

2

Revisão Bibliográfica e Tópicos Técnicos

Neste capítulo, uma abordagem sobre os trabalhos realizados na área experimental será realizada. O objetivo é avaliar a liberação de calor pela combustão e emissão de poluentes nos modos: original e bicomcombustível. Pretende-se também, discutir tópicos técnicos ligados à combustão em motores do ciclo Diesel.

2.1. Revisão Bibliográfica

2.1.1. Análise da Liberação de Calor e Taxas de Substituição de Combustíveis

Diversos trabalhos, experimentais e numéricos, foram realizados para avaliar a liberação de calor no interior do cilindro. Esta liberação foi analisada para motores do ciclo Otto e Diesel, com diferentes tipos de combustíveis no intuito de melhoria de rendimento e emissão de poluentes.

Shropshire e Goering (1982) realizaram ensaios experimentais em um motor do ciclo Otto em que foi constatado um considerável aumento da potência e torque do motor, através do aumento da injeção de etanol. Com a injeção do combustível alternativo, o motor ficou propenso à detonação. Em virtude deste fenômeno, os autores controlaram a vazão de injeção de etanol para que esta condição fosse controlada.

Gao *et al.* (1983) testaram um motor do ciclo Diesel turbo alimentado operando com óleo Diesel e etanol. O teste foi realizado em uma bancada dinamométrica, onde o motor foi instrumentado com termopares e transdutores de pressão para monitoramento dos pontos relevantes a serem tratados. A porcentagem em massa do etanol foi variada de 0 a 80% para baixas cargas e de 0 a 50% para altas cargas. Em uma segunda etapa, o trabalho se concentrou na avaliação numérica por códigos computacionais. Quando nesta fase, a câmara foi dividida em três zonas, sendo elas, mistura ar / etanol, óleo Diesel não queimado e zona queimada. Assim, foi possível avaliar a influência destas zonas na formação

da mistura ar / combustível desde o início do processo de queima até o final da combustão. Avaliaram-se também, os poluentes emitidos. O método numérico englobou um modelo zero dimensional e o método de multizonas a fim de avaliar os campos de escoamentos turbulentos para o ar e combustíveis. Gao *et al.* (1983), em sua simulação numérica, encontraram uma redução no atraso da ignição, a partir do incremento gradual do etanol. Houve também, diminuição do período da combustão para altas cargas, contudo, aumentou para cargas baixas. O modelo numérico constatou a formação de óxido de nitrogênio, no entanto, por aproximações feitas, os resultados obtidos foram maiores em comparação aos encontrados experimentalmente. Em altas cargas, com a adição de etanol, a liberação de calor foi antecipada em relação à operação no modo original (Diesel puro), ou seja, a combustão no modo bicomcombustível ocorreu mais cedo.

Hayes *et al.* (1988) utilizando um motor do ciclo Diesel (taxa de compressão de 16,3:1) turbocompressor, de seis cilindros, com injeção direta realizaram ensaios experimentais para avaliar os efeitos da fumigação a partir da injeção eletrônica multiponto para diferentes concentrações de etanol. A etapa de injeção ocorreu nas fases de admissão e expansão. As vantagens deste tipo de injeção foi o pré-aquecimento da metade da carga de etanol pelo impacto do spray sobre a válvula de admissão, e o fornecimento de uma estratificação parcial da carga no interior do cilindro. O motor foi testado a uma rotação fixa de 2400 rpm, com três cargas distintas: 200, 500 e 800 kPa. As concentrações de etanol foram diversas, onde para baixas cargas foram de 50, 62,5, 75, 87,5 e 99,5% (v/v). Já em altas cargas as concentrações foram 75, 87,5 e 99,5% (v/v) em virtude da limitação da vazão dos injetores.

Em relação aos resultados observaram que a máxima substituição de etanol diminuiu conforme se aumentou a carga imposta ao motor, onde a 200 kPa foi 75%, 500 kPa com 60% e 800 kPa com 36%. Constataram ainda atrasos de ignição à medida que injetavam etanol e devido às respectivas parcelas de água presente. Ressalta-se que os atrasos foram maiores para baixas cargas, visto a maior quantidade de etanol. Em decorrência disto, a combustão foi mais atrasada em relação a 800 kPa, ocasionando também, menores taxas de aumento de pressão. No que tange a emissão de poluentes gasosos, o HC e CO apresentaram considerável aumento no modo bicomcombustível. Destacou-se que neste modo a

emissão de HC foi 7,2 superior ao modo diesel puro. A emissão de NO_x apresentou uma redução em todos os casos de hidratação (Egúsquiza, 2011).

Goering (1992) modificou um motor do ciclo Diesel na introdução de um sistema para fornecer etanol através do coletor de admissão. Junto a esta modificação, utilizou-se aditivo no etanol e com isso possibilitou a ignição por compressão a partir somente da utilização do combustível alternativo. Em virtude desta modificação não houve alteração da potência gerada e nenhuma fuligem foi observada. Entretanto, obtiveram-se pressões mais elevadas e no que diz respeito à durabilidade do motor, foi posta em dúvida.

