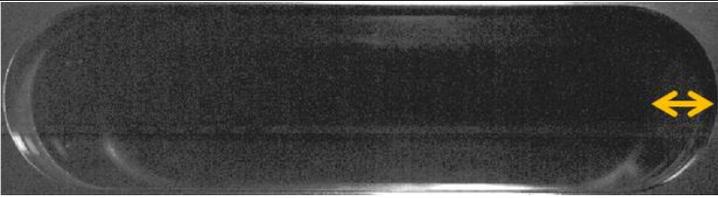
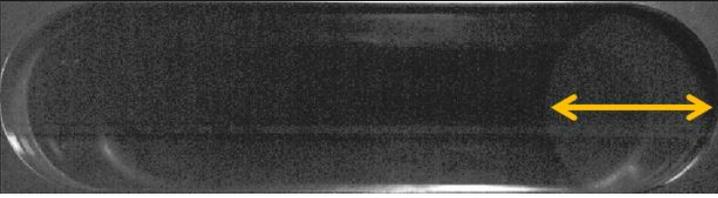
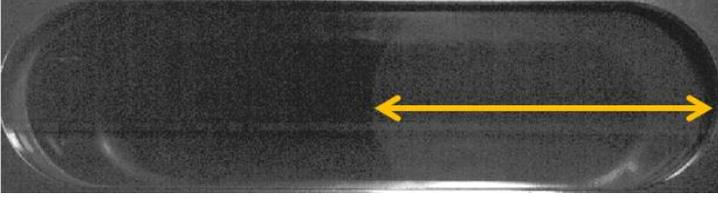
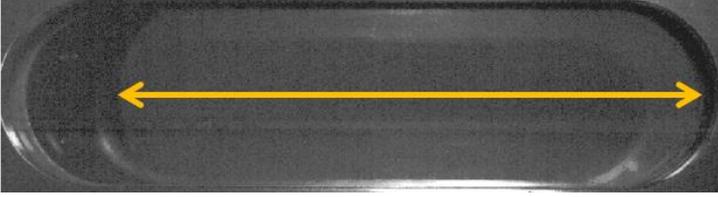
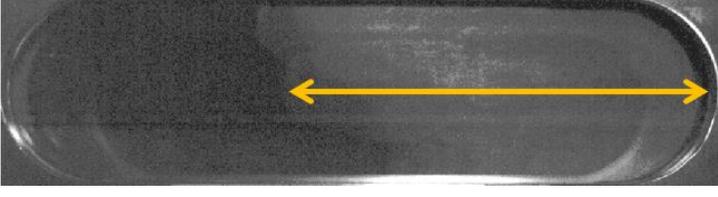
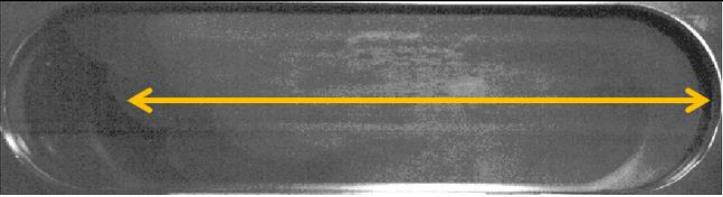
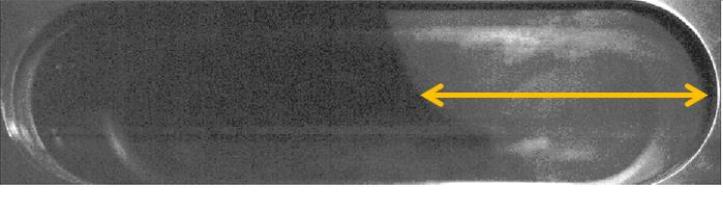
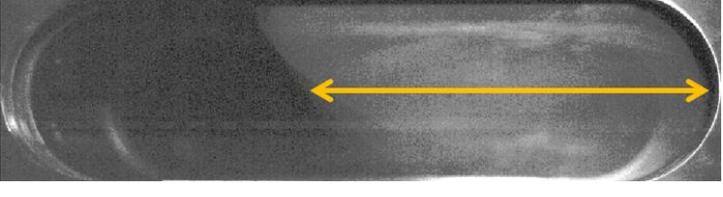
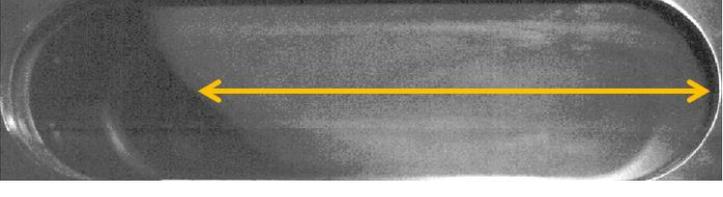
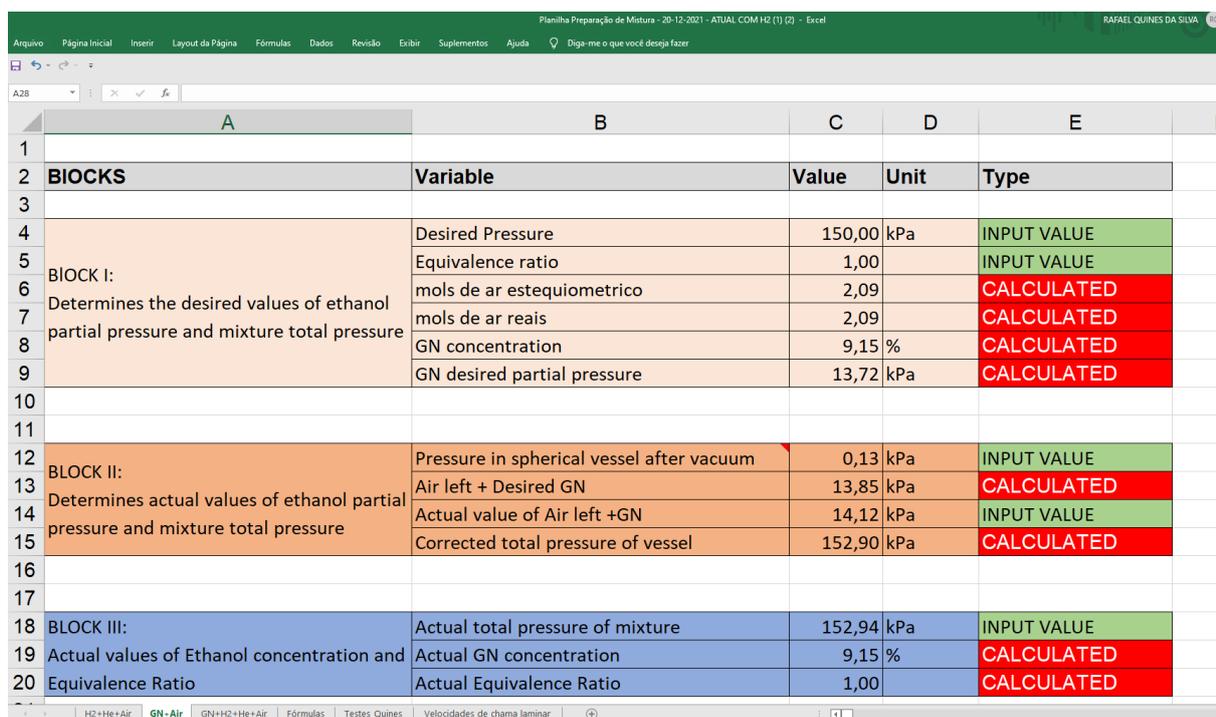
		53,72	277,40
		57,58	272,07
Janela 3		80,81	174,58
		86,52	163,22
		91,15	86,43
		95,09	134,42

