

8

Resultados das velocidades de propagação de chama turbulentas no interior do cilindro do motor

Neste capítulo, primeiramente serão apresentadas de forma consolidada as curvas típicas obtidas para a evolução do raio de chama durante a queima e para as velocidades instantâneas de propagação de chama turbulentas no interior do cilindro, em função do ângulo de virabrequim. Em seguida são apresentados os resultados das velocidades de propagação de chama no interior do cilindro obtidas para os diferentes combustíveis e condições operacionais. Por fim, apresentam-se as influências dos componentes nas velocidades de propagação de chama, seguindo a forma adotada nos capítulos anteriores, utilizando os gráficos triangulares típicos da técnica de Planejamento e Análise de Misturas.

8.1.

Curvas típicas características da evolução do raio de chama e velocidades instantâneas de propagação de chama turbulentas no interior do cilindro do motor

São apresentadas nas Figuras 8.1 e 8.2, respectivamente a curva da evolução do raio de chama e da velocidade instantânea de propagação de chama turbulenta no interior do cilindro, obtidas para as formulações reduzidas J e D, na condição operacional de 2250 rpm em plena carga. Conforme explanado no Capítulo 4, Figura 4.20, nas curvas da evolução do raio de chama foi representada uma linha de referência correspondente a um diâmetro de pistão ($1D_p$), para melhor percepção da relação entre a duração de queima e as dimensões geométricas da câmara de combustão.

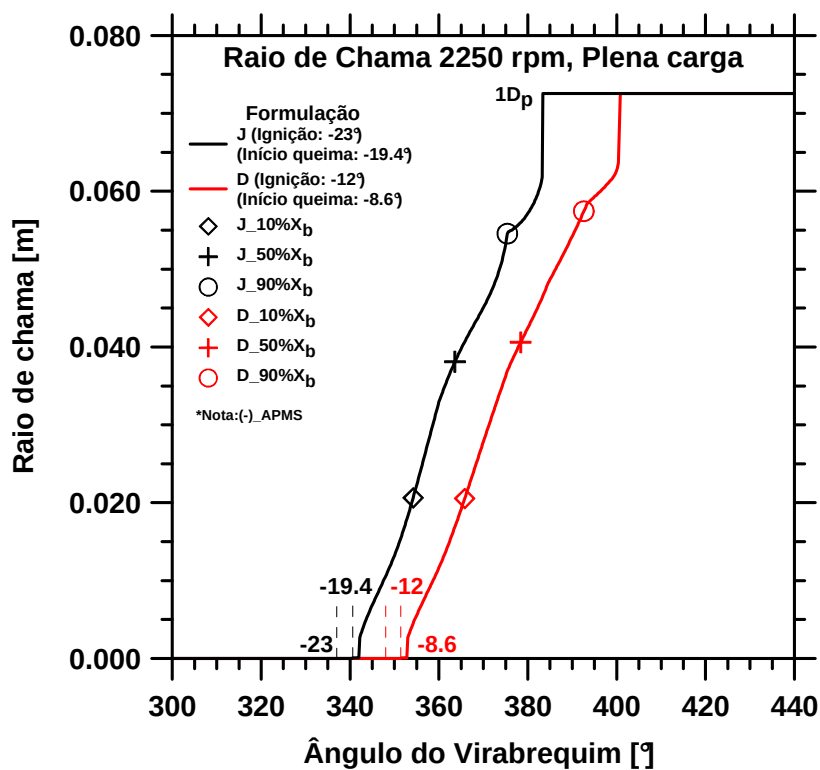


Figura 8.1 – Evolução do raio de chama, formulações J e D a 2250 rpm em plena carga.

