

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

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS NA
OCORRÊNCIA DE DETONAÇÃO EM UM MOTOR ALTERNATIVO DE CICLO OTTO
DE DOIS-TEMPOS

por

Miguel Postal

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

Porto Alegre, setembro de 2023

CIP - Catalogação na Publicação

Postal, Miguel

Análise Experimental da Influência de Parâmetros na Ocorrência de Detonação em um Motor Alternativo de Ciclo Otto de Dois-Tempos / Miguel Postal. -- 2023. 26 f.

Orientador: Felipe Roman Centeno.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Detonação. 2. Motor à Combustão. 3. Combustíveis. I. Centeno, Felipe Roman, orient. II. Título.

Miguel Postal

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS NA
OCORRÊNCIA DE DETONAÇÃO EM UM MOTOR ALTERNATIVO DE CICLO OTTO
DE DOIS-TEMPOS

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

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Felipe Roman Centeno

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Felipe Roman Centeno (Presidente)

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Prof. Alexandre Vagtinski De Paula

Porto Alegre, setembro de 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2023

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS NA
OCORRÊNCIA DE DETONAÇÃO EM UM MOTOR ALTERNATIVO DE
CICLO OTTO DE DOIS-TEMPOS

Postal, Miguel

miguelpostal22@gmail.com

Resumo. A ocorrência de detonação em motores a combustão interna traz limitações ao incremento de desempenho, tendo sua origem explicada através de diferentes teorias. Baseado nestas hipóteses e com o objetivo de reduzir a ocorrência de detonação em um motor do ciclo dois-tempos, foram realizadas alterações geométricas no cilindro e no êmbolo do motor estudado, antecipando a abertura da janela de exaustão, provocando a retirada de gás residual, e diminuindo a taxa de compressão, separadamente. Através de testes em bancada dinamométrica, foi observado que a diminuição da taxa de compressão aliada com a carbonização e depósitos observados nas superfícies do cilindro não trouxe resultados positivos quanto à detonação, além de provocar grande perda de potência. Já para a alteração da altura da janela de exaustão, foram observados resultados satisfatórios, sem perda significativa de desempenho. Além disso, também foram realizados experimentos com combustíveis de diferentes teores de etanol e octanagem, observando-se que a octanagem superior do etanol não significou diminuição na ocorrência de combustão anormal para as condições severas do motor estudado em comparação à gasolina pura.

Palavras-chave: detonação, motores, gás residual, taxa de compressão, etanol.

Analysis of parameters influence on knocking occurrence on a two-stroke cycle engine

Abstract. The occurrence of knocking in internal combustion engines brings limitations to the performance increase, having its origin explained through different theories. Based on these hypotheses and with the goal of reducing the occurrence of knocking in a two-stroke engine, geometric changes were made in the cylinder and piston of the studied engine, turning the opening of the exhaust port earlier, causing the removal of residual gas, and decreasing the compression ratio, separately. Through dynamometer bench tests, it was observed that the decrease in compression ratio combined with the carbonization and deposits observed in the cylinder surfaces did not bring positive results regarding knocking, in addition to causing a great loss of power, while for the change in the height of the exhaust port, satisfactory results were observed, without significant loss of performance. In addition, experiments were also carried out with fuels of different ethanol content and octane rating, observing that the higher octane rating of ethanol did not mean a decrease in the occurrence of abnormal combustion for the severe conditions of the engine studied comparing with pure gasoline.

Keywords: knocking, engines, end-gas, compression ratio, ethanol.

Símbolos

V_{cc}	Cilindrada do motor	[cm ³]
D	Diâmetro do cilindro	[mm]
L	Curso do êmbolo	[mm]
CR	Taxa de compressão geométrica	
V_{cv}	Volume da câmara de combustão	[cm ³]
V_{ret}	Volume retido	[cm ³]
L_{ex}	Distância entre PMS e janela de exaustão	[mm]
CR_{ef}	Taxa de compressão efetiva	
ϕ	Ângulo de abertura da janela de exaustão	[°]
λ	Coefficiente de mistura lambda	
AFR	Razão ar-combustível da mistura medida	[kg _{ar} /kg _{combustível}]
$AFR_{estequiométrica}$	Razão ar-combustível da mistura estequiométrica	[kg _{ar} /kg _{combustível}]
Red	Fator de redução	
P_{red}	Potência reduzida	[kW]
P	Potência	[kW]
B_{red}	Consumo horário de combustível reduzido	[kg/h]
B	Consumo horário de combustível	[kg/h]

Abreviaturas e acrômimos

PMS	Ponto Morto Superior
APMS	Antes do Ponto Morto Superior
DPMS	Depois do Ponto Morto Superior
RPM	Rotações Por Minuto
RON	<i>Research Octane Number</i>
MON	<i>Motor Octane Number</i>
IAD	Índice Anti-Detonante

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	7
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1	Motor a Combustão Interna do Ciclo Dois-Tempos	8
2.2	Combustão	9
2.3	Combustão Anormal	10
2.3.1	Ignição por Superfície	10
2.3.2	Detonação.....	10
2.4	Combustíveis.....	12
3.	METODOLOGIA	13
3.1	Bancada de Testes	13
3.2	Método de Medição de Detonação.....	14
3.3	Obtenção de amostras	16
3.4	Escopo de Testes	17
3.5	Tratamento de Dados	17
4.	RESULTADOS.....	18
4.1	Variação da taxa de compressão	18
4.2	Variação da abertura da janela de escape.....	19
4.3	Variação do combustível.....	20
5.	CONCLUSÕES	21
	REFERÊNCIAS	22

1. INTRODUÇÃO

Desde sua invenção, os motores a combustão interna passaram por melhorias e pesquisas que visavam o puro aumento de seu desempenho na forma de potência e durabilidade (ZHEN et al., 2011). Ao longo do tempo, motores do ciclo Otto quatro-tempos foram bem aceitos em aplicações usuais do dia-a-dia, como automóveis e maquinário industrial, enquanto os motores do ciclo dois-tempos tornaram-se dominantes em ferramentas portáteis, algumas motocicletas, e outras aplicações de menor escala.

O enrijecimento de legislações que visam diminuir as emissões provenientes dos motores nas últimas décadas tornou o foco das pesquisas em aumentar a eficiência de conversão, por consequência diminuição de consumo de combustíveis fósseis e emissões de gases nocivos. Apesar disso, o aumento de desempenho de um motor pode ser limitado devido a fenômenos não desejados de combustão anormal, como detonação e autoignição, que podem ser danosos à estrutura do motor e até terminais em casos mais graves. Diferentes teorias buscam explicar e encontrar formas de atenuar a ocorrência de tais fenômenos.

Heywood (1988) descreve e classifica diferentes fenômenos de combustão anormal, de acordo com sua origem e principais efeitos. Também apresenta teoria que busca explicar a origem do fenômeno de detonação, a influência do combustível utilizado e os métodos de medição da qualidade dos combustíveis, e também as principais consequências que podem ser vistas em um motor que sofre de detonação severa.

Segundo Schreer et al. (2009), para motores do ciclo Otto quatro-tempos, os parâmetros que mais influenciam a existência de detonação estão atrelados ao ângulo de avanço da ignição, à riqueza da mistura e à eficiência volumétrica. Mas para motores dois-tempos, os estudos ainda são limitados. Os autores ainda investigam, através de experimentos, a influência destes parâmetros na ocorrência da detonação em um pequeno motor do ciclo dois-tempos com ignição por centelha e alta velocidade e apresentam métodos de medição e instrumentação no cilindro para detecção do fenômeno.

Zhen et al. (2011) trazem uma visão geral do fenômeno de combustão anormal para motores com ignição por centelha, incluindo as teorias que tentam explicar o mecanismo que desencadeia a detonação, os principais fatores de influência, consequências e métodos de detecção. Apresentam também três modelos matemáticos que podem prever a existência da combustão anormal e os principais métodos de mitigação.

Adamo (2015) apresenta exemplos de danos provocados pela detonação em um motor, além de também trazer os principais métodos de medição e índices da amplitude da detonação em um motor. Além disso, também busca explorar métodos de modelagem numérica de combustão e combustão anormal em motores com ignição por centelha de alto desempenho.

O presente trabalho, desenvolvido em âmbito industrial, tem por objetivo investigar formas de atenuação de ocorrência de detonação que podem ser encontradas na literatura em um motor do ciclo dois-tempos, através de experimentos que estudam a influência de parâmetros geométricos do motor e também do combustível no fenômeno descrito. Ao mesmo tempo, espera-se que a diminuição da detecção de detonação não provoque grandes perdas em termos de desempenho e eficiência de conversão do motor, desta forma tentando balancear o comportamento funcional do motor, através de potência e consumo de combustível, com sua durabilidade.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Motor a Combustão Interna do Ciclo Dois-Tempos

Motores a combustão interna alternativos são utilizados para produzir trabalho mecânico por meio da queima de uma mistura de ar e combustível dentro de um cilindro, acionando um êmbolo que, através da biela, gera movimento rotativo no eixo do motor, movimentando o conjunto. Os motores alternativos podem ser divididos entre motores de ciclo quatro-tempos e em motores de ciclo dois-tempos.