Tabela C.2 – Imagens representativas da propagação da frente da chama para mistura GN + 10% He + ar.

GN + 10% He + ar			
	Propagação da Frente de Chama	x (cm)	V (cm/s)
Janela 1		6,29	444,14
		9,84	615,54
		15,13	943,78
		24,49	1055,55
Janela 2		41,47	195,97
		47,59	242,81
		53,68	195,98

		58,45	274,87
Janela 3		78,88	157,41
		84,51	124,51
		88,50	111,58
		91,51	105,71

APÊNDICE D – Planilha de preparação de misturas



	A	B	C	D	E	F
1						
2	BLOCKS	Variable	Value	Unit	Type	
3						
4	BLOCK I: Determines the desired values of ethanol partial pressure and mixture total pressure	Desired Pressure	150,00	kPa	INPUT VALUE	
5		Equivalence ratio	1,00		INPUT VALUE	
6		mols de ar estequiometrico	2,09		CALCULATED	
7		mols de ar reais	2,09		CALCULATED	
8		GN concentration	9,15	%	CALCULATED	
9		GN desired partial pressure	13,72	kPa	CALCULATED	
10						
11						
12	BLOCK II: Determines actual values of ethanol partial pressure and mixture total pressure	Pressure in spherical vessel after vacuum	0,13	kPa	INPUT VALUE	
13		Air left + Desired GN	13,85	kPa	CALCULATED	
14		Actual value of Air left +GN	14,12	kPa	INPUT VALUE	
15		Corrected total pressure of vessel	152,90	kPa	CALCULATED	
16						
17						
18	BLOCK III: Actual values of Ethanol concentration and Equivalence Ratio	Actual total pressure of mixture	152,94	kPa	INPUT VALUE	
19		Actual GN concentration	9,15	%	CALCULATED	
20		Actual Equivalence Ratio	1,00		CALCULATED	

Figura D.0.1 – Planilha preparação de mistura dos testes experimentais.

