4.
Desenvolvimento dos Ensaios e Resultados

Para desenvolver as estratégias de injeção Dual Fuel e cumprir com os objetivos inicialmente propostos, foi necessário dividir o experimento em três etapas.

A MCR é aquecida até atingir temperaturas estabilizadas em torno de seus valores nominais (60°C, no cabeçote e nas paredes do cilindro, respectivamente). Dava-se início aos ensaios com uma primeira calibração da posição do pistão até igualar o valor do curso nominal pré-estabelecido. Durante uma série típica de ensaios ajustava-se a pressão de acionamento para operar a MCR com a mesma taxa de compressão que o motor DW10 CTED4, ou seja, 16:1. Tudo isto sem a injeção de combustível. Uma vez determinada a ”pressão de acionamento”, testes foram realizados consumindo apenas óleo diesel de modo a obter os dados de pressão no interior do cilindro assim como a posição do pistão, ambos dependentes do tempo. A cada certo número de ensaios (variando entre 15 e 20, segundo as estratégias de injeção), a MCR era aberta para realizar a limpeza dos resíduos da combustão (fuligem), após o que se procedia a uma nova calibração para dar continuidade nos testes.

Do modo Diesel puro passava-se, então, à operação no modo Dual Fuel, injetando na MCR tanto óleo diesel quanto etanol, segundo a estratégia de injeção estabelecida. Para a execução dos ensaios Dual Fuel não se adotou nenhum critério rígido na definição das razões de substituição de óleo diesel por etanol. Procurou-se apenas a mínima quantidade de óleo diesel necessária para dar inicio à combustão, aumentando a quantidade de óleo diesel injetado até esta acontecer e atingir valores similares aos da combustão do óleo diesel puro.

Uma vez determinadas as máximas razões de substituição, foram feitas modificações tanto nos pontos de injeção dos combustíveis, quanto o número deles, de modo a se observar a influência dos mesmos no início da combustão, assim como nas pressões máximas atingidas.

A aquisição de dados foi realizada e armazenada durante um período de tempo, de -100 ms até 100 ms, embora os dados de interesse, que foram levados em conta durante este trabalho, correspondessem a tempos de -20ms até 20 ms, isto pela definição de tempo de compressão (Capitulo 4).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

Cabe mencionar também que, para a taxa de compressão do motor DW10 CTED4, estabelecida em 16:1 a combustão foi deficiente. Sendo assim, a sequência de ensaios, descrita anteriormente, foi repetida para uma nova taxa de compressão estabelecida em 20:1.

A Tabela 11 apresenta um resumo de todas as estratégias de injeção de combustível (óleo diesel e etanol) que são analisadas e mostradas em cada uma das etapas do desenvolvimento dos ensaios.

Tabela 11 - Resumo das estratégias de injeção Dual Fuel

Etapa	TC	Percentual de carga por combustível	Carga Total	Estratégia e Ângulo de Injeção
I	16	-	0%	Compressão sem carga
I	16	0% E -100% D	100%	Diesel (-14,94º)
II	16	35% E -25% D	60%	Etanol (-180°) - Diesel (-14,94°)
II	16	35% E -25% D	60%	Etanol (-90º) - Diesel (-14,94°)
II	16	30% E - 45% D	75%	Etanol (-180°) - Diesel (-14,94°)
II	16	30% E - 45% D	75%	Etanol (-90º) - Diesel (-14,94°)
III	20	0% E - 100% D	100%	Diesel (-14,94º)
III	20	90% E -10% D	100%	Etanol (-180°) - Diesel (-14,94°)
III	20	85% E - 15% D	100%	Etanol (-180°) - Diesel (-14,94°)
III	20	75% E - 25% D	100%	Etanol (-180°) - Diesel (-14,94°)
III	20	70% E - 30% D	100%	Etanol (-180°) - Diesel (-14,94°)
III	20	50% E - 50% D	100%	Etanol (-180°) - Diesel (-14,94°)
III	20	55% E-10% D-35% E	100%	Etanol (-180°) Diesel - Etanol (-14,94°)
III	20	55% E-15% D-30% E	100%	Etanol (-180°) Diesel - Etanol (-14,94°)
III	20	50% E-15% D-35% E	100%	Etanol (-180°) Diesel - Etanol (-14,94°)
III	20	55% E-20% D-25% E	100%	Etanol (-180°) Diesel - Etanol (-14,94°)
III	20	50% E-20% D-30% E	100%	Etanol (-180°) Diesel - Etanol (-14,94°)
III	20	50% E-25% D-25% E	100%	Etanol (-180°) Diesel - Etanol (-14,94°)
III	20	45% E-25% D-30% E	100%	Etanol (-180°) Diesel - Etanol (-14,94°)
III	20	45% E-30% D-25% E	100%	Etanol (-180°) Diesel - Etanol (-14,94°)
III	20	40% E-30% D-30% E	100%	Etanol (-180°) Diesel - Etanol (-14,94°)
III	20	70% E-30% D	100%	Etanol (-180°) - Diesel (-14,94º)
III	20	25% E-100% D	125%	Etanol (-58,14°) - Diesel (-14,94º)
III	20	25% E-100% D	125%	Etanol (-14,94°) - Diesel (-14,94º)
III	20	100% D-25% E	125%	Diesel (-14,94º) - Etanol (-2,25°)

4.1
Etapa I – Caso Base - Diesel

Na MCR um curso de compressão é definido (a MCR apresenta um maior volume morto e, por esta razão, aumenta-se o curso para se obter a mesma taxa

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

de compressão do motor DW10 CTED4). Em seguida, a pressão final, após a compressão, foi estabelecida usando-se o modelo de gás ideal para um processo de compressão politrópico. Assim:

$$\frac{P_f}{P_o} = \left(\frac{V_0}{V_f}\right)^n = (TC)^\gamma \tag{5.1}$$

e

$$\frac{T_f}{T_o} = \left(\frac{V_0}{V_f}\right)^{n-1} = (TC)^{n-1} \tag{5.2}$$

onde:

P_f: Pressão no final da compressão (bar);

P_o: Pressão no inicio da compressão (bar);

V_o:Volume no final da compressão (m^3);

V_f:Volume no inicio da compressão (m^3);

T_f: Temperatura no final da compressão (K);

T_o: Temperatura no inicio da compressão (K);

TC: Taxa de compressão (16:1);

n=Expoente politrópico do gás de referência, para nosso caso de estudo se fixou em 1,28 fundamentado nos resultados de Zou et al., (2008) para combustão Dual Fuel Diesel/Metanol.

Apesar da MCR ter uma geometria simples, existem alguns canais e mangueiras por onde entra o ar, dificultando o cálculo do volume morto. O procedimento acima descrito permite impor a razão de compressão através, apenas, do controle das pressões inicial e final. Com isto, é possível reproduzir a taxa de compressão de um motor real.

O procedimento seguido durante esta primeira etapa foi estabelecer uma pressão de acionamento na MCR que proporcione uma pressão ao final da compressão, sem combustão, de 38,25 bar, que teoricamente equivale a uma TC=16:1 igual à do motor DW10 CTED4. Foram consideradas 10 medições válidas, com valores finais na pressão de 38,25±0,25 bar. Como resultado final obteve-se um valor médio de 38,44 bar. Dos ensaios considerados, escolheu-se aquele que apresentou o valor mais próximo da média, correspondente ao ensaio DF6. Na tabela 11 são apresentados os dados que serviram de referência:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

Tabela 12 - Calibração da MCR procurando uma pressão final=38,25± 0,25 bar

Teste	Pressão de acionamento (Bar)	Pressão Final (Bar)	Temperatura na parede (°C)	Temperatura no cabeçote (°C)
DF2	22	38,44	60,9	51,9

Em seguida realizaram-se testes com injeção só de óleo diesel, onde a máxima carga de combustível do teste corresponde a 50% da carga do motor DW10 CTED4, definida na tabela 10 do capitulo III, variando a carga de combustível injetado de 100%, 75%, 60%, 50%, 45%, 25% até 12,5%. Ou seja, para 100% de carga de combustível foram injetadas 0,047 gramas de óleo diesel, que correspondem à massa injetada por ciclo de combustão de 50% da carga máxima do motor. Para cada percentual de massa injetada, se considerou um conjunto de cinco testes válidos. Para cada conjunto, selecionou-se o teste que mais se aproximava da média obtida, definindo-o como teste padrão. Os resultados para cada carga estão na tabela 13:

Tabela 13 - Resultado dos testes na MCR com injeção de óleo diesel. TC=16:1

Teste	Carga (%)	Pressão de acionamento (Bar)	Pressão Final (Bar)	Temperatura na parede (°C)	Temperatura no cabeçote (°C)
DF 115	100	21,5	83,645	59,4	50,2
DF 111	75	20,47	82,94	56,9	47,7
DF 45	60	21,8	70,5	59,1	50,1
DF 17	50	21,9	65,37	59,5	50,3
DF 52	45	21,85	60,41	59,7	50,4
DF 23	25	21,9	57,80	59,1	50,7

O objetivo deste ensaio foi gerar o conjunto de dados que serviu de referência para análise e comparação entre os resultados obtidos utilizando só óleo diesel e as estratégias Dual Fuel Diesel/Etanol. As figuras 48 e 49 apresentam os resultados da pressão e calor liberado durante a etapa I, respetivamente.

A figura 48 mostra uma elevação gradual da pressão máxima desde a compressão sem combustível (0%) até 100% da carga. É importante notar que as temperaturas nas quais a MCR funcionou durante os testes (em média 55°C, tanto no cabeçote quanto na parede do cilindro, produto do aquecimento usando resistências elétricas) certamente influenciam no comportamento da pressão no interior da MCR. Vale ressaltar ainda que estas temperaturas são baixas, quando comparadas às esperadas em motores, mas aqui limitadas pelas baixas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

potencias das resistências elétricas.

A figura 49 mostra o calor liberado para todas as cargas estabelecidas no teste com TC=16:1. Nesta se identifica claramente que, para maiores cargas de combustível, uma liberação maior de calor é atingida.

Para uma melhor visualização das curvas de pressão e calor liberado, os gráficos mostram o comportamento tanto da pressão quando do calor liberado entre posições equivalentes a ângulos de -90° a 90°.

As curvas de pressão e calor liberado, apresentadas servirão de base para futuras comparações.