Os motores de quatro-tempos são utilizados em veículos de passeio e outros tipos de máquinas, tendo suas quatro etapas definidas como: admissão, compressão, combustão/expansão e exaustão. Nestes motores, cada ciclo é caracterizado por duas voltas completas do eixo do motor (720°).

Os motores de dois-tempos são normalmente encontrados em algumas motocicletas, cortadores de grama, motosserras, e outras aplicações de menor escala. Blair (1996) destaca que a simplicidade destes motores é óbvia, já que todos os processos são controlados somente pelas extremidades do êmbolo enquanto se move. Por não possuir válvulas de admissão e exaustão, estes processos são realizados através de janelas na parede do cilindro. Quando o êmbolo está em movimento descendente, a janela de exaustão é aberta e amplifica sua área conforme o ângulo do eixo do motor aumenta até o ponto morto inferior; e no movimento ascendente a janela de admissão é aberta na parte inferior do êmbolo. Isso significa que todos os tempos de abertura das portas são simétricos em relação ao ponto morto superior e seu ângulo de abertura é oposto ao tempo de fechamento (α e $-\alpha$, por exemplo). Na Figura 1 pode ser observada a ordem de ocorrência dos tempos das janelas, de acordo com o ângulo do eixo do motor.

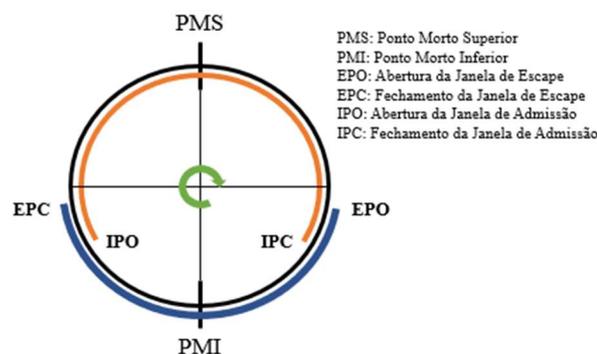


Figura 1: Tempos de abertura das janelas de acordo com ângulo do eixo do motor. Fonte: O Autor.

A cilindrada de um motor (V_{cc}) pode ser definida como sendo o volume varrido pelo êmbolo. Essa medida pode ser obtida através da equação (1), relacionando o diâmetro do cilindro (d) com o curso do êmbolo (L). A taxa de compressão geométrica (CR), obtida da equação (2), é a razão entre o máximo e o mínimo volume que pode ser preenchido dentro do cilindro, sendo que o mínimo volume (V_{cv}) é o volume da câmara de combustão, obtido quando o êmbolo está no ponto morto superior. A taxa de compressão é fator determinante na eficiência do motor e na potência que pode ser produzida.

$$V_{cc} = \frac{\pi}{4} d^2 L \quad (1)$$

$$CR = \frac{V_{cc} + V_{cv}}{V_{cv}} \quad (2)$$

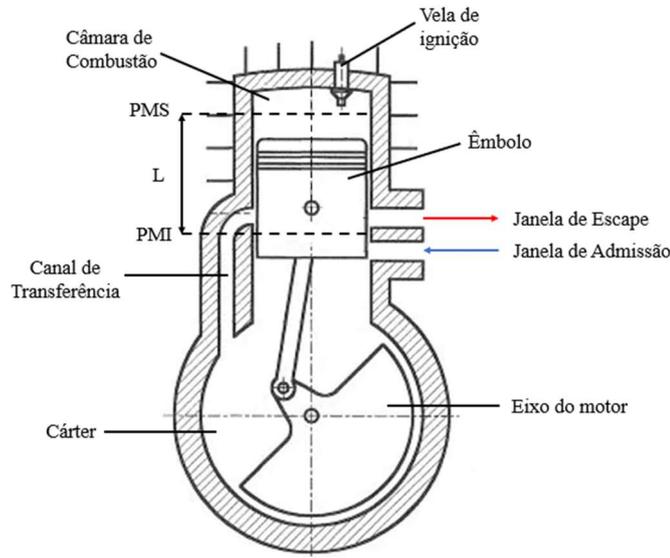


Figura 2: Motor à combustão interna do ciclo dois-tempos. Adaptado de Heywood e Sher, 1999.

Segundo Blair (1996), o processo de compressão se dá efetivamente somente após o fechamento da janela de escape pelo êmbolo, conforme pode ser visto na Figura 2, e por conta disso a razão de compressão neste ponto é a mais importante durante a construção do motor. Essa taxa de compressão é chamada de efetiva ou retida. O volume retido (V_{ret}) é calculado a partir da distância entre a janela de escape e o ponto morto superior (L_{ex}) conforme a equação (3) e a taxa de compressão efetiva (CR_{ef}) a partir da equação (4).

$$V_{ret} = \frac{\pi}{4} d^2 L_{ex} \quad (3)$$

$$CR_{ef} = \frac{V_{ret} + V_{cv}}{V_{cv}} \quad (4)$$

O ângulo do eixo do motor em que ocorre a abertura da janela de exaustão pode ser equacionado a partir do curso do êmbolo e da distância da janela de escape até o ponto morto superior, conforme a equação (5).

$$\phi = \cos^{-1} [(L/2 - L_{ex}) / (L/2)] \quad (5)$$

2.2 Combustão

Segundo Richards (2014), as primeiras reações, chamadas de pré-chama, que resultam na combustão acontecem ainda quando o combustível é misturado com o oxigênio, antes da mistura atingir a câmara de combustão e continuam até que todo combustível seja consumido. A extensão e a natureza da combustão dependem de fatores como a composição do combustível, temperatura e pressão da mistura.

A mistura ar-combustível é tida como estequiométrica quando contém a exata proporção entre combustível e oxidante para que a combustão seja completa (MCALLISTER et al., 2011). Esta mistura ideal leva à máxima temperatura de chama, já que toda energia liberada pela combustão aquece seus produtos. A comparação da mistura real com a estequiométrica pode ser obtida pelo coeficiente lambda (λ), ou riqueza da mistura, a partir da equação (6), sendo AFR a razão mássica ar-combustível. Quanto menor o coeficiente obtido,

mais rica está a mistura, e quando lambda é igual a 1, a mistura está em condições estequiométricas.

$$\lambda = \frac{AFR}{AFR_{estequiométrico}} \quad (6)$$

Em motores de dois-tempos, em que as condições de mistura também afetam a lubrificação das partes móveis do motor, já que o óleo lubrificante é misturado junto ao combustível, a mistura ar-combustível habitualmente está em condições mais ricas do que a mistura estequiométrica.

Zhen et al. (2011) destacam que em motores com ignição por centelha o processo de combustão pode acontecer de forma normal ou anormal. A combustão normal é iniciada somente pela centelha da vela e produz uma frente de chama que ocupa o volume do cilindro de maneira uniforme. A combustão anormal será explicada com maiores detalhes na próxima seção.

2.3 Combustão Anormal

A busca pelo aumento da potência específica e eficiência volumétrica acaba resultando em fenômenos de combustão não desejados (SCHREER et al., 2009). O entendimento da ocorrência da autoignição é de grande relevância na construção de motores de combustão interna. Este fenômeno é descrito pela teoria térmica como o estado em que a mistura gera calor no mínimo igual ao calor perdido. Dessa forma, é possível concluir que para cada combustível existe uma temperatura crítica em que o combustível pode inflamar-se sem a aplicação de uma fonte externa de chama ou ignição (MCALLISTER et al., 2011).

Segundo Heywood (1988), combustão anormal é o processo em que a queima do combustível pode ser iniciada por meio de superfícies quentes da câmara de combustão, seja antes ou depois da ignição por centelha. Além disso, durante esse processo, é possível que parte ou toda a mistura de ar e combustível seja queimada de forma muito rápida. Os processos de combustão anormal podem ser divididos entre “*Spark knock*” (Detonação) e “*Surface ignition*” (Ignição por Superfície).

2.3.1 Ignição por Superfície

A ignição por superfície ocorre quando a mistura de ar e combustível é inflamada por um ponto quente nas paredes da câmara de combustão, que pode ser causado por uma válvula ou vela de ignição superaquecida ou um depósito incandescente. Esse tipo de ignição é diferente da ignição normal por centelha, pois ocorre por outros meios e pode acontecer antes ou depois da ignição por centelha. Depois que a mistura é inflamada, uma chama turbulenta é criada no ponto de ignição por superfície e se espalha pela câmara da mesma maneira que a chama da ignição por centelha (HEYWOOD, 1988).

2.3.2 Detonação

A outra classificação de Heywood (1988), a detonação, é caracterizada pelo ruído que se propaga pela estrutura do motor, e ocorre quando há a ignição espontânea de uma porção do gás residual - a mistura de combustível, ar e gás queimado em alta temperatura - antes que a chama se espalhe. Caracteriza-se por ocorrer após a centelha da vela e gera uma segunda frente de chama, como ilustrado na Figura 3. Esse processo de combustão anormal libera

rapidamente a energia química contida no gás residual, gerando pressões locais muito altas e ondas de pressão de grande amplitude que se propagam pela câmara de combustão.

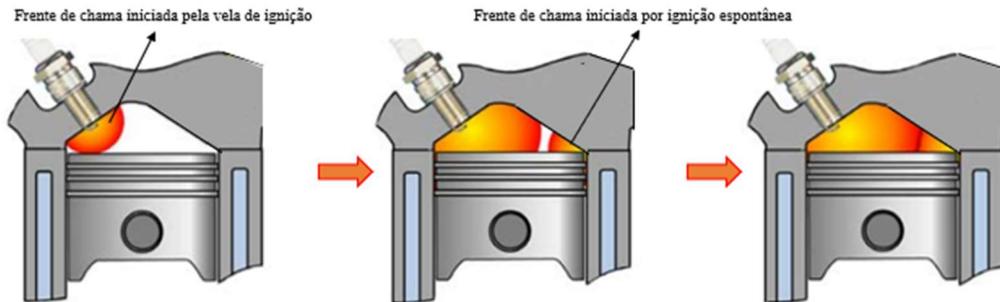


Figura 3: Sequência de eventos em ciclo com ocorrência de detonação. Adaptado de Richards, 2014.

Segundo Zhen et al. (2011), a ocorrência de detonação em um motor pode levar a efeitos indesejáveis na combustão, como perda de eficiência energética, aumento de emissões, aumento do consumo específico, além de problemas estruturais mais sérios, caso persistir por um longo período de tempo, como a quebra de anéis de êmbolo, erosão da calota do cilindro e do topo do êmbolo, fusão do material do êmbolo, etc. Exemplos de danos estruturais catastróficos podem ser vistos na Figura 4.



Figura 4: Exemplo de pistões danificados por detonação severa. Fonte: Adamo, 2015.

Heywood (1988) afirma que a teoria mais aceita sobre a origem da detonação trata da liberação extremamente rápida da energia contida no gás residual adiante da frente de chama, resultando em pontos de alta pressão. A distribuição dessa pressão causa ondas de choque dentro da câmara de combustão, podendo fazê-la vibrar em sua frequência natural. Essas ondas podem ser vistas na curva de pressão obtida dentro da câmara de combustão, conforme mostrado na Figura 5. Richards (2014) apresenta teoria semelhante, afirmando que a detonação inicia a partir da ignição espontânea e descontrolada da mistura de gás residual e combustível, causada pelo aumento da sua temperatura e pressão por conta da onda de calor da chama.

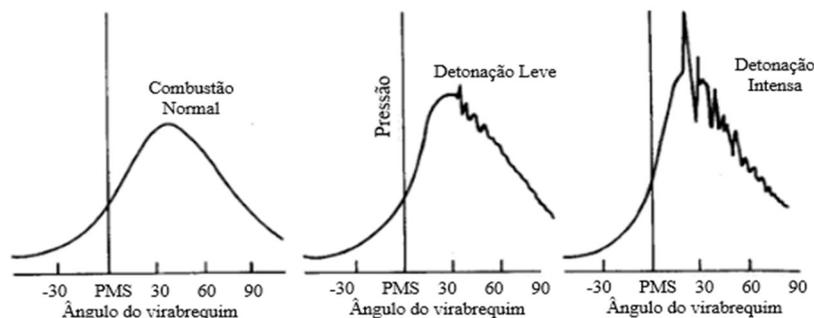


Figura 5: Comparativo entre curvas típicas de ciclos sem e com detonação. Adaptado de Heywood, 1988.

Zhen et al. (2011) apresentam duas possíveis teorias: autoignição e detonação. A teoria da autoignição, a mais aceita, se baseia na ignição de pontos quentes no gás residual não queimado, que são formados por conta de não uniformidades no perfil de temperatura e concentração. Após a centelha da vela, esse gás é comprimido e aquecido através de radiação pela frente de chama, até o ponto em que a sua temperatura e pressão atingem valores suficientes para causar a autoignição do gás. Já a teoria da detonação assume que a aceleração da frente de chama provoca vibração ao atingir a parede do cilindro assimetricamente. O impacto é de curta duração, porém de alta magnitude.

Segundo Schreer et al. (2009), pontos de ignição adiantados, somados a uma alta concentração de gás residual na câmara de combustão provocam aumento na ocorrência de detonação. Por conta disso, os principais métodos de atenuação deste fenômeno incluem a diminuição da taxa de compressão e atraso do ponto de ignição.

2.4 Combustíveis

Além dos fatores que dizem respeito à construção do motor, outro importante fator na ocorrência de detonação é o combustível, principalmente na sua capacidade antidetonante (HEYWOOD, 1988). Essa capacidade pode ser medida através do número de octanas: quanto maior este número, maior a sua resistência à detonação. Informações sobre as duas formas comumente utilizadas para medir este fator em um combustível e suas diferenças podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1 - Formas de medição do número de octanas de combustíveis. Adaptado de Heywood, 1988.

Método	RON (<i>Research Octane Number</i>)	MON (<i>Motor Octane Number</i>)
Temperatura de entrada	52 °C	149 °C
Rotação do motor	600 RPM	900 RPM
Avanço da ignição	13° APMS	19-26° APMS (varia com a razão de compressão)
Razão ar-combustível	Ajustada para a máxima ocorrência de detonação	

O número de octanas de um combustível é o volume percentual de isooctano em uma mistura com n-heptano que apresenta o mesmo desempenho antidetonante sob mesmas condições, sendo um valor de 100 igual ao desempenho do isooctano puro e um valor de 0 igual ao n-heptano puro (RICHARDS, 2014). Ainda, um terceiro número que caracteriza a capacidade do combustível em resistir à detonação é utilizado conforme Heywood (1988), o índice antidetonante (IAD), obtido pela simples média entre os valores medidos de RON e MON.

A maioria dos combustíveis apresenta RON superior a MON, e, segundo Richards (2014), a diferença entre o resultado obtido pelos dois métodos é a sensibilidade do combustível (Sensibilidade = RON - MON). Este conceito pode ser definido como a perda de capacidade antidetonante conforme a severidade da condição de operação do motor, e pode ser visto no gráfico da Figura 6.

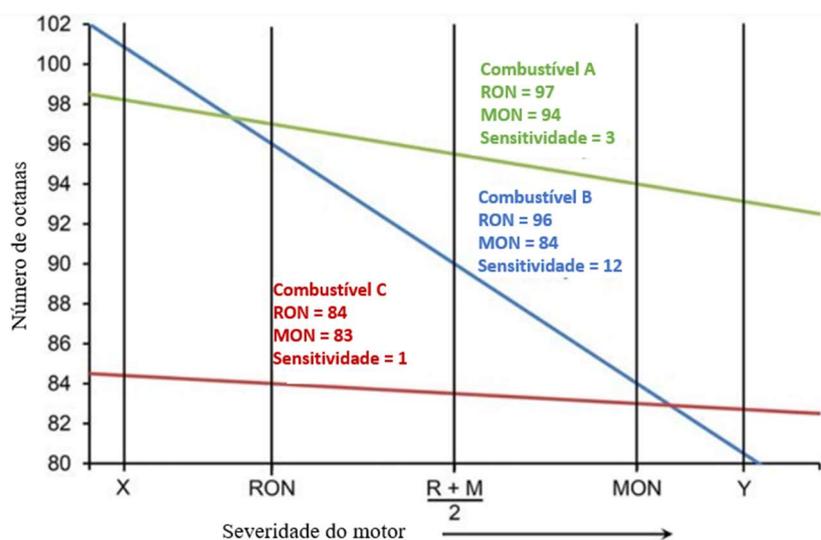


Figura 6: Capacidade antidetonante de combustíveis de acordo com severidade de operação do motor. Adaptado de Richards, 2014.

Combustíveis com altos valores de octanagem possuem maior resistência à detonação, permitindo que o motor tenha melhor desempenho e maior durabilidade, desde que projetado de acordo (PETROBRAS, 2020). Heywood (1988) também define a exigência de octanagem de um motor como o número de octanas necessário para evitar a detonação. Essa exigência aumenta de acordo com fatores que aumentam a temperatura e pressão ou que aumentam o tempo de queima do combustível.

Segundo a Petrobras (2020), a gasolina comum comercializada no Brasil possui especificação mínima para octanagem de MON 82 e RON 92. A gasolina nacional tem como característica a adição de etanol anidro, em quantidade atualmente definida por lei como 27,5% em volume, e que pode variar de acordo com a disponibilidade de etanol no mercado.