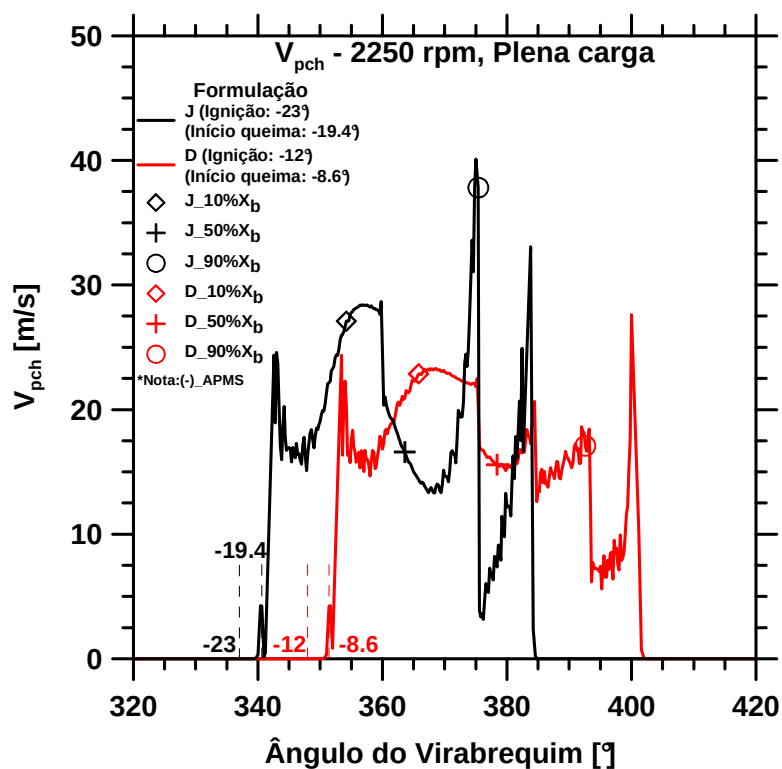


Figura 8.2 – Velocidade de propagação de chama instantânea, formulações J e D a 2250 rpm em plena carga.

Na Figura 8.1, observa-se uma evolução sempre crescente para o raio de chama, com variações de derivadas, que são refletidas no comportamento oscilatório das velocidades instantâneas. Isto ocorre em função da interação da chama com o escoamento no interior do cilindro e com a geometria da câmara de combustão, incluindo o topo do pistão de geometria característica. É possível identificar na Figura 8.1 um patamar horizontal de raio constante diferente de zero após o início de queima, que está provavelmente relacionado com a presença de *squish* neste motor (Figura 4.16). O *squish* induz, durante a compressão, um movimento da mistura não queimada em direção à vela de ignição. A queda acentuada na velocidade de propagação após a passagem do pistão pelo PMS, observada na Figura 8.2, está relacionada com a dinâmica do escoamento no interior do cilindro e maior disponibilidade de espaço para aumento de área de chama com o afastamento do pistão. Nas Figuras 8.1 e 8.2 foram identificadas as posições angulares de virabrequim para 10%, 50% e 90% de X_b . Para estes combustíveis e condição operacional, em 90% de fração de massa queimada os raios de chama já ocupam praticamente toda a câmara de combustão, restando apenas pequenos volumes dispersos de gases não queimados na coroa do pistão, que não são tão bem representados pela propagação da frente de chama esférica contínua. Esta fase final apresenta um comportamento de queima preponderante de chamas de difusão, resultantes do combustível não queimado aprisionado nos vãos e folgas da câmara de combustão.

Na Figura 8.2, nota-se uma semelhança geral na evolução da velocidade instantânea de propagação de chama dos dois combustíveis. Observam-se também algumas variações e deslocamentos, que refletem os diferentes momentos de interação da chama com a geometria da câmara de combustão e com as características do escoamento em seu interior, em função do combustível e calibração diferenciada do avanço de ignição. Estas tendências gerais se repetiram para os demais combustíveis e condições operacionais com variações relacionadas às características de cada caso.

A Figura 8.3 mostra as evoluções dos raios de chama para a formulação D, nas condições operacionais de 2250, 3875 e 5500 rpm em plena carga. Foi representado um detalhamento do início de queima, no qual se observam com maior clareza os patamares horizontais de raios de chama constantes e diferentes de zero, logo após o início de queima. Estes patamares horizontais sugerem que a

modelagem realizada está captando o efeito de *squish*, induzido pelas características de projeto desta câmara de combustão. Neste momento, o escoamento da mistura não queimada está sendo direcionado para a vela de ignição, de tal forma que a frente de chama permanece estacionária por algum período de tempo. Na legenda da Figura 8.3 foram registrados os intervalos angulares calculados para o *squish* nas diferentes velocidades de rotação. Nota-se uma coerência, na medida em que o intervalo angular de *squish* é crescente com a rotação, o que reforça a sensibilidade da modelagem para captar o tempo de ação do *squish*.

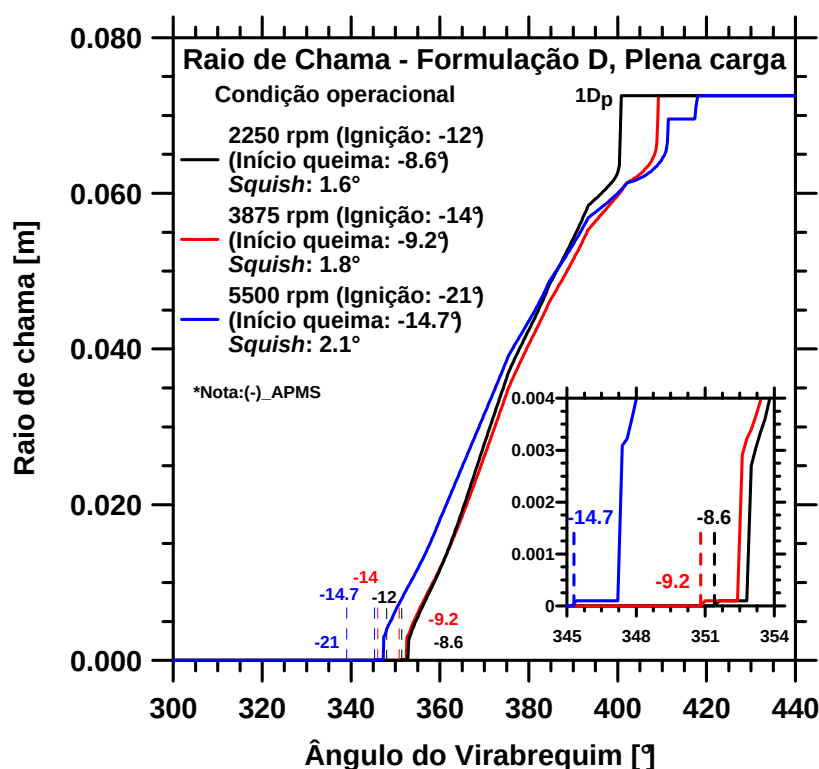


Figura 8.3 – Evolução do raio de chama, com detalhamento do *squish*, formulação D a 2250, 3875 e 5500 rpm em plena carga.

Observa-se também no detalhe da Figura 8.3 que, após o período de *squish*, há um aumento rápido do raio da chama livre, até que a chama começa a interagir com as paredes da câmara de combustão, alterando o comportamento de evolução do raio de chama através da mudança de derivada.

8.2.

Resultados das velocidades de propagação de chama turbulentas para os diferentes combustíveis e condições operacionais

Para efeito de apresentação de resultados e comparação entre as velocidades de propagação de chama dos diferentes combustíveis nas diferentes condições operacionais, utilizou-se a velocidade média no intervalo angular de 10 até 90% de fração de massa queimada. Esta metodologia foi adotada para eliminar a influência do início e fim do processo de combustão na velocidade de propagação de chama. O intervalo angular de 0 a 10% de fração de massa queimada corresponde ao intervalo de desenvolvimento de chama, que, conforme visto anteriormente, pode ser altamente influenciado pelo escoamento próximo da vela no momento da centelha, de forma aleatória e descolada do comportamento médio dentro do cilindro. Além disso, cada combustível possui um retardo da ignição diferente, influenciado pelas condições termodinâmicas no momento da ignição (ver Capítulo 7, Figuras 7.16(a-b) e 7.18(a-b)), de tal forma que o retardo de ignição pode ser independente da velocidade de propagação de chama. Por sua vez, no intervalo angular de 90 a 100% de fração de massa queimada, espera-se que a chama já tenha preenchido praticamente todo o volume do cilindro e o fim de queima se processa em pequenos volumes de mistura não queimada remanescentes. Desta forma, a aproximação pela propagação de frente de chama esférica se afasta do comportamento físico no início e fim de queima, podendo distorcer os resultados.

São apresentados nas Tabelas 8.1 e 8.2 os resultados das velocidades médias de propagação de chama turbulentas para os diferentes combustíveis e condições operacionais, respectivamente para as condições de plena carga e carga parcial.

Tabela 8.1 – Velocidades médias de propagação de chama nas condições de plena carga, no intervalo de 10 a 90% de fração de massa queimada ($\bar{V}_{pch(10-90\%)}$).

Formulação	Velocidades médias de propagação de chama em plena carga [m/s]		
	2250 rpm	3875 rpm	5500 rpm
A	19,48	28,72	37,33
B	18,66	27,47	37,26
C	18,98	29,12	37,97
D	18,54	28,69	37,55
E	19,65	28,12	37,85
F	-	26,31	35,59
G	19,91	29,86	37,96
H	19,36	27,98	37,32
I	18,61	25,45	37,12
J	21,01	28,01	35,33

Tabela 8.2 – Velocidades médias de propagação de chama nas condições de carga parcial, no intervalo de 10 a 90% de fração de massa queimada ($\bar{V}_{pch(10-90\%)}$).

Formulação	Velocidades médias de propagação de chama em carga parcial [m/s]		
	1500 rpm	2250 rpm	3875 rpm
A	14,04	17,92	24,79
B	13,69	17,80	24,96
C	14,12	18,28	26,79
D	13,44	19,48	25,86
E	14,67	19,26	26,22
F	12,59	18,80	25,30
G	13,27	18,38	26,06
H	12,17	19,55	26,79
I	11,20	19,56	25,15
J	13,67	19,45	24,50

Não se encontram na literatura dados extensos e consolidados de velocidades de propagação de chama em motores, principalmente no caso de motores comerciais modernos. As ordens de grandeza dos resultados encontrados no presente trabalho estão coerentes entre si nas diferentes condições operacionais. As velocidades aumentam com a rotação e, em menor escala, com a carga do motor. Observam-se também variações consistentes com as diferentes calibrações do avanço de ignição adotadas, conforme será analisado na próxima seção, referente à influência dos componentes nas velocidades.

De forma coerente, as velocidades encontradas apresentam a mesma ordem de grandeza e são superiores às velocidades reportadas na literatura para motores de teste monocilindros, de geometria de câmara de combustão simples e razões de

compressão baixas. Estas velocidades foram obtidas utilizando técnicas de visualização e rotações baixas (Heywood, 1988; Groff & Matekunas, 1980). Velocidades médias de propagação de chama foram também calculadas usando a duração total de combustão (0 a 100% de X_b), a velocidade de rotação do motor e a distância entre a posição da vela e o raio da borda do pistão na posição angular referente ao fim de queima. Os valores destas velocidades apresentaram coerência com os valores das velocidades médias calculadas a partir das velocidades instantâneas, indicando a consistência dos resultados.

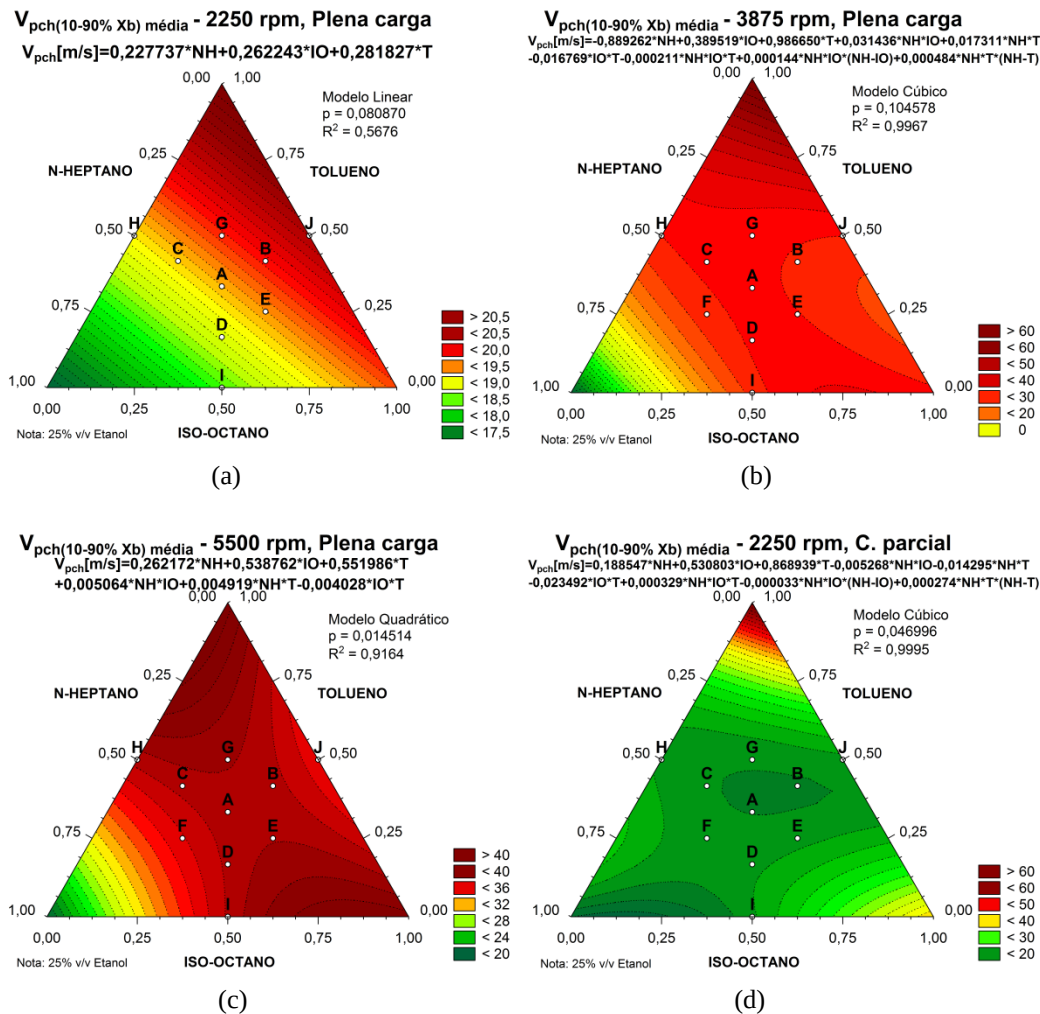
As incertezas envolvidas nos cálculos das velocidades médias de propagação de chama apresentadas nas Tabelas 8.1 e 8.2 foram estimadas. Para tanto foram calculadas as velocidades do combustível de referência na condição operacional de 2250 rpm em plena carga dos ensaios experimentais de três dias diferentes. Através das variações das curvas de pressão médias e dos parâmetros de entrada da metodologia nos ensaios, obteve-se uma incerteza de 0,66 %. Espera-se que os demais parâmetros de combustão, analisados no Capítulo 7, possuam incertezas semelhantes, na medida em que seus cálculos também se basearam na curva de pressão média de 300 ciclos.

8.3.

Influência dos componentes nas velocidades de propagação de chama turbulentas no interior do cilindro do motor

Para estas análises foram utilizadas as velocidades de propagação de chama turbulentas médias apresentadas na Seção 8.2 (Tabelas 8.1 e 8.2) no lugar das velocidades instantâneas para reduzir o volume de dados a serem tratados, contudo sem prejuízo das análises estatísticas que se seguem.

Foi possível obter modelos estatisticamente significativos para todas as condições operacionais de plena carga e para 2250 rpm em carga parcial, conforme pode ser observado nas Figuras 8.4(a-d).



Figuras 8.4(a-d) – Velocidades médias de propagação de chama (10 a 90% de X_b), (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 2250 rpm em carga parcial.

As qualidades dos ajustes foram em geral satisfatórias, com exceção da condição operacional de 2250 rpm em plena carga, que apresentou uma qualidade de ajuste inferior, porém com as mesmas tendências gerais observadas para as demais condições operacionais. Tal fato permite a extração de conclusões também para esta condição. A qualidade de ajuste inferior para 2250 rpm em plena carga, provavelmente está associada à falta do ponto experimental referente à formulação F, conforme já exposto.

De uma maneira geral observa-se um comportamento médio típico. Nota-se pelos coeficientes dos modelos gerados que a influência dos termos lineares é mais significativa que a influência cruzada, o que permite analisar a contribuição de cada componente isolado. No comportamento médio observado, a menor contribuição dos termos não lineares sugere haver fraca sinergia entre os

componentes para modificar significativamente as velocidades de propagação de chama.

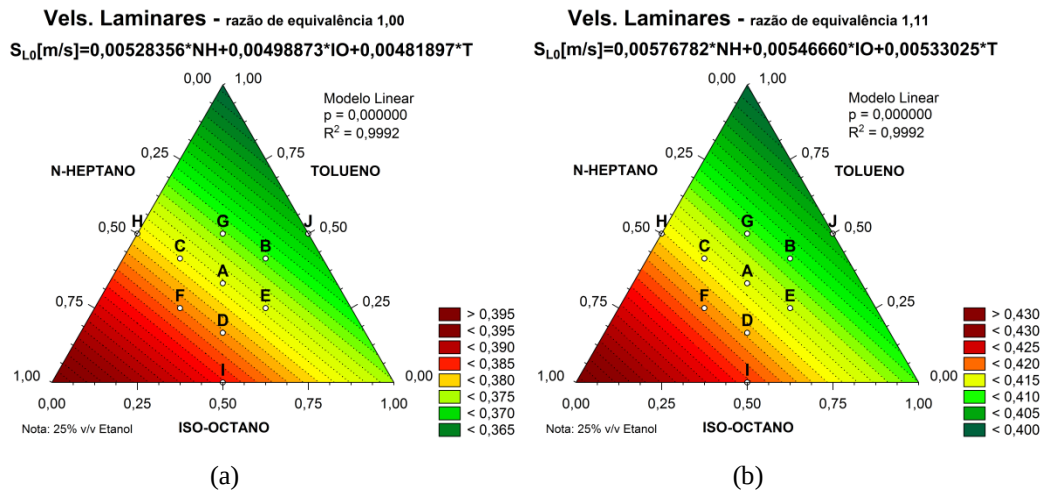
As Figuras 8.4(a-d) indicam que maiores teores de tolueno e iso-octano tendem a elevar a velocidade de propagação de chama turbulenta no interior do cilindro, enquanto que maiores teores de n-heptano tendem a diminuí-la. As figuras e coeficientes dos modelos gerados sugerem maior impacto do tolueno em relação ao iso-octano no aumento da velocidade de propagação, sendo que as contribuições destes componentes estão mais próximas entre si do que em relação à contribuição do n-heptano.

As tendências verificadas estão coerentes com as observadas para o intervalo angular de 10 a 90% de fração de massa queimada (ângulo de queima rápida, Capítulo 7, Figuras 7.23(a-d)), o que reforça o comportamento médio observado. Quanto maiores as velocidades de propagação, menores os intervalos angulares de queima rápida. As tendências verificadas também apresentaram coerência geral com as tendências observadas para o parâmetro m de Wiebe (Figuras 7.20(a-d)), conforme análise do Capítulo 7.

Atualmente não existem dados consolidados na literatura referentes às velocidades de chama laminares de combustíveis nas condições de pressão e temperatura típicas de um motor de combustão interna. No Capítulo 4 foi apresentada a Tabela 4.6 com as velocidades de chama laminares dos componentes puros na condição padrão. Desconsiderando o etanol, nota-se que o n-heptano apresenta as maiores velocidades laminares, tanto para $\phi = 1,00$ como para $\phi = 1,11$. Tolueno e iso-octano apresentam velocidades mais próximas entre si, sendo que para $\phi = 1,00$ a velocidade do iso-octano é levemente superior e para $\phi = 1,11$ há uma inversão de tendência, com o tolueno apresentando maior velocidade. As diferenças entre as velocidades do tolueno e iso-octano estão dentro das incertezas de medição reportadas para as velocidades laminares de chama, conforme exposto na Revisão Bibliográfica.

As Figuras 8.5(a-b), elaboradas com os dados da Tabela 4.7, mostram, para $\phi = 1,00$ e $\phi = 1,11$, as velocidades de chama laminares das formulações na condição padrão, calculadas por ponderação molar das velocidades dos diferentes componentes utilizados, conforme descrito no Capítulo 4. Nota-se a contribuição do n-heptano em elevar a velocidade de chama laminar, enquanto iso-octano e tolueno contribuem para diminuí-la. Observa-se também que a ponderação molar

das velocidades dos componentes utilizados favorece o iso-octano em relação ao tolueno na elevação das velocidades laminares das formulações.

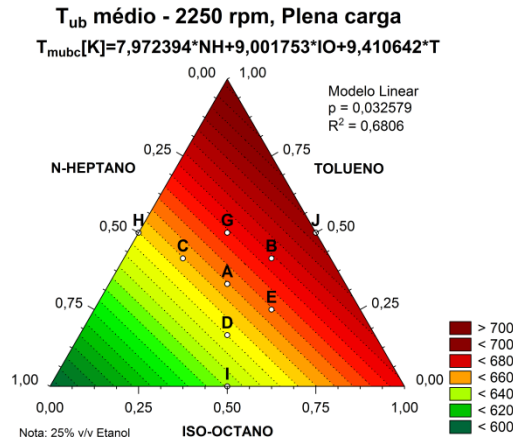


Figuras 8.5(a-b) – Velocidades de chama laminares das formulações na condição padrão, (a) – $\phi = 1,00$; (b) – $\phi = 1,11$.

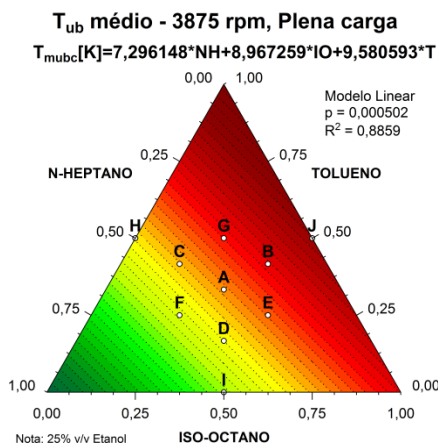
Ao se comparar as tendências das velocidades de propagação de chama turbulentas no interior do motor (Figuras 8.4 (a-d)) com as velocidades de chama laminares das formulações (Figuras 8.5(a-b)), nota-se uma inversão de comportamento. Apesar de apresentar a maior velocidade de chama laminar, o n-heptano contribuiu para reduzir a velocidade de propagação de chama no interior do motor. A maior proximidade entre as velocidades laminares do tolueno e iso-octano, dentro das incertezas dos métodos de medição, dificulta a análise comparativa entre estes dois componentes no que diz respeito à aderência das velocidades de propagação de chama turbulentas com as velocidades de chama laminares. A maior proximidade entre os coeficientes destes componentes nos modelos gerados para as velocidades de propagação de chama está em sintonia com a maior proximidade das velocidades de chama laminares.

O comportamento observado sugere que a otimização da calibração do motor, nas condições operacionais onde a ocorrência de detonação foi susceptível (2250, 3875 e 5500 rpm em plena carga), desempenha um papel preponderante na velocidade de propagação de chama no interior do cilindro ao melhorar as condições gerais para a combustão das formulações com maiores teores de tolueno e iso-octano. Os maiores avanços de ignição calibrados (Figuras 6.6(a-c)) elevaram as pressões médias de combustão (ver Capítulo 7, Figuras 7.9(a-c)) e as

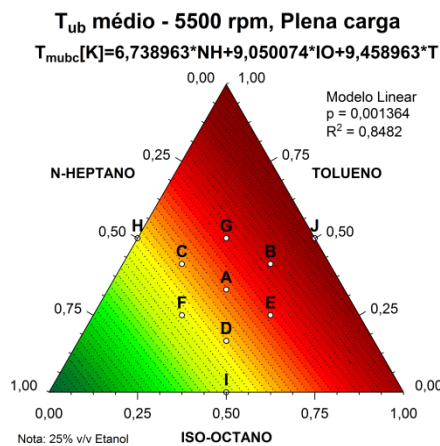
temperaturas médias dos gases não queimados durante a combustão destas formulações (T_{mubc}), observadas nas Figuras 8.6(a-c), favorecendo o aumento das velocidades de propagação.



(a)



(b)



(c)

Figuras 8.6(a-c) – Temperatura média dos gases não queimados durante a combustão (T_{mubc}), (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga.

Para estes componentes de octanagens mais elevadas, o tolueno foi mais efetivo que o iso-octano na elevação das velocidades de propagação. Deve-se observar que, neste caso, o comportamento é suportado pelo fato do tolueno apresentar as tendências de pressões médias de combustão e temperaturas médias dos gases não queimados superiores. Estas, por sua vez, estão relacionadas com os maiores avanços calibrados (Figuras 6.6(a-c)), níveis mais elevados de poder calorífico por kg de ar estequiométrico (Figura 6.2) e maiores eficiências volumétricas (Figuras 6.12(a-c)) das formulações com maiores teores de tolueno,

conforme analisado no Capítulo 7. As melhores estabilidades de combustão (Figuras 6.13(a-c)) das formulações com maiores teores de tolueno também favorecem suas maiores velocidades de propagação em relação às formulações com maiores teores de iso-octano. Para as formulações com maiores teores de n-heptano, componente de octanagem mais baixa, as calibrações limitadas pela ocorrência de detonação (menores avanços, Figuras 6.6(a-c)) e condições do escoamento no interior do cilindro se sobrepuseram à velocidade de chama laminar no estabelecimento do comportamento das velocidades de propagação de chama na câmara.

Observa-se que para 2250 rpm em carga parcial, condição que não foi susceptível à detonação, a tendência geral se manteve, ou seja, a contribuição mais significativa na elevação da velocidade de propagação de chama no interior do motor continuou sendo do tolueno, seguido respectivamente pelo iso-octano e n-heptano. Isto ocorreu, mesmo para uma faixa mais restrita de variação dos avanços de ignição calibrados (Tabela AV.1 do Apêndice V). A calibração do motor mais uniforme entre as formulações nesta condição operacional contribuiu para o não estabelecimento de modelos estatisticamente significativos para o avanço de ignição, pressão média de combustão e temperatura média dos gases não queimados durante a combustão. Desta forma, não foi possível comparar as tendências isoladas destes parâmetros com as tendências das velocidades de propagação de chama turbulentas na câmara.

O comportamento observado sugere que a avaliação isolada da velocidade de chama laminar tem uma importância relativa quando se busca otimizar a interação combustível – motor. Na seleção de componentes e desenvolvimento de formulações de combustíveis, a velocidade de chama laminar deve sempre ser associada a outras propriedades físico-químicas dos combustíveis e parâmetros de calibração do motor. Sua importância poderá ser relativamente maior ou menor, a depender da aplicação desejada.

A existência de um comportamento médio semelhante entre as velocidades de propagação de chama turbulentas em diferentes condições operacionais do motor sugere a existência de um padrão funcional na transformação das velocidades de chama laminares dos combustíveis em velocidades de propagação de chama no interior do cilindro. Os resultados apresentados no Capítulo 9 materializam este padrão médio.