Estas mostram exatamente o que já se esperava, maiores valores para ambas as funções à medida em que se aumenta a quantidade de combustível injetada.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

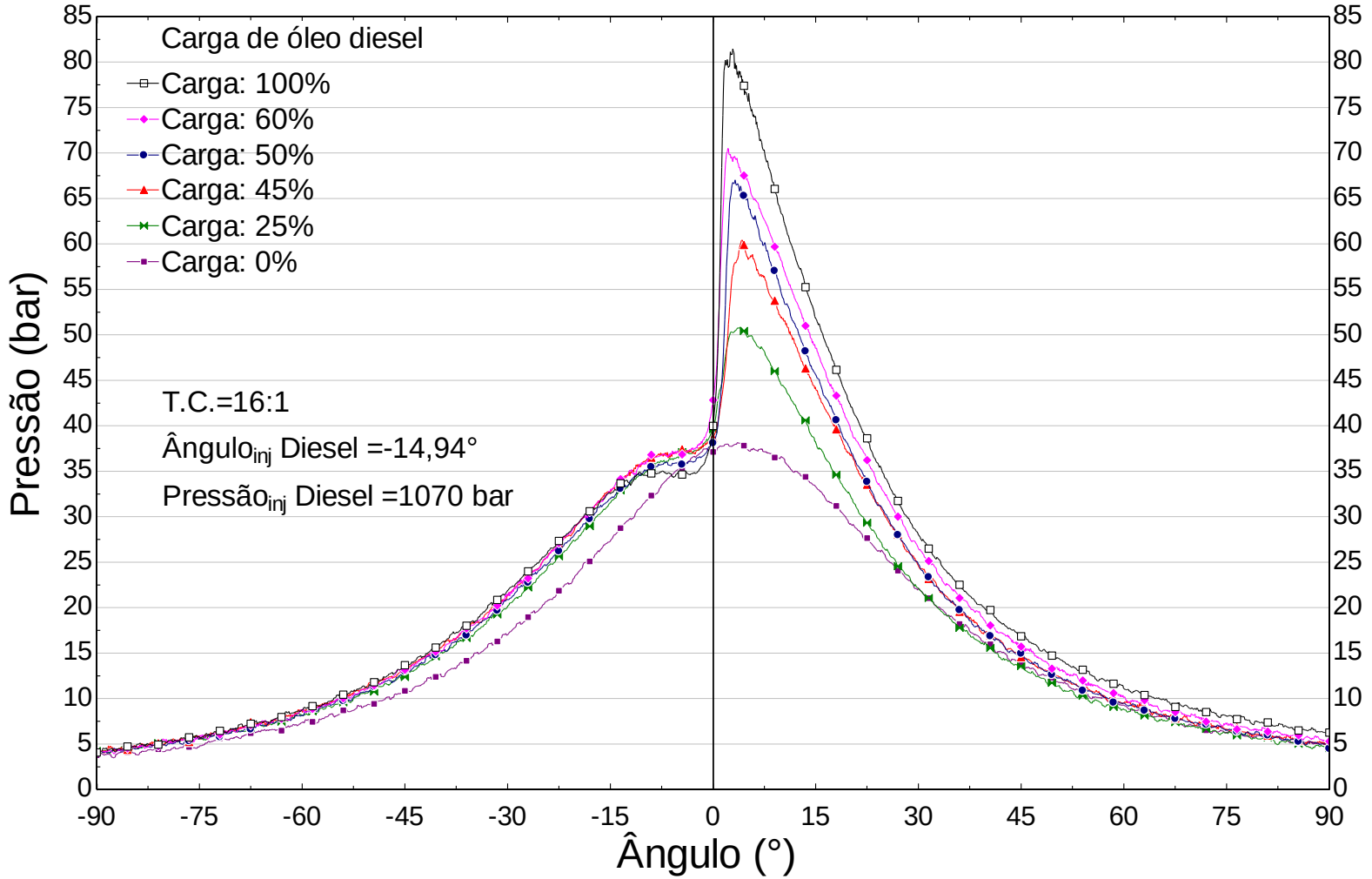

Figura 48 – Pressão vs Ângulo no interior do cilindro para teste com óleo diesel.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

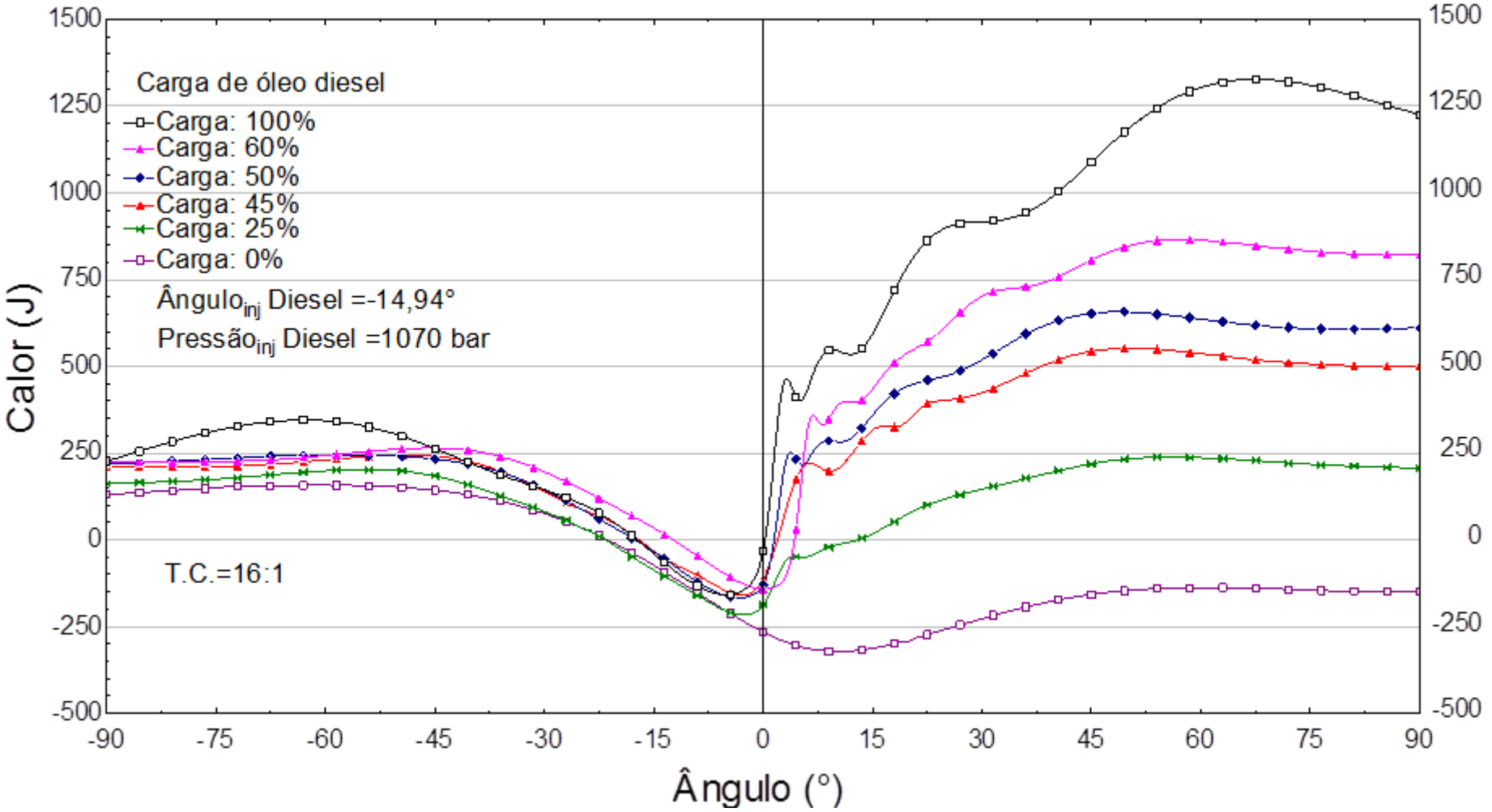

Figura 49 - Calor vs Ângulo no interior do cilindro para teste com óleo diesel.

4.2
Etapa II – Dual Fuel – Injeção Simples

Iniciou-se a fase Dual Fuel com o objetivo de se encontrar a maior razão de substituição de óleo diesel por etanol para TC=16:1. Foram comparadas pressão máxima atingida e o calor liberado no modo Dual Fuel com as cargas equivalentes de óleo diesel puro. Duas estratégias foram testadas:

Estratégia 1: Injeção piloto (etanol injetado no PMI) – Injeção principal (óleo diesel) no mesmo ângulo de injeção do caso base do motor DW10 CTED4. A figura 50 mostra esquematicamente esta estratégia.

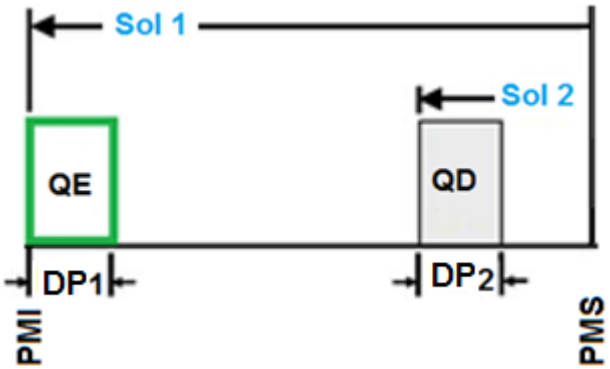

Figura 50 - Estratégia de injeção Dual Fuel, caso 1.

Estratégia 2: Pré-injeção (etanol injetado no meio do curso de compressão) – Injeção principal (óleo diesel) no mesmo ângulo de injeção do caso de óleo diesel do motor DW10 CETD4, figura 51.

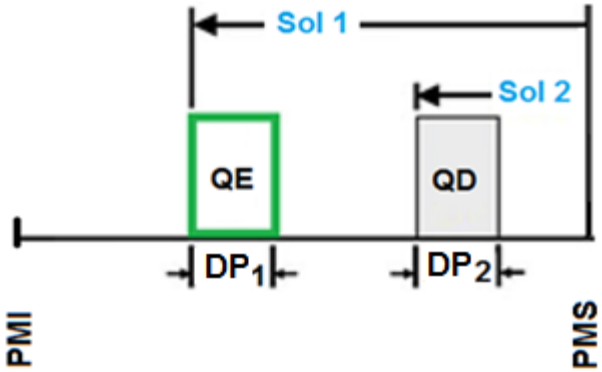

Figura 51 - Estratégia de injeção Dual Fuel, caso 2.

onde:

PMI e PMS: Ponto morto Inferior e Superior;

Sol_1: Inicio da injeção do etanol (em milissegundos antes do PMS);

Sol_2: Inicio da injeção óleo diesel (em milissegundos antes do PMS);

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

DP_1: Duração do pulso de injeção do etanol (milissegundos);
DP_2: Duração do pulso de injeção do etanol (milissegundos);
QE: Carga injetada de Etanol (mm^3);
QD: Carga injetada de óleo diesel (mm^3).

Segundo a bibliografia consultada, o uso de etanol no modo Dual Fuel em motores ICO provoca aumentos significativos na pressão no interior do cilindro, e estas pressões, se atingidas dentro da MCR, poderiam danificá-la. Para evitar pressões elevadas, portanto, decidiu-se injetar uma primeira carga equivalente a 60% da energia química fornecida pelo óleo diesel definida na etapa I que servirá de referência no primeiro conjunto de testes no modo Dual Fuel.

O teste inicial consistiu de 35% de energia química fornecida pelo etanol e 25% de energia química fornecida pelo óleo diesel totalizando um 60% da carga padrão (definida como 50% da carga máxima). A figura 52 mostra o comportamento das curvas de pressão das duas estratégias Dual Fuel comparadas com as curvas de pressão para cargas só de óleo diesel de 60% e 25% da carga padrão. Percebe-se que nas estratégias Dual Fuel a pressão corresponde basicamente à carga de óleo diesel (25%) e está longe de atingir os mesmos níveis de pressão obtidos com a carga de óleo diesel equivalente à mesma energia química injetada (60%). Outro ponto a se observar é o atraso do início da combustão na estratégia Dual Fuel com injeção piloto de etanol.