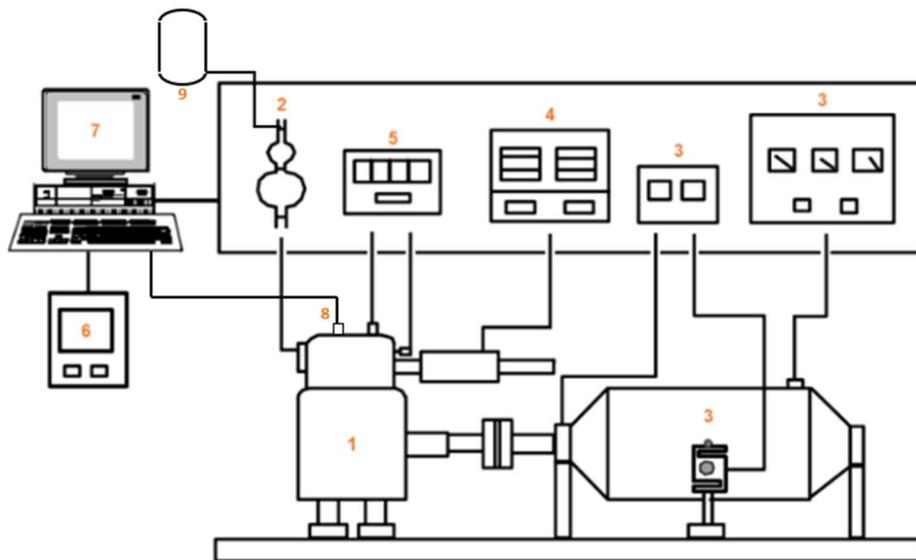
A adição do etanol no combustível brasileiro influencia no número de octanas e por consequência na ocorrência de detonação. Segundo Heywood (1988), o valor usual do etanol puro para o índice antidetonante é de aproximadamente 110, enquanto o de gasolina pura é de 90. McAllister et al. (2011) apresentam valores de temperatura crítica para autoignição de etanol de 423°C e para gasolina de 370°C, a pressão de 1 atm - um aumento da pressão diminui a temperatura crítica.

Wang et al. (2017) destacam que a fórmula molecular do etanol, que conta com a presença de um átomo de oxigênio, favorece a diminuição de depósitos na câmara de combustão, que pode ser uma das causas da ocorrência de autoignição. Outros efeitos da fórmula molecular do etanol são a diminuição das emissões, da razão ar-combustível necessária para a mistura, que por consequência aumenta o consumo volumétrico de combustível, e aumento da eficiência energética, que aumenta a potência gerada.

3. METODOLOGIA

3.1 Bancada de Testes

O diagrama apresentado na Figura 7 representa a bancada de testes utilizada durante os experimentos. A bancada permite aquisição, visualização e processamento dos dados adquiridos em tempo real.



1- Motor; 2- Medidor de Vazão de Combustível; 3- Dinamômetro; 4- Analisador de Gases; 5- Medidores de temperatura; 6- Estação Meteorológica; 7- Controlador da bancada; 8- Sensor de pressão interna do cilindro; 9 - Tanque de combustível externo

Figura 7: Diagrama da Bancada de Testes. Adaptado de Biondo, 2019.

O conjunto conta com alimentação de combustível via tanque externo (item 9 da figura), com vazão medida por medidor do tipo Coriolis da fabricante Emerson modelo CMFS007M (item 2 da figura), com exatidão de $\pm 0,1\%$ de vazão mássica e $\pm 0,002 \text{ g/cm}^3$ de massa específica (Emerson). Um freio dinamométrico de correntes parasitas modelo 2WB65 (item 3 da figura), da fabricante Magtrol, com escala de 0 a 30000 RPM para a rotação e de 0 a 20 Nm para o torque com exatidão de $\pm 0,3\%$ faz a medição do torque do motor (Magtrol). A coleta dos gases de escape é realizada através de uma sonda posicionada no silenciador do motor, de onde são filtradas e bombeadas para um analisador de gases modelo MEXA7100D da fabricante HORIBA (item 4 da figura), responsável pelas análises de emissões de CO e CO₂ (escala 0-20% em volume), de NO_x (escala 0-150 ppm), de HC (escala 0-30000 ppm) e de O₂ (escala 0-10% em volume), todos com exatidão $\pm 0,5\%$ na escala de medição (Horiba). A medição de temperatura foi realizada em dois pontos: no assentamento da vela de ignição e próximo a janela de escape, a 1 milímetro da pista do cilindro (item 5 da figura).

A medição de pressão interna do cilindro é realizada através de um sensor de pressão piezoelétrico para análise de combustão modelo GH14DK (item 8 da figura), da fabricante AVL, com escala de medição de 0 a 300 bar e linearidade de 0,3% (AVL). A medição da pressão é feita com uma resolução de 0,2° do ângulo do eixo do motor, de -180° a 180°.

Os testes realizados consistem na gravação de pontos a partir de duas formas, sendo possível gerar duas curvas de pontos: a primeira consiste na variação de rotação (5000 – 12000 rpm) em passos de 500 rpm, mantendo a riqueza da mistura estável no seu valor nominal; a segunda consiste na variação da riqueza, mantendo a rotação constante (9500 rpm). Neste caso, os valores de λ podem ser limitados devido a um aumento acelerado de temperatura. As gravações são realizadas após um período de estabilização de trinta segundos e com uma média das medições durante os trinta segundos posteriores. A gravação da pressão interna do cilindro é realizada em 1000 ciclos de combustão para cada ponto.

3.2 Método de Medição de Detonação

A medição de pressão interna do cilindro é passada por um filtro passa alta. Os ciclos com ocorrência de detonação possuem como característica ondas de pressão com frequência

muito superior à frequência da onda de pressão gerada pela combustão normal, o que pode ser observado no exemplo da Figura 8, meramente ilustrativa. Após a filtragem do sinal, o resultado deve ser a pressão resultante somente do fenômeno anormal.

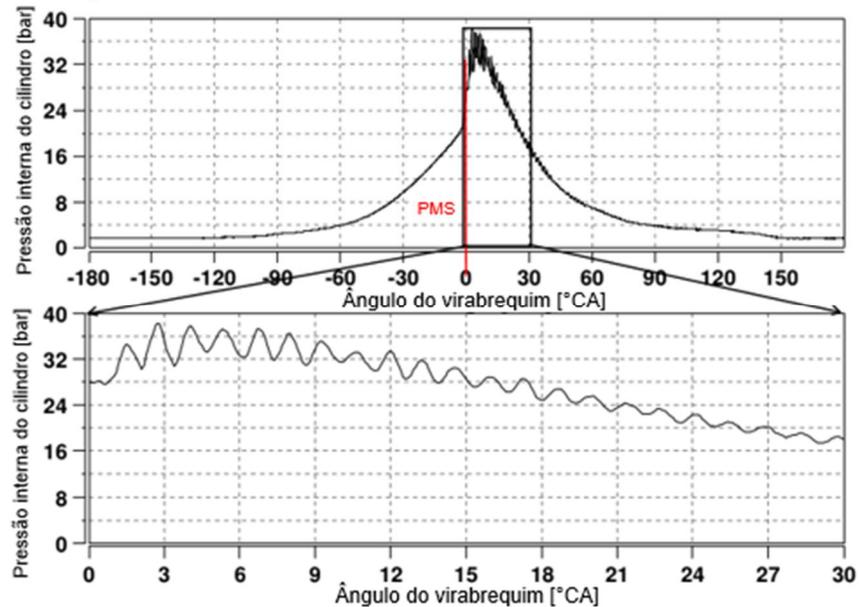


Figura 8: Sinal de pressão de um ciclo com detonação. Adaptado de Schreer et al. (2009)

Após esse processo, a máxima intensidade de detonação pode ser deduzida para o respectivo ciclo, como é indicado na Figura 9, após a filtragem do sinal do ciclo apresentado. O valor de detonação apresentado para cada ponto de operação é definido como a intensidade da pressão proveniente de detonação que corresponde ao valor do percentil 85, ou seja, 85% dos ciclos gravados possuem pressão de detonação inferior a este valor, desta forma definido como $DQ85$. No exemplo da Figura 9, meramente ilustrativa, este valor é de pouco mais de 4 bar.

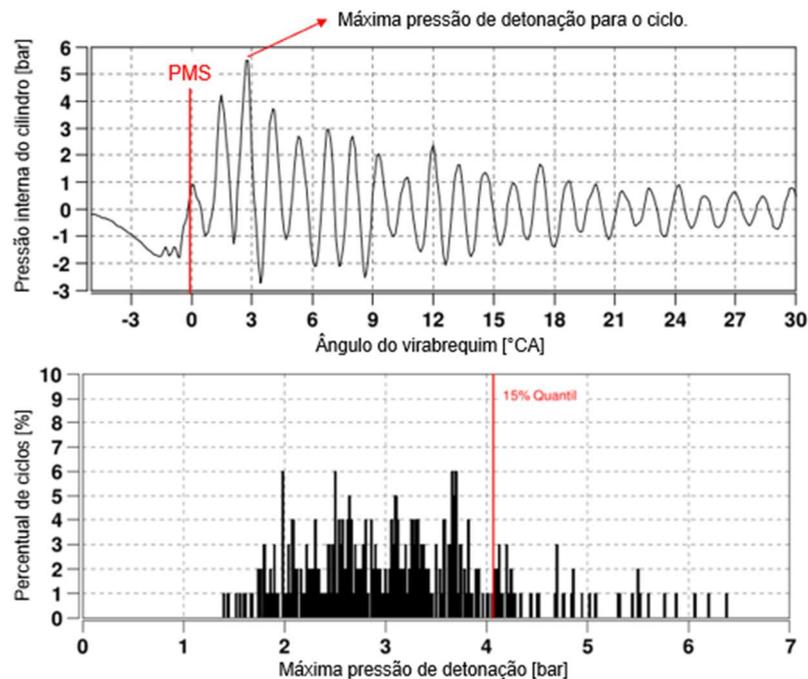


Figura 9: Sinal de pressão do ciclo com detonação após filtragem. Adaptado de Schreer et al. (2009)

3.3 Obtenção de amostras

O motor estudado tem suas características construtivas principais originais elencadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características do motor estudado.

Tipo de motor	Ciclo Otto de dois-tempos, monocilíndrico, alimentação via carburador
Sistema de ignição	Por centelha
Curso do êmbolo	33,2 mm
Ponto de Ignição	27° APMS
Razão de compressão geométrica	11,06:1
Riqueza de mistura nominal (λ)	0,828

No presente estudo foram realizados testes alterando a geometria do êmbolo (rebaixamento), a geometria do cilindro (posição da janela de exaustão), e o combustível, conforme descreve-se a seguir.

Para obter uma menor razão de compressão, a forma encontrada consistiu em retirada do material do topo do êmbolo. Dessa forma, o volume da câmara de combustão é aumentado e por consequência a taxa de compressão diminuída. Outra vantagem de obter-se esse efeito através do êmbolo é a possibilidade de cruzar as amostras de cilindros com as amostras de pistões, podendo-se obter mais variações de conjuntos a serem testados com um número menor de amostras modificadas. A Tabela 3 contém as três variações obtidas a partir do retrabalho nos pistões.

Tabela 3 – Variantes de Pistões.

Variante	Altura de retirada de material [mm]	Razão de Compressão Geométrica
P0	0	11,06:1
P1	0,1	10,77:1
P2	0,2	10,49:1

Como apresentado na seção anterior, o tempo de abertura da janela de escape pode ser alterado a partir da posição da sua aresta superior em relação ao ponto morto superior. Dessa forma, a retirada dos gases queimados é antecipada e a formação de mistura de gás residual com combustível fresco pode ser diminuída ou evitada, como descrito por Heywood (1988), em teoria que explica a origem do fenômeno de combustão anormal. A fim de obter amostras que resultassem em tempos de abertura adiantados, foram obtidas amostras de cilindros com a aresta superior da exaustão usinada em dois níveis diferentes. A partir das equações foi possível obter qual o ângulo do eixo do motor em que é realizada a abertura da exaustão nas amostras. A Tabela 4 apresenta as três variações de cilindros utilizadas em testes.

Tabela 4 – Variantes de Cilindros.

Variante	L_{ex} [mm]	Diferença no Ângulo de abertura da Janela de Escape	Razão de Compressão Efetiva
C0	18,91	Nominal	6,73:1
C1	17,91	-3,5°	6,43:1
C2	17,41	-5,2°	6,28:1

Os combustíveis utilizados nos testes com o intuito de comparação da ocorrência de detonação passaram por análise em laboratório especializado para obtenção do seu número de octanas característico, conforme os métodos apresentados anteriormente. O combustível E0 é a gasolina utilizada para desenvolvimento de motores em mercados em que não há adição de etanol, e o combustível E27 é a mistura de gasolina e etanol que pode ser encontrada nos postos de combustível no Brasil como gasolina comum. Os resultados destas análises, juntamente com características do percentual de etanol e de mistura de cada combustível são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Características dos combustíveis testados.

Combustível	Percentual de Etanol	RON	MON	Sensitividade	AFR estequiométrico
E0	0%	89	83	6	14,517 $\text{kg}_{\text{ar}}/\text{kg}_{\text{combustível}}$
E27	27,5%	93	81	12	12,893 $\text{kg}_{\text{ar}}/\text{kg}_{\text{combustível}}$

Foram obtidas duas amostras de cada variante para os cilindros e pistões. Após inspeção e avaliação das medições de suas cotas funcionais, as amostras foram selecionadas para montagem e realização de testes conforme descrito na seção seguinte.

3.4 Escopo de Testes

Os testes foram realizados avaliando de forma separada e independente as variações testadas, sendo possível observar a mudança de desempenho e de perfil de detonação entre cada amostra. Na Tabela 6, é possível observar os testes realizados durante o estudo. Os testes 1 e 4 foram realizados com diferentes amostras de mesmas especificações, para evitar a influência de possíveis desgastes ou carbonização nas amostras já testadas. Além disso, o experimento realizado utilizando combustível E0 foi feito com amostras novas de cilindro (C1), enquanto que as amostras de cilindro C0 já haviam todas sido testadas.

Tabela 6 – Escopo de Testes.

Análise	Teste	Variante de Cilindro	Variante de Êmbolo	Combustível
Taxa de Compressão	1	C0 (amostra 1)	P0 (amostra 1)	E27
	2	C0 (amostra 1)	P1 (amostra 1)	E27
	3	C0 (amostra 1)	P2 (amostra 1)	E27
Abertura da Exaustão	4	C0 (amostra 2)	P0 (amostra 2)	E27
	5	C1 (amostra 1)	P0 (amostra 2)	E27
	6	C2 (amostra 1)	P0 (amostra 2)	E27
Combustível	7	C1 (amostra 2)	P0 (amostra 2)	E27
	8	C1 (amostra 2)	P0 (amostra 2)	E0

3.5 Tratamento de Dados

Para eliminar a influência das condições ambientes, como temperatura da cabine e umidade relativa do ar, as medições de potência e de consumo de combustível são reduzidas conforme especificado pela DIN70020-3. O fator de redução (*Red*) é obtido a partir da pressão atmosférica de referência ($p_{ref} = 1,013 \times 10^8 \text{ Pa}$), temperatura ambiente de referência ($T_{ref} = 20^\circ\text{C}$), pressão medida (p) e temperatura ambiente medida (T). Os valores medidos de consumo de combustível (B) e potência (P) são divididos pelo fator de redução.

$$Red = \frac{p_{ref}}{p} \sqrt{\frac{T}{T_{ref}}} \quad (7)$$

$$B_{red} = \frac{B}{Red} \quad (8)$$

$$P_{red} = \frac{P}{Red} \quad (9)$$

Para garantir o sigilo das informações coletadas a partir dos testes, os parâmetros apresentados como resultados (potência, consumo, temperatura no assentamento da vela, *DQ85*) passaram por uma normalização conforme Equação 8, onde G_N é a grandeza normalizada, G a grandeza resultante no teste e G_{max} o valor máximo obtido durante toda a rodada de testes.

$$G_N = \frac{G}{G_{max}} \quad (10)$$

Nos resultados apresentados para *DQ85*, também é apresentado o valor-alvo, que não deve ser superado em condições nominais de rotação e riqueza da mistura. Este valor atende normas internas de desenvolvimento da companhia em que o projeto foi desenvolvido, com o objetivo de atender requisitos de durabilidade e resistência a testes em campo, sem perder desempenho funcional.

Os resultados apresentados em gráficos na seção seguinte contam com barras de erros considerando as incertezas de medição, com base nos dados apresentados de exatidão de cada equipamento.

4. RESULTADOS

4.1 Variação da taxa de compressão

A Figura 10 apresenta os resultados para a ocorrência de detonação com diferentes taxas de compressão através da alteração nas amostras de pistões, correspondentes aos testes 1, 2 e 3 da Tabela 6. O processo de ignição espontânea de uma mistura é diretamente influenciado pela pressão interna na câmara de combustão, por isso, espera-se observar uma diminuição na intensidade de detonação com menores taxas de compressão.

Apesar disso, o que se observa nos resultados foi um aumento da intensidade de *DQ85* nas duas curvas produzidas para o primeiro patamar de taxa de compressão modificada – êmbolo P1. Além disso a curva de variação da razão da mistura foi limitada devido ao aumento de temperatura observado. O aumento de detonação nas condições de λ nominal a 9500 RPM foi de 49,73% em relação ao êmbolo P0.