Amadeo (2006) em seu trabalho avaliou um motor Diesel de 4 cilindros turbocomprimido operando com óleo Diesel e, posteriormente, etanol. O objetivo foi comparar os parâmetros de desempenho de cada operação. Os testes foram realizados na plena carga (100%), 25, 50 e 75% desta. Ressaltou que para operação com etanol, a vazão de injeção deste foi 63% maior em relação ao óleo Diesel. O objetivo foi fornecer a mesma quantidade de energia gerada pelo óleo Diesel, tendo em vista o baixo poder calorífico. Para realizar os ensaios experimentais com etanol, mudanças nos componentes do motor foram necessárias. Destacam-se: controle na tensão da vela aquecedora, regulagem na quantidade injetada de combustível, troca dos bicos injetores, alteração no ponto de injeção e adição de 2% em massa de óleo de mamona devido a baixa lubricidade do etanol. Posteriormente, realizou-se o desenvolvimento no código computacional, Chemkin. O modelo termodinâmico proposto foi o zero dimensional analisado para fase fechada do ciclo (compressão, combustão e expansão), não havendo fluxo de massa. A mistura de gases na câmara de combustão foi considerada como perfeita.

Amadeo (2006) comenta em seus resultados que a operação com etanol em altas cargas teve picos de pressão superiores em relação à operação com óleo Diesel (na mesma carga), visualizados pela curva de pressão. Através da visualização da curva de pressão conseguiu-se verificar que ao final da compressão as pressões foram inferiores para operação com etanol quando comparada com óleo Diesel. Justificou que as menores pressões encontradas foram em virtude da necessidade de vaporização do etanol. Constatou também, que pela presença do etanol, o rendimento global do motor diminuiu, em cargas semelhantes de ambos os modos de operação (óleo Diesel e etanol). Ressaltou-se

que isto foi devido ao maior fornecimento de combustível e menor aproveitamento da energia.

Hauck (2010) desenvolveu um modelo computacional, em C++, no intuito de simular um motor Diesel. O modelo proposto considerou as duas fases do ciclo do motor (fechada e aberta). O modelo foi capaz de realizar a análise termodinâmica do gás no interior do cilindro, que levou em consideração a pressão e a temperatura uniformes. Para o balanço de energia, a Primeira Lei da Termodinâmica foi utilizada, partindo como premissa inicial, gás ideal. O objetivo foi encontrar os parâmetros de desempenho do motor (pressão média efetiva, potência, torque, consumo específico de combustível e eficiência). Em sua análise, os resultados encontrados na simulação foram similares a diversos trabalhos experimentais e aos dados do fabricante.

Egúsqiza (2011) realizou ensaios experimentais em um motor Diesel (MWM de potência e torque máximo de: 107 kW e 430 Nm, em 2600 e 1800 rpm respectivamente) operando em dois modos bicomcombustíveis: Diesel / etanol e Diesel / gás. O objetivo foi analisar as influências da utilização destes combustíveis geradas ao motor e, também, avaliar as técnicas do avanço de injeção do óleo Diesel e da restrição parcial do ar de admissão. Com isso, os parâmetros de desempenho e formação de poluentes foram analisados para um melhor embasamento na teoria do processo de queima da combustão. Os resultados observados para utilização no modo bicomcombustível foram picos de pressão menores em relação ao modo Diesel original em cargas baixas e médias. Menciona-se que este fato foi devido às características físico-químicas dos combustíveis alternativos, que gerou menores temperaturas e maiores atrasos da ignição. Este fenômeno foi intensificado para altas taxas de substituição para o caso Diesel / etanol. Já para o rendimento térmico na operação bicomcombustível (Diesel / etanol) e altas cargas, houve um sensível acréscimo pelo aumento da injeção de etanol em substituição do óleo Diesel. No entanto, para cargas mais baixas, a utilização no modo bicomcombustível gerou uma grande redução pelo aumento da injeção do combustível alternativo em substituição do óleo Diesel.

2.1.2. Aspectos Gerais da Emissão de Poluentes pela Presença do Etanol em Motores Diesel

Alguns trabalhos realizados serão citados a fim de investigar a formação de poluentes pela combustão do óleo Diesel junto ao etanol.

O etanol tornou-se um ótimo “candidato” na substituição parcial do óleo Diesel. Sem mencionar na facilidade de sua produção visto o amplo território nacional e condições climáticas. O etanol contém oxigênio em sua molécula e é bastante volátil. Este possui concentrações de água distintas, dependendo do seu grau INPM.

Jiang *et al.* (1990) utilizaram um motor de ignição por compressão (16,8:1) turbocompressor de quatro cilindros a fim de investigar a emissão de poluentes para diferentes teores de etanol. Os principais fatores destacados pelo efeito da fumigação foram em relação à temperatura da chama de óleo diesel e as emissões de óxido de nitrogênio (NO_x). Vale ressaltar que a temperatura da chama de óleo Diesel foi calculada com base na temperatura adiabática da chama. Os resultados indicaram menores emissões de NO_x . Os pesquisadores justificaram tal ocorrência através da redução da temperatura da chama, como também, pela queima parcial ou total do etanol sob condições de mistura pobre de ar e álcool (Egúsquiza, 2011).

As principais características da combustão no modo bicomcombustível (Diesel / etanol) em relação à poluição são as reduções de: fuligem, material particulado e monóxido de carbono. Já para a emissão de NO_x salienta-se que podem ter uma maior ou menor parcela em sua emissão, dependendo da carga imposta ao motor. Salienta-se que em altas cargas (altas temperaturas) este poluente pode ter sua participação reduzida através do aumento da injeção de etanol em substituição do Diesel.

A fim de exemplificar, Ajav *et al.* (1998) testaram um motor Diesel monocilíndrico em plena carga e através do pré-aquecimento ar / etanol em 50 °C, houve uma considerável redução na emissão de NO_x , como também, na temperatura de escape. Nesta mesma carga notou-se um ligeiro aumento na emissão de CO.

No entanto, Suppes (2000) em seu trabalho avaliou diversos autores, onde evidenciou o incremento de óxido de nitrogênio na exaustão. Ressaltou também, uma efetiva redução do material particulado. Constatou que as condições

operacionais do motor e a porcentagem de água presente no etanol podem influenciar em ambos os casos citados anteriormente (maior ou menor emissão de óxido de nitrogênio).

Egúsquiza (2006) avaliou um motor Diesel operando no modo Diesel / gás com objetivo de reduzir as emissões de poluentes e avaliar as taxas de substituição. Seu método para reduzir a emissão de poluentes consistiu na restrição parcial do ar no coletor de admissão. Constatou que através deste método, houve redução da emissão de hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO) para as faixas de operação propostas. No entanto, em altas cargas houve um aumento da emissão de óxido de nitroso (NO_x). Verificou-se também, que para cargas com 50% da total, houve aumento do rendimento térmico.

Egúsquiza (2011), em uma parte do seu trabalho, avaliou um motor Diesel de quatro cilindros operando com óleo Diesel / etanol. Analisou a operação em diversas cargas e avanços de injeção, para posteriormente discutir as taxas de substituição do óleo Diesel pelo etanol nas respectivas condições de trabalho impostas. Investigou ainda, a emissão de poluentes encontradas. Evidenciou que em 75% e 100% de carga houve um acréscimo de óxido de nitrogênio pelo aumento da taxa de substituição. Na máxima taxa de substituição em comparação ao modo original, houve um aumento de 7% de NO_x . Menciona-se que para cargas mais baixas foi observada uma ligeira redução do óxido de nitrogênio pelo aumento da taxa de substituição.

Estes fatores acima comentados podem ser explicados através da quantidade de carga imposta ao motor. Tem-se que para altas cargas há o favorecimento da oxidação do nitrogênio atmosférico pela rápida liberação de energia, ocorrida após a ignição do piloto. Esta liberação ocorre nas regiões mais ricas em combustível, por nestas zonas ocorrerem um aumento acentuado das taxas de elevação de pressão e temperatura. Cabe ressaltar, a composição química do etanol, tendo em vista a presença do oxigênio. Quando analisado para baixas cargas, o alto calor latente de vaporização do etanol e a má propagação de chama pelas regiões mais pobres de ar / etanol, desfavorece o NO_x (acréscimo). Isto ocasiona níveis mais baixos de temperatura na combustão (Egúsquiza, 2011). Em respeito aos hidrocarbonetos, houve maiores emissões em cargas baixas e taxas de substituição elevadas. É destacado que um dos fatores causadores deste fenômeno é o

armazenamento da mistura nas fendas do cilindro, não favorecendo que a frente de chama a alcance.

Os motores de ignição por compressão por trabalharem com excesso de ar levam a uma formação da mistura pobre, ainda mais em baixas cargas, não propiciando assim uma combustão completa. Isto leva a formação de HC. Ou seja, gases não queimados de hidrocarbonetos são emitidos.

Egúsquiza (2011) também constata o mesmo resultado do HC, para o monóxido de carbono. Observou-se que em maiores taxas de substituição ocorreu um aumento gradual da emissão deste componente. É mencionado que a presença de CO é originada pela combustão incompleta de misturas ricas (excesso de combustível). Em seu trabalho é ressaltado como fator gerador do aumento do monóxido de carbono, a má distribuição do etanol na câmara pela técnica de injeção “monoponto” e pelo coletor de admissão, não propiciando uma boa vaporização.

Já para o material particulado houve um decréscimo da emissão desses poluentes através do aumento da taxa de substituição. Egúsquiza (2011) enfatiza que o mesmo resultado foi obtido pelos autores Chen *et al* (1981) e Heisey e Lestz (1981). Um dos fatores que explica este acontecimento está ligado à composição química do etanol, ou seja, por conter maior quantidade de oxigênio e por ser livre de compostos de naftas e aromáticos provenientes do petróleo.

2.2. Tópicos Técnicos

2.2.1. Óleo Diesel

O óleo Diesel é um combustível fóssil, derivado do petróleo, formado basicamente por hidrocarbonetos, composto químico formado por átomos de hidrogênio e carbono. Em sua composição existe uma pequena quantidade de oxigênio, nitrogênio e enxofre. Este combustível é muito utilizado em motores de caminhões, tratores, furgões, locomotivas, automóveis de passeio, máquinas de grande porte e embarcações. O mais empregado é o óleo Diesel leve, dodecano, $C_{12}H_{26}$, para motores operando em uma escala superior a 1200 rpm. Taylor (1976) explicita a relação do óleo Diesel, conforme segue.

- Óleo Diesel Leve: $C_{12}H_{26}$ (dodecano);
- Óleo Diesel Médio: $C_{13}H_{28}$ (tridecano);
- Óleo Diesel Pesado: $C_{14}H_{30}$ (tetradecano);

A composição química influi diretamente no desempenho do motor e está relacionada com o tipo de petróleo e com os processos utilizados para a sua produção nas refinarias. Este desempenho está atrelado a algumas propriedades do combustível, como por exemplo, a densidade, volatilidade e viscosidade influenciando diretamente na injeção do combustível, como também, na formação de uma mistura de autoignição (Amadeo, 2006).

A densidade influi diretamente na combustão pela energia liberada e razão estequiométrica que ocasiona variações em emissões de poluentes. Para a viscosidade, destaca-se que um combustível muito viscoso gera perda de carga nos bicos injetores ocasionando queda de pressão. Para combustíveis menos viscosos, o acúmulo de combustível na bomba será maior podendo acarretar problemas futuros (Amadeo, 2006).

O número de cetano (NC) é uma medida da qualidade de ignição do óleo Diesel. Sua obtenção é através de um teste com um motor padrão monocilíndrico. Esta medida representa diretamente o atraso de ignição do combustível dentro da câmara de combustão, de modo que, quanto menor o número de cetano maior será o retardo da ignição. Para motores do ciclo Diesel, ressalta-se que o número de cetano do combustível deve variar entre 40 e 60. O NC elevado favorece a um rápido aquecimento do motor, redução da possibilidade de danificações nos pistões, baixo nível de ruído no motor, como também baixo, índice de emissões de poluentes. Números abaixo de 40 há ocorrência de perda de potência, maior consumo do combustível e fumaça na descarga (Egúsquiza, 2006). Enfatiza-se, que o atraso de ignição influenciará na permanência de uma maior quantidade de combustível na câmara de combustão, não queimando no tempo correto. E como consequência, ocorrerá um mau funcionamento do motor, pois quando a queima acontecer gerará uma quantidade de energia superior àquela necessária. Este excesso de energia força o pistão a descer em alta velocidade pelo sistema, provocando esforços anormais sobre o pistão. Este fator causa danos mecânicos e perda de potência (Egúsquiza, 2006).

2.2.2. Etanol

O etanol é hoje um produto de diversas aplicações no mercado, largamente utilizado como combustível na forma hidratado ou misturado à gasolina e nos dias atuais, ao óleo Diesel.

Este combustível, utilizado nos carros a álcool é incolor, volátil, inflamável e totalmente solúvel em água. É derivado da cana de açúcar, do milho, entre outros, sendo produzido através da fermentação da sacarose. Comercialmente é conhecido como álcool etílico hidratado combustível (AEHC), onde sua composição química é dada por C_2H_5OH . O álcool anidro, ausente de água é constituído de 99,3° INPM. Neste trabalho, o mesmo esteve entre 92,6° a 93,8°, como também a 70° INPM.

Sua composição por possuir uma quantidade menor de carbono em relação ao óleo Diesel emite consideravelmente uma menor quantidade de material particulado (Egúsqüiza, 2011).

2.2.3. Dificuldades na Utilização do Etanol

O emprego deste combustível na mistura com o óleo Diesel em motores de ignição por compressão deve ser de forma cautelosa atentando para as suas características. O intuito é prevenir danos aos componentes do motor favorecendo sempre que possível uma combustão completa. A seguir são citadas algumas limitações, que devem ser levadas em consideração para, por exemplo, o projeto do motor. Amadeo (2006) menciona:

- Possibilidade de contaminação da borracha por solventes. Neste caso, há a necessidade da troca dos materiais dos componentes, tendo em vista a danificação por produtos químicos;
- Baixo poder calorífico inferior do etanol, 26.865 kJ/kg, quando comparado ao hidrocarboneto, 42.450 kJ/kg. Esta diferença leva ao maior consumo de etanol para fornecer uma mesma quantidade de energia de óleo Diesel;
- Alta acidez do etanol, tendo em vista a presença de água e ácidos. Segundo a Agência Nacional do Petróleo a concentração máxima é de no máximo 3,0 mg/100 ml de álcool. A presença da água aumenta

a possibilidade de corrosão e a partir deste fator, prevenções têm que ser adotadas, como por exemplo, tratamento superficial em componentes em contato direto com o combustível;

- Fluido higroscópico. Este combustível absorve a água com facilidade, onde a consequência é a diminuição do poder calorífico acarretando um aumento do consumo;
- Outro fator considerado por alguns autores, um dos mais importantes é o aumento do seu poder corrosivo. A hidratação do álcool pela água influi neste aspecto e alguns componentes do motor fabricado em ferro fundido como, o coletor de escape e silencioso apresentam sua durabilidade prejudicada. Por fim, a mudança do material para um aço inox acaba por encarecer o equipamento.

Tabela 2: Propriedades físico-químicas dos combustíveis (1 atm e 288 K)

| Propriedades | Óleo Diesel | Etanol |
|---|--------------------|---------------|
| Fórmula química principal | $C_{12}H_{26}$ | C_2H_5OH |
| Relação atômica H/C do combustível | 1,85 | 3 |
| Massa molecular [g/mol] | 170 | 46 |
| Massa específica [kg/m ³], 20°C e 1 atm | 830 | 790 |
| Razão ar/combustível estequiométrica [kg/kg] | 15,14 / 1 | 9,07 / 1 |
| Temperatura de auto-ignição [°C] | 254 | 420 |
| Poder calorífico superior [kJ/kg] | 45.590 | 29.726 |
| Poder calorífico inferior [kJ/kg] | 42.450 | 26.865 |
| Limite de inflamabilidade no ar [% por volume] | 0,5-0,7 | 4,3-19 |
| Número de octana | - | 108 |
| Número de cetano | 44-50 | - |
| Calor latente de vaporização (kJ/kg) | - | 903 |
| Calor de combustão de 0,028m ³ de mistura estequiométrica a 1 atm e 15,6°C [kcal/kg] | 49,17 | 52,61 |
| Viscosidade a 300 K [cSt] | 3,71 | 1,78 |

2.2.4. Detonação

O mau funcionamento mencionado no item anterior, conhecido como detonação ou também, como *knock*, pode levar a perda total do motor. O entendimento claro deste fenômeno é fundamental para evitar um possível acontecimento.

Segundo Heywood (1988), o fenômeno da detonação não possui uma explicação completa. A ocorrência do *knock* pode ser entendida como uma rápida liberação de energia contida na mistura ar-combustível, através da ignição espontânea com altas pressões e temperaturas. Essa liberação se dá por uma propagação de chama turbulenta que como resultado há o surgimento de altas pressões locais. E assim, acarretam em ondas de choque que se propagam pela câmara de combustão provocando o ruído característico.

A ocorrência deste fenômeno pode ser devido à resistência do combustível a detonação (propriedades do combustível). E também, pelas características geométricas do conjunto cilindro-pistão, a qual pode não favorecer a um escoamento adequado dos gases dificultando a formação da mistura (Egúsquiza, 2006).

2.2.5. Combustão Ideal

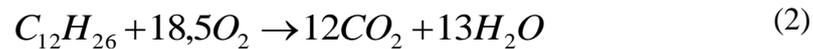
Na combustão perfeita, conhecida como, combustão estequiométrica, todo o oxigênio presente combina-se quimicamente com o combustível e produz dióxido de carbono (CO_2) e vapor de água (H_2O). Na prática a combustão perfeita é impossível de ser atingida. Obtém-se apenas uma combustão completa quando se fornece à câmara de combustão mais ar do que o requerido na teoria. Este procedimento é conhecido como “ar em excesso” e seu controle é a chave indispensável para otimizar a eficiência da combustão. Deve-se lembrar de que a parcela em massa de oxigênio contido no ar ambiente é de 23% (Heywood, 1988).

A relação ar-combustível (A/C) pode ser calculada em base mássica ou em base molar. Por Wylene (1995):

$$(A/C)_s = \frac{m_{ar}}{m_{comb}} \quad (1)$$

Wylen (1995) utiliza a letra “s” para indicar que a relação se refere a 100% do ar teórico, também conhecido como ar estequiométrico.

A equação balanceada da combustão perfeita para o óleo Diesel leve, dodecano é dada por:

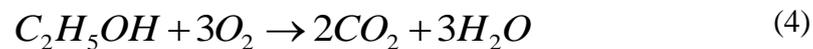


Assim, pode-se encontrar a razão ar-combustível:

$$(A/C)_D = \frac{(18,5 \times 32) / 0,23}{170} = 15,14 kg_{ar} / kg_{\acute{o}leo Diesel} \quad (3)$$

A partir deste valor tem-se então a combustão perfeita para cada quilograma de óleo Diesel leve.

Já para o etanol, a equação balanceada da combustão é dada por:



A partir desta equação tem-se a razão de ar / combustível admitindo os valores das massas molares do oxigênio e etanol sendo 32g/mol e 46g/mol, respectivamente e com 23% da massa de oxigênio em relação ao ar teórico.

$$(A/C)_e = \frac{(3 \times 32) / 0,23}{46} = 9,07 kg_{ar} / kg_{etanol} \quad (5)$$

2.2.6. Atraso da Ignição

O atraso é compreendido pelo intervalo entre a injeção de combustível e o início da liberação de calor. Este retardo é o resultado de uma combinação entre as características do conjunto cilindro-pistão e combustível para uma dada condição

de operação. Para quantificar o atraso, há a necessidade do entendimento dos diversos fenômenos ocorrendo de forma consecutiva e simultânea em relação ao aquecimento do combustível em contato com o ar. Como também, pela formação de uma mistura homogênea adequada para a autoignição (Amadeo, 2006).

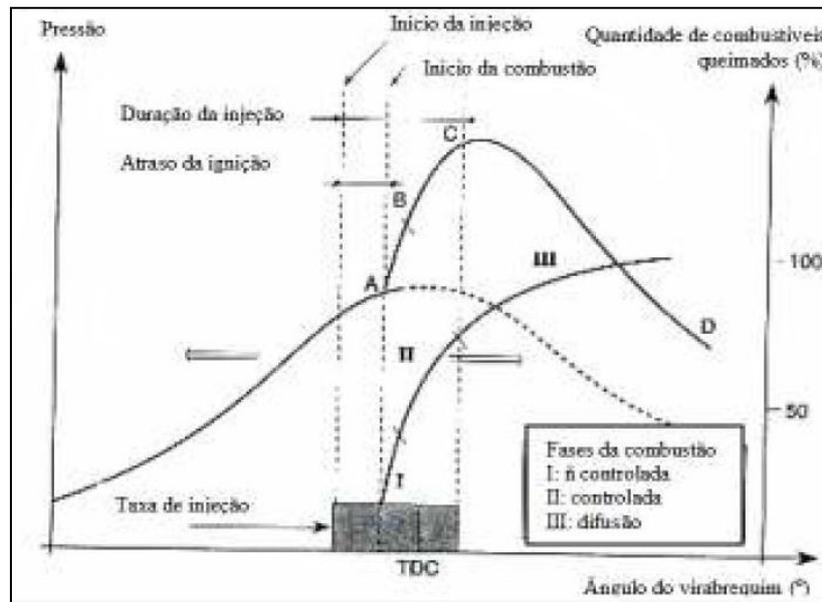


Figura 2: Atraso de ignição, motor Diesel (Guibet, 1999)

Vale ressaltar que a definição do início da combustão é de difícil análise. A avaliação da origem da combustão para um dado ângulo do virabrequim é complexo. No entanto, um método utilizado para os estudos é a curva de pressão no interior do cilindro, conforme Figura 2, medida através de um transdutor de pressão. Nos motores de ignição por compressão o atraso varia entre 1,5 e 10 graus do virabrequim. Citam-se, a exemplo, alguns fatores que levam a esta ocorrência: sistema de injeção, formato da câmara de combustão, rotação e carga (Heywood, 1988).

Para o atraso da ignição, divide-se o fenômeno em duas fases, onde que estas se correlacionam. Estas fases são conhecidas como atraso físico e atraso químico.

2.2.7. Atraso Físico

Este fenômeno é compreendido como o intervalo entre o início da injeção de combustível até a formação da mistura em qualquer ponto da câmara de

combustão. As zonas de misturas formadas aparecem em função do tempo. Estas ocorrem onde a mistura está superaquecida e o combustível completamente vaporizado. Salienta-se que não existe procedimento de cálculo, entretanto mencionam-se tópicos qualitativos (Amadeo, 2006).

- A magnitude deste atraso é semelhante ao atraso químico, concluindo-se então que este não é desprezível;
- A mudança na volatilidade do combustível apresenta um pequeno efeito no atraso físico;
- O atraso físico se correlaciona com o atraso químico, tendo em vista que o mesmo determina a temperatura e a relação ar / combustível nas zonas em que ocorre a autoignição.

Vale destacar que os fenômenos relacionados à difusão e às características hidrodinâmicas da câmara de combustão são mais determinantes em relação à temperatura de vaporização (Amadeo, 2006).

2.2.8. Atraso Químico

Denomina-se o atraso químico como o intervalo de tempo entre a formação da mistura e o início da combustão, sendo função unicamente do número de cetano (NC) de combustível. A evaporação do combustível forma zonas onde a temperatura aumenta rapidamente possuindo uma maior chance de sofrerem a autoignição, conhecidas como reações preliminares (Heywood, 1988).

2.2.9. Processo da Combustão

A combustão em motores Diesel tem características distintas em relação aos motores do ciclo Otto. Para os motores à gasolina, a combustão se propaga através de uma frente de chama, iniciada por uma centelha, proveniente da vela de ignição. Já nos motores de ignição por compressão, a combustão é por difusão, ou seja, se propaga pela câmara de combustão através de vários pontos. Nesta combustão as temperaturas iniciais são mais baixas quando comparadas a combustão do ciclo Otto.

Ressalta-se que para o processo de combustão do ciclo Diesel o ar é admitido e comprimido, onde ao final da compressão o combustível Diesel é injetado. Salienta-se que a combustão do óleo Diesel será através da alta temperatura do ar, pois o óleo Diesel quando injetado encontrará o ar perto das “condições de autoignição” propiciadas pela temperatura, regiões ar-combustível estequiométricas, no volume confinado da câmara de combustão.

A introdução do combustível óleo Diesel pelo bico injetor (pequeno orifício) a alta pressão ocasiona o aumento da velocidade de injeção, que tem por finalidade quebrar o combustível em gotículas para formar o *spray*. Esta névoa, juntamente com o ar escoado para o interior do cilindro será responsável pela formação da mistura apropriada para o início da queima. O correto entendimento sobre a dispersão do combustível no ar é importante, a fim de projetar motores mais eficientes. Isto é devido à forma como ele se mistura com o ar. A eficiência de sua queima, por exemplo, está ligada a emissão de gases poluentes (Heywood, 1988).

Em relação ao processo de queima do combustível em motores do ciclo Diesel, destacam-se duas fases. Estas possuem características bastante distintas, impossibilitando prever corretamente o início e término de cada uma (Moreira, 2000). Abaixo seguem as mesmas.

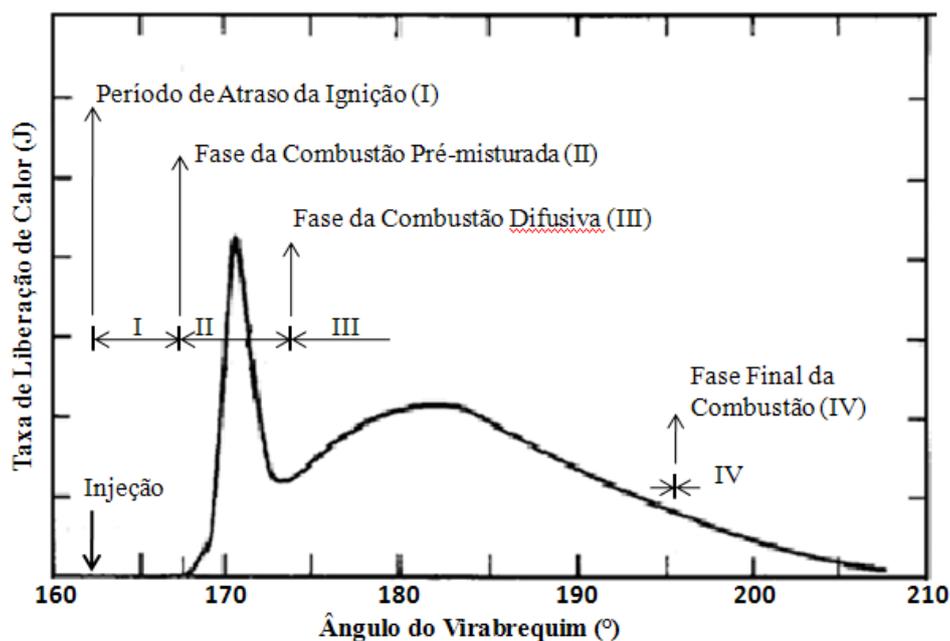


Figura 3: Fases da combustão - motor Diesel (Heywood, 1988)

- I. O momento do atraso da ignição, que conforme citado anteriormente é composto pelos atrasos, químico e físico, sendo caracterizado pelo intervalo entre o início da injeção até o início da combustão.
- II. A combustão pré-misturada ou combustão rápida caracteriza-se pelo intervalo entre o início da combustão indo até o ponto de máxima pressão do ciclo. Neste período, existe uma elevação brusca de pressão devido a certa quantidade de combustível já misturado ao ar queimar de forma acelerada graças à cinética dos gases. E como já dito anteriormente, esta grande elevação de pressão provoca o ruído característico do funcionamento dos motores Diesel (Heywood, 1988).
- III. A combustão difusiva ou combustão controlada sucede o momento da combustão pré-misturada. A combustão se propaga de forma mais lenta, visto que depende da taxa em que a mistura torna-se disponível para queima. Ou seja, sabe-se que uma parcela da mistura ar / combustível não está adequada até o momento da ignição. Nesta fase, a queima é realizada por “frentes de chama”, ou seja, se difunde pela câmara de combustão (Heywood, 1988).
- IV. Processo final da combustão. Esta ocorre de forma difusiva e a queima acontece a uma taxa decrescente à medida que o combustível e o oxigênio são consumidos (Bueno, 2003). Os reagentes e a liberação de energia tornam-se cada vez menores, até o ciclo se completar com a abertura da válvula de exaustão. Nesta etapa, há grande produção de material particulado e uma grande perda de calor por radiação. Salienta-se que a cinética dos gases diminui conforme a temperatura no interior do cilindro decresce durante a expansão.