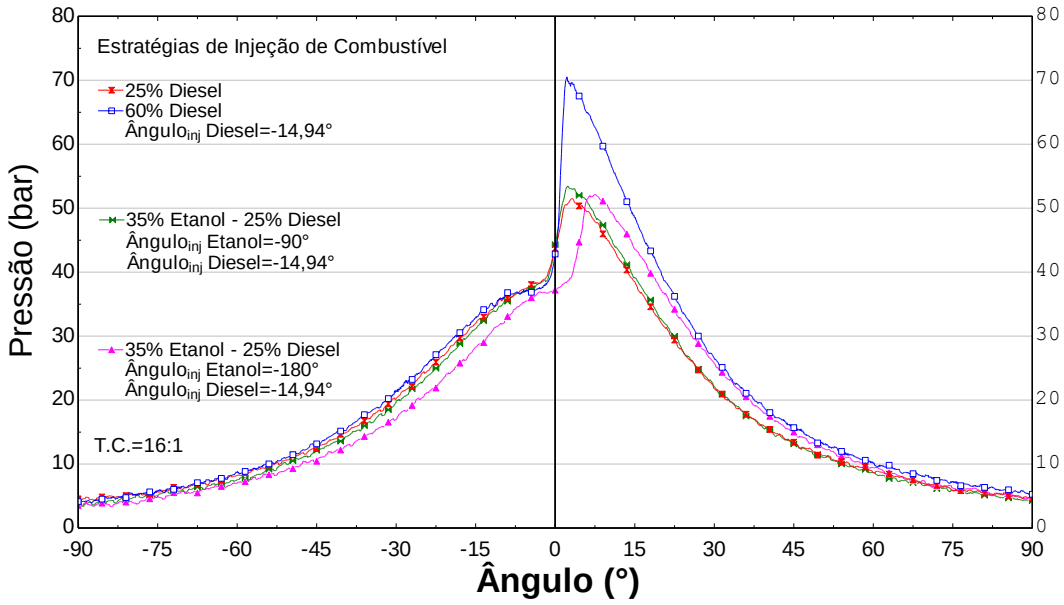

Figura 52 - Pressão vs Ângulo no interior do cilindro, cargas de óleo diesel puro e estratégias Dual Fuel (35% Etanol – 25% Diesel).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

Na figura 53 se verifica que, para as estratégias Dual Fuel, o calor liberado é menor que o produzido pela injeção de óleo diesel que corresponde a 60% da carga padrão. Atribui-se este fato ao alto calor latente de vaporização do etanol, que absorve parte do calor gerado, resfriando a câmara e dificultando o processo de ignição.

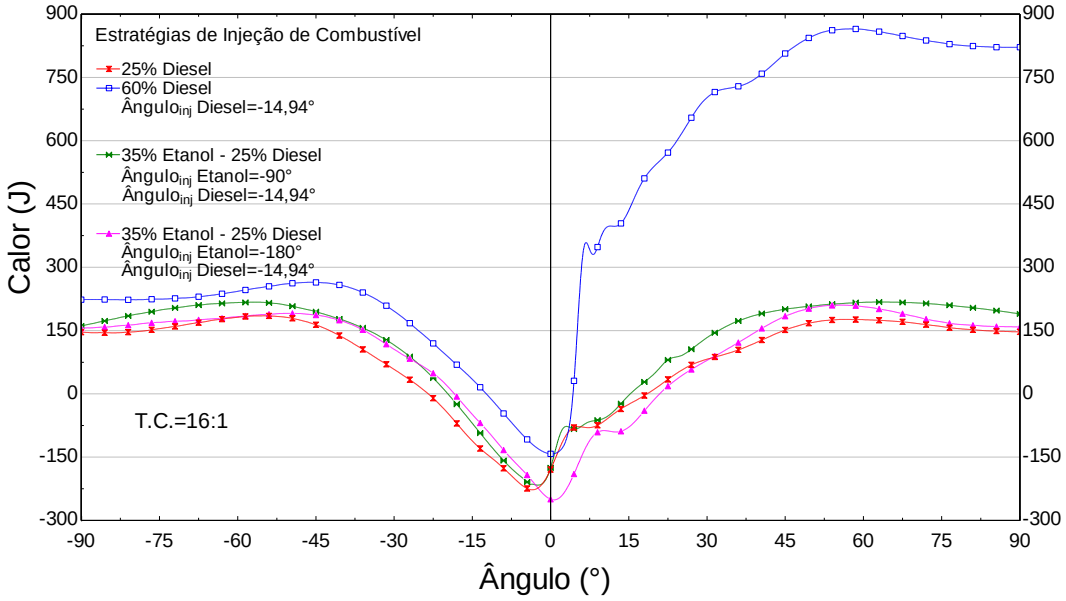

Figura 53 - Calor vs Ângulo no interior do cilindro, cargas de óleo diesel puro y duas estratégias Dual Fuel (35% Etanol – 25% Diesel).

De posse dos resultados mostrados acima, decidiu-se aumentar o percentual energético do óleo diesel, que passou para 45% da carga padrão. O percentual energético do etanol foi reduzido para 30%, fazendo com que se injetasse na forma de energia química, 75% da carga padrão. Esta nova série de experiências foi comparada com duas cargas de óleo diesel puro, 45% e 75% da carga máxima, respectivamente, representados na figura 54.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

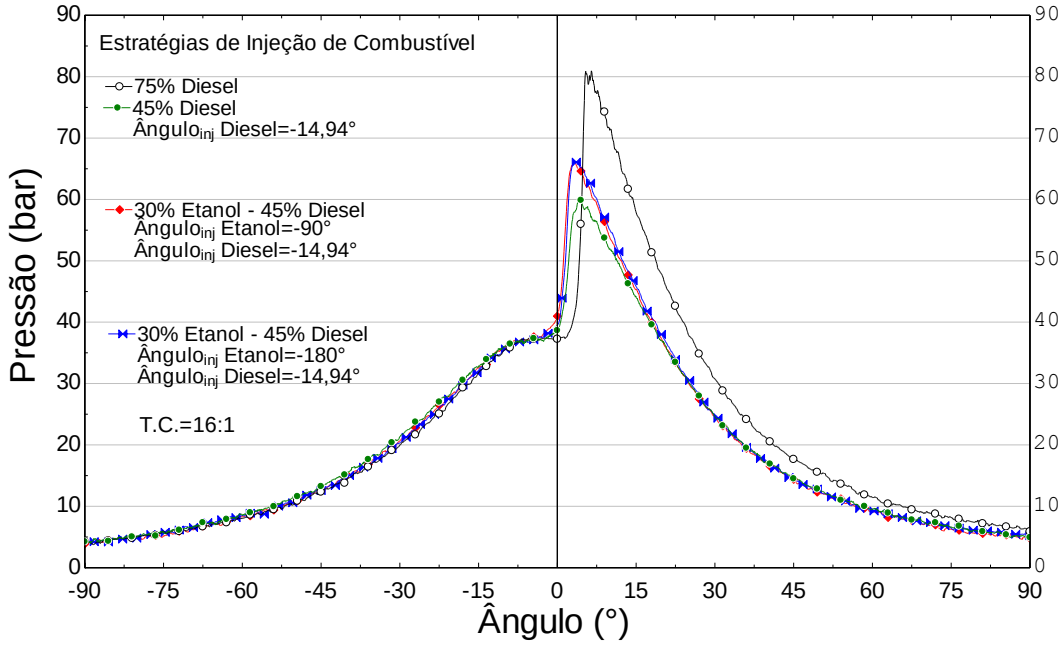

Figura 54 - Pressão vs Ângulo no interior do cilindro, cargas de óleo diesel puro y duas estratégias Dual Fuel (30% Etanol – 45% Diesel)

As pressões das estratégias Dual Fuel se mantiveram baixas, como mostrado na figura 54, quando comparadas com o nível da pressão atingida pela combustão do óleo diesel puro para uma carga de 75%. Não se percebeu alteração significativa no início da reação de combustão.

Egúsquiza (2011), que trabalhou com fumigação em motores, menciona uma diminuição gradual da pressão na configuração Dual Fuel no final do curso de compressão. Ele realizou testes em um motor com TC=16:1. Este comportamento também foi percebido nos testes aqui realizados, embora a combustão do etanol na MCR não aconteça da mesma forma que acontece no motor. Certamente a influência da temperatura no interior da MCR é fundamental no processo de combustão.

Na figura 55 se observa que o calor liberado nas estratégias Dual Fuel é inferior comparado com o calor liberado pelas cargas de óleo diesel.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

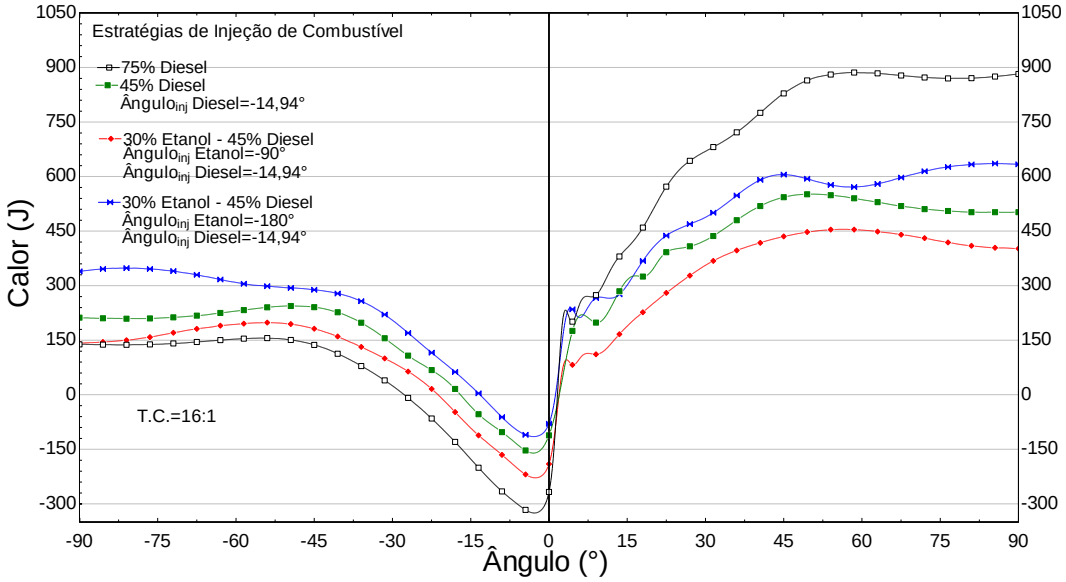

Figura 55 - Calor vs Ângulo no interior do cilindro, cargas de óleo diesel puro y duas estratégias Dual Fuel (30% Etanol – 45% Diesel)

4.3
Etapa III – Dual Fuel – Injeção Dupla de Etanol

Mais uma vez, de posse dos novos resultados, decidiu-se por implementar novas estratégias de injeção para dar continuidade às observações sobre a combustão Dual Fuel Diesel/Etanol:

- ✓ Modificou-se a taxa de compressão da MCR passando de 16:1 para 20:1. Segundo o modelo de compressão politrópico a temperatura no final da compressão T_2 atinge o valor de 694,4K para TC= 20:1 com a temperatura de autoignição do etanol hidratado <673K. Com TC= 16:1 a temperatura T_2 foi de 652 K.
- ✓ Aumentou-se a carga de óleo diesel de 50% para 75% da carga máxima mostrada na tabela 9 e esta nova carga foi definida como a carga padrão do teste.
- ✓ Estabeleceu-se uma nova estratégia de injeção composta por duas injeções de etanol, uma denominada pré-injeção no ponto morto inferior e outra chamada de pós-injeção, simultânea com injeção de óleo diesel, próxima do ponto morto superior.

Na tabela 14 são mostrados os resultados dos testes de base para diferentes cargas de óleo diesel com TC=20:1 Nas figuras 56 e 57 mostram-se as curvas de pressão e calor liberado, respectivamente.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

Tabela 14 - Resultado dos testes na MCR com injeção de óleo diesel TC=20:1

Teste	Carga (%)	Pressão de acionamento (Bar)	Pressão Máxima (Bar)	Temperatura na parede (°C)	Temperatura no cabeçote (°C)
DF2_44	100	23,25	81,18	59,1	50,2
DF2_38	75	23,25	80,97	58,3	50,1
DF2_28	65	23,25	77,87	57,1	50,1
DF2_27	55	23,25	77,25	56,5	50,3
DF2_20	45	23,25	76,58	56,4	50,4
DF2_16	35	23,25	74,5	54,2	50,7
DF2_8	25	23,25	69	54	50,7
DF_2	0	23,25	50,9	53	50,6

Assim como observada na figura 47 (TC 16:1), a pressão máxima atingida para os novos testes com 100% de carga padrão não ultrapassou os 85 bar de pressão. Pode-se observar na figura 56 que os níveis de pressões mostraram-se mais longos no tempo quando comparados com o mesmo gráfico para TC=16:1, embora se esteja injetando mais energia.