Já para o segundo patamar, os valores observados são semelhantes aos vistos com o êmbolo não modificado e taxa de compressão original. A diferença na intensidade na condição de mistura nominal foi de uma redução de apenas 4,85%

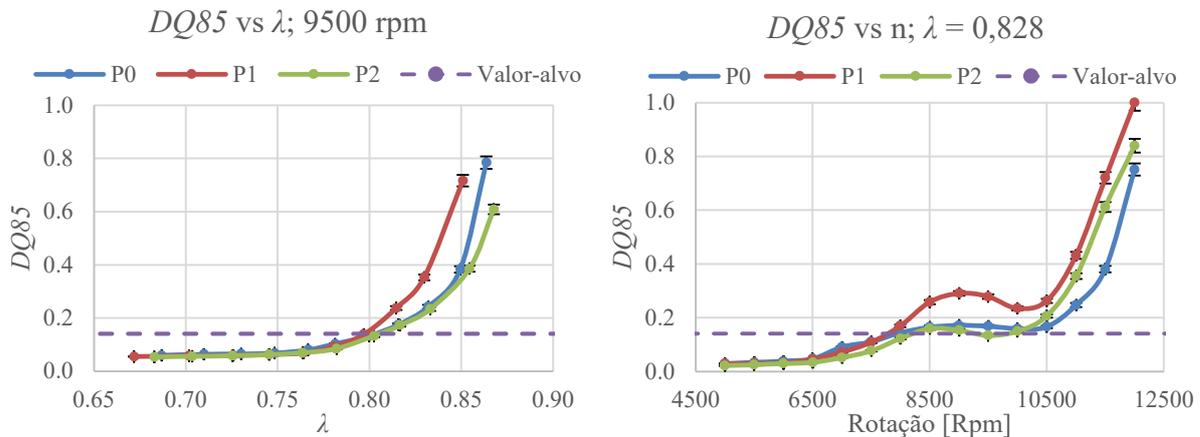


Figura 10: Ocorrência de detonação para diferentes taxas de compressão.

O fato de que os experimentos com as três amostras de pistões diferentes foram realizados com montagens com o mesmo cilindro e que os valores de detonação tiveram um acréscimo no primeiro experimento com menor taxa de compressão levanta a hipótese de que a ocorrência de detonação tem origem em depósitos de carbono na superfície da exaustão ou da câmara de combustão, observados ao longo dos testes. Essa teoria está alinhada com a classificação de ignição por superfície, apresentada por Heywood (1988), em que a onda de detonação tem origem em um ponto quente.

Os resultados para potência, consumo de combustível e temperatura da vela ignição para os testes 1, 2 e 3 da Tabela 6, são apresentados no Apêndice A.

4.2 Variação da abertura da janela de escape

Os resultados para a ocorrência de detonação em relação às alterações na altura da janela de escape, e consequentemente o ângulo de abertura das mesmas e da taxa de compressão efetiva, correspondentes aos testes 4, 5 e 6 da Tabela 6, são apresentados na Figura 11. A mistura de ar-combustível fresca que adentra a câmara de combustão entra em contato com o gás residual em alta temperatura e é levada a uma condição de ignição espontânea. Por isso, a retirada antecipada dos gases produtos da reação de combustão de um ciclo reflete diretamente na ocorrência da detonação.

É possível observar uma clara redução na intensidade de detonação em iguais condições de operação entre as amostras de cilindro C0 e C1, e de C1 para C2 igualmente. Em condições de λ nominal a 9500 RPM, a redução para a primeira amostra modificada, uma alteração de $3,5^\circ$ no ângulo do eixo do motor em que a janela de escape é aberta, foi de 36,01% na intensidade. Em relação ao valor alvo de intensidade, a amostra mostrou detonação 12,96% inferior.

Para a segunda amostra modificada, com diferença de $5,2^\circ$ no ângulo de abertura da exaustão, a redução de intensidade de detonação em relação ao cilindro C0 em condições nominais foi de 49,24%. Em comparação com o valor alvo para condições nominais, a intensidade foi 30,96% inferior.

Na curva produzida a partir da rotação, a amostra C0 não pôde ser levada ao último ponto de gravação, em 12000 rpm, devido ao aumento acentuado da temperatura observado nos canais dos termopares, o que poderia levar a danos irreversíveis.

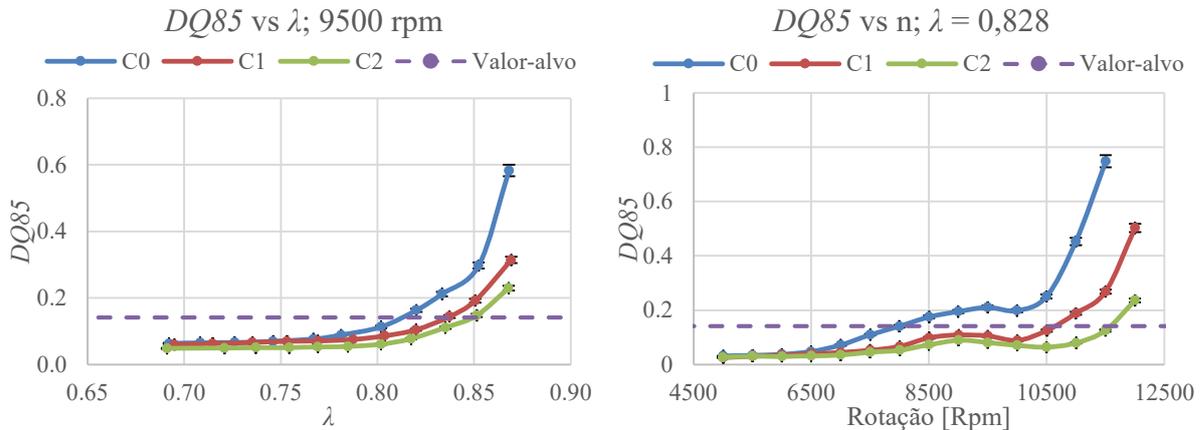


Figura 11: Ocorrência de detonação para diferentes tempos de abertura da janela de escape.

Os resultados para potência, consumo de combustível e temperatura da vela de ignição para os testes 4, 5 e 6 da Tabela 6, são apresentados no Apêndice B.

4.3 Variação do combustível

A Figura 12 apresenta os resultados para intensidade de detonação obtidos com alimentação por diferentes combustíveis, para a mesma amostra de cilindro e êmbolo, correspondentes aos testes 7 e 8 da Tabela 6. Destaca-se o fato de que o experimento realizado com combustível E0 foi levado a condições de mistura muito mais pobres, com um λ superior, enquanto que os testes realizados com E27 não alcançaram tal ponto devido a intensidade elevada de detonação, o que poderia danificar permanentemente as amostras.

A diferença entre os dois combustíveis na condição nominal de mistura e rotação foi de 37%, inferior para o caso com E0. No gráfico realizado a partir da variação de rotação, destaca-se que o combustível E0 manteve-se abaixo do valor alvo de intensidade em todos os pontos gravados.

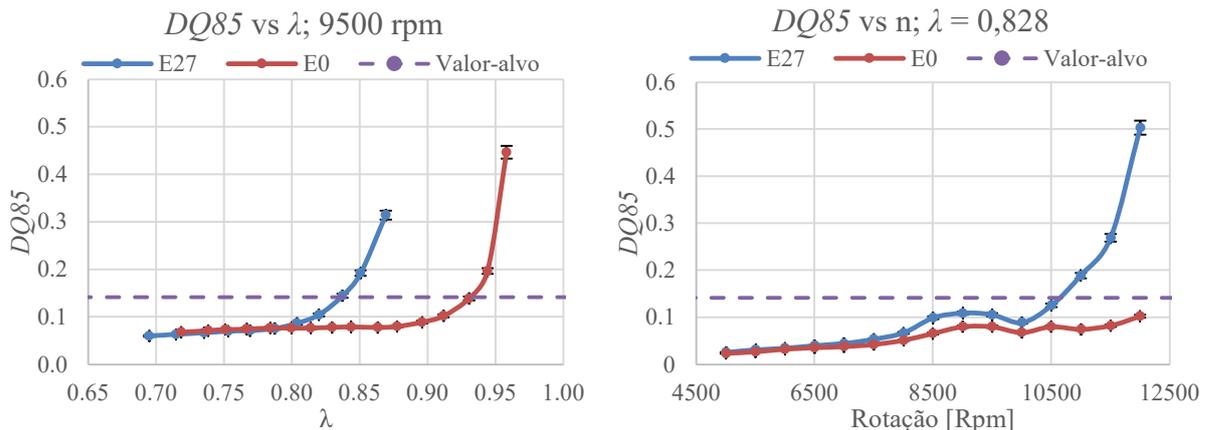


Figura 12: Ocorrência de detonação para combustíveis com diferente teor de etanol e número de octanas.

