

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA PRÉ-CÂMARA DE COMBUSTÃO PARA ADAPTAÇÃO EM UM SISTEMA DE IGNIÇÃO POR LANÇA-CHAMAS DE UM MOTOR DO CICLO OTTO

Denis Clei Cândido de Sá

Universidade Federal de Minas Gerais - Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Antônio Carlos 6627 - Belo Horizonte, MG - 31270-901
dsa@acominas.com.br

Ramón Molina Valle

Universidade Federal de Minas Gerais - Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Antônio Carlos 6627 - Belo Horizonte, MG - 31270-901
ramon@demec.ufmg.br

Resumo. A ignição por lança chamas consiste na inflamação da mistura por meio de jatos de gases em chama, que constituem linhas de ignição. Motores com estas características possuem uma cavidade ou pré-câmara de combustão, fisicamente separada da câmara principal. Nestes sistemas ocorre uma maior geração de turbulência, decorrente da movimentação dos gases no interior da pré-câmara e nos orifícios de interligação. A estratificação da carga, por meio de um sistema auxiliar de alimentação para a pré-câmara também contribui para a inflamação rápida e segura de misturas pobres e dos mais variados combustíveis, inclusive os de difícil ignição direta por centelha. Este trabalho apresenta a elaboração da concepção, projeto e construção de uma pré-câmara de combustão a partir de uma análise dos principais parâmetros que influenciam o processo de combustão. Parâmetros construtivos tais como o volume da pré-câmara, a configuração dos orifícios de interligação com a câmara principal e a geometria da pré-câmara, dentre outros, influenciam significativamente a eficiência da combustão e conseqüentemente o rendimento do motor e os índices de emissões de poluentes. A redução dos índices de emissões nocivas, a redução do consumo específico de combustível e o aumento do rendimento global do motor são os principais benefícios obtidos com o sistema de ignição por lança-chamas.

Palavras chaves: auxiliary combustion chamber, torch ignition, prechamber ignition, stratified charge.

1. Introdução

Os motores de combustão interna estão em desenvolvimento desde quando foram inventados, a pouco mais de um século. Nos dias atuais, as atividades de pesquisa e desenvolvimento dos motores a combustão estão relacionadas com a necessidade e conveniência da economia dos combustíveis convencionais, no desenvolvimento de novos combustíveis e na redução os níveis máximos de emissões tóxicas. Os modernos projetos associam a disponibilidade de recursos tecnológicos avançados, como a eletrônica, injeção direta de combustível e novos materiais. A ignição por lança-chamas, associada aos avanços tecnológicos citados, pode constituir uma alternativa promissora para atender aos objetivos atuais de redução do consumo de combustível e emissões de poluentes, sem redução do rendimento global do motor.

A ignição por lança-chamas consiste no acendimento inicial de uma pequena quantidade de combustível facilmente inflamável por vela, no interior de uma pré-câmara de combustão. Desta pré-câmara partem, através de orifícios dimensionados, jatos de gases em combustão, para dentro da câmara principal. Cada jato representa uma fonte de altíssima energia capaz de originar a ignição da mistura pobre contida na câmara principal. Existem sistemas de ignição por lança-chamas onde a alimentação de combustível ou mistura ar/combustível no interior da pré-câmara é feita através de um sistema auxiliar de alimentação. Geralmente este sistema auxiliar de alimentação da pré-câmara apresenta uma válvula de admissão ou um sistema de injeção direta de combustível.

Segundo Turkish (1975), Harry R. Ricardo, em 1918, foi o primeiro a desenvolver e patentear o primeiro motor dotado deste sistema de ignição, tornando-se uma referência para trabalhos realizados posteriormente por outros pesquisadores, sendo extensivamente desenvolvidos na extinta União Soviética e Japão.

A partir das idealizações de Gussak (1975) e outros precursores, a Honda desenvolveu o CVCC, Compound Vortex Controlled Combustion. O desenvolvimento do sistema CVCC teve origem por volta de 1965, com objetivo de obter um motor mais eficiente e com baixa emissão de poluentes. O sistema CVCC, que está apresentado na Fig. (1a), é considerado o mais significativo desenvolvimento realizado em motores do ciclo Otto com este sistema de ignição (Date et al, 1974).

A Fig. (1b) apresenta um exemplo do mais simples sistema de ignição por lança-chamas. Este conceito não apresenta um sistema de alimentação auxiliar para a pré-câmara de combustão. A função da pré-câmara é aumentar o processo inicial de desenvolvimento da chama imediatamente após a descarga elétrica no interior da câmara auxiliar,

formando em seu interior uma região mais turbulenta que a câmara principal. Neste caso não existe estratificação da carga. Os jatos (ou jato) que emergem da pré-câmara apresentam uma grande área superficial que favorece o início do processo de combustão da carga contida no interior da câmara principal. A Toyota, em 1976, denominou o sistema por ela desenvolvido como cavidade com geração de turbulência (Heywood, 1988).

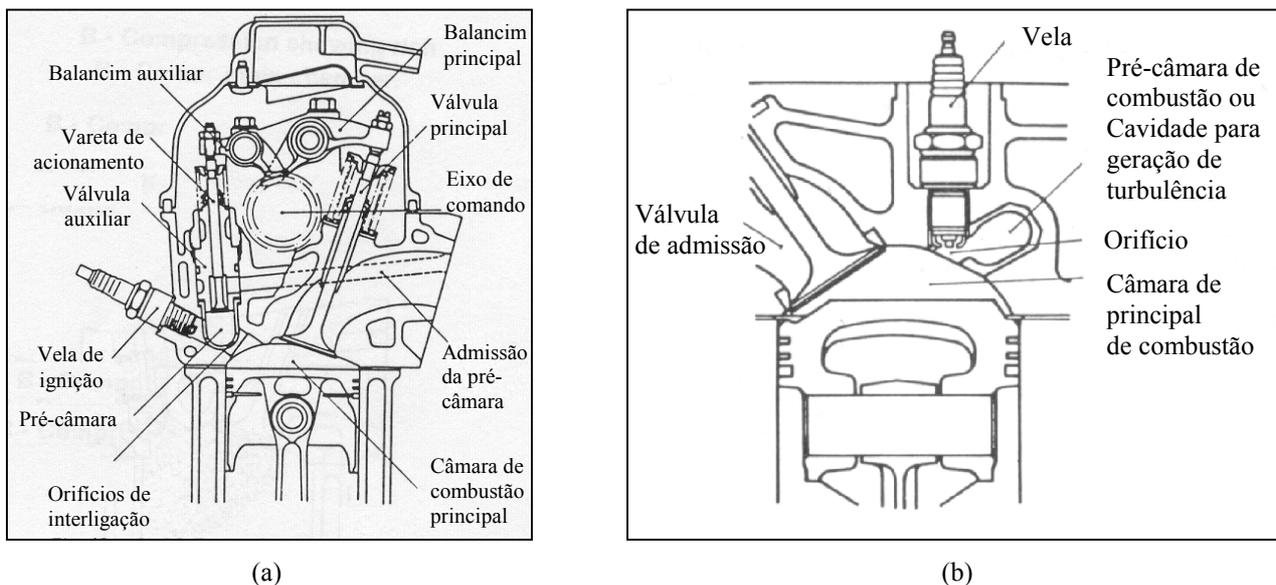


Figura 1. (a) Sistema CVCC. (b) Cavidade para geração de turbulência desenvolvida pela Toyota.