Em relação à frente de chama em motores de ignição por compressão, Turns (1996) destaca que este fenômeno divide a câmara em gases queimados e não queimados (a queimar). Menciona que a frente de chama é uma zona de intensa reação química e que se distinguem as chamas de pré-misturas e chamas difusivas.

Menciona-se que nos motores Diesel a existência da difusão da chama é devido aos reagentes estarem inicialmente separados, onde a mistura e a reação química ocorrem somente na interface entre o combustível e o ar. Como já retratado, estas chamas ocorrem com diferentes intensidades. Neste caso, ainda existe a formação da mistura durante a autoignição resultando na elevação de pressão na câmara de combustão.

2.2.10. Métodos de Modelagem

A modelagem de fenômenos físico-químicos de processos complexos são condições de partida muito relevantes. O modelo é realizado através de hipóteses simplificadoras para se entender as causas e consequências de um dado processo termodinâmico. Nos dias atuais o seu emprego é fundamental e amplamente utilizado ao redor do mundo.

Modelar, em um contexto geral, envolve a utilização de modelos matemáticos para descrever um processo ou fenômeno físico de um sistema particular. O intuito é adquirir um embasamento inicial da natureza do problema. Na aplicação da engenharia mecânica, melhores dispositivos e componentes de motores podem ter melhoria contínua em seu desenvolvimento.

Mais especificamente, aplicar o modelo significa entender os complexos fenômenos físico-químicos que estão estritamente ligados à conservação de massa, momentum e transporte de energia. O resultado é a conversão química do combustível em trabalho útil gerado através da expansão do gás na câmara de combustão. Cabe mencionar, que estas equações são na maioria das vezes bastante complexas, onde o número de incógnitas é bem maior que o número de equações. Isto leva a adoção de hipóteses a fim de se conseguir solucionar o problema. Destaca-se também para sua resolução a necessidade de softwares com intuito de possibilitar métodos iterativos.

A maior dificuldade dos pesquisadores é elaborar uma formulação correta de uma modelagem precisa. Os resultados encontrados até os dias de hoje fornecem uma boa aproximação no processo de queima como um todo. No entanto, devido à turbulência pelo escoamento dos gases no interior da câmara de combustão, há dificuldade no perfeito entendimento do fenômeno. Isto acarreta a

utilização de submodelos de turbulência, que por fim geram bons resultados, mas aproximados.

Como já retratado, diversos trabalhos, experimentais e numéricos já foram elaborados até os dias atuais, em bancadas dinamométricas e softwares computacionais, respectivamente. Saliente-se que para este último, Heywood (1980), divide a análise numérica em três categorias, o qual o nível de complexidade aumenta conforme se opte por modelos mais robustos. São eles:

- Modelo zero dimensional;
- Quase dimensional;
- Multi dimensional.

A simulação numérica tem se consagrado como uma ferramenta excepcional servindo de auxílio aos projetos de motores, tendo em vista avanços tecnológicos computacionais. O objetivo é investigar os fenômenos químicos decorrentes do processo de combustão em motores de ignição por compressão. No entanto, cabe mencionar alguns métodos para uma aplicação correta e coerente. São eles:

1. Identificar o que se deseja simular, isto é, um equipamento único ou um sistema, para posteriormente traçar os objetivos específicos;
2. Sintetizar os processos para avaliar como ocorrem os escoamentos de fluido, por exemplo, no intuito de se embasar sobre o problema inicial;
3. Uma vez entendido os processos, cabe realizar a modelagem matemática, obedecendo às leis regidas nos fenômenos;
4. Solução numérica, onde nesta etapa há de se ter o número de equações e incógnitas iguais, através das hipóteses ou premissas, adotadas nos estudos;
5. Seleção do código computacional (software) para gerar as sub-rotinas e obter os resultados;
6. Validação do resultado com os dados experimentais a fim de avaliar coerência nos valores obtidos;
7. Utilização do código computacional após confirmação dos resultados;

8. Realização do relatório final, apresentando o desenvolvimento envolvido no trabalho, buscando melhorias contínuas.

Através das etapas acima, a correta aplicação para a utilização da simulação numérica é com intuito de se entender qual é o escopo de trabalho que será realizado, qual o investimento inicial para viabilizar o projeto e por fim estimar o prazo para finalização do mesmo.

Cabe considerar pelo fato de sua importância, que a análise numérica não substitui os trabalhos experimentais. E sim é uma ferramenta extremamente importante utilizada em paralelo aos experimentos. O objetivo é validar os resultados e entender com maior profundidade teórica os eventos decorrentes da engenharia como um todo.