A octanagem obtida através do método RON não refletiu nos resultados observados durante o experimento. Já o método MON apresentou octanagem levemente superior para o combustível E0 (83 contra 81). Dessa forma, pode-se concluir que nas condições de operação do motor – alta rotação e mistura pobre – o resultado do método RON não pode ser tratado como definitivo. A alta rotação de operação do motor estudado coloca o combustível em uma

condição de trabalho mais severa do que os métodos usuais de medição de capacidade antidetonante conseguem reproduzir.

Os resultados para potência, consumo de combustível e temperatura da vela para os testes 7 e 8 da Tabela 6, são apresentados no Apêndice C.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo, foram experimentados métodos para amenizar a intensidade de detonação em um motor do ciclo dois-tempos: a alteração da taxa de compressão, de forma a diminuir a pressão interna da mistura na câmara de combustão; e a alteração da abertura da janela de escape, facilitando a saída dos gases produtos na reação de combustão. Além disso, foram experimentados combustíveis com número de octanas e teor de etanol diferentes para analisar o efeito nas condições severas de operação do motor estudado.

A diminuição da taxa de compressão, método conhecido e usual em motores do ciclo quatro-tempos, não trouxe os resultados esperados para diminuição de detonação, ficando muito acima do valor alvo de intensidade. Os resultados e marcas de carbonização observados estão em acordo com as teorias que explicam a detonação a partir da existência de pontos quentes no interior da câmara de combustão. Além disso, o desempenho do motor é altamente prejudicado por menores razões de compressão, devido a diminuição da pressão máxima interna da câmara de combustão.

A alteração da janela de escape no motor do ciclo dois-tempos teve efeito positivo na ocorrência da combustão anormal, o que pode ser explicado através das teorias trazidas por Heywood (1988) e Richards (2014), em que o fenômeno tem origem no contato dos gases queimados em alta temperatura com a mistura fresca que entra na câmara de combustão. Além disso, analisando-se o desempenho do motor a partir dessas alterações, não há grandes discrepâncias com o motor em condições originais, e visto que em condições de operação nominal a detonação esteve abaixo do valor alvo de intensidade, tais alterações atendem o objetivo principal do trabalho.

Por último, a análise através da alteração do combustível mostrou que os métodos usuais de medição de octanagem não são capazes de transmitir a real capacidade antidetonante de combustíveis quando utilizados em motores dois-tempos de alta rotação. Apesar disso, o método MON é o que mais se aproximou das medições realizadas. A sensibilidade do combustível E27 para condições que se tornam mais severas, leva a capacidade antidetonante deste para valores abaixo do combustível E0.

Em trabalhos futuros, sugere-se explorar a alteração do ponto de ignição do motor, juntamente com as alterações nas condições de mistura, taxa de compressão e abertura da janela de exaustão, dessa forma tentando obter um ponto ideal entre detonação amena, ou ausência desta, e desempenho do motor. Além disso, estudos mais profundos podem ser realizados a partir de diferentes misturas de gasolina e etanol no combustível, como experimentos com combustíveis E40, E50, E75 e E100, a fim de verificar o efeito direto da adição de etanol na ocorrência da combustão anormal.

REFERÊNCIAS

Adamo, A.; “**Numerical Modelling of Abnormal Combustion in High Performance Spark-Ignition Engines**”, Università Degli Studi di Modena e Reggio Emilia: Dipartimento di Ingegneria “Enzo Ferrari”, 2015.

AVL. “**Pressure Sensor For Combustion Analysis Data Sheet GH14DK**”, 2018.

Biondo, A.; “**Efeitos da Razão de Compressão em Motores do Ciclo de Dois-Tempos Alimentado com Diferentes Misturas de Etanol e Gasolina**”. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

Blair, G.P.; “**Design and Simulation of Two-Stroke Engines**”, SAE International, 1st edition, 1996.

DIN 70020-3; “**Testing conditions, maximum speed, acceleration and elasticity, mass, terms, Miscellaneous**”, DIN, 2008

EMERSON. “**Micro Motion ELITE CMFS007M Coriolis Meter, 1/12 Inch (DN1), 316L Stainless Steel**”, <https://www.emerson.com/en-us/catalog/micro-motion-sku-cmfs007m?fetchFacets=true#facet:&partsFacet:&modelsFacet:&facetLimit:&searchTerm:&partsSearchTerm:&modelsSearchTerm:&productBeginIndex:0&partsBeginIndex:0&modelsBeginIndex:0&orderBy:&partsOrderBy:&modelsOrderBy:&pageView:list&minPrice:&maxPrice:&pageSize:&facetRange:&> . Acessado em 16/06/2023.

Heywood, J.B.; “**Internal Combustion Engines Fundamentals**”, McGraw-Hill, 1st edition, 1988.

Heywood, J.B.; Sher, E.; “**The Two-Stroke Cycle Engine: Its Development, Operation and Design**”, SAE International, 1st edition, 1999.

HORIBA Automotive. “**MEXA-ONE: Motor Exhaust Gas Analyzer**”, <https://www.horiba.com/fra/automotive/products/detail/action/show/Product/mexa-one-41/>. Acessado em 16/06/2023.

Magtrol Inc.; “**WB SERIES: EDDY-CURRENT DYNAMOMETERS**” <https://www.magtrol.com/wp-content/uploads/wb-series.pdf>. Acessado em: 16/06/2023.

McAllister, S.; Chen, J.; Fernandez-Pello, A.; “**Fundamentals of Combustion Processes**”, Springer, 1st edition, 2011.

PETROBRAS; “**Gasolina: Informações Técnicas**”; “<https://petrobras.com.br/data/files/02/93/A0/4C/5A39C710E2EF93B7B8E99EA8/manual-de-gasolina.pdf>” Acessado em 25/05/2023.

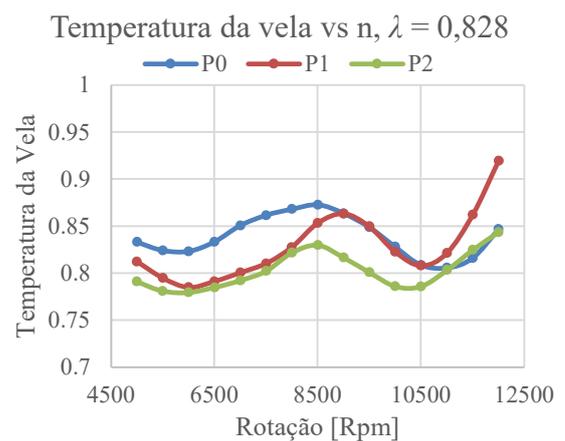
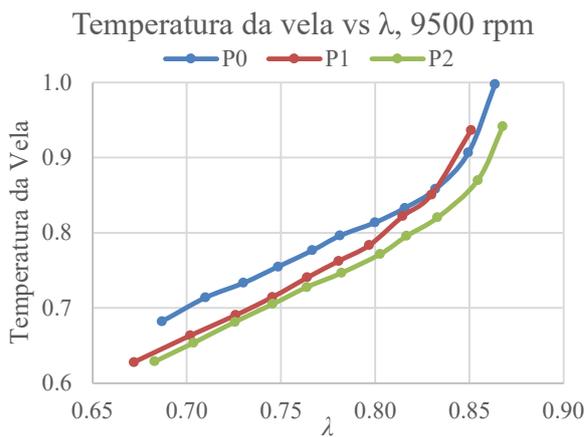
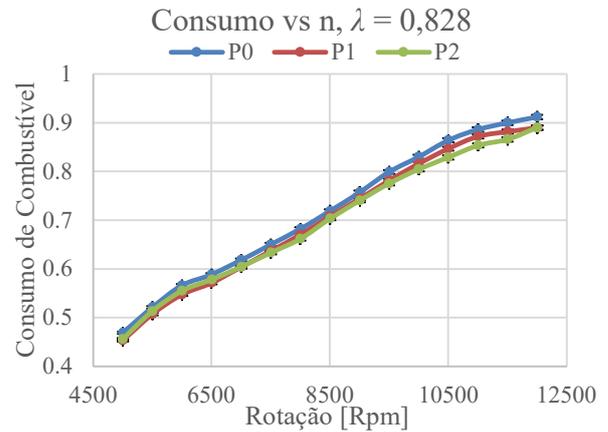
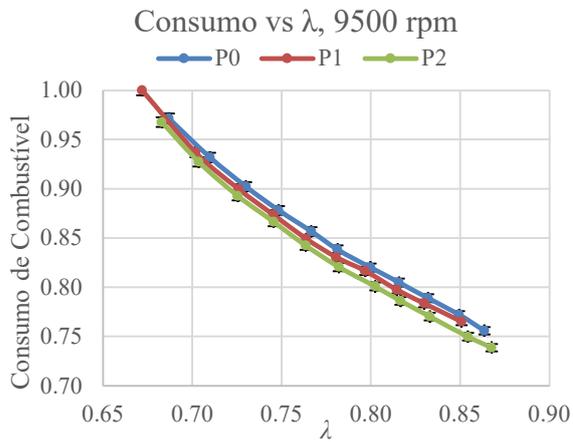
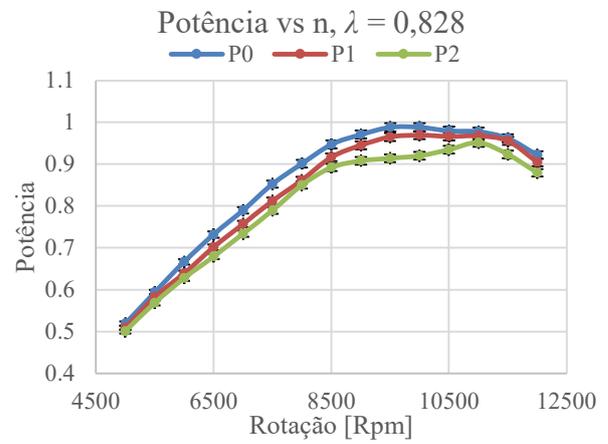
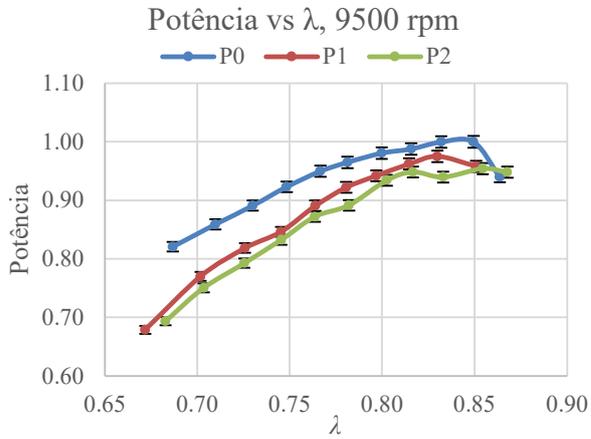
Richards, P.; “**Automotive Fuels Reference Book**”. SAE International, 3rd edition, 2014.