2. Particularidades do sistema de ignição por lança-chamas

Segundo Gussak (1975), para uma mistura convencional composta por gasolina e ar atmosférico, com relação ar/combustível (r_{ac}) entre 12~18:1, uma energia de aproximadamente 10 milijoules é suficiente para iniciar a combustão. Porém, em caso de misturas extremamente pobres, (r_{ac} acima de 20:1), esta energia precisa ser superior. A ignição por lança-chamas pode promover uma energia 20 vezes superior, produzindo combustão estável em misturas com r_{ac} superior a 35:1. Uma mistura extremamente pobre no interior de uma câmara de combustão pode sofrer ignição por jatos com temperatura baixas (1000°C). Tais jatos contendo produtos instáveis e quimicamente ativos, ricos em radicais livres atuam de maneira mais satisfatória que uma chama com temperatura superior originária de uma ignição puntiforme e composta de produtos inertes de combustão. Segundo o autor, a geração de turbulência e o surgimento de peróxidos, aldeídos e outros radicais intermediários diversos como CH_3 , H_2O_2 , CH_2O , C_2H , a partir da chama de ignição, são os principais responsáveis pelo desencadeamento da combustão da mistura pobre no interior da câmara de combustão.

Devido a elevada turbulência presente na pré-câmara no momento da ignição, ocorre uma rápida combustão. A turbulência expõe, através do seu movimento caótico, porções de mistura ainda não queimada em contato direto com a fonte de ignição. Portanto, quanto maior for a intensidade de turbulência, maior será a frequência de exposição de mistura não queimada à fonte de ignição e diminuição das temperaturas médias no processo de combustão, devido a movimentação dos gases. A presença de gases remanescentes no interior da pré-câmara também contribui para esta redução da temperatura, de maneira análoga ao efeito causado pelos sistemas de recirculação de gases (Date et al, 1974). Assim, o sistema de ignição por lança-chamas promove as seguintes características ao processo de combustão no interior da câmara principal:

- Energia suficiente para a ignição de misturas pobres devido a presença de produtos instáveis e quimicamente ativos;
- Os jatos provindos da pré-câmara de combustão provocam movimentação dos gases e como resultado, o gradiente de temperatura no interior da câmara de combustão tende a diminuir;
- Redução do período necessário para a combustão, devido à geração de turbulência, estratificação e reatividade da chama, com aumento da estabilidade e redução das flutuações entre os ciclos;
- Maior eficiência da combustão, ou seja, melhor aproveitamento de combustível.

Assim, a ignição por lança-chamas, associada com a introdução de misturas pobres no interior da câmara de combustão promove as seguintes vantagens:

- Diminuição da emissão de NO_x , decorrente da diminuição do gradiente de temperatura no interior da câmara de combustão;
- Diminuição do índice de emissões de monóxido de carbono (CO), devido queima de misturas ricas em oxigênio, favorecendo a formação de CO_2 ;
- Diminuição do índice de emissões de hidrocarbonetos, devido a queima mais completa do combustível, decorrente de um processo de combustão estável e sem flutuações entre os ciclos;

- d. Menor tendência à detonação, permitindo o uso de combustíveis de menor octanagem e/ou maior razão de compressão;
- e. Utilização de diferentes combustíveis na câmara principal do motor tais como óleo combustível, querosene, gasolina e combustíveis de difícil ignição por centelha. Neste caso, uma mistura facilmente inflamável deve ser utilizada no interior da pré-câmara;
- f. As razões pobres de ar/combustível em carga parcial resultam em um baixo consumo de combustível e constituem uma aproximação à eficiência do ciclo ideal do ar.

A dificuldade de realizar a varredura dos gases remanescentes no interior da pré-câmara é uma das limitações do sistema de ignição por lança-chamas. O excesso de gases remanescentes pode prejudicar a homogeneidade da mistura e reduzir o rendimento do motor. Para minimizar este efeito é necessário que a pré-câmara de combustão seja devidamente projetada para o motor. A construção de sistemas auxiliares para varredura e alimentação da pré-câmara também é um fator dificultador. Em sistemas mecânicos de alimentação e exaustão da pré-câmara torna-se necessário a utilização de válvulas e eixos auxiliares. Este fator eleva o custo de fabricação e manutenção do motor. A utilização da injeção direta de combustível na pré-câmara, combinada com a varredura dos gases através do(s) orifício(s) de interligação, podem aumentar a viabilidade do sistema de ignição por lança-chamas (Wyczalek et al, 1975).

O ciclo de combustão de um motor dotado de pré-câmara de combustão com alimentação auxiliar, pode ser visto na Fig. (2) (Nakazono e Natsume, 1994).

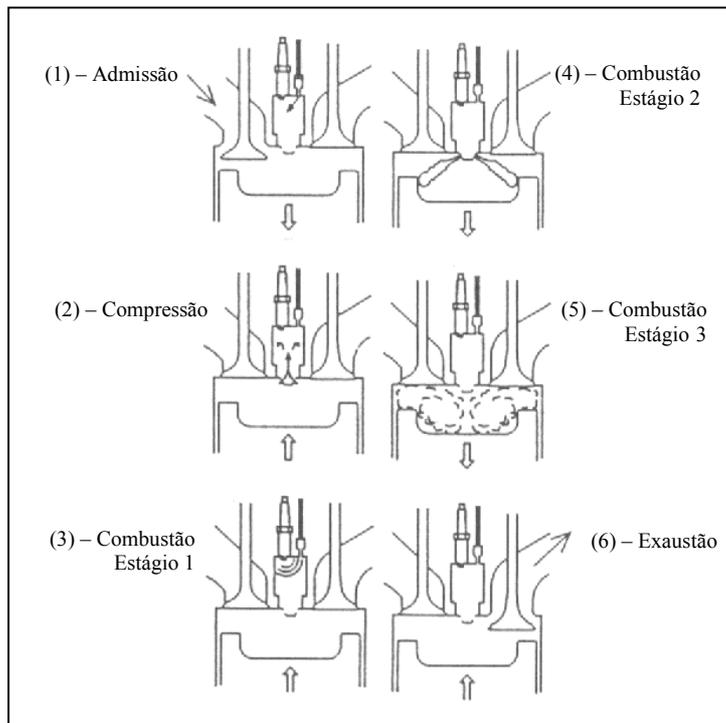


Figura 2. Ciclo de um motor dotado de pré-câmara de combustão e alimentação auxiliar.

O volume da pré-câmara, onde está inserida a vela de ignição é preenchido com uma mistura rica em combustível, através da válvula auxiliar instalada do lado da vela (1). Ao mesmo tempo, a mistura principal muito pobre (que contém ar além do requerido para queimar completamente o combustível) é introduzida na câmara principal do motor através da válvula de admissão, preparada de forma convencional por um sistema de carburação ou injeção eletrônica. Após o fechamento da válvula de admissão, as pressões no cilindro crescem e a mistura pobre é comprimida para dentro da pré-câmara tornando a mistura nas vizinhanças da vela de ignição facilmente inflamável e menos enriquecida (2). Após a ignição (3), com o aumento da pressão no interior da pré-câmara, os jatos em chama são lançados através de um ou mais orifícios para a câmara de combustão principal (4), inflamando a carga principal de mistura pobre existente (5). Pode-se perceber que no processo de exaustão (6), uma pequena parte dos produtos da combustão é empurrada pelo pistão para o interior da pré-câmara. Portanto, uma pequena fração de gases remanescentes do ciclo anterior está sempre presente no processo.

3. Influência dos parâmetros construtivos da pré-câmara de combustão

Sistemas com pré-câmaras com volume variando desde 90% até menos que 1% com relação a câmara principal foram desenvolvidos, sendo que a geração de turbulência, o volume e geometria da pré-câmara, a posição e a quantidade de orifícios, seus respectivos diâmetros e a localização da vela são os aspectos mais importantes. A seguir serão apresentadas as influências destes principais parâmetros no comportamento do sistema de ignição por lança-chamas.

3.1. Turbulência na propagação da chama

Segundo Adams (1978), a turbulência é caracterizada pela média quadrática das flutuações de velocidade, denominada de intensidade de turbulência (u), e pela média das dimensões das ondas formadas, denominada de escala de turbulência (ι). A razão entre estas duas grandezas, (ι/u), é denominada de tempo característico de turbulência, T_t . De maneira similar, a propagação de uma chama em uma mistura combustível é caracterizada pela velocidade de propagação da onda de combustão (v – cm/s) e pelo seu comprimento de onda (δ – cm). A razão destas grandezas, (δ/v) é o tempo característico da combustão T_c . O comprimento da onda de combustão e a sua velocidade de propagação estão relacionados através da Eq. (1), onde ρ representa a massa específica da mistura (g/cm^3), C_p o calor específico a pressão constante ($\text{cal/g.}^\circ\text{C}$) e λ a condutividade térmica média da mistura ($\text{cal/cm.}^\circ\text{C.s}$).

$$\delta = \frac{\lambda}{C_p \times \rho \times v} \quad (1)$$

Durante o processo de compressão, a mistura ar/combustível é empurrada através do(s) orifício(s) para o interior da pré-câmara, provocando turbulência em seu interior. Devido a elevada turbulência presente na pré-câmara no momento da ignição ocorre uma rápida combustão. A turbulência expõe, através do seu movimento caótico, porções de mistura ainda não queimada em contato direto com a fonte de ignição. Logo, quanto maior for a intensidade de turbulência maior será a frequência de exposição de mistura não queimada à fonte de ignição (Ohtsu et al, 1989). A velocidade instantânea da mistura através do(s) orifício(s), pode ser calculada através da Eq. (2) (Adams, 1978).

$$v_o = U_i \times \frac{A_p}{A_o} \times \frac{V_{pc}}{V_i} \quad (2)$$

Onde:

v_o : Velocidade de escoamento da mistura através do orifício;

U_i : Velocidade instantânea do pistão;

A_p : Área da seção transversal do pistão;

A_o : Área da seção transversal do orifício;

V_{pc} : Volume da pré-câmara;

V_i : Volume instantâneo do cilindro acima do pistão.

A energia cinética do fluido que entra para o interior da pré-câmara é convertida em turbulência, inclusive no momento da ignição, tanto no interior da pré-câmara, quanto na câmara principal. A combustão da mistura no interior da pré-câmara ocorre rapidamente, devido a elevada turbulência ocasionada pela movimentação da mistura. Verifica-se que taxas de geração de turbulência elevadas provocam maior velocidade de propagação da onda de combustão, em toda a faixa de relação ar/combustível.

3.2. O volume da pré-câmara

A relação entre o volume da pré-câmara e o volume total da câmara de combustão é geralmente utilizada como parâmetro comparativo ou parâmetro de referência. A Eq. (3) apresenta esta relação:

$$r_v = \frac{V_{pc}}{V_{pc} + V_{cp}} \quad (3)$$

Onde:

r_v : Relação entre o volume da pré-câmara e o volume total;

V_{pc} : Volume da pré-câmara;

V_{cp} : Volume da câmara principal.

Encontra-se na literatura relações entre volumes (r_v) variando em média entre 1,1% e 37%. Valores intermediários apresentam melhores resultados. Uma relação de 7,3 % para o sistema CVCC implicou em menores emissões de poluentes e baixo consumo específico de combustível (Date et al, 1974).

Nakasono e Natsume (1994) afirmam que quando o volume da pré-câmara é grande, a emissão de NOx tende a aumentar. Isso é explicado pelo fato da pressão e temperatura no interior da pré-câmara aumentarem excessivamente, decorrente do alto poder de chama provido da pré-câmara. A Fig. (3a) apresenta alguns resultados obtidos com diferentes dimensões da pré-câmara de combustão. A pressão máxima no interior do cilindro com $r_v = 3\%$ é maior, e a variação da pressão máxima é baixa. Ao longo do processo de combustão com a pré-câmara maior, a pressão tende a valores altos, aumentando as emissões de NOx.

Gussak (1975) concluiu em seus estudos que volumes intermediários são necessários, a fim de garantir estabilidade do processo de combustão, diminuição de emissões e do consumo de combustível. É desejável a construção de pequenas pré-câmaras, porém, suficientes para gerar a energia necessária para promover rapidamente a queima na câmara principal. Pré-câmaras com volumes menores liberam maiores quantidades de energia em intervalos mais curtos de tempo. Este comportamento pode ser verificado na Fig. (3b). No geral, com volumes pequenos os jatos de gases em combustão provenientes da pré-câmara não possuem energia suficiente para promover a queima da mistura na câmara principal e, por outro lado a utilização de um maior volume resulta em um maior consumo de combustível e maiores índices de emissões de NO_x.

