

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUÍS GUSTAVO MAÇAN

**ESTUDO ANALÍTICO DE DADOS DE PRESSÃO DE COMBUSTÃO
EM SISTEMA DE IGNIÇÃO POR JATO TURBULENTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2016

LUÍS GUSTAVO MAÇAN

**ESTUDO ANALÍTICO DE DADOS DE PRESSÃO DE COMBUSTÃO
EM SISTEMA DE IGNIÇÃO POR JATO TURBULENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Cornélio Procópio, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Lourenço.

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, responsáveis por todo o apoio e suporte recebido antes e durante todo período de graduação. Este trabalho é também dedicado à todas as pessoas as quais, direta ou indiretamente, tornaram este momento possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço meus pais, Ronaldo Cesar Maçan e Lilian Deyse Helbel, pelo amor incondicional, pelo incentivo e apoio antes e durante o período de graduação no curso de Engenharia Mecânica e por nunca medirem esforços durante todas as etapas de minha vida.

Agradeço aos meus familiares, pelo suporte, preocupação e palavras de apoio.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas pelo companheirismo, tanto as amizades firmadas durante a infância, quanto amizades as quais começaram juntamente a este período de graduação, todas foram e são muito importantes para todos os momentos de minha vida.

Agradeço aos meus professores os quais contribuíram e contribuem por cada etapa de ensino nesta jornada, em especial aos professores doutores, Marcos Lourenço e Rubens Gallo pela orientação concedida.

Agradeço também ao meu orientador de pesquisa de verão, prof. Dr. Indrek Wichman por ter me concedido a oportunidade e confiança de me integrar ao seu time de pesquisa no laboratório Energy and Automotive Research Laboratory – (EARL). Agradecimento à minha mentora de pesquisa, Masumeh Gholamisheeri por todos os ensinamentos e paciência.

Agradeço também à Universidade Estadual do Michigan – Michigan State University pelo apoio durante todo o meu período de trabalho.

Agradeço a CAPES pela oportunidade única de participação do programa de mobilidade científica Ciência Sem Fronteiras, através do edital 180/2015.

Agradeço aos professores da banca examinadora pela atenção e contribuição dedicadas a este estudo.

RESUMO

MAÇAN, Luís Gustavo. Estudo analítico de dados de pressão de combustão em sistema de ignição por jato turbulento. 44 Folhas. TCC (Curso de Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

No presente estudo, dados de pressão provenientes do sistema de Ignição por Jato Turbulento - *Turbulent Jet Ignition (TJI)* - foram analisados com o auxílio da ferramenta numérica MatLab. O sistema TJI tem como característica, permitir combustão de baixa temperatura produzida por mistura de ar/combustível diluída ou pobre. A combustão no sistema TJI é iniciada em uma pequena câmara de combustão denominada pré-câmara, a qual é conectada à câmara principal por um ou múltiplos orifícios. O interesse deste trabalho se dá na análise dos traços de pressão de modo a determinar os pontos críticos de inflexão, como o ponto de Início da Combustão ou aquele relativo ao Início da Liberação de Calor da Combustão, visando obtenção de tempo médio de queima da mistura. Vários experimentos foram realizados em uma Máquina de Compressão Rápida – *Rapid Compression Machine (RCM)* – com diferentes condições de teste, como diferentes misturas da quantidade de ar/combustível sendo Metano (CH_4) e ar atmosférico ($P_{\text{ar}} = 1 \text{ atm}$) em condições estequiométricas ($\phi = 1$) e pobres ($\phi = 0.8$ e 0.67). O tamanho do bocal entre câmaras também foi variado. Três bocais de um orifício foram testados, com diâmetros respectivos, de 2,0, 2,5 e 3,0 mm. Utilizando diferenciação numérica implementada no software MatLab, foi possível a determinação dos ponto de pressão e dos tempo nos quais cada evento importante da combustão, como Ponto Morto Superior – *Top Dead Center (TDC)*, Começo da Combustão – *Start of Combustion (SOC)*, Começo da Liberação do Calor da Combustão – *Start of Heat Release (SOHR)* e tempo de duração da queima de 0-a-10% e 10-a-90% da fração mássica da mistura de ar/combustível. O tempo de queima de diferentes condições de mistura e de diâmetros de bocais foram então, comparados para determinação da melhor configuração experimental.

Palavras-chave: Combustão. Ignição por Jato Turbulento. Máquina de Compressão Rápida. Análise analítica.

ABSTRACT

MAÇAN, Luís Gustavo. Analytical Study of the Pressure Data of Turbulent Jet Ignition System. 44 Folhas. TCC (Course of Mechanical Engineering) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

In the present study, pressure data obtained from the Turbulent Jet Ignition (TJI) system was analyzed using MatLab. TJI is characterized by enabling low temperature combustion produced by either lean or dilute air/fuel mixture. The combustion in TJI system is initiated at a small volume chamber denominated prechamber, which is linked to the main combustion chamber via one or multiple small orifices. The novelty of this work is at the investigation of pressure traces in terms of finding critical inflection points such as the Start of Combustion or Start of Heat Release. Several experiments were performed on a Rapid Compression Machine (RCM) with different conditions such as fuel mixture of Methane (CH_4) and atmospheric air ($P_{\text{ar}} 1 \text{ atm}$) at stoichiometric ($\phi = 1$) and lean conditions ($\phi = 0.8$ and 0.67). Nozzle diameter was also changed. Three single orifice nozzles were tested with diameters of 2.0, 2.5 and 3.0 mm. Using numerical differentiation implemented in MatLab it was possible to determine the pressure and time of each important combustion event such as Top Dead Center (TDC), Start of Combustion (SOC), Start of Heat Release (SOHR), 0-to-10% and 10-to-90% mass fraction burn duration. Burning time of different air/fuel mixture conditions and nozzle sizes were compared afterward seeking for determining the best experimental set-up.

Keywords: Combustion. Turbulent Jet Ignition. Rapid Compression Machine. Analytical Study.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Vista de secção de um Ignitor por Jato Turbulento centralmente instalado.....	13
Figura 2 – Complexo de pesquisas automotivas – EARL/Michigan State University	14
Figura 3 – Derivada de $f(x)$ em a.	18
Figura 4 – Definição de ponto extremo.	19
Figura 5 – RCM, destacando cilindro de combustão e sistema de Ignição por Jato Turbulento.	21
Figura 6 – $P \times t$ - câmara principal de combustão para $\lambda = 1.25$ e $d = 2.5$ mm.....	23
Figura 7 – Primeira derivada de pressão na câmara principal para $\lambda = 1.25$ e $d = 2.5$ mm.	23
Figura 8 – Segunda derivada de pressão na câmara principal para $\lambda = 1.25$ e $d = 2.5$ mm.	24
Figura 9 – Projeção dos parâmetros de combustão para $\lambda = 1.25$ e $d = 2.5$ mm.....	26
Figura 10 – Comparação de resultados para 0-10% $x_b - \lambda$	27
Figura 11 – Comparação de resultados para 10-90% $x_b - \lambda$	27
Figura 12 – Comparação de resultados para 0-10% $x_b - d$	28
Figura 13 – Comparação de resultados para 10-90% $x_b - d$	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configuração experimental na RCM.....	22
Tabela 2 – Localização dos parâmetros de combustão.	24
Tabela 3 – Resultados numéricos de parâmetros de combustão para $\lambda = 1.25$ e $d = 2.5$ mm.....	26
Tabela 4 – Comparativo - tempo entre fagulha e Início da Combustão (SOC).....	28

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

CO	Monóxido de Carbono
LTC	Low Temperature Combustion
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
SOC	Start of Combustion
SOHR	Start of Heat Release
EARL	Energy and Automotive Research Laboratory
MSU	Michigan State University
CO ₂	Dióxido de Carbono
H ₂ O	Água
N ₂	Nitrogênio
O ₂	Oxigênio
Sgolay	Savitzky-Golay
Lowess	Locally Weighted Scatterplot Smoothing
CH ₄	Metano
TDF	Tempo de Desenvolvimento de Flama
TQR	Tempo de Queima Rápida
Tspark	Time of Spark Release
TJI	Turbulent Jet Ignition
RCM	Rapid Compression Machine
TDC	Top Dead Center

LISTA DE SÍMBOLOS

Φ	Índice de estequiometridade
x_b	fração mássica de queima
$v(x)$	velocidade com distância axial
$v(x,r)$	velocidade com distâncias axiais e radiais
r	raio
J_e	momento de saída do jato
ξ	número adimensional
ρ_e	densidade do jato de saída
v_e	velocidade do jato de saída
r_e	raio do jato de saída
x	distância x
μ	mu
π	pi
a	a
b	b
d	c
λ	lambda
$(f/a)_{\text{real}}$	relação ar/combustível real
$(f/a)_{\text{esteq}}$	relação ar/combustível estequiométrica
$f(x)$	função em x
$f(a)$	função em a
$f(x_k)$	função em x_k
$y_s(i)$	valor suavizado para o valor do i-ésimo ponto
N	número de pontos de dados da vizinhança
i	índice
x_i	x-índice
w_i	valor ponderado

$d(x)$	diferencial da função x
cm^3	centímetros cúbicos
mm	milímetros
atm	atmosfera
$^{\circ}\text{C}$	grau Celsius
Bar	Bar
ms	milissegundo
d	diâmetro
y	y
y_0	y inicial
y_1	y_1
x_0	x_0
x_1	x_1

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 DINÂMICA DOS FLUIDOS	16
3.2 REAÇÃO GLOBAL DE COMBUSTÃO DE COMBUSTÍVEL E AR ATMOSFÉRICO	17
3.3 DIFERENCIAÇÃO NUMÉRICA E SUAVIZAÇÃO DE DADOS DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO	18
4 MATERIAIS E MÉTODOS	21
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
5 CONCLUSÃO	29
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
REFERÊNCIAS	31
APÊNDICES	33
APÊNDICE A – CÓDIGO IMPLEMENTADO EM SOFTWARE MATLAB PARA ANÁLISE NUMÉRICA	34
APÊNDICE B – DADOS PROCESSADOS PARA ANÁLISE NUMÉRICA	40
ANEXOS	43
ANEXO A – CÓDIGO PARA CARREGAMENTO DE MATRIZ DE DADOS DE PRESSÃO	44

1 INTRODUÇÃO

Motores à Combustão Interna têm sido extensivamente estudados devido às suas grandes variedades de aplicações e projetos. Dois tópicos principais levam as companhias automotivas a investirem grandes quantidades de tempo e recursos em busca de melhorias para este componente em específico. O primeiro é a necessidade de corresponder às rigorosas restrições de emissões de, por exemplo, hidrocarbonetos não queimados (queima incompleta de reagentes), monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NOx). A segunda principal razão é relacionada à economia de combustível e redução de custos associados a esta. Ambas as razões, entretanto, convergem para uma solução possível, denominada Estratégia de Combustão à Baixas Temperaturas – *Low Temperature Combustion (LTC) strategies*. A LTC ocorre quando uma carga de mistura de ar/combustível pobre ($\phi < 1$) está inserida na câmara de combustão. Em processos de queimas pobres, o combustível é queimado com ar em excesso, processo no qual possui muitas vantagens sobre a combustão estequiométrica convencional como mencionado por E. Toulson, H. J. Schock, and W. P. Attard. (2010, p.14). Sistemas de queima empobrecida têm sido pesquisados por vários anos.