Ou seja, a integral no tempo é maior, o que se explica pela maior massa injetada, mas as pressões máximas não variam substancialmente.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

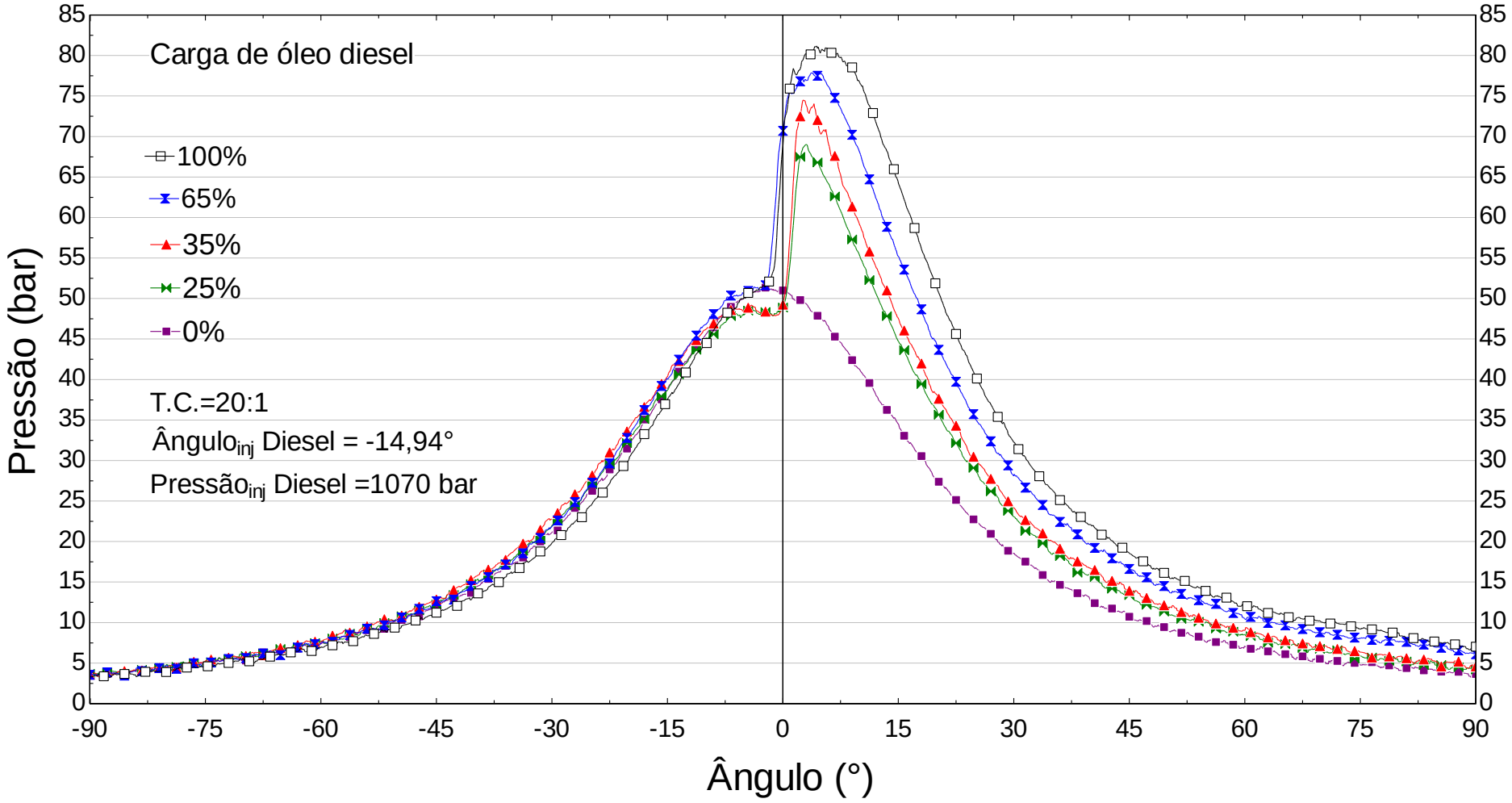

Figura 56 - Pressão vs Ângulo no interior do cilindro para teste com óleo diesel, Etapa III

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

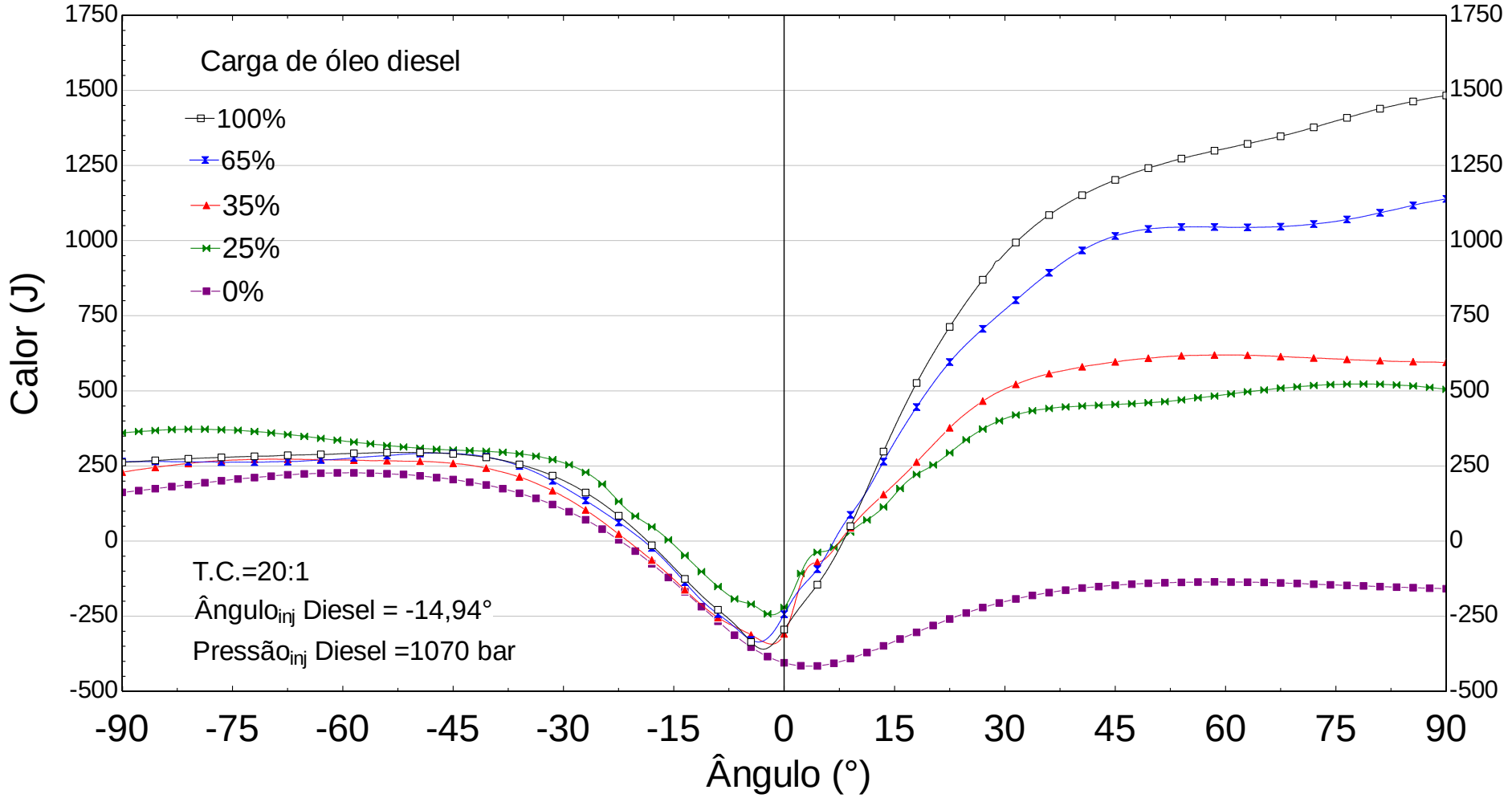

Figura 57 - Calor vs Ângulo no interior do cilindro para teste com óleo diesel, Etapa III.

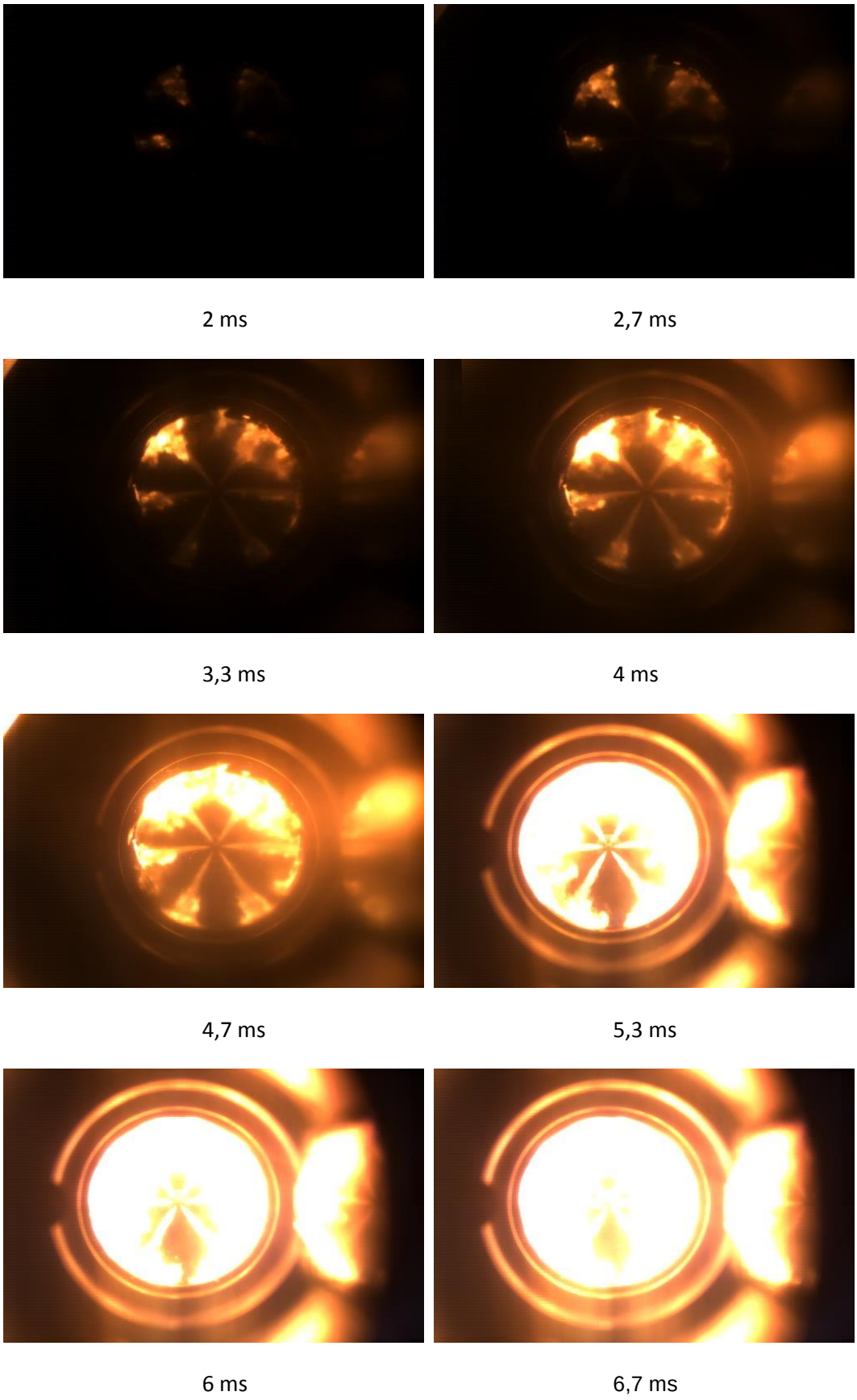

Figura 58 - Imagens da Combustão Diesel, com TC=20:1, tempos após o início da combustão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

Antes de passar para a dupla injeção de etanol, com o propósito de comparações futuras, estabeleceu-se um passo intermediário, de injeção simples. Implementou-se então a estratégia de injeção Dual Fuel consistindo em apenas uma injeção de etanol (PMI) e uma injeção óleo diesel no mesmo ângulo de injeção do caso de óleo diesel do motor DW10 CETD4, como representado na figura 59.

