

5

Resultados e Discussões

Os resultados serão divididos em duas seções, referentes às duas etapas deste trabalho, testes preliminares e testes finais. A primeira etapa, como já mencionado, consiste da avaliação e determinação das misturas (combustíveis), bem como nas condições de operação que serão levadas em conta no momento de escolher os possíveis substitutos do diesel em um processo de ignição por compressão. É importante mencionar que, durante a primeira etapa realizou-se, também, testes com etanol sem adição de aditivo para diferentes razões de compressão ($\approx 20:1$ e $\approx 25:1$), não acontecendo a queima do combustível. A segunda etapa consta, basicamente, da avaliação dos parâmetros da combustão das melhores misturas testadas na primeira etapa.

5.1

Resultados dos Testes Preliminares

Para o melhor entendimento dos resultados, estes serão divididos de acordo com as misturas que foram realizadas com o etanol hidratado ($\sim 93^\circ$ INPM) como se mostra a seguir:

- Testes de Diesel S50 e ED95.
- Testes das misturas de etanol e PEG400.
- Testes das misturas de etanol e PEG600.
- Testes das misturas de etanol e n-butanol.

5.1.1

Testes de Diesel S50 e ED95

Estes testes foram realizados utilizando os combustíveis, Diesel S50 e ED95. No teste realizado com o Diesel S50 se manteve as condições de tempo de injeção, avanço da injeção e a pressão de injeção conforme descrito na Tabela 4.2. Este teste serviu de referência para os testes com ED95. Os testes com ED95 foram realizados para diferentes razões de compressão e diferentes pontos de injeção, como descrito no Capítulo 3. As Tabelas 5.1 e 5.2 mostram um resumo dos resultados obtidos nos diferentes ensaios efetuados.

Tabela 5.1: Resultados dos testes com Diesel S50 e ED95.

Situação	Diesel S50, RC=15,92:1		ED95, RC=15,95:1		ED95, RC=20,65:1		ED95, RC=24,75:1	
	IDI (mm)	Resultado	IDI (mm)	Resultado	IDI (mm)	Resultado	IDI (mm)	Resultado
Combustão	2,40	Sim	1,90	Não	1,90	Não	1,60	Sim
P_Max (bar)	~ 15°	83,20	~ 13°	37,99	~ 15°	50,99	~ 12°	98,00
Combustão	-	-	2,50	Não	3,10	Não	2,40	Sim
P_Max (bar)	-	-	~ 17°	37,14	~ 17°	47,58	~ 15°	109,94
Combustão	-	-	3,60	Não	4,10	Sim	3,20	Sim
P_Max (bar)	-	-	~ 20°	36,57	~ 20°	105,50	~ 17°	116,75
Combustão	-	-	-	-	5,00	Sim	4,30	Sim
P_Max (bar)	-	-	-	-	~ 22°	114,27	~ 20°	121,72
Combustão	-	-	-	-	5,40	Sim	5,10	Sim
P_Max (bar)	-	-	-	-	~ 23°	112,62	~ 22°	133,50
Combustão	-	-	-	-	5,80	Sim	5,60	Sim
P_Max (bar)	-	-	-	-	~ 24°	112,96	~ 23°	136,23
Combustão	-	-	-	-	6,20	Sim	6,00	Sim
P_Max (bar)	-	-	-	-	~ 25°	120,96	~ 24°	140,73
Combustão	-	-	-	-	7,20	Não	6,60	Sim
P_Max (bar)	-	-	-	-	~ 27°	47,33	~ 25°	140,04

Tabela 5.2: Resumo dos parâmetros da combustão para os combustíveis testados (Diesel S50 e ED95).

Combustível	1500 rpm				1750 rpm				1900 rpm			
	IDI (mm)	AI (ms)	ms - PMI	dP_max (bar/ms)	IDI (mm)	AI (ms)	ms - PMI	dP_max (bar/ms)	IDI (mm)	AI (ms)	ms - PMI	dP_max (bar/ms)
Diesel S50	2,40	0,92	0,68	226,11	-	-	-	-	-	-	-	-
	1,90	-	-	-	1,90	-	-	-	1,60	1,66	1,77	135,08
	2,50	-	-	-	3,10	-	-	-	2,40	1,30	0,98	123,45
	3,60	-	-	-	4,10	2,65	1,55	166,14	3,20	1,56	1,26	178,07
	-	-	-	-	5,00	2,47	1,31	149,73	4,30	1,97	1,17	180,21
	-	-	-	-	5,40	2,81	1,03	157,31	5,10	1,83	0,64	250,36
ED95	-	-	-	-	5,80	2,62	0,88	151,70	5,60	1,94	0,72	288,23
	-	-	-	-	6,20	2,87	1,01	158,53	6,00	2,15	0,55	372,42
	-	-	-	-	7,20	-	-	-	6,60	2,06	0,36	240,49

A Figura 5.1 mostra o comportamento da pressão no ensaio usando óleo diesel S50. O pico de pressão ocorre cerca de 0,68 ms após o PMS, como mostrado na Tabela 5.2. As Figuras 5.3 e 5.6 apresentam alguma das curvas de pressão nos processos de combustão com o ED95, quando utilizando as razões de compressão de 20,65:1 e 24,75:1. Ressalta-se que, quando testado para uma razão de compressão 16:1, não se obteve combustão.

É importante mencionar, que a razão de equivalência utilizada no testes com óleo diesel S50, foi a de plena carga para a rotação de 1500 rpm conforme informação das cartas do motor DW10C. Observando a Figura 5.1 e fazendo uma comparação com as curvas de pressão do motor DW10C, pode-se notar que os valores dos picos diferem muito, já que no motor, para a condição referida, o valor do pico de pressão é de 170 bar. Esta diferença notória é ocasionada fundamentalmente devido a dois fatores: pressão da admissão do ar (na MCR 1,1 bar e no motor 1,96 bar); o outro fator é o avanço da injeção principal (na MCR 15° antes do PMS e no motor no PMS). Estes fatores, além da diferença da geometria e homogeneidade da temperatura do ar no interior do cilindro, fazem que exista diferenças no processo de combustão e não se obtenha resultados similares aos do motor de ignição por compressão. Portanto, como se menciona ao longo deste trabalho, a MCR foi utilizada, principalmente, para determinar as melhores misturas que poderiam ser testadas no motor de ignição por compressão.

O tipo de curva apresentado na Figura 5.1, será importante durante os testes com as misturas de etanol e aditivos, já que nesta pode-se observar o que acontece no processo de combustão. Ao longo deste capítulo, pode-se observar a influência do avanço e da relação do compressão, como parâmetros principais, que condicionam os resultados dos diferentes testes realizados.

A Figura 5.2, mostra o processo de ignição e queima do Diesel S50 em um dos testes realizados, sob as condições descritas na Tabela 4.2. Através destas imagens é possível determinar o atraso da ignição de forma direta, o qual é apresentado na Tabela 5.2. Neste teste específico, o atraso da ignição foi de 0,92 ms. Uma vez mais, fazendo referência aos resultado dos testes no motor DW10C, pode-se observar que o atraso da ignição (sob a mesma razão de equivalência e mesma rotação, mas diferentes pressões de admissão e avanço), foi de 0,25 ms. Isto demonstra claramente como os parâmetros antes mencionados tem influência direta nos resultados.

Através da Figura 5.3, referente ao teste com ED95, é possível determinar que há um aumento de 6,75% do valor máximo de pressão, quando o avanço de injeção é alterado de 4,10 mm a 5,40 mm antes do PMS. Quando o ponto de injeção varia de 4,10 mm para 6,20 mm antes do PMS, foi observado um

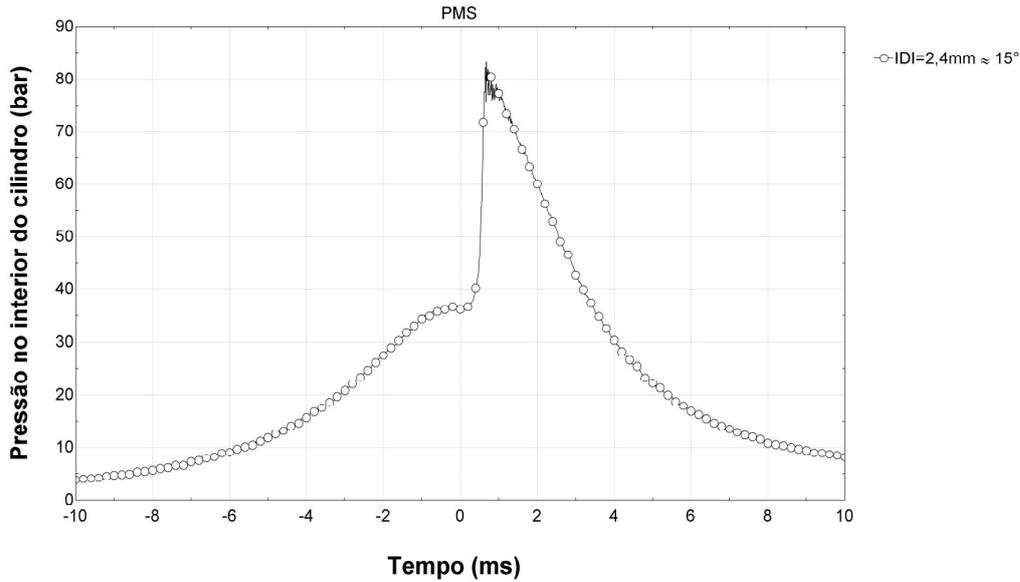


Figura 5.1: Pressão no cilindro para o teste com Diesel S50, 1500 rpm e RC = 15,92:1.

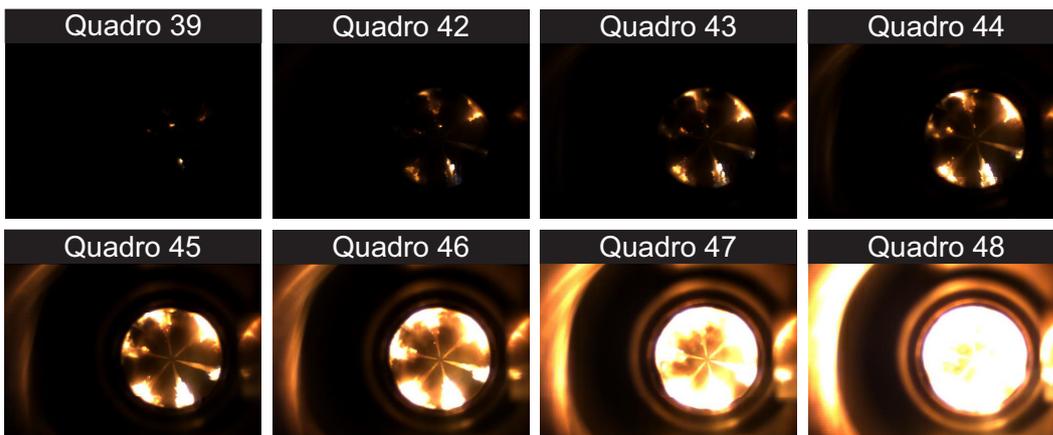


Figura 5.2: Ignição e combustão no teste com diesel S50, 1500 rpm, RC = 15,92:1 e IDI = 2,40 mm (~ 15° - Quadro 11) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

aumento ainda maior de tal parâmetro, de 13%. O pico de pressão para o teste com avanço da injeção de 6,20 mm está situado 1,01 ms após o PMS. O aumento da pressão dos testes apresentados na Figura 5.3 é uma consequência da mudança do avanço da injeção. Pode-se também observar que o início da combustão para os testes com avanços de 5,4 mm e 6,2 mm são praticamente os mesmos. Portanto, pode-se dizer que o único efeito ao adiantar o início da injeção, foi o de gerar um maior pico de pressão e por conseguinte uma maior taxa de variação da pressão, o que pode originar maior ruído.

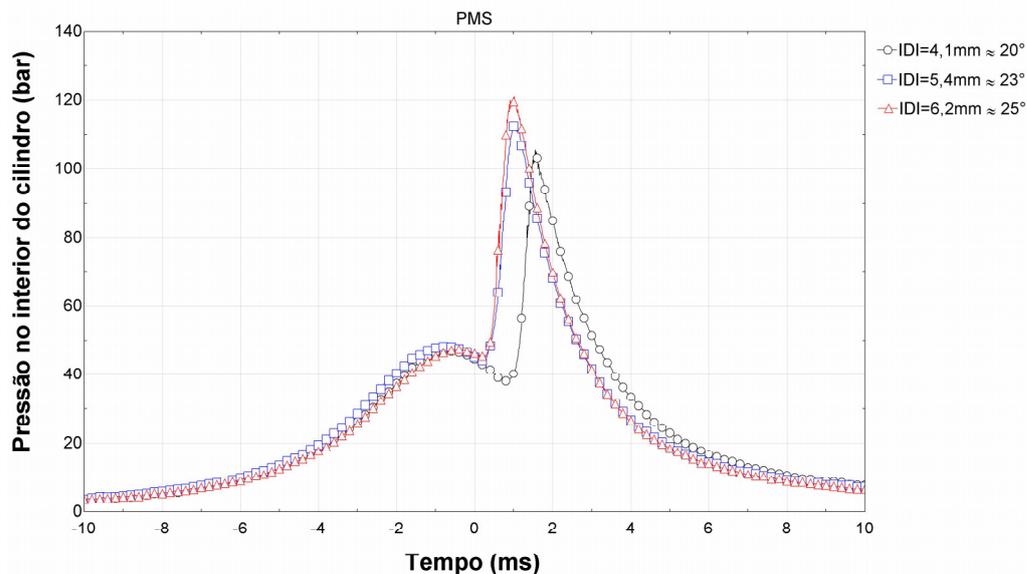


Figura 5.3: Pressão no cilindro para o teste com ED95, 1750 rpm e RC = 20,65:1.

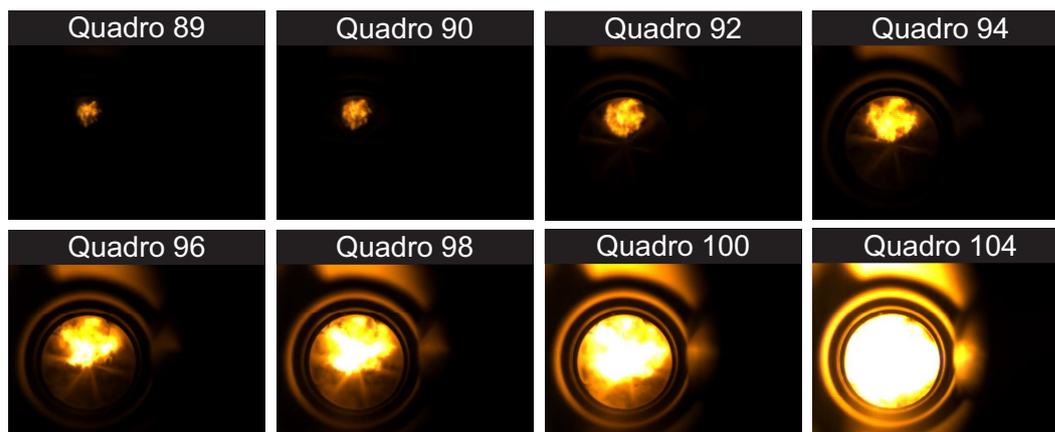


Figura 5.4: Ignição e combustão no teste com ED95, 1750 rpm, RC = 20,65:1 e IDI = 4,10 mm ($\sim 20^\circ$ - Quadro 8) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

As Figuras 5.4 e 5.5, mostram o processo ignição e combustão do ED95 nos testes descritos na Tabela 4.3. Através destas imagens pode-se determinar o atraso de ignição que, para os dois testes apresentados, foi de 2,65 e 2,87 ms, respectivamente para os avanços de injeção de 4,10 e 6,20 mm.

O início da combustão, observado através das Figuras 5.4 e 5.5, acontece em regiões diferentes, o que pode indicar que, em cada caso, aconteceu a melhor condição para o início da combustão do ED95 em diferentes pontos. Este "fato curioso" foi verificado em todos os testes com misturas de álcool e aditivo, sob as mesmas condições de teste e para a mesma mistura. A localização do início

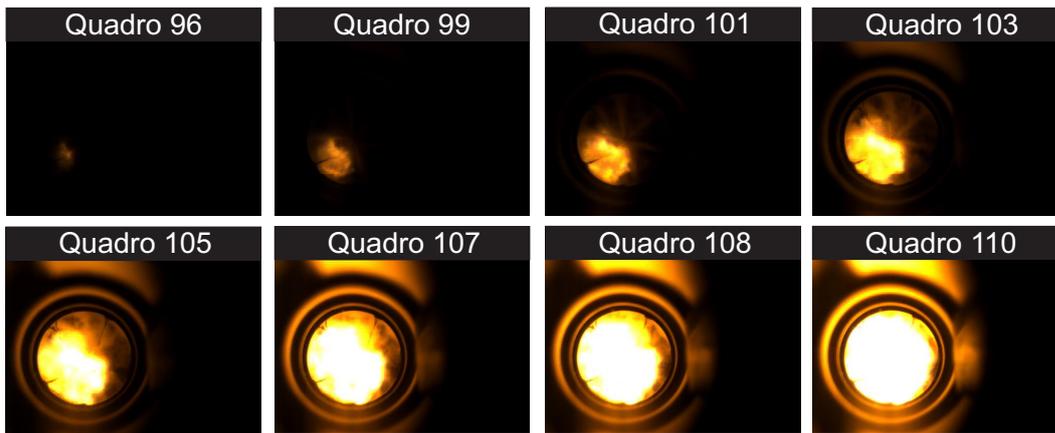


Figura 5.5: Ignição e combustão no teste com ED95, 1750 rpm, RC = 20,65:1 e IDI = 6,20 mm ($\sim 25^\circ$ - Quadro 6) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

da combustão do combustível nem sempre aconteceu na mesma região.

Na Tabela 5.1, se observa, para avanços (parecidos) de 5,0 mm e 5,1 mm e razões de compressão de 20,65:1 e 24,75:1, respectivamente, um aumento de 19,22% do valor máximo de pressão. Assim como o valor máximo da pressão aumentou, devido ao aumento da razão de compressão, aumentou também a taxa de variação de pressão, o que pode originar maior ruído quando levada esta mistura ao motor de ignição por compressão. Também é importante comentar que, para os testes com ED95 e razão de compressão 20,65:1, existe um valor máximo de avanço, após o qual o combustível não entra mais em combustão. Isto se deve ao fato de que, no momento da injeção, o ar no interior do cilindro se encontra a um par de temperatura e pressão em nível baixo do necessário para o início da combustão. Cabe mencionar que, como esperado, o fato de se aumentar a razão de compressão nos testes com ED95, possibilitou que, com avanços menores, se obtivesse combustão. Devido a que no momento da injeção, durante o processo de vaporização e no início da combustão, as condições de pressão e temperatura no interior da câmara de combustão são melhores.

Na Figura 5.6, pode ser visto que existe um aumento de 9,67% do valor máximo de pressão, quando o ponto de injeção varia de 3,2 mm para 4,3 mm antes do PMS. Alterando-se o ponto de injeção de 3,2 mm para 6,0 mm antes do PMS, observa-se um aumento do valor da pressão máxima de cerca de 15%. Este valor da pressão máxima observada para o teste com avanço de injeção de 6,0 mm ocorreu 0,54 ms após o PMS. Fazendo uma comparação com os testes apresentados na Figura 5.3, pode-se dizer, que a mudança do avanço, quando o ED95 é testado com uma razão de compressão maior, tem um efeito sob o valor máximo da pressão. Ao aumentar a razão de compressão, melhoram as condições para a ignição do combustível. Além disso, um avanço da injeção

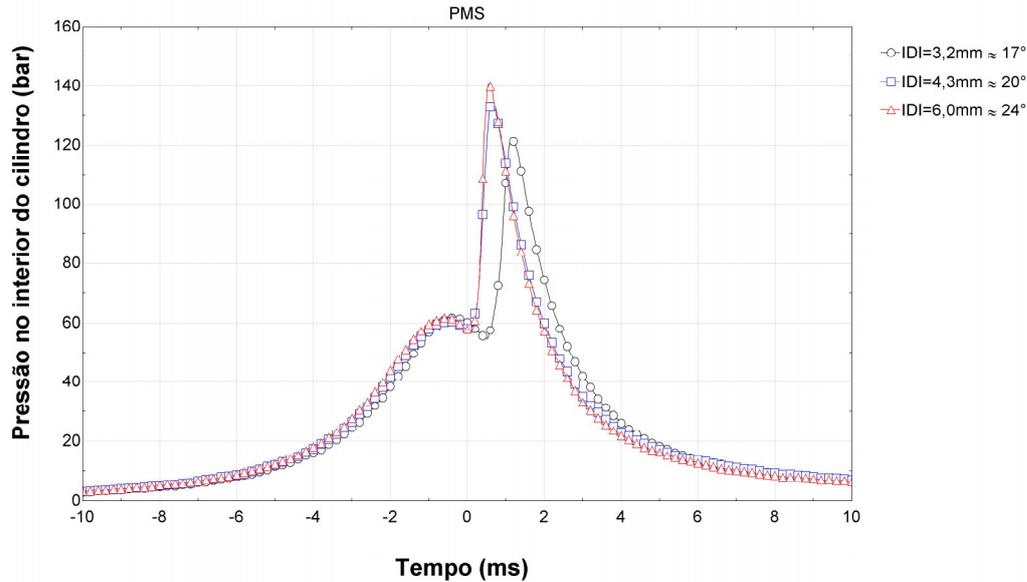


Figura 5.6: Pressão no cilindro para o teste com ED95, 1900 rpm e RC = 24,75:1.

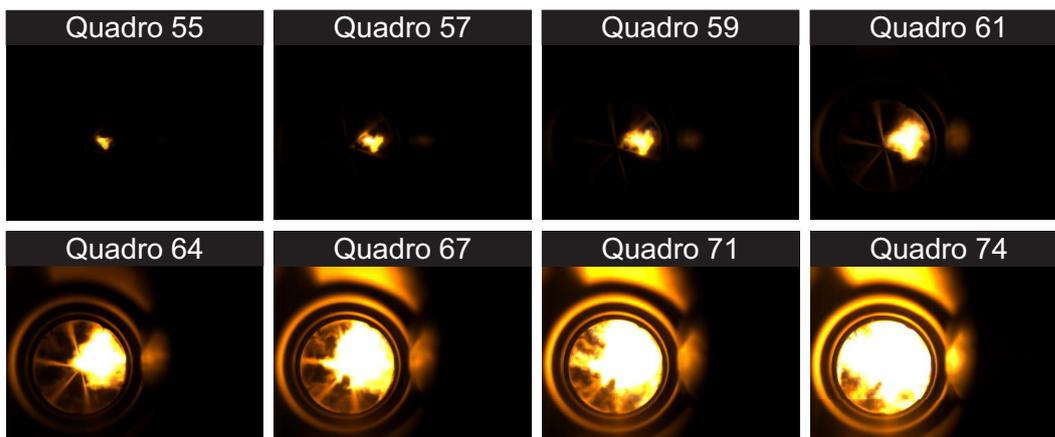


Figura 5.7: Ignição e combustão no teste com ED95, 1900 rpm, RC = 24,75:1 e IDI = 2,40 mm ($\approx 15^\circ$ - Quadro 7) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

maior (mais longe do PMS), possibilita no instante da ignição, que as condições de pressão e temperatura sejam melhores. Quando testado o ED95 nota-se que o intervalo de tempo entre o instante da injeção e o instante da ignição é maior em comparação aos testes com óleo diesel. Isto deve-se a que o calor latente de vaporização é maior e o NC é menor. Portanto, com o objetivo de que a mistura ar - combustível, no final deste intervalo de tempo (injeção - ignição), encontre condições melhores para a ignição, aumenta-se a razão de compressão e/ou o avanço da injeção.

O processo de ignição e combustão descrito nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9,

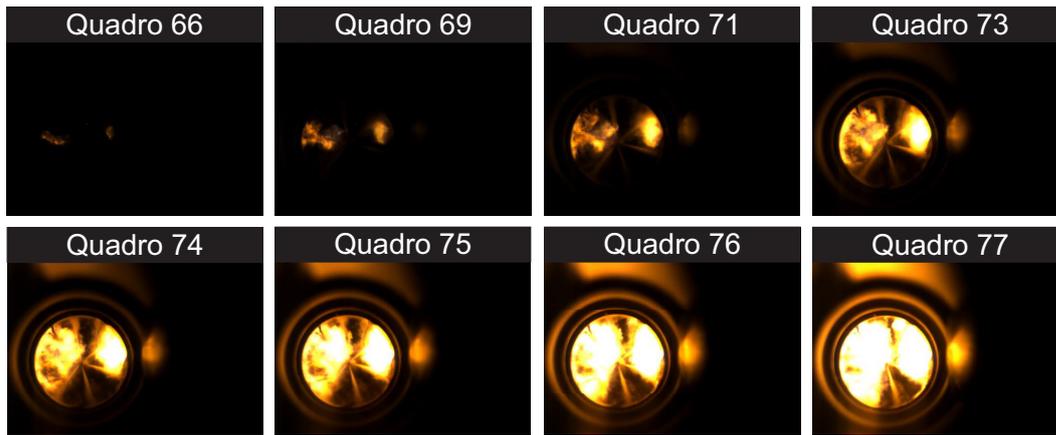


Figura 5.8: Ignição e combustão no teste com ED95, 1900 rpm, RC = 24,75:1 e IDI = 4,30 ($\sim 20^\circ$ - Quadro 6) mm antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

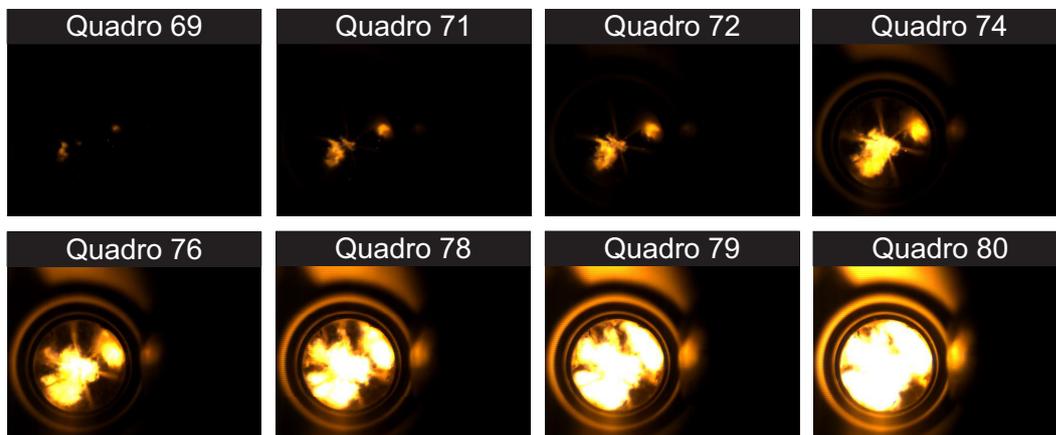


Figura 5.9: Ignição e combustão no teste com ED95, 1900 rpm, RC = 24,75:1 e IDI = 6,60 mm ($\sim 24^\circ$ - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

referem-se aos testes com ED95 e razão de compressão 24,75:1. Através das imagens mostradas, pode-se determinar o atraso de ignição para os testes com avanços de 2,40, 4,30 e 6,60 mm antes do PMS, que são, respectivamente, 1,30, 1,83 e 2,06 ms. O efeito do adiantamento do início da injeção, além de aumentar o atraso da ignição, permitiu também a criação de duas regiões propícias para o início da combustão, como é observado nas Figuras 5.8 e 5.9. Isto pode beneficiar em muito o processo de queima do ED95, já que ao ter duas regiões propícias para o início da combustão, facilita a queima mais rápida e completa do ED95.