Dentre todos os sistemas, aqueles de ignição em pré-câmaras são de grande interesse, pelo fato permitirem combustão com baixa temperatura, através de misturas pobres e/ou diluídas. O sistema TJI, demonstrado na Figura 1 (W. P. Attard and P. Parsons, 2010, p.32) é um sistema de melhoramento da queima, iniciada em uma pré-câmara de combustão. A combustão é iniciada em uma pressão de mistura aumentada dentro da pré-câmara proporcionando, assim, a força motriz necessária para o escoamento dos gases provenientes da pré-câmara para o compartimento de combustão principal do motor.

“Os jatos turbulentos penetrantes aumentam a turbulência e, conseqüentemente, a taxa de mistura de ar/combustível na câmara principal e como resultando, a mistura ar/combustível tem uma maior chance de ignição total através da ação de micro ignições em regiões espacialmente distribuídas.” (GHOLAMISHEERI 2016, p. 8)

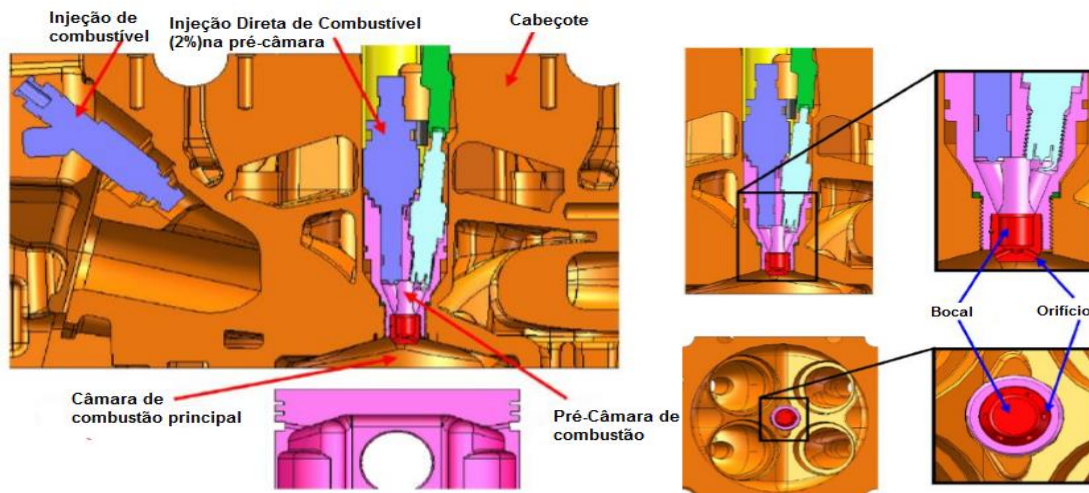


Figura 1 – Vista de seção de um Ignitor por Jato Turbulento centralmente instalado.

O propósito deste trabalho é o estudo do tempo de queima da mistura de ar/combustível em diferentes configurações de mistura (diferentes valores de λ) assim como para diferentes diâmetros do bocal entre câmaras (pré-câmara e câmara principal). Para tanto, dados de pressão (Bar) em função do tempo (ms) adquiridos em experimentos utilizando um aparato denominado Máquina de Compressão Rápida – *Rapid Compression Machine* (RCM) – são diferenciados através de métodos de diferenciações numéricas, suavizados, e então correlacionados aos dados originais, para determinação precisa do ponto de pressão e tempo de acontecimentos dos eventos importantes da combustão, como: Ponto Morto Superior – *Top Dead Center* (TDC), *Início da Combustão* – *Start of Combustion* (SOC), *Início da Liberação do Calor de Combustão* – *Start of Heat Release* (SOHR) e tempo de duração da queima de 0-a-10% e 10-a-90% da fração mássica (X_b) da mistura de ar/combustível.

A captação dos dados neste trabalho deu-se no *Energy and Automotive Research Laboratory* (EARL), localizado na Universidade Estadual do Michigan – *Michigan State University* (MSU), na cidade de East Lansing, no estado do Michigan.

“A universidade tem investido em uma comunidade acadêmica interdisciplinar que é focada em pesquisas da área automotiva e da área de combustíveis em parceria com o governo e indústria. Além disso, a MSU tem desenvolvido uma

infraestrutura a qual suporta o estudo de eficiência energética veicular, energias alternativas e redução de emissões, tendo várias de suas pesquisas baseadas no laboratório EARL. ” (SCHOCK, 2015. p.1)



Figura 2 – Complexo de pesquisas automotivas – EARL/Michigan State University

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O engenheiro moderno, independentemente de sua área de atuação e especialização, é responsável não apenas pelo desenvolvimento de novas tecnologias visando o aprimoramento da vivência do ser humano e/ou redução de custos de produção, como também buscar tais benefícios de uma maneira alinhada ao desenvolvimento sustentável. O sistema de Ignição por Jato Turbulento (TJI) se configura como uma tecnologia promissora por abranger todos os itens beneficiários mencionados. Tal temática se faz presente neste trabalho de conclusão de curso objetivando a simulação de um ambiente de pesquisa e desenvolvimento industrial, que abrange experimentação, manipulação analítica de dados e análise de resultados.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho, são:

- O estudo do sistema de Ignição por Jato Turbulento;
- Implementação de código computacional para diferenciação e suavização de dados de pressão na câmara de combustão principal visando determinação do tempo de acontecimentos de eventos importantes referentes à combustão;
- Determinação da configuração experimental - lambda e diâmetro do bocal - a qual otimiza o processo de queima, tornando-o mais rápido e estável.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Três pontos principais fazem-se necessários para breve revisão bibliográfica neste trabalho:

- O primeiro pode ser considerado como sendo um objetivo específico para o conhecimento e entendimento básico do processo de combustão em questão: Ignição por Jato Turbulento, faz-se necessário o levantamento de alguns pontos referentes à dinâmica dos fluidos governantes neste sistema, discutidos na Seção 3.1 deste trabalho;
- O levantamento da reação química pertinente ao experimento em questão – Seção 3.2;
- Formulação matemática dos algoritmos de diferenciação numérica e suavização implementados em software MatLab (MATLAB, 2016) – Seção 3.3.

3.1 DINÂMICA DOS FLUIDOS

Visando o entendimento do sistema de combustão em questão, é importante a análise dos gases aquecidos provenientes da combustão em pré-câmara, os quais são direcionados para a câmara principal de combustão, causando alterações estruturais no fluido de mistura ar/combustível nela contida.

“A forma em que os gases aquecidos penetram na câmara principal influencia o tempo de queima e a propagação da flama. A velocidade do jato aquecido na saída do bocal é estimada através da velocidade de penetração como função da profundidade de penetração do jato e pelo uso de correlações matemáticas disponíveis.” (GHOLAMISHEERI et al., 2016, p. 4)

3.1.1 CORRELAÇÃO I: ANÁLISE DO JATO LAMINAR

Uma análise do jato laminar fornece uma distribuição de velocidade axial não-dimensional como função do número de Reynolds na saída do bocal. O resultado, é demonstrado pela equação 1, sendo $v(x)$ a velocidade de uma partícula localizada na câmara principal com distâncias radiais e axiais (x,r) . ρ_e , v_e e r_e , representam, respectivamente, densidade, velocidade e raio do jato localizado na saída do bocal, como demonstrado por Turns (2000, p.124). v_e é estimada da velocidade de penetração como uma função do comprimento de penetração e pelo uso de correlações matemáticas (ABANI; REITZ. 2007, p.12) O número adimensional ξ e o momento (Je) de saída do bocal, do jato, são definidos nas equações (2) e (3), respectivamente.

$$\frac{V(x,r)}{v_e} = 0.375 \left(\frac{\rho_e v_e r_e}{\mu} \right) \left(\frac{x}{r_e} \right)^{-1} \left[1 + \frac{\xi^2}{4} \right]^{-2} \quad (1)$$

$$\xi = \left(\frac{\rho_e J_e}{16\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\mu} \frac{r}{x} \quad (2)$$

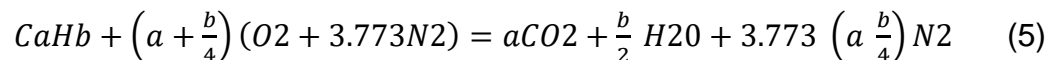
$$J_e = \rho_e v_e^2 \pi r_e^2 \quad (3)$$

Realizando-se as devidas simplificações entre as equações, tem-se a equação 4, onde V_{x0} representa a velocidade na linha central do jato em cada posição no eixo X.

