

5 Resultados

Para o melhor entendimento do presente capítulo, os ensaios experimentais do motor em modo HCCI foram divididos em duas partes: Apresentação e análise das principais curvas de desempenho HCCI para todas as rotações avaliadas e apresentação e análise dos parâmetros de controle na combustão HCCI.

5.1. Avaliação modo de combustão HCCI

Como foi descrito no capítulo anterior, foram realizadas modificações externas no motor de ciclo Diesel (instalação de um aquecedor de ar e de um bico injetor, ambos na linha de admissão) para que possa trabalhar na combustão HCCI utilizando gasolina. O principal desafio da operação HCCI com gasolina é atingir as condições necessárias para iniciar a ignição da mistura no final da fase de compressão. Os parâmetros de maior influência para atingir o modo HCCI são a variação da temperatura da mistura, a vazão mássica de combustível e a rotação do motor (Baumgarten, 2006).

5.1.1. Condições de Operação

Os ensaios realizados no motor foram realizados com aspiração natural e injeção na linha de admissão (injeção indireta), nesta etapa será avaliado o desempenho do motor sob a variação da temperatura da mistura, vazão de combustível e rotação do motor.

Como foi mencionado no capítulo quatro, é necessário um período de aquecimento em modo diesel, isto é para poder atingir as condições térmicas que permitam desenvolver a ignição e combustão HCCI, é dizer estabelecer um ambiente térmico adequado (Aguilar, 2010). Este período de aquecimento poderia simular a partida em frio.

Posterior ao período de aquecimento foi iniciado os ensaios HCCI em função das condições de operação previamente estabelecidas. Na Tabela 8, apresenta-se as condições de operação do motor em modo HCCI.

Tabela 8. Condições de Operação HCCI – Motor Yanmar NSB50

Parâmetro Experimental	Valor
Rotação do motor	1600-2000 RPM
Razão ar-combustível	2 - 4
Temperatura do ar de admissão	348 - 363 K
Pressão do ar de admissão	1 bar
Pressão do combustível	2 bar
Temperatura do óleo	A partir de 60 °C
Temperatura da parede do motor	A partir de 100 °C
Temperatura da água de refrigeração	90 – 100 °C
Pressão interior do cilindro	90 bar
Combustível	Gasolina Tipo C

As Rotações utilizadas para os ensaios em HCCI foram estabelecidas em função dos testes realizados anteriormente (Roque, 2010; Aguilar, 2010) intervalo onde foram apresentados os melhores valores de desempenho. A temperatura da mistura esteve na faixa de 75°C a 90°C com intervalos de 8°C e a vazão mássica de combustível injetada foi regulada por meio do parâmetro lambda que mede as relações das vazões mássicas do ar e do combustível, para estes ensaios se trabalhou na faixa de dois a quatro.

A pressão máxima na câmara de combustão, estabelecida como limite de funcionamento para os ensaios em modo HCCI foi de 90 bar, designada a partir da pressão máxima gerada no motor em modo diesel.

5.2. Desempenho HCCI

Na Figura 29, apresenta-se a variação de torque e potência com diferentes rotações, para três temperaturas da mistura. Foi observado que, para maiores temperaturas, menores valores de torque, isto devido a que aumentando a temperatura da mistura, a quantidade de combustível que é injetada no motor é diminuída, então, menor trabalho útil será gerado.

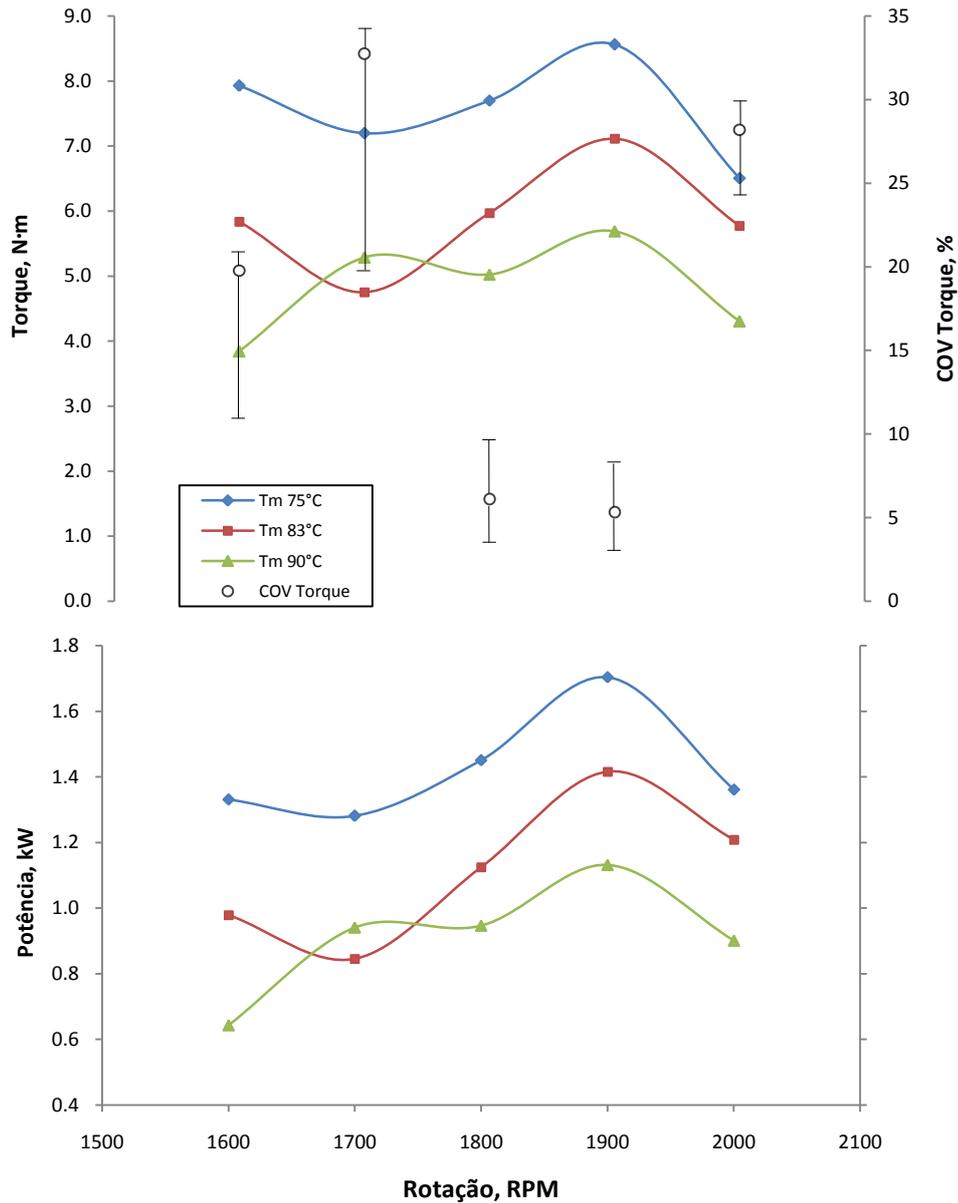


Figura 29. Variação do torque e potência com a rotação e a temperatura da mistura.

Na mesma Fig. 29, pode-se observar que para 1900 RPM se obtiveram os melhores valores de torque, sendo aproximadamente 8,5 N·m, para uma temperatura de mistura de 75°C, devemos ter em consideração que estes resultados não indicam a vazão mássica do combustível. Em consequência não se analisa desempenho. Outra característica importante na Figura 29 é a utilização de uma ferramenta estatística denominada Coeficiente de Variação (COV) que é definida como uma medida da dispersão dos dados observados, permitindo assim analisar a variabilidade do parâmetro. Baixos valores de COV (até 5%) indicam o funcionamento estável do motor. Valores na faixa de 5% até 10% são

considerados como uma operação quase estável, com poucas oscilações nos valores de torque, finalmente valores do COV superiores a 10% são indicadores de instabilidade e possível dano ao motor. Por tanto, como pode ser observado na Figura 29, para rotações de 1800 RPM e 1900 RPM se apresentam os melhores valores de COV (5%), indicando melhor operação no modo HCCI. As outras rotações, principalmente 1700 RPM e 2000 RPM apresentam valores de COV muito altos, em consequência, são rotações não recomendadas para a operação HCCI.

Na Figura 29 também se pode visualizar o a variação da potência para cada temperatura da mistura e para diferentes rotações. A máxima potência gerada foi de 1,7 kW para a rotação de 1900 RPM com uma temperatura da mistura de 75°C. As tendências das curvas de potência apresentam o mesmo comportamento das curvas do torque principalmente na faixa de 1800 até 2000 RPM, isto para as três temperaturas da mistura.