Observando as Figuras 5.3 e 5.6, nota-se em primeiro lugar que o fato de se aumentar a razão de compressão também aumentou consideravelmente o valor máximo da pressão. Este parâmetro pode ser um dos limitantes no uso do ED95 no motor, já que quanto maior a razão de compressão, maiores serão

os picos de pressão e, por conseguinte, maiores esforços deverão suportar os elementos do motor. Sabe-se que este combustível, hoje em dia, trabalha em motores Scania com razão de compressão de 28:1. Os motores originalmente trabalham com razão de compressão próxima a 17:1, quando operado com óleo Diesel.

É importante mencionar também o papel que desempenha a mudança do avanço da injeção. Observando as Figuras 5.3 e 5.6, pode-se notar que quanto mais adiantada é a injeção de combustível, maior é o pico de pressão e esta ocorre mais próxima do PMS. Mas isto não é representado no atraso da ignição, já que como mostrado nas Figuras 5.4 até 5.9, quanto maior foi o avanço, maior também foi o atraso da ignição, e em alguns casos não se teve a queima, como mostrado nas Tabelas 5.1 e 5.2. Portanto pode-se dizer, que existe uma faixa na qual o avanço da injeção pode ser alterado a fim de que se tenha a queima do combustível. Este parâmetro será fundamental, já que pode otimizar o processo de combustão e preservar a vida útil do motor.

A faixa na qual o avanço pode ser alterado, é maior quanto maior é a razão de compressão, devido a que os valores de pressão e temperatura do ar, no instante da injeção, são maiores. Portanto, uma maior razão de compressão, permite ao profissional que realiza a calibração do motor, ter maiores opções na procura do avanço ótimo que garanta uma boa queima, preservação dos componentes do motor e também uma menor emissão de poluentes ao meio ambiente.

Além da mudança do avanço e a razão de compressão, pode ser também alterado o processo de injeção. Atualmente os motores trabalham com multiples injeções. Neste trabalho, em todos os testes, foi realizada uma única injeção. O fato de injetar uma única vez, uma quantidade superior em 80% (massa) ao processo de combustão, de combustível com um numero de cetano menor que o do óleo Diesel, pode originar queima incompleta, como consequência da não completa vaporização do combustível injetado.

5.1.2

Testes de Misturas de Etanol com PEG400

Durante os testes com os combustíveis formulados mediante a mistura de etanol e PEG400, com razões de compressão de 20,27:1 e 20,09:1, para as misturas contendo 7% e 10% deste aditivo, respectivamente, não se observou a queima do combustível. É importante voltar a mencionar, que o atraso da ignição, como consequência do numero de cetano da mistura, é influenciado pela massa molecular do aditivo melhorador da autoignição, quando o aditivo utilizado é um polietileno glycol (PEG). Portanto, quanto menor é a massa

molecular do PEG, maior terá que ser o percentual de aditivo presente na mistura com etanol, afim de que esta possa queimar sob as mesmas condições. No caso do ED95, o aditivo melhorador da autoignição do etanol é o Beraid [76], o qual tem um percentual de 7% (massa) presente na mistura com etanol. Este aditivo, é um derivado do PEG [16], mas não se tem a informação certa de qual PEG foi utilizado na sua fabricação. O que se supõe é que o PEG utilizado tenha uma massa molecular superior a 400 (PEG400).

Como não ocorreu a queima das misturas de etanol com PEG400 (7% e 10%), decidiu-se por realizar misturas com maiores percentuais do aditivo. Desta forma, se realizou uma mistura contendo 20% de PEG400, a qual entrou em combustão quando testada sob uma razão de compressão de 20,83:1. Observando-se o comportamento da pressão máxima nos processos de combustão desta mistura (PEG400 20%) , com RC = 20,83:1, verifica-se que esta aumenta à medida que aumenta o avanço do ponto de injeção, de forma similar ao que aconteceu com o ED95. Observa-se que para avanços acima de 2,9 mm ($\sim 17^\circ$), existe queima do combustível. Este dado é importante mencionar, já que quando testado o ED95, sob uma razão de compressão similar (20,65:1), a queima aconteceu quando o avanço da injeção esteve acima de 4,10 mm ($\sim 20^\circ$). Isto indica que a quantidade de aditivo poderia ser menor e obter resultados similares aos apresentados quando testado o ED95.

Tendo em conta a otimização da quantidade do aditivo a ser utilizado na mistura com etanol (PEG400), foi realizada uma nova mistura, com menor percentual de aditivo, desta vez contendo 15% de PEG400. Após os testes realizados com razão de compressão 22,28:1, foram realizados testes com razão de compressão 25,58:1, mudando sempre o avanço da injeção. Para todos os casos onde a queima da mistura aconteceu, verificou-se, novamente que, à medida que o avanço foi maior, a pressão máxima também aumentou.

Em vista de que a mistura de etanol e PEG400 (15%) queimou nos testes com razões de compressão de 22,28:1 e 25,58:1, decidiu-se trabalhar com uma nova mistura contendo ainda menor quantidade de aditivo PEG400. A nova mistura foi formulada com 13% em massa do aditivo (PEG400). Uma vez realizada a mistura, esta foi testada na MCR para as razões de compressão RC = 21,64:1 e RC = 25,88:1. Em ambos os casos ocorreu a queima para todos os avanços de injeção testados.

Tabela 5.3: Resultados dos testes das misturas de etanol e PEG400.

Situação	PEG400 (13%), RC=21,64:1		PEG400 (13%), RC=25,88:1		PEG400 (15%), RC=22,28:1		PEG400 (15%), RC=25,58:1		PEG400 (20%), RC=20,83:1	
	Avanço (mm)	Resultado								
Combustão	4,10	Sim	6,80	Sim	1,50	Não	1,40	Sim	1,60	Não
P_Max (bar)	~ 23°	124,80	~ 23°	135,70	~ 13°	50,64	~ 13°	97,29	~ 13°	50,33
Combustão	4,70	Sim	7,30	Sim	2,60	Sim	2,60	Sim	2,90	Sim
P_Max (bar)	~ 24°	126,50	~ 24°	142,90	~ 17°	100,56	~ 17°	112,23	~ 17°	100,98
Combustão	5,20	Sim	7,70	Sim	3,70	Sim	3,80	Sim	4,00	Sim
P_Max (bar)	~ 25°	129,30	~ 25°	145,20	~ 20°	106,07	~ 20°	124,39	~ 20°	105,98
Combustão	6,10	Sim	8,80	Sim	4,60	Sim	4,60	Sim	4,80	Sim
P_Max (bar)	~ 27°	131,90	~ 27°	154,80	~ 22°	115,06	~ 22°	130,37	~ 22°	115,78
Combustão	7,20	Sim	9,90	Sim	4,90	Sim	5,00	Sim	5,20	Sim
P_Max (bar)	~ 29°	125,60	~ 29°	152,90	~ 23°	119,28	~ 23°	135,74	~ 23°	118,62
Combustão	8,30	Sim	11,00	Sim	5,40	Sim	5,60	Sim	5,60	Sim
P_Max (bar)	~ 31°	122,10	~ 31°	171,10	~ 24°	122,46	~ 24°	142,26	~ 24°	123,13
Combustão	9,50	Sim	12,20	Sim	5,80	Sim	6,40	Sim	6,30	Sim
P_Max (bar)	~ 33°	113,20	~ 33°	159,80	~ 25°	129,62	~ 25°	153,50	~ 25°	127,67
Combustão	-	-	-	-	6,40	Sim	7,00	Sim	7,20	Sim
P_Max (bar)	-	-	-	-	~ 27°	129,60	~ 27°	164,29	~ 27°	130,77

Tabela 5.4: Resumo dos parâmetros da combustão para as misturas de etanol e PEG400.

Combustível	1750 rpm				1900 rpm			
	IDI (mm)	AI (ms)	ms-PMI P_max	dP_max (bar/ms)	IDI (mm)	AI (ms)	ms-PMI P_max	dP_max (bar/ms)
PEG400(13%)	4,10	2,77	1,01	242,37	6,80	2,4	0,77	184,60
	4,70	2,80	1,05	229,61	7,30	2,1	0,77	235,15
	5,20	2,75	0,86	205,24	7,70	2,5	0,67	284,26
	6,10	2,89	0,82	236,36	8,80	2,1	0,27	289,46
	7,20	3,10	0,66	184,49	9,90	2,4	0,64	272,88
	8,30	3,13	0,69	217,03	11,00	2,5	0,22	392,27
	9,50	3,50	0,91	115,29	12,20	2,7	0,41	227,26
	1,50	-	-	-	1,40	2,19	1,89	97,63
	2,60	1,86	1,45	102,93	2,60	2,45	1,35	202,16
PEG400(15%)	3,70	2,15	1,43	159,60	3,80	2,18	1,12	165,33
	4,60	2,10	1,40	211,58	4,60	2,17	1,27	163,81
	4,90	2,17	1,00	222,00	5,00	2,18	0,95	196,91
	5,40	2,13	0,81	218,19	5,60	2,16	0,41	213,49
	5,80	2,42	0,81	289,35	6,40	2,23	0,61	333,32
	6,40	2,47	0,62	238,67	7,00	2,02	0,23	455,17
	1,60	-	-	-	-	-	-	-
	2,90	2,2	1,31	140,96	-	-	-	-
	4,00	2,7	1,26	197,90	-	-	-	-
PEG400(20%)	4,80	2,6	1,22	186,21	-	-	-	-
	5,20	2,4	0,78	205,19	-	-	-	-
	5,60	2,1	0,78	159,08	-	-	-	-
	6,30	2,3	0,76	152,58	-	-	-	-
	7,20	2,5	0,77	200,61	-	-	-	-

As Tabelas 5.3 e 5.4 mostram um resumo dos resultados obtidos nos diferentes ensaios efetuados. Na Tabela 5.3, pode-se observar que quando testadas as misturas de etanol e PEG400 (15% e 20%), iniciou-se os testes com avanços de injeção menores ou mais próximos do PMS. Já nos testes com a mistura de etanol e PEG400 (13%), iniciou-se os testes com avanços injeção maiores. Este procedimento adotado, deve-se ao fato de se verificar pouca repetitividade dos resultados, quando a mistura foi testada com avanços menores ($\sim 13^\circ$ - $\sim 20^\circ$). Nos avanços antes mencionados, em muitos dos testes realizados, a mistura não queimou devido a que no final do processo de vaporização, as condições de pressão e temperatura não foram as mínimas necessárias para a ignição do combustível.

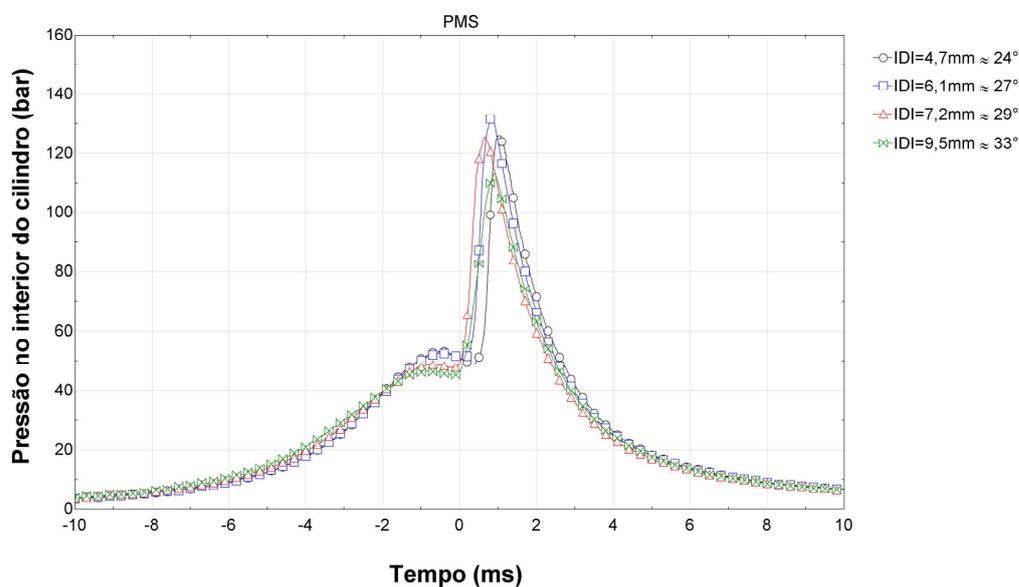


Figura 5.10: Pressão no cilindro para o teste com a mistura de etanol e PEG400 (13%), 1750 rpm e RC = 21,64:1.

Observando os resultados obtidos, utilizando uma mistura de etanol e PEG400 (13%), descritos nas Figuras 5.10 e 5.14, pode-se afirmar que o aumento da razão de compressão de 21,64:1 para 25,88:1, originou, para avanços (similares) de 7,2 mm e 7,30 mm, respectivamente, um aumento no valor da pressão máxima de 13,77 %. Nos testes realizados com RC = 21,64:1, pode-se observar que para os avanços de 4,7 mm e 6,1 mm, o valor de pressão máxima ocorreu 1,05 ms e 0,82 ms após o PMS, respectivamente. Também é possível observar que, para os testes realizados com RC = 25,88:1 e avanços de 7,30 mm e 11,00 mm, o valor da pressão máxima ocorreu 0,77 ms e 0,22 ms após o PMS, respectivamente. Em testes anteriores, com avanços de injeção

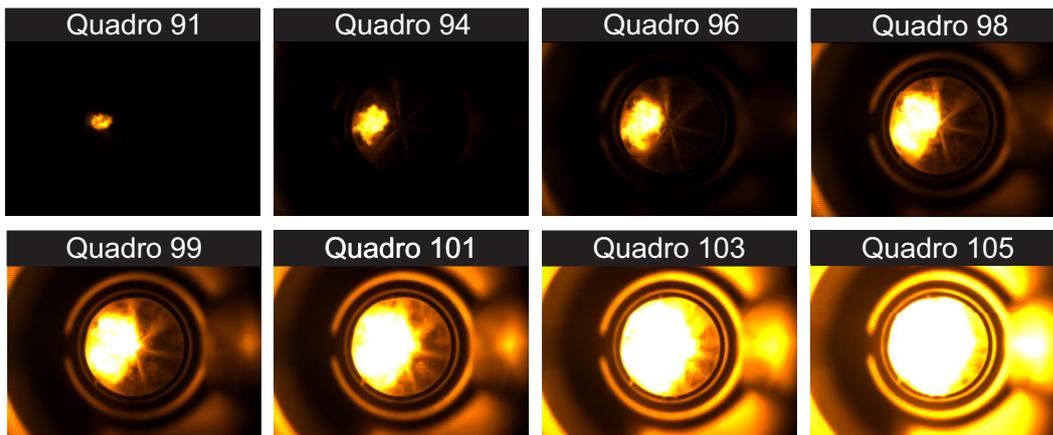


Figura 5.11: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (13%), 1750 rpm, RC = 21,64:1 e IDI = 4,70 mm ($\sim 24^\circ$ - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

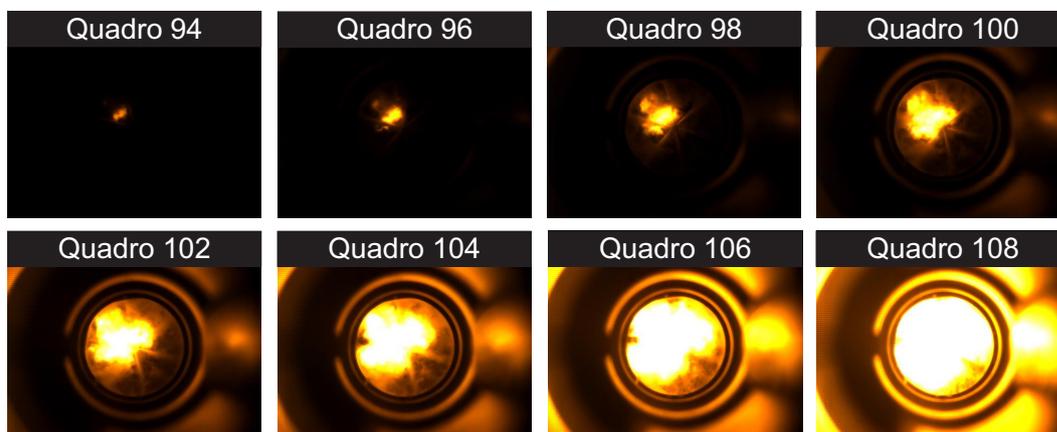


Figura 5.12: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (13%), 1750 rpm, RC = 21,64:1 e IDI = 6,10 mm ($\sim 27^\circ$ - Quadro 4) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

mais próximos ao PMS (menores a 27°), observou-se que o pico de pressão aproximava-se mais ao PMS quando o avanço da injeção era maior.

Nos testes realizados com a mistura de etanol e PEG400 (13%) com RC = 21,64:1, onde foram testados avanços superiores a 27° , observou-se que quando testado um avanço de 9,50 mm ($\sim 33^\circ$), o pico de pressão máxima ficou mais afastado do PMS e foi menor do que observado nos testes realizados com avanço 7,20 mm ($\sim 29^\circ$). Isto deve-se a que quando o início da injeção (IDI) acontece mais afastado do PMS, existe um maior intervalo de tempo no qual a mistura absorve calor do ar que esta sendo comprimido. Por conseguinte, no início da combustão (ICOM) a pressão e temperatura no interior do cilindro são menores, influenciando no valor do pico de pressão, como mostrado na Figura 5.10.

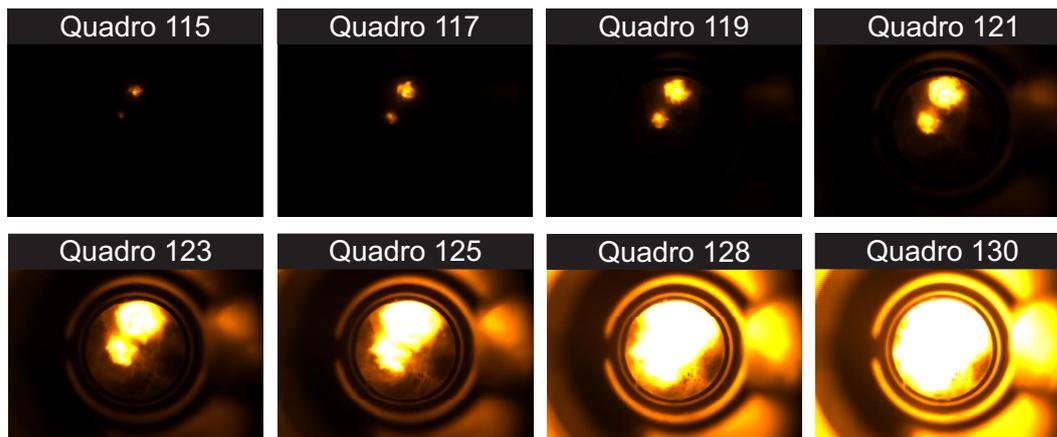


Figura 5.13: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (13%), 1750 rpm, RC = 21,64:1 e IDI = 9,50 mm ($\sim 33^\circ$ - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

Ainda nas Figuras 5.10 e 5.14, observa-se que o pico de pressão máxima para o testes com razão de compressão de 25,88:1 aumentou em mais de 30% com relação ao teste com menor razão de compressão. Este fenômeno se dá não só pelo aumento da razão de compressão mais também pela mudança do avanço da injeção. Como foi mostrado nos testes com ED95, existe igualmente uma faixa na qual o avanço pode ser mudado e se consegue a queima constante da mistura, PEG400 (13%). Se espera que no motor, sob as mesmas condições, obtenham-se picos de pressões maiores, pelo qual será de vital importância, uma vez escolhido a razão de compressão a utilizar, alterar de forma cuidadosa no avanço.

Pode-se observar também, para os testes apresentados nas Figuras 5.10 e 5.14, que para um avanço acima de 23° antes do PMS, consegue-se a queima da mistura. O ideal, devido às mudanças da geometria e comportamento mais homogêneo da temperatura do ar no interior do cilindro do motor, é que não se faça a mudança imediata do avanço para o valor mencionado. É recomendável mudar de forma gradual o avanço até conseguir a queima, tendo em conta que avanço principal nessas condições é bem próximo do PMS e uma mudança grande no avanço pode originar detonação.

Através das Figuras 5.11, 5.12 e 5.13, referentes aos testes com a mistura de etanol e PEG400 (13%), razão de compressão de 21,64:1 e avanços da injeção do combustível de 4,70, 6,10 e 9,50 mm antes do PMS, pode-se determinar atraso da ignição, os quais são 2,80, 2,89 e 3,50 ms, respectivamente. De forma similar aos testes com ED95, mas com uma razão de compressão menor, se obteve duas regiões propícias para o início da ignição. Isto só foi possível graças ao maior avanço da injeção (9,50 mm $\sim 33^\circ$), o que possibilitou uma melhor

vaporização do combustível.

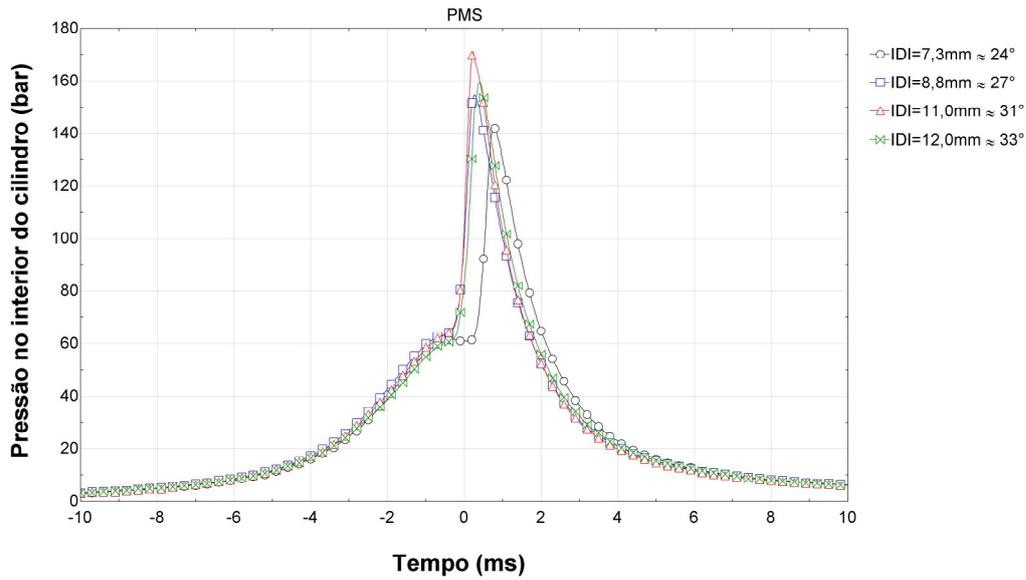


Figura 5.14: Pressão no cilindro para o teste com a mistura de etanol e PEG400 (13%), 1900 rpm, RC = 25,88:1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212851/CA

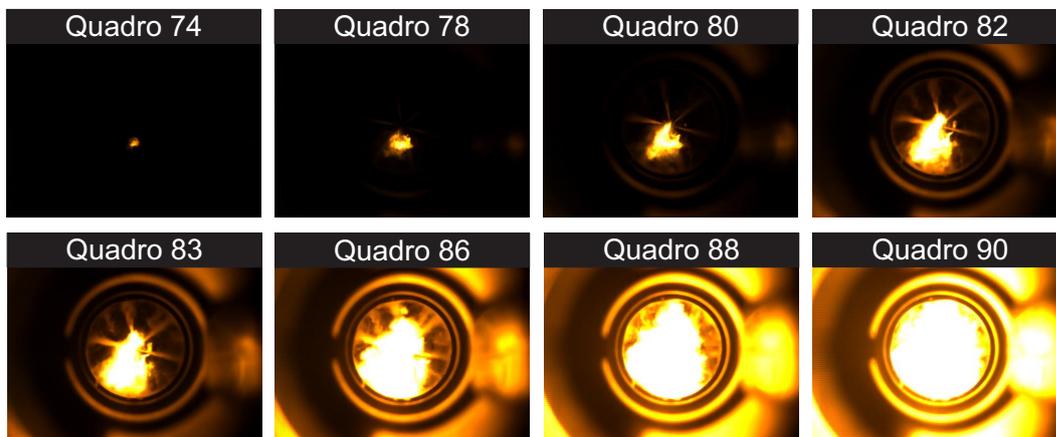


Figura 5.15: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (13%), 1900 rpm, RC = 25,88:1 e IDI = 7,30 mm (~ 24° - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

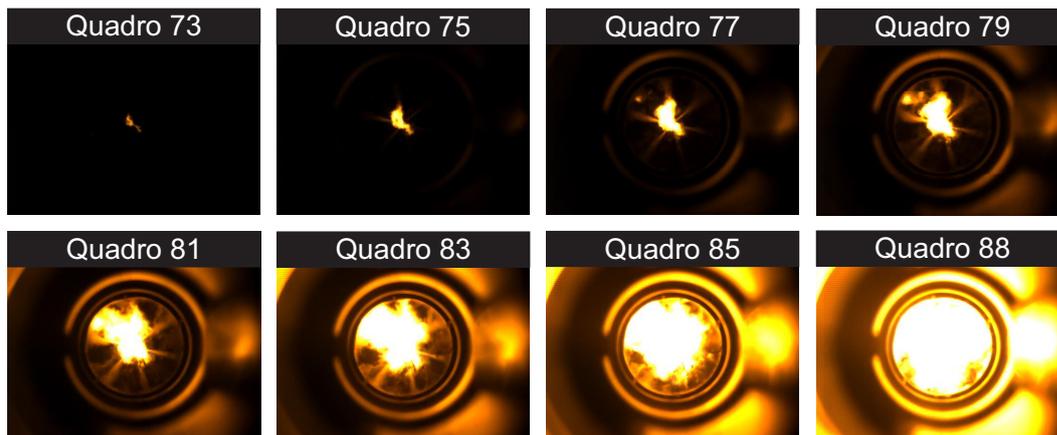


Figura 5.16: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (13%), 1900 rpm, RC = 25,88:1 e IDI = 8,80 mm ($\sim 27^\circ$ - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

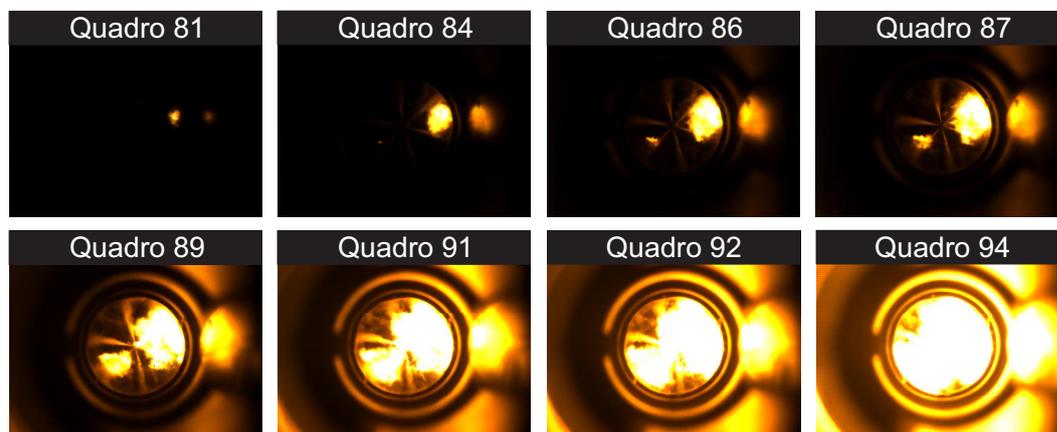


Figura 5.17: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (13%), 1900 rpm, RC = 25,88:1 e IDI = 11,00 mm ($\sim 31^\circ$ - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

Como é mostrado nas Figuras 5.15, 5.16 e 5.17, o atraso de ignição pode ser determinado mediante análise das imagens do processo de ignição e combustão das misturas testadas. De acordo com estas análises, para os testes realizados com a mistura de etanol e PEG400 (13%), razão de compressão de 25,88:1 e avanços da injeção de combustível de 7,30, 8,80 e 11,00 mm antes do PMS, os valores de atraso da ignição são 2,10, 2,20 e 2,50 ms, respectivamente. De forma similar ao observado nos testes com razão de compressão 21,64:1, notam-se duas regiões propícias para o início da combustão com avanços de 8,80 e 11,00 mm ($\sim 27^\circ$ e 31°). Com isto, pode-se dizer que, quanto maior for a razão de compressão, menor pode ser o avanço da injeção gerando mais zonas propícias para o início da combustão.