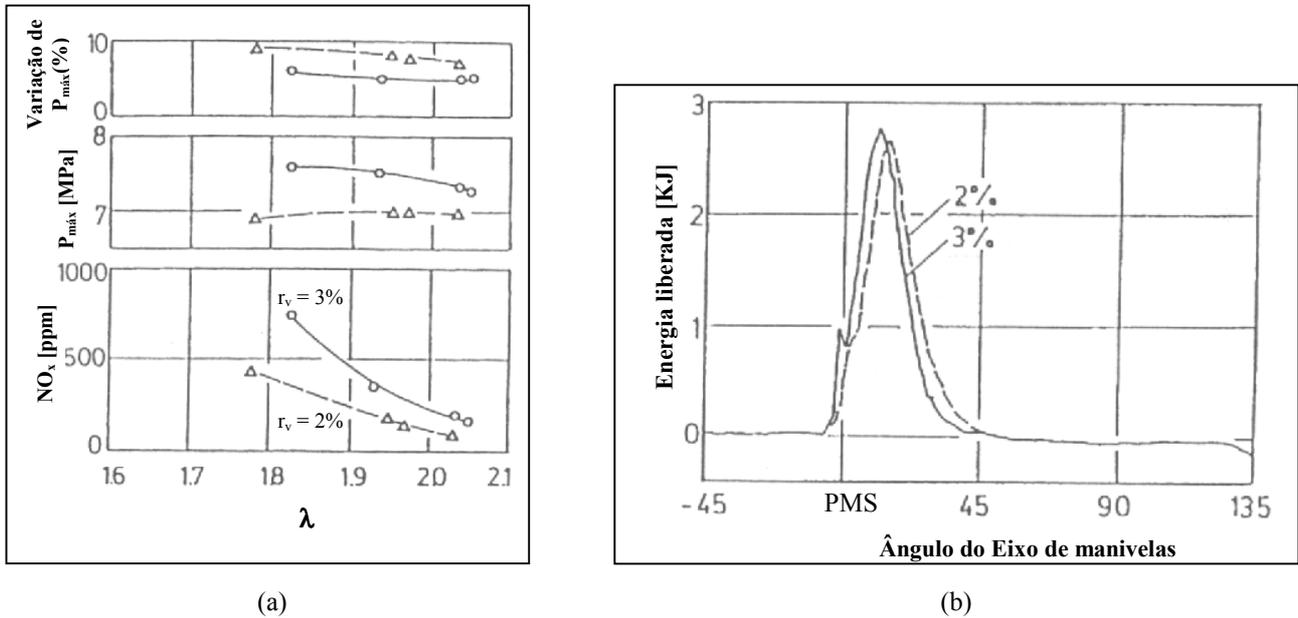


Figura 3. (a) Influência do volume da pré-câmara nas emissões de NO_x. (b) Duração do período de combustão e taxa de liberação de energia para pré-câmaras com diferentes volumes.

3.3. A geometria da pré-câmara

Pré-câmaras com formato esférico são amplamente difundidas e foram intensamente desenvolvidas e aperfeiçoadas, principalmente nos motores do ciclo Diesel (Heywood, 1988).

Segundo Turkish (1975), as pesquisas iniciais com ignição por lança-chamas utilizavam em grande escala formatos esféricos da pré-câmara de combustão, muitas vezes derivadas de adaptações dos motores Diesel. As pré-câmaras com formato esférico possuem a propriedade de concentrar mais intensamente a combustão em seu interior, o que diverge das características dos sistemas de ignição por lança-chamas.

Por este motivo, várias outras configurações da pré-câmara de combustão tem sido pesquisadas em sistemas de ignição por lança-chamas. Segundo a literatura, os formatos cilíndricos são os mais utilizados.

Wolff et al (1997) realizaram um experimento, comparando uma pré-câmara de formato cilíndrico com uma de formato cônico, conforme a Fig. (4a). Os resultados mostraram que na pré-câmara cilíndrica, a formação da mistura ocorreu de maneira mais homogênea, com menores áreas de heterogeneidade e suaves gradientes de densidade, ao passo que na pré-câmara cônica foram verificados maiores degraus de densidade da mistura formada. Na pré-câmara cilíndrica ocorreu a formação precoce de vórtices, capazes de homogeneizar melhor a mistura para um mesmo intervalo de tempo, em relação a pré-câmara cônica.

A utilização de pré-câmaras com geometria cônica tende a dificultar a formação da mistura, provocando flutuações entre os ciclos. Durante cada ciclo, o início da chama e a formação do jato é fortemente influenciado pela distribuição dos gradientes de densidade na mistura (Wang et al, 1981).

3.4. A posição da pré-câmara de combustão

Ryu et al (1987) estudaram o comportamento de um motor monocilíndrico de válvulas no bloco, com diferentes ângulos de inclinação da pré-câmara. A Fig. (4b) apresenta os diferentes ângulos utilizados. Segundo o autor, a configuração com ângulo de 180° apresenta dois inconvenientes:

- a. Maior afastamento da vela de ignição com relação a câmara principal de combustão;
- b. A posição horizontal gera menores quantidades de vórtices e conseqüentemente menor turbulência.

A posição vertical favorece a queima mais rápida da mistura. Isso ocorre pois maior turbulência é gerada devido a colisão da tocha proveniente da pré-câmara com a face do pistão, além de promover a combustão em todo o volume de maneira mais uniforme. Com ângulo de 90° da pré-câmara, a temperatura no interior da câmara de combustão é elevada,

devido ao choque da frente de chama com a face do pistão. Isto favorece o surgimento de picos de pressão e, conseqüentemente, de temperatura e elevada energia liberada em curtos períodos de tempo. Por isso, a alternativa de utilizar ângulos intermediários não pode ser desprezada, visto que tornam-se alternativas para a diminuição de emissões de NOx (Sakurauchi et al, 1987).

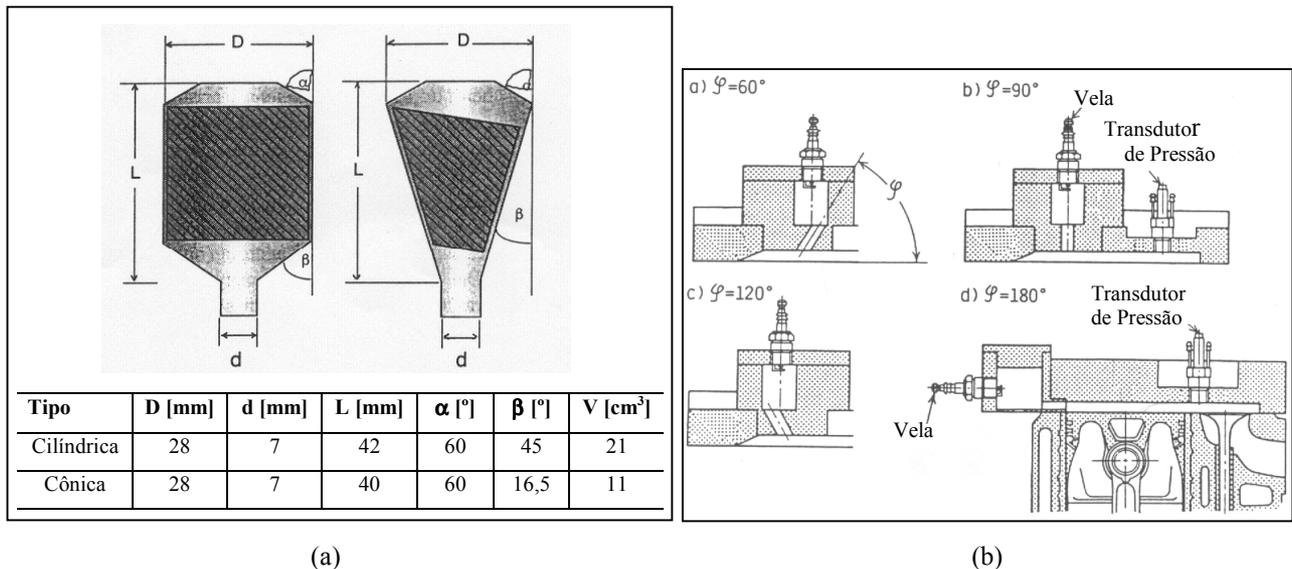


Figura 4. (a) Diferentes geometrias da pré-câmara de combustão. (b) Ângulos de colocação da pré-câmara de combustão.

3.5. A configuração dos orifícios

Um ou mais orifícios separam a pré-câmara da câmara principal e o seu diâmetro deve ser tal que permita a passagem da chama sem provocar a sua extinção. Segundo Adams (1978), em uma mistura em combustão a chama pode passar por uma abertura se o diâmetro desta abertura for maior que um diâmetro mínimo, que é chamado de diâmetro crítico (d_{oc}). O diâmetro crítico varia em função da pressão e da proporção combustível/oxidante. O diâmetro mínimo pode ser calculado através da Eq. (4):

$$d_o \geq \delta \times \frac{v_o}{2v} \tag{4}$$

Onde:

- d_o : Diâmetro do orifício;
- δ : Comprimento de onda da combustão;
- v_o : Velocidade de escoamento da mistura através do orifício;
- v : Velocidade de propagação da onda de combustão.