A Figura 30, apresenta a variação do consumo específico de combustível e do rendimento térmico em função da rotação do motor e das temperaturas da mistura. O consumo específico mínimo alcançado foi de 252 g/kW·h para 1900 RPM e temperatura da mistura de 75°C, este ponto indica uma boa transformação do combustível em trabalho útil por parte do motor.

Também a Figura 30 apresenta a variação do rendimento térmico em função da rotação e das temperaturas da mistura, o máximo valor atingido foi de 34,2 % na rotação de 1900 RPM com uma temperatura da mistura de 75°C. O rendimento térmico é afetado pelo aumento da temperatura da mistura. Para a máxima temperatura testada (90°C) o rendimento térmico apresenta uma queda, quando comparada com a temperatura de 75°C.

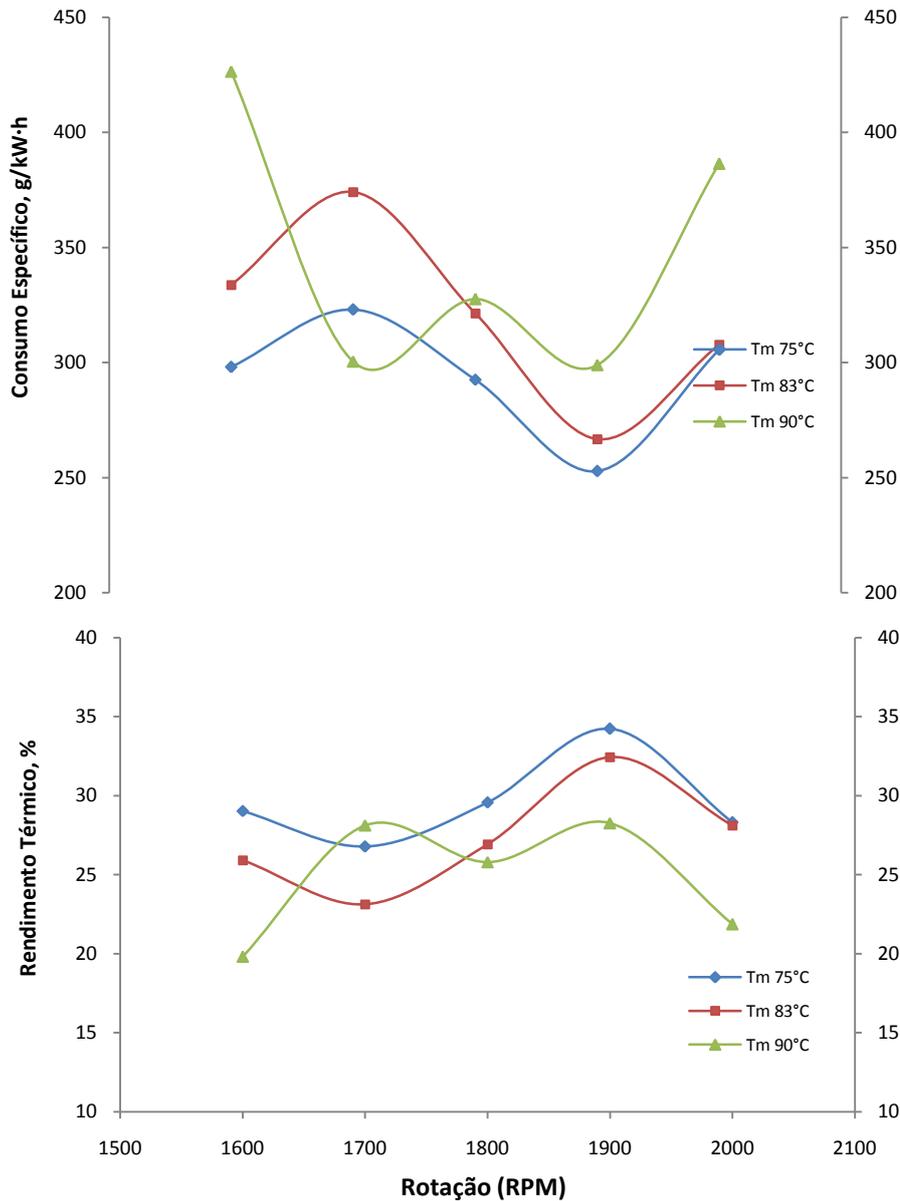


Figura 30. Variação do consumo específico e do rendimento térmico com a rotação.

A variação da eficiência volumétrica em função da rotação do motor para diferentes temperaturas da mistura (ar-combustível) é apresentada na Figura 31. Até a rotação de 1700 RPM, a eficiência volumétrica aumenta com a rotação do motor, até que os efeitos do atrito (perda de carga) e a velocidade de abertura e fechamento das válvulas fazem diminuir o valor da eficiência. Segundo Heywood (1988) valores máximos típicos de este parâmetro para motores com aspiração natural devem trabalhar na faixa de 80% até 90%, nestes testes o máximo valor atingido foi de 85% na faixa de 1500 a 1700 RPM.

Observa-se também na Figura 31 que para maiores valores de temperatura do ar a eficiência volumétrica diminui. Isto é relacionado ao fato que, aumentando a temperatura de entrada do ar ocasiona uma diminuição na densidade do mesmo e por tanto, menor quantidade de massa de ar ingressa ao motor, reduzindo assim a quantidade de oxigênio que vai participar no processo de combustão, isto também ocasiona a geração de menor trabalho útil. Esta diminuição na quantidade de combustível durante fase de combustão pode ser confirmada nos valores obtidos de lambda para cada ensaio, se observa que com aumento da temperatura de entrada de ar, maiores valores de lambda são observados e menor quantidade de combustível esta sendo injetada.

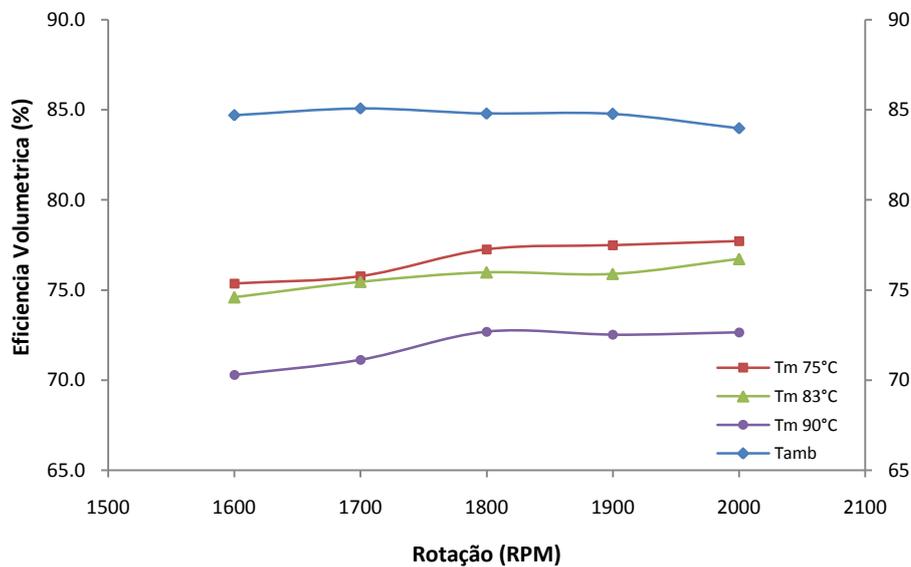


Figura 31. Eficiência Volumétrica em função da rotação.

A variação da temperatura dos gases de escape em função da rotação do motor e das temperaturas da mistura é apresentada na Figura 32. Observa-se que a temperatura de dos gases de escape aumenta até que a rotação alcança um valor de 1900 RPM. Posteriormente a temperatura teve uma leve queda. Pode-se observar que em 2000 RPM não é uma rotação apropriada para a operação HCCI mostrando muita vibração. Os altos valores de temperatura de gases de escape são conseguidos com uma menor temperatura na mistura de entrada principalmente pelo fato de permitir trabalhar com maiores quantidades de combustível.

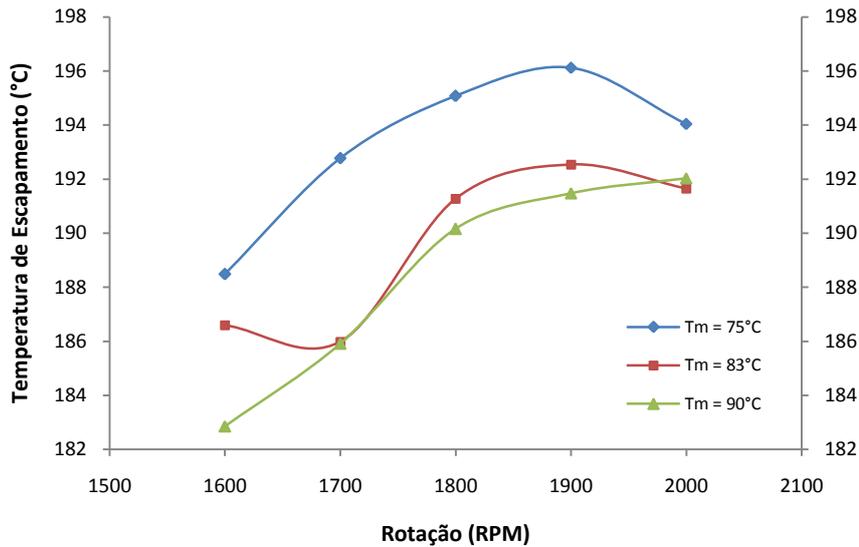


Figura 32. Temperatura de escapamento em função da rotação.

Na Figura 33 são apresentadas as medições das diferentes temperaturas registradas na bancada experimental (temperatura do óleo, da água de refrigeração, do bloco do motor, do motor elétrico e da temperatura ambiente)

Como foi mencionado no início de este capítulo a combustão HCCI só é conseguida quando se atingem as condições necessárias que permitam desenvolver um ambiente térmico adequado, sendo basicamente influenciado pelo registro histórico da temperatura (temperatura do óleo e do bloco do motor) e também pela concentração da mistura (ar-combustível). Mesmo assim que as condições adequadas sejam atingidas, elas mudam com a rotação.

Na mesma Fig. 33, são apresentados os resultados do ensaio realizado para a temperatura da mistura de 75°C em função da rotação. Como poder ser observado, as temperaturas do óleo e do bloco do motor vão aumentando quando a rotação é incrementada e qualquer variação na quantidade de combustível tem um efeito direto sobre estes parâmetros.

A temperatura da água de refrigeração está influenciada diretamente com a variação da temperatura do bloco e do óleo lubrificante, podendo atingir até 100°C. Finalmente, as temperaturas do motor elétrico e do ambiente permanecem constantes.

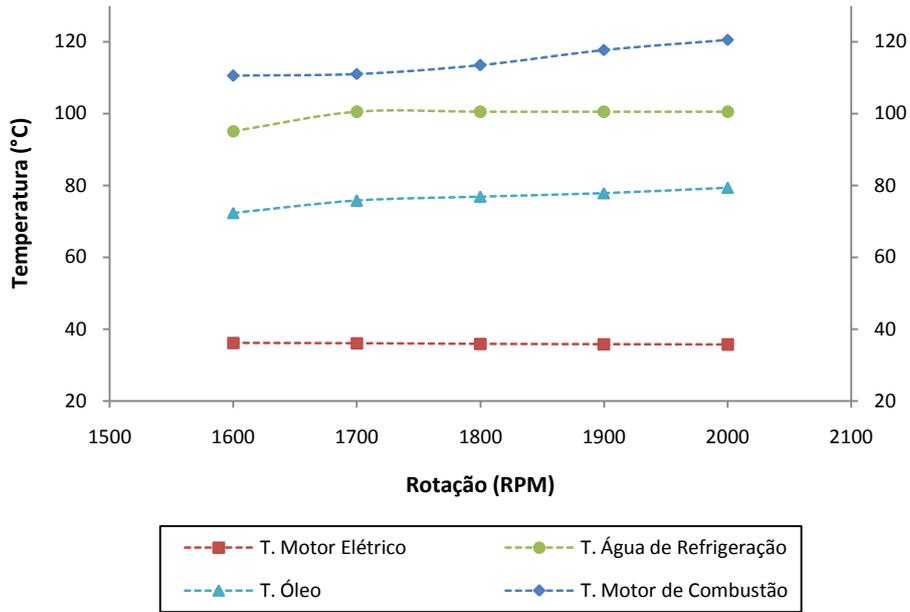


Figura 33. Variação de temperaturas em função da rotação, 75°C na mistura.

5.3. Análise dos parâmetros de controle na combustão HCCI

A combustão HCCI é caracterizada pela ausência de um mecanismo de controle direto ou iniciador da fase de combustão como acontece nos sistemas de combustão convencionais SI e CI. Por tanto o desafio chave para o funcionamento do motor em modo HCCI é o controle indireto do processo de combustão (Baumgarten, 2006).

As reações químicas são iniciadas pelas condições termodinâmicas e pela composição química da carga no cilindro. Parâmetros como a quantidade de combustível, temperatura da mistura de entrada e rotação do motor se apresentam como as melhores opções para ter um controle direto no início, duração, avanço da combustão e na velocidade de liberação de calor.

5.3.1. Relação ar/combustível

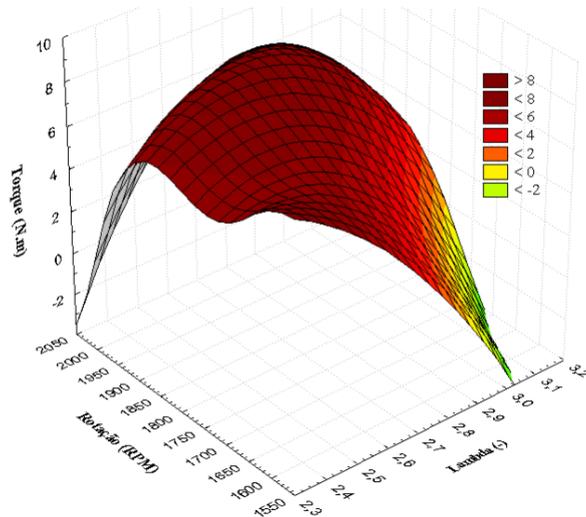
Um parâmetro utilizado no controle da ignição HCCI é a relação ar-combustível conhecido como o fator lambda (λ). Valores altos de lambda significam misturas muito fracas em combustível originando muitas vezes uma combustão incompleta com baixas temperaturas para oxidar o combustível e

valores baixos de lambda podem ocasionar altos níveis de pressão (pela de alta quantidade de combustível) e assim danificar a estrutura interna do motor ou apresentar detonação do combustível (Baumgarten, 2006).

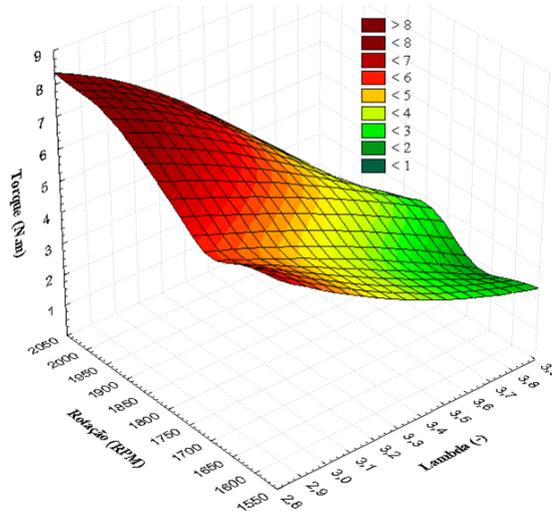
Uma característica importante do processo de combustão HCCI é a utilização de uma mistura ar-combustível homogênea. Pelo fato que a injeção de combustível é feita na linha de admissão (injeção indireta) permite misturar o ar e o combustível até atingir uma mistura homogênea. A ausência de homogeneidade na mistura pode produzir significantes efeitos na autoignição.

Para obter uma mistura homogênea possível é desejável um maior tempo de mescla do ar e do combustível antes que seja injetado (Baumgarten, 2006), isto significa que a instalação do bico injetor deve ser afastada da válvula de admissão, mas se a distância é muito longe, a perda de calor aumenta e diminui a temperatura com a qual a mistura esta ingressando e a autoignição pode ser afetada. Sob estes conceitos a bancada foi projetada com 0,8 m de distanciamento entre o bico injetor e a válvula de admissão do motor (Chialva, 2006, Aceves, 2001, e Xing-Cai, 2005).

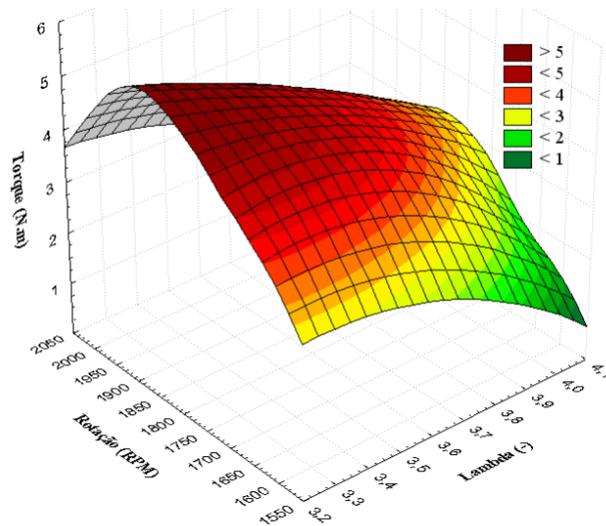
Na Figura 34 se apresenta a variação dos valores do torque em função da rotação e da relação ar-combustível (lambda) para as três temperaturas da mistura (75°C, 83°C e 90°C). Pode-se observar nos resultados que, para todos os casos de temperatura da mistura, os melhores valores de torque são conseguidos no intervalo de 1800 até 1950 RPM. No início dos testes com altos valores de lambda (2,9 até 3,2) a combustão fica muito instável devido ao fato de trabalhar com misturas extremamente fracas em combustível ocasionando o retardo no início da ignição e torques muito baixos. É por isso que para valores de lambda elevados (a partir de 2,9) o torque é menor e essa tendência se apresenta para todas as rotações estudadas, já que um aumento no valor de lambda significa que menor quantidade de combustível está sendo injetado e menor trabalho útil será gerado. Por outro lado, para menores valores de lambda (menores a 2,6), o torque aumenta devido ao aumento do combustível na mistura, isto permite uma rápida liberação de calor e por tanto a geração de maior trabalho útil.



Temperatura da mistura: 75°C



Temperatura da mistura: 83°C

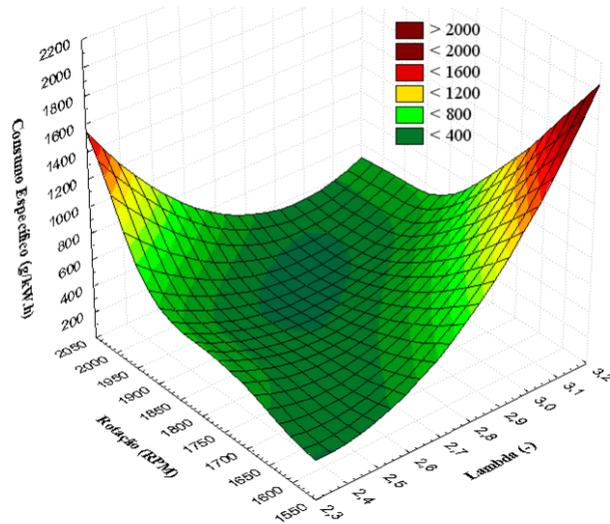


Temperatura da mistura: 90°C

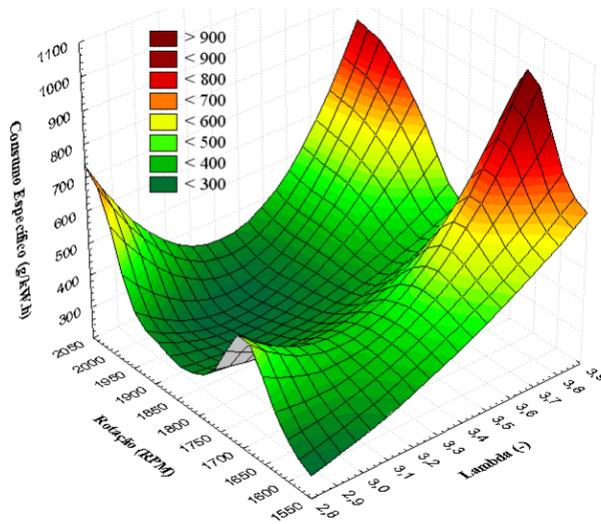
Figura 34. Torque em função da rotação e o fator lambda.

A variação do consumo específico de combustível em função da rotação do motor e dos valores do fator lambda é apresentada na Figura 35 para as três temperaturas da mistura estudadas. Pode-se observar que para a temperatura da mistura de 75°C que, baixos valores de consumo específico são conseguidos principalmente nas rotações entre 1800 e 1950 RPM (entre 252 g/kW·h e 292 g/kW·h) com um valor de lambda que varia entre 2,6 e 2,9 e, quando os valores de lambda ficam afastados de esse intervalo os valores de consumo específico começam a incrementar-se.

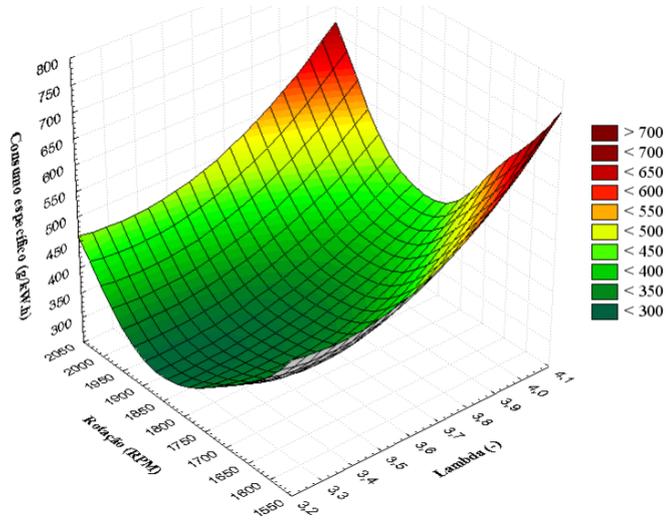
Para os resultados do consumo específico nas temperaturas de 83°C e 90°C, pode-se observar também que os melhores valores se encontraram no intervalo de 1800 RPM até 1950 RPM, que foram as rotações do motor onde se obtiveram os melhores resultados nos testes HCCI. Nestas curvas se podem apreciar os altos valores que se obtém de consumo específico quando se trabalha com valores altos de lambda (misturas fracas). Por outro lado, baixos valores de lambda (na faixa 2,9 até 3,3) geram baixos valores de consumo específico (267 g/kW·h e 298 g/kW·h para as temperaturas de 83°C e 90°C respectivamente).



Temperatura da mistura: 75°C



Temperatura da mistura: 75°C



Temperatura da mistura: 75°C

Figura 35. Consumo específico em função da rotação e fator lambda.

Análise da curva de pressão

Nesta seção são apresentadas as curvas de pressão no interior da câmara de combustão em função do ângulo da manivela para a rotação de 1900 RPM e para todas as temperaturas da mistura utilizadas. As curvas de pressão obtidas para as outras rotações são apresentadas no anexo.

Para examinar o efeito do lambda na combustão HCCI, a temperatura da mistura de entrada foi fixada para cada ensaio.

Na Figura 36 se pode observar a variação da pressão interna em função dos valores de lambda estudados para a rotação de 1900 RPM. Para valores menores de lambda as pressões máximas aumentam, isto devido ao que maior quantidade de combustível esta sendo queimado e maior trabalho útil está sendo gerado.

Para valores de lambda até 2,96, se apresenta um comportamento moderado na combustão HCCI (sem vibração ou ruído), mais para valores superiores de 3,04 o motor apresenta dificuldades para manter a ignição mostrando altas variações na pressão de um ciclo para outro. Segundo Baumgarten (2006), misturas pobres em combustível retardam o início da ignição e tem uma liberação de calor mais lenta e misturas extremadamente pobres resultam em uma combustão incompleta apresentando baixas temperaturas e levando a um aumento nas emissões de CO e HC pela alta troca de calor que acontece nesse instante.

Para valores de lambda menores, mais energia térmica esta sendo liberada atingindo assim uma maior eficiência térmica. Por outro lado, dependendo da quantidade de combustível e das condições de contorno, a estabilidade da combustão se degrada e a detonação aparece, devido a que a liberação de calor se torna violenta e o aumento na pressão resulta numa combustão detonante ($\lambda \leq 2,77$), sendo isto também confirmado com o excesso de vibração. Outra característica observada nesta figura é que para misturas mais ricas em combustível, além de apresentar um incremento na eficiência térmica, permitem um avanço da fase de combustão. Como pode ser visualizado na Figura 36 cada vez que o valor de lambda é diminuído, o início da combustão apresenta um avanço respeito ao ângulo do virabrequim. Segundo Machrafi et al (2008), a variação do fator lambda permite adiantar o início da combustão e a duração da combustão é também afetada.

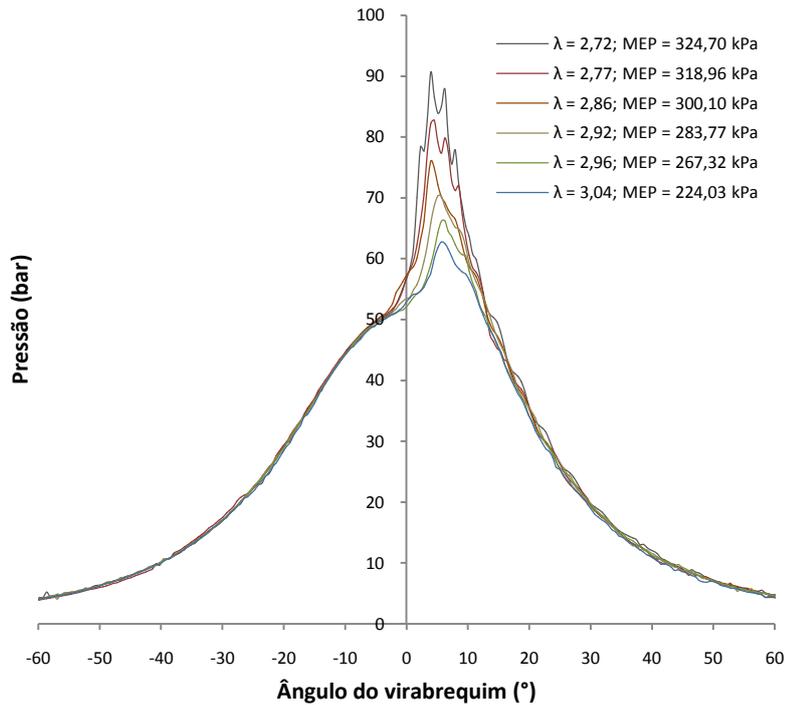


Figura 36. Pressão em função do ângulo da manivela, 1900 RPM e 75°C na mistura.

Na Figura 37 se apresenta a variação do rendimento térmico em função da razão de equivalência para a rotação de 1900 RPM e temperatura da mistura de 75°C. Para $\lambda > 2,96$ (valores até 0,338 em razão de equivalência), o rendimento térmico no modo HCCI é de 26%. Só para valores menores de lambda pode variar quase em 5% (chegando até 31%) e quando a razão de equivalência aumenta pode-se observar um incremento neste parâmetro até atingir seu máximo valor (34,15%) e ficar dentro da zona de detonação.

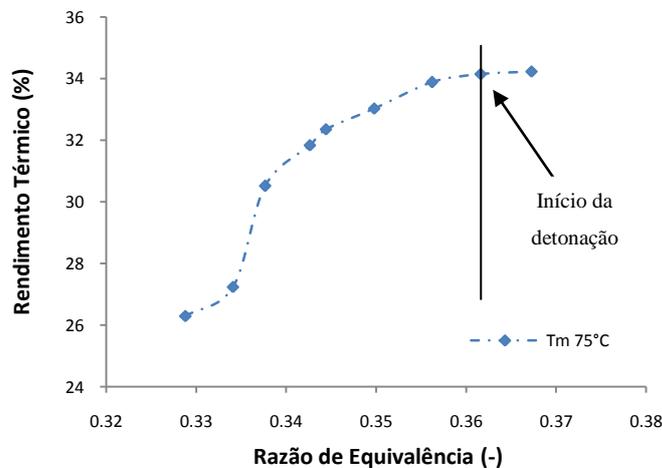


Figura 37. Rendimento térmico em função da razão de equivalência, 1900RPM, 75°C da mistura.

Na Figura 38 se apresenta a curva de pressão em função do lambda para as temperaturas da mistura de 83°C e rotação de 1900 RPM.

Sabemos que para cada temperatura da mistura foram estudados diferentes valores de lambda, então, podemos observar que para $\lambda > 3,58$ apresentam um comportamento instável no desenvolvimento da fase de combustão. Quando $\lambda = 3,13$; a combustão no interior da câmara apresenta um comportamento adequado com baixos COV, mas para valores $\lambda \leq 3,13$ aparece a detonação limitando a faixa de operação do motor. Uma característica importante mostrado neste gráfico é o início da fase de combustão. Para $\lambda = 3,58$ o início acontece alguns graus depois do ponto motor superior (PMS). Porém, quando aumentamos o combustível, o início da combustão acontece antes do PMS.

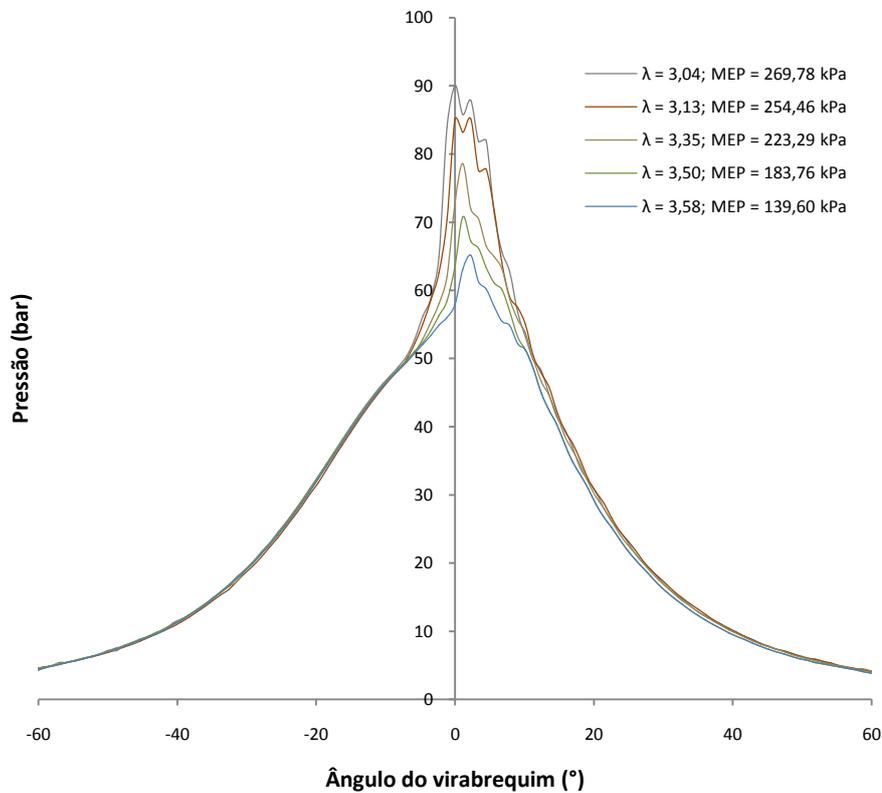


Figura 38. Pressão em função do ângulo da manivela, 1900 RPM, 83°C da mistura.

Na Figura 39 se apresenta a variação do rendimento térmico com a razão de equivalência. Para maiores valores da razão de equivalência, a eficiência é maior até atingir o ponto do início de detonação para $\lambda = 0,32$ e $\eta_t = 32\%$.

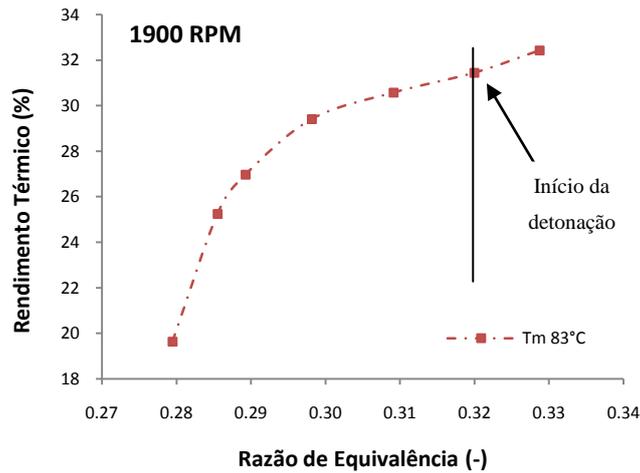


Figura 39. Rendimento térmico em função da razão de equivalência, 1900 RPM, 83°C na mistura.

Para finalizar esta seção, na Figura 40 se apresenta a curva de pressão em função da variação do fator lambda para a temperatura da mistura de 90°C e rotação de 1900 RPM. A característica principal desta gráfica é que para valores de lambda menores o início da fase de combustão acontece antes do PMS, podendo chegar aproximadamente até -8° graus antes do PMS.

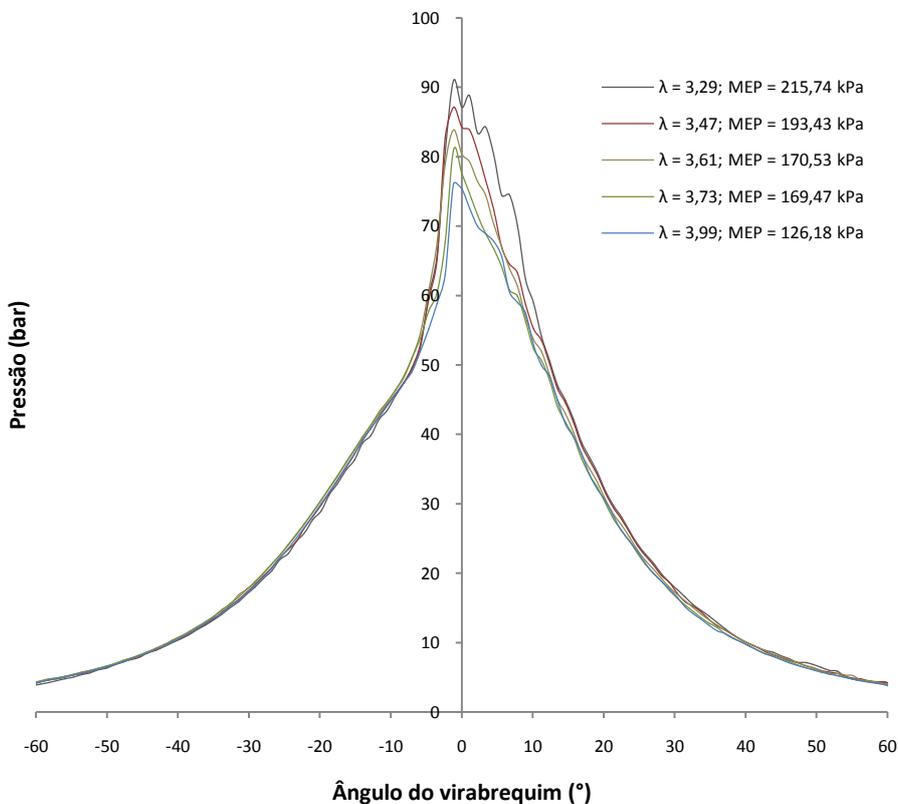


Figura 40. Pressão em função do ângulo da manivela, 1900 RPM, 90°C na mistura.

Na Figura 41, se observa a variação do rendimento térmico para cada valor de razão de equivalência e temperatura da mistura de 90°C. Pode-se ressaltar que para o $\lambda > 0,266$ acontece o maior rendimento do motor ($\eta = 28,27\%$), para maiores valores de da razão de equivalência, é atingida a zona de detonação.

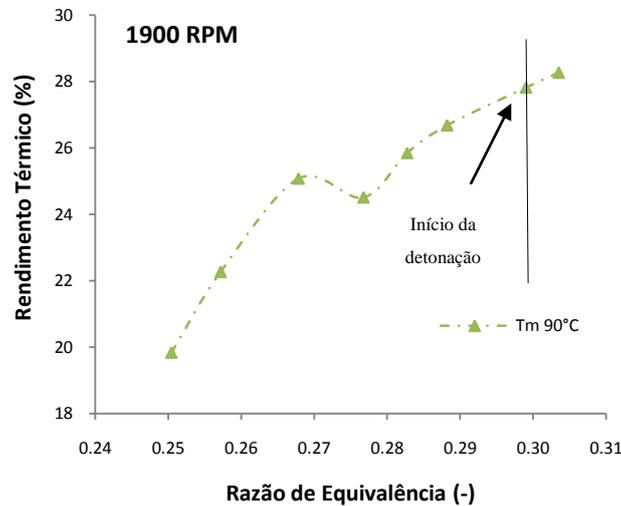


Figura 41. Rendimento térmico em função da razão de equivalência, 1900RPM, 90°C na mistura.

Finalmente pode ser concluído de esta seção três características importantes acerca da utilização do fator lambda como parâmetro de controle na combustão HCCI. Primeiro, que o fator lambda combinado com a temperatura da mistura permitem o início da auto-ignição e em consequência a combustão. Segundo, o fator lambda tem uma forte influência no avanço da auto-ignição. Terceiro, o fator lambda pode ser definido como o parâmetro de fornecimento de energia já que de ele vai depender o trabalho útil que pode ser gerado para cada faixa de operação dependendo só dos limites de operação para cada ensaio.

5.3.2. Temperatura da mistura

Parâmetro conhecido normalmente como a temperatura do ar de admissão, mas como ar que entra na linha se mistura com o combustível injetado, ele vai sofrer uma variação em seu valor final quando a rotação ou a quantidade de combustível é variada. Por conseguinte para fins de este trabalho foi determinado

utilizar o nome de temperatura da mistura, sendo aquela temperatura que é medida na entrada da válvula de admissão.

A temperatura da mistura é considerada como um dos fatores mais importantes que afetam a combustão HCCI. Isso ocorre porque este tipo de combustão é dominado pelas reações químicas de auto-ignição, portanto o sistema de reação deve ter uma adequada temperatura. Uma temperatura da mistura muito baixa não conduzirá a auto-ignição, por outro lado uma temperatura muito alta pode resultar em uma combustão detonante. A temperatura do gás no cilindro deve ser suficientemente alta para iniciar e manter as reações químicas levando ao processo de auto-ignição (Zhao et al, 2001).

Outra característica importante de aumentar a temperatura da mistura é que vai permitir uma rápida liberação de calor, permitindo diminuir as perdas de calor pelo contato que existe entre a mistura com as paredes do cilindro levando a melhores condições térmicas dentro da câmara para os próximos ciclos.

Inicialmente a temperatura da mistura foi de 40°C variando cada 10°C como o objetivo de encontrar a temperatura mínima requeria. A pesar de ter variado a quantidade de combustível, para 40°C até 70°C não foi atingido o modo HCCI. Para a temperatura da mistura de 72°C, foi que o motor começou a trabalhar na combustão HCCI. Portanto, pode ser indicada a importância da temperatura da mistura para poder alcançar as condições térmicas necessárias que permitam iniciar a combustão HCCI.

Na Figura 42 é apresentada a pressão media efetiva em função das temperaturas das misturas. A pressão média efetiva (MEP) é uma variável muito utilizada para comparação de rendimentos entre motores já que mede a eficácia com que um motor tira proveito do seu tamanho (cilindrada). No caso do torque, por exemplo, não se presta muito para comparar motores porque este valor vai depender das dimensões do motor. Por outro lado a potência, também não é um bom elemento para permitir uma comparação de motores, pois depende do porte do mesmo e de sua rotação.

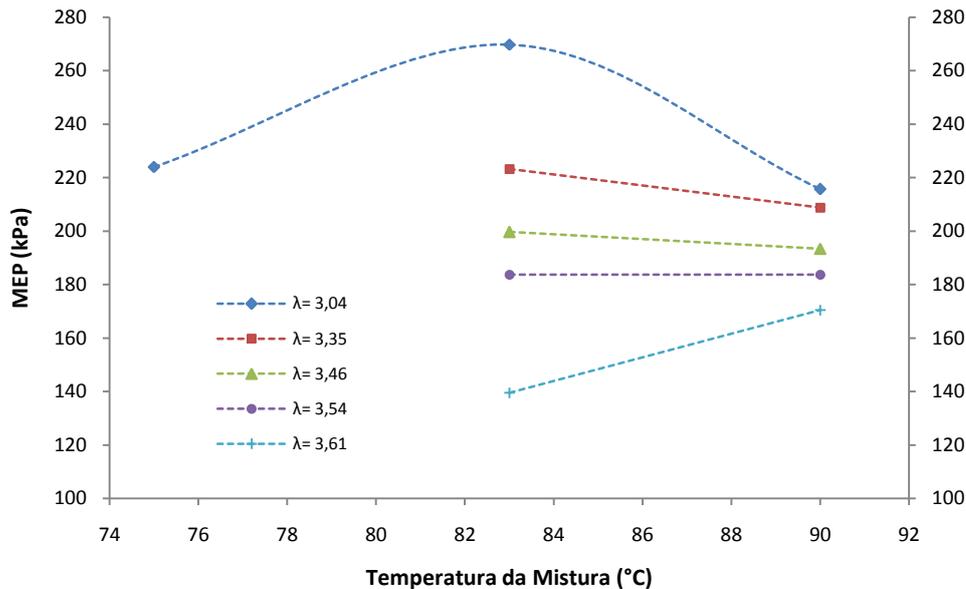


Figura 42. Pressão média efetiva em função da temperatura da mistura e do fator lambda

A partir dos resultados apresentados na Figura 42, pode-se observar que os valores de MEP se encontram no intervalo de 130 kPa até 270 kPa. Os valores de MEP variam em função do lambda e da temperatura da mistura, por exemplo, para $\lambda = 3,04$; foram testada três temperaturas da mistura e o maior valor de MEP (270 kPa) foi conseguido com a temperatura de 83°C. Este resultado indicaria que existe uma melhor liberação de calor para este valor de lambda quando a temperatura da mistura estivesse a 83°C. Cabe mencionar que, para temperaturas da mistura menores a 83°C e $\lambda > 3,04$, a combustão HCCI não foi atingida. Isto devido a que a mistura é excessivamente fraca em combustível.

Análise da curva de pressão

Nesta seção é realizada a análise da curva de pressão para a rotação de 1900 RPM em função da temperatura da mistura. Foi escolhido o valor de lambda mais próximo a 3,43 para cada temperatura. Cabe ressaltar que fixar um valor de lambda para cada ensaio é complicado pelo fato que diferentes temperaturas de misturas trabalham com diferentes faixas de valores de lambda e muitas vezes os intervalos de lambda utilizados podem ficar muito distintos entre eles.

Na Figura 43 pode-se observar a curva de pressão para diferentes temperaturas das misturas. Para a temperatura de 75°C, 83°C e 90°C pode-se

observar que a pressão máxima é de 60 bar, 80 bar e 90 bar, respectivamente, no último caso se apresentou detonação. Para valores de temperaturas da mistura maiores, o início da combustão é antecipada, já para a temperatura de 73°C, o início é depois do PMS e para temperaturas de 83°C e 90°C o início da combustão acontece antes do PMS. Cabe ressaltar que quando se incrementa a temperatura da mistura, se gera maiores níveis de pressão e por tanto, maiores valores de temperatura no interior do cilindro.

A temperatura da mistura é um fator importante que afeta o início da combustão (Xing-cai et al, 2006). A máxima temperatura do gás no cilindro e a pressão são incrementadas notavelmente com o aumento da temperatura da mistura. Para estes ensaios foi observado que quando a temperatura da mistura é superior a 90°C, a combustão é detonante e pode ser comprovada com o excessivo som, alta vibração no motor, instabilidade no registro dos dados de torque e altos perfis de pressão interna. Por outro lado, quando a temperatura é inferior a 75°C pode acontecer um problema de combustão incompleta e se ainda se trabalha com misturas extremadamente fracas em combustível a falha de ignição poderia se apresentar.

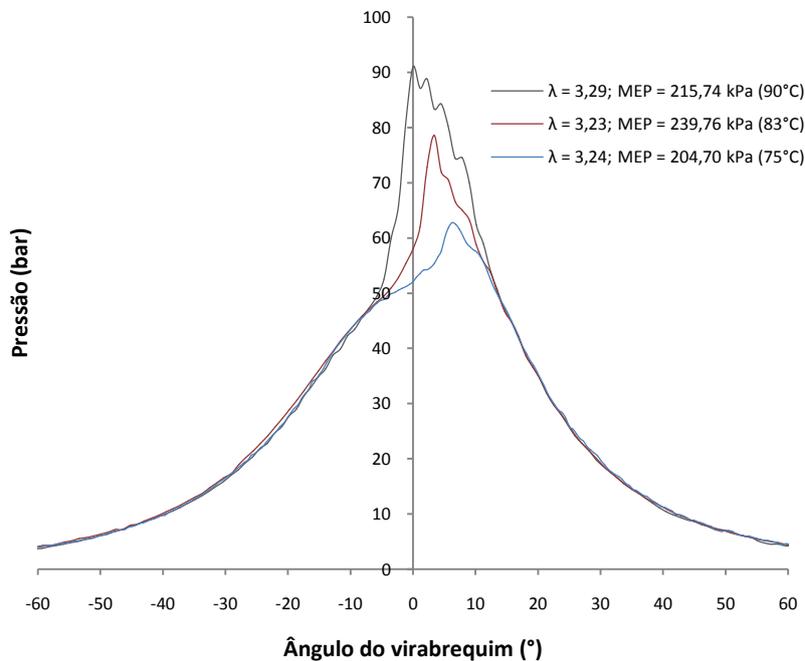


Figura 43. Pressão em função do ângulo da manivela, 1900 RPM.

Finalmente, pode ser concluído que, a temperatura da mistura atuando como parâmetro de controle tem uma forte influência no início da auto-ignição e portanto no processo de combustão. Respeito do avanço da ignição, quando o fator lambda diminui (maior quantidade de combustível injetada), a temperatura da mistura tem uma menor influência no avanço da combustão, provavelmente devido ao grande aquecimento de todo o sistema de admissão. Finalmente, os resultados apresentados concordam com a literatura estudada (Machrafi, 2008), indicando que, altas temperaturas de misturas resultam em um menor atraso de ignição devido que acelera a velocidade da reação cinética global.

Na Figura 44 se apresenta os valores máximos de pressão interna em função da razão de equivalência. Pode-se observar que, para cada temperatura da mistura, quando a razão de equivalência é incrementada, maiores valores de pressão são gerados no interior do cilindro, já que um incremento na razão de equivalência significa que mais combustível está sendo injetado para participar da combustão. Além disso, a velocidade de liberação de calor é incrementada, pelo fato de trabalhar com uma mistura homogênea que participa simultaneamente de forma completa na fase de combustão e altos níveis de pressão são gerados.

Também pode ser observado na Figura 44 os pontos máximos de pressão para cada temperatura da mistura. Para temperaturas maiores a apresenta uma derivada menor (da linha de tendência). Baixos valores da razão de equivalência significam menores quantidades de combustível e por tanto menor pressão será gerada. Finalmente pode ser observado que, para valores de temperatura da mistura menores, a pressão de início em modo HCCI é menor.

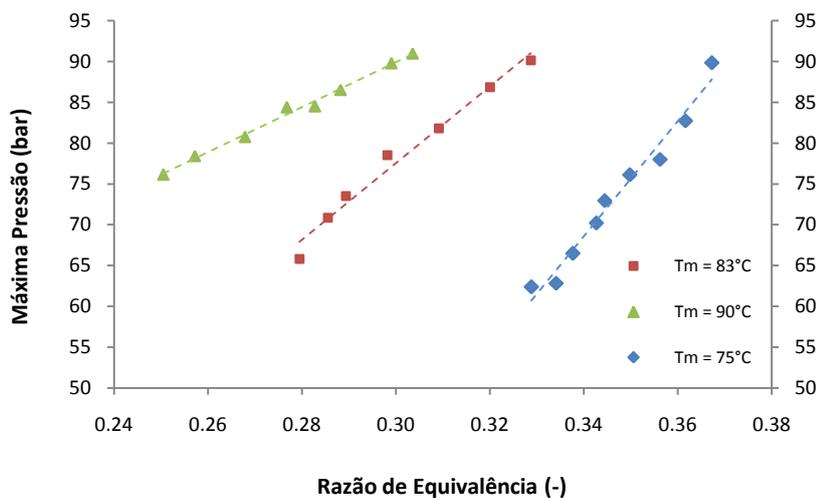


Figura 44. Máximos valores de pressão em função da razão de equivalência.

5.3.3. Efeito da rotação do motor

O processo de combustão HCCI também se vê influenciado pela faixa de rotação na qual o motor está funcionando, caso contrário o processo de combustão atingirá as zonas de falha de ignição ou detonação.

A Figura 45 apresenta a variação do COV da máxima pressão do gás em função da rotação. Para este trabalho, a variação de ciclo a ciclo foi definida tendo em consideração o trabalho de Xing-Caü (2005):

$$COV_{P_{max}(\%)} = \frac{P_{max_{max}} - P_{max_{min}}}{P_{med_{max}}} \times 100 \quad (5.1)$$

Onde,

$COV_{P_{max}}$ representa a máxima variação de ciclo a ciclo da pressão do gás de 30 ciclos;

$P_{max_{max}}$ é o máximo valor das pressões pico de 30 ciclos;

$P_{max_{min}}$ é o mínimo valor das pressões pico de 30 ciclos;

$P_{med_{max}}$ é a media dos picos das pressões entre 30 ciclos.

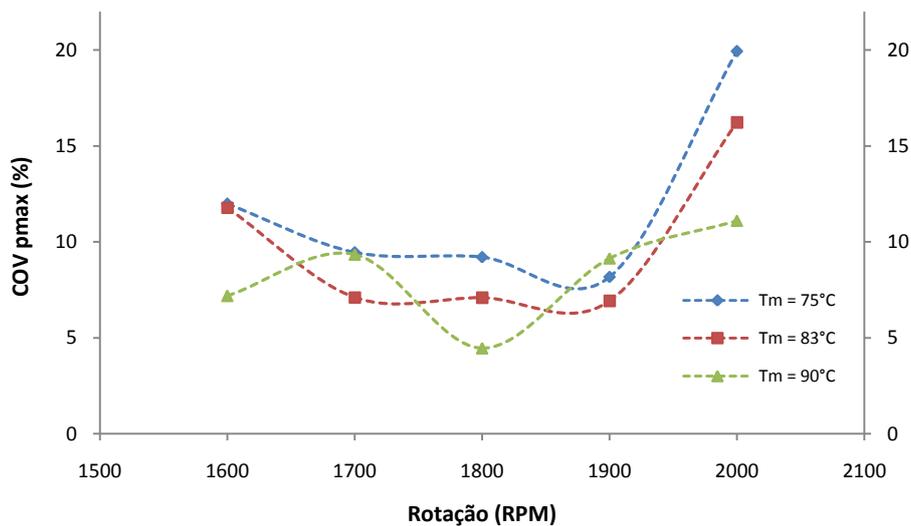


Figura 45. $COV_{p_{max}}$ em função da rotação.

Na mesma Figura 45 se pode observar que no intervalo de 1700 RPM até 1900 RPM se obtiveram os menores valores de COV, indicando estabilidade no funcionamento HCCI. Também pode ser observado que, para a temperatura de 75°C os valores de COV se mantiveram na faixa de 8,17% e 9,45 % para as rotações de 1700, 1800 e 1900 RPM ficando por encima dos valores obtidos nas outras temperaturas (exceção a 1900 RPM). Isto é devido a que, para a temperatura de 75°C se trabalha com maior quantidade de combustível (baixos valores de lambda), por tanto a liberação de calor é mais rápida comparada com as outras temperaturas da mistura.

Este comportamento se mantém ainda com a temperatura da mistura de 83°C, já que se obtiveram menores valores de COV (6,9% e 7,11%), para esta temperatura os valores de lambda são menores e por tanto a quantidade de combustível também será menor.

Pode-se observar na mesma Figura 45 que para 2000 RPM se apresentaram os maiores valores de COV, indicando a instabilidade de funcionamento. Valores superiores a 2000 RPM ou inferiores a 1600RPM, mesmo assim possam trabalhar em modo HCCI apresentam uma alta variabilidade no desenvolvimento das curvas de pressão afetando o rendimento do motor.

A extensão da faixa de operação (intervalo de rotação) é tão importante quanto o processo de auto-ignição. O problema de trabalhar a baixa rotação (rotações menores a 1200 RPM) é que os picos de temperaturas de gás são muito baixos para completar a oxidação do combustível e mais ainda com misturas fracas em combustível, então, a eficiência se deteriora vertiginosamente. Por tanto a operação a baixas rotações incluindo a partida em frio são limitados, porque existe insuficiente energia térmica para iniciar a auto-ignição da mistura no final da fase de compressão. Também uma combustão incompleta ou falha de ignição acontece a baixas rotações, isto pode ser explicado pelo fato que maiores perdas de calor para as paredes de cilindro ocorrem a baixas rotações, devido ao aumento do tempo disponível para a transferência de calor da carga no cilindro para as paredes do cilindro. Esta grande perda de calor, portanto conduziria a uma redução da temperatura do gás no final da fase de compressão (Zhao et al, 2001).

Em contraste, trabalhar a altas rotações (superiores a 2000 RPM) resulta num incremento na turbulência e na velocidade da combustão, e um incremento da velocidade faz que o tempo disponível para as reações seja reduzido com o

incremento da rotação do motor (Baumgarten, 2006). Segundo Yao (2009) e Zhao (2001) a altas rotações, a taxa de aumento de pressão pode se tornar tão grande que o ruído do motor aumenta significativamente e altas temperaturas de compressão são obtidas a uma velocidade maior até atingir a zona de detonação com a uma reduzida potência e eficiência.

Na Figura 46 é apresentada a variação COV para a rotação de 1900 RPM e temperatura da mistura de 75°C em função da variação da razão equivalência.

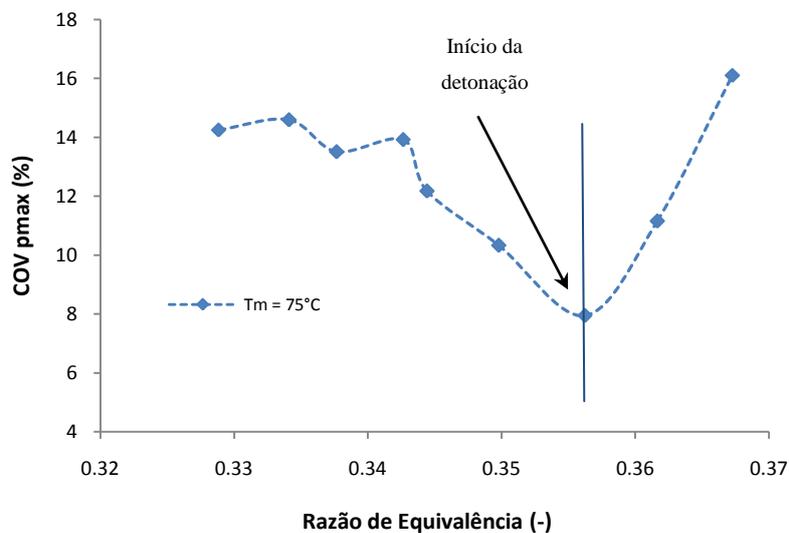


Figura 46. COV_{pmax} em função da razão de equivalência, 75°C da mistura de.

Pode-se concluir que a variação ciclo a ciclo é significativamente alta quando se trabalha com misturas fracas em combustível (baixos valores de razão de equivalência). Com o incremento da razão de equivalência, a variação de ciclo a ciclo da combustão HCCI diminui gradualmente até o ponto onde a quantidade de combustível e as condições de contorno fazem com que a estabilidade da combustão seja afetada e se apresente detonação. Mesmo assim, com a presença da detonação se observou valores altos de rendimento, internamente a estabilidade da combustão não é a adequada e sem um controle da detonação o motor poderia ser danificado severamente. Por outro lado, quando se trabalha com baixos valores de razão de equivalência, a variação de ciclo a ciclo (COV) são elevados já que misturas fracas levam a uma combustão incompleta durante alguns ciclos, o que poderia aumentar dramaticamente o consumo de combustível e as emissões de HC

e CO pela baixa temperatura de oxidação no interior da câmara (Xing-Caü et al, 2005).

Na Figura 47 se pode observar o teste para a rotação de 1900 RPM com temperatura da mistura de 90°C. Quando a razão de equivalência é incrementada a variação de ciclo a ciclo tende-se a elevar. Por tanto, o ambiente térmico desenvolvido se encontra nas condições ótimas para iniciar a combustão HCCI (quando na verdade se precisa uma temperatura mínima entre 72°C), é por isso que misturas fracas em combustível não apresenta muito problema para o início da fase de combustão. Por outro lado este comportamento não se mantém quando se utiliza misturas excessivamente fracas em combustível onde o problema de falha de ignição se apresenta fazendo que a variações de ciclo a ciclo se eleve notavelmente.

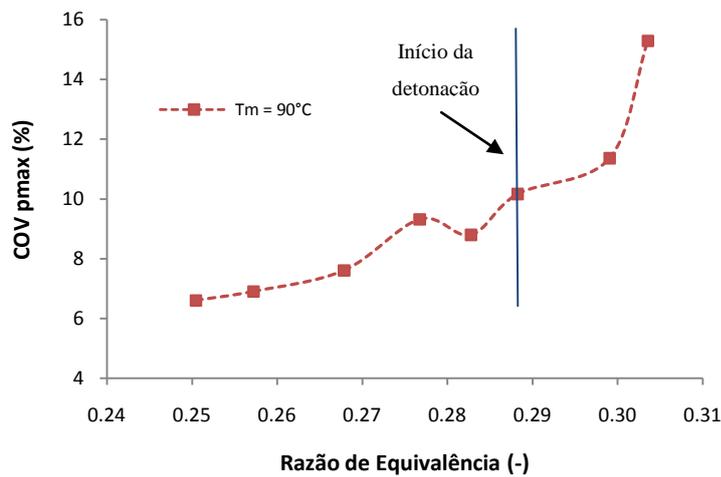


Figura 47. COV_{pmax} em função da razão de equivalência, 90°C na mistura.