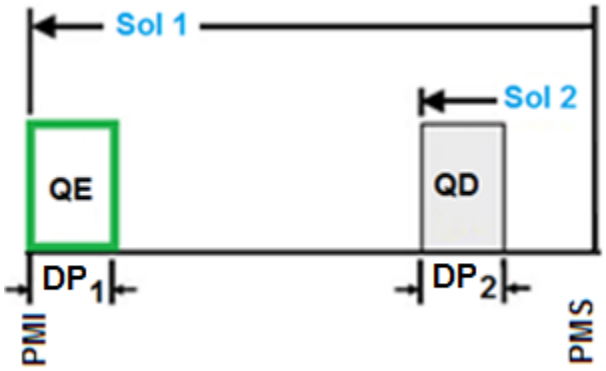

Figura 59 - Estratégia de injeção Dual Fuel, caso 1, Etapa III

onde:

PMI e PMS: Ponto morto Inferior e Superior;

Sol_1: Início da injeção do etanol (em milissegundos antes do PMS);

Sol_2: Início da injeção óleo diesel (em milissegundos antes do PMS);

DP_1: Duração do pulso de injeção do etanol (milissegundos);

DP_2: Duração do pulso de injeção do etanol (milissegundos);

QE: Carga injetada de Etanol (mm^3);

QD: Carga injetada de óleo diesel (mm^3).

Na figura 60 podem ser vistas as curvas de pressão para diferentes razões de substituição. As variações das curvas correspondem à diminuição da energia química fornecida pelo etanol e aumento da energia química fornecida pelo óleo diesel.

A injeção de etanol pré-misturado exerce uma grande influência no tempo de atraso da combustão e as pressões máximas. Para razão de substituição de 90% a quantidade de óleo diesel não é suficiente para iniciar a combustão de tudo o etanol. Conforme a razão de substituição aumenta, maiores pressões e tempos de atraso são percebidos para razões de substituição de 70% a 85%. Aumentos anômalos da pressão aconteceram para uma razão de substituição igual a 50%. Estes aumentos de pressão danificaram três injetores de etanol, provocando vazamentos de combustível no interior da MCR, como se mostra na

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

figura 61. A pressão máxima de trabalho do injetor de etanol é de 120 bar. Por este motivo, a substituição energética de 50% de etanol por óleo diesel (em base química) foi considerada como o limite de substituição neste trabalho para evitar danificar o injetor de etanol.

Maiores razões de substituição de etanol injetado no PMI fazem com que o inicio da combustão aconteça com mais retraso.

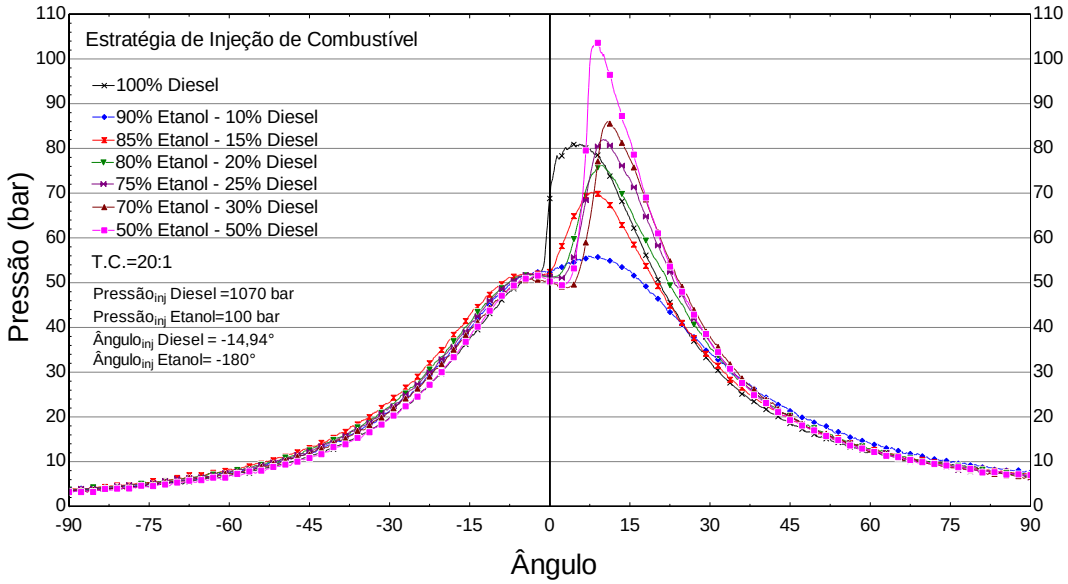

Figura 60 – Pressão vs Ângulo no interior do cilindro para teste Dual Fuel (Etanol - Diesel) etapa III.

Figura 61 - Vazamento no injetor de Etanol no interior da MCR durante os testes com TC=20:1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

No caso do calor liberado, níveis maiores ou iguais que do óleo diesel foram atingidos para razões de substituição energética de até 85%. Assim como também se percebe que a liberação de calor acontece de forma mais rápida quando comparado com o óleo diesel, como mostrado na figura 62 o que justifica os picos de pressão.

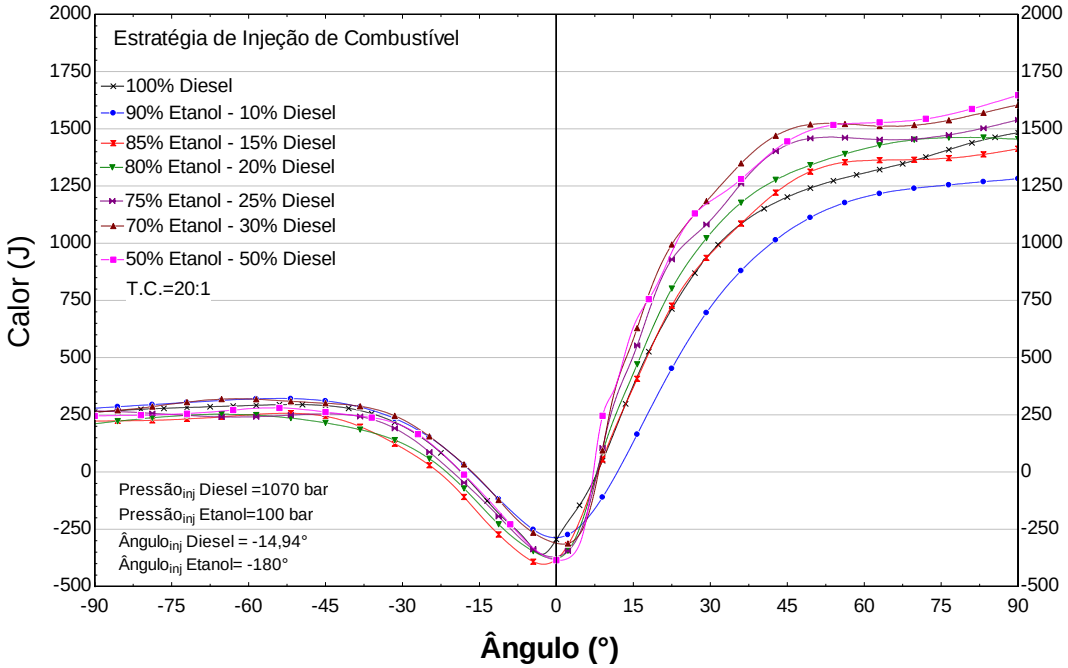

Figura 62 - Calor vs Ângulo no interior do cilindro para teste Dual Fuel (Etanol - Diesel) etapa III

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

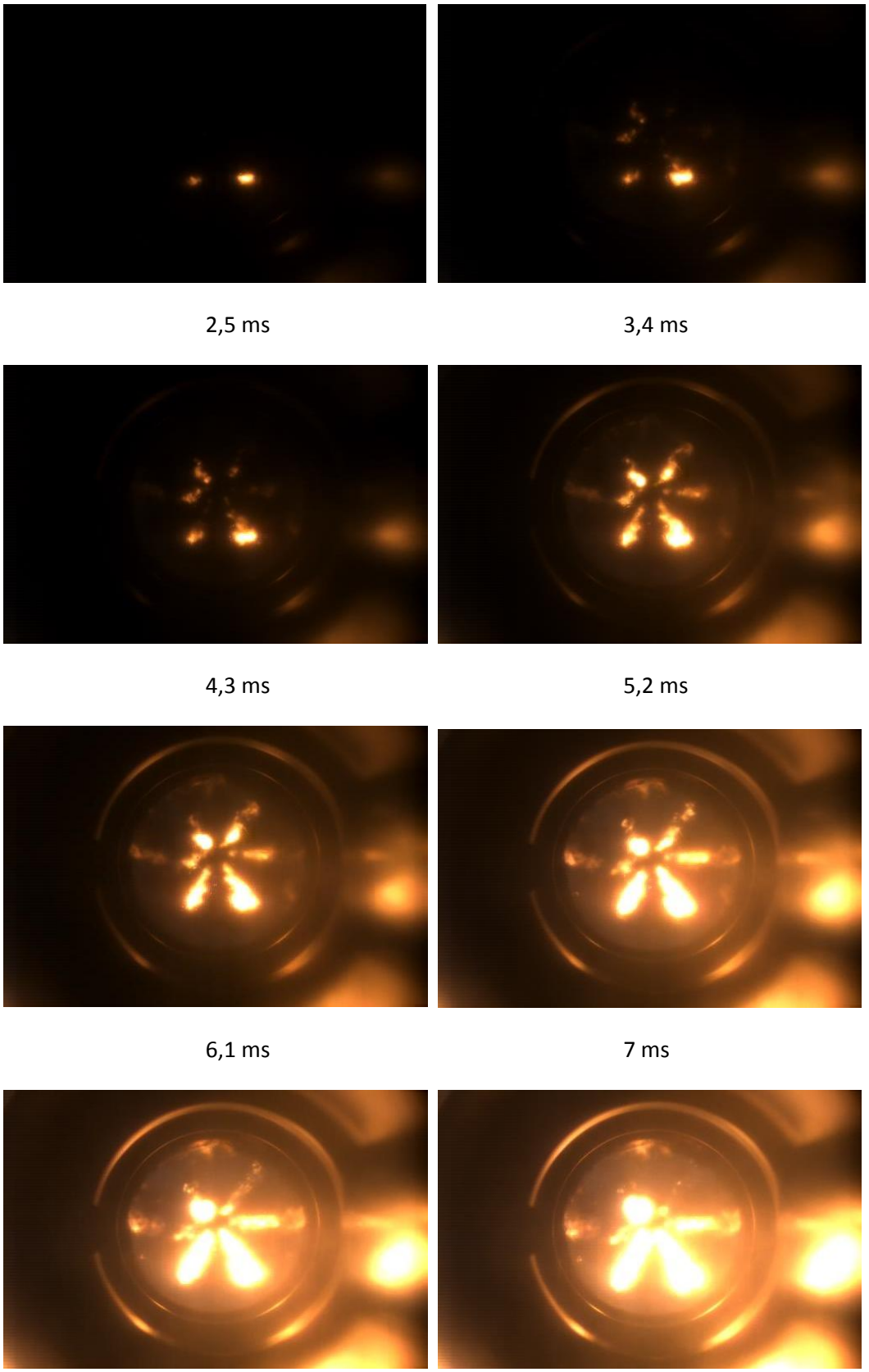

Figura 63 - Imagens da combustão Dual Fuel, Diesel Etanol com TC = 20:1 e razão de substituição igual a 80%, tempos após do inicio da combustão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

Na figura 63, se mostram imagens da combustão Dual Fuel com uma razão de substituição igual a 80% injetando o etanol no PMI. Comparando as figuras 58 e 63, pode-se observar como a combustão do óleo diesel puro é mais uniforme quando comparado à combustão Dual Fuel uma vez iniciado o processo de combustão, mesmo assim quando se compara os níveis de calor liberado, os valores são quase os mesmos. Pode se também fazer uma comparação do desenvolvimento dos processos de combustão no tempo entre a combustão óleo diesel convencional e a combustão Dual Fuel, na que se perceve o maior tempo que atraso desta ultima.