ANEXO I – Certificados de calibração dos transdutores



Laboratório SENAI IST - PGE

Certificado N°:
SM 210181-2021-01

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025 sob o nº CAL 0639

Cliente: Andrés Armando Mendiburu Zevallos
Endereço: Rua Sarmiento Leite, 425, Centro Histórico, Porto Alegre
Nome: Andrés Mendiburu
Contato: andresmendiburu@ufrgs.br
Instrumento: Transmissor de pressão absoluta
Local da Calibração: Instalações Permar
Identificação: T-01
N° de Série: TP. 6875
Fabricante: WARME
Resolução: 0,0001 bar
Modelo: Transmissor de pressão absoluta
Faixa: (0 a 1) bar (abs)
Faixa Calibrada: (0 a 1) bar (abs)

Padrões utilizados:

Padrão/Tipo	Identificação	Certificado		
		Número/Origem	Incerteza	Validade
Manômetro Padrão	Cappo XP (0 a 20)bar abs	CAL-194596/21-ABSI	± 0,02 %	Fevereiro/2023
Leitor de Unidade Elétrica	Cappo XP (4 a 20)mA	E0678/2020	± 0,02%	Dezembro/2021

Ambiente Laboratorial:

Temperatura: 20,5°C

Umidade Relativa: 64,0%ur

Pressão Atmosférica: 1053,5mbar

Procedimento: Conforme procedimento interno PRI-15-110-01.

A calibração foi realizada por comparação direta com o Padrão, o sistema permaneceu por 5 minutos sob pressão máxima para estabilidade do sistema e verificação de eventuais vazamentos. Os pontos foram setados no Instrumento em Calibração e comparado com o Sensor Padrão.

Resultados Obtidos na Calibração:

Instrumento		mA	Padrão				Dados de Calibração		
MPa	bar		bar				Incerteza de Medida	K	Veff
			Primeiro Ciclo		Segundo Ciclo				
		Carrego	Descarrego	Carrego	Descarrego				
0,02	0,2000	7,2000	0,2020	0,2021	0,2021	0,2022	0,0939	2,06	45,19
0,04	0,4000	10,4000	0,4017	0,4018	0,4017	0,4019	0,0939	2,06	45,19
0,06	0,6000	13,6000	0,6026	0,6027	0,6025	0,6027	0,0939	2,06	45,19
0,08	0,8000	16,8000	0,8045	0,8047	0,8043	0,8047	0,0939	2,06	45,19
0,10	1,0000	20,0000	1,0016	1,0011	1,0016	1,0011	0,0939	2,06	45,19

Características Metrológicas Apresentadas em Relação a Amplitude da Faixa do Instrumento (%):

Histerese: 0,0500%

Incerteza: 9,39%

Repetibilidade: 0,0200%

Curva de Calibração:

$$Y = -4,1992329208 + 20,6764028354X$$

Correlação: 0,9897594753

Incertezada Curva: 0,941966 mA



Conversões:

1bar = 0,1 MPa

Incerteza:

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com ν_{eff} graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Data de calibração:
13/10/2021**Data do Certificado:**
15/10/2021

MARCOS BASSANI Assinado de forma digital por
MARCOS BASSANI
RECH:0110377702 RECH:01103777025
5 Dados: 2021.10.18 09:42:38
-03'00'

Signatário Autorizado

Os resultados deste certificado equivalem exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições relatadas, não sendo extensivos a qualquer lote. É proibida a reprodução parcial deste certificado. Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na Regulamentação Metrológica.



Laboratório SENAI IST - PGE

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025 sob o nº CAL 0639

Cliente:	Andrés Armando Mendiburu Zevallos		
Endereço:	Rua Sarmento Leite, 425, Centro Histórico, Porto Alegre		
Nome:	Andrés Mendiburu		
Contato:	andresmendiburu@ufrgs.br		
Instrumento:	Transmissor de pressão absoluta	Local da Calibração:	Instalações Permar
Identificação:	T-02	N° de Série:	TP. 6875
Fabricante:	WARME	Resolução:	0,0001 bar
Modelo:	Transmissor de pressão absoluta	Faixa:	(0 a 10) bar (abs)
		Faixa Calibrada:	(0 a 10) bar (abs)

Padrões utilizados:

Padrão/Tipo	Identificação	Certificado		
		Número/Origem	Incerteza	Validade
Manômetro Padrão	Cappo XP (0 a 20)bar abs	CAL-194596/21-ABSI	± 0,02 %	Fevereiro/2023
Leitor de Unidade Elétrica	Cappo XP (4 a 20)mA	E0678/2020	± 0,02%	Dezembro/2021

Ambiente Laboratorial:

Temperatura: 20,5°C

Umidade Relativa: 64,0%ur

Pressão Atmosférica: 1053,5mbar

Procedimento: Conforme procedimento interno PRI-15-110-01.