A intensidade de turbulência gerada pelo jato a partir do(s) orifício(s) pode ser ajustada experimentalmente através da variação do diâmetro. Um pequeno orifício produz altas velocidades e curtos períodos de combustão, mas nem sempre esta característica é desejada ao extremo.

O diâmetro dos orifícios possui grande influência no processo de combustão. Com orifícios menores é possível obter maiores pressões e maiores taxas de propagação da chama. Em sistemas onde existe alimentação auxiliar da pré-câmara, a mistura ligeiramente enriquecida do interior da pré-câmara não dilui intensamente, pois orifícios menores restringem a passagem da mistura pobre provinda da câmara principal. Assim, a mistura enriquecida no interior da pré-câmara possui maior poder de chama. A energia da tocha depende da diferença de pressão entre as câmaras, que pode ser aumentada através da diminuição dos orifícios ou do aumento do volume da pré-câmara (Kataoka e Hirako, 1982).

A relação entre a área da seção transversal do orifício e o volume da pré-câmara é utilizada como parâmetro comparativo:

$$r_o = \frac{A_o}{V_{pc}} \tag{5}$$

Onde:

- r_o : Relação entre a área da seção transversal do orifício e o volume da pré-câmara;

A_o : Área da seção transversal do orifício;
 V_{pc} : Volume da pré-câmara.

A quantidade de orifícios também influencia na eficiência do sistema de ignição por lança-chamas (Mavinahally et al, 1994). Um aumento do rendimento térmico do motor de testes pode ser obtido utilizando configurações com maior número de orifícios, principalmente trabalhando com misturas extremamente pobres, com relação ar/combustível em torno de 23:1. Na configuração A da Fig. (5a), foi utilizado um único orifício, ou passagem aberta, com $d_o = 6\text{mm}$. No entanto, nas configurações B e C foram utilizados orifícios intercalados de 2 e 3 milímetros de diâmetro. Na configuração B foram adotados 4 orifícios e na configuração C, 12 orifícios. Uma favorável ampliação da faixa de operação com misturas pobres foi obtida para as configurações B e C, que apresentam maior número de orifícios, evidenciando a ampliação da faixa de trabalho com misturas pobres proposta pelo sistema de ignição por lança-chamas.

Adams (1979) analisou a influência da direção da chama com relação às válvulas de admissão e exaustão da câmara principal. Na Fig. (5b) podem ser vistos os diferentes ângulos de direcionamento da chama, representados pelas linhas pontilhadas. Com a chama direcionada para a válvula de exaustão foram obtidos os menores índices de emissões de HC e NOx, além de menores pressões, enquanto que direcionada para o centro da câmara (posição 11:30), foram verificados os maiores índices de pressão no interior da câmara de combustão. Portanto, o direcionamento da chama com relação às válvulas de admissão e exaustão da câmara principal é um fator importante na redução de HC e NOx. No entanto, testes específicos devem ser realizados para cada tipo de motor.

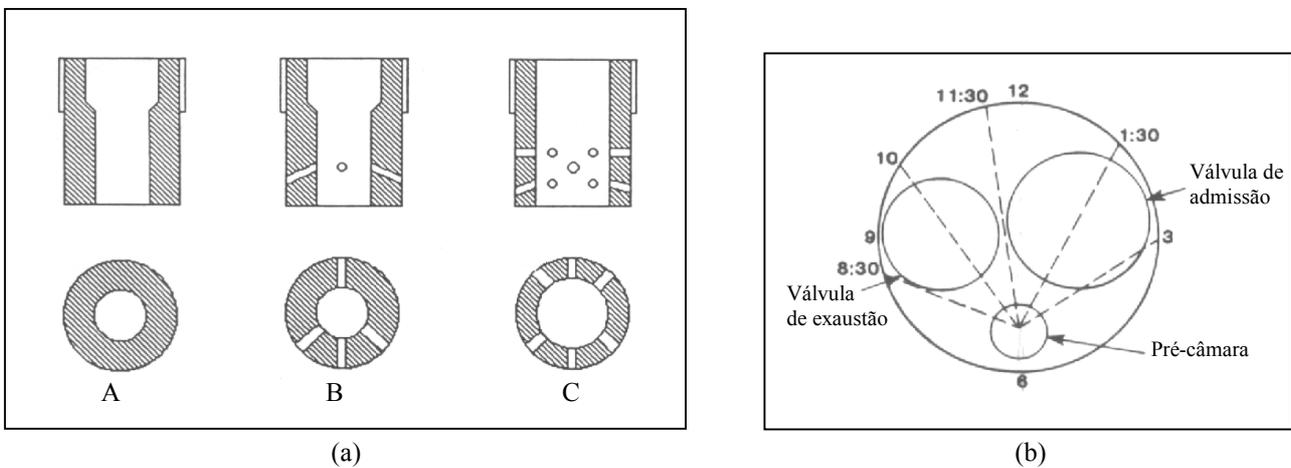


Figura 5. (a) Configurações dos orifícios de interligação entre a câmara principal e a pré-câmara. (b) Ângulos de direcionamento da chama no interior da câmara principal de combustão.

3.6. A posição da vela de ignição

A Fig. (6) apresenta as posições do eletrodo no interior da pré-câmara de combustão. Em posições afastadas dos orifícios de interligação com a câmara de combustão ocorrem maiores concentrações de gases remanescentes do ciclo anterior, que diluem a mistura fresca, ocasionando eventuais flutuações (Kataoka e Hirako, 1982). Um posicionamento inadequado, como no caso da posição A, pode fazer com que os resultados sejam inferiores aos obtidos com o sistema convencional de ignição (Mavinahally et al, 1994). Foram obtidas menores pressões e taxa de liberação de calor mais uniforme, ao adotar colocação da vela de ignição mais próxima do orifício de interligação entre as câmaras de combustão. Isso ocorre devido ao fato de haver uma propagação da chama tanto para o interior da câmara principal quanto para o interior da pré-câmara, diminuindo a intensidade do choque da frente de chama com a face do pistão, diferentemente do que ocorre em posicionamentos mais afastados.

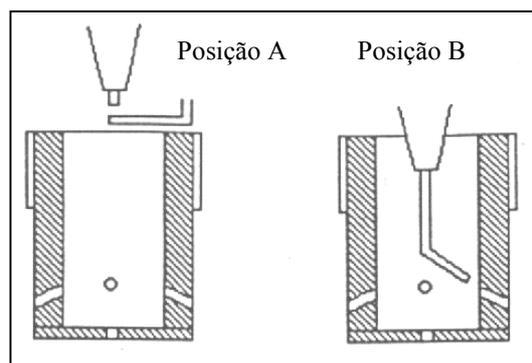


Figura 6. Posições dos eletrodos de ignição.