Terminada a fase de injeção simples, passou-se ao objetivo desta nova etapa, uma nova estratégia de injeção dos combustíveis. Como no caso anterior, inicia-se o processo com uma injeção de etanol próximo ao PMI e uma segunda injeção de etanol, simultânea com a injeção de óleo diesel, no mesmo ângulo de injeção do caso de óleo diesel do motor DW10 CETD4. Os pulsos são apresentados, esquematicamente, na figura 64. Esta estratégia foi testada e comparada com os resultados obtidos no caso anterior.

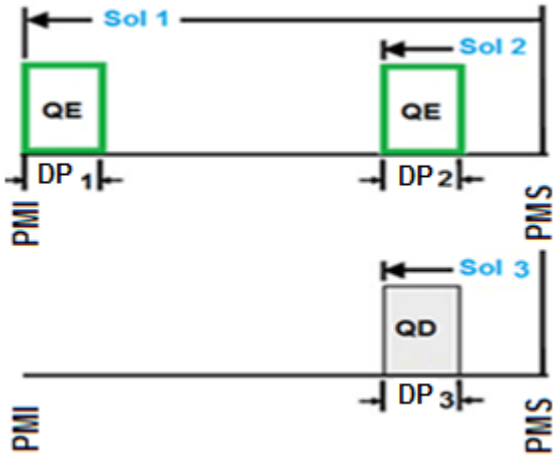

Figura 64 - Estratégia de injeção Dual Fuel, três injeções, Etapa III

onde:

PMI e PMS: Ponto morto Inferior e Superior;

$Sol_{1\ e\ 2}$: Início da injeção do etanol (em milissegundos antes do PMS);

Sol_3: Início da injeção óleo diesel (em milissegundos antes do PMS);

$DP_{1\ e\ 2}$: Duração do pulso de injeção do etanol (milissegundos);

DP_3: Duração do pulso de injeção do etanol (milissegundos);

QE: Carga injetada de Etanol (mm^3);

QD: Carga injetada de óleo diesel (mm^3).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

As figuras 65 e 66 apresentam, respectivamente, as curvas de pressão e calor liberado versus ângulo equivalente, para os 3 casos analisados: diesel puro, Duel Fuel injeção simples de etanol no PMI e Dual Fuel Injeção dupla de etanol.

Esta análise abrange tanto a variação da carga do óleo diesel, que dá inicio à combustão, quanto o efeito da injeção simultânea do etanol e óleo diesel sobre a combustão, na estratégia de três injeções.

Os níveis de pressão máxima atingidos durante a combustão, para os casos mostrados nas figuras 65(A), 65(B) e 65(C), são menores do que a máxima pressão observada para o óleo diesel puro. Na figura 65(D) observa-se que na estratégia de duas injeções (etanol – diesel), o atraso da ignição torna-se mais evidente quando comparado com a estratégia de três injeções (etanol-diesel-etanol).

Para todos os casos mostrados na figura 65 a menor pressão corresponde à estratégia de três injeções com maior nível da substituição na injeção de etanol simultânea à do óleo diesel. Evidentemente um maior percentual de substituição na segunda injeção de etanol “arrefece” em demasia o processo e faz que a pressão máxima diminua. Aumentos significativos nos níveis das pressões não foram observados para as razões de substituição de entre 90% e 75%. Pelo contrário, as pressões estiveram sempre em níveis menores que o nível da pressão durante os testes de combustão do óleo diesel puro.

Mais uma vez isto pode ser explicado pelo elevado calor latente do etanol que resfria a câmara para sua vaporização.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

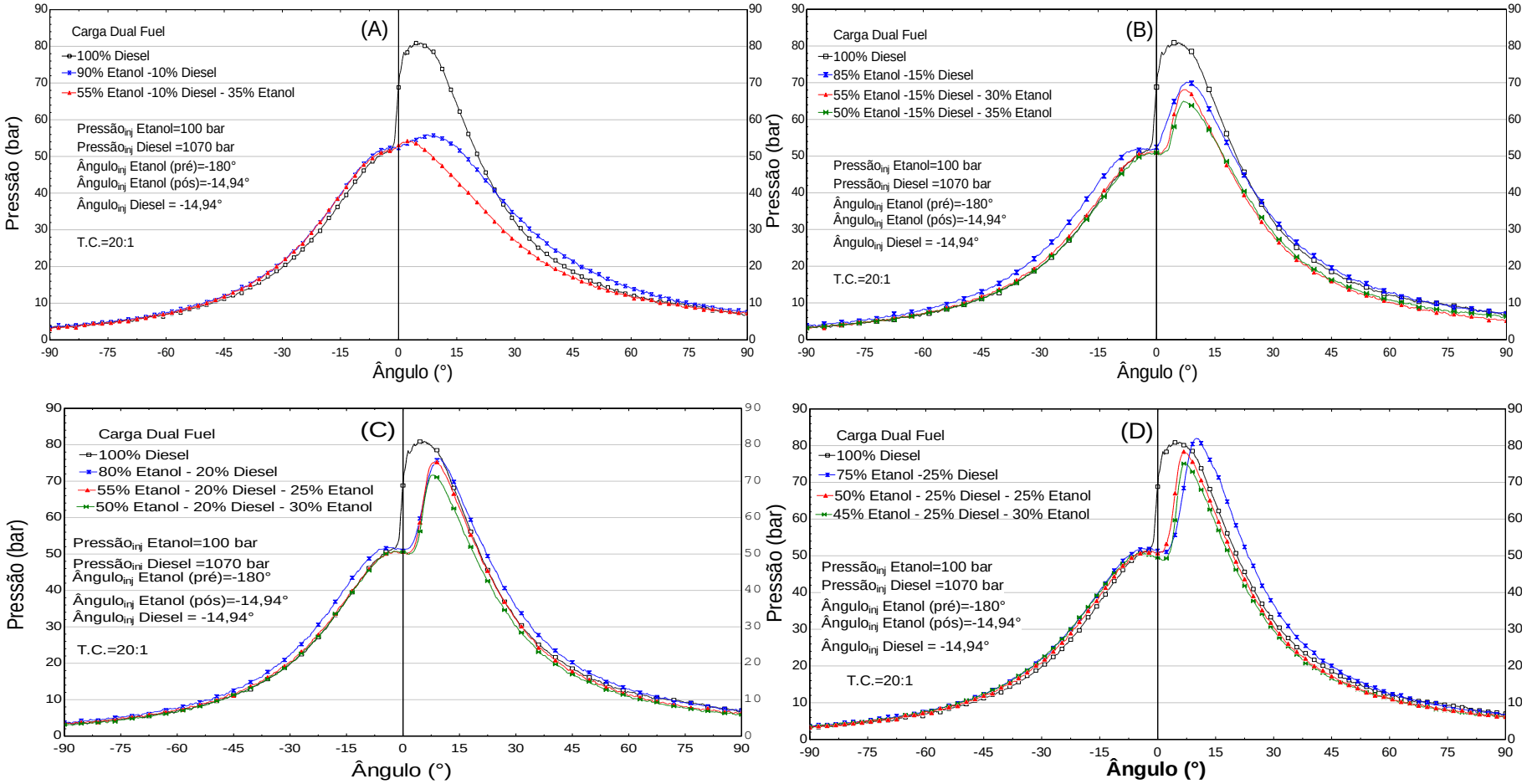

Figura 65 – Pressão vs Ângulo no interior do cilindro, Estratégias Dual Fuel etapa III

Na figura 66 é mostrado o calor liberado com razão de substituição variando de 90% até 75%. Pode-se observar que com uma razão de substituição de 85%, no caso da estratégia de uma única injeção de etanol e uma de óleo diesel, o calor liberado está sempre próximo ao calor liberado no modo óleo diesel puro. Também é notório que a liberação de calor é mais rápida que no modo óleo diesel puro, como efeito da pré-mistura do etano com o ar.

Considerando-se também que o etanol é formado por um só tipo de molécula, sua combustão acontece ao mesmo tempo, distinta da combustão do óleo diesel formado por vários tipos de cadeias de carbono.

No caso da estratégia de três injeções, os níveis de calor liberado para razões de substituição de entre 90% e 75% é sempre menor que o calor liberado tanto no modo Dual Fuel com duas injeções quanto na injeção de óleo diesel óleo diesel puro, e tem correlação com a quantidade de etanol injetado perto da injeção de óleo diesel. Ecklund et al., (1984) mencionam que a injeção do etanol próxima da injeção de óleo diesel, arrefece a chama, motivado pelo alto calor latente de vaporização do etanol, causando falhas na combustão. Porém, não se encontrou citação sobre a interação entre dois ou mais pulsos de injeção (tempos de injeção, separação entre pulsos, pressões de injeção) de dois combustíveis.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