A calibração foi realizada por comparação direta com o Padrão, o sistema permaneceu por 5 minutos sob pressão máxima para estabilidade do sistema e verificação de eventuais vazamentos. Os pontos foram setados no Instrumento em Calibração e comparado com o Sensor Padrão.

Resultados Obtidos na Calibração:

Instrumento			Padrão				Dados de Calibração		
MPa	bar	mA	bar				Incerteza de Medida	K	Veff
			Primeiro Ciclo		Segundo Ciclo				
			Carrego	Descarrego	Carrego	Descarrego			
0,20	2,0000	7,2000	2,0820	2,0760	2,0782	2,0762	0,9441	2,06	45,00
0,40	4,0000	10,4000	4,0688	4,0656	4,0691	4,0658	0,9441	2,06	45,00
0,60	6,0000	13,6000	6,0560	6,0553	6,0586	6,0552	0,9441	2,06	45,00
0,80	8,0000	16,8000	8,0570	8,0550	8,0590	8,0552	0,9441	2,06	45,00
1,00	10,0000	20,0000	10,0616	10,0636	10,0617	10,0631	0,9441	2,06	45,00

Características Metrológicas Apresentadas em Relação a Amplitude da Faixa do Instrumento (%):

Histerese: 0,0600%

Incerteza: 9,44%

Repetibilidade: 0,0380%

Curva de Calibração:

$$Y = -4,2331186424 + 2,0609416180X$$

Correlação: 0,9903518016

Incertezada Curva: 0,944531 mA

**Conversões:**

1bar = 0,1 MPa

Incerteza:

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com ν_{eff} graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Data de calibração:
11/10/2021

Data do Certificado:
15/10/2021

MARCOS BASSANI Assinado de forma digital
por MARCOS BASSANI
RECH:0110377702 RECH:01103777025
5 Dados: 2021.10.18
09:42:57 -03'00'

Signatário Autorizado

Os resultados deste certificado equivalem exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições relatadas, não sendo extensivos a qualquer lote. É proibida a reprodução parcial deste certificado. Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na Regulamentação Metrológica.



Laboratório SENAI IST - PGE

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025 sob o nº CAL 0639

Cliente:	Andrés Armando Mendiburu Zevallos		
Endereço:	Rua Sarmento Leite, 425, Centro Histórico, Porto Alegre		
Nome:	Andrés Mendiburu		
Contato:	andresmendiburu@ufrgs.br		
Instrumento:	Transmissor de pressão absoluta	Local da Calibração:	Instalações Permar
Identificação:	RTP-420	N° de Série:	-
Fabricante:	RUCKEN	Resolução:	0,0001 bar
Modelo:	Transmissor de pressão absoluta	Faixa:	(0 a 2) bar (abs)
		Faixa Calibrada:	(0 a 2) bar (abs)

Padrões utilizados:

Padrão/Tipo	Identificação	Certificado		
		Número/Origem	Incerteza	Validade
Manômetro Padrão	Cappo XP (0 a 20)bar abs	CAL-194596/21-ABSI	± 0,02 %	Fevereiro/2023
Leitor de Unidade Elétrica	Cappo XP (4 a 20)mA	E0678/2020	± 0,02%	Dezembro/2021

Ambiente Laboratorial:

Temperatura: 20,1°C

Umidade Relativa: 63,4%ur

Pressão Atmosférica: 1007,7mbar

Procedimento: Conforme procedimento interno PRI-15-110-01.

A calibração foi realizada por comparação direta com o Padrão, o sistema permaneceu por 5 minutos sob pressão máxima para estabilidade do sistema e verificação de eventuais vazamentos. Os pontos foram setados no Instrumento em Calibração e comparado com o Sensor Padrão.

Resultados Obtidos na Calibração:

Instrumento			Padrão				Dados de Calibração		
MPa	bar	mA	bar				Incerteza de Medida	K	Veff
			Primeiro Ciclo		Segundo Ciclo				
			Carrego	Descarrego	Carrego	Descarrego			
0,04	0,4000	7,2000	0,5188	0,5189	0,5188	0,5187	0,1984	2,06	45,04
0,08	0,8000	10,4000	0,8151	0,8152	0,8152	0,8152	0,1984	2,06	45,04
0,12	1,2000	13,6000	0,2145	0,2143	0,2144	0,2143	0,1984	2,06	45,04
0,16	1,6000	16,8000	1,6134	1,6135	1,6134	1,6135	0,1984	2,06	45,04
0,20	2,0000	20,0000	2,0081	2,0084	2,0081	2,0082	0,1984	2,06	45,04

Características Metrológicas Apresentadas em Relação a Amplitude da Faixa do Instrumento (%):

Histerese: 0,0150%

Incerteza: 9,92%

Repetibilidade: 0,0100%

Curva de Calibração:

$$Y = -2,1990076536 + 9,7262538096X$$

Correlação: 0,8991244898

Incertezada Curva: 0,936465 mA



Conversões:

1bar = 0,1 MPa

Incerteza:

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com ν_{eff} graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Data de calibração:
15/10/2021Data do Certificado:
15/10/2021

MARCOS BASSANI Assinado de forma digital por
RECH:0110377702 MARCOS BASSANI
5 RECH:01103777025
Dados: 2021.10.18 09:42:04
-03'00'

Signatário Autorizado

Os resultados deste certificado equivalem exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições relatadas, não sendo extensivos a qualquer lote. É proibida a reprodução parcial deste certificado. Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na Regulamentação Metrológica.



CERT. Nº.: 16589/20

CERTIFICADO DE QUALIDADE

CLIENTE: FUNDAÇÃO DE APOIO DA UFRGS - FAURGS
EQUIPAMENTO: TRANSMISSOR DE PRESSÃO
MODELO: WTP-4010
FAIXA: 0 A 1 bar (ABS)
NºSÉRIE: TP.6419
QUANTIDADE: 1

DATA: 11/06/2020

1. TESTES

DESCRIÇÃO DOS TESTES	APLICAÇÃO		RESULTADOS
	SIM	NÃO	
FUNCIONAL	X		OK
CALIBRAÇÃO	X		OK
VEDAÇÃO	X		OK

2. VERIFICAÇÃO

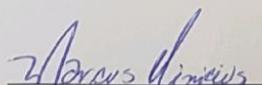
DESCRIÇÃO	APLICAÇÃO		RESULTADOS
	SIM	NÃO	
DIMENSÕES GERAIS	X		OK
ACABAMENTO	X		OK
MONTAGEM	X		OK

3. GARANTIA

Este equipamento é garantido contra defeitos de mão de obra e material pelo prazo de 12 meses a partir da data de entrega.

Esta garantia será invalidada quando os critérios de julgamento da WÄRME, caso o equipamento apresente avarias ou manuseios impróprios.

Quando o reparo dentro da garantia for necessário, o usuário deverá remeter o equipamento a nossa assistência técnica com Nota Fiscal remessa para conserto.


 Marcus Vinicius
 Responsável Técnico


 Claudio Iacona
 Gerente Técnico



WÄRME DO BRASIL INSTRUMENTAÇÃO E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL LTDA.
 Rua Cana Verde, 110 - Via de Circulação Um, 205 Jd. Silvestre - Centro Industrial
 Itaqucetubaba - São Paulo - Cep: 08584-420
 Central de Atendimento: (11) 4646-2525

www.warme.com.br



CERT. Nº.: 16588/20

CERTIFICADO DE QUALIDADE

CLIENTE: FUNDAÇÃO DE APOIO DA UFRGS - FAURGS
EQUIPAMENTO: TRANSMISSOR DE PRESSÃO
MODELO : WTP-4010
FAIXA: 0 A 10 bar (ABS)
NºSÉRIE: TP.6367
QUANTIDADE: 1 **DATA:** 11/06/2020

1. TESTES

DESCRIÇÃO DOS TESTES	APLICAÇÃO		RESULTADOS
	SIM	NÃO	
FUNCIONAL	X		OK
CALIBRAÇÃO	X		OK
VEDAÇÃO	X		OK

2. VERIFICAÇÃO

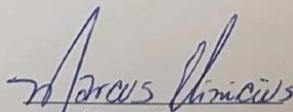
DESCRIÇÃO	APLICAÇÃO		RESULTADOS
	SIM	NÃO	
DIMENSÕES GERAIS	X		OK
ACABAMENTO	X		OK
MONTAGEM	X		OK

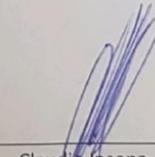
3. GARANTIA

Este equipamento é garantido contra defeitos de mão de obra e material pelo prazo de 12 meses a partir da data de entrega.

Esta garantia será invalidada quando os critérios de julgamento da Wärme, caso o equipamento apresente avarias ou manuseios impróprios.

Quando o reparo dentro da garantia for necessário, o usuário deverá remeter o equipamento a nossa assistência técnica com Nota Fiscal remessa para conserto.

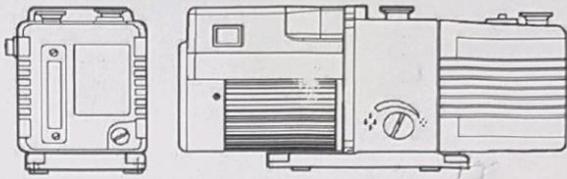
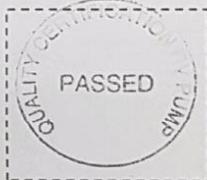
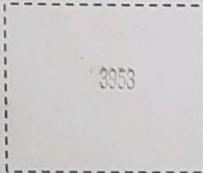

 Marcus Vinicius
 Responsável Técnico


 Claudio Jaona
 Gerente Técnico



WÄRME DO BRASIL INSTRUMENTAÇÃO E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL LTDA.
 Rua Cana Verde, 110 - Via de Circulação Um, 205 Jd. Silvestre - Centro Industrial
 Itaquecetubaba - São Paulo - Cep: 08584-420
 Central de Atendimento: (11) 4646-2525 - www.warme.com.br

ANEXO II – Certificado de calibração bomba de vácuo

		Edwards Limited Innovation drive Burgess Hill West Sussex, RH15 9TW, United Kingdom http://www.edwardsvacuum.com	
TEST CERTIFICATE			
<u>PUMP TYPE</u> Model: A65301906 Pump Serial Number: 200393798			
<u>PUMP INFORMATION</u>			
Pump Type: RV5 US/EUR PUMP LOW VOLTAGE Manufactured and Tested at: LUTÍN, CZECH REPUBLIC			
<u>PERFORMANCE TESTING</u>		CERTIFICATION STAMP	
<input checked="" type="checkbox"/> Noise <input checked="" type="checkbox"/> Gas Ballast Flow Rate Position 1 <input checked="" type="checkbox"/> Gas Ballast Flow Rate Position 2 <input checked="" type="checkbox"/> Gas Ballast Ultimate <input checked="" type="checkbox"/> Ultimate <input checked="" type="checkbox"/> Pressure Rise on Switch Off <input checked="" type="checkbox"/> Motor Power			
<u>FUNCTIONALITY TESTING</u>		TESTED BY	
<input checked="" type="checkbox"/> Priming <input checked="" type="checkbox"/> Inlet Valve Cycling <input checked="" type="checkbox"/> Mode Switch <input checked="" type="checkbox"/> Gas Ballast			

ANEXO III – Informações câmera Phantom v411

VISION
RESEARCH

PHANTOM

when it's too fast to see, and too important not to.®



Key Benefits:

WHEN IT'S TOO FAST TO SEE, AND TOO IMPORTANT NOT TO®

Our line of 1 megapixel cameras has several members. This data sheet covers the Phantom v411, v611, and v711. Be sure to check out our ultrahigh-speed line of 1 megapixel cameras also – including the new v2512.

All models feature a widescreen 1280 x 800 CMOS sensor – 25% wider than most competitive models – allowing you to **keep moving targets in-frame longer and see more of the event you are recording**. The wide sensor also allows you to get true 1280 x 720 HD images from a 1Mpx camera.

With a pixel size of 20 microns and improved quantum efficiency, **these cameras have the sensitivity you need** for even the most challenging lighting conditions.

Minimum exposure time of 1 microsecond (300 nanoseconds on the v711 with the FAST option) allows you to **eliminate blur** and **allow you to see the smallest of details**.

DATA SHEET

For the most current version visit www.phantomhighspeed.com
Subject to change Rev April 2016

Phantom® 1 Megapixel v-Series Cameras

Choose the model that best fits your performance requirements and budget

Advanced features are standard on these models

Each model is available with or without CineMag compatibility and On-Camera Controls

Key Features:

- Custom-designed 1280 x 800 CMOS sensor
 - Extreme Dynamic Range (EDR): two exposures per frame
 - Internal Mechanical Shutter mechanism for hands-free/remote CSRs
 - Memory Segmentation: up to 63 segments
 - Non-volatile, hot-swappable Phantom CineMag memory magazines
 - CineMag interface is optional on all models
 - Range Data Input: embed tracker data into recorded cine file
 - 8GB, 16GB or 32GB of internal high-speed memory
 - ISO (ISO-12232 SAT method):
Mono: 20,000 T and 6400 D
Color: 2500 T and 2000 D
 - Pixel Bit-Depth: 8-, 12-bit
 - Gb Ethernet
- The v711 and v611 support a FAST option that provides frame rates of 1,000,000 fps or more as well as sub-microsecond exposure times (export controlled)

AMETEK®
MATERIALS ANALYSIS DIVISION

Phantom 1 Mpx Cameras



Phantom v411

Throughput:

v411 - 4Gpx/s

v611 - 6Gpx/s

v711 - 7Gpx/s

MAXIMUM SPEEDS AT VARIOUS RESOLUTIONS		
Resolution		
v411	v611	v711
1280 x 800		
4200	6240	7530
1280 x 720		
4670	6930	8360
512 x 512		
13,900	20,970	25,000
256 x 256		
44,100	66,990	79,000
128 x 8		
600,000	1,000,000*	1,400,000*

* With FAST option installed

With throughput specifications ranging from 4 gigapixels-per-sec (Gpx/s) to 7Gpx/s, **there is a model to meet your frame-rate requirements.** At 4Gpx/s, the v411 can take over 4000 frames-per-second (fps) at full resolution. With 6Gpx/s the v611 tops out at over 6000 fps. A 7Gpx/s camera (the v711) can take over 7000 fps at full resolution (7530 fps, actually!) Top speeds at reduced resolution range from 300,000 fps to 1,400,000 fps depending on camera model.

These cameras support both 8- and 12-bit pixel depth. **Smaller bit-depth gives you more recording time** and smaller files. **Greater bit-depth gives you more gray levels** and finer detail. With the greater latitude of 12 bits, you can pull more detail out of the image, an essential requirement for most motion analysis applications.

Phantom's high-accuracy timing system means improved frame rate, frame synchronization and exposure accuracy. And a frame-synchronization (F-SYNC) signal is now available on a dedicated BNC connector on the camera connector panel for **easier cabling and increased signal integrity.**

The camera models offer the Extreme Dynamic Range feature – pioneered by Vision Research. This gives you the ability to **get two different exposures within a single frame** so areas that would otherwise be overexposed contain image detail. And, with Auto Exposure, **the camera adjusts to changing lighting conditions** automatically.

There is an internal mechanical shutter that can cut off all light to the sensor when doing a session-specific black reference (CSR). **You can now do remote CSRs through software control without the need to manually cover the lens!** With the optional Canon EOS lens mount installed you get remote control over lens aperture and focus, too. **This enables complete remote control in environments where you cannot easily access the camera.**

These models come with 8GB, 16GB or 32GB internal high-speed memory. Segmenting memory allows you to divide this into up to 63 segments so you can **take multiple shots back-to-back** without the need to download data from the camera.

Or, record directly to our Phantom CineMag non-volatile, hot-swappable memory magazines. They mount on the CineMag interface of compatible cameras. Continuously record full resolution cines into a CineMag at up to 780 fps. That's just over 2 minutes into the 128GB CineMag, 4.25 minutes into the 256GB, or 8.5 minutes into the 512GB version. Or, record at even higher speeds into camera RAM, then manually or automatically move your recording to the CineMag. With CineMag storage you **get maximum data protection and an ideal storage medium for secure environments.** The CineMag interface is an option on all models.

	Phantom v411	Phantom v611	Phantom v711
Throughput / Speed	> 4 Gpx/second Max speed at full resolution of 1280 x 800 is 4200 fps Max speed at reduced resolution of 128 x 8 is 600,000 fps Record direct to CineMag at up to 800 Mpx/second Minimum frame rate of 24 fps	> 6 Gpx/sec Max speed at full resolution of 1280 x 800 is 6242 fps Max speed at reduced resolution of 128 x 8 is 680,000 fps (standard), 1,000,000 fps (optional) Record direct to CineMag at up to 800 Mpx/second Minimum frame rate of 24 fps Some features are export controlled	> 7 Gpx/sec Max speed at full resolution of 1280 x 800 is 7530 fps Max speed at reduced resolution of 128 x 8 is 680,000 fps (standard), 1,400,000 fps (optional) Record direct to CineMag at up to 800 Mpx/second Minimum frame rate of 24 fps Some features are export controlled
Exposure	1 μ s minimum exposure Global electronic shutter Extreme Dynamic Range (EDR) Auto Exposure Shutter Off mode for PIV	1 μ s minimum exposure (standard), 300 ns (optional) Global electronic shutter Extreme Dynamic Range (EDR) Auto Exposure Shutter Off mode for PIV Some features are export controlled	1 μ s minimum exposure (standard), 300 ns (optional) Global electronic shutter Extreme Dynamic Range (EDR) Auto Exposure Shutter Off mode for PIV Some features are export controlled
Record Times	5.2 seconds at maximum frame rate, maximum bit depth, largest resolution and into maximum internal memory. Longer record times are available when recording directly to a CineMag.	3.58 seconds at maximum frame rate, maximum bit depth, largest resolution and into maximum internal memory. Longer record times are available when recording directly to a CineMag.	2.97 seconds at maximum frame rate, maximum bit depth, largest resolution and into maximum internal memory. Longer record times are available when recording directly to a CineMag.
Image-Based Auto-Trigger	Standard		
Internal Mechanical Shutter	Standard		
Timing & Synchronization	20 ns timing resolution Frame synchronization to internal or external clock (FSYNC) IRIG in/out (modulated or unmodulated) SMPTE timecode at support frame rates Ready output Strobe output Genlock		
Signaling	Dedicated FSYNC, Trigger, Genlock, Timecode In and Timecode Out (SMPTE & IRIG) BNCs on camera body, Range Data input on camera body Capture cable with Ready, Strobe, IBAT-Trigger, Pre-Trigger, Analog Video, Additional signals available with use of optional Break-Out-Box (BoB)		
Ethernet Connection	Gb Ethernet for both control and data		
Camera Control	Optional On-Camera Controls (OCC), Phantom Camera Control (PCC) Remote Control Unit (RCU), connects to Remote port, LabView and Matlab drivers available		
Video Out	Analog video (NTSC or PAL) available on Capture Cable Component viewfinder port Versatile Dual HD-SDI can provide 4:4:4 video (except at 60 fps), or can be two single 4:2:2 HD-SDI ports, one for playback and one always live		
Lensing	Nikon F-mount standard, Canon EOS mount optional, PL-mount optional, C-mount optional, (lens not included)		



Phantom v711

ISO SAT			
Mono		Color	
ISO SAT T	ISO SAT D	ISO SAT T	ISO SAT D
20,000	6400	2500	2000



when it's too fast to see, and too important not to.™

Move the CineMag to a CineStation connected to a PC and **view, edit, and save your recordings using the Phantom Camera Control software** included with the camera. Keep the recordings in their original raw cine format, or convert them to TIFF, QuickTime, AVI, or other popular formats. Move files from the CineStation to a disk or video recorder via 10Gb Ethernet; 4:4:4 HD-SDI, or Component Video outputs.

When using the camera on a tracking mount, **elevation and azimuth data can be transferred to the camera** and associated with image frames through our unique Range Data interface.

View your recordings immediately in a variety of formats either through the HD-SDI ports on the camera, or through the component video port. There are two HD-SDI ports on the camera which can be configured in a variety of ways including 4:4:4 dual-link and simultaneous play/record (on some models).

The cameras can be controlled with the feature-rich PCC software, the Phantom RCU, or the new (optional) on-camera controls.

Vision Research Global Support - for wherever you are

Our ultrahigh-speed camera line is supported by Vision Research's Global Service and Support network offering AMECare Performance Services from multiple sites around the globe. Maximize the value of your Phantom camera by learning more about our service and support options at www.phantomhighspeed.com/PhantomZone

AMETEK Vision Research's digital high-speed cameras are subject to the export licensing jurisdiction of the Export Administration Regulations. As a result, the export, transfer, or re-export of these cameras to a country embargoed by the United States is strictly prohibited. Likewise, it is prohibited under the Export Administration Regulations to export, transfer, or re-export AMETEK Vision Research's digital high-speed cameras to certain buyers and/or end users.

Customers are also advised that some models of AMETEK Vision Research's digital high-speed cameras may require a license from the U.S. Department of Commerce to be: (1) exported from the United States; (2) transferred to a foreign person in the United States; or (3) re-exported to a third country. Interested parties should contact the U.S. Department of Commerce to determine if an export or a re-export license is required for their specific transaction.

DATA SHEET

Phantom®

1 Megapixel

v-Series Cameras

Additional Features:

Size (without lens, CineMag or handle):

11.5 x 5.5 x 5.0 inches (L x W x H);

29.2 x 14 x 12.7 cm

Weight (without lens or CineMag): 11.75 lb; 5.33 kg

Temperature and Humidity: 0°C - 40°C @ 8% to 80% RH

Shock: 30g, half sine wave, 11 ms, 10 times all axes (without CineMag or lens)

Vibration: 25g, 5-500 Hz, all axes without CineMag

Focused

Since 1950, Vision Research has been designing, and manufacturing high-speed cameras. Our single focus is to invent, build, and support the most advanced cameras possible.

VISION
RESEARCH

AMETEK®
MATERIALS ANALYSIS DIVISION

100 Dey Road
Wayne, NJ 07470 USA
+1.973.696.4500

www.phantomhighspeed.com