De forma similar como aconteceu nos testes com ED95, as Figuras 5.11

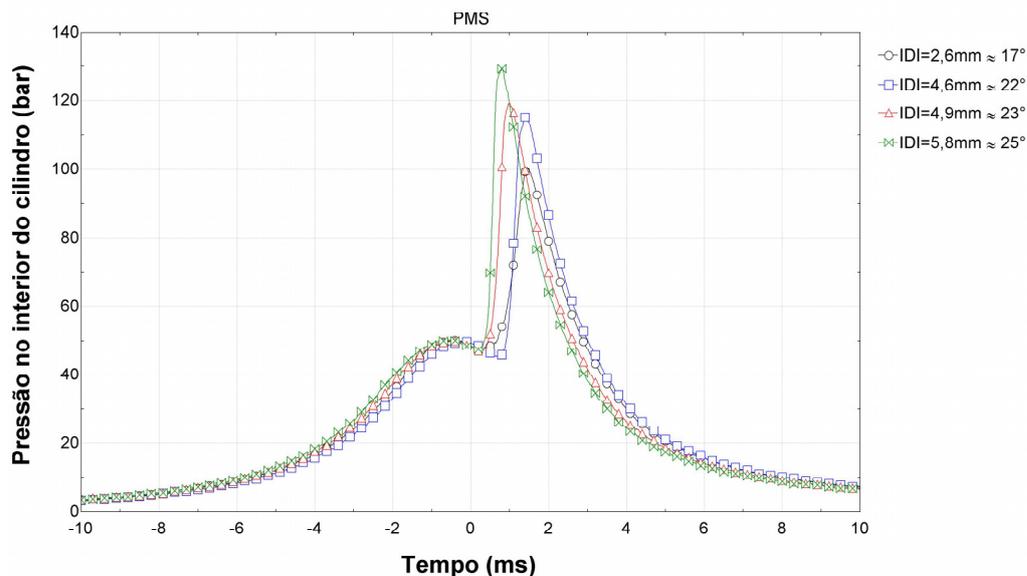


Figura 5.18: Pressão no cilindro para o teste com a mistura de etanol e PEG400 (15%), 1750 rpm e RC = 22,28:1.

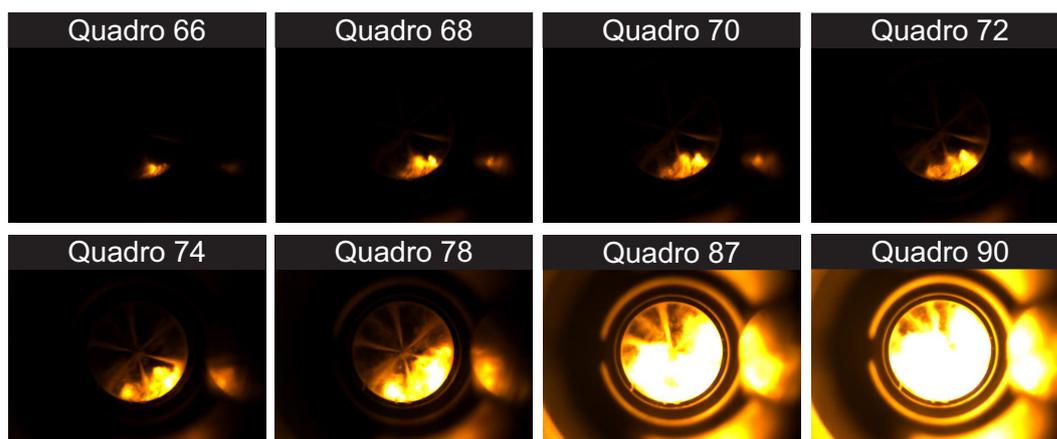


Figura 5.19: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (15%), 1750 rpm, RC = 22,28:1 e IDI = 2,60 mm ($\sim 17^\circ$ - Quadro 7) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

- 5.13 e 5.15 - 5.17 mostram que, quanto maior foi o avanço da injeção, maior será o atraso da ignição. Isto deve-se ao fato de que quando o combustível é injetado com um avanço maior, a temperatura do ar que está sendo comprimido é menor, o que implica em um maior tempo no processo de vaporização do combustível. Em alguns casos, fato que não foi verificado, pode originar uma queima incompleta do combustível e aumento de ruído.

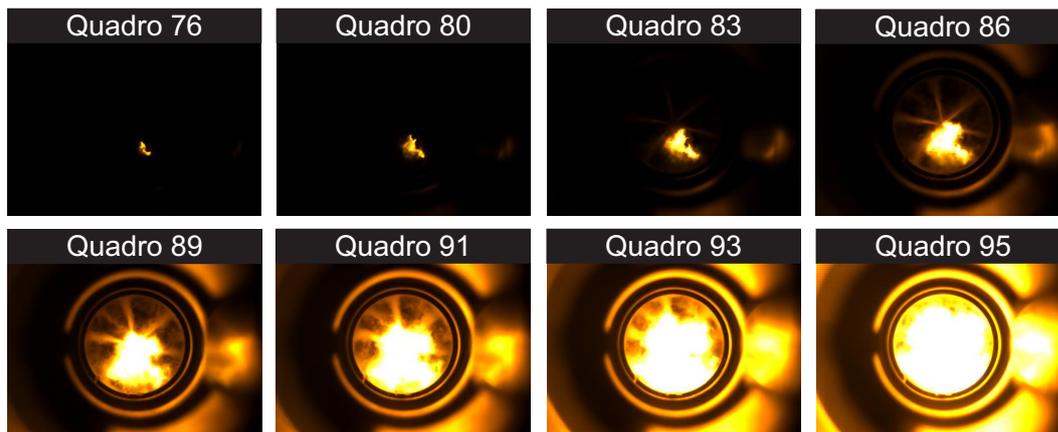


Figura 5.20: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (15%), 1750 rpm, RC = 22,28:1 e IDI = 4,90 mm ($\sim 23^\circ$ - Quadro 6) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

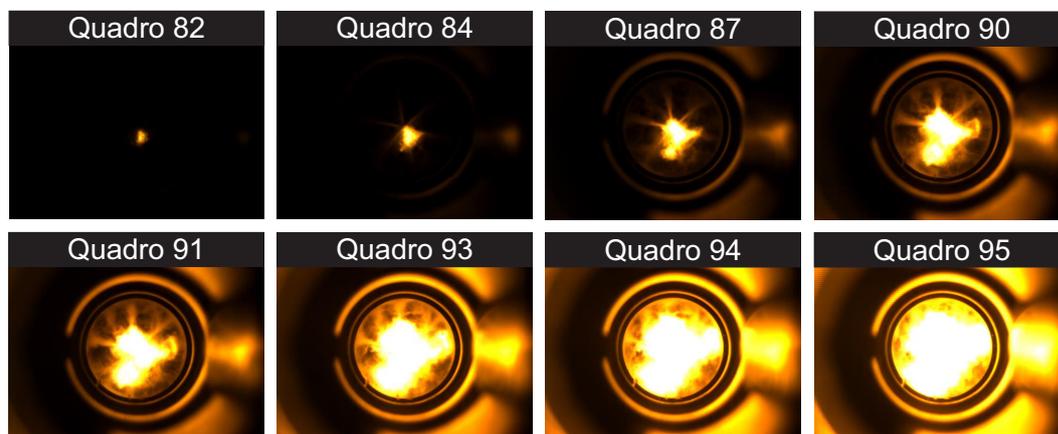


Figura 5.21: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (15%), 1750 rpm, RC = 22,28:1 e IDI = 5,80 mm ($\sim 25^\circ$ - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

Através dos resultados dos testes apresentados nas Figuras 5.10, e 5.26, observa-se que, para avanços similares (4,70 mm e 4,80 mm), a diminuição de 20% para 13% no percentual de aditivo origina um aumento de 0,7 ms no atraso da ignição.

Nos testes realizados com uma mistura de etanol e PEG400 (15%), apresentados nas Figuras 5.18 e 5.22, pode-se observar que, para avanços similares de 2,6 mm em cada caso, o aumento da razão de compressão de 22,28:1 para 25,58:1 originou um aumento de 12,16% no valor da pressão máxima. Já nos casos de avanços próximos, de 4,9 mm e 5,0 mm, respectivamente, o aumento da razão de compressão, similar ao descrito anteriormente, originou um aumento de 13,79% no valor máximo da pressão. Também pode-se observar que, quando foi testada a mistura de etanol e PEG400 (15%) com RC =

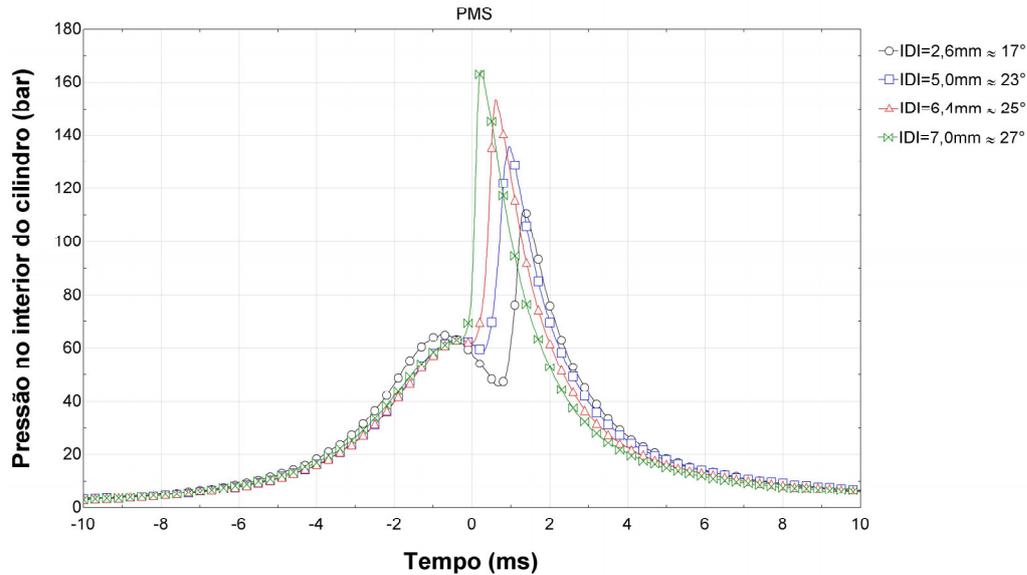


Figura 5.22: Pressão no cilindro para o teste com a mistura de etanol e PEG400 (15%), 1900 rpm e $RC = 25,58:1$.

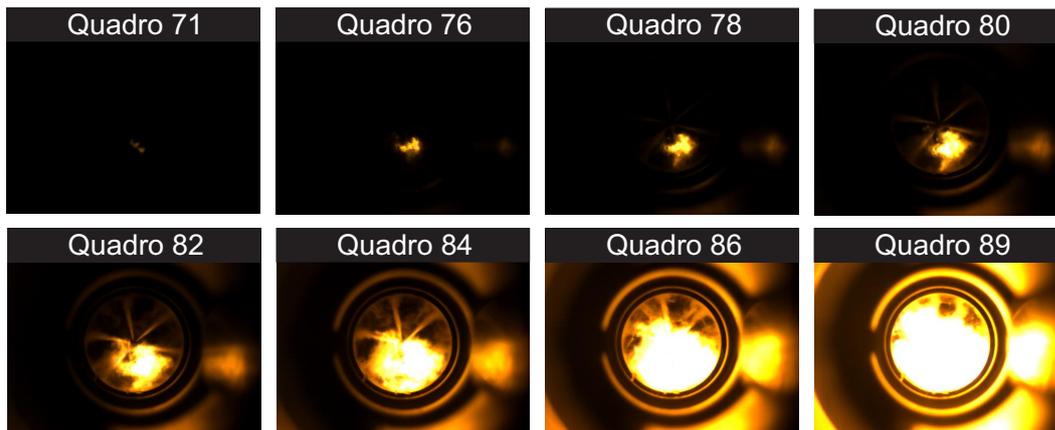


Figura 5.23: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (15%), 1900 rpm, $RC = 25,58:1$ e $IDI = 2,60 \text{ mm}$ ($\sim 17^\circ$ - Quadro 7) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

22,28:1, para os avanços de 2,6 mm e 5,8 mm, o valor da pressão máxima apresentou-se 1,43 ms e 0,81 ms após o PMS. Para os testes com a mesma mistura e $RC = 25,58:1$, com avanços de 2,6 mm e 7,0 mm, o valor da pressão máxima apresentou-se 1,35 ms e 0,23 ms após o PMS. De acordo com o mencionado neste parágrafo, podemos concluir que quanto maior é a razão de compressão para avanços similares, se tem maiores picos de pressão, o que também pode originar maiores taxas de variação da pressão, que como já foi dito anteriormente, originam ruído. Outra observação importante, que é bom mencionar, é que quanto maior é a razão de compressão para avanços maiores,

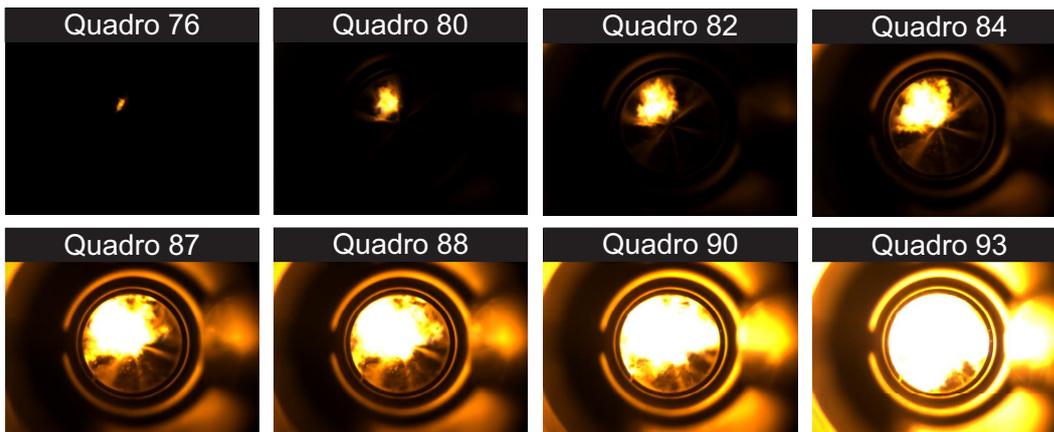


Figura 5.24: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (15%), 1900 rpm, RC = 25,58:1 e IDI = 5,00 mm ($\sim 23^\circ$ - Quadro 6) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

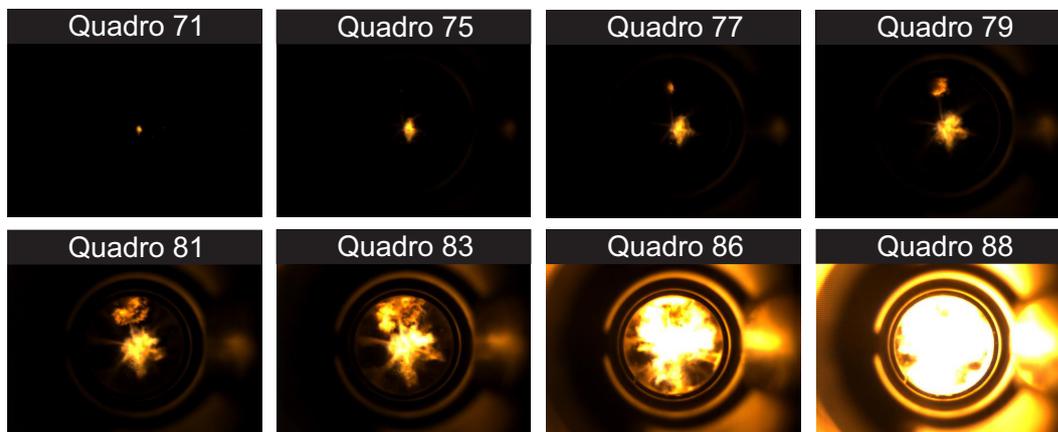


Figura 5.25: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (15%), 1900 rpm, RC = 25,58:1 e IDI = 7,00 mm ($\sim 27^\circ$ - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

pode-se ter o início da combustão antes do PMS, o que pode originar uma contra-pressão sobre o pistão e, no pior dos casos, detonação.

Por meio das imagens mostradas nas Figuras 5.19, 5.20 e 5.21, o atraso da ignição pode ser determinado. Portanto, através destas imagens, que descrevem o processo de ignição e combustão dos testes realizados com a mistura de etanol e PEG400 (15%), razão de compressão de 22,28:1 e avanços da injeção de combustível de 2,60, 4,90 e 5,80 mm antes do PMS, o valor de atraso da ignição foi de 2,00, 2,20 e 2,50 ms, respectivamente. Comparando com os resultados obtidos no teste com a mistura de etanol e PEG400 (13%), não foi suficiente um pequeno aumento da razão de compressão (21,64: 1 para 22,28), para se ter mais de uma região propícia para a combustão. Observamos nas Figuras 5.19, 5.20 e 5.21, que existiu uma única região onde se iniciou a ignição.

Este fato pode-se dever também aos valores dos avanços utilizados durante os testes com a mistura de etanol e PEG400 (15%), de aproximadamente 13° a 27° antes do PMS.

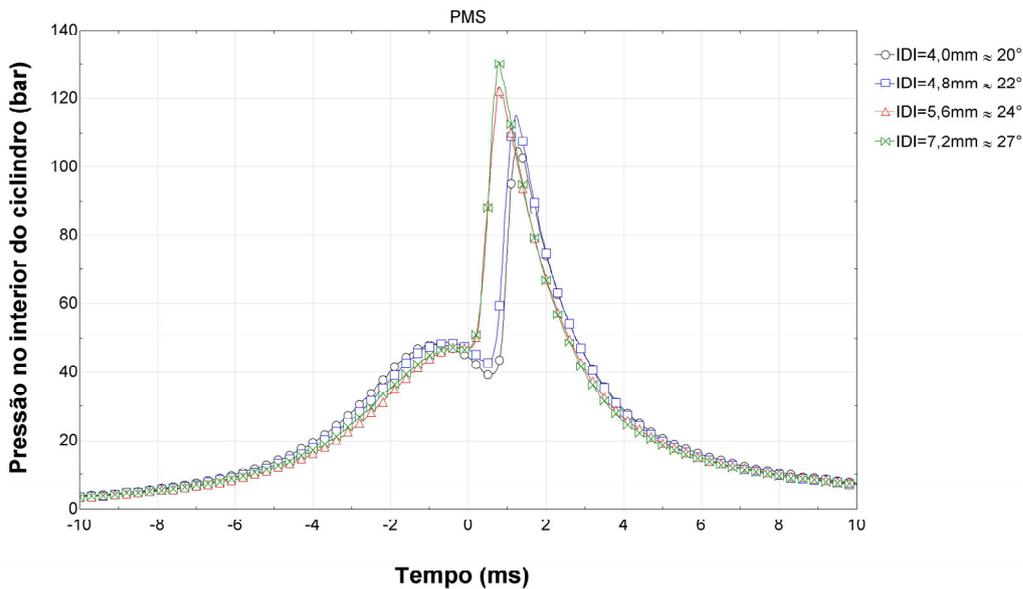


Figura 5.26: Pressão no cilindro para o teste com a mistura de etanol e PEG400 (20%), 1750 rpm e RC = 20,83:1.

Observando os resultados dos testes apresentados nas Figuras 5.18 e 5.26 pode-se notar que, para avanços similares (5,8 e 5,60 mm), o incremento percentual de 5% de aditivo originou uma queda de 4,99% no valor máximo de pressão. Situação similar pode ser observado, quando comparado os testes apresentados nas Figuras 5.10 e 5.26, para avanços similares (4,70 e 4,80 mm), o incremento percentual de 7% de aditivo originou uma queda de 8,47% no valor máximo de pressão.

Observando as imagens mostradas nas Figuras 5.23, 5.24 e 5.25, é possível determinar o atraso de ignição. Através das imagens apresentadas, onde se descreve o processo de ignição e combustão, dos testes realizados com a mistura de etanol e PEG400 (15%), razão de compressão de 25,58:1 e avanços da injeção de combustível de 2,60, 5,00 e 7,00 mm antes do PMS, o valor de atraso de ignição, para os testes mencionados, são 2,10, 2,20 e 2,00 ms, respectivamente. Novamente podemos observar na Figura 5.25 que existem dois regiões propícias para a ignição da mistura, coisa que não aconteceu quando a razão de compressão foi menor para o mesmo avanço ($\sim 27^\circ$). A presença de mais de uma região propícia para a ignição da mistura, depende não só do avanço da injeção e sim também da razão de compressão na qual sejam realizados os testes.

Na Figura 5.26, pode ser observado que quando testada a mistura de etanol e PEG400 (20%) com $RC = 20,83:1$, para os avanços de 4,00 mm e 7,20 mm, o valor da pressão máxima apresentou-se 1,26 ms e 0,77 ms após o PMS, respectivamente. Para os outros avanços o pico de pressão máxima aconteceu bem próximo dos 0,77 ms após o PMS. Como é mostrado na Figura 5.26, aparentemente o início da combustão aconteceu no mesmo avanço próximo do PMS, o que mostra claramente que quanto maior for o avanço da injeção, maior foi o atraso da ignição assim como também o pico de pressão. Este fenômeno deve-se a que, quanto maior é o avanço da injeção menores serão os valores de pressão e temperatura, o que origina um maior tempo de vaporização do combustível.

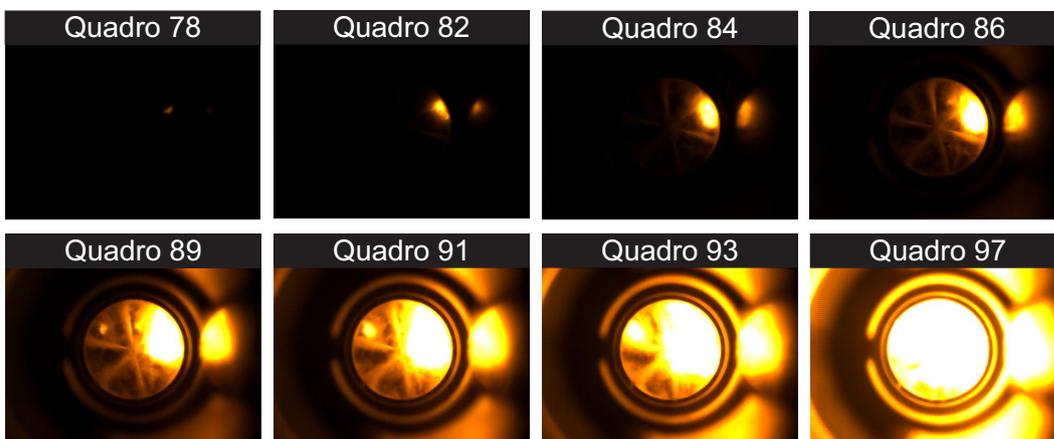


Figura 5.27: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (20%), 1750 rpm, $RC = 20,83:1$ e $IDI = 4,00$ mm ($\sim 20^\circ$ - Quadro 6) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.



Figura 5.28: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (20%), 1750 rpm, $RC = 20,83:1$ e $IDI = 5,60$ mm ($\sim 24^\circ$ - Quadro 6) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

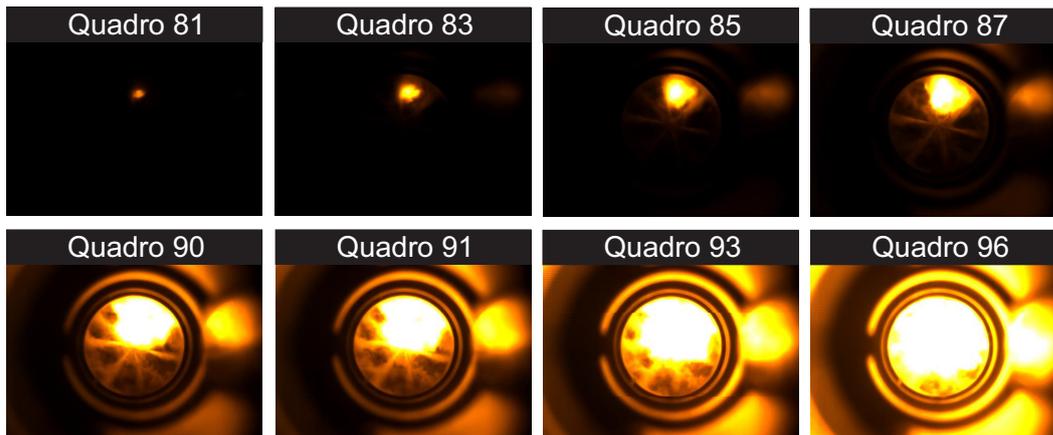


Figura 5.29: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG400 (20%), 1750 rpm, RC = 20,83:1 e IDI = 7,20 mm ($\sim 27^\circ$ - Quadro 6) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

O conjunto de testes utilizando a mistura de etanol e PEG400 (20%), foi o primeiro no qual se obteve a queima do etanol aditivado mediante a ignição por compressão. Efetivamente, não foi a mistura escolhida, por diversos fatores já relatados, mas foi de muita importância, por ser a primeira formulação na qual se obteve êxito. A partir desta mistura, se procurou a otimização do uso do aditivo melhorador da ignição (PEG400), mediante os testes já descritos utilizando 15% e posteriormente 13% de PEG 400.

Através das imagens mostradas nas Figuras 5.27, 5.28 e 5.29, onde se mostram os processos de ignição e combustão para os testes realizados com a mistura de etanol e PEG400 (20%), razão de compressão de 20,83:1 e avanços de 4,00, 5,60 e 7,20 mm antes do PMS, foram determinados atrasos da combustão de 2,70, 2,10 e 2,50 ms, respectivamente. Conclui-se da análise das diferentes imagens que a existência de mais de uma região propícia para ignição está condicionada, principalmente, ao aumento da razão de compressão e ao avanço da injeção de combustível. Mas, até agora não, se tinha observado a influência da quantidade de aditivo presente na mistura. Observa-se na Figura 5.28, para os testes com a menor razão de compressão utilizada (20,83:1), duas regiões propícias para o início da combustão da mistura. Portanto, pode-se dizer que é possível utilizar avanços menores e ter mais de uma região propícia à ignição, aumentando-se o percentual de aditivo na mistura. Também pode ser observado, que duas regiões propiciando a ignição, um avanço da ignição menor, favorece a queima da mistura.

Os testes realizados com percentuais de PEG400 de 15% e 20% com relação ao teste com percentual de 13%, mostram que uma maior adição de aditivo melhorador da autoignição do etanol, possibilita que a mistura queime

com um menor avanço da injeção, reduzindo assim os picos de pressão. É importante mencionar isto e, posteriormente, fazer uma comparação com os resultados utilizando PEG600, já que este fenômeno é fundamental na escolha do aditivo a ser utilizado.

Como parte da etapa preliminar, uma vez concluído os testes com as misturas de etanol e PEG400, se procedeu a escolher a mistura com menor percentual de aditivo que tenha queimado nas condições testadas. Como mostra disto, a mistura de etanol e PEG400 contendo 13% deste último, foi a escolhida para os testes finais. Uma vez testada esta mistura, sob condições mais próximas do motor, o próximo passo será testar esta mistura em motores. É de vital importância, antes de levar esta mistura ao motor, analisar a lubrificidade do combustível, a fim de evitar possíveis danos no sistema de injeção. Também é importante, assim como foi dito anteriormente com relação à utilização do ED95 no motor, ter cuidado no momento da mudança do avanço, já que uma mudança grande do avanço pode originar detonação no motor. Além da detonação, é importante, durante a escolha do ponto adequado da injeção, monitorar o valor da pressão máxima, a qual deve estar dentro dos limites permissíveis de operação do motor.

Outra coisa que é importante mencionar, é a possibilidade de que o motor não de partida a frio. Nos testes realizados, sempre o cilindro e o cabeçote da MCR estiveram quentes. Este fato possibilitou que as misturas de PEG400 com etanol queimassem sob as condições descritas. Este ponto pode ser resolvido com o uso de uma vela incandescente no momento da partida.

5.1.3

Testes de Misturas de Etanol com PEG600

Posteriormente aos testes realizados com as misturas de etanol e PEG400, realizaram-se, de acordo com a Patente WO1995005437 A1 [16], os testes com a mistura de etanol e PEG600 (7%). Os testes de combustão foram feitos com razões de compressão de 16,78:1, 22,06:1 e 26,50:1, com avanços de injeção a partir de 4,6 mm até 7,2 mm ($\sim 23^\circ$ e 29°), 4,8 mm até 9,6 mm ($\sim 23^\circ$ e 33°) e 5,5 até 11,0 mm ($\sim 23^\circ$ e 33°) antes do PMS, para cada uma das razões de compressão listadas anteriormente, respectivamente. As Tabelas 5.5 e 5.6 mostram um resumo dos resultados obtidos nos diferentes ensaios efetuados.

É importante mencionar que nos testes utilizando PEG600 como melhorador da autoignição do etanol, foi testado em primeiro lugar uma mistura de etanol e PEG600 (7%), de forma similar aos testes realizados com misturas de etanol e PEG400. Infelizmente, mas como era de se esperar, nos testes realizados com razão de compressão 16,78:1, não se teve queima da mistura injetada.

Já com razões de compressão maiores, obteve-se, com sucesso, a queima da mistura para todos os avanços testados.

Os resultados deste conjunto de testes, são de grande importância, já que o percentual de PEG600 utilizado é quase igual ao percentual do Beraid utilizado na elaboração do ED95 ($\sim 7\%$ massa). Foi constatado que para avanços similares, os picos de pressão dos testes com misturas de PEG600 e etanol são um pouco maiores que os picos de pressão dos testes com ED95. Este fato pode ser devido ao leve aumento da razão de compressão nos testes com as misturas de etanol e PEG600. Infelizmente, esta mistura não foi testada na MCR durante os testes finais, devido a um problema na MCR. Mas é um candidato a ser testado no motor de ignição por compressão, futuramente.

Analisando os resultados obtidos, mostrados na Tabela 5.5, observa-se para testes com similar avanço da injeção, 6,6 mm e 6,5 mm, para as razões de compressão 22,06:1 e 26,50:1 respectivamente, que o aumento da razão de compressão originou um incremento de 6,95% no valor da pressão máxima. Quando comparado, os testes com avanço de 7,5 mm, o aumento de razão de compressão de 22,06:1 para 26,50:1, originou um incremento de 31,67% no valor da pressão máxima. Finalmente, pode-se observar também que para os testes com avanços similares de 8,5 mm e 8,6 mm, e razões de compressão de 22,06:1 e 26,50:1 respectivamente, o aumento da razão de compressão originou um aumento de 21,85% na pressão máxima. Com base no descrito anteriormente, pode-se dizer que o pico de pressão aumenta conforme aumenta a razão de compressão, este aumento, uma vez alterada a razão de compressão, é diferente para cada avanço de injeção.

Observando a Tabela 5.5 e a Figura 5.30, referentes aos testes com condições apresentadas na Tabela 4.9, nota-se que o maior valor de pressão máxima, para todos os testes, foi de 140,50 bar, quando a mistura foi injetada 8,50 mm antes do PMS. Este valor de pressão máxima, para o teste mencionado, apresentou-se 0,90 ms após o PMS. Já a menor pressão máxima dos testes realizados foi de 99,86 bar, quando a mistura foi injetada com um avanço de 4,80 mm antes do PMS, mostrado na Tabela 5.5. Este menor valor de pressão máxima, apresentou-se 1,36 ms após o PMS.

Tabela 5.5: Resultados dos testes das misturas de etanol e PEG600.

Situação	PEG600 (7%), RC=16,78:1		PEG600 (7%), RC=22,06:1		PEG600 (7%), RC=26,50:1	
	Avanço (mm)	Resultado	Avanço (mm)	Resultado	Avanço (mm)	Resultado
Combustão	4,60	Não	4,80	Sim	5,50	Sim
P_Max (bar)	~ 23°	36,40	~ 23°	99,80	~ 23°	132,30
Combustão	5,00	Não	5,20	Sim	6,00	Sim
P_Max (bar)	~ 24°	37,80	~ 24°	113,90	~ 24°	140,30
Combustão	5,40	Não	5,60	Sim	6,50	Sim
P_Max (bar)	~ 25°	38,4	~ 25°	128,80	~ 25°	144,60
Combustão	6,20	Não	6,60	Sim	7,50	Sim
P_Max (bar)	~ 27°	38,90	~ 27°	135,20	~ 27°	166,30
Combustão	7,20	Não	7,50	Sim	8,60	Sim
P_Max (bar)	~ 29°	38,60	~ 29°	126,30	~ 29°	171,20
Combustão	-	-	8,50	Sim	9,80	Sim
P_Max (bar)	-	-	~ 31°	140,50	~ 31°	167,70
Combustão	-	-	9,60	Sim	11,00	Sim
P_Max (bar)	-	-	~ 33°	123,90	~ 33°	184,80

Tabela 5.6: Resumo dos parâmetros da combustão para as misturas de etanol e PEG600.

Condições de teste		Teste						
		1	2	3	4	5	6	7
1750 rpm	IDI (ms)	4,80	5,20	5,60	6,60	7,50	8,50	9,60
	AI (ms)	2,60	2,70	2,10	2,20	2,60	2,60	2,60
	ms-PMI	1,36	1,60	0,66	0,65	1,19	0,90	0,89
	P_max							
	dP_max (bar/ms)	143,58	194,66	223,09	196,75	220,99	255,29	158,28
1900 rpm	IDI (ms)	5,50	6,00	6,50	7,50	8,60	9,80	11,00
	AI (ms)	2,10	2,00	2,20	2,10	2,00	2,40	2,40
	ms-PMI	0,67	0,67	0,96	0,43	0,38	0,31	0,35
	P_max							
	dP_max (bar/ms)	216,64	185,97	242,34	363,21	409,75	316,52	500,46

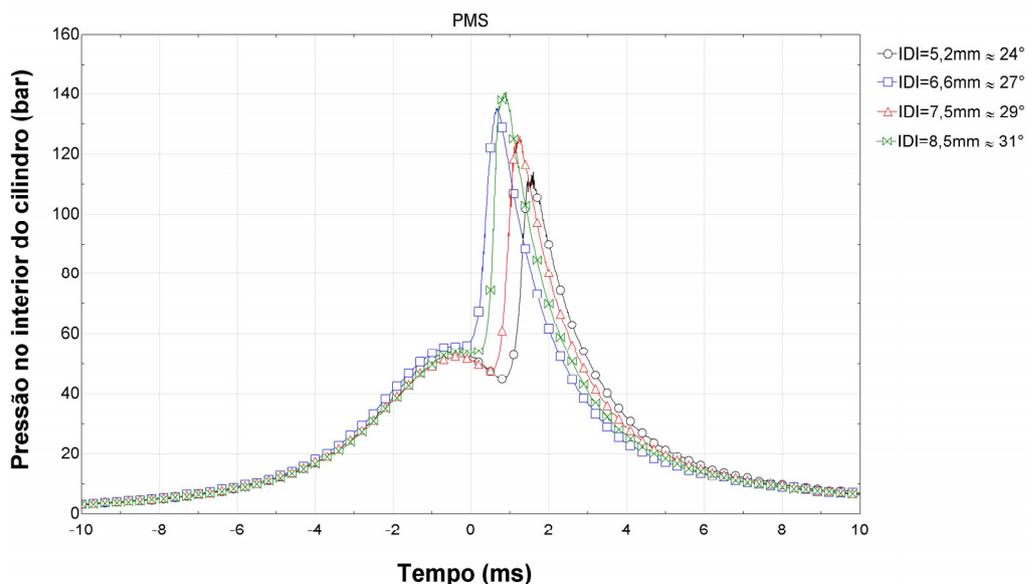


Figura 5.30: Pressão no cilindro para o teste com a mistura de etanol e PEG600 (7%), 1750 rpm e RC = 22,06:1.

Na Figura 5.30, pode-se também observar um fenômeno que até então não tinha acontecido ao longo dos testes. O atraso da ignição tem um valor mínimo na faixa de avanços testado, avanço que não foi determinado ao longo dos testes. Este comportamento pode ser atribuído ao avanço da injeção, devido a que, as condições de pressão e temperatura são diferentes em cada situação, de tal forma que pode se dizer que existe um avanço de injeção ótimo para cada regime. Nem sempre, um avanço de injeção maior garante uma melhor queima do combustível.

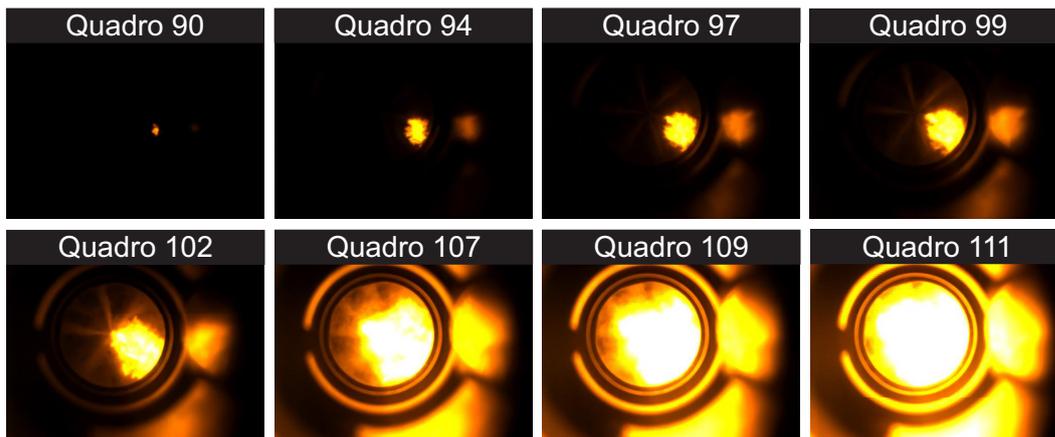


Figura 5.31: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG600 (7%), 1750 rpm, RC = 22,06:1 e IDI = 5,20 mm ($\sim 24^\circ$ - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

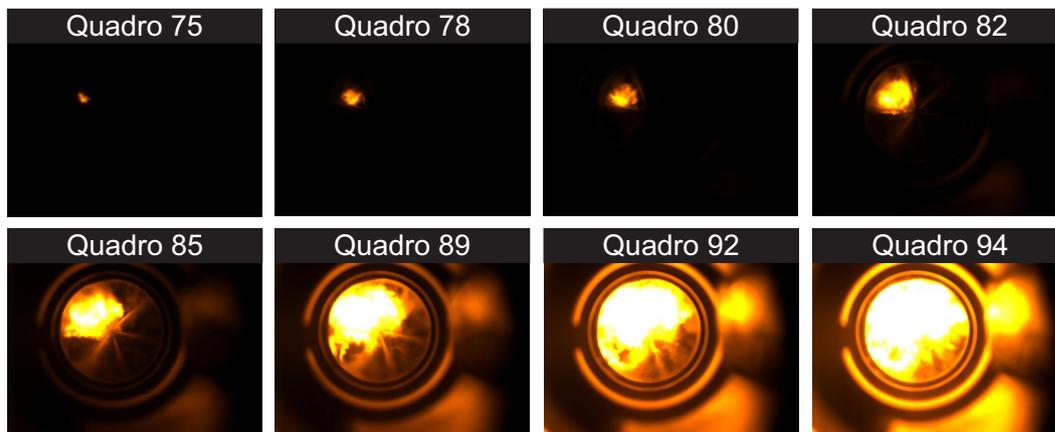


Figura 5.32: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG600 (7%), 1750 rpm, RC = 22,06:1 e IDI = 6,60 mm ($\sim 27^\circ$ - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

As Figuras 5.31, 5.32 e 5.33, mostram o processo de ignição e combustão referentes aos testes com a mistura de etanol e PEG600 (7%), razão de compressão de 22,06:1 e avanços da injeção do combustível de 5,20, 6,60 e 8,50 mm antes do PMS. Mediante estas imagens é possível determinar o atraso de ignição, respectivamente iguais a 2,70, 2,30 e 2,70 ms. Através das imagens é possível afirmar, mais uma vez, o que já foi dito no parágrafo anterior com relação à influencia do avanço no processo de ignição e queima da mistura. Também foi observado que, para os testes das misturas de etanol e PEG400 (15%) e PEG600 (7%) e avanços de injeção de 4,90 mm e 5,20 mm respectivamente numa razão de compressão similar ($\sim 22,00:1$), o atraso da ignição foi de 2,50 e 2,70 mm, respectivamente. Isto nos mostra que é possível obter resultados similares mediante o uso de menores quantidades de aditivo,

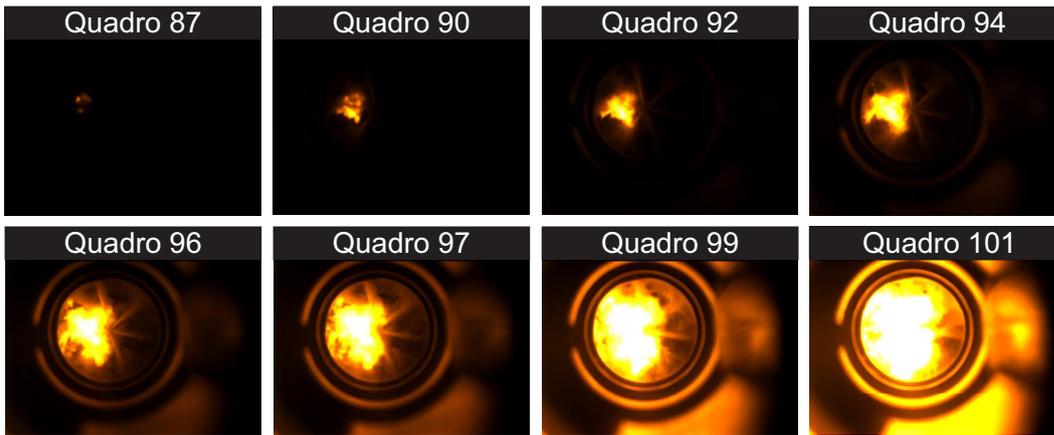


Figura 5.33: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG600 (7%), 1750 rpm, RC = 22,06:1 e IDI = 8,50 mm ($\sim 31^\circ$ - Quadro 4) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

desde que a formulação da mistura de etanol mais PEG utilize o aditivo com maior massa molecular.

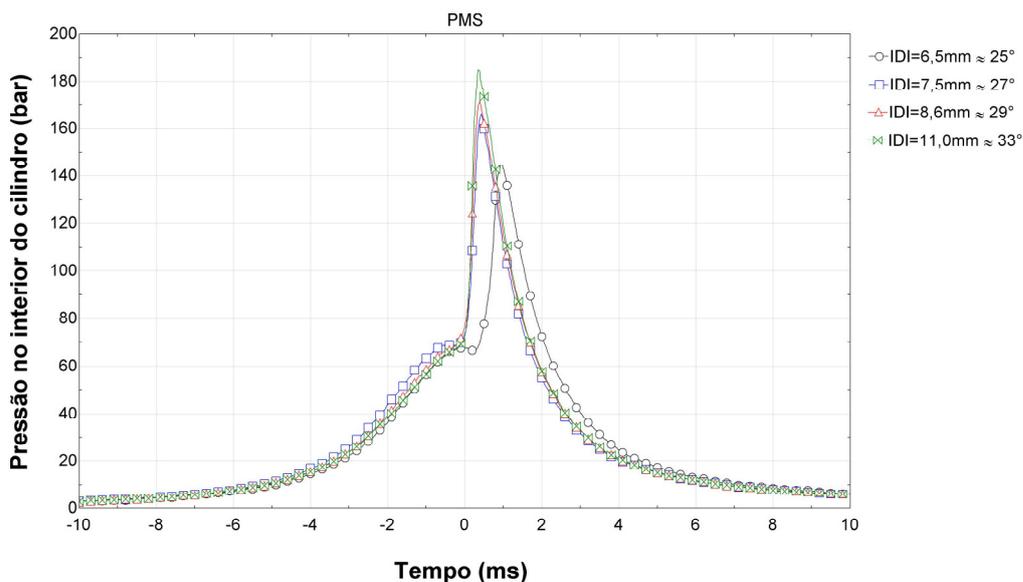


Figura 5.34: Pressão no cilindro para o teste com a mistura de etanol e PEG600 (7%), 1900 rpm e RC = 26,50:1.

Observando a Tabela 5.5 e a Figura 5.34, referentes aos testes com condições apresentadas na Tabela 4.9, pode-se visualizar que o máximo valor de pressão, para todos os testes realizados, foi de 184,80 bar, e aconteceu quando a mistura foi injetada a 11,00 mm antes do PMS. Este valor de pressão máxima, para o teste mencionado, apresentou-se 0,35 ms após o PMS. Não se deu continuidade a avanços maiores porquê a máquina de compressão

rápida trabalha na faixa de 0 - 200 bar. Assim, com o objetivo de preservar o equipamento, decidiu-se não aumentar o avanço da injeção do combustível. Nas Tabelas 5.5 e 5.6, a menor pressão máxima dos testes realizados foi de 132,33 bar, quando a mistura foi injetada com um avanço de 5,50 mm antes do PMS. Este menor valor de pressão máxima, apresentou-se 0,67 ms após o PMS. Através da Figura 5.34, pode-se observar que o comportamento da pressão no teste ilustrado, foi similar ao comportamento da pressão nos testes da mistura de etanol e PEG400 (13%) para uma razão de compressão de 25,88:1. Os valores de picos de pressão obtidos nos testes realizados com a mistura de etanol e PEG600 (7%), são maiores, com relação aos testes da mistura de etanol e PEG400 (13%), devido ao fato que a razão de compressão também é maior e os avanços também não são os mesmos. O atraso da ignição aumentou a medida que o avanço aumentou, elevando desta forma o valor dos picos de pressão. Ainda na Figura 5.34, observa-se que o início da combustão, para os testes com avanço de injeção de 7,50 até 11,00 mm antes do PMS, é quase o mesmo, tendo em conta os altos picos de pressão. Também é possível afirmar que a taxa de variação da pressão no interior do cilindro para estes testes aumentou, conforme o avanço da injeção aumentou. Portanto, quando levada esta mistura no motor de ignição por compressão, para avanços maiores, existe uma grande possibilidade de originar ruído, produto da altas taxas de variação da pressão.

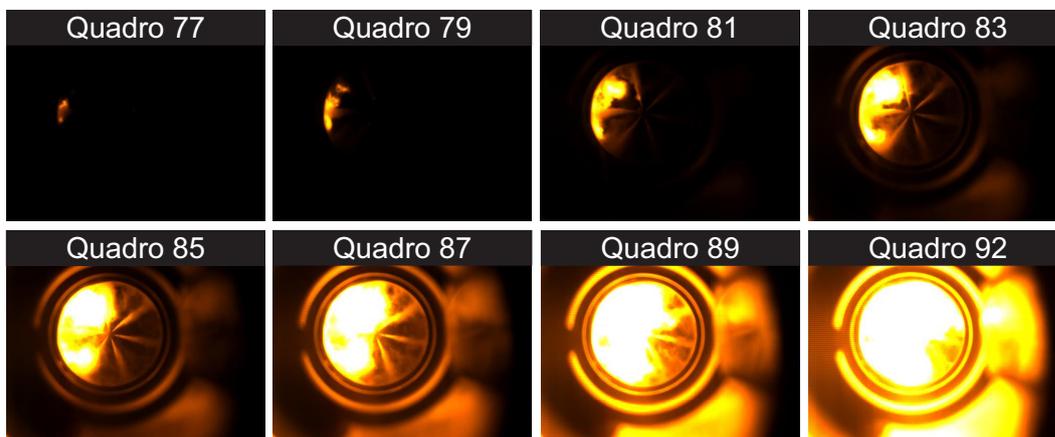


Figura 5.35: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG600 (7%), 1900 rpm, RC = 26,50:1 e IDI = 6,50 mm ($\sim 25^\circ$ - Quadro 4) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

Mediante as Figuras 5.35, 5.36 e 5.37, pode-se observar o processo de ignição e combustão referentes aos testes com a mistura de etanol e PEG600 (7%), razão de compressão de 26,50:1 e avanços da injeção do combustível de 6,50, 8,60 e 11,00 mm antes do PMS. Através destas imagens é possível

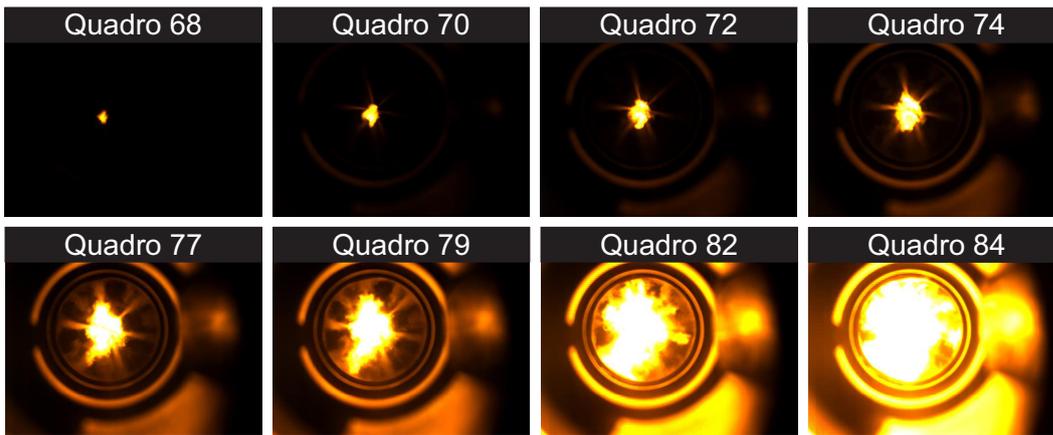


Figura 5.36: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG600 (7%), 1900 rpm, RC = 26,50:1 e IDI = 8,60 mm ($\sim 29^\circ$ - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

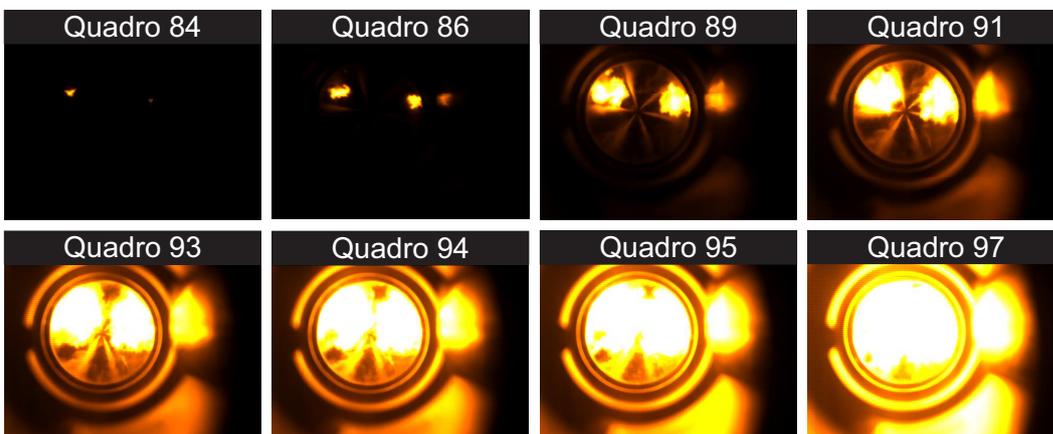


Figura 5.37: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e PEG600 (7%), 1900 rpm, RC = 26,50:1 e IDI = 11,00 mm ($\sim 33^\circ$ - Quadro 4) antes do PMS. Imagens a 30000 qps.

determinar os atrasos de ignição, iguais a 2,20, 2,00 e 2,30 ms, respectivamente. Ainda analisando as figuras, pode-se observar que quando utilizado um avanço de 11,00 mm ($\sim 33^\circ$ - Figura 5.37), surgem duas regiões propícias para a ignição da mistura. Isto se deve à utilização de um avanço maior, o que origina um maior tempo para a evaporação, uma vez que a temperatura e pressão do ar são menores no momento da injeção, por conseguinte, possibilita uma melhor queima.