3.7. Considerações finais sobre o sistema de ignição por lança-chamas

Apesar das pesquisas intensificadas em sistemas de injeção eletrônica e injeção direta, muitos outros resultados satisfatórios também foram obtidos em pesquisas posteriores, nas décadas de 80 e 90, com sistemas de ignição por tocha, com objetivo de adaptá-los em motores movidos não somente a gasolina, mas também a gás natural. Com base na literatura pesquisada, foi feito um levantamento dos resultados globais obtidos com os sistemas de ignição por lança-chamas, que podem ser vistos na Tab. (1). Parâmetros como temperatura, pressão e taxa de liberação de calor também são medidos. Entretanto, tais parâmetros dificilmente são usados como referência, uma vez que estão intimamente relacionados com as características específicas de cada motor e diferentes metodologias de medição.

Tabela 1. Resultados globais obtidos com o sistema de ignição por lança-chamas.

Principais parâmetros mensurados	Resultados obtidos com ignição por lança-chamas
Emissões de hidrocarbonetos (HC)	Redução de 87 %
Emissões de óxidos de nitrogênio (NO _x)	Redução de 69 %
Emissões de monóxido de carbono (CO)	Redução de 75 %
Rendimento térmico	Aumento de 4 %
Consumo específico de combustível	Redução de 9 %
Relação ar combustível	Aumento de 53 % ($r_{ac} \cong 23$ - gasolina)

Programas computacionais também vêm sendo utilizados para a simulação da propagação da chama, em sistemas com pré-câmara de combustão. Cloutman (1993) utilizou um método numérico a partir das equações de Navier-Stokes para misturas fluidas, simulando a velocidade de propagação da chama em um motor com o sistema convencional de ignição e com o sistema de ignição por lança-chamas. Através de isotérmicas no interior do cilindro, foi verificado um tempo de 10,81 ms com ignição convencional, contra apenas 6,32 ms com ignição por lança-chamas ao término da combustão.

Brandstetter (1980) usou um modelo matemático para simular os efeitos de parâmetros como volume da pré-câmara de combustão, diâmetro dos orifícios, estratificação da carga e avanço da ignição. A partir das equações de governo dos gases, dos princípios termodinâmicos e parâmetros de similaridade envolvendo as dimensões e características do motor e da pré-câmara, foram obtidos resultados compatíveis com resultados experimentais.

O excesso de gases remanescentes na pré-câmara de combustão pode prejudicar a homogeneidade da mistura e reduzir o rendimento do motor devido a ocorrência de flutuações entre os ciclos. A pré-câmara de combustão deve promover uma suficiente varredura dos gases remanescentes, através de características geométricas apropriadas.

A construção de sistemas de alimentação auxiliar de combustível na pré-câmara era um fator dificultador, que inclusive inviabilizava economicamente a adaptação da ignição por tocha, visto que eram necessários carburadores, válvulas e eixos de comando auxiliares, elevando os custos de construção e de manutenção dos motores. Atualmente, com a injeção eletrônica direta, o sistema de alimentação auxiliar fica reduzido tão somente a um eletro-injetor comandado eletronicamente. Resultados satisfatórios podem ser obtidos através da injeção direta de combustível no interior da pré-câmara de combustão (Wyczalek et al, 1975).

4. Projeto da pré-câmara de combustão

O projeto da pré-câmara de combustão foi elaborado após o levantamento das principais características construtivas envolvidas em sistemas de ignição por lança-chamas (Sá, 2001). A influência dos parâmetros geométricos e as configurações usuais foram estudadas a fim de garantir melhores resultados com o sistema de ignição por lança-chamas. A partir desta metodologia, foram elaboradas duas configurações distintas da pré-câmara de combustão, conforme mostrado na Fig. (7) .

Ambas as configurações foram estabelecidas no intuito de realizar os ensaios em um motor monocilindrico de 319 cc, com taxa de compressão de 6,9:1. A configuração (a) foi elaborada para um sistema de ignição por lança-chamas sem alimentação auxiliar de combustível. A configuração (b) apresenta características apropriadas para ignição por lança-chamas com alimentação auxiliar de combustível no interior da pré-câmara de combustão, promovendo estratificação da carga.

A configuração (a) não apresenta o bico e o fixador, pois pequenos orifícios dificultam a passagem da mistura provinda da câmara principal de combustão. A configuração (b) possui um orifício no corpo superior da pré-câmara, ao qual é inserido o eletroinjetor de combustível. A seguir são apresentadas as características dos componentes da pré-câmara de combustão:

A arruela do corpo inferior corresponde a arruela utilizada nas velas de ignição, com o objetivo de garantir uma vedação entre a pré-câmara e o cabeçote do motor. O corpo inferior foi projetado para alojar o bico, além de fixar a pré-câmara no motor. Para isso foi usinada uma rosca externa, com as mesmas características da rosca da vela de ignição. O

bico da pré-câmara é uma peça vazada, e em uma das extremidades encontram-se os orifícios de conexão com a câmara principal, com diâmetro de 1,4 mm. Na outra extremidade encontra-se a abertura do canal que conduz o gás em combustão da pré-câmara até os orifícios. No projeto é prevista a utilização de diferentes bicos, com diferentes diâmetros de orifícios, a fim de observar o comportamento do motor e avaliar o sistema de ignição por lança-chamas para diferentes configurações de orifícios. A função do fixador é integrar o bico ao corpo inferior da pré-câmara. Trata-se de uma peça cilíndrica com um sextavado interno e uma rosca externa idêntica à rosca interna do corpo inferior. O corpo superior tem a função de alajar a vela de ignição. Seu interior constitui a maior parte do volume útil da pré-câmara. Sua junção ao corpo inferior é feita por intermédio de uma rosca internamente usinada.

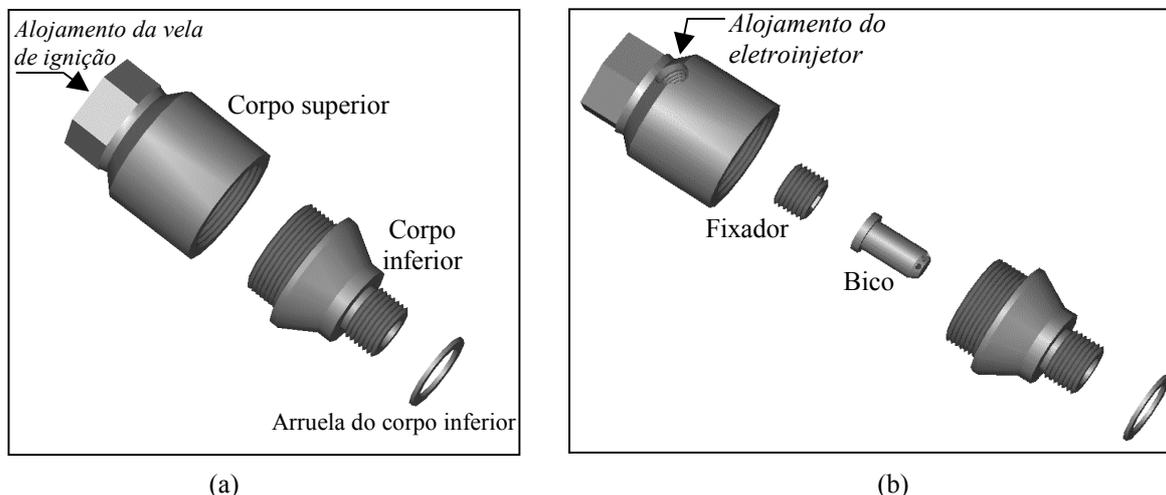


Figura 7. (a) Pré-câmara para geração de turbulência. (b) Pré-câmara com injeção direta de combustível.

As principais características da pré-câmara projetada são:

Geometria: Cilíndrica;

Volume (V_{pc}): $6,5 \text{ cm}^3$;

Material: Aço;

Canal do corpo inferior: $d_o = 7,6 \text{ mm}$;

Posição dos eletrodos com relação ao canal principal: $46,3 \text{ mm}$.

Área transversal do canal do corpo inferior (A_o): $0,453 \text{ cm}^2$;

$r_v = 10,7\%$ ($V_{sp} = 54,1 \text{ cm}^3$);

$r_o = 0,070 \text{ cm}^{-1}$;

Posição: Vertical;

5. Ensaios preliminares

Foram realizados ensaios comparativos entre o sistema de ignição convencional e o sistema de ignição por lança-chamas. Em ambos os casos, foi feita a alimentação eletrônica de combustível no interior da câmara principal de combustão. Estes ensaios foram realizados com o objetivo de analisar o comportamento da pré-câmara projetada, adotando a configuração (a). Portanto, a pré-câmara foi utilizada como uma cavidade para geração de turbulência, sem alimentação auxiliar de combustível em seu interior. A Fig. (8) apresenta um diagrama esquemático da instrumentação e controle utilizados para os ensaios em banco dinamométrico.

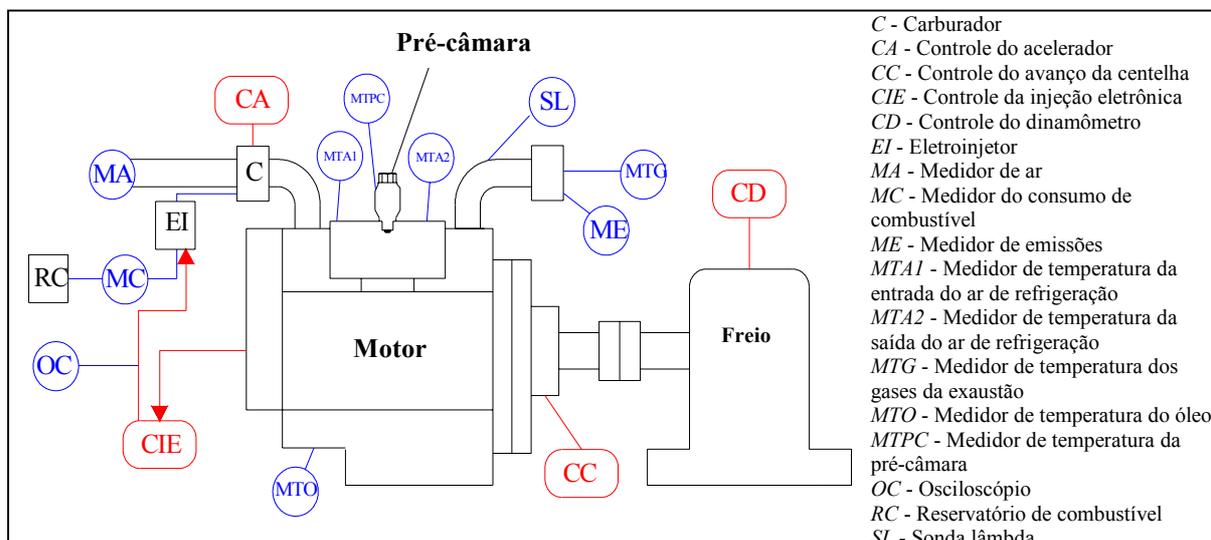


Figura 8. Diagrama esquemático de controle e medição da bancada de testes.

A Fig. (9a) apresenta uma fotografia da pré-câmara adaptada ao cabeçote do motor de testes. Foi realizado um rebaixamento do cabeçote a fim de garantir a taxa de compressão original do motor.

Foi verificado durante os ensaios um aquecimento excessivo das paredes da pré-câmara de combustão, com temperaturas superiores a 350°C. Para detectar o superaquecimento, medições de temperatura foram realizadas utilizando um termopar devidamente instalado na parede externa da pré-câmara de combustão durante os ensaios. O contato com as paredes superaquecidas eleva excessivamente a temperatura da mistura, que é composta por hidrocarbonetos, ocasionando o surgimento de pré-reações. Estas pré-reações elevam ainda mais a temperatura da mistura, resultando em alterações da estrutura molecular do combustível e provocando deshidrogenação, polimerização e quebra das cadeias de hidrocarbonetos. Alguns óxidos de carbono, água e outros produtos oxigenados são formados durante as pré-reações, reduzindo o poder calorífico da mistura. Conseqüentemente, reações incompletas de combustão são originadas após a ignição da mistura, elevando os índices de emissões de poluentes, originados por hidrocarbonetos não queimados e pela oxidação incompleta do combustível. A diminuição do poder calorífico da mistura reduz a potencia do motor como conseqüência das baixas temperaturas e pressões de combustão (Heywood, 1988).

Nos ensaios com a pré-câmara de combustão foi verificada uma redução de 10% da potência do motor e aumento significativo dos índices de emissões. Provalvemente, estes resultados estão associados ao superaquecimento da pré-câmara de combustão. Este fator impossibilitou uma análise conclusiva com relação ao sistema de ignição por lanças-chamas utilizado. Apesar deste fato, o motor apresentou estabilidade e comportamento satisfatório. O desenvolvimento de um sistema de refrigeração foi proposto, juntamente com o sistema de alimentação direta de combustível para a pré-câmara de combustão. Propõe-se a utilização de um sistema com camisa de refrigeração, conforme a Fig. (9b). Desta forma, espera-se resultados satisfatórios com o sistema de ignição por lanças-chamas, análogos ou superiores aos verificados na literatura.

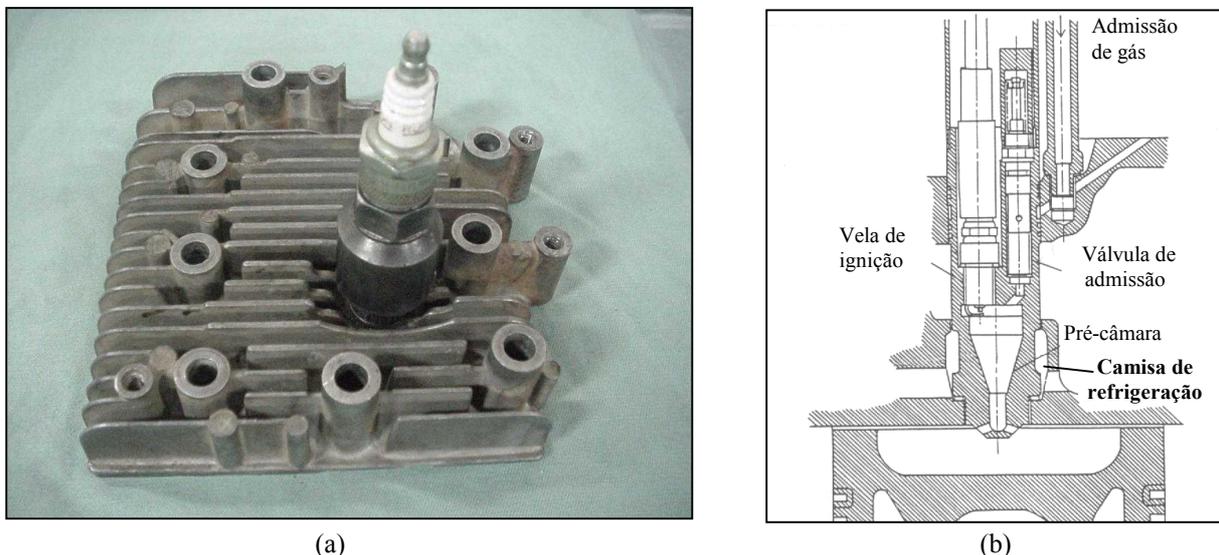


Figura 9. (a) Montagem da pré-câmara de combustão no cabeçote do motor de testes. (b) Sistema de refrigeração para a pré-câmara de combustão.

6. Conclusões

- a) O sistema de ignição por lanças-chamas é capaz de apresentar melhorias significativas no desempenho dos motores de combustão interna;
- b) Foi realizado um estudo detalhado das principais características construtivas de uma pré-câmara de combustão;
- c) Pode ser claramente notado que seguindo esta metodologia de projeto apresentada, pode-se construir um sistema de ignição por lanças-chamas eficiente e otimizado;
- d) Foi desenvolvida, através de uma compilação de literatura, a metodologia para o projeto de uma pré-câmara de combustão para sistemas de ignição por lanças-chamas, envolvendo todos os parâmetros necessários para a fabricação da mesma;
- e) Foi constatado que a pré-câmara de combustão, projetada e construída, apresenta características geométricas satisfatórias, compatíveis com as verificadas na literatura, necessitando apenas de um sistema de refrigeração eficiente;
- f) Existe uma perspectiva de resultados satisfatórios com o sistema de ignição por lanças-chamas, verificada em ensaios preliminares;
- g) A utilização de sistemas de alimentação direta de combustível na pré-câmara e na câmara de combustão associados, constituem uma alternativa atrativa de aprimoramento dos sistemas de ignição por lanças-chamas.

7. Agradecimentos

O desenvolvimento deste trabalho contou com o apoio da CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, através de uma bolsa de mestrado junto ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais.

8. Referências

- Adams, T.G., 1978, "Theory and evaluation of auxiliary combustion (torch) chambers", SAE Paper N° 780631, 19 p.
- Adams, T. G., 1979, "Torch Ignition for combustion control of lean mixtures", SAE Paper N° 790440, 8 p.
- Brandstetter, W.R., 1980, "Modeling of a stratified-charge engine with an unscavenged prechamber", Combustion modeling in reciprocating engines, General Motors research laboratories, Plenum Press, pp. 509-536.
- Cloutman, L.D., 1993, "A comparison between direct spark ignition and prechamber ignition in an internal combustion engine", Preprint Paper, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, USA, 16 p.
- Date, T., Yagi, S., Ishizuya, A. and Fujii, I., 1974, "Research and development of the Honda CVCC engine", SAE Paper N° 740605, 18 p.
- Gussak, L.A., 1975, "High chemical activity of incomplete combustion products and method of prechamber torch ignition for avalanche activation of combustion in internal combustion engines", SAE Paper N° 750890, 25 p.
- Heywood, J.B., 1988, "Internal combustion engine fundamentals", McGraw-Hill International, New York, 930 p.
- Kataoka, K. and Hirako, Y. Dez., 1982, "Combustion process in a divided chamber spark ignition Engine", Bulletin of the JSME, Vol. 25, N° 210, pp. 1946-1952.
- Mavinahally, N.S., Assanis, D.N., Mallan, K.R. and Gopalakrishnan, K.V., 1994, "Torch ignition: Ideal for lean burn premixed-charge engines", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 116, pp. 793-798.
- Nakazono, T., 1994, "Study of lean burn gas engine (effect of main chamber)", JSME International Journal, Vol. 37, series b, N° 3, pp. 677-682.
- Nakazono, T. and Natsume, Y., 1994, "Effect of dimensions of prechamber on lean burn gas engine", JSME International Journal, v. 37, Series b, N° 4, pp. 951-956.
- Ohtsu, A., Ryu H. and Asanuma, T., 1989, "Visualization of flame propagation in a spark ignition engine with an unscavenged prechamber", JSME International Journal, Series II, Vol. 32, N° 1, pp. 127-133.
- Ryu, H., Ohtsu, A. and Asanuma, T., 1987, "Effect of torch jet direction on combustion and performance of a prechamber spark-ignition engine", SAE Paper N° 870167, 12 p.
- Sá, D.C.C and Valle, R. M., 2001, "Análise de um sistema de ignição por lança-chamas adaptado a um motor do ciclo Otto", Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 164 p.
- Sakurauchi, Y., Ryu H., Iijima, T. and Asanuma, T., 1987, "Combustion gas temperature in a prechamber spark ignition engine measured by infrared pyrometer", SAE Paper N° 870457, 10 p.
- Turkish, M.C., 1975, "Prechamber and valve gear design for 3-valve stratified charge engines", SAE Paper N° 751004, 30 p.
- Wang, T.S., Zhang, Y.F., Zhao, H.F., Qi, Z.M. and Ren, A.F., 1981, "A study of ignition by flame torches", Eighteenth symposium (international) on combustion, The combustion institute, pp. 1729-1736.
- Wyczalek, F.A., Harned, J.L., Maksymiuk, S. and Blevins, J.R., 1975, "E.F.I. prechamber torch ignition of lean mixtures", SAE Paper N° 750351, 15 p.
- Wolff, D., Tamura, M., Tai, H. and Sakurai, T., 1997, "Looking into the prechamber of a lean-burn gas engine", JSME International Journal, Series b, Vol. 40, N° 2, pp. 320-327.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN COMBUSTION PRECHAMBER FOR A TORCH IGNITION SYSTEM FOR ADAPTATION AN OTTO CYCLE ENGINE

Denis Clei Cândido de Sá

Universidade Federal de Minas Gerais - Departamento de Engenharia Mecânica
 Av. Antônio Carlos 6627 - Belo Horizonte, MG - 31270-901
dsa@acominas.com.br

Ramón Molina Valle

Universidade Federal de Minas Gerais - Departamento de Engenharia Mecânica
 Av. Antônio Carlos 6627 - Belo Horizonte, MG - 31270-901
ramon@demec.ufmg.br

Abstract. *The torch ignition system consists in the inflammation of the air/fuel mixture by means of gases jet flame, that constitute ignition lines. Engines with this feature have a cavity or a combustion prechamber, physically separate from the main chamber. In such systems it may occur a massive turbulence generation, due the movement of the gases inside the prechamber and through the orifices of the interconnection. The charge stratification, by means of an auxiliary inlet fuel system, also contributes for the fast and safe inflammation of lean combustible mixtures, including the difficult direct spark ignition fuels. The present work reports the design elaboration of a combustion prechamber using an analysis of the influence of the main constructive parameters in the*

combustion process. The volume of the prechamber, the pattern of the orifices of interconnection with the main chamber and the geometry of the prechamber, together with other parameters, are important to the efficiency of the combustion and consequently the efficiency of the engine and the emissions of pollutants. The reduction of the pollutants emissions, the reduction of the brake specific fuel consumption and the increase of the global efficiency of the engine, are the main benefits obtained with the torch ignition.

Keywords. *auxiliary combustion chamber, torch ignition, prechamber ignition, stratified charge.*