

9

Relações para redução das velocidades de propagação de chama turbulentas no motor em velocidades de chama laminares dos combustíveis

Neste capítulo serão apresentadas as relações desenvolvidas, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4, para redução das velocidades de propagação de chama turbulentas no motor em velocidades de chama laminares dos combustíveis na condição padrão. Em seguida, realizando-se o caminho inverso, as velocidades de propagação de chama são reconstruídas a partir das velocidades laminares de cada componente do combustível utilizado. Procede-se a avaliação da influência dos componentes nas velocidades de propagação reconstruídas, comparando-as com as velocidades de propagação calculadas a partir dos dados experimentais do motor, apresentadas no Capítulo 8, avaliando-se também a sinergia entre os componentes.

9.1. Relações de redução

Conforme visto na Revisão Bibliográfica e no Capítulo 4, referente às metodologias utilizadas no presente trabalho, uma das abordagens adotadas pelos programas de simulação de motores para simular a combustão é utilizar as velocidades de chama laminares dos combustíveis na condição padrão. Estas são corrigidas para a condição de temperatura e pressão no motor, utilizando relações e expoentes típicos do regime laminar. Em seguida, corrige-se novamente a velocidade por um coeficiente de ajuste, designado muitas vezes por fator de turbulência, para se calcular a velocidade de propagação de chama, conforme eq. (9.1),

$$V_{pch} = F_T S_{L_0} \left[\left(\frac{T_{ub}}{T_0} \right)^\alpha \left(\frac{P}{P_0} \right)^\beta \right] \quad (9.1)$$

Conforme também visto na Revisão Bibliográfica e no Capítulo 4, de uma maneira geral é bem estabelecida uma dependência com o expoente 2 para a temperatura, independente do regime de combustão. Por sua vez, os expoentes reportados para a pressão variam de acordo com o combustível e razão de equivalência (Kuo, 2005), porém os dados de literatura para diferentes combustíveis e seus componentes são limitados a faixas de pressão inferiores às encontradas nos motores.

Não existem comprovações de que a dependência de pressão, representada pelo seu expoente de regime laminar na eq. (9.1) seja mantida nas condições de pressão, temperatura e turbulência típicas do motor de combustão interna. Também não estão disponíveis relações capazes de permitir uma estimativa da velocidade de propagação de chama no interior do motor a partir das velocidades de chama laminares dos combustíveis, que levem em conta simultaneamente: condição operacional; calibração do motor otimizada; turbulência e condições de pressão e temperatura dos gases não queimados no interior do cilindro. Neste capítulo, tais relações são apresentadas e, conforme descrito no Capítulo 4, assumem a forma da eq. (4.48),

$$V_{pch} = S_{L_0} Re_{ad_r}^{\xi} \left(\frac{T_{ub}}{T_0} \right)^{\alpha} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\beta} \quad (4.48)$$

Deste modo, buscou-se a obtenção de relações simples, que possam ser utilizadas a partir de dados experimentais em motor, sem a utilização de parâmetros de difícil acesso, relacionados diretamente com a turbulência e combustão no interior do motor. As influências das características de combustão e turbulência estão representadas em conjunto pelas dependências com a pressão, temperatura e pelo Reynolds de admissão do motor.

Conforme também descrito no Capítulo 4, com o intuito de se construir relações mais gerais, válidas para uma ampla faixa de condições operacionais e diferentes combustíveis, o desenvolvimento foi realizado considerando todas as rotações avaliadas e todos os combustíveis testados. Foi observado um comportamento físico diferenciado para as duas cargas utilizadas, cada qual com razões de equivalência diferentes, de tal forma que foram obtidas duas relações, uma para carga parcial ($\phi = 1,00$) e outra para plena carga ($\phi = 1,11$).

Na Tabela 9.1 são apresentados os resultados para os expoentes de pressão e Reynolds de admissão dos diferentes combustíveis, para carga parcial e plena carga, juntamente com seus valores médios, obtidos de acordo com o procedimento descrito no Capítulo 4.

Tabela 9.1 – Expoentes das relações de redução encontrados para Reynolds e pressão com as diferentes formulações em plena carga e carga parcial.

Formulação	Expoentes das relações de redução para Reynolds e pressão			
	$Re_{ad_r}(\xi)$ plena carga	$Re_{ad_r}(\xi)$ carga parcial	$P(\beta)$ plena carga	$P(\beta)$ carga parcial
A	0,82	0,89	0,02169	-0,02404
B	0,82	0,96	0,00110	-0,02880
C	0,77	0,87	0,03693	-0,00601
D	0,77	0,86	0,03757	-0,00837
E	0,75	0,93	0,01459	-0,01272
F	0,78	0,81	0,03763	-0,00881
G	0,79	1,04	0,01706	-0,02469
H	0,67	0,95	0,04462	-0,01085
I	0,70	0,90	0,04357	-0,01402
J	0,62	0,94	0,00121	-0,01697
Média	0,749	0,915	0,02560	-0,01553

Ficam evidenciadas as dependências características com o Reynolds de admissão e a pressão para todos os diferentes combustíveis avaliados, com mudança nos patamares dos expoentes nas duas diferentes cargas. Observam-se as proximidades entre os expoentes dentro de cada carga, permitindo a extração de um comportamento médio típico de plena carga e outro de carga parcial. O comportamento médio é representado pelos expoentes médios, também apresentados na Tabela 9.1. Os expoentes médios encontrados para a dependência com Reynolds foram de $\xi = 0,75$ em plena carga e $\xi = 0,92$ em carga parcial. Os expoentes médios encontrados para a dependência com a pressão foram $\beta = 0,026$ em plena carga e $\beta = -0,016$ em carga parcial.

Assim, foi possível desenvolver as eqs. (9.2) e (9.3), que relacionam as velocidades de propagação de chama turbulentas no interior do motor, no intervalo angular de 10% a 90% de fração de massa queimada, com as velocidades de chama laminares dos combustíveis na condição padrão, tendo como dados de entrada as pressões e temperaturas da mistura não queimada e o Reynolds de admissão reduzido,

$$V_{pch_{plc}} = S_{L_0} Re_{adr}^{0,75} \left(\frac{T_{ub}}{T_0} \right)^2 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0,026} \quad (9.2)$$

$$V_{pch_{cp}} = S_{L_0} Re_{adr}^{0,92} \left(\frac{T_{ub}}{T_0} \right)^2 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{-0,016} \quad (9.3)$$

As eqs. (9.4) e (9.5) foram utilizadas para calcular os valores das velocidades de propagação de chama reduzidas (adimensionais),

$$V_{pchr_{plc}} = \frac{V_{pch_{plc}}}{S_{L_0} Re_{adr}^{0,75} \left(\frac{T_{ub}}{T_0} \right)^2 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0,026}} \quad (9.4)$$

$$V_{pchr_{cp}} = \frac{V_{pch_{cp}}}{S_{L_0} Re_{adr}^{0,92} \left(\frac{T_{ub}}{T_0} \right)^2 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{-0,016}} \quad (9.5)$$

onde $V_{pchr_{plc}}$ e $V_{pchr_{cp}}$ são, respectivamente, as velocidades de propagação de chama reduzidas em plena carga e carga parcial. Os valores médios calculados para as velocidades de propagação de chama reduzidas no intervalo angular de 10 a 90% de fração de massa queimada com cada formulação, em plena carga e carga parcial, são apresentados na Tabela 9.2.

Tabela 9.2 – Velocidades de propagação de chama reduzidas médias (10 a 90% de X_b) com as diferentes formulações em plena carga e carga parcial ($\bar{V}_{pchr(10-90\%)}$).

Formulação	Velocidades de propagação de chama reduzidas médias			
	Plena carga	Desvio % para unidade	Carga parcial	Desvio % para unidade
A	1,0080	0,8023	1,0084	0,8450
B	0,9447	-5,5349	1,0010	0,1013
C	1,0676	6,7580	1,0696	6,9584
D	1,0726	7,2583	1,0659	6,5922
E	0,9910	-0,8996	1,0606	6,0567
F	1,0744	7,4397	1,0673	6,7265
G	0,9996	-0,0435	1,0275	2,7464
H	1,0971	9,7091	1,0607	6,0704
I	1,0985	9,8544	1,0430	4,2959
J	0,9650	-3,4975	1,0412	4,1205
Média	1,0318	3,1846	1,0445	4,4513

Na Tabela 9.2, quanto mais próximo o valor da velocidade reduzida média da unidade, melhor a qualidade da redução. Os valores apresentados evidenciam a qualidade das expressões de redução desenvolvidas, com desvios máximos de 9,85 e 6,96% e desvios médios de 3,18 e 4,45%, respectivamente para plena carga e carga parcial.

O comportamento instantâneo das velocidades reduzidas ao longo do intervalo angular adotado (10 a 90% de fração de massa queimada) é exemplificado com a formulação G, pelas Figuras 9.1 e 9.2, respectivamente para plena carga e carga parcial.

Assim como observado na Figura 8.2, referente às velocidades de propagação de chama instantâneas, as variações observadas nas velocidades reduzidas são decorrentes da interação da chama com a geometria do motor e o escoamento no interior do cilindro. A mudança do combustível pode deslocar ou alterar o perfil em função, principalmente, da calibração diferenciada, que proporciona início de combustão em momentos diferentes, o que também modifica a interação da chama com a geometria do motor. Entretanto, nota-se um padrão geral típico, observado a partir da comparação das Figuras 9.1 e 9.2 com as Figuras 9.3 e 9.4, referentes à formulação A. Observa-se que as médias situam-se próximas da unidade, conforme apresentado na Tabela 9.2. Portanto, as relações de redução das velocidades capturam o comportamento médio, mantendo as características físicas da propagação da chama no cilindro.

Para as outras formulações as mesmas tendências foram observadas. É importante notar que as eqs. (9.2) a (9.5) propostas são aplicáveis a todas as formulações.

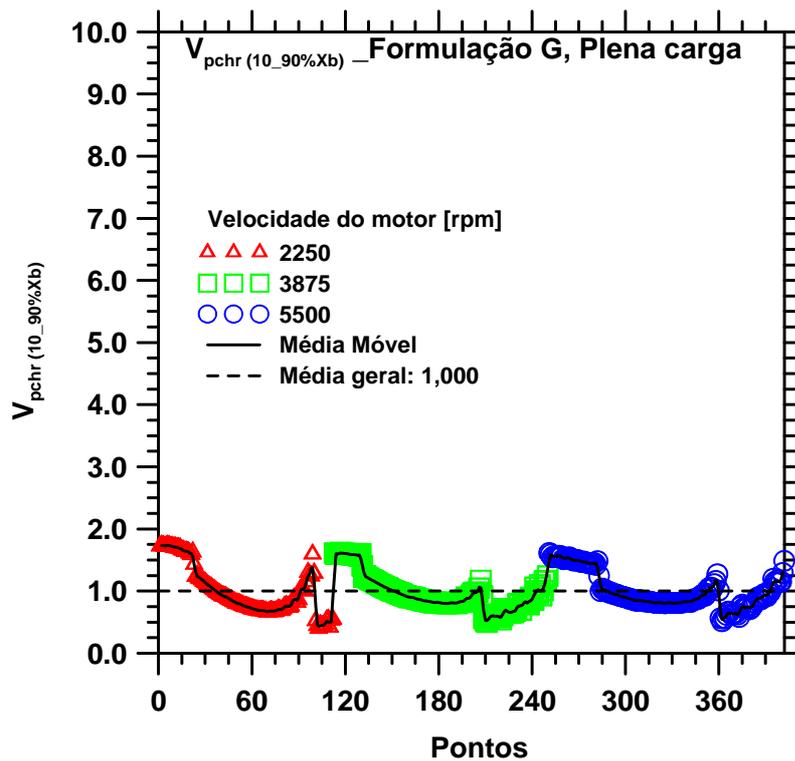


Figura 9.1 - Velocidades reduzidas ao longo do intervalo angular adotado (10 a 90% de X_b), formulação G a 2250, 3875 e 5500 rpm em plena carga.

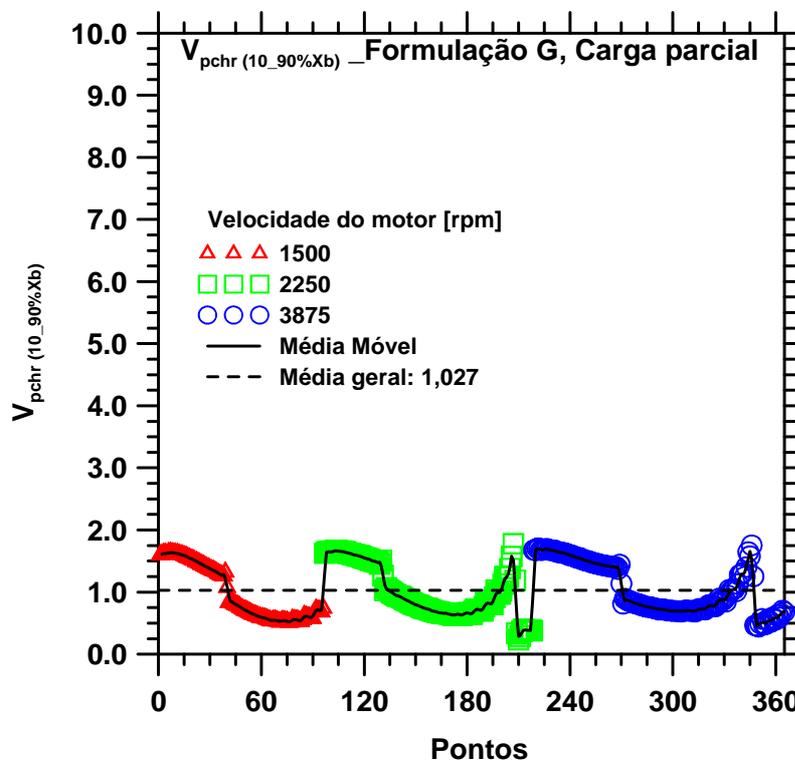


Figura 9.2 - Velocidades reduzidas ao longo do intervalo angular adotado (10 a 90% de X_b), formulação G a 1500, 2250 e 3875 rpm em carga parcial.

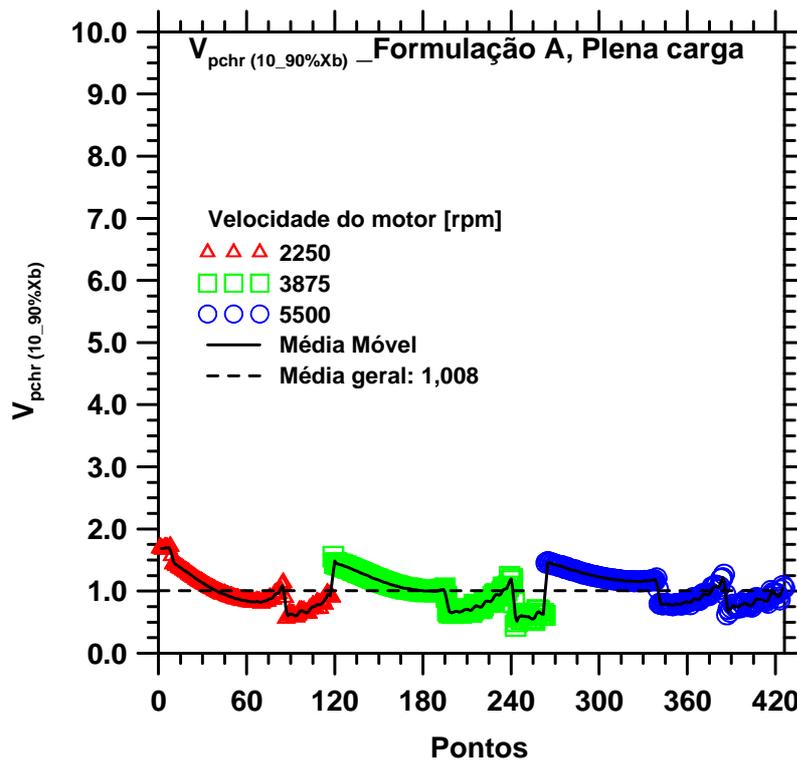


Figura 9.3 - Velocidades reduzidas ao longo do intervalo angular adotado (10 a 90% de X_b), formulação A em 2250, 3875 e 5500 rpm em plena carga.

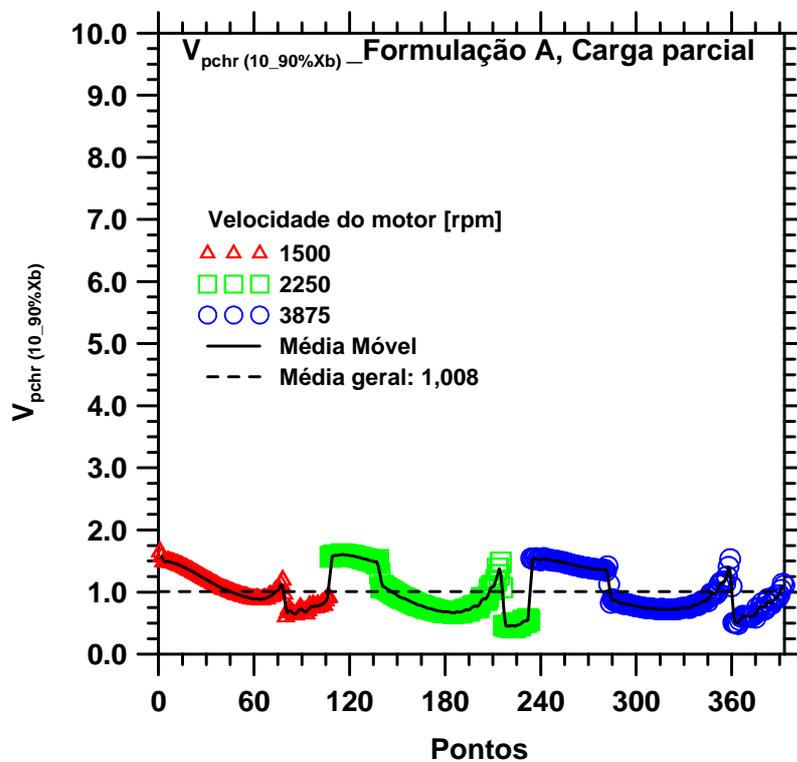


Figura 9.4 - Velocidades reduzidas ao longo do intervalo angular adotado (10 a 90% de X_b), formulação A em 1500, 2250 e 3875 rpm em carga parcial.

Nota-se que as dependências com Reynolds e a pressão embutem a influência da turbulência na modificação das velocidades de chama laminares em velocidades de propagação de chama no interior do motor. É interessante observar que os expoentes obtidos mostram uma dependência com o Reynolds de admissão coerente com dados de literatura para outros motores avaliados. Barros (2003) encontrou expoentes de dependência com Reynolds na mesma ordem de grandeza, entre 0,72 e 1,28, utilizando os dados experimentais de Gaboury et al. (ver Taylor, 1988) com diferentes motores *MIT*.

A dependência encontrada para a pressão foi a mais fraca de todas, apresentando expoentes uma ordem de grandeza menor do que os expoentes normalmente utilizados para cálculos das velocidades de chama laminares em diferentes condições de pressão e temperatura a partir das velocidades na condição padrão (Kuo, 2005; Heywood, 1988). As condições de escoamentos turbulentos característicos dos processos de combustão em motores parecem sobrepor-se à dependência de pressão do regime laminar, inibindo-a. Para plena carga ocorreu uma inversão do sinal do expoente para positivo, o que está coerente com algumas dependências encontradas na literatura para condições turbulentas (ver Sharma, 1984). É importante frisar que os expoentes de dependência com a pressão não guardaram relação com os expoentes previstos pelos modelos cinéticos e dados experimentais de velocidades de chama laminares, o que indica que não se pode utilizar o comportamento laminar com a pressão para previsão da velocidade turbulenta.

Cabe observar que os expoentes de pressão podem ser modificados em função das velocidades laminares de referência adotadas. Porém, testes realizados mostraram que as variações são pequenas e não alteram a importância relativa entre as dependências de pressão, Reynolds e temperatura.

As relações de redução desenvolvidas confirmaram a dependência com o quadrado da temperatura da mistura não queimada, conforme previsto por modelo de Zeldovich (ver Turns, 2000).

Assim, a ausência da constante de ajuste para a modelagem, o valor do expoente de temperatura coerente com a literatura, os valores dos expoentes para o Reynolds de admissão coerentes com dados de motores *MIT* e a baixa influência da pressão (expoentes pequenos) sugerem uma generalidade das relações desenvolvidas para outros motores.

A importância e contribuição das relações desenvolvidas residem na possibilidade de sua utilização para estimativa das velocidades de propagação de chama no interior do motor, a partir das velocidades de chama laminares dos combustíveis na condição padrão. Também podem ser utilizadas no caminho inverso, ou seja, obtenção de estimativas para as velocidades de chama laminares de combustíveis na condição padrão, a partir de dados obtidos com ensaios experimentais em motor, de mais simples execução que os equipamentos e métodos sofisticados tradicionalmente utilizados.

Desta forma, são introduzidas novas possibilidades para estimativas das velocidades de propagação de chama nos simuladores de motores, dispensando-se a necessidade de obtenção do fator de turbulência, da forma usualmente adotada, após a correção da velocidade laminar pela pressão e temperatura utilizando expoentes de regime laminar. O fator de turbulência da forma usualmente adotada é de difícil estimativa a partir de medições dos índices de turbulência no motor (*tumble, swirl e squish*, dentre outros). Conforme foi evidenciado, os expoentes de pressão típicos de regime laminar não são adequados para as condições típicas nos motores.

A qualidade das reduções realizadas sugere que, apesar das simplificações e hipóteses assumidas, a modelagem como um todo conseguiu capturar de forma adequada os aspectos físicos envolvidos no processo de combustão e propagação da chama. A eliminação natural da necessidade de utilização de uma constante de ajuste nas relações de redução reforça a coerência física da metodologia e das relações de redução desenvolvidas.

9.2.

Influência dos componentes nas velocidades de propagação de chama reconstruídas e avaliação de sinergias entre os componentes

Conforme exposto na Revisão Bibliográfica, não existem dados extensos na literatura sobre como as velocidades de chama laminares de diferentes componentes se combinam em mistura, de tal forma que se torna importante avaliar a presença ou não de sinergias que promovam um possível comportamento não linear. Os resultados apresentados no Capítulo 8 sugerem fraca sinergia entre os componentes na velocidade de propagação de chama turbulenta no interior do cilindro.

Para se aprofundar na investigação da existência de sinergias entre os componentes na composição das velocidades laminares de suas misturas, foram utilizadas as velocidades de chama laminares na condição padrão para cada combustível. Estas foram estimadas a partir das velocidades de chama laminares de cada componente, ponderadas pelas frações molares na mistura, assumindo-se um comportamento linear (ver Tabela 4.7 e Figuras 8.5(a-b)). A partir destas velocidades foram calculadas as velocidades de propagação de chama no motor para cada combustível, utilizando as relações desenvolvidas no presente trabalho, eq. (9.2) para plena carga e eq. (9.3) para carga parcial. Observar que as relações de redução foram desenvolvidas adimensionalizando pelas velocidades de chama laminares médias das formulações na condição padrão, em cada razão de equivalência adotada, correspondente a cada carga. No caminho inverso de reconstrução das velocidades de propagação de chama, foram utilizadas as velocidades de chama laminares de cada formulação na condição padrão.

Como dados de entrada foram adotados os valores médios de pressão e temperatura da mistura não queimada adimensionais e Reynolds de admissão reduzido, correspondentes aos intervalos angulares de 10 a 90% de fração de massa queimada das três rotações para cada carga, apresentados na Tabela 9.3. Desta forma, pretendeu-se agrupar as influências das diferentes rotações, obtendo-se velocidades de propagação médias para as condições de plena carga e carga parcial com cada combustível.

Conforme os dados apresentados na Tabela 9.4, de forma coerente, as velocidades de propagação de chama reconstruídas apresentaram patamares próximos das velocidades de propagação de chama calculadas diretamente partir dos dados experimentais para as rotações intermediárias (3875 rpm em plena carga e 2250 rpm em carga parcial, Tabelas 8.1 e 8.2).

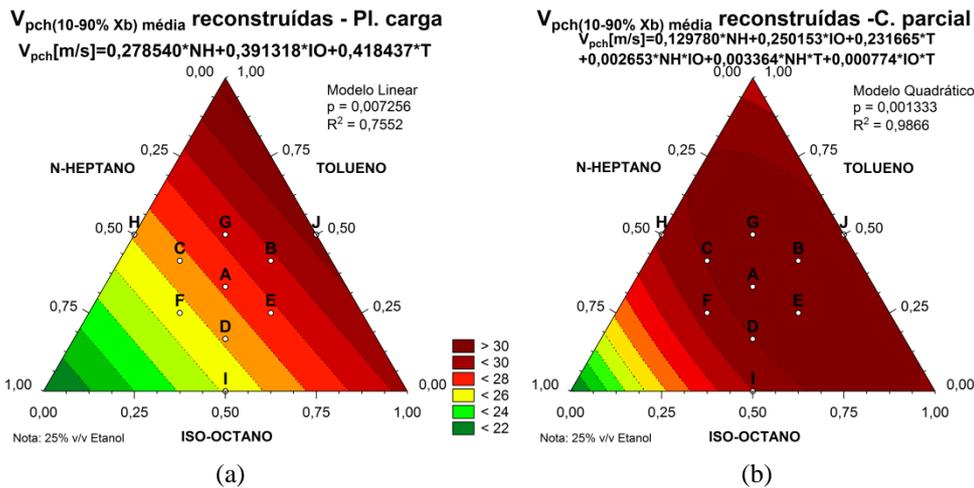
Tabela 9.3 – Parâmetros de entrada para cálculo das velocidades médias de propagação de chama reconstruídas para o intervalo angular de 10 a 90% de fração de massa queimada, em plena carga e carga parcial.

Formulação	$\left(\frac{P}{P_0}\right)$		$\left(\frac{T_{ub}}{T_0}\right)$		$Re_{ad,r}$	
	Plena carga	Carga parcial	Plena carga	Carga Parcial	Plena carga	Carga parcial
A	44,6647	26,6720	2,5016	2,1956	20,8338	14,0808
B	51,0189	27,4876	2,5793	2,2136	20,5021	14,0080
C	39,3950	25,4435	2,4382	2,1889	20,5146	13,6308
D	38,1577	25,4253	2,3933	2,1608	20,7861	13,9104
E	47,7837	27,9213	2,5209	2,2010	21,0475	14,1138
F	32,9889	23,9400	2,3258	2,1331	24,3022	13,6925
G	49,7659	27,8219	2,5715	2,2217	20,5603	13,8900
H	36,7812	24,4385	2,3676	2,1380	21,0082	13,7084
I	33,1652	22,7862	2,3171	2,1094	20,8213	13,5588
J	53,5222	27,7790	2,5583	2,1798	21,5041	14,3405

Tabela 9.4 – Velocidades médias de propagação de chama reconstruídas e calculadas a partir dos dados experimentais (10 a 90% de X_b).

Formulação	Velocidades reconstruídas [m/s]		Velocidades calculadas [m/s] (Tabs. 8.1 e 8.2)	
	Plena carga	Carga parcial	3875 rpm plena carga	2250 rpm carga parcial
A	27,89	19,66	28,72	17,92
B	29,07	19,63	27,47	17,80
C	26,17	19,02	29,12	18,28
D	25,60	19,04	28,69	19,48
E	28,51	19,74	28,12	19,26
F	27,15	18,35	26,31	18,80
G	29,02	19,67	29,86	18,38
H	25,14	18,29	27,98	19,55
I	24,16	17,96	25,45	19,56
J	29,36	19,21	28,01	19,45

Com os dados das velocidades de propagação de chama reconstruídas, foram avaliadas as influências dos componentes nestas velocidades. Foram obtidos modelos estatisticamente significativos tanto para plena carga como para carga parcial. As Figuras 9.5(a-b) mostram a influência dos componentes e os modelos gerados. Notam-se comportamentos médios típicos semelhantes entre as Figuras 9.5(a-b) e entre estas e as Figuras 8.4(a-d), referentes às velocidades de propagação de chama calculadas diretamente a partir dos dados experimentais.



Figuras 9.5(a-b) – Velocidades médias de propagação de chama reconstruídas, (a) – Plena carga; (b) – Carga parcial.

De uma maneira geral o n-heptano contribuiu para diminuir a velocidade de propagação de chama reconstruída, enquanto tolueno e iso-octano tenderam a elevá-la. Observando os coeficientes dos modelos gerados, nota-se que novamente os pesos das contribuições do tolueno e iso-octano em acelerar a velocidade de chama estão mais próximos entre si, enquanto o n-heptano contribui mais fortemente para reduzi-la. Para a condição de carga parcial há uma inversão entre as contribuições de tolueno e iso-octano quando se comparam as figuras e os coeficientes das velocidades calculadas a partir dos dados experimentais e as reconstruídas (respectivamente Figuras 8.4(d) e 9.5(b)). Tal fato pode estar relacionado com a proximidade, dentro da faixa de incertezas reportadas, existente entre as velocidades laminares padrão utilizadas para estes componentes.

A manutenção do comportamento típico médio entre as velocidades calculadas diretamente a partir dos dados experimentais e as velocidades reconstruídas a partir das velocidades laminares dos diferentes combustíveis na condição padrão reforçam as tendências gerais verificadas e a qualidade das relações de redução desenvolvidas. Deve-se observar que os dados utilizados para reconstrução das velocidades incluem as condições operacionais que não apresentaram modelos estatisticamente significativos para as velocidades de propagação calculadas diretamente a partir dos dados experimentais (1500 e 3875 rpm em carga parcial). Isto reforça a generalidade da aplicação do modelo, apesar de contribuir para algumas das diferenças encontradas.

A menor contribuição dos termos não lineares no modelo da condição em carga parcial e a inexistência deles na condição de plena carga sugerem uma tendência de fraca sinergia entre os componentes para modificar tanto as velocidades de chama laminares como as velocidades de propagação de chama no interior do cilindro. Se a sinergia entre os componentes fosse forte, as velocidades de propagação de chama no motor, reconstruídas a partir das velocidades de chama laminares dos combustíveis calculadas linearmente, não conseguiriam reproduzir as tendências gerais médias das velocidades de propagação calculadas a partir dos dados experimentais.

Portanto, as semelhanças de tendências gerais médias encontradas entre as velocidades de propagação de chama calculadas a partir de dados experimentais e as reconstruídas sugerem que as estimativas de velocidades de chama laminares de misturas de componentes na condição padrão podem ser obtidas a partir da combinação linear de suas velocidades individuais, ponderadas pelas frações molares de mistura.

A modelagem desenvolvida para a velocidade de propagação de chama turbulenta no motor segrega a influência das condições operacionais da influência da velocidade de chama laminar, que é função única dos componentes das formulações, diferentemente do que ocorre com os parâmetros da lei de Wiebe, conforme visto no Capítulo 7. Este fato permitiu que se fizesse a conversão das tendências observadas nos gráficos referentes às velocidades laminares dos combustíveis na condição padrão (Figuras 8.5(a-b)) para as tendências observadas nos gráficos desta seção, Figuras 9.5(a-b), das velocidades de propagação de chama no motor.