Schreer, K.; Beck, K.; Bernhardt, S.; Spicher, U.; Geyer, W.; Meyer, S.; **“Knocking investigations in a small Two-Stroke SI Engine”**, SAE Paper 20097013, 2009.

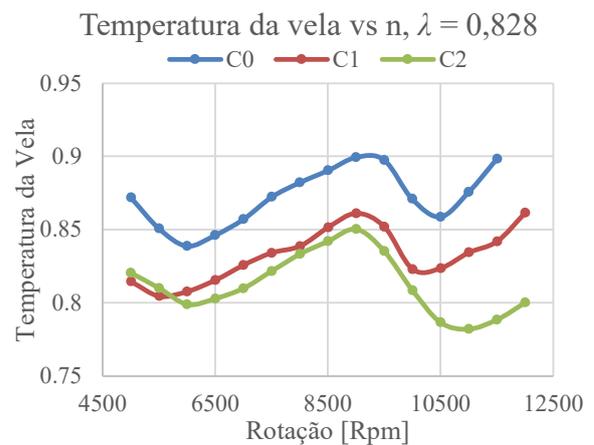
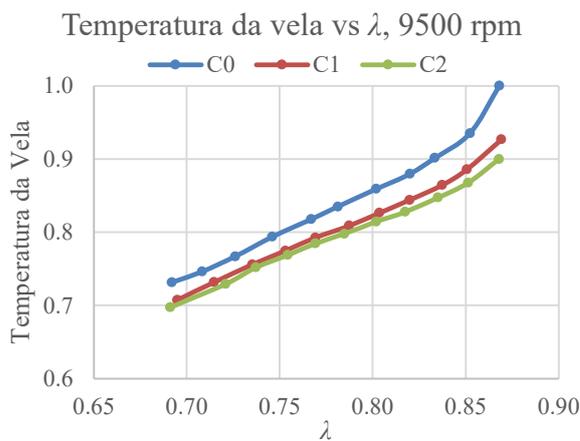
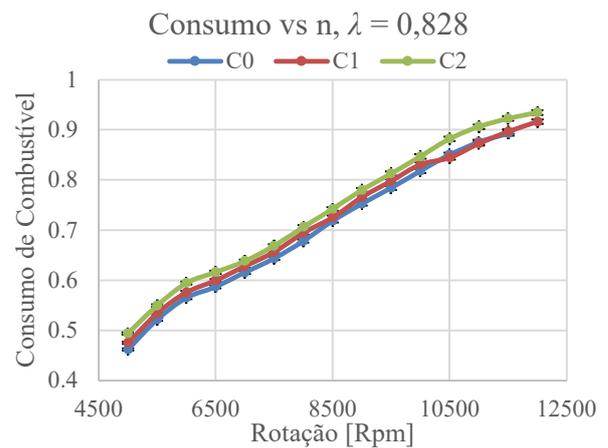
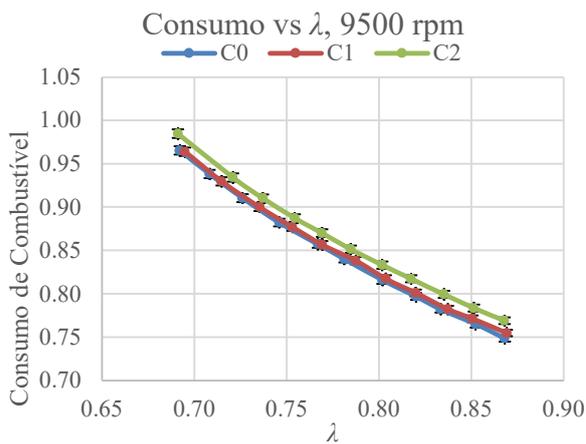
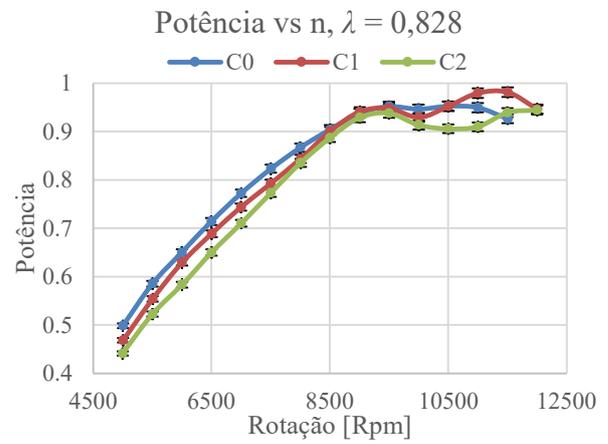
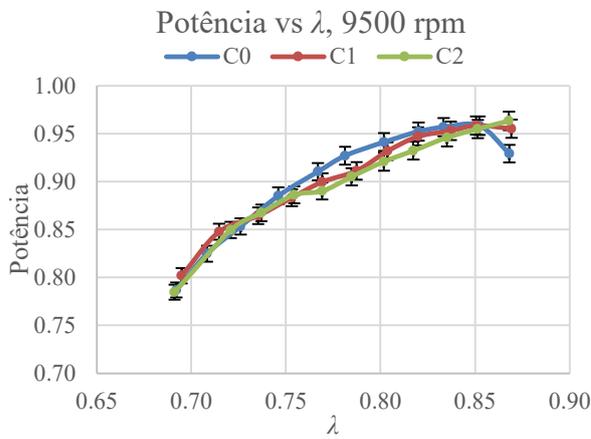
Wang, C.; Zeraati-Rezaei, S.; Xiang, L.; Xu, H.; **“Ethanol blends in spark ignition engines: RON, octane-added value, cooling effect, compression ratio, and potential engine efficiency gain”**, Applied Energy 191 (2017), 603-619

Zhen, X.; Wang, Y.; Xu, S.; Zhu, Y.; Tao, C.; Xu, T.; Song, M.; **“The engine knock analysis – An overview”**, Applied Energy 92 (2012), 628-636.

APÊNDICE A: DADOS NORMALIZADOS DE POTÊNCIA, CONSUMO E TEMPERATURA NO ASSENTAMENTO DA VELA PARA VARIAÇÃO DA TAXA DE COMPRESSÃO.



APÊNDICE B: DADOS NORMALIZADOS DE POTÊNCIA, CONSUMO E TEMPERATURA NO ASSENTAMENTO DA VELA PARA VARIAÇÃO DA ABERTURA DA JANELA DE ESCAPE.



APÊNDICE C: DADOS NORMALIZADOS DE POTÊNCIA, CONSUMO E TEMPERATURA NO ASSENTAMENTO DA VELA PARA VARIAÇÃO DO COMBUSTÍVEL.