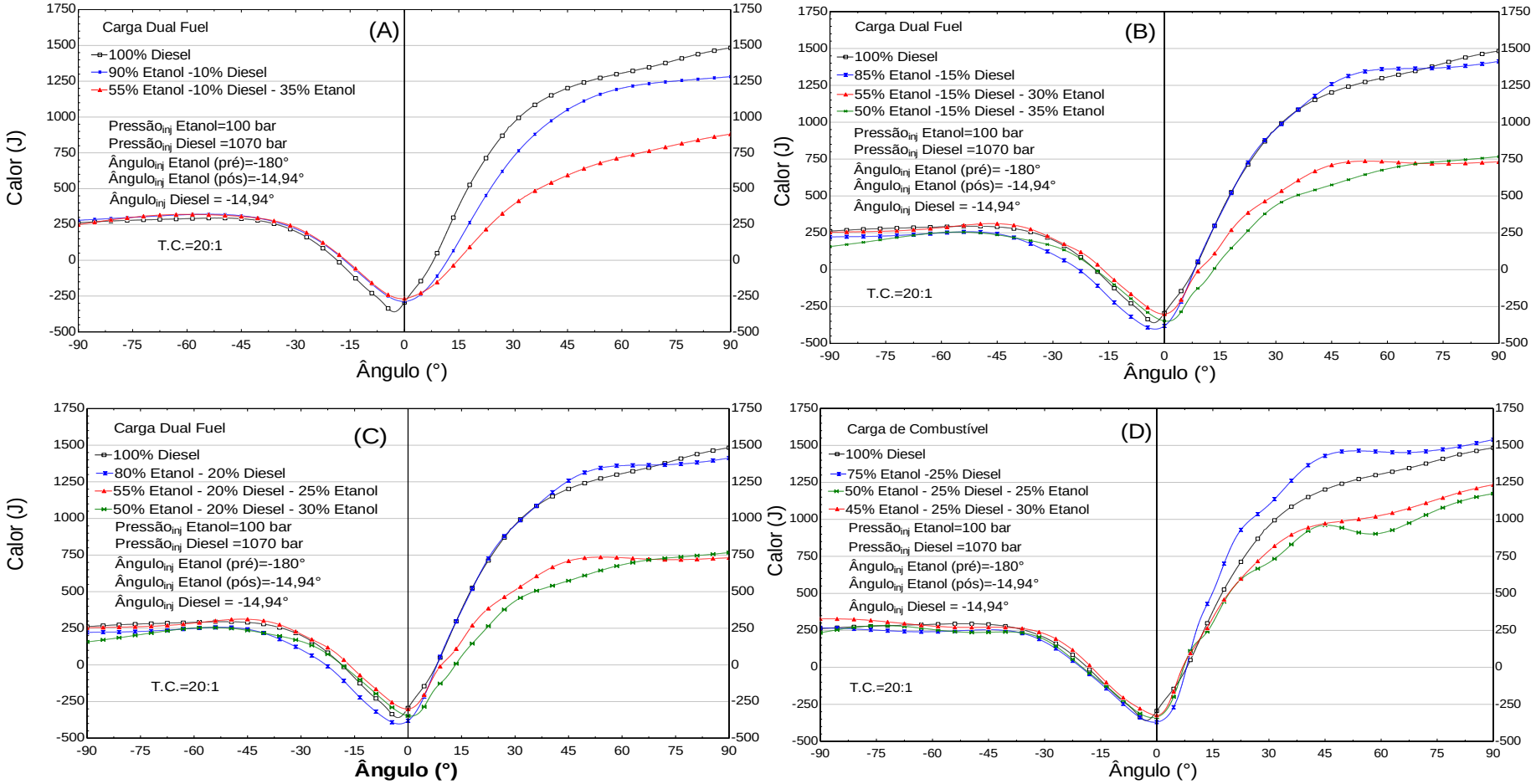

Figura 66 - Calor vs Ângulo no interior do cilindro, Estratégias Dual Fuel etapa III

A figura 67 mostra as curvas de pressão para razões de substituição igual a 70%, onde é possível perceber valores mais elevados (inferiores a 10%) nas máximas pressões, para todas as estratégias Dual Fuel, quando comparadas com a combustão do óleo diesel puro.

Um maior atraso de ignição se percebe na estratégia Dual Fuel com duas injeções (etanol – óleo diesel), quando em comparação com a de três injeções (etanol – diesel – etanol), onde este atraso é menos pronunciado. Isto se justifica pela maior presença de etanol pré-misturado no primeiro caso.

A injeção simultânea de etanol com o óleo diesel, que nos casos anteriores pareciam não mostrar maiores vantagens, pode contribuir para diminuir o atraso de ignição, permitindo manter a injeção do óleo diesel sempre no mesmo ponto. Isto indica que é possível otimizar os instantes das 3 injeções, em função das quantidades de energia contidas em cada uma delas.

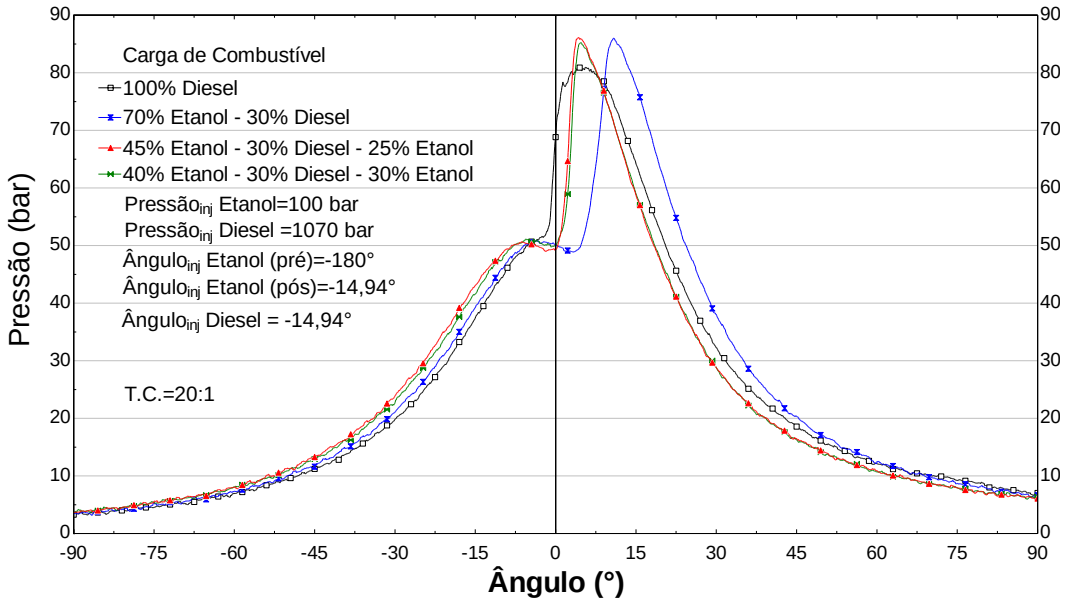

Figura 67 - Pressão vs Ângulo no interior do cilindro, influencia da pós-injeção no atraso da combustão. Estratégias Dual Fuel etapa III

A figura 68 mostra que o calor liberado mantém a tendência dos casos anteriores, onde maiores níveis de calor liberado são atingidos (no intervalo de tempo analisado) com a estratégia de duas injeções (etanol – diesel). Nos casos de três injeções (etanol – diesel – etanol), quanto maior é a razão de substituição na injeção simultânea de etanol, junto com o óleo diesel, menor é o calor liberado no intervalo de análise.

Deve-se ressaltar, mais uma vez, que a análise é limitada à faixa angular onde a combustão na MCR tem comportamento similar ao motor.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

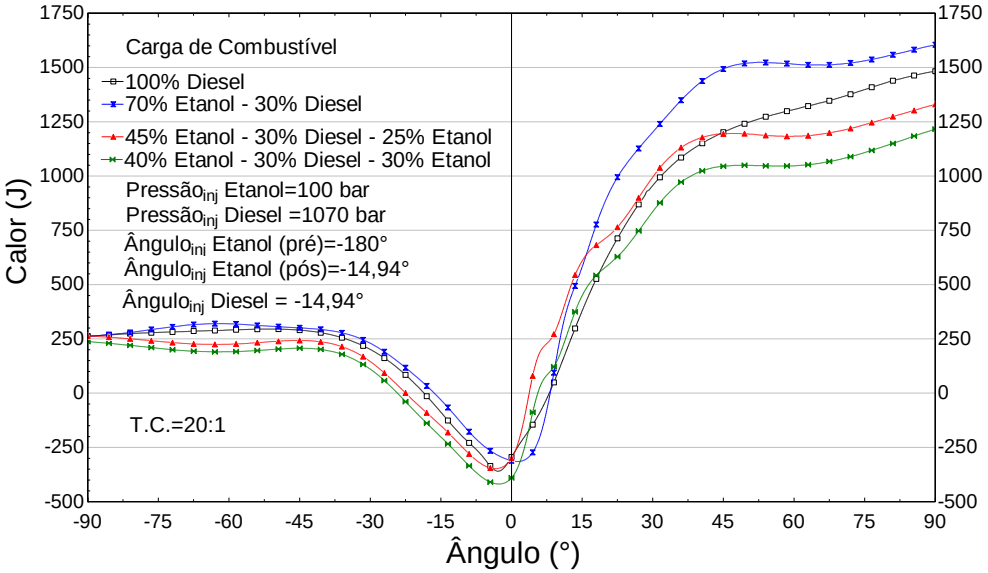

Figura 68 - Calor vs Ângulo no interior do cilindro, influencia da pós-injeção no atraso da combustão. Estratégias Dual Fuel etapa III

Para compensar o efeito do etanol pré-misturado, foi feito um estudo do efeito do avanço da injeção do óleo diesel sobre as características da combustão Dual Fuel. A figura 69 mostra o comportamento da pressão em função do ponto onde se faz a injeção piloto. Observando apenas a estratégia de duas injeções, é notável a mudança no comportamento da pressão ao se alterar o ponto de injeção do óleo diesel de 212,6 mm (-14,94°) para 211,6 mm (-17,38°). A correção do ponto de injeção, trazendo a elevação da curva de pressão para um ponto mais próximo do PMS, provoca um aumento significativo da pressão, como observado e comentado na literatura.

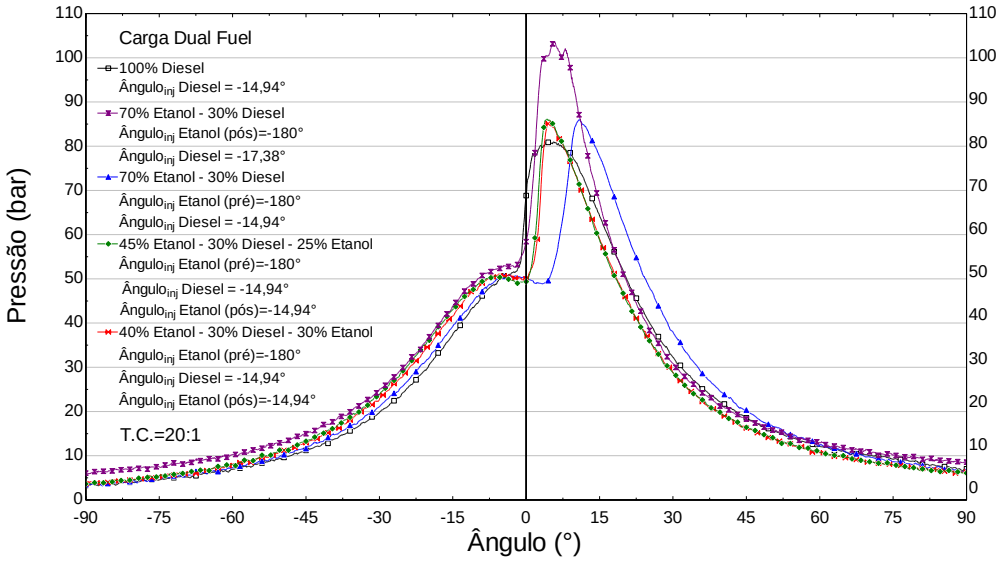

Figura 69 - Pressão vs Ângulo no interior do cilindro para teste com óleo diesel puro e estratégias Dual Fuel com duas e três injeções mudando o ponto de injeção do óleo diesel.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

A figura 70, por outro lado, mostra que, ainda que os níveis de calor liberado atingissem valores aproximadamente iguais ao final da região de análise (~ 1600 J), a liberação de calor nos primeiros instantes da combustão acontece mais rápida com a antecipação do ponto de injeção do óleo diesel. Como a MCR não reproduz todo o curso da expansão, não é possível tirar maiores conclusões, quanto à eficiência de todo o ciclo, o que só pode ser feito em motores.