De forma similar aos testes com ED95 e a mistura de etanol com PEG400, o valor da pressão máxima nos testes aumenta quando o avanço da injeção é maior. Mas, com relação aos testes anteriores, para este conjunto de testes, da mistura de etanol e PEG600 (7%), os picos de pressão foram maiores. Algo que é importante destacar, observando as Figuras 5.30 e 5.34, é o início da

combustão. Na primeira figura citada, observa-se que o início da combustão fica mais próximo do PMS, quando o avanço da injeção é maior. Já na segunda figura citada, o começo da combustão ocorre em momentos semelhantes, o que dá a impressão que, para avanços superiores ou iguais a 27° antes do PMS, a ignição acontece no mesmo instante de tempo. Este fenômeno pode ser originado devido à alta razão de compressão e ao avanço da injeção utilizado de forma similar ao que aconteceu nos testes com as misturas de etanol e PEG400 (13%) (Figura 5.17).

Como foi dito anteriormente, esta mistura é um dos candidatos a serem testados no motor. Mas, é importante ter cuidado no momento da mudança do avanço. O motor, no qual se testarão as misturas selecionadas, tem um limite de pressão de 180 bar. Portanto, como é observado na Figura 5.34, o valor da pressão máxima ultrapassou o valor limite. Outras das recomendações na hora de levar esta mistura ao motor, é primeiro testar regimens com baixa carga, de tal forma que se possa monitorar, tanto o efeito da mudança do avanço da injeção, como do aumento da carga sobre o valor da pressão máxima dentro câmara de combustão.

5.1.4

Testes de Misturas Etanol com n-Butanol

Após os testes realizados com misturas de etanol e PEG, se procedeu a realizar testes utilizando o n-butanol como melhorador da autoignição do etanol. A utilização do n-butanol, como aditivo melhorador da ignição do etanol em um processo de ignição por compressão é o aporte inédito deste trabalho. Hoje em dia, o n-butanol ainda é utilizado em processos de ignição por compressão, como um substituto do óleo diesel (mistura óleo diesel - butanol) de forma percentual (misturas de óleo diesel e n-butanol), mas não como aditivo melhorador da autoignição do etanol, [96][97].

Com base no dito anteriormente, se realizaram as misturas de etanol e n-butanol com 10 e 15% em massa. Os testes desenvolvidos seguiram os mesmos padrões utilizados nos testes anteriores. Ambas as misturas foram testadas sob razões de compressão de 21,64:1 e 26,81:1. Estes testes foram feitos com a finalidade de demonstrar que o n-butanol pode ser utilizado como um melhorador da autoignição do etanol, que além das vantagens e características citadas no Capítulo 2 e Tabelas 2.9 e 2.10, respectivamente, ele pode ser produzido de forma orgânica, tornando a mistura etanol e n-butanol um substituto 100% renovável para o óleo diesel.

Tabela 5.7: Resultados dos testes das misturas de etanol e n-Butanol.

Situação	n-But. (10%), RC=21,64:1		n-But. (10%), RC=26,81:1		n-But. (15%), RC=21,64:1		n-But. (15%), RC=26,81:1	
	Avanço (mm)	Resultado						
Combustão	3,70	Não	5,30	Sim	4,10	Não	4,60	Sim
P_Max (bar)	~ 23°	51,10	~ 23°	126,80	~ 23°	51,80	~ 23°	111,60
Combustão	4,20	Não	5,70	Sim	5,40	Não	5,00	Sim
P_Max (bar)	~ 24°	51,50	~ 24°	129,40	~ 24°	51,80	~ 24°	132,00
Combustão	4,60	Não	6,20	Sim	5,80	Não	5,50	Sim
P_Max (bar)	~ 25°	51,60	~ 25°	128,60	~ 25°	51,50	~ 25°	128,50
Combustão	5,50	Não	7,30	Sim	6,60	Não	6,50	Sim
P_Max (bar)	~ 27°	52,40	~ 27°	140,13	~ 27°	51,30	~ 27°	139,80
Combustão	6,50	Não	8,40	Sim	7,50	Não	7,50	Sim
P_Max (bar)	~ 29°	50,40	~ 29°	165,10	~ 29°	52,10	~ 29°	146,50
Combustão	7,50	Não	9,40	Sim	8,50	Não	8,60	Sim
P_Max (bar)	~ 31°	49,20	~ 31°	157,60	~ 31°	53,80	~ 31°	161,90
Combustão	8,40	Não	10,60	Sim	9,50	Não	9,70	Sim
P_Max (bar)	~ 33°	50,30	~ 33°	154,90	~ 33°	53,90	~ 33°	184,10

Tabela 5.8: Resumo dos parâmetros da combustão para as misturas de etanol e n-butanol.

Combustível	1900 rpm			
	IDI (mm)	AI (ms)	ms-PMI P_max	dP_max (bar/ms)
n-butanol(10%)	5,30	2,2	0,66	163,35
	5,70	2,0	1,03	120,82
	6,20	2,2	0,92	277,70
	7,30	2,8	1,49	252,53
	8,40	2,9	0,23	366,94
	9,40	2,5	0,49	312,52
	10,60	2,5	0,41	240,78
n-butanol(15%)	4,60	2,6	1,70	208,27
	5,00	2,0	1,02	138,01
	5,50	2,5	1,32	175,01
	6,50	2,0	0,66	141,67
	7,50	2,0	0,64	257,55
	8,60	2,0	0,47	266,08
	9,70	2,5	0,41	425,18

Como pode ser observado na Tabela 5.7, nos testes feitos com uma razão de compressão de 21,64:1, não aconteceu a queima do combustível. Assim, decidiu-se aumentar a razão de compressão de 21,64:1 para 26,81:1, obtendo combustão para as duas misturas (10 e 15% em massa de n-butanol), e os resultados são apresentados também na Tabela 5.8 .

Na Figura 5.38, observam-se as curvas de pressão no interior do cilindro para alguns testes realizados com a mistura de etanol e n-butanol (10%). Mediante estes testes, pode-se visualizar que, quando o avanço da injeção aumenta de 7,30 mm para 9,40 mm antes do PMS, o valor da pressão máxima tem um incremento de 20%. Observando a Tabela 5.7 pode-se notar que existe um valor máximo de pressão máxima no interior do cilindro em função do avanço da injeção. Este valor, nos testes realizados, foi de 165,10 bar, correspondente ao teste realizado com um avanço de 8,40 mm antes do PMS.

Ainda na Figura 5.38, pode-se observar que, de forma similar ao já relatado em outros testes, o valor do pico de pressão é influenciado pelo avanço da injeção. Isto normalmente acontece em função de dois fenômenos que atuam de formas opostas. Um maior avanço da injeção faz com que o combustível tenha mais tempo para vaporizar, porém a vaporização terá início sob condições piores de pressão e temperatura. Assim, a injeção prematura do combustível pode reduzir os valores de pressão e temperatura, devido ao alto calor latente de vaporização do etanol. É por isso que observamos na Figura 5.38 o maior pico de pressão dos testes e a maior taxa de variação

da pressão, ocorrendo quando foi testado um avanço intermediário, fato que deve ser tomado em conta quando a mistura seja testada no motor. Também é importante mencionar, que nos testes realizados com a mistura de etanol e n-butanol, para uma razão de compressão de 26,81:1, de acordo com a Figura 5.38, o valor da pressão máxima, para os testes com avanços de 7,30, 8,40 e 9,40 mm antes do PMS, se apresentou 0,70, 0,23 e 0,49 ms após o PMS, respectivamente.

O processo de ignição e combustão referentes aos testes com a mistura de etanol e n-butanol (10%) são mostradas nas Figuras 5.39, 5.40 e 5.41. De acordo com tais figuras, para os testes com os avanços de 5,70, 8,40 e 9,40 mm antes do PMS, determinou-se o atraso da ignição e estes são 2,00, 2,90 e 2,50 ms, respectivamente. Através destas imagens pode-se observar, que diferentemente de alguns testes realizados com razão de compressão superior a 25:1 onde para avanços maiores se tinham mais de uma região propícia para a ignição, os testes das misturas de etanol e n-butanol, não apresentaram este comportamento. Isto pode ser resultado de um número de cetano baixo, com relação às misturas de etanol e PEG, o que origina uma maior dificuldade para que o combustível vaporize e logo possa entrar em ignição. Com relação aos atrasos da ignição, pode-se comentar que apresenta na faixa testada um valor máximo de atraso da ignição.

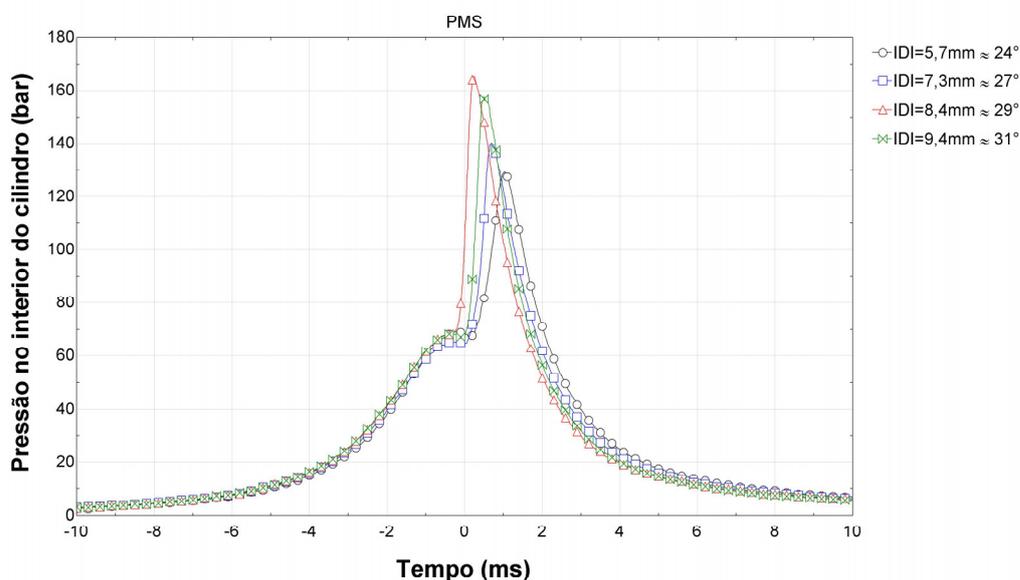


Figura 5.38: Pressão no cilindro para o teste com a mistura de etanol e n-Butanol (10%), 1900 rpm e RC = 26,81:1.

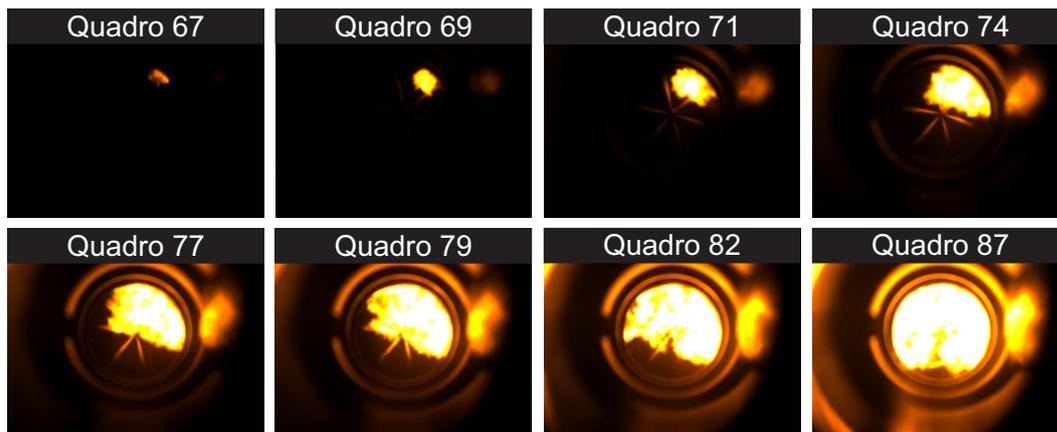


Figura 5.39: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e n-Butanol (10%), 1900 rpm, RC = 26,81:1 e IDI = 5,70 mm ($\sim 24^\circ$ - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

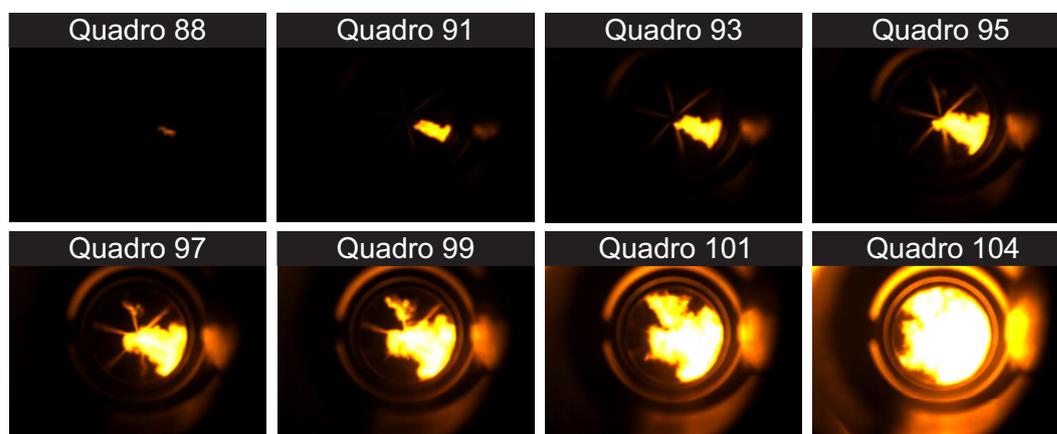


Figura 5.40: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e n-Butanol (10%), 1900 rpm, RC = 26,81:1 e IDI = 8,40 mm ($\sim 29^\circ$ - Quadro 4) antes do PMS. Imagens a 30000 qps.

Nos testes realizados com a mistura de etanol e n-butanol (15%), pode-se observar na Tabela 5.7 e Figura 5.42, que o valor da pressão máxima aumenta em 43% quando o avanço da injeção de combustível muda de 5,50 para 9,70 mm antes do PMS, fato que não foi observado quando testada a mistura de etanol e n-butanol (10%), aumento de 22% quando o avanço muda de 5,70 para 9,40 mm. Este incremento se deve ao avanço da injeção e ao processo de vaporização que tiveram ambas as misturas, naquelas condições, influenciando o atraso da ignição. Fazendo uma comparação com os testes realizados com a mistura de etanol e n-butanol (10%), onde o valor máximo das pressões máximas foi observado no meio da faixa de avanços testados, nos testes com percentual de n-butanol (15%), este valor máximo não se conseguiu determinar devido a que as pressões máximas da combustão ficaram perto dos valores máximos de

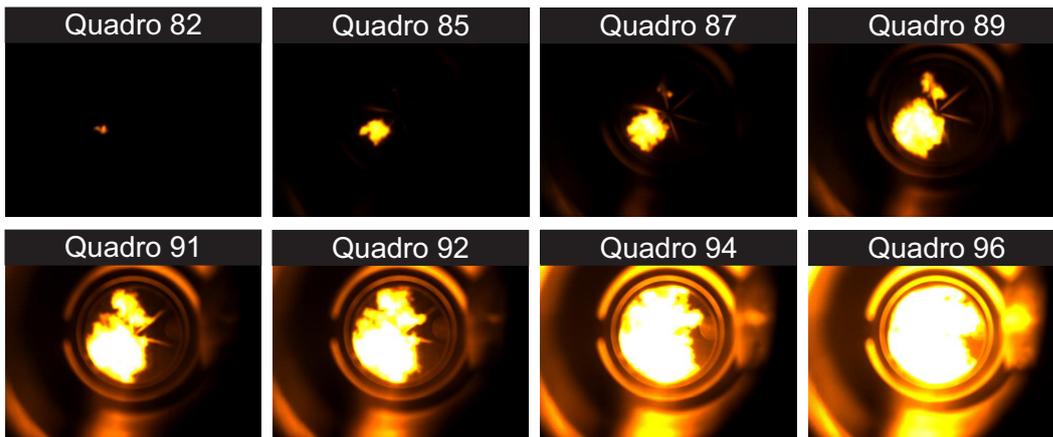


Figura 5.41: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e n-Butanol (10%), 1900 rpm, RC = 26,81:1 e IDI = 9,40 mm ($\sim 31^\circ$ - Quadro 4) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

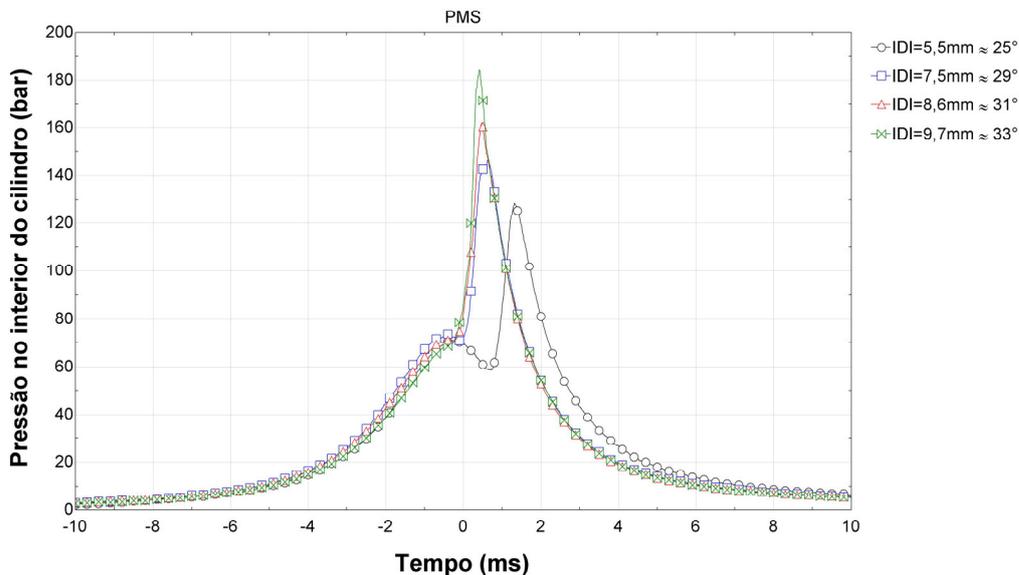


Figura 5.42: Pressão no cilindro para o teste com a mistura de etanol e n-Butanol (15%), 1900 rpm e RC = 26,81:1.

operação da MCR (200 bar). Com a finalidade de preservar os equipamentos, decidiu-se por não aumentar mais o avanço da injeção. É importante mencionar que o início da combustão para testes com avanços maiores a 7,50 mm ($\sim 29^\circ$) foram próximos do PMS, o que possibilita uma melhor queima do combustível. Uma vez mais é importante destacar que quanto maior é o avanço, maiores são as taxas de variação de pressão.

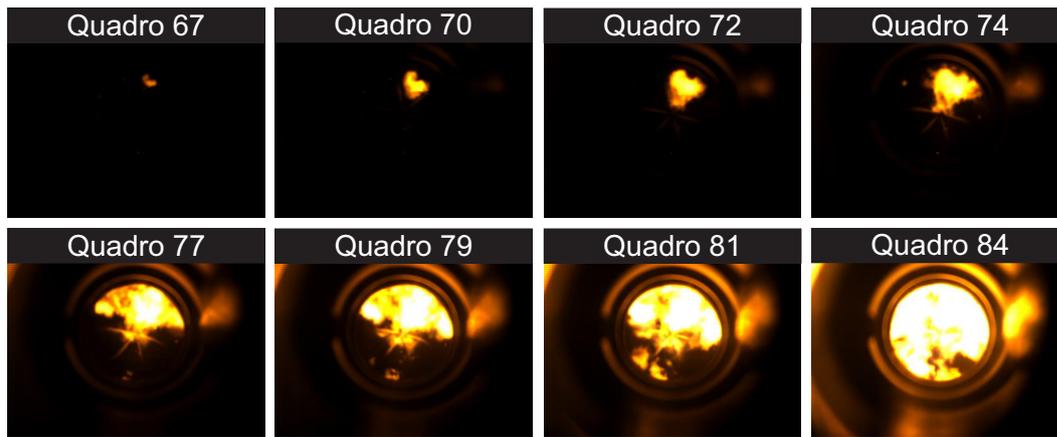


Figura 5.43: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e n-Butanol (15%), 1900 rpm, RC = 26,81:1 e IDI = 7,50 mm ($\sim 29^\circ$ - Quadro 5) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

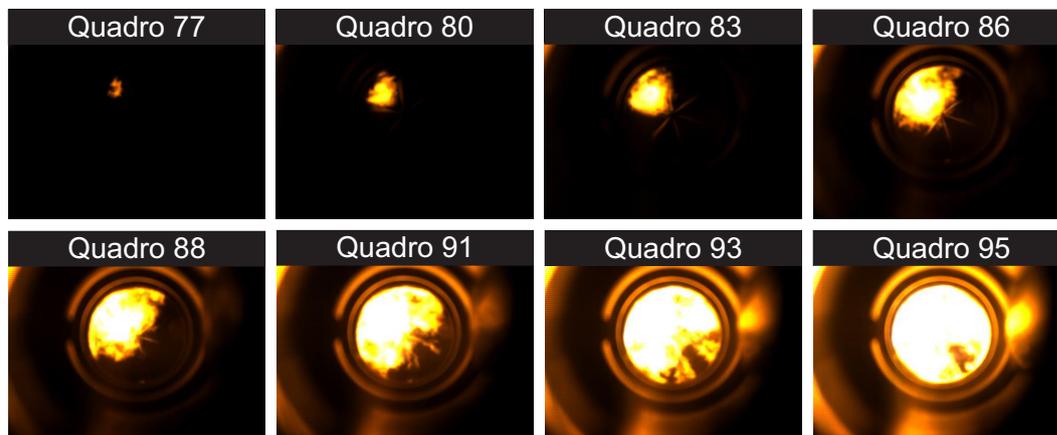


Figura 5.44: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e n-Butanol (15%), 1900 rpm, RC = 26,81:1 e IDI = 8,60 mm ($\sim 31^\circ$ - Quadro 4) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

Numa comparação dos dados referentes às pressões máximas para avanços similares, de 5,70 mm e 5,50 mm, 7,30 mm e 7,50 mm e 8,40 mm e 8,60 mm, para os testes com percentual de n-butanol de (10%) e (15%), respectivamente, constata-se: o incremento do percentual do n-butanol na mistura não alterou consideravelmente o valor da pressão máxima da combustão, já que a diferença máxima de valores de pressão máxima nos testes citados é de 4,54 %.

Na Tabela 5.7, é fácil observar a existência de um valor máximo de pressão máxima no interior do cilindro. Este valor máximo nos testes realizados com a mistura de etanol e n-butanol (15%) foi de 184,10 bar, correspondente ao testes realizado com um avanço de 9,70 mm antes do PMS. É importante mencionar, que para os testes realizados com a mistura antes descrita (etanol e n-butanol

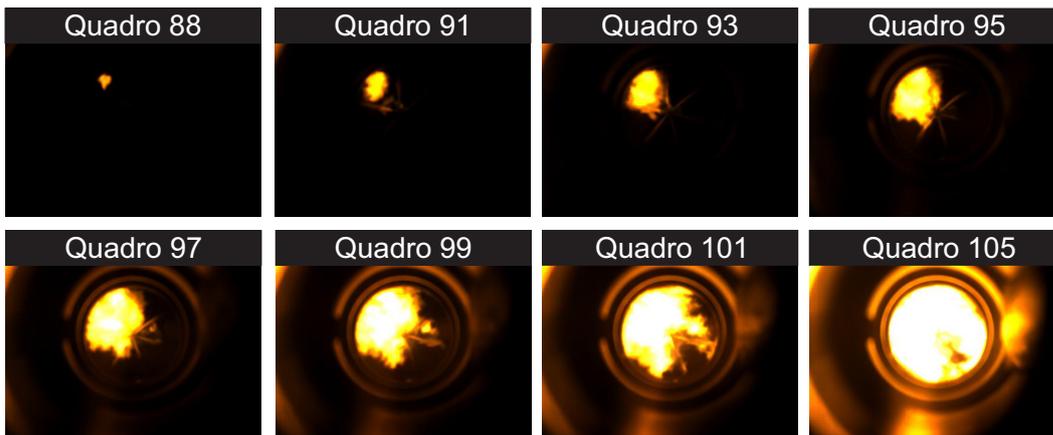


Figura 5.45: Ignição e combustão no teste da mistura etanol e n-Butanol (15%), 1900 rpm, RC = 26,81:1 e IDI = 9,70 mm ($\sim 33^\circ$ - Quadro 4) antes do PMS. Imagens a 30.000 qps.

(15%)) e avanços de injeção de 7,50, 8,60 e 9,70 mm antes do PMS, o valor da pressão máxima, apresentou-se 0,64, 0,47 e 0,41 ms após o PMS.

As Figuras 5.43, 5.44 e 5.45 mostram o processo de ignição e combustão dos testes feitos com a mistura de etanol e n-butanol (15%). De acordo com as figuras antes mencionadas, o atraso da ignição foi determinado para os avanços de 7,50, 8,60 e 9,70 mm antes do PMS, os quais foram de 2,00, 2,00 e 2,50 ms, respectivamente. Fazendo uma comparação entre as duas misturas testadas, pode-se observar que o comportamento é quase similar, mas o atraso da ignição é significativamente menor, quando a mistura tem maior percentual de n-butanol. Assim como também foi mencionado anteriormente, com relação aos testes das misturas de etanol e n-butanol (10%), quando testada a mistura de etanol e 15% de n-butanol, referentes as Figuras 5.43, 5.44 e 5.45, não se teve mais de uma região propícia para a ignição. Isto mostra que não foi suficiente à adição de maior quantidade de n-butanol, já que o número de cetano não aumentou de forma considerável. Devido a que o número de cetano da mistura é baixo (fato que não foi analisado), para que se gerem maiores regiões propícias para a ignição da mistura, a estratégia é aumentar a razão de compressão ou pre-aquecer o ar de admissão, de tal forma que quando injetada a mistura, esta possa encontrar melhores condições para a ignição.

Como foi observado anteriormente, os testes realizados com a mistura de etanol e n-butanol mostram que se precisa de um aumento na razão de compressão ($\geq 26,81:1$) com relação aos testes com as misturas de etanol e PEG. Este desafio pode ser superado mediante o pre-aquecimento do ar de admissão ou aquecimento do combustível, de tal forma que a mistura de etanol e n-butanol vaporize de maneira mais rápida.

É importante mencionar que, durante os testes com as misturas de etanol e n-butanol, a janela de visualização do pistão da MCR quebrou, devido à alta pressão na camera de combustão. Isto aconteceu, justamente quando se testava a mistura de etanol e n-butanol (15%) com avanço da injeção de 33° antes do PMS. Portanto, se recomenda, uma vez mais, o máximo de cuidado na hora de levar esta mistura ao motor.

Durante os testes preliminares, se conseguiu filmar o processo de combustão de todos os testes. Como pode ser observado, nas imagens dos testes de misturas de etanol e aditivo, a ignição origina-se em um ponto arbitrário, já que nem sempre acontece no mesmo lugar. Em comparação com o teste de referência feito com óleo Diesel S50, onde a ignição começa nas paredes do cilindro e de forma quase simétrica, nos testes com as misturas de etanol e aditivo, em nenhum caso aconteceu este fenômeno. Então, observando as diferentes imagens obtidas da filmagem de cada teste com misturas de etanol e aditivo, pode-se dizer que a ignição destas misturas ocorre de forma similar à ignição de um processo de ignição por centelha. Neste processo de combustão, a ignição do combustível começa na região onde a centelha foi produzida. Portanto, na ausência de uma centelha, como é este caso, pode-se dizer que para os testes com as misturas de etanol e aditivo, a ignição começou na região onde as condições para a autoignição do combustível foram as melhores.

5.2

Resultados dos Testes Finais

Como foi dito anteriormente, no início deste capítulo, uma vez realizados os testes preliminares, foram escolhidas as principais misturas, com a finalidade de se realizar uma análise mais detalhada. Durante a realização destes testes finais, deve-se ter em conta que muitos parâmetros foram alterados, com a finalidade de representar, de forma mais próxima, as condições do motor DW10. Mais especificamente, foram alteradas a razão de compressão, a pressão de admissão (turbo) e a relação de equivalência. É importante também mencionar que o objetivo não é fazer uma comparação com os resultados de testes no motor (razão de compressão original 16:1), e sim, ter uma referência mais próxima da realidade em relação à operação dos motores Diesel. Para o melhor entendimento dos resultados finais, estes serão divididos de acordo com os combustíveis e as misturas que foram testadas:

- Testes de Diesel S10.
- Testes das misturas de etanol e PEG400 (13%).
- Testes das misturas de etanol e n-butanol (10%).

Foram realizados testes na MCR em três diferentes razões de compressão: 16:1, 20:1 e 24:1. Não se utilizaram maiores razões de compressão, como nos testes preliminares, devido aos limites de operação da MCR, já que nos testes finais se considerou uma sobrecarga (turbo) em comparação com os testes preliminares, onde a pressão de admissão sempre foi igual a 1,10 bar.

Nesta fase não se utilizou o ED95, devido ao fato de que na época da realização dos testes, Novembro de 2015, o restante que se tinha de ED95, coletado em Maio de 2012, já estava degradado.

5.2.1

Testes com Diesel S10

Os testes foram realizados utilizando o Diesel S10 e não mais o S50, como foi feito durante a realização dos testes preliminares. Isto se deve ao fato de que, quando se iniciaram os testes finais, em Outubro de 2015, o Diesel S50 estava sendo retirado do mercado e substituído pelo Diesel S10. As condições de testes com Diesel S10 estão descritas na Tabela 4.12.

Durante a realização dos testes com o Diesel S10 se mantiveram as mesmas condições de pressão de injeção e relação de equivalência. O tempo de injeção de combustível muda conforme a razão de compressão, com a finalidade de manter a relação de equivalência, uma vez que a quantidade de ar admitido varia.

Tabela 5.9: Resultados dos testes com Diesel S10.

Situação	Diesel S10, RC=16:1		Diesel S10, RC=20:1		Diesel S10, RC=24:1	
	Avanço (mm)	Resultado	Avanço (mm)	Resultado	Avanço (mm)	Resultado
Combustão	-1,00	Não	-1,00	Sim	-1,00	Sim
P_Max (bar)	~ -10°	36,66	~ -12°	63,68	~ -11°	93,76
Combustão	0,00	Sim	0,00	Sim	0,00	Sim
P_Max (bar)	~ 1°	58,98	~ 1°	67,56	~ 1°	96,96
Combustão	1,00	Sim	1,00	Sim	1,00	Sim
P_Max (bar)	~ 10°	67,15	~ 9°	88,41	~ 10°	112,23
Combustão	2,00	Sim	2,00	Sim	2,00	Sim
P_Max (bar)	~ 13°	75,76	~ 12°	94,96	~ 13°	125,95

Os resultados destes novos testes com óleo diesel S10 são descritos nas Tabelas 5.9 e 5.15, onde pode-se observar que quando o óleo diesel é injetado após o PMS, para uma razão de compressão de 16:1, não acontece a queima deste combustível. No motor pode-se observar que, em muitos regimes de operação, a injeção principal acontece após o PMS. É importante mencionar que além da injeção principal, se tem, em muitos casos duas pré-injeções de combustível. Isto faz parte da técnica de otimização do motor com a finalidade de diminuir as emissões e melhorar seu rendimento.

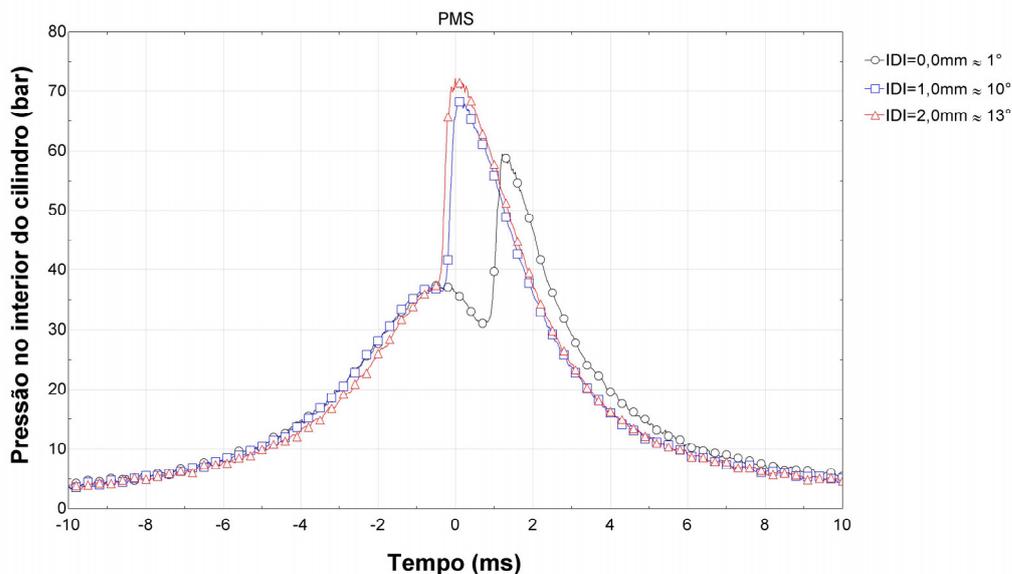


Figura 5.46: Pressão no cilindro para o teste com óleo Diesel S10, 1500 rpm e RC = 16:1.

Na Figura 5.46, pode-se observar o comportamento da pressão ao longo dos testes, para cada avanço de injeção de combustível. É importante notar o início da combustão e a localização do valor máximo de pressão em cada teste. Quanto maior é o avanço, mais cedo ocorre a combustão, mas isso não quer dizer que o atraso de ignição seja menor. Além da ignição acontecer antes, é fácil observar que a ignição para avanços maiores, acontece antes do PMS, fato que pode ser prejudicial, pois pode originar uma contra-pressão elevada sobre o pistão, gerando trabalho negativo (trabalho indicado) e, no pior dos casos, detonação. O aumento de 1 mm no avanço, com relação à injeção no PMS, gera um incremento no valor máximo de pressão ao redor de 13,85%. Já, quando o incremento é de 2 mm, o valor da pressão máxima aumenta em 28,45%. Os valores de pressão máxima nos testes realizados, para avanços de 0, 1 e 2 mm antes do PMS, acontecem 1,07, 0,21 ms após o PMS e 0,15 ms antes do PMS, respectivamente.

Seguindo a análise dos testes apresentados na Figura 5.46, as máximas taxas de variação da pressão, após a injeção de combustível para os testes com avanços de 0,0, 1,0 e 2,0 mm antes do PMS, foram 80,17, 98,77 e 128,88 bar/ms, respectivamente, as quais aconteceram 0,83, 0,02 ms após o PMS e 0,36 ms antes do PMS. De acordo com os dados mostrados, quanto maior é o avanço, há uma tendência de elevação do ruído que se produz da ignição do óleo diesel S10.

É importante mencionar, antes da apresentação e comentários referentes às figuras de calor aparente liberado, que durante os testes na MCR, os deslocamentos do pistão nos processos de compressão e expansão são totalmente diferentes. Na compressão o controle do deslocamento é realizado por meio do controle da pressão de acionamento do pistão e na expansão, o deslocamento é realizado mediante o balanço das pressões (no interior da câmara e a pressão residual de acionamento). Portanto, a análise de calor liberado aparente, serve somente de ajuda na determinação do início da combustão, nos casos nos quais foi difícil determinar este parâmetro por meio da curva de pressão.

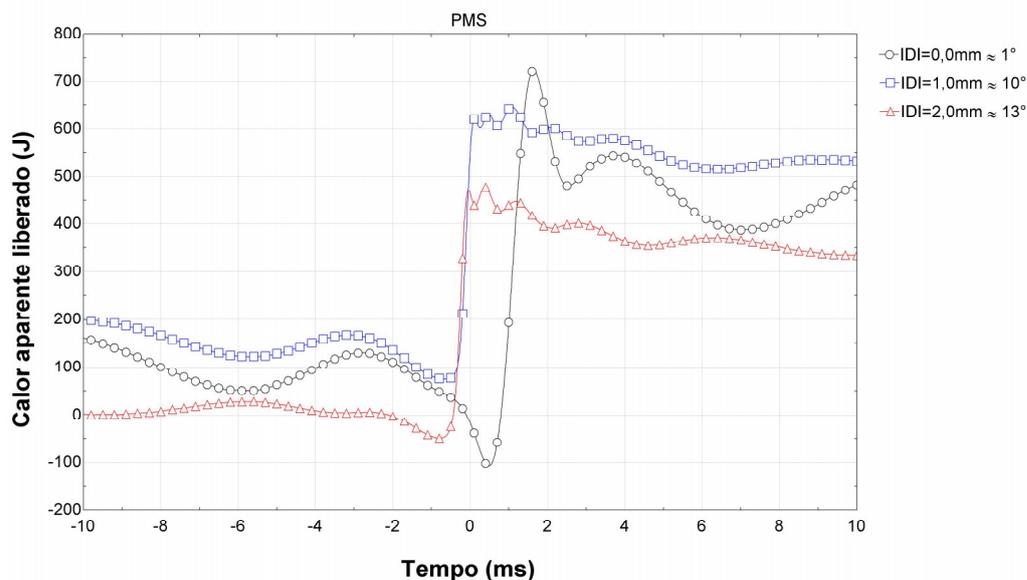


Figura 5.47: Calor aparente liberado para o teste com óleo Diesel S10, 1500 rpm e RC = 16:1.

Na Figura 5.47 mostra-se o calor aparente acumulado para os testes com óleo Diesel S10, razão de compressão 16:1 e avanços de 0,0, 1,0 e 2,0 mm antes do PMS. Como é fácil observar, o valor máximo de calor acumulado reflete a influência do avanço da injeção, já que, quanto maior o avanço neste grupo de testes, menor o calor aparente acumulado. O incremento de 1,0 mm no avanço, com relação ao testes com injeção de combustível no PMS, originou

uma diminuição de 4,77% e um incremento de 2 mm no avanço, originou uma diminuição de 26,94% no valor máximo do calor aparente acumulado. Como foi dito anteriormente, com relação à Figura 5.46, quando o processo de ignição acontece antes do PMS. Por este motivo observa-se uma alta taxa de liberação de calor. Já quando o início da injeção acontece no PMS, a taxa de liberação de calor é menor e o atraso da ignição é maior.

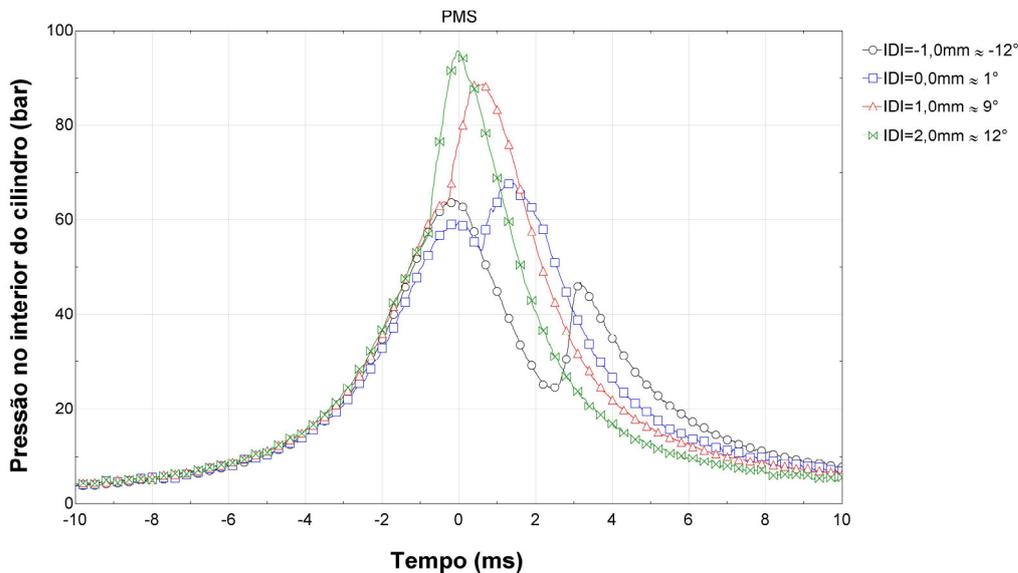


Figura 5.48: Pressão no cilindro para o teste com óleo Diesel S10, 1900 rpm e RC = 20:1.

A Figura 5.48, apresenta o comportamento da pressão ao longo dos testes, para cada avanço de injeção de combustível, nos testes com razão de compressão 20:1. É determinado o início da combustão e valores máximos de pressão, assim como a localização destes ao longo do tempo. De forma semelhante aos testes com razão de compressão 16:1, quanto maior foi o avanço, mais cedo acontece a combustão. Pode-se observar que, quando a injeção acontece após o PMS, o valor da pressão máxima, como consequência da combustão, é menor com relação a pressão de compressão. Este fato pode ser também observado nas curvas de pressão no motor DW10, quando a injeção principal acontece após o PMS e o motor encontra-se operando em baixas cargas. O atraso da injeção em 1 mm, com relação ao teste com injeção no PMS, origina uma diminuição de 30,64% no valor da pressão máxima de combustão. O aumento de 1 mm no avanço, com relação ao teste com injeção no PMS, gera um incremento no valor máximo de pressão ao redor de 30,85%. Já o incremento de 2 mm, aumenta em 40,56% o valor da pressão máxima. Os valores de pressão máxima nos testes realizados, para avanços de -1,0, 0,0, 1,0

e 2,0 mm antes do PMS, aconteceram 3,16, 1,07, 0,64 e 0,17 ms após do PMS, respectivamente. Uma vez mais, como no teste anterior (óleo diesel S10 - RC = 16:1), para avanços maiores, o início da ignição aconteceu antes do PMS. Como é mostrado na Figura 5.48, no processo de combustão para o avanço de 2,00 mm antes do PMS, a ignição acontece bem antes do PMS, causando uma contra-pressão considerável, gerando na maioria dos casos um trabalho negativo e perda de eficiência da combustão.

É importante mencionar que nos testes apresentados na Figura 5.48, as máximas taxas de variação da pressão após a injeção de combustível para os testes com avanços de -1,0, 0,0, 1,0 e 2,0 mm antes do PMS, foram 21,39, 25,02, 36,80 e 59,07 bar/ms, respectivamente, e aconteceram 2,92, 0,66, 0,26 após o PMS e 0,23 ms antes do PMS, respectivamente. Uma taxa de variação da pressão elevada antes do PMS, pode originar ao longo dos testes a detonação. Por isso é importante sempre monitorar a curva de pressão quando se esta mudando o avanço, a fim de evitar fenômenos como este, que prejudiquem a vida útil do motor.

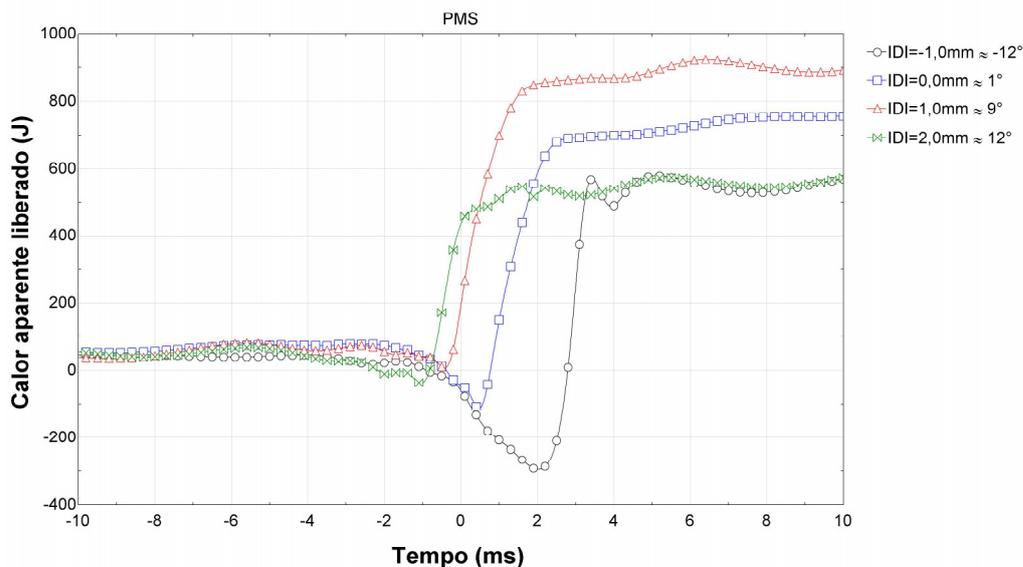


Figura 5.49: Calor aparente liberado para o teste com óleo Diesel S10, 1900 rpm e RC = 20:1.

A Figura 5.49 mostra o comportamento do calor aparente acumulado para os testes com óleo Diesel S10, razão de compressão 20:1 e avanços de -1,0, 0,0, 1,0 e 2,0 mm antes do PMS. mais uma vez nota-se que o valor máximo de calor acumulado é influenciado pelo avanço da injeção. O incremento de 1,0 mm no avanço, com relação aos testes com injeção de combustível no PMS originou um aumento de 5,47%, e o incremento de 2 mm no avanço,

uma diminuição de 34,74% no valor máximo do calor aparente acumulado. Já para o teste com injeção 1,0 mm após o PMS, o valor acumulado de calor liberado foi de aproximadamente 645,46 J, o que mostra uma diminuição de 29,05% com relação ao teste realizado com injeção de combustível no PMS. Observando a Figura 5.49, pode-se afirmar que os testes com avanços -1,0 e 2,0 mm, praticamente produziram a mesma quantidade de calor liberado. Mas, observando as curvas de pressão apresentadas na Figura 5.48, vê-se que existe uma grande diferença, tanto no valor da pressão máxima, quanto na localização desta. A origem deste fenômeno é a forma como se desenvolve a pressão ao longo da expansão. Este fenômeno acontece porque o processo de expansão na máquina de compressão é originado pela pressão na câmara de combustão após o PMS. Apesar das dificuldades para se analisar o calor aparente, devido às restrições que foram comentadas anteriormente, pode-se visualizar com ampla clareza, que o fato de um processo de compressão ter um pico elevado de pressão não significa que seja mais eficiente que outro com menor pico de pressão. Além disso, o fato de ter a injeção bem antes do PMS, originou uma perda de eficiência como é mostrado na curva dos testes com avanço 2mm apresentada na Figura 5.49

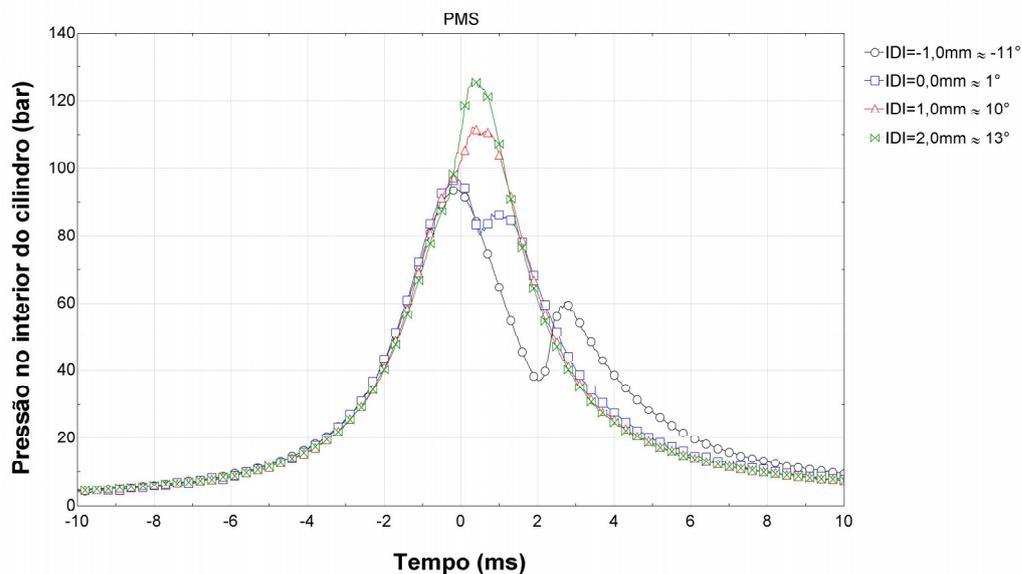


Figura 5.50: Pressão no cilindro para o teste com óleo Diesel S10, 2400 rpm e TC = 24:1.

Através da Figura 5.50, pode ser observado o comportamento da pressão ao longo dos testes com razão de compressão 24:1, para os diferentes avanços de injeção de combustível. O início da combustão e valores máximos de pressão, assim como a localização destes ao longo do tempo são determinados.

Novamente, quanto maior for o avanço, mais cedo acontece a combustão. Pode-se observar que, quando a injeção acontece após o PMS e no PMS, o valor da pressão máxima como consequência da combustão é menor com relação a pressão de compressão, de forma similar aos testes com razão de compressão 20:1. O atraso da injeção em 1,0 mm, com relação ao teste com injeção no PMS, origina uma diminuição de 30,32% no valor da pressão máxima de combustão. Já o aumento de 1,0 mm no avanço, com relação ao testes com injeção no PMS, gera um incremento no valor máximo de pressão ao redor de 29,36% e no caso de 2,0 mm, o valor da pressão máxima aumenta em 45,18% em relação ao caso com avanço da injeção no PMS. Os valores de pressão máxima da combustão nos testes realizados, para avanços de -1,0, 0,0, 1,0 e 2,0 mm antes do PMS, aconteceram 2,73, 0,92, 0,31 e 0,32 ms após do PMS, respectivamente.

Outro fenômeno que se apresenta na Figura 5.50, pode ser visualizado quando comparado com a 5.48, quando para avanços no PMS e 1 mm após o PMS, o valor da pressão máxima produto da combustão foi menor que a pressão máxima no processo de compressão. Isto é devido, basicamente, ao tempo que o combustível tem para vaporizar, devido a que a velocidade do pistão aumenta conforme a razão de compressão aumenta.

Nos testes apresentados na Figura 5.50, as máximas taxas de variação da pressão após a injeção de combustível para os testes com avanços de -1,0, 0,0, 1,0 e 2,0 mm antes do PMS, foram 52,90, 13,31, 42,03 e 73,04 bar/ms, respectivamente, os quais aconteceram 2,37, 0,86, 0,17 e 0,04 ms após o PMS, respectivamente. Normalmente, sob as mesmas condições (rotação e carga) no motor, quanto maior a razão de compressão, se espera que a taxa de variação da pressão aumente. Nos testes descritos na Figura 5.50, isto não acontece de forma clara, devido a que quanto maior é a razão de compressão, menor é o tempo que o combustível injetado tem para se vaporizar. O tempo que o combustível permanece nas condições de temperatura e pressão propícias para a ignição dependem da velocidade do pistão. Na MCR, com a finalidade de aumentar a razão de compressão, aumenta-se a pressão de acionamento do pistão, originando uma maior velocidade de deslocamento deste.

A Figura 5.51 apresenta o comportamento do calor aparente acumulado para os testes com óleo Diesel S10, razão de compressão 24:1 e avanços de -1,0, 0,0, 1,0 e 2,0 mm antes do PMS. O valor máximo de calor acumulado apresenta a influência do avanço da injeção. Portanto, o incremento de 1 mm no avanço, com relação ao teste com injeção de combustível no PMS, originou um incremento de 4,12%, e no caso de 2,0 mm no avanço, originou um aumento de 5,74% no valor máximo do calor aparente acumulado. No teste com injeção 1,0 mm após o PMS, o valor máximo acumulado de calor liberado

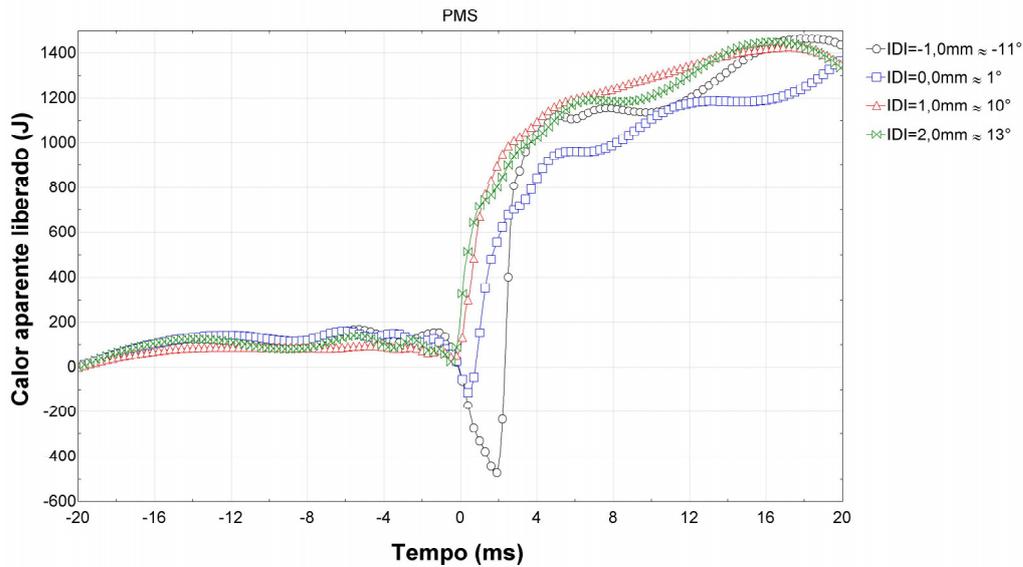


Figura 5.51: Calor aparente liberado para o teste com óleo Diesel S10, 2400 rpm e RC = 24:1.

foi de aproximadamente 1464,63 J, o que mostra um incremento de 6,86% com relação ao teste realizado com injeção de combustível no PMS. Os valores máximos de calor aparente acumulado, referentes aos testes descritos na Figura 5.51, foram de 1464,63, 1370,56, 1427,05 e 1449,34 J, para os avanços de -1,0, 0,0, 1,0 e 2,0 mm antes do PMS, respectivamente.

Como é mostrado na Figura 5.51, o fato de injetar o combustível após o PMS, origina nas curvas de calor liberado uma grande queda, devido ao fato que as condições de pressão e temperatura propícias para a ignição diminuem conforme o pistão se desloca para o PMI, dificultando o processo de vaporização e por conseguinte aumentando o atraso da ignição.

Tabela 5.10: Atraso da ignição para os testes com óleo Diesel S10.

Avanço (mm)	16:1		20:1		24:1	
	\bar{X} (ms)	DM (ms)	\bar{X} (ms)	DM (ms)	\bar{X} (ms)	DM (ms)
-1,00	-	-	1,36	0,16	1,07	0,12
0,00	0,59	0,12	0,51	0,10	0,42	0,04
1,00	0,51	0,11	0,37	0,06	0,21	0,05
2,00	0,48	0,07	0,30	0,06	0,15	0,04

Na Tabela 5.10 mostra-se, para cada teste, o atraso da ignição. O método utilizado para determinar este parâmetro foi descrito no Capítulo 3. Na tabela descrita, se apresenta a média (\bar{X}) e o desvio da média (DM) para os 50 testes realizados em cada condição. Pode-se observar para cada razão de compressão, quanto maior é o avanço, o atraso de ignição é menor. Também é fácil notar

que, para cada avanço, quando a razão de compressão aumenta, o atraso de ignição diminui.

Observa-se que a média dos valores de atraso da ignição, para os testes com razão de compressão 16:1, diminui 18,64% quando o avanço da injeção muda de 0 para 2 mm antes do PMS. Esta diminuição é maior devido ao aumento da razão de compressão, quando comparados os mesmos avanços para as razões de compressão de 20:1 e 24:1, registrando uma queda de 40,38 e 64,28% respectivamente, em relação à razão de compressão de 16:1.

Quando comparadas diferentes razões de compressão, 16:1 e 24:1, para um mesmo avanço da injeção de combustível, pode-se observar que os percentuais de diminuição do atraso da ignição foram 28,81, 58,82 e 68,75% para os avanços de 0, 1 e 2 mm antes do PMS, respectivamente.

Como nos testes preliminares, o pico de pressão cresce com o avanço da injeção. E também aumenta com o aumento da razão de compressão. O avanço da injeção, assim como o atraso da ignição, estão fortemente relacionados. Assim como observado nos testes preliminares, existe uma faixa na qual o avanço da injeção pode ser mudado, e por conseguinte existe um máximo e um mínimo no valor de atraso da ignição. Isto não pode ser observado nos testes com óleo Diesel S10 devido à faixa de avanços utilizados nos testes.

Os testes realizados com óleo diesel servem de referência para os testes com as misturas de etanol e aditivos. O objetivo é avaliar o atraso de ignição, o qual indica a facilidade do combustível injetado entrar em combustão, mediante o processo de ignição por compressão a uma condição determinada (número de cetano). Já foi frisado que o número de cetano do etanol é muito menor do que o número de cetano do óleo diesel. Assim, diversas modificações tanto físicas (aumento da razão de compressão) como químicas (adição de aditivo), foram utilizadas, com a finalidade do etanol se comportar de forma mais similar ao óleo diesel. É importante mencionar que no princípio desta fase do trabalho se tinha o desejo de realizar testes com misturas de etanol e PEG600, além dos demais já apresentados. Devido ao sistema de equalização de deslocamento do pistão da máquina de compressão rápida sofrer danos, tais testes não foram realizados. A seguir apresentam-se os resultados para os testes com as misturas de etanol com PEG400 e etanol com n-butanol.

5.2.2

Testes das misturas de etanol e PEG400 (13%)

Após os testes com Diesel S10, descritos anteriormente, realizaram-se os ensaios utilizando a mistura de etanol e PEG 400, este último com uma participação de 13% em massa na mistura. Tendo sempre em conta que, quanto maior é o percentual do aditivo na mistura, maior é o custo do combustível (mistura). Com isso, optou-se por realizar novamente os testes com a mistura mencionada, sob condições de operação mais próximas às do motor DW10. As condições de testes com a mistura de etanol e PEG 400 estão descritos no Capítulo 3, Tabela 4.13.

Em todos os testes realizados com a mistura etanol e PEG 400, mantiveram-se, igualmente aos testes com óleo diesel, as condições de pressão de injeção e relação de equivalência. Os parâmetros que são modificados, para cada grupo de teste, são o tempo de injeção de combustível e a razão de compressão. O primeiro como consequência do segundo, porque o deslocamento do pistão muda conforme muda a razão de compressão e, portanto, a quantidade de ar admitida no processo de compressão também varia. Para manter a relação de equivalência constante, optou-se por mudar também a quantidade de combustível injetada, mediante a mudança do tempo de injeção, mantendo a pressão de injeção constante.

O resumo dos resultados, com relação aos testes feitos com a mistura de etanol e PEG400, são descritos na Tabela 5.11. Nesta pode-se observar que quando os testes são feitos com razão de compressão 20:1, para os avanços de 0,0 e 1,0 mm antes do PMS (aproximadamente 0 e 9 °CA), não acontece a combustão. Isto é um fenômeno que ocorre normalmente, quando é testado o etanol sob as mesmas condições que o óleo diesel, devido, ao baixo número de cetano e também ao alto valor do calor latente de vaporização do etanol. Assim, o etanol precisa de maior quantidade de energia e tempo para poder vaporizar e encontrar as condições mínimas necessárias para entrar em combustão. Esta última é uma das características que dificultam, de forma significativa, a utilização do etanol em motores ou ciclos de ignição por compressão. É por isso que, quando as condições dentro da câmara de combustão, no momento da injeção "melhoram", o etanol entra em combustão com maior facilidade. Por exemplo, quando se aumenta a razão de compressão (de 20:1 para 24:1), para avanços menores, consegue-se a queima do etanol.

É importante destacar que, à medida que o avanço da injeção é maior, a pressão máxima da combustão também aumenta de forma significativa. Durante os testes com razão de compressão 20:1, tentou-se realizar testes com avanços maiores a 6 mm antes do PMS. O resultado não foi satisfatório, porque

não se teve boa repetitividade no processo de combustão sob estas condições. Em muitos testes não se obteve a queima do etanol aditivado, e quando ocorreu, a pressão máxima ficou perto de 180 bar.

A não repetitividade está relacionada, provavelmente, à ignição estar ocorrendo "no limite" do par pressão e temperatura necessário para sua ocorrência. Maiores pressões e temperaturas levaram, certamente, à ocorrência de maior número de regiões propícias, fazendo com que o processo ignição-combustão se aproximasse mais do caso diesel.

Tabela 5.11: Resultados dos testes da mistura de etanol e PEG 400 (13%).

Situação	PEG400, RC=20:1		PEG400, RC=24:1	
	Avanço (mm)	Resultado	Avanço (mm)	Resultado
Combustão	0,00	Não	0,00	Sim
P_Max (bar)	~ 0°	63,81	~ 0°	97,84
Combustão	1,00	Não	1,00	Sim
P_Max (bar)	~ 9°	63,10	~ 9°	112,92
Combustão	2,00	Sim	2,00	Sim
P_Max (bar)	~ 14°	118,94	~ 13°	132,19
Combustão	3,00	Sim	3,00	Sim
P_Max (bar)	~ 18°	123,23	~ 17°	138,59
Combustão	4,00	Sim	-	-
P_Max (bar)	~ 21	136,17	-	-
Combustão	5,00	Sim	-	-
P_Max (bar)	~ 23°	144,86	-	-
Combustão	6,00	Sim	-	-
P_Max (bar)	~ 25°	148,90	-	-

Observando a Tabela 5.11, pode-se verificar que, para um mesmo avanço da injeção de combustível (2,0 mm antes do PMS), a pressão máxima apresenta um incremento de 11,14%, quando se altera a razão de compressão de 20:1 para 24:1. Caso parecido também pode ser observado quando o avanço da injeção é de 3,0 mm antes do PMS, onde o fato de mudar a razão de compressão, significou um aumento na pressão máxima de 12,46%. Quando analisados os valores de pressão máxima para os testes com a mesma razão de compressão, 20:1, pode-se notar que o aumento do avanço da injeção em 2,0 mm e 4,0 mm, com relação aos testes com avanço 2,0 mm antes do PMS, gera aumentos no valor da pressão máxima de 14,48 e 25,18%, respectivamente.

Mediante a Figura 5.52, se apresenta o comportamento da pressão ao longo dos testes da mistura de etanol e PEG400, com razão de compressão 20:1 e diferentes avanços de injeção de combustível. Foram determinados o início da combustão e valores máximos de pressão, assim como a localização destes, ao longo do processo. Como foi explicado anteriormente, e observado nos testes com óleo diesel, quanto maior for o avanço, mais cedo acontece a

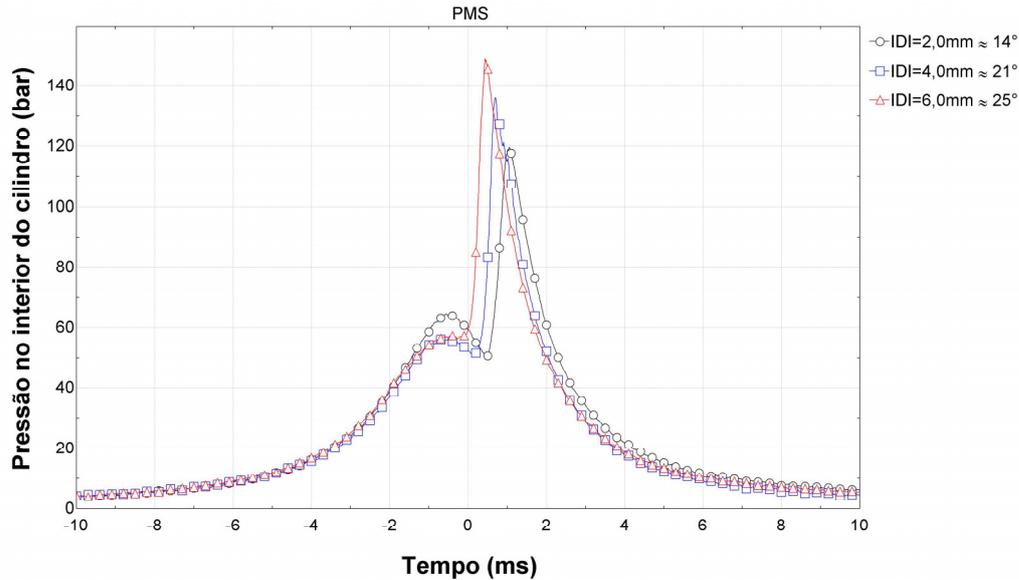


Figura 5.52: Pressão no cilindro para o teste da mistura de etanol e PEG 400 (13%), 1900 rpm e RC = 20:1.

combustão, como pode ser observado na Figura 5.52. Os valores de pressão máxima da combustão nos testes realizados, para avanços de 2,0, 4,0 e 6,0 mm antes do PMS, aconteceram 1,06, 0,70 e 0,43 ms após o PMS, respectivamente. Para os testes com avanços 3,0 e 5,0 mm antes do PMS, que não são mostrados na Figura 5.52, os valores da pressão máxima acontecem 0,93 e 0,65 ms após o PMS, respectivamente.

Nos testes apresentados na Figura 5.52, observa-se que existe uma maior inclinação na curva de pressão após o início da combustão quando o avanço da injeção é maior. Se comparadas com os testes de óleo diesel, para a mesma razão de compressão, as máximas taxas de variação da pressão, após a injeção de combustível, são muito maiores. Para os testes com avanços de 2,0, 4,0 e 6,0 mm antes do PMS, as máximas taxas de variação da pressão, após o início da combustão, foram de 161,41, 217,44 e 324,86 bar/ms, os quais aconteceram 0,83, 0,57 e 0,29 ms após o PMS, respectivamente. Comparando estes valores aos dos testes com óleo Diesel S10 para a mesma razão de compressão (20:1), é fácil observar que a taxa de variação da pressão nos testes descritos na Figura 5.52, são elevados. Este fenômeno é uma característica da queima do etanol e se manifesta de forma maior quando o avanço da injeção fica mais longe do PMS. Basicamente, quando o etanol é injetado com um avanço maior, se permite que, a massa de combustível já vaporizada encontre melhores condições de pressão e temperatura, permitindo assim uma queima mais rápida. É importante mencionar que em muitos dos casos, no instante da ignição ainda se tem

massa de combustível vaporizando e também injetando. Devido ao baixo poder calorífico inferior do etanol precisa-se de injetar maior quantidade de etanol ao processo. Este desafio pode ser superado aumentando a pressão de injeção ou aumentando o tempo de injeção. Muitas das vezes, combinar estas duas variáveis não resolve o problema, pelo que é recomendável realizar mais de uma injeção (pré-injeções). Além disso, é importante ter o cuidado na hora de testar as misturas de etanol no motor, já que além de originar níveis de ruído elevados, pode originar detonação e desgaste dos elementos do motor.

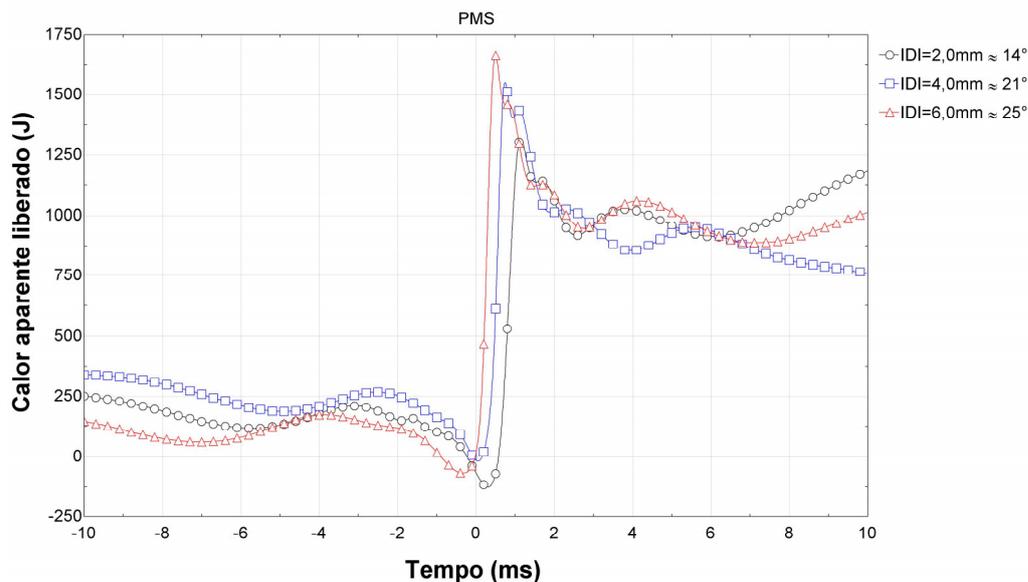


Figura 5.53: Calor aparente liberado para o teste da mistura de etanol e PEG 400 (13%), 1900 rpm e RC = 20:1

Na Figura 5.53, observa-se o comportamento do calor aparente acumulado para os testes com a mistura de etanol e PEG400, razão de compressão 20:1 e avanços de 2,0, 4,0 e 6,0 mm antes do PMS. O valor máximo de calor acumulado teve a influência do avanço da injeção. É por isso que o incremento de 2,0 mm no avanço, com relação ao testes com injeção de combustível 2,0 mm antes do PMS, originou um incremento de 17,86%. Para o caso de incremento de 4,0 mm no avanço, o aumento foi de 26,38% no valor máximo do calor aparente acumulado. Para os testes antes descritos, o valor máximo acumulado de calor liberado foi de 1315,85, 1150,97 e 1663,05 J, respectivamente. De acordo com as curvas apresentadas na Figura 5.53, o fato de aumentar o avanço da injeção pode ajudar na queima da mistura, gerando uma melhor eficiência e produzindo menores teores de HC nas emissões, mas também pode originar pressões elevadas e detonação.

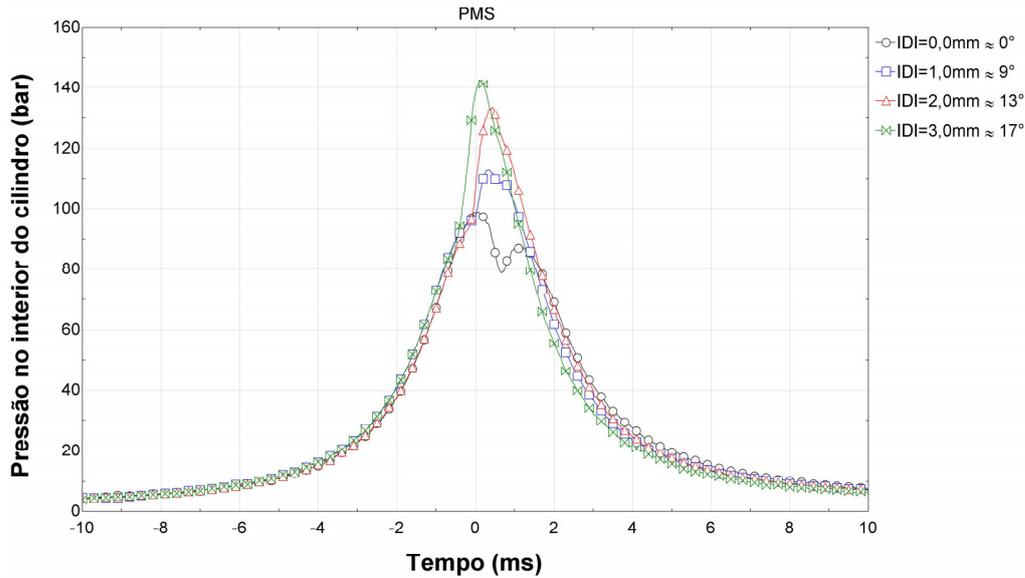


Figura 5.54: Pressão no cilindro para o teste da mistura de etanol e PEG 400 (13%), 2400 rpm e RC = 24:1.

Por meio da Figura 5.54 pode-se observar o comportamento da pressão ao longo dos testes com a mistura de etanol e PEG400 (13%), razão de compressão 24:1 e diferentes avanços de injeção de combustível, que vão de 0,0 até 3,0 mm antes do PMS. É também importante mencionar que, devido ao aumento da razão de compressão, não se precisou de avanços maiores para que a queima da mistura. Como parte da análise, foram determinados o início da combustão e valores máximos de pressão, assim como a localização destes após o início da combustão. Como acontece na maioria dos testes, para avanços menores ou injeção após o PMS, a pressão máxima, produto da queima da mistura, fica menor que a pressão máxima da compressão. Este fato voltou a ser observado quando testada a mistura, sob as condições mencionadas na Tabela 4.13, onde o combustível é injetado no PMS. De forma similar à maioria dos testes realizados, foi observado, uma vez mais que, quanto maior o avanço, mais cedo ocorre a combustão, na faixa testada. Os valores de pressão máxima da combustão nos testes realizados, para avanços de 0,0, 1,0, 2,0 e 3,0 mm antes do PMS, aconteceram 1,05, 0,34, 0,35 e 0,09 ms após o PMS, respectivamente. O valor da pressão máxima da combustão, para o teste com injeção de combustível no PMS, foi de 87,44 bar.

Nos testes apresentados na Figura 5.54 observa-se, de forma similar aos testes realizados com razão de compressão 20:1, que existe uma maior inclinação na curva de pressão após o início da combustão quando o avanço da injeção é maior. Para os testes com avanços de 0,0 1,0, 2,0 e 3,0 mm antes do

PMS, as máximas taxas de variação da pressão, após o início da combustão, foram de 23,63, 49,28, 96,05 e 114,08 bar/ms, que aconteceram 0,84, 0,15, 0,10 ms após o PMS e 0,15 antes do PMS, respectivamente. Como foi mencionado nos testes com as misturas de etanol e PEG400, na razão de compressão 20:1 em relação ao óleo diesel S10, se esperava, mais uma vez, o aumento da taxa de variação da pressão para este conjunto de testes, mas isto não aconteceu, pois a velocidade do pistão aumentou conforme a razão de compressão aumentou.

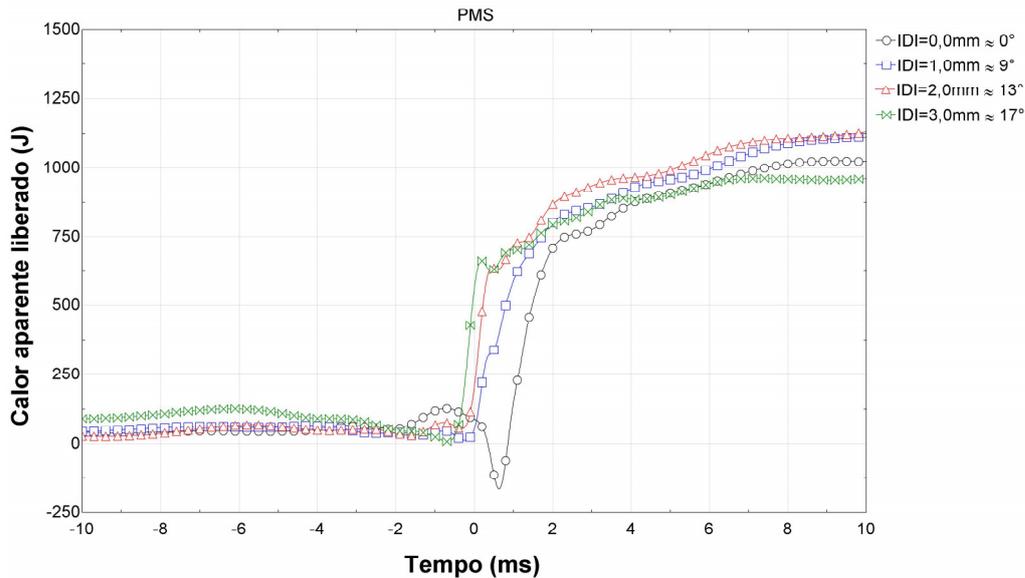


Figura 5.55: Calor aparente liberado para o teste da mistura de etanol e PEG 400 (13%), 2400 rpm e RC = 24:1

Através da Figura 5.55 pode-se observar o comportamento do calor aparente acumulado para os testes com a mistura de etanol e PEG400, razão de compressão 24:1 e avanços de 0,0, 1,0, 2,0 e 3,0 mm antes do PMS. O valor máximo de calor acumulado foi influenciado pelo avanço da injeção. Assim, um incremento de 1 mm no avanço, com relação ao teste com injeção de combustível no PMS, originou um incremento de 12,54%, e o incremento de 2,0 mm no avanço, originou um aumento de 27,92% no valor máximo do calor aparente acumulado. Já um incremento de 3 mm no avanço originou uma diminuição no valor máximo de calor acumulado. Para estes testes, o valor acumulado de calor liberado foi de 1112,19, 1251,77, 1422,82 e 1060,41 J, respectivamente. A injeção da mistura de etanol e PEG400 (13%) no PMS gera uma grande absorção de calor, por parte da mistura para se vaporizar, no processo de expansão. Isto pode originar uma queda na eficiência da combustão assim como também maior presença de HC nas emissões, devido à não vaporização completa ou à queima incompleta da mistura.

Tabela 5.12: Atraso da ignição para os testes da mistura de etanol e PEG 400 (13%).

Avanço (mm)	20:1		24:1	
	\bar{X} (ms)	DM (ms)	\bar{X} (ms)	DM (ms)
0,00	-	-	0,49	0,05
1,00	-	-	0,36	0,04
2,00	1,34	0,12	0,35	0,05
3,00	1,50	0,05	0,38	0,07
4,00	1,59	0,07	-	-
5,00	1,71	0,08	-	-
6,00	1,78	0,11	-	-

A Tabela 5.12 apresenta, para cada grupo de testes, o atraso médio da ignição. Nota-se que, para a razão de compressão 20:1, quanto maior é o avanço da injeção, maior também é o atraso da ignição (fato diferente do que acontece quando é testado sob as mesmas condições o óleo diesel). Mas, cabe mencionar que os avanços não são os mesmos, e talvez exista um valor de atraso da ignição mínimo, na faixa de avanço onde existe queima do etanol aditivado com PEG400. Se menciona isto, já que quando observado os resultados mostrados na Tabela 5.12, para os testes com razão de compressão 24:1, o valor de atraso da ignição diminui quando o avanço da injeção vai de 0,0 até 2,0 mm antes do PMS.

Na Tabela 5.12 observa-se que a média dos valores de atraso da ignição, para os testes com razão de compressão 20:1, aumentam 18,65 e 32,83%, quando o avanço da injeção muda de 2,0 para 4,0 e de 2,0 para 6,0 mm antes do PMS, respectivamente. Agora, comparando os testes com avanços de 2,0 e 3,0 mm antes do PMS, para as razões de compressão de 20:1 e 24:1, os atrasos médios da ignição aumentaram 11,94 e 8,57%, respectivamente.

Comparações realizadas, para um mesmo avanço de injeção de 2 mm antes do PMS, com razões de compressão de 20:1 e 24:1, mostram que o atraso médio da ignição diminuiu 73,88% pelo fato de se aumentar a razão de compressão. A mesma análise pode ser feita para o avanço de 3,0 mm antes do PMS, mostrando que, ao aumentar a razão de compressão, o valor do atraso médio da ignição diminuiu 74,66%.

Fazendo uma análise, para diferentes combustíveis (óleo diesel e mistura de etanol com PEG400), observa-se que, para o mesmo avanço da injeção de combustível, 2,0 mm antes do PMS, o valor médio do atraso da ignição, para o teste com a mistura de etanol e PEG400, é 4,46 vezes maior que o atraso da ignição utilizando óleo diesel, para uma razão de compressão de 20:1. Já quando a razão de compressão dos testes muda para 24:1, o valor médio do atraso da

ignição do etanol aditivado é 2,33 vezes maior que o valor médio do atraso da ignição dos testes feitos com óleo diesel. Cabe mencionar também que, atrasos da ignição similares aos observados nos testes com óleo diesel (RC = 16:1 e IDI = 2,0 mm), podem ser também encontrados nos testes com a mistura de etanol e PEG400 (RC = 24:1 e IDI = 0,0 mm). Também este fenômeno pode ser encontrado, fazendo a comparação dos testes com óleo diesel (RC = 20:1 e IDI = 0,0 mm), com os testes da mistura de etanol e PEG400 (RC = 24:1 e IDI = 0,0 mm). Portanto, atrasos de ignição para os testes com óleo diesel, podem ser reproduzidos mediante a alteração da razão de compressão e avanço da injeção, quando testado misturas de etanol e PEG400.

Ao longo dos testes realizados na etapa final, observa-se que para os mesmos avanços e as mesmas razões de compressão, o valor do pico máximo de pressão aumenta quando se troca de combustível (óleo Diesel pela mistura de etanol e PEG400). Este fenômeno, também se apresentou, mas não de forma clara e comparativa durante os testes preliminares. O fato é que a combustão do etanol aditivado origina altos picos de pressão na câmara de combustão.

5.2.3

Testes das misturas de etanol e n-butanol (10%)

Finalmente, uma vez concluídos os testes com a mistura de etanol e PEG400, procedeu-se a realizar os testes com a mistura de etanol e n-butanol, este último com uma participação percentual de 10% em massa na mistura. De igual forma que nos testes com a mistura de etanol e PEG400 (13%), se utilizou o mesmo critério para a seleção da mistura na realização dos testes finais, tendo em conta a utilização do menor percentual de aditivo presente na mistura. Também é importante mencionar que as condições sob as quais foram realizados os testes, encontram-se descritos no Capítulo 3, Tabela 4.14. É importante também ressaltar, mais uma vez, que quando a razão de compressão aumenta, aumenta também a quantidade de ar no cilindro, devido ao maior deslocamento do pistão.

Para todos os testes realizados com a mistura etanol e n-butanol manteve-se, igualmente aos testes antes descritos, as condições de pressão de injeção e relação de equivalência. Como nos casos anteriores, os parâmetros modificados, para cada grupo de teste, são o tempo de injeção e a razão de compressão. É importante ressaltar que, para todos os testes com a mesma razão de compressão, se injetou no sistema a mesma quantidade de energia, baseados no poder calorífico inferior, o que foi obtido da literatura em alguns casos e outros foram determinados mediante balanço da reação química de formação. Já para a mistura de etanol e n-butanol, o poder calorífico inferior da mistura

foi determinado como a média ponderada dos valores de poderes caloríficos inferiores de cada componente, devido a não disponibilidade de informação sobre o valor da entalpia de formação de cada componente para determinar o poder calorífico inferior da mistura mediante o balanço da reação química.

Os resultados dos testes feitos com a mistura de etanol e n-butanol (10%) são descritos na Tabela 5.13. Através desta pode-se observar que quando os testes foram realizados com razão de compressão 20:1, para avanços na faixa de 2,0 até 5,0 mm antes do PMS (aproximadamente 14 até 22 °CA), não se obteve a queima do combustível. Duas são as causas para tal, as condições não favoráveis de pressão e temperatura no momento da injeção do combustível e, também relevante, devido ao alto valor do calor latente de vaporização da mistura etanol e n-butanol, ainda maior do que o da mistura etanol com PEG400. Por isso aumentou-se a razão de compressão para 24:1, o que se mostrou suficiente para o surgimento da combustão, na maioria dos avanços testados. Pode-se observar, facilmente, que, novamente à medida que se aumenta o avanço da injeção, aumenta também, de forma significativa, a pressão máxima da combustão. Durante estes testes com razão de compressão 24:1, tentou-se também utilizar avanços maiores que 5 mm antes do PMS. O resultado não foi bom, pois não se verificou boa repetitividade no processo de combustão. Sob estas condições, em muitos casos não se verificou a queima do etanol aditivado e, quando esta ocorria, a pressão máxima ficava perto de 180 bar. Portanto, decidiu-se por não continuar com testes, para os avanços maiores que 5 mm antes do PMS.

Tabela 5.13: Resultados dos testes da mistura de etanol e n-butanol (10%).

Situação	n-butanol (10%), RC=20:1		n-butanol (10%), RC=24:1	
	Avanço (mm)	Resultado	Avanço (mm)	Resultado
Combustão	2,00	Não	2,00	Não
P_Max (bar)	~ 14°	61,041	~ 15°	94,073
Combustão	3,00	Não	3,00	Sim
P_Max (bar)	~ 18°	60,211	~ 17°	126,40
Combustão	4,00	Não	4,00	Sim
P_Max (bar)	~ 20°	62,10	~ 19°	140,39
Combustão	5,00	Não	5,00	Sim
P_Max (bar)	~ 22°	61,524	~ 23°	151,00

Na Tabela 5.13 observa-se que, para os testes com avanço de 2,0 mm antes do PMS, não ocorreu a queima do etanol aditivado. Quando o avanço da injeção foi incrementado em 1,0 mm, com relação aos testes com avanço 3 mm antes do PMS, o valor máximo da pressão aumentou em 11,06%. Já quando este aumento no avanço foi de 2,0 mm, o valor máximo da pressão aumentou em 19,46%.

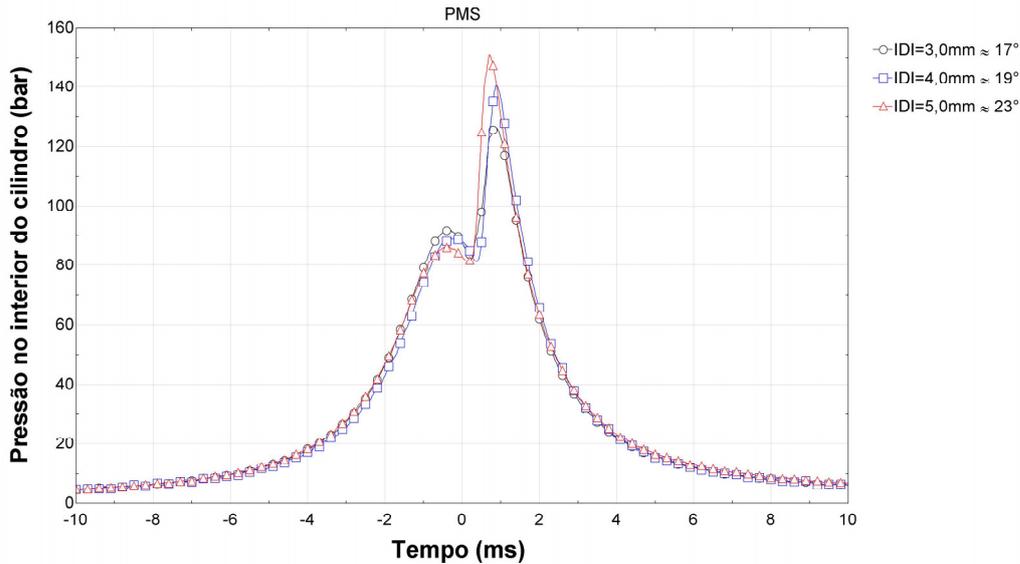


Figura 5.56: Pressão no cilindro para o teste da mistura de etanol e n-butanol (10%), 2400 rpm e RC = 24:1.

Através da Figura 5.56, pode-se observar o comportamento da pressão ao longo dos testes da mistura de etanol e n-butanol (10%), com razão de compressão 24:1 e diferentes avanços de injeção de combustível. Na análise das curvas do processo de combustão foram determinados o início da combustão e valores máximos de pressão, assim como a localização destes ao longo do processo. Os valores de pressão máxima da combustão nos testes realizados, para avanços de 3,0, 4,0 e 5,0 mm antes do PMS, aconteceram em 0,85, 0,87 e 0,71 ms após o PMS, respectivamente. Observa-se também que, aparentemente, o início se deu na mesma região após o PMS, o que mostra mais uma vez que o atraso da ignição está condicionado ao aumento do avanço da injeção. De igual forma como na maioria dos testes realizados com as misturas de etanol, o pico de pressão aumentou conforme aumentou o avanço da injeção, na faixa avaliada.

Nos testes com a mistura de etanol e n-butanol, apresentados na Figura 5.56, observa-se que a inclinação da curva de pressão, após o início da combustão, é tão maior, quanto maior for o avanço da injeção. Quando comparadas, para a mesma razão de compressão (24:1), nos testes utilizando óleo diesel e a mistura de etanol com PEG400, as máximas taxas de variação da pressão após a injeção de combustível, são muito maiores. Nos testes realizados com os avanços de 3,0, 4,0 e 5,0 mm antes do PMS, as máximas taxas de variação da pressão, após o início da combustão, foram de 100,85, 174,14 e 191,89 bar/ms, os quais aconteceram 0,59, 0,68 e 0,51 ms após o PMS,

respectivamente. Os valores das taxas de variação da pressão, foram maiores com relação aos testes (RC = 24:1) da mistura de etanol e PEG400. Isto mostra que, quando esta mistura for testada no motor, pode originar níveis de ruído elevados.

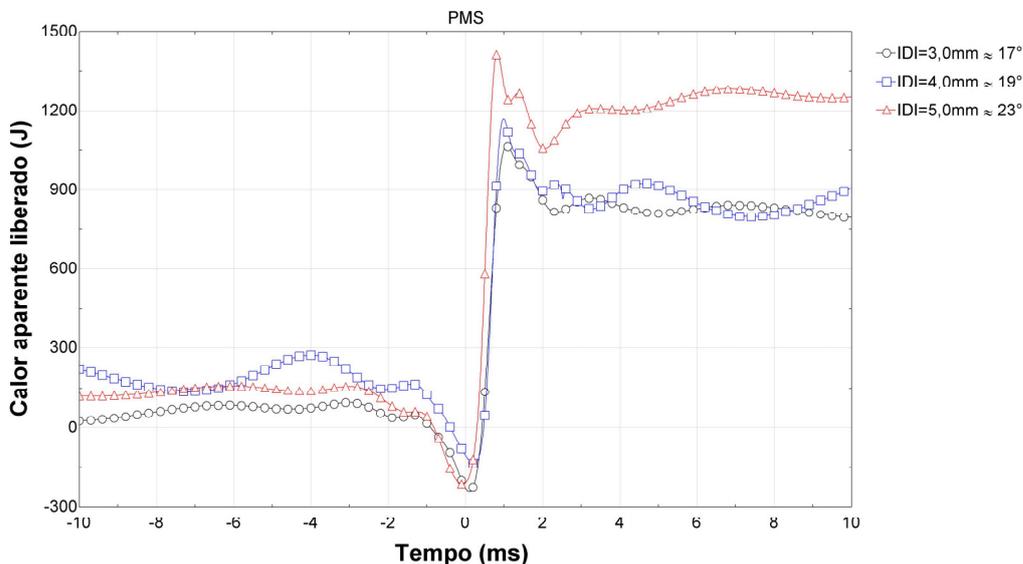


Figura 5.57: Calor aparente liberado para o teste da mistura de etanol e n-butanol (10%), 2400 rpm e RC = 24:1

A Figura 5.57 apresenta o comportamento do calor aparente acumulado para os testes com a mistura de etanol e n-butanol, razão de compressão 24:1 e avanços de 3,0, 4,0 e 5,0 mm antes do PMS. Pode-se verificar que o valor máximo de calor acumulado foi influenciado pelo avanço da injeção. Um incremento de 1,0 mm no avanço, em relação ao teste com avanço de 3,0 mm antes do PMS, originou um incremento de 9,65%, e o incremento de 2,0 mm no avanço, originou um aumento de 32,87% no valor máximo do calor aparente acumulado. Para estes testes, os valores máximos acumulados do calor liberado foram de 1065,45, 1168,28 e 1415,67 J, respectivamente. Como foi observado na Figura 5.56, a alta taxa de variação da pressão nos testes com avanços maiores, origina também a alta taxa de liberação de calor após a ignição, o que pode beneficiar no processo de combustão da mistura, diminuindo os teores de HC presentes nas emissões e aumentando a eficiência.

A Tabela 5.14 apresenta, para os testes realizados com a mistura de etanol e n-butanol, o atraso médio da ignição. Observa-se que quanto maior é o avanço da injeção, maior é o atraso da ignição. Observa-se na Tabela 5.12, para os testes com a mistura de etanol com PEG400 e razão de compressão 20:1, um fenômeno similar, na faixa de avanço de 3,0 até 6,0 mm antes do PMS.

Tabela 5.14: Atraso da ignição para os testes da mistura de etanol e n-butanol (10%).

Avanço (mm)	24:1	
	\bar{X} (ms)	DM (ms)
2,00	-	-
3,00	1,43	0,02
4,00	1,65	0,06
5,00	1,69	0,08

Quando comparados os atrasos médios dos testes apresentados na Tabela 5.14, pode-se observar que o aumento de 1,0 mm no avanço, em relação ao teste com avanço de 3,0 mm antes do PMS, origina um aumento no atraso de 15%. Já quando este aumento no avanço é de 2,0 mm, o valor médio do atraso da ignição aumenta em 18%.

Quando comparados, para um mesmo avanço de injeção, correspondente a 3,0 mm antes do PMS, o fato de mudar de mistura, fez com que o valor médio do atraso da ignição para o teste com a mistura de etanol e n-butanol, seja 3,76 vezes maior que o atraso médio da combustão do teste realizado com a mistura de etanol e PEG400. Já quando comparado com os testes de óleo diesel, de acordo com a tendência de valores médios de atraso da ignição, provavelmente, o valor de atraso médio dos testes com a mistura de etanol e n-butanol, seria 9,5 vezes maior que o atraso médio dos testes realizados com óleo diesel. Este fenômeno, é também influenciado pelo fato de que o calor latente de vaporização da mistura de etanol e n-butanol é maior que o calor latente de vaporização dos outros combustíveis testados, sob a mesmas condições.

Uma vez mais, assim como nos testes preliminares, a mistura de etanol e n-butanol, apresentou maiores picos de pressão, com relação às demais misturas testadas ao longo do trabalho. Isto é uma característica da queima dos álcoois, o que origina um desafio maior durante os testes no motor de ignição por compressão. É por isso que para evitar avanços de injeção maiores que possam originar picos de pressão acima do permitido pelo motor, é recomendável testar em regimens com baixas cargas e, de preferência, pre-aquecer o ar de admissão.

Finalmente, pode-se dizer que a utilização do n-butanol, como aditivo para melhorar a ignição do etanol em um ciclo de ignição por compressão, é possível. Para que este álcool (n-butanol), que pode ser também produzido de forma orgânica, sirva como aditivo para o etanol, são necessárias diversas mudanças no motor, tais como aumento da razão de compressão e pre-aquecimento do ar. Mudanças que podem ser realizadas em conjunto ou separadas. Em primeira instância se recomenda aumentar a razão de compressão mediante a modificação da câmara de combustão no pistão. Sempre ter em conta os níveis

máximos de pressão permissíveis na câmara de combustão do motor. Quanto maior a razão de compressão, maiores serão as chances de êxito no processo de queima do etanol aditivado com n-butanol. Já um pre-aquecimento do ar de admissão pode diminuir a quantidade de ar e por conseguinte a quantidade de combustível injetado, o que originaria uma perda de potência do motor.

Além das mudanças descritas, deve-se ter em conta que, em um determinado regime de operação do motor, a quantidade injetada de etanol aditivado será maior, devido ao poder calorífico inferior ser menor (menor quantidade de energia química por massa de combustível). Isto pode originar maiores intervalos de injeção, causando a não vaporização total da mistura e por conseguinte a queima incompleta. Este ponto pode ser superado mediante a aplicação de diferentes técnicas: aumento da pressão de injeção, dos orifícios do injetor ou aumento do número das injeções (pré e pós injeções). Um resultado mais satisfatório, fazendo menção à técnica de múltipla injeção, pode ser conseguido quando se utilize uma ou mais pré injeções. Mas, como foi observado durante os testes de RCCI realizados na MCR [3], quando o etanol foi injetado após a injeção principal, o calor aparente liberado diminuiu com relação aos testes feitos com a injeção de etanol antes da injeção principal.

5.2.4

Comentários Finais

Ao iniciar este trabalho de pesquisa teve-se como primeiro objetivo, a substituição do óleo diesel pelo etanol aditivado. Portanto, buscou-se que a combustão do etanol aditivado apresente características similares à combustão do óleo diesel. Para isto, o avanço da injeção e a razão de compressão cumpriram um papel fundamental. Na Tabela 5.15 apresentam-se diferentes parâmetros como resultado dos testes realizados. Na Tabela 5.15, é importante destacar que, ao testar a mistura de etanol e PEG400 (RC = 24:1 e IDI = 2 mm), o atraso de ignição é similar ao apresentado no testes com óleo diesel S10 (RC = 16:1 e IDI = 2 mm). Comportamento similar não observa-se quando comparados os testes com óleo diesel S10 (RC = 16:1), com relação aos testes com a mistura etanol e PEG400 (RC = 20:1).

Tabela 5.15: Parâmetros da combustão para os diferentes combustíveis testados.

Combustível	IDI (mm)	RC = 16:1			RC = 20:1			RC = 24:1		
		AI (ms)	P _{max} (bar)	dP _{max} (bar/ms)	AI (ms)	P _{max} (bar)	dP _{max} (bar/ms)	AI (ms)	P _{max} (bar)	dP _{max} (bar/ms)
Diesel	-1	-	-	-	1,36	63,68	21,39	1,07	93,76	52,90
	0	0,59	58,98	81,17	0,51	67,56	25,02	0,42	96,96	13,31
	1	0,51	67,15	98,77	0,37	88,41	36,80	0,21	112,23	42,03
	2	0,48	75,76	128,88	0,30	94,96	59,07	0,15	125,95	73,04
PEG400	0	-	-	-	-	-	-	0,49	97,84	23,63
	1	-	-	-	-	-	-	0,36	112,92	49,28
	2	-	-	-	1,34	118,94	161,41	0,35	132,19	96,05
	3	-	-	-	1,50	123,23	145,93	0,38	138,59	114,08
	4	-	-	-	1,59	136,17	217,44	-	-	-
	5	-	-	-	1,71	144,86	322,91	-	-	-
n-Butanol	6	-	-	-	1,78	148,90	324,86	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	1,43	126,40	100,85
	4	-	-	-	-	-	-	1,65	140,39	174,14
	5	-	-	-	-	-	-	1,69	151,00	191,89
	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Nota, Diesel: Óleo Diesel S10, PEG400: Mistura de Etanol e PEG400 (13%), n-Butanol: Mistura de Etanol e n-Butanol (10%).

Isto mostra que, além da adição do aditivo melhorador da ignição, é necessário o aumento da razão de compressão a fim de que se tenha comportamentos similares no processo de ignição. Já para o caso da mistura de etanol e n-butanol (RC = 24:1 e IDI = 3 mm), o atraso da ignição é similar ao apresentado no teste com a mistura de etanol e PEG400 (RC = 20:1 e IDI = 3 mm). Cabe mencionar que as proporções das aditivos nas misturas são diferentes, fato que tem influencia no aumento da razão de compressão. Portanto pode-se dizer que, a partir dos resultados, a mistura de de etanol e n-butanol, requer de maiores razões de compressão a fim de que se observe a queima do combustível quando comparado às misturas de etanol e PEG400 testadas. Além disso, é importante mencionar, que este trabalho tenta mostrar as condições limites a fim de que se tenha a queima do etanol aditivado. Portanto, estes testes podem servir como ponto de partida a partir do qual o fabricante de motores poderá desenhar um novo motor. Logicamente se espera que este novo motor tenha uma maior razão de compressão.

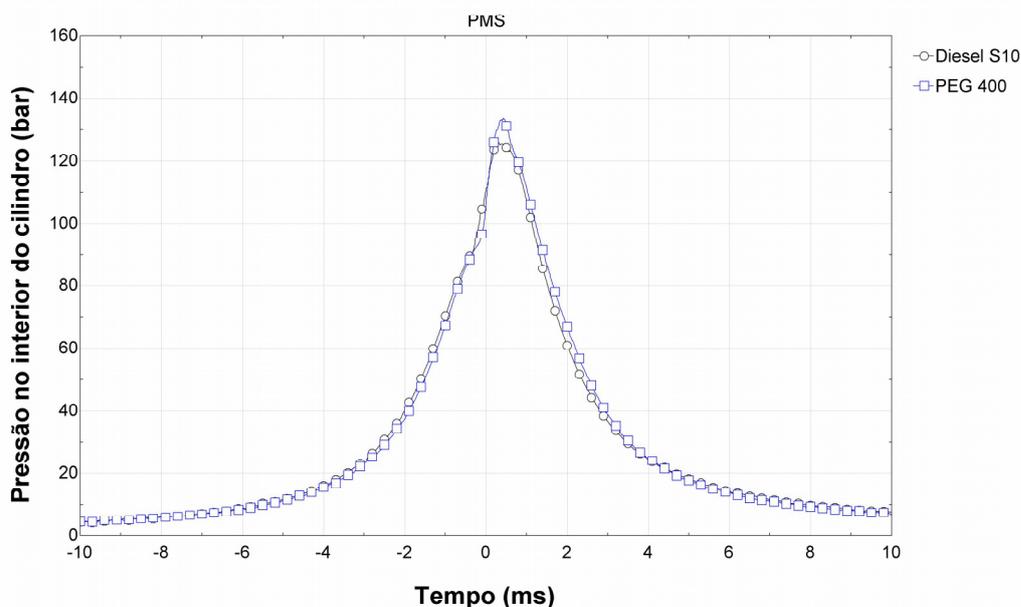


Figura 5.58: Pressão no cilindro para o teste de dois combustíveis com IDI = 2 mm \sim 13°, 2400 rpm e RC = 24:1.

Nas Figuras 5.58 e 5.59, pode-se observar o comportamento do processo de ignição, para condições similares, de diferentes combustíveis testados. A diferença do atraso da ignição quando testado a mistura de etanol e PEG 400 com relação à mistura de etanol e n-butanol é maior, que quando comparado com o teste de óleo diesel S10. Isto mostra que, o número de cetano da mistura da mistura de etanol e n-butanol é menor do que o da mistura de etanol e

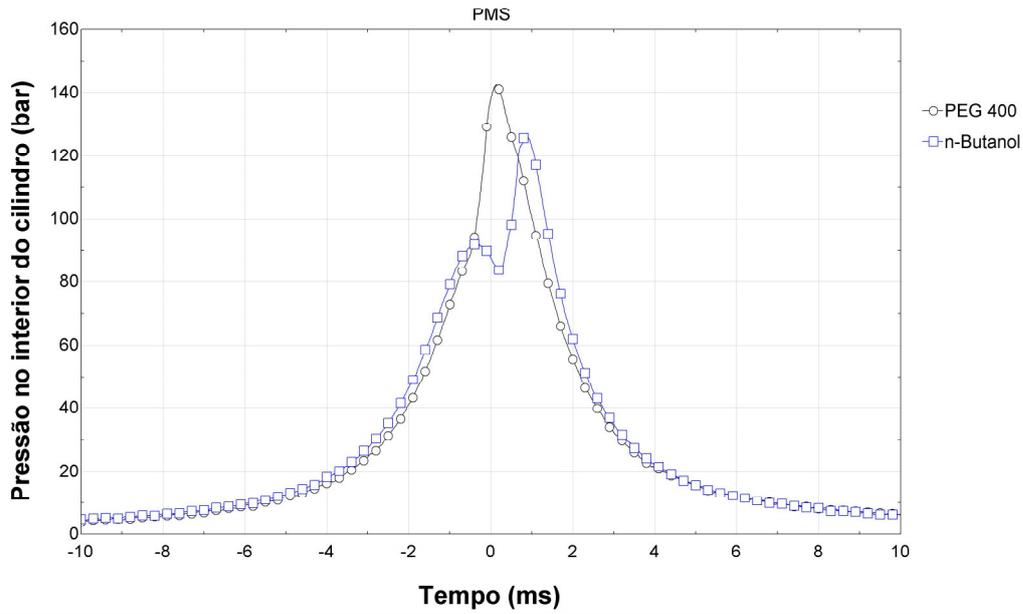


Figura 5.59: Pressão no cilindro para o teste de dois combustíveis com $IDI = 3 \text{ mm} \sim 17^\circ$, 2400 rpm e $RC = 24:1$.

PEG400. Portanto, recomenda-se maiores razões de compressão para o motor que opere com a mistura de etanol e n-butanol. Também pode ser observado na Tabela 5.15, o aumento elevado da taxa de variação da pressão conforme aumenta o avanço da injeção, para os testes das misturas de etanol e n-butanol. Este é um desafio a ser superado, pois origina níveis altos de ruído e danifica os componentes do motor.