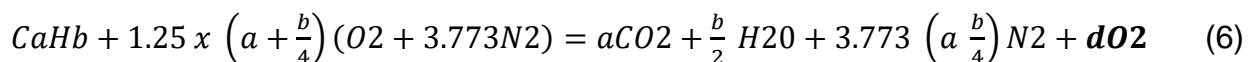
$$\frac{V_{x0}}{V_e} = 0.375 \left(\frac{(\rho_e \cdot v_e \cdot r_e)}{\mu} \right) \left(\frac{x}{r_e} \right)^{-1} \quad (4)$$

3.2 REAÇÃO GLOBAL DE COMBUSTÃO DE COMBUSTÍVEL E AR ATMOSFÉRICO

Se oxigênio em quantidade suficiente estiver disponível para combustão, um hidrocarboneto poderá ser completamente oxidado. O carbono, no combustível, é então convertido para dióxido de carbono (CO_2) e o hidrogênio, convertido em água (H_2O). Como disposto na equação (5) global de combustão. O ar contém nitrogênio (N_2), porém quando os produtos se encontram em baixa temperatura, o nitrogênio não é significativamente afetado pela reação. (HEYWOOD, 1988, p. 68)



Misturas ar/combustível com mais ou menos que a quantidade de ar estequiométrico pode ser queimadas. Com ar em excesso ou misturas empobrecidas, o ar extra aparece nos produtos de forma inalterada (HEYWOOD, 1988, p. 69). A combustão contendo 25% de ar em excesso, ou 1.25 vezes o ar requerido para combustão estequiométrica é demonstrado na equação 6.



Pelo fato da taxa de ar/combustível depender da composição do combustível, a razão entre a taxa real de ar/combustível para a taxa de ar/combustível estequiométrica se torna um parâmetro informativo para a definição da composição da mistura, ou seja, a razão de equivalência de ar/combustível, expressada pela equação 7.

$$\lambda = \varphi^{-1} = \frac{\left(\frac{F}{A}\right)_{real}}{\left(\frac{F}{A}\right)_{esteq}} \quad (7)$$

3.3 DIFERENCIAÇÃO NUMÉRICA E SUAVIZAÇÃO DE DADOS DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO

Os dados de pressão em função do tempo são diferenciados utilizando o método de diferenciação numérica. A derivada de uma função $f(x)$ é definida como (UCCS,2008):

$$f'(x) = \frac{df(x)}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{(x+\Delta) - x} \quad (8)$$

A derivada de $f(x)$ em a é a inclinação da linha tangente a $f(x)$ em a como demonstrado na figura 3:

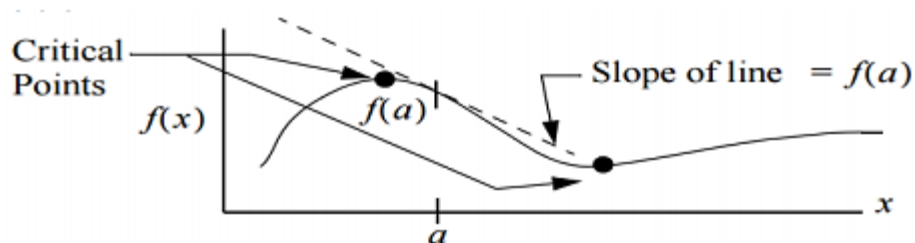


Figura 3 – Derivada de $f(x)$ em a .

O ponto extremo é onde $f(x)$ está em um local de máximo ou mínimo (máximo ou mínimo global, ou local), demonstrado na figura 4. A segunda derivada da função pode ser usada para determinar se o ponto designado é um máximo ou mínimo.

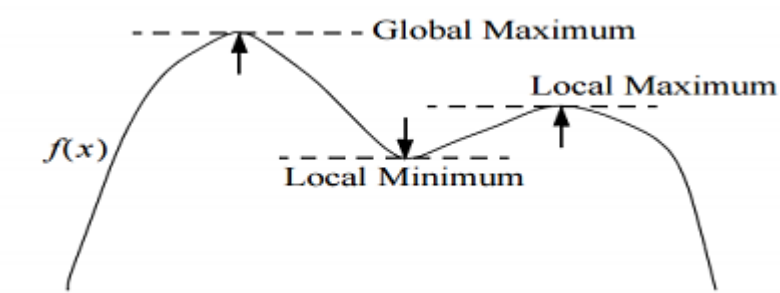


Figura 4 – Definição de ponto extremo.

Métodos numéricos para computação da derivada de uma função requerem a estimativa da inclinação da função em um intervalo particular de valores do eixo x . Neste estudo, as seguintes aproximações de diferenciação são utilizadas (UCCS, 2008). Diferença retrógrada – equação 9, diferenças centrais – equação 10 e diferenças dianteiras – equação 11.

$$f'(x_i) \approx \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - (x_{i-1})} \quad (9)$$

$$f'(x_i) \approx \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1})}{x_{i+1} - (x_{i-1})} \quad (10)$$

$$f'(x_i) \approx \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - (x_i)} \quad (11)$$

Devido à pequenas oscilações nos dados de pressão, os resultados das primeiras e segundas derivadas são ruidosos. Por este motivo, os dados de pressão precisam ser filtrados visando suavização de oscilações ponto-a-ponto. Dois tipos de filtros – Sgolay e Lowess – são aplicados aos dados de pressão.

“Filtros Savitzky-Golay podem definidos como um filtro de médias movediças que tem como resultado a suavização das diferenças entre pontos pela substituição cada ponto de dados pela média de sua vizinhança de pontos definidos pelo tamanho do intervalo. Este processo é equivalente à filtragem Lowess com a resposta de suavização dada pela equação diferencial correspondente. ” (MATHWORKS, 2016).

A equação 12 demonstra equação diferencial para filtragem Lowess, onde $y_s(i)$ é o valor suavizado para o valor do i -ésimo ponto de dado. N é o número de pontos de dados da vizinhança para ambos os lados de $y_s(i)$.

$$y_s(i) = \frac{1}{2N} + 1(y(i + N) + y(i + N - 1) + \dots + y(i - N)) \quad (12)$$

O método de Pontos de Dispersão Localmente Ponderados (Lowess) é considerado local porque cada valor suavizado é determinado pelos pontos vizinhos contidos no tamanho intervalo (MATHWORKS, 2016), como descrito pela equação 13, onde W_i é o valor ponderado, e, x e x_i são os valores respectivos de pressão, neste caso.

$$w_i = \left(1 - \left|\frac{x-x_i}{d(x)}\right|^3\right)^3 \quad (13)$$

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados de pressão foram medidos nos testes realizados em uma Máquina de Compressão Rápida (RCM), projetada, construída e instalada (ALLEN, 2012) no *Energy and Automotive Research Laboratory* (EARL), localizada na Universidade Estadual do Michigan (*Michigan State University*). Seu esquema é exemplificado na Figura 5. A RCM tem como objetivo simular um ambiente de combustão real como demonstrado por Grogan, Goldsborough e Ihme (2015, p. 162) sendo esta composta de 3 pistões de atuação (pistão hidráulico, pneumático e de combustão) localizados em um mesmo eixo. O cilindro de combustão comprime a mistura homogênea de ar/combustível e para no Ponto Morto Superior (TDC) causando que a combustão ocorra em uma condição de volume constante. O software LabView é usado para o monitoramento e controle da temperatura da parede do cilindro, armazenamento de dados de pressão em função do tempo e também para o gerenciamento do sinal de controle referentes ao tempo de injeção e de liberação de fagulha. As especificações e dados de operação - detalhados por Gentz et al (2015, p.2) - da RCM estão dispostas na Tabela 1. O combustível utilizado para estudo é Metano (CH_4).

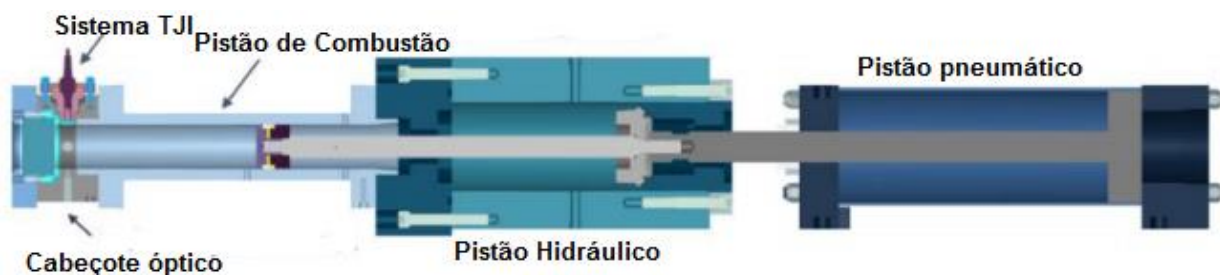


Figura 5 – RCM, destacando cilindro de combustão e sistema de Ignição por Jato Turbulento.

Tabela 1 – Configuração experimental na RCM

Temperatura da Parede do Cilindro	80°C
Taxa de Compressão	8.5
Capacidade Volumétrica do Cilindro	460 cm ³
Volume de Folga (Clearance)	54 cm ³
Curso do Pistão	203.2 mm
Diâmetro do Pistão	50.5 mm
Combustível	Metano
Pressão do Ar	1 atm
Volume de Pré-Câmara de Combustão	4.75 cm ³
Injetor de Combustível Auxiliar	Bosch Direct Injector

Os dados foram adquiridos em lotes de 10 amostras por cada condição experimental. Os testes diferem entre si pela taxa de quantidade de ar/combustível (λ) e tamanhos de bocal entre as câmaras de combustão. Para cada um dos diferentes valores de λ , sendo estes 1.0, 1.25 e 1.5, três valores de bocais diferentes, 2.0, 2.5 e 3 mm foram testados, respectivamente. No total, noventa testes foram realizados para este estudo. O software LabView produziu um arquivo de texto como resultado de pressão no pistão em função do tempo para cada rodada experimental, contendo resolução de cem mil amostras de pressão por segundo. Os dados foram processados utilizando o software MatLab. Um algoritmo foi criado e implementado (Apêndice A) para diversas análises. Funções como: carregamento da matriz de dados (Anexo A), suavização dos contornos de pressão, diferenciação numérica para obtenção da primeira e segunda derivadas dos dados de pressão, avaliação e determinação dos valores de pressão e tempo de cada evento importante da combustão resultando em uma tabela de resultados (Apêndice B).

Um caso-exemplo de combustão configurado a $\lambda = 1.25$ e diâmetro de bocal de 2.5 mm é revisado nesta sessão de metodologia para fins de demonstração. A Figura 3 demonstra a plotagem dos dados de pressão (Bar) em função do tempo (ms) a qual

atinge seu máximo no valor de 46.83 Bar. O disparo do gatilho de fagulha é também demonstrado na figura 6.

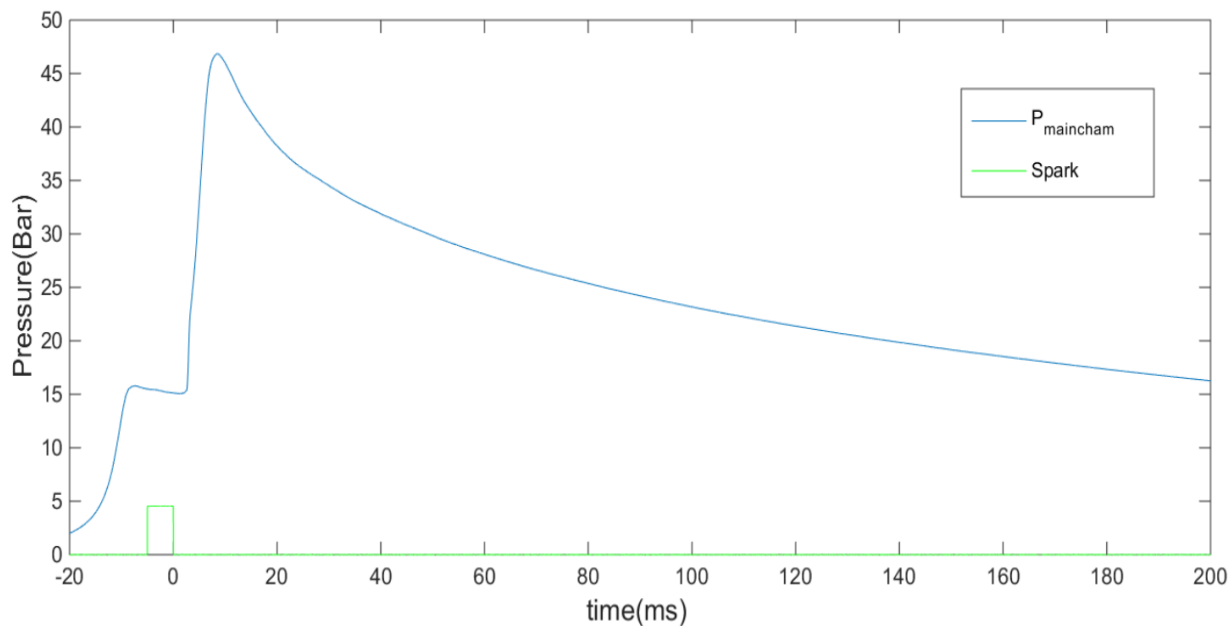


Figura 6 – $P \times t$ - câmara principal de combustão para $\lambda = 1.25$ e $d = 2.5$ mm.

Uma vez que os dados são suavizados, as derivadas primeiras e segundas

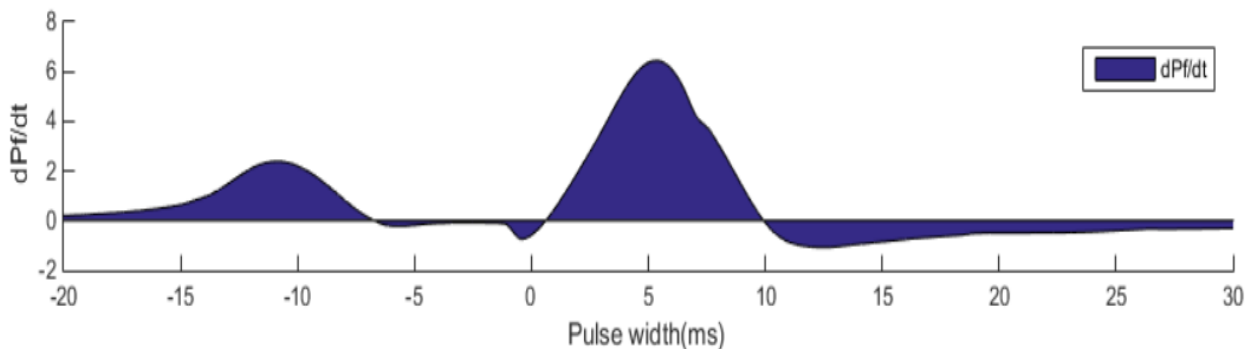


Figura 5– Primeira derivada de pressão na câmara principal para $\lambda = 1.25$ e $d = 2.5$ mm.

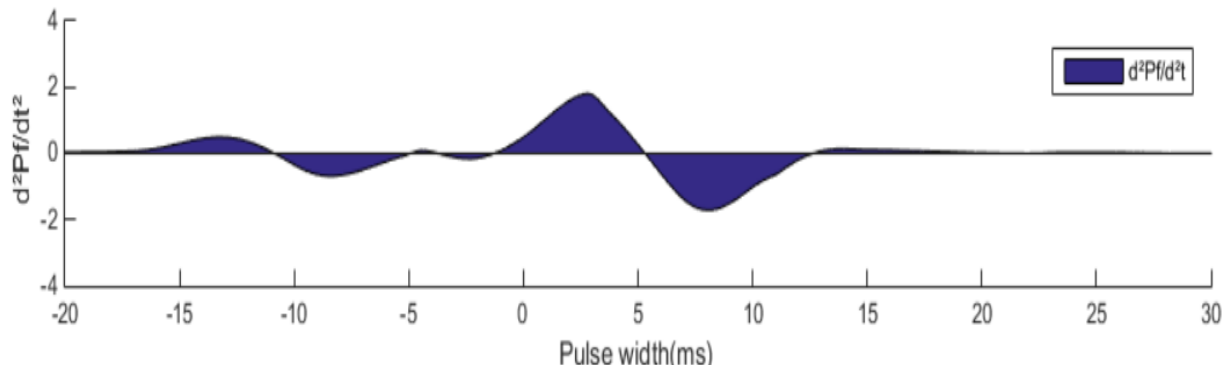


Figura 6 – Segunda derivada de pressão na câmara principal para $\lambda = 1.25$ e $d = 2.5$ mm.

A Tabela 2 correlaciona importantes eventos de combustão com suas respectivas localizações nas curvas de primeira e segunda derivadas.

Tabela 2 – Localização dos parâmetros de combustão.

Data Analysis		
Event	First Derivative	Second Derivative
Top Dead Center (TDC)	$\frac{dP}{dt} = 0$	-
Start of Combustion (SOC)	-	$\frac{d^2P}{dt^2} = \max$
Start of Heat Release (SOHR)	$\frac{dP}{dt} = 0$	-

Tendo como principal ponto de interesse neste estudo, o tempo de combustão de fração mássica queimada (x_b) é determinada. O Tempo de Desenvolvimento da Flama (TDF - 0 – 10% de x_b) é definido por Heywood (1988, p. 389) como sendo o intervalo entra a descarga da fagulha e o tempo em que uma pequena, porém significativa fração da massa no cilindro tenha sido queimada, ou, energia química do combustível tenha sido liberada e é obtida pelo cálculo de um décimo do tempo entre o Início da Combustão (SOC) e Início da Liberação de Calor (SOHR). Para o cálculo do ponto de pressão

associado ao valor de tempo obtido, interpolação linear, demonstrada para pela equação 14, é utilizada entre os pontos de tempo para definição, onde X representa os valores de tempo, e Y, os valores de pressão.

$$y = y_0 + \frac{(y_1 - y_0)(x - x_0)}{x_1 - x_0} \quad (14)$$

O Tempo de Queima Rápida (TQR 10% - 90% de X_b) é definida por Heywood (1988, p. 389) como sendo o intervalo requerido para a queima do conteúdo da carga de ar/combustível e é iniciada ao final do período de TDF. O valor é obtido pela diferença de tempo dentre o Início da Liberação de Calor (SOHR) e o Tempo de Desenvolvimento de Flama (em 10% x_b). A figura 9 demonstra os pontos de interesse do estudo localizados através da derivada primeira e segunda dos dados de pressão projetados no gráfico de pressão em função do tempo originais, baseados no experimento configurado para $\lambda = 1.25$ e $d = 2.5$ mm. Os números 1, 2 e 3 representam, respectivamente, Ponto Morto Superior (TDC), Início da Combustão (SOC) e Início da Liberação de Calor (SOHR). O ponto de número 4 representa 10% X_b , designando a separação entre áreas 2-4 e 4-3, Tempo de Desenvolvimento da Flama e Tempo de Queima Rápida, respectivamente. A tabela 3 mostra os resultados numéricos calculados por algoritmo implementado em software MatLab.

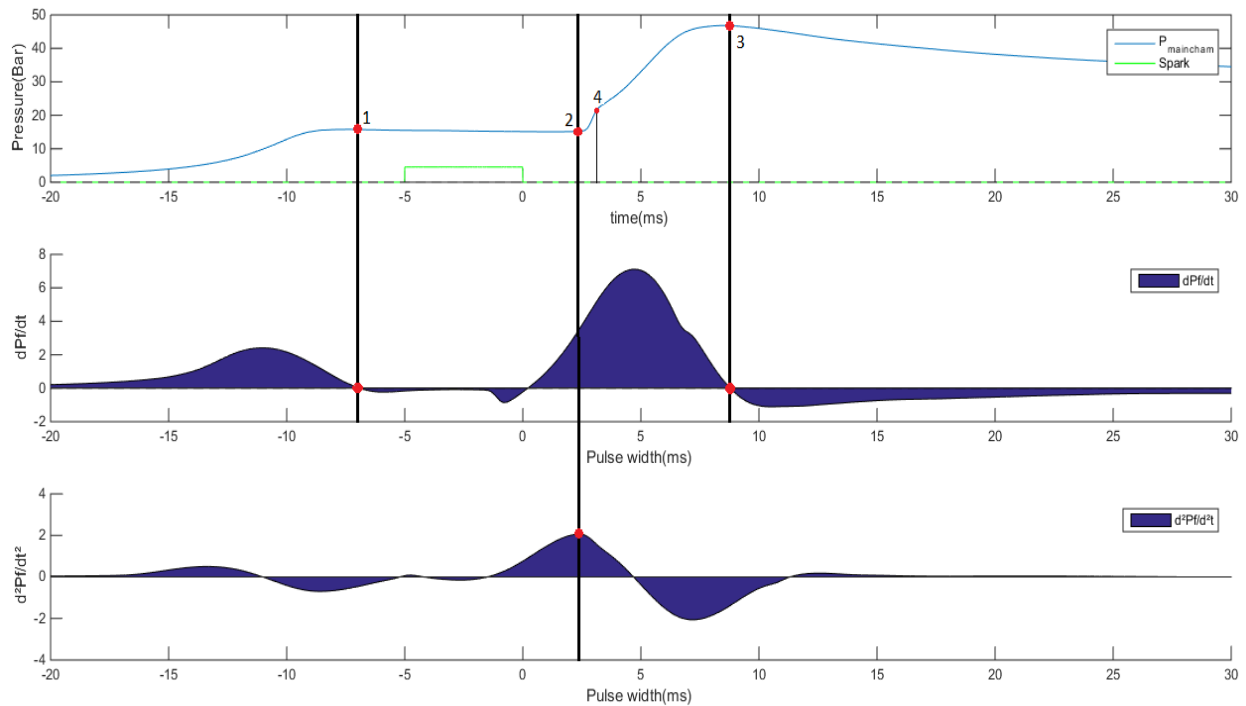


Figura 7 – Traços de pressão e projeção dos parâmetros de combustão para $\lambda = 1.25$ e $d = 2.5$ mm

Tabela 3 – Resultados numéricos de parâmetros de combustão para $\lambda = 1.25$ e $d = 2.5$ mm.

TURBULENT JET IGNITION - TJI DATA ANALYSIS										
Test ID	Nozzle diameter	Lambda	TDC		SOC		SOHR		Δt 0 - 10%	Δt 10 - 90%
-	L (mm)	-	P (Bar)	t (ms)	P (Bar)	t (ms)	P (Bar)	t (ms)	t (ms)	t (ms)
7.08.2015.05.txt	2.5	1.25	15.76	-6.90	15.28	2.38	46.84	8.53	0.53	6.15

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As durações do Tempo de Desenvolvimento de Flama (TDF) e Tempo de Queima Rápida (TQR), foram determinadas pela média simples aritmética entre os dez lotes de informações de cada uma das nove possibilidades de combinações totalizando noventa experimentos. A ascensão de pressão entre 0-10% X_b , pode ser utilizada para a determinação de quão rápida a chama é iniciada, enquanto a faixa de 10-90% X_b demonstra quão rápido o processo de combustão ocorre. Para a comparação dos

resultados entre as diferentes configurações, a compilação das informações processadas é disposta nas Figuras 10, 11 – agrupadas por valores iguais de λ – e Figuras, 12 e 13 agrupadas por valores de diâmetro do bocal d (mm). A Tabela contendo a comparação do Início da Combustão (SOC) entre todas condições de experimento é provida:

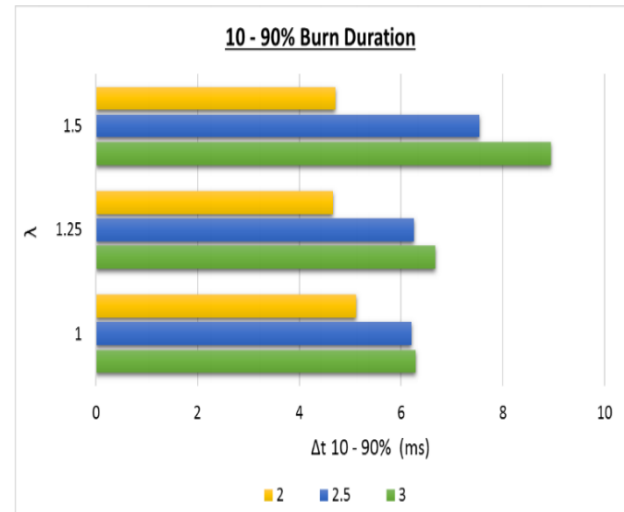
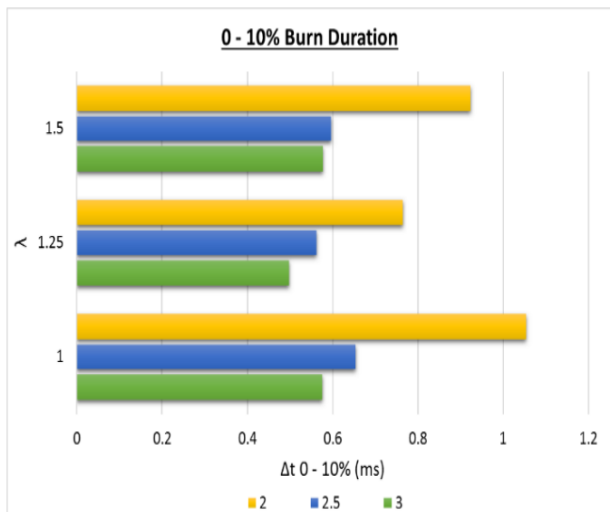


Figura 10 – Comparação de resultados para 0-10% $x_b - \lambda$ **Figura 11** – Comparação de resultados para 10-90% $x_b - \lambda$

A partir de uma análise das informações contidas na Figura 10, é possível a observação de um padrão de redução no Tempo de Desenvolvimento de Flama (TDF) conforme o aumento do diâmetro do bocal. Em contra-partida, pode-se possível notar que, embora existente para $\lambda = 1.25$, a redução no tempo de TDF não segue, aparentemente, um padrão de comportamento causado pelo aumento de ar em excesso, o que é de certa forma esperado, pois misturas menos concentradas em combustível tendem a possuir mais dificuldade na propagação da flama. A Figura 11 demonstra que, em geral, a rareficação de combustível em relação ao ar atmosférico causa um aumento na quantidade de tempo necessária para a queima de 10-90% x_b exceto para o caso onde o diâmetro do bocal é de 2 mm e $\lambda = 1.5$. Entretanto, existe uma notável diferença no Tempo de Queima Rápida (TQR), sendo este mais rápido conforme a diminuição do diâmetro do bocal.

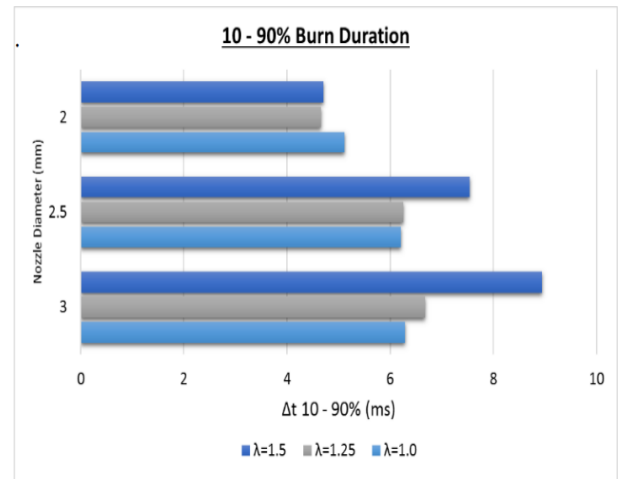
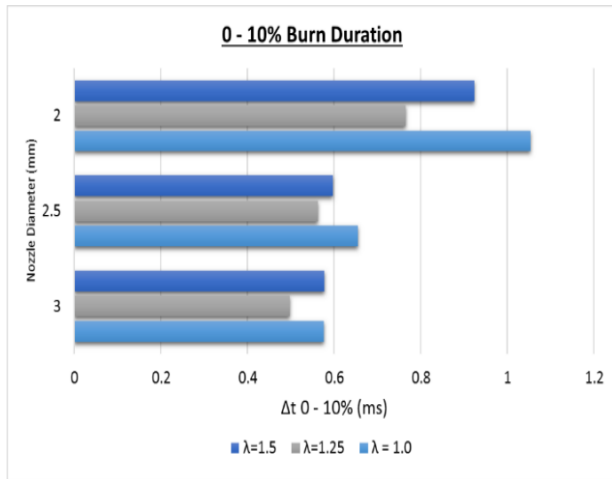


Figura 12 – Comparação de resultados para 0-10% x_b - d

Figura 13 – Comparação de resultados para 10-90% x_b - d

Com o agrupamento dos resultados por diâmetro do bocal, pode-se realizar uma observação referente ao comportamento do tempo da combustão da mesma forma em que quando agrupados pelo número de λ . Para o gráfico de 0-10% X_b (figura 12), nota-se novamente um menor tempo de TDF para todas os experimentos utilizando-se $\lambda = 1.25$, aliado a uma tendência de aumento no tempo de TDF com a diminuição do diâmetro do bocal. No gráfico da Figura 13, observa-se um comportamento no qual o aumento no valor de λ gera um maior tempo de TQR, enquanto a redução do diâmetro do bocal faz com que a mistura queime mais rápido.

Tabela 4 – Comparativo - tempo entre fagulha e Início da Combustão (SOC).

t (tspark - Start of Combustion [ms])			
Lambda	D = 3.0 [mm]	D = 2.5 [mm]	D = 2.0 [mm]
$\lambda = 1$	2.90	3.19	4.05
$\lambda = 1.25$	2.40	2.31	2.37
$\lambda = 1.5$	3.27	2.25	2.83

A Tabela 4 mostra o valor médio do período de Atraso de Ignição – *Ignition Delay* (ID) para cada condição de experimento realizada. O período de Atraso de Ignição é definido como o período entre o início da injeção de combustível na câmara de combustão e o Início da Combustão. Neste caso, verifica-se um melhor resultado para a faixa de diâmetro de bocal de 2.5 mm para misturas com ar em excesso.

5 CONCLUSÃO

A iniciação da combustão e o período de duração da queima da mistura de ar (atmosférico)/metano em uma pré-câmara no sistema TJI foram estudados através de dados de pressão obtidos em uma máquina RCM. Três diferentes diâmetros de bocais de conexão entre ambas as câmaras – pré-câmara e câmara principal – de 2, 2.5 e 3 mm foram testados sob diferentes valores de lambda (λ) sendo estes, $\lambda = 1$ para uma mistura estequiométrica, $\lambda = 1.25$ / $\lambda = 1.5$ para misturas empobrecidas. Os dados de pressão foram diferenciados uma e duas vezes para determinação da localização dos pontos de inflexão, os quais demonstram o período no tempo em que os eventos importantes da combustão aconteceram.

Os resultados demonstraram que cada alteração nas configurações experimentais, seja ela com relação ao número de λ e/ou no diâmetro no bocal, causa uma diferente leitura para os Tempos de Desenvolvimento de Flama (TDF) e Tempo de Queima Rápida (TQR). Os dados dos resultados condensados indicam uma predominância das máximas:

- O aumento do diâmetro do bocal causa um decréscimo no tempo de TDF;
- A redução do diâmetro do bocal causa um decréscimo no tempo de TQR;
- A alteração dos valores de λ não provocam uma variação brusca tanto no tempo de TDF quanto no tempo de TQR;
- Os dados de período de Atraso de Ignição demonstram que a melhor configuração (menor tempo de atraso) acontece no valor de $d = 2.5$ mm.

Deste modo, por inferência obtida pela análise analítica e gráfica conclui-se que a configuração mais adaptada ao objetivo de reduzir o tempo processo de queima (TDF+TQR) especificamente para a mistura de Metano (CH_4) + Ar Atmosférico (1 atm), dá-se no valor médio de TDF+TQR, o qual é menor, e portanto ótimo, em diâmetro do bocal = 2.5 mm e $\lambda = 1.25$, sendo que o valor λ permite ser razoavelmente variado sem que exista alteração brusca no tempo total do processo de queima.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema Turbulent Jet Ignition mostra-se uma excelente alternativa no aprimoramento de motores de combustão interna, reduzindo as emissões de gases de exaustão como Óxidos de Nitrogênio – NO e NO₂ (NO_x) (KNEER et al, 1994, p. 25) sendo estes um dos maiores causadores de fumaça fotoquímica e poluição do ozônio, participando da remoção da camada de ozônio na estratosfera (JOHNSTON, 1992). Tal redução em emissões é possível promovendo o uso de tecnologia de Combustão à Baixa temperatura (LTC), a qual utiliza a queima de ar em excesso ($\lambda > 1$). Os resultados obtidos nos experimentos utilizando Ignição por Jato Turbulento demonstram que este método de combustão permite efetivamente que misturas empobrecidas obtenham sua queima com período de tempo semelhante ou até mais rápida comparada às misturas estequiométricas ($\lambda = 1$). O presente trabalho, resultados e conclusões são considerados satisfatórios, visto que todos seus objetivos, tanto gerais quanto específicos foram realizados e concluídos com êxito.

REFERÊNCIAS

ABANI, Neerav .; REITZ, Rolf D. **Unsteady turbulent round jets and vortex motion**. University of Wisconsin-Madison. AIP Phys. Fluids 19 (12) (2007) 125102.

ALLEN, Casey. **Advanced rapid compression machine test methods and surrogate fuel modeling for bioderived jet and diesel fuel autoignition**. 2012. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Michigan State University, 2012. Disponível em: <https://etd.lib.msu.edu/.../Advanced_rapid_compress_machine_test_methods_and_surrogate_fuel_modeling_for_bio-derived_jet_and_diesel_fuel_autoignition.pdf> Acesso em 01/09/2016.

ATTARD, W. P; PARSONS P. **Flame kernel development for a spark initiated pre-chamber combustion system capable of high load, high efficiency and near zero NOx emissions**. SAE International. Jet. Engines, 3(2) (2010). 408-427.

COLLEGE OF ENGIENERING AND APPLIED SCIENCES at University of Colorado – Colorado Springs **Numerical Differentiation ECE 1010 – 2016**. Disponível em <http://www.eas.uccs.edu/~mwickert/ece1010/lecture_notes/1010n7b.PDF> Acesso em: 03/06/2016.

GENTZ, Gerald. et al. **Combustion Visualization, Performance, and CFD Modeling of a Pre-Chamber Turbulent Jet Ignition System in a Rapid Compression Machine**. SAE Int. J. Engines 8(2):538-546, 2015, doi:10.4271/2015-01-0779. 14 abr 2015.

GHOLAMISHEERI, Masumeh. **Experiments and Modeling of a Controlled Turbulent Jet Ignition System for Internal Combustion Engine**. 2016. 101 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Michigan State University.

GROGAN, Kevin.; Scott GOLDSBOROUGH.; IHME, Matthias. **Ignition regimes in rapid compression machines**. Combustion and Flame, 162(8) (2015). 3071-3080. 28 abr 2015. Disponível em: <http://web.stanford.edu/group/ihmegroup/cgi-bin/MatthiasIhme/wp-content/papercite-data/pdf/grogan_ihme_cf2015.pdf> Acesso em: 09/09/2016

HEYWOOD, John B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1988.

JOHNSTON, Harold S. **Atmospheric ozone**. Simpósio. Annual Review of Physical Chemistry, 43(1) (1992). 1-31

KNEER, R. et al. **Study of NO_x emission characteristics in pressurized staged combustor concepts**. Simpósio. (International) on Combustion, 25(1) (1994). 1043-1049

MATHWORKS. **Filtering and Smoothing Data - MATLAB & Simulink**: Mathworks.com 2016. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/help/curvefit/smoothing-data.html>> Acesso em: 02/07/2016.

MATHWORKS. **MatLab User Guide**: Primer Get Start. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/getstart.pdf> Acesso em: 28/05/2016.

SCHOCK, H.J. **Energy and Automotive Research Laboratory (EARL) report**: a distinctive, integrated approach that could drive the next automotive revolution. 2015. Disponível em: < http://www.egr.msu.edu/me/sites/default/files/content/EARL%20report-1_0.pdf> Acesso em: 29/06/2016.

TOULSON, E.; SCHOCK, H. J.; ATTARD, W. P. **A Review of Pre-chamber Initiated Jet Ignition Combustion Systems**, SAE International doi: 10.4271/2010-01 -2263. (2010)

URNS, Stephen R. **An introduction to combustion, concepts and applications**, McGraw Hill, 2000.

WICHMAN, Indrek et al. **Rapid compression machine study of a premixed, variable inlet density and flow rate, confined turbulent jet**. Combustion and Flame (2016), 169, 321-332. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.05.001.

APÊNDICES

APÊNCIE A – CÓDIGO IMPLEMENTADO EM SOFTWARE MATLAB PARA ANÁLISE NUMÉRICA.

```

%% TJI - TURBULENT JET IGNITION ----- DATA ANALYSIS

%PLEASE INSERT THE NUMBER OF TOTAL PRESSURE DATA SET IN YOUR FOLDER.
%PLEASE INSERT THE NUMBER OF 7.07.2015.txt DATA SET FILES.

%% DATA ACQUISITION

addpath('C:\Users\lgmacan\Desktop\TJI\FULL DATA');
loadcont = 1;
txtcount = 0;
dataload2 = 1;

prompt = 'What is the number of pressure files? ';
filenum2 = input (prompt);

prompt = 'What is the number of pressure files like 7.07.2015.txt? ';
filenum = input(prompt);

prompt = 'Do you want to plot the pressure traces? (Y/N) ';
resp = input (prompt, 's');

if resp == 'y'
    fprintf('Please type the pressure trace file number (A = x / B = y / C = z
/ 0 to skip) from 1 to %d\nA: ', filenum2);
    aaa = input('');
    prompt = 'B: ';
    bbb = input(prompt);
    prompt = 'C: ';
    ccc = input (prompt);
end

for dataload=1:filenum2
    if dataload < 10
        FileID= sprintf('7.07.2015.0%d.txt', dataload);
        data = importdata(FileID);

    end

    if dataload >= 10 && dataload <= filenum
        FileID= sprintf('7.07.2015.%d.txt', dataload);
        data = importdata(FileID);
    end
end

```

```

    if dataload > filenum

        if dataload2 < 10
            FileID= sprintf('7.08.2015.0%d.txt', dataload2);
            data = importdata(FileID);
        end

        if dataload2 >= 10 && dataload2 <= (filenum2-filenum)
            FileID= sprintf('7.08.2015.%d.txt', dataload2);
            data = importdata(FileID);
        end
        dataload2 = dataload2 + 1;

    end

%% FIRST DERIVATIVE CALCULATOR

for i = 1:n
    if(i==1)
        z(i)=((Pf(i+1)-Pf(i))/((time(i+1)-(time(i)))));
    elseif (i==n)
        z(i)=((Pf(i)-Pf(i-1))/((time(i)-(time(i-1)))));
    else
        z(i)=((Pf(i+1)-Pf(i-1))/((time(i+1)-(time(i-1)))));
    end
end

%% ENABLED PRESSURE TRACES SMOOTHING 1

z= smooth(z,800,'sgolay',2);
z= smooth(z,0.001,'lowess');

%% SECOND DERIVATIVE CALCULATOR

j = 1;
for j = 1:n
    if(j==1)
        g(j)=((z(j+1)-z(j))/((time(j+1)-(time(j)))));
    elseif (j==n)
        g(j)=((z(j)-z(j-1))/((time(j)-(time(j-1)))));
    else
        g(j)=((z(j+1)-z(j-1))/((time(j+1)-(time(j-1)))));
    end
    j=j+1;
end

%% ENABLED PRESSURE TRACES SMOOTHING 2

g= smooth(g,800,'sgolay',2);