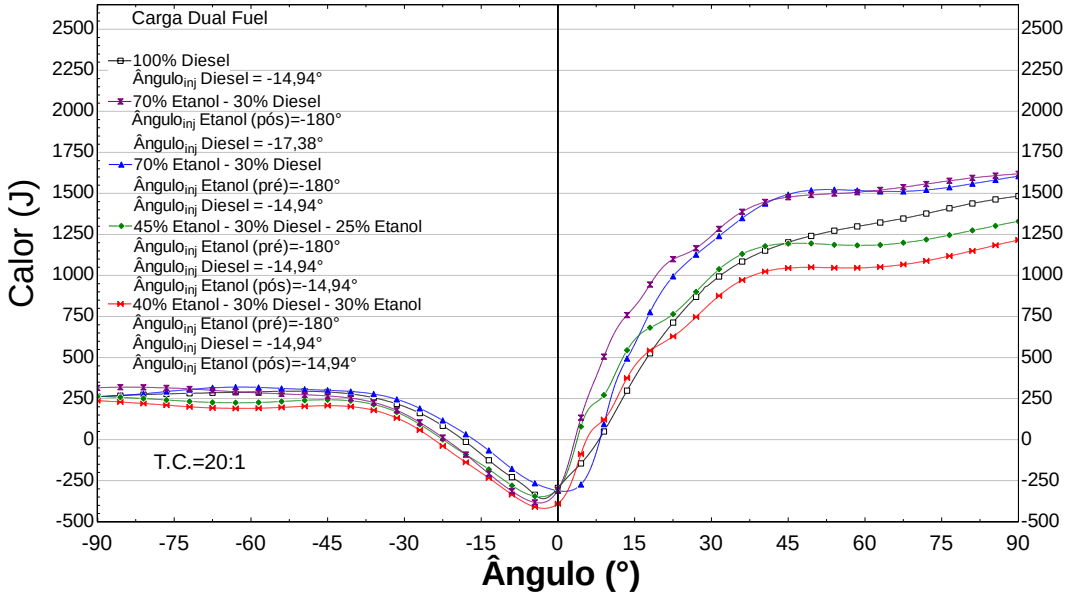

Figura 70 - Calor vs Ângulo no interior do cilindro para teste com óleo diesel puro e estratégias Dual Fuel com duas e três injeções mudando o ponto de injeção do óleo diesel.

Dando sequência à analise das variáveis, passou-se a investigar a influência da posição relativa dos pulsos de injeção diesel/etanol. Como se observou nos testes com duas injeções de etanol, a segunda injeção deste combustível não apresentou melhorias nas condições da combustão. Sendo assim resolveu-se avaliar, de forma isolada, a influência da posição da injeção de etanol, em relação à injeção do óleo diesel. Para esta análise foram investigadas três estratégias de injeção. Tais estratégias estão esquematizadas nas figuras 71, 72 e 73 onde DP_1 e DP_2 representam a duração de cada injeção:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

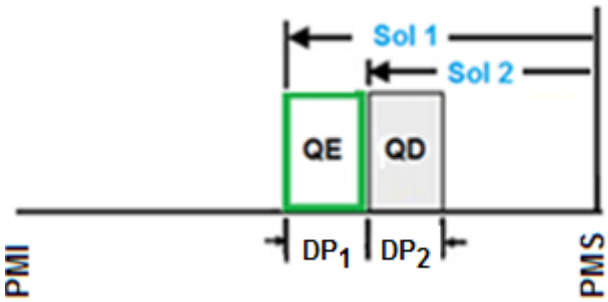

Figura 71 - Pré-injeção de etanol – Injeção de óleo diesel.

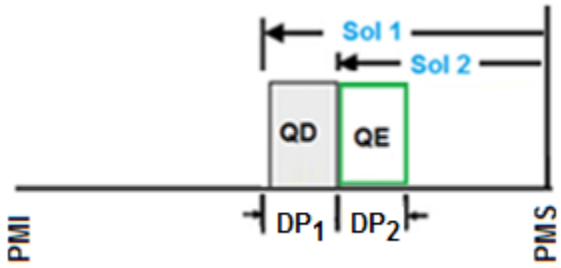

Figura 72 - Pós-injeção de etanol – Injeção de óleo diesel.

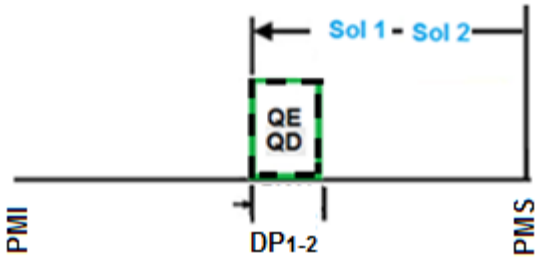

Figura 73 - Injeção simultânea óleo diesel - etanol.

onde:

PMI e PMS: Ponto morto Inferior e Superior;

SoI_1: Início da injeção do etanol (em milissegundos antes do PMS);

SoI_2: Início da injeção óleo diesel (em milissegundos antes do PMS);

DP_1: Duração do pulso de injeção do etanol (milissegundos);

DP_2: Duração do pulso de injeção do etanol (milissegundos);

QE: Carga injetada de Etanol (mm^3);

QD: Carga injetada de óleo diesel (mm^3).

Estabelecidas as estratégias de injeção de combustível para estudar a interação entre os pulsos de injeção “simultâneos” dos dois combustíveis, estas foram implementadas, gerando as curvas de pressão e calor liberado. Como o objetivo era avaliar a influência vaporização do etanol sobre a combustão do óleo diesel, a energia contida neste último foi mantida constante nos 3 experimentos. Considerou-se assim, uma carga equivalente a 125% da carga

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

padrão, distribuídas de forma que 100% da energia química fosse liberada pelo óleo diesel e 25% da energia química pelo etanol. Realizaram-se testes para as três diferentes estratégias mudando o ponto de início da injeção do etanol e mantendo constante o ponto de início da injeção do óleo diesel.

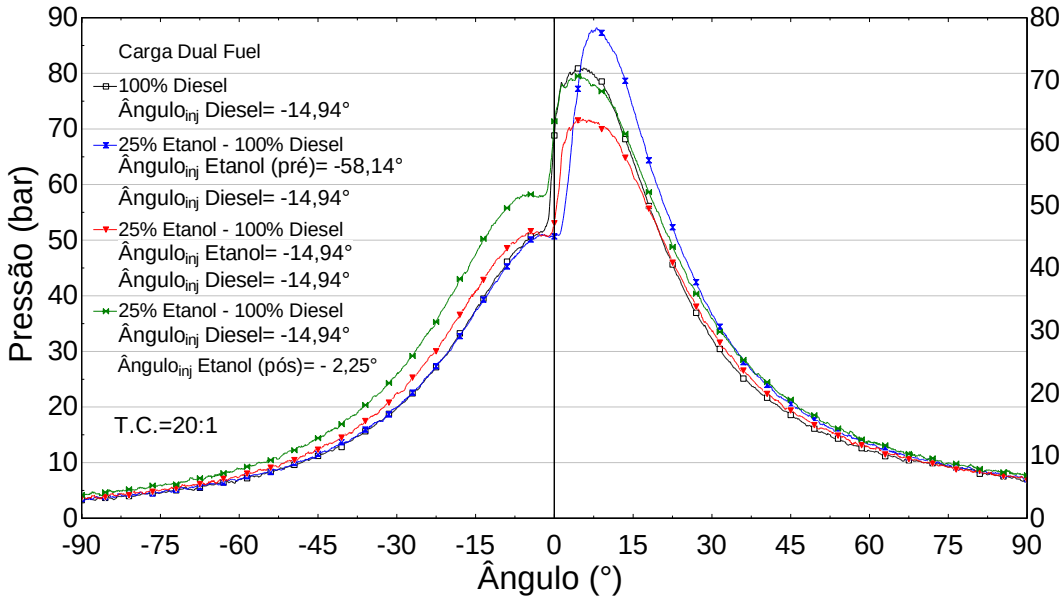

Figura 74 - Pressão vs Ângulo, mostrando o efeito do ponto de injeção do etanol com referência a injeção de óleo diesel.

Na figura 74 são mostradas as curvas da pressão para as estratégias avaliadas. Para os caos de injeção do etanol simultânea e posterior em relação à injeção do óleo diesel, foram observados níveis de pressão menores do que os obtidos com o óleo diesel puro. Já no caso da pré-injeção de etanol, tanto um maior nível de pressão, quanto um maior atraso de ignição são percebidos. Ou seja, tanto a injeção simultânea, quanto a posterior, parecem evitar a combustão, indicando que a maior participação do etanol se dá na forma de pré-injeção.

Na figura 75 se visualiza o calor liberado nos casos em estudo. A pré-injeção de etanol aparece como a estratégia onde a maior quantidade de calor é liberada, sendo a única a superar o caso do óleo diesel puro.

Para a faixa de correspondência da combustão MCR – motor, ainda é difícil afirmar que todo o etanol injetado foi consumido na combustão.

Devido à contrapressão ser maior nestas injeções próximas ao PMS, realizou-se uma avaliação da massa injetada, tendo em conta a maior pressão no interior do cilindro. Para tal foi utilizado a equação 4.15 e as pressões tanto de injeção do etanol, quanto no interior da MCR. Para os 3 casos avaliados foram constatadas massas equivalentes a 23% da carga de óleo diesel. A

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

redução provocada pela maior pressão no interior da MCR foi relativamente pequena

No caso das injeções simultânea e posterior, observam-se comportamentos similares com relação ao calor liberado. Ambos ficam próximos do caso com só óleo diesel, o que indica que o etanol não chega a queimar nesta janela angular ou sua combustão é ineficiente. Aparentemente, a energia adicional introduzida com etanol é desperdiçada ou pelo efeito da contrapressão não é injetada nas quantidades teoricamente estabelecidas.

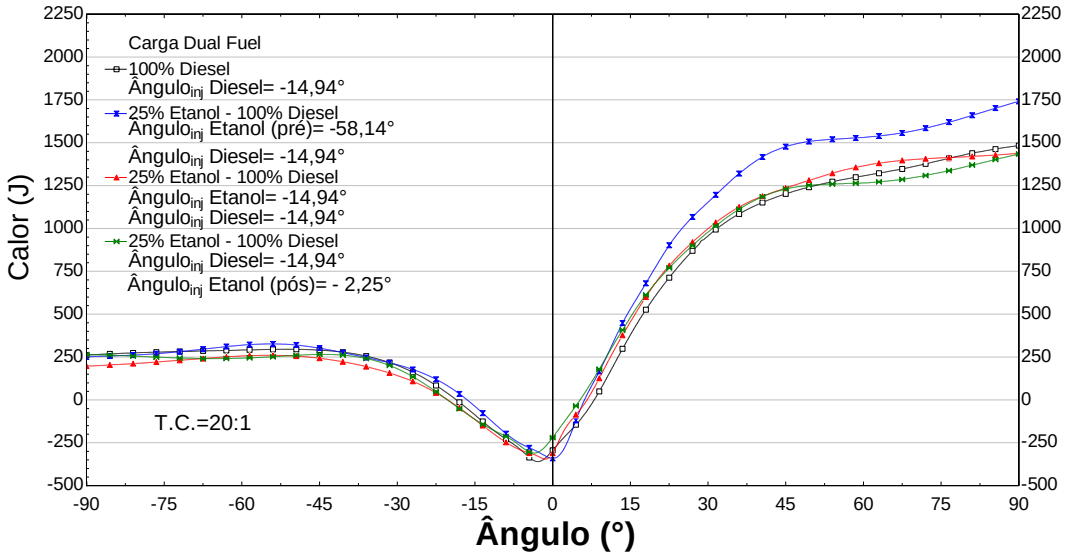

Figura 75 - Calor vs Ângulo, mostrando o efeito do ponto de injeção do etanol com referência a injeção de óleo diesel.

De maneira geral o uso de óleo diesel e etanol através de estratégias dual fuel em uma máquina de compressão rápida atingiu os objetivos propostos nesta tese. Altas taxas de substituição são possíveis, usando estratégias de duas injeções (etanol – óleo diesel) mesmo com as baixas temperaturas na MCR.

Uma segunda injeção de etanol, próxima ä injeção de óleo diesel, pode ser otimizada para reduzir uma das desvantagens mencionadas geralmente na literatura, como é o caso do atraso da combustão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB