

Efeitos da Defasagem de Abertura das Válvulas de Admissão na Eficiência Volumétrica de Motores - Um estudo Numérico

Luciana Bassi Marinho Pires

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais / PUC – MG

Departamento de Engenharia Mecânica

Av. Dom José Gaspar, 500 – Coração Eucarístico – Belo Horizonte – MG – BRASIL

CEP – 30535-610 – Fax: +55 (31) 3319 4910 – Tel: +55 (31) 3319 4583

lubmp@ig.com.br

Leonardo da Mata Guimarães

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais / PUC – MG

Departamento de Engenharia Mecânica

Av. Dom José Gaspar, 500 – Coração Eucarístico – Belo Horizonte – MG – BRASIL

CEP – 30535-610 – Fax: +55 (31) 3319 4910 – Tel: +55 (31) 3319 4583

engmecatronica@bol.com.br

Gabriel Godoy Pereira Russi

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais / PUC – MG

Departamento de Engenharia Mecânica

Av. Dom José Gaspar, 500 – Coração Eucarístico – Belo Horizonte – MG – BRASIL

CEP – 30535-610 – Fax: +55 (31) 3319 4910 – Tel: +55 (31) 3319 4583

gabriel.russi@russitelecom.com.br

Sérgio de Moraes Hanriot

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais / PUC – MG

Departamento de Engenharia Mecânica

Av. Dom José Gaspar, 500 – Coração Eucarístico – Belo Horizonte – MG – BRASIL

CEP – 30535-610 – Fax: +55 (31) 3319 4910 – Tel: +55 (31) 3319 4583

hanriot@pucminas.br

Resumo. O presente trabalho analisa a defasagem angular das válvulas de admissão em motores de combustão interna com duas válvulas de admissão por cilindro. O estudo visa defasjar a abertura de uma das válvulas de admissão em relação à outra, para vários regimes de rotação do eixo comando de válvulas. A defasagem produz alterações na quantidade de massa de ar admitida em relação à situação original. A metodologia numérica se baseia no Método das Características, um modelo analítico unidimensional. Esta técnica permite transformar as equações diferenciais parciais em equações diferenciais ordinárias. Assim, o desenvolvimento de tal metodologia analítica proporciona as informações necessárias sem a necessidade de montagens experimentais. Em suma, apresenta-se neste trabalho uma metodologia numérica validada para o estudo dos efeitos da defasagem na eficiência volumétrica em motores de combustão interna alternativo.

Palavras-chave: motores, escoamento transiente, Método das Características.

1. INTRODUÇÃO

Os motores de combustão interna multi-válvulas estão se tornando cada vez mais populares e difundidos como unidades de potência em carros de passageiros. Eles combinam alta densidade de potência com eficiência de combustível a um custo razoável. Os motores de quatro válvulas por cilindro tiveram o seu conceito inicial aplicado em carros de corrida de admissão natural, no início dos anos 60, até os motores atuais de 240 CV/ litro dos carros de fórmula 1. Muitas dessas inovações tecnológicas foram transferidas para a produção seriada, que possui configurações e potências específicas bem abaixo das citadas acima (no máximo na faixa de 110 CV/litro - Ferrari F50) (Hanriot, 2001).

Atualmente, o problema se dá ao fato de que os motores automotivos são raramente usados em plena carga ou utilizando toda sua potência. Sendo assim, eles devem ser projetados com elevada potência para controlar situações esporádicas, tais como ultrapassar outros veículos ou ao subir percursos íngremes. Esta "reserva de potência" representa custos em termos de investimento inicial, manutenção e consumo de combustível. Um motor com total flexibilidade de sintonização (injeção de combustível, válvula e tempo de ignição) poderia conseguir ótima potência para tal velocidade (Cunha *et al.*, 2000).

Poucos veículos disponíveis hoje no mercado usam algum tipo de acionamento mecânico que permite certa flexibilidade no tempo de abertura e fechamento das válvulas. Contudo, nenhum dos mecanismos produz o completo ajuste independente de sincronização de abertura e fechamento. Vários projetos têm sido propostos e apresentam diferentes tipos de acionamentos mecânicos (Dresner e Barkan, 1989; Hara *et al.*, 1989; Pierik e Burkhard, 2000). Seguidos pela mesma motivação, Urata *et al.* (1993) e Lenz *et al.* (1989) apresentaram sistemas de acionamento mecânico-hidráulico e Cunha *et al.* (2000) estudaram um conceito alternativo de acionamento hidráulico para válvulas.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo estudar a influência das oscilações de pressão em projetos de sistemas de admissão através da defasagem de abertura das válvulas de admissão nos motores de combustão interna, dezenas de válvulas, com quatro cilindros, visando assim um aumento da massa de ar admitida no cilindro e consequentemente um aumento do rendimento volumétrico dos motores. Os valores de vazão mássica e da pressão no escoamento transiente ocasionado pelo movimento das válvulas de admissão serão analisados em vários regimes de rotação do motor com o intuito de identificar os instantes em que a vazão mássica atinge valores máximos e mínimos no cilindro. Através da metodologia numérica para o estudo dos fenômenos de oscilação de pressão em condutos de admissão de motores de combustão interna, espera-se obter, a partir dos dados, uma melhor compreensão destes fenômenos que permita aos projetistas a otimização de tais dispositivos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O motor de combustão interna é uma máquina térmica em que o gás é admitido e descarregado através das válvulas que trabalham de modo alternativo. No interior do conduto, sobreposto ao movimento do gás, surgem também, os fenômenos oscilatórios (pulsantes). Como consequência, o movimento do gás é transiente, ou seja, sua velocidade e pressão variam no tempo. Isso é determinado pela diferença de pressão entre a entrada do conduto de admissão e o cilindro. Ocorrem, portanto, fenômenos de inércia (movimento do gás) e fenômenos de oscilação de pressão devido ao movimento das válvulas e do pistão (Hanriot *et al.*, 1999).

Morse *et al.* (1938) foram dos primeiros a mostrar a influência dos efeitos da produção de pulsos de pressão nos condutos de admissão ocasionados pelo movimento alternativo das válvulas de admissão. Evidenciaram que o aproveitamento de tais flutuações de pressão pode ser usado no aumento do rendimento volumétrico dos motores.

A eficiência dos motores de combustão interna depende largamente do aproveitamento dos fenômenos iniciais e transientes que ocorrem nos condutos de admissão e descarga. A otimização das condições de trabalho dos motores de combustão interna passa necessariamente por uma análise

profunda das diversas variáveis envolvidas no processo. Os sistemas de admissão e descarga possuem dimensionamento e configurações geométricas diferenciados de acordo com suas finalidades, onde pode ser privilegiado no projeto o consumo, a potência ou, por exemplo, o rendimento volumétrico e o torque a baixas rotações (Hanriot, 2001).

Depois que a tecnologia multi-válvulas se tornou difundida em projetos de motores, o sincronismo das válvulas se tornou a próxima etapa para a transformação do motor, aumentando a potência ou o torque. O sincronismo da admissão e da descarga do motor é controlado pela forma geométrica dos cames e pelo seu ângulo de fase. Para otimizar a admissão, o motor requer um sincronismo diferente das válvulas para as diferentes velocidades. Quando as revoluções aumentam, a duração do curso de admissão e descarga diminui, de modo que o ar fresco seja admitido de maneira suficiente para que ocorra a combustão e a descarga seja suficiente para sair do cilindro. Conseqüentemente, a melhor solução deveria ser a abertura adiantada das válvulas de admissão e o fechamento atrasado das válvulas de descarga. Ou seja, sobrepor entre o período de admissão e descarga um aumento, quando as revoluções do motor forem aumentadas.

Leone *et al.* (1996) identificaram quatro estratégias que podem ser aplicadas para a variação de fase:

- somente o eixo comando de válvulas de admissão;
- somente o eixo comando de válvulas de descarga;
- eixo comando de válvulas de admissão e descarga defasados igualmente e;
- eixo comando de válvulas de admissão e descarga defasados independentemente.

Estes projetos visam reduzir o tempo de fase das válvulas visando conseguir uma alta eficiência volumétrica para condições de plena carga e velocidades dos motores sem causar, ao mesmo tempo, a deteriorização em operações de baixas cargas e velocidade.

Em alguns projetos, o levante da válvula também pode ser variado de acordo com a velocidade do motor. Para otimizar o processo em altas velocidades, uma maior elevação é necessária para um aumento da admissão e descarga. Naturalmente, para velocidades mais baixas o levante provocará efeitos contrários deteriorando o processo, sendo necessário um levante menor para baixas velocidades, tornando assim o levante variável de acordo com a velocidade do motor. Um exemplo de mecanismo com sistema de levante de válvula variável pode ser visto em Kreuter *et al.* (1999).

Outra maneira de se variar as válvulas é em relação ao tempo. Devido à dificuldade de gerar um mecanismo com válvulas variáveis no tempo (VVT) com custos aceitáveis, durabilidade e confiabilidade, poucos motores automotivos com produção seriada vêm sendo equipados até hoje com tal variação. Pesquisas relacionadas à variação do tempo das válvulas podem ser vistas em Cunha *et al.* (2000) e Hosoya *et al.* (2000), que se dedicaram a mecanismos de acionamento hidráulico, Pischinger *et al.* (2000), que estudaram os benefícios de um trem de válvula eletromecânico, e Lancefield *et al.* (2000), que pesquisaram a aplicação do tempo de válvula variável para um moderno motor diesel.

Muitos pesquisadores estão desenvolvendo mecanismos conjuntos desses métodos, como é o caso de Hara *et al.* (2000), que descrevem um novo sistema de válvulas variáveis capazes de controlar continuamente a fase da válvula e o período de tempo enquanto a válvula está aberta. No trabalho de Flierl e Klüting (2000) pode-se constatar que a BMW tem desenvolvido completos trens de válvula variáveis como uma possível solução técnica para realizar controle de carga pelo ajuste do levante da válvula e o tempo de fechamento da válvula de admissão. Neste caso, a variabilidade pode ser conseguida por trens de válvulas mecânicos variáveis ou sistemas mecatrônicos.

3. MODELO MATEMÁTICO E MÉTODO NUMÉRICO

O Método das Características foi introduzido por Riemann (1858,1892) e possui primeira ordem de precisão. As primeiras aplicações desse método utilizavam soluções gráficas e consideravam escoamento adiabático e isentrópico em condutos de descarga. O método geométrico possuía a desvantagem de não poder ser utilizado em geometrias complexas, tais como junções. Neste método os sistemas de admissão e descarga são sub-divididos em seções de tubos individuais que são

conectadas através de junções. A malha é especificada em cada seção do tubo entre as junções (Hanriot, 2001). Em motores de combustão interna, o Método das Características é utilizado para analisar as fases de admissão e descarga, visando a determinação dos fenômenos transientes que ocorrem nos condutos. Os resultados obtidos de tais simulações permitem a obtenção de informação acerca da interação entre os vários parâmetros que determinam o desempenho dos motores.

O modelo estudado utiliza o Método das Características para resolver escoamentos compressíveis transientes nos condutos de admissão em um escoamento não-homeontrópico. As equações governantes unidimensionais que descrevem um escoamento compressível e não homeontrópico para um gás ideal são (Winterbone e Pearson, 1999; 2000):

$$\frac{\partial V}{\partial t} + A \frac{\partial V}{\partial x} + C = 0 \quad (1)$$

onde:

$$V = \begin{bmatrix} \rho \\ u \\ p \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} u & \rho & 0 \\ 0 & u & \frac{1}{\rho} \\ 0 & a^2 \rho & u \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C = \begin{bmatrix} \rho u \\ 0 \\ a^2 \rho u \end{bmatrix} \frac{1}{F} \frac{dF}{dx} + \begin{bmatrix} 0 \\ G \\ (\kappa - 1)\rho(q + uG) \end{bmatrix}$$

sendo x a distância, t o tempo, ρ a pressão, u a velocidade do escoamento, ρ a massa específica e a a velocidade do som. F é a área da seção transversal e d o diâmetro do conduto. $G = 4f_w u |u| / 2d$, onde f_w é o fator de atrito na parede do conduto, q é a transferência de calor por unidade de massa e κ é a razão entre os calores específicos. Esta série de equações diferenciais parciais é um sistema hiperbólico não-linear, e a integração pode ser obtida através de esquemas numéricos aptos para utilizar as informações contidas ao longo das linhas características no campo do escoamento (Roe, 1986). Três linhas características são usadas em um método não homeontrópico (Winterbone, 1999): características se movendo para a direita e esquerda $dx/dt = u \pm a$ (representa as inclinações (distúrbios) que são relatados para as velocidades das ondas em relação ao escoamento médio) e a trajetória da linha $dx/dt = u$, que segue (acompanha) o movimento do escoamento no conduto.

As condições de contorno e iniciais (obtidas experimentalmente) e a equação do gás ideal complementam o sistema de equações a ser resolvido.

4. METODOLOGIA

As simulações foram realizadas para uma faixa de rotação de 400 a 5200rpm do eixo virabrequim, baseado em valores operacionais, de um motor fire 16 válvulas (quatro válvulas por cilindro, sendo duas de admissão e as outras duas de descarga). A análise da variação da vazão mássica e da pressão no escoamento transiente ocasionado pelo movimento das válvulas de admissão foi feita com apenas um cilindro em operação, simulando a condição de um motor monocilindro.

Os transdutores de pressão foram inseridos de maneira que possibilitessem uma análise dos fenômenos pulsantes gerados pelo movimento das válvulas, sendo suficiente para formação da onda

estacionária. Na análise numérica foram adicionadas tomadas de pressão em determinados pontos da malha que representavam várias posições do conduto e nas portas das válvulas de admissão.

Para analisar o comportamento das ondas de pressão foi adotado um tubo de 2000mm (tamanho da malha), que é o comprimento característico adotado por Hanriot (2001) como sendo o mais próximo ao comprimento característico dos automóveis. Como existe uma relação inversa entre freqüência e comprimento do tubo, é de se esperar que comprimentos menores produzam ressonância com a freqüência do eixo comando de válvulas a rotações mais elevadas. Inversamente, comprimentos de admissão maiores produzem ressonância em freqüências menores.

As simulações foram realizadas para as válvulas sem defasagem e com defasagens de 10°, 20° e 30° em relação ao eixo comando de válvulas entre as válvulas de admissão. Esses ângulos foram escolhidos porque experimentalmente, após 30°, há uma diminuição da vazão mássica. e, operacionalmente, uma defasagem de 30° já se torna inviável devido à geometria do cames. As Fig. 1 e 2 mostram os diagramas de válvulas para as respectivas defasagens.

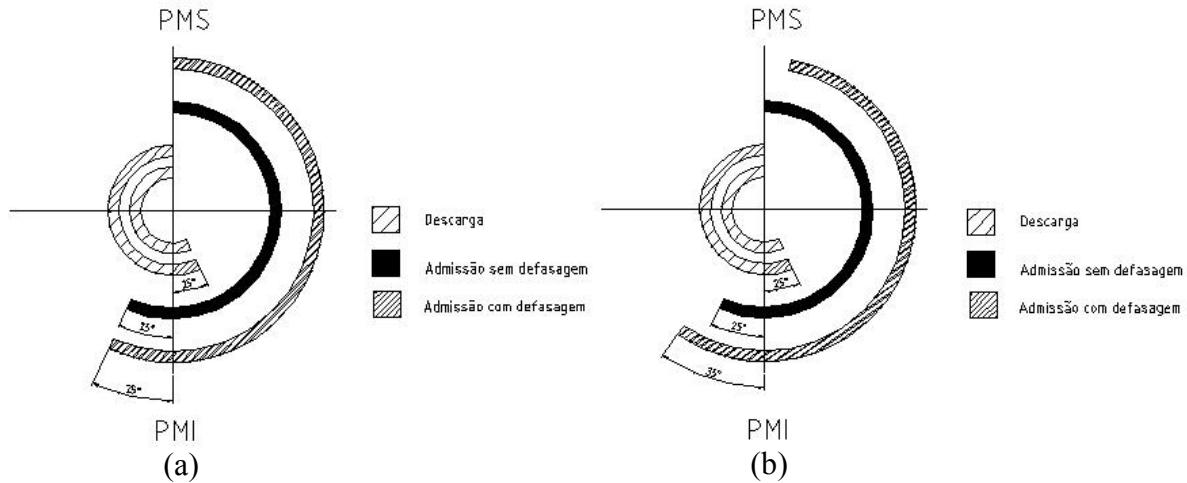


Figura 1 – (a) diagrama de válvulas sem defasagem (b) diagrama de válvulas com defasagem de 10°

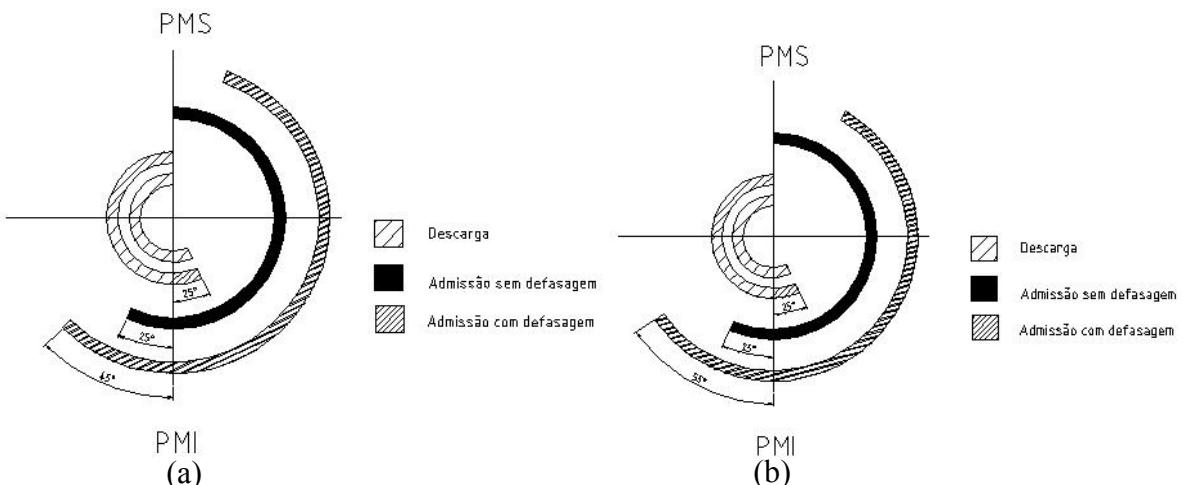


Figura 2 – (a) diagrama de válvulas com defasagem de 20° (b) diagrama de válvulas com defasagem de 30°

5. RESULTADOS

A Fig. 3 mostra os resultados da influência da defasagem das válvulas de admissão em relação às rotações do eixo virabrequim. Pode-se observar que o comportamento da curva em todas as simulações é similar, apresentando diferentes níveis de vazão mássica ao longo das rotações simuladas.

Através da Fig. 3 podemos notar que as maiores vazões estão nas rotações mais baixas e em 3200rpm. Nas diferentes defasagens foi possível notar que a vazão aumenta com o aumento da

defasagem. Na rotação de 4800rpm ocorre a ressonância do conduto de admissão por isso a vazão é inferior.