```

```

g= smooth(g,0.001,'lowess');

%% DISABLED PLOTTING
%hold on
%figure(1)
time=time-117;
%plot(time,Pf,'b')
%plot(time,Pf2,'k')
%plot(time,trigger1,'g')
%plot(time,trigger2,'c')
%plot(t,pressure,'m')
%plot (time,z,'r')
%legend ('dP/dT')
%plot (time,g,'y')
%axis([0 200 0 60])
%xlabel('Pulse width(ms) ');
%ylabel('Pressure(Bar) ');
%legend ('P_m_a_i_n_c_h_a_m','Spark','dP/dt','d²P/dt²')
%title ('Pressure Trace, d = 3.0, \lambda= x','FontSize',14)

%% PRESSURE TRACES PLOTTING

if resp == 'y'
    if loadcont == aaa || loadcont == bbb || loadcont == ccc

h = figure;
ax0 = subplot (1,1,1);
plot(time,Pf);
hold on
xlabel('time(ms) ');
ylabel('Pressure(Bar) ');
xlim(ax0,[-20 200]);
ylim(ax0,[0 50]);
plot(time,trigger1,'g')
%plot([-20, 30],[0, 0],'k--')
legend ('P_m_a_i_n_c_h_a_m','Spark')
hold off

%ax1 = subplot (3,1,2);
%plot(time,z);
%hold on
%area (time,z)
%xlabel('Pulse width(ms) ');
%ylabel('dPf/dt');
%xlim(ax1,[-20 30]);
%ylim(ax1,[-2 8]);
%plot([-20, 30],[0, 0],'k--')
%legend ('dPf/dt');
%hold off

```

```

%ax2 = subplot (3,1,3);
%%plot(time,g);
%hold on
%area (time,g)
%xlim(ax2,[-20 30])
%xlabel('Pulse width(ms) ');
%ylabel('d²Pf/dt²');
%xlim(ax2,[-20 30]);
%ylim(ax2,[-4 4]);
%plot([-20, 30],[0, 0],'k--')
%legend ('d²Pf/d²t');
suptitle (FileID);
hold off
figure('Visible','off');
cont9 = loadcont;

%% SAVE FILE --- DISABLED

if dataload < 10
    %filename= sprintf('image_7.07.2015.0%d.fig', dataload);

end

if dataload >= 10
    %filename= sprintf('image_7.07.2015.%d.fig', dataload);
end

    %saveas(gcf,filename)

end
end

%% VALUE FINDER

%% TOP DEAD CENTER LOCATION

tdccont = 1;
tdcflag = 0;
tdccompar = 1;
for tdccont = 1:n
    if z(tdccont)> 0 && time(tdccont)>-20 && time(tdccont)<-3
        if z(tdccont)<tdccompar
            tdccompar=z(tdccont);
            tdcpressure = Pf(tdccont);
            tdcptime = time(tdccont);
            tdcflag = 1;
        end
    end
end
end

```

```

%% START OF COMBUSTION LOCATION

soccont = 1;
soccompar = 0;
for soccont = 1:n
    if g(soccont)>soccompar
        soccompar = g(soccont);
        socpressure = Pf(soccont);
        soctime = time(soccont);
        cont0 = soccont;
    end
end

%% START OF HEAT RELEASE LOCATION

sohrcont = 1;
sohrcompar = 0;
for sohrcont = 1:n
    if Pf(sohrcont)>sohrcompar
        sohrcompar = Pf(sohrcont);
        sohrpressure = sohrcompar;
        sohrtime = time(sohrcont);
        cont1 = sohrcont;
    end
end

%% FLAME DEVELOPMENT (0 - 10% xb) TIME AND LOCATION

tenpctbpf = (sohrpressure-socpressure)*0.1;
tenpctbpf = tenpctbpf + socpressure;

flag2 = 0;
flag3 = 0;

for vector = cont0:cont1
    burningpressure(vector) = Pf(vector);
    burningtime(vector) = time(vector);
    if burningpressure(vector)-tenpctbpf >0 && flag2 == 0
        cont3=vector;
        cont4=cont3-1;
        flag2=1;
    end
end

%% TWO POINT INTERPOLATION - FLAME DEVELOPMENT TIME

FLDEVTIME = (time(cont3)*(Pf(cont4)-tenpctbpf)+(time(cont4)*(tenpctbpf-
Pf(cont3))))/(Pf(cont4)-Pf(cont3));
FLAMEDEVTIMEdT = FLDEVTIME - soctime;

```

```
%%      RAPID BURNING TIME (10% - 90% xb) TIME AND LOCATION

rapidburnpf = sohrpressure;
rapidburntime=sohrtime;
RAPIDBURNINGTIMEdT = rapidburntime - soctime;

%%      STRUCTURE FILLING

field1 = 'ab1';
field2 = 'ab2';
field3 = 'ab3';
field4 = 'ab4';
field5 = 'ab5';
field6 = 'ab6';
field7 = 'ab7';
field8 = 'ab8';
field9 = 'ab9';

Results(dataload) =
struct(field1,FileID,field2,tdcpresure,field3,tdctime,field4,socpresure,fiel
d5,soctime,field6,sohrpressure,field7,sohrtime,field8,FLAMEDEVTIMEdT,field9,RA
PIDBURNINGTIMEdT);

%%      .TXT FILE DATA OUTPUT --- TABLE

fprintf('Processing data number: %i\n', loadcont);
if loadcont==filenum2
    fprintf('Data processing completed -- Last processed data number:
%i\n',loadcont);
    PRT = struct2table(Results)
    writetable(struct2table(Results), 'somefile.txt')
    format short;

end
loadcont = loadcont+1;
end
```


APÊNDICE B – DADOS PROCESSADOS PARA ANÁLISE NUMÉRICA

LAMBDA = 1

TURBULENT JET IGNITION - TJI DATA ANALYSIS									
Nozzle diameter	Test ID	TDC		SOC		SOHR		Δt 0 - 10%	Δt 10 - 90%
<i>L(mm)</i>	-	<i>P (Bar)</i>	<i>t (ms)</i>	<i>P (Bar)</i>	<i>t (ms)</i>	<i>P (Bar)</i>	<i>t (ms)</i>	<i>t (ms)</i>	<i>t (ms)</i>
3	7.07.2015.01.txt	15.68895635	-7.07	15.1958988	2.4	50.44098639	8.45	0.574405808	6.05
	7.07.2015.02.txt	15.69975381	-7.11	15.19891694	2.68	50.41542679	8.84	0.54081574	6.16
	7.07.2015.03.txt	15.70937846	-6.89	15.29837119	3.04	50.36210766	9.42	0.532173839	6.38
	7.07.2015.04.txt	15.64800519	-6.93	15.19118011	3.53	50.10729701	10.12	0.574300521	6.59
	7.07.2015.05.txt	15.59706525	-6.78	15.21318059	3.01	49.97085953	9.38	0.576505356	6.37
	7.07.2015.06.txt	15.61736737	-6.65	15.28507372	2.74	50.23048454	8.91	0.587660298	6.17
	7.07.2015.07.txt	15.62403082	-6.68	15.24009919	2.31	50.28606221	8.49	0.542312499	6.18
	7.07.2015.08.txt	15.58427201	-6.8	15.21377479	2.95	49.95793745	9.37	0.608106905	6.42
	7.07.2015.09.txt	15.56890268	-6.78	15.19645504	3.38	50.26350342	9.53	0.634256077	6.15
	7.07.2015.10.txt	15.52686618	-6.68	15.20380487	2.94	49.79105231	9.4	0.588431879	6.46
2.5	7.07.2015.31.txt	15.5098149	-6.52	15.22928488	3.13	50.37957985	9.46	0.629220818	6.33
	7.07.2015.32.txt	15.5177645	-6.49	15.14308041	2.79	49.40504245	9.22	0.660331536	6.43
	7.07.2015.33.txt	15.53294412	-6.61	15.1470933	2.64	50.60798612	8.44	0.626752505	5.8
	7.07.2015.34.txt	15.47296695	-6.32	15.23021264	3.75	50.11690058	9.92	0.620664035	6.17
	7.07.2015.35.txt	15.4999251	-6.44	15.13555914	2.79	49.48451734	9.15	0.631520849	6.36
	7.07.2015.36.txt	15.48900068	-6.42	15.17423195	3.51	49.65892189	9.79	0.689334266	6.28
	7.07.2015.37.txt	15.511569	-6.53	15.12617399	2.85	49.88121933	9.19	0.753861874	6.34
	7.07.2015.38.txt	15.52472325	-6.62	15.11000847	2.44	50.23568833	8.5	0.695576319	6.06
	7.07.2015.39.txt	15.50396051	-6.53	15.10583666	4.21	50.01460386	10.57	0.629733744	6.36
	7.07.2015.40.txt	15.49320265	-6.54	15.19816477	3.76	50.06117375	9.72	0.606273742	5.96
2	7.08.2015.21.txt	15.56840598	-6.72	15.28204518	4.44	51.15290614	9.71	1.025719685	5.27
	7.08.2015.22.txt	15.56930189	-6.79	15.23097511	3.72	51.61461715	8.79	1.084461053	5.07
	7.08.2015.23.txt	15.67350623	-6.79	15.34290607	3.84	52.02413121	8.67	1.2323789	4.83
	7.08.2015.24.txt	15.54960995	-6.51	15.16170641	3.92	51.50059581	9	1.05998933	5.08
	7.08.2015.25.txt	15.59192368	-6.87	15.10858285	2.91	50.67506579	8.13	1.077884691	5.22
	7.08.2015.26.txt	15.40009381	-6.57	15.27362294	4.16	51.54284643	8.82	1.24093195	4.66
	7.08.2015.27.txt	15.45559542	-6.66	15.16223461	5.14	51.19176137	10.41	0.891316939	5.27
	7.08.2015.28.txt	15.49140521	-6.57	15.12858457	4.67	51.3596715	10.04	0.918155394	5.37
	7.08.2015.29.txt	15.52273733	-6.73	15.13142627	3.76	51.27546718	9.1	0.915877333	5.34
	7.08.2015.30.txt	15.46425674	-6.56	15.20134057	3.92	51.27225329	9.03	1.092551936	5.11

LAMBDA = 1.25

TURBULENT JET IGNITION - TJI DATA ANALYSIS									
Nozzle diameter	Test ID	TDC		SOC		SOHR		Δt 0 - 10%	Δt 10 - 90%
L(mm)	-	P (Bar)	t (ms)	P (Bar)	t (ms)	P (Bar)	t (ms)	t (ms)	t (ms)
3	7.07.2015.11.txt	15.68324077	-6.69	15.25870723	2.37	46.60247685	9.04	0.485331099	6.67
	7.07.2015.12.txt	15.6472866	-6.49	15.27148479	2.42	46.14726868	9.47	0.498869859	7.05
	7.07.2015.13.txt	15.67010061	-6.72	15.27392618	2.63	46.94949605	9.39	0.493234748	6.76
	7.07.2015.14.txt	15.65660205	-6.8	15.25580785	2.42	45.90243808	9.56	0.51325129	7.14
	7.07.2015.15.txt	15.63039126	-6.57	15.26903515	2.42	46.7917836	8.76	0.503313614	6.34
	7.07.2015.16.txt	15.66124145	-6.51	15.25615122	2.37	46.98200012	8.79	0.480765996	6.42
	7.07.2015.17.txt	15.62589675	-6.47	15.27534613	2.28	47.01138606	8.63	0.530073597	6.35
	7.07.2015.18.txt	15.74104136	-6.71	15.30440909	2.79	47.19569972	9.7	0.497176411	6.91
	7.07.2015.19.txt	15.65957818	-6.66	15.25672062	2.13	46.83595792	8.61	0.49758675	6.48
	7.07.2015.20.txt	15.68719457	-6.51	15.29396173	2.17	46.81485361	8.69	0.475744098	6.52
2.5	7.08.2015.01.txt	15.72770816	-6.7	15.27200207	2.44	47.78008112	8.99	0.542861261	6.55
	7.08.2015.02.txt	15.55169045	-6.49	15.19769011	2.09	46.8814577	8.38	0.632196616	6.29
	7.08.2015.03.txt	15.80843493	-7.14	15.27893173	2.21	47.31860287	8.47	0.55168935	6.26
	7.08.2015.04.txt	15.71275126	-6.85	15.29850043	2.31	47.49793014	8.5	0.544524605	6.19
	7.08.2015.05.txt	15.75594057	-6.9	15.27951984	2.38	46.84409512	8.53	0.528235729	6.15
	7.08.2015.06.txt	15.57609521	-6.46	15.24730706	2.18	47.98240747	8.16	0.599812806	5.98
	7.08.2015.07.txt	15.68329809	-6.7	15.25144053	2.09	47.12107042	8.23	0.625274328	6.14
	7.08.2015.08.txt	15.70600063	-6.7	15.28873387	2.37	46.79159592	8.85	0.540481735	6.48
	7.08.2015.09.txt	15.6265414	-6.66	15.24819203	2.48	46.39553985	8.82	0.533068359	6.34
	7.08.2015.10.txt	15.69409417	-6.59	15.36594132	2.66	47.5657512	8.87	0.530390097	6.21
2	7.08.2015.31.txt	15.60767568	-6.63	15.21579843	2.53	47.65396429	7.71	0.727445826	5.18
	7.08.2015.32.txt	15.66152283	-6.6	15.25446853	2.34	47.08632333	8.11	0.740974173	5.77
	7.08.2015.33.txt	15.7193505	-6.63	15.26568988	2.51	47.58231803	7.52	0.814625073	5.01
	7.08.2015.34.txt	15.61289432	-6.72	15.20070815	2.47	46.93203898	8.13	0.718040421	5.66
	7.08.2015.35.txt	15.63848925	-6.72	15.18334206	2.31	46.69129366	8.13	0.733772655	5.82
	7.08.2015.36.txt	15.59659207	-6.46	15.18573605	2	47.46657159	7.03	0.913359752	5.03
	7.08.2015.37.txt	15.6081654	-6.81	15.15921058	2.57	47.27442783	8.01	0.886618183	5.44
	7.08.2015.38.txt	15.60591321	-6.51	15.24628337	2.39	46.7308304	8.04	0.751262247	5.65
	7.08.2015.39.txt	15.62493235	-6.64	15.18006351	2.34	47.31335905	7.88	0.661783336	5.54
	7.08.2015.40.txt	15.66951864	-6.79	15.11517045	2.25	46.97577013	7.89	0.702756829	5.64

LAMBDA = 1.5

TURBULENT JET IGNITION - TJI DATA ANALYSIS									
Nozzle diameter	Test ID	TDC		SOC		SOHR		Δt 0 - 10%	Δt 10 - 90%
L(mm)	-	P (Bar)	t (ms)	P (Bar)	t (ms)	P (Bar)	t (ms)	t (ms)	t (ms)
3	7.07.2015.21.txt	15.78056085	-6.65	15.37478687	3.11	41.8983678	11.79	0.58216052	8.68
	7.07.2015.22.txt	15.72036976	-6.31	15.42412313	3.19	42.02931339	12.24	0.529844908	9.05
	7.07.2015.23.txt	15.79837242	-6.62	15.48282852	4.41	41.7857714	13.59	0.617890253	9.18
	7.07.2015.24.txt	15.75436314	-6.68	15.33708075	3.25	41.2114681	13.22	0.663168338	9.97
	7.07.2015.25.txt	15.72595021	-6.57	15.36636355	2.9	41.78746692	11.98	0.552410953	9.08
	7.07.2015.26.txt	15.75840685	-6.45	15.41564101	2.7	42.17559367	10.93	0.523794074	8.23
	7.07.2015.27.txt	15.73546108	-6.37	15.43071204	3.1	41.89899198	12.05	0.522638179	8.95
	7.07.2015.28.txt	15.81388408	-6.62	15.45943213	4.45	41.77877719	13.59	0.725493478	9.14
	7.07.2015.29.txt	15.76254336	-6.58	15.37730293	2.92	41.78357828	11.42	0.524837843	8.5
	7.07.2015.30.txt	15.77608173	-6.43	15.40781626	2.67	42.28283682	11.38	0.53481408	8.71
2.5	7.08.2015.11.txt	15.7266747	-6.66	15.31055611	2.31	41.89863999	10.67	0.569914797	8.36
	7.08.2015.12.txt	15.72819852	-6.65	15.32534864	2.25	42.81586091	9.52	0.518549558	7.27
	7.08.2015.13.txt	15.8204015	-6.74	15.33155418	2.27	42.97262908	9.53	0.623149328	7.26
	7.08.2015.14.txt	15.73803202	-6.52	15.33295019	2.32	42.1507341	10.14	0.617511157	7.82
	7.08.2015.15.txt	15.78773016	-6.65	15.30699407	2.27	42.37587545	8.96	0.561364947	6.69
	7.08.2015.16.txt	15.76851868	-6.67	15.30043048	2.09	42.25301485	9.86	0.591754919	7.77
	7.08.2015.17.txt	15.78389317	-6.6	15.32210455	2.27	42.9282567	9.36	0.535080893	7.09
	7.08.2015.18.txt	15.77005771	-6.56	15.34254579	2.18	42.36346705	9.96	0.607380026	7.78
	7.08.2015.19.txt	15.82203909	-6.78	15.32818787	2.36	42.43193736	10.43	0.694334727	8.07
	7.08.2015.20.txt	15.79534952	-6.76	15.28533208	2.2	42.46302557	9.53	0.647316037	7.33
2	7.08.2015.41.txt	15.74683354	-6.7	15.29618862	2.6	42.63429637	9.15	0.926589953	6.55
	7.08.2015.42.txt	15.70593531	-6.49	15.35753702	2.59	43.26978018	8.64	0.799672956	6.05
	7.08.2015.43.txt	15.82934912	-6.8	15.83131985	3.69	44.171687	8.34	1.357075983	4.65
	7.08.2015.44.txt	15.76003906	-6.74	15.27981121	2.61	42.56443775	8.85	0.807708198	6.24
	7.08.2015.45.txt	15.76127998	-6.76	15.30909175	3.06	42.31203586	10.11	0.838161922	7.05
	7.08.2015.46.txt	15.7512251	-6.69	15.20823952	2.59	42.04414279	10.17	0.963188	7.58
	7.08.2015.47.txt	15.8016543	-6.81	15.27406494	2.62	42.34109257	9.57	0.882906204	6.95
	7.08.2015.48.txt	15.77378467	-6.75	15.33813835	2.71	42.37457114	9.6	0.843989197	6.89
	7.08.2015.49.txt	15.76246041	-6.61	15.42982181	3.57	42.64944363	10.18	1.016720752	6.61
	7.08.2015.50.txt	15.76129788	-6.61	15.28238875	2.26	42.18329049	9.29	0.79696568	7.03

ANEXOS

ANEXO A – CÓDIGO PARA CARREGAMENTO DE MATRIZ DE DADOS DE PRESSÃO

```

%% DATA MANIPULATION

r=100000;           %Sampling rate 100,000 samples/second
t=1/r;             %time increment between data points
PressureScale=30. ; %Scale for Kistler Pressure Transducer [Mu/Volt]
PressureScale2=25.25;
Po=1.00;           %[Bar] Initial Pressure that the Combustion Chamber is
filed to

%Data Array
%1. Main Chamber Pressure
%2. Pre Chamber Pressure
%3. Trigger Signal
%4. Camera Sync Pos
%5. Fuel Injection Control Signal

Voltage=data(1,:);
Voltage2=data(2,:);
trigger1=data(3,:);
CameraGate= data(4,:);
trigger2=data(5,:);
Baseline=mean(Voltage(1:1000));

endtime= t*(length(Voltage)-1);   %endtime = time increment * number of
samples
time= 1000* (0:t:endtime)';       %Create a time vector for plotting the
voltage data
Pressure = Po + PressureScale.*(Voltage-Baseline);
Pressure2 = Po + PressureScale2.*(Voltage2-Baseline);

%%Create a buttersworth filter to filter the Pressure Data
fFilt=100000;           %Sampling Rate
cut= 2000;             %Cut Off Frequency (Hz)
fNorm= cut/(fFilt/2);  %Normalized Frequency
[bb,aa]= butter(9,fNorm,'low'); %Output the numerator and denominator
coefficients for a buttersworth filter
Pf=filtfilt(bb,aa,Pressure); %Output Filtered Pressure

%%Prechamber pressure data

fFilt=100000;           %Sampling Rate
cut= 2000;             %Cut Off Frequency (Hz)
fNorm= cut/(fFilt/2);  %Normalized Frequency
[bb,aa]= butter(9,fNorm,'low'); %Output the numerator and denominator
coefficients for a buttersworth filter
Pf2=filtfilt(bb,aa,Pressure2); %Output Filtered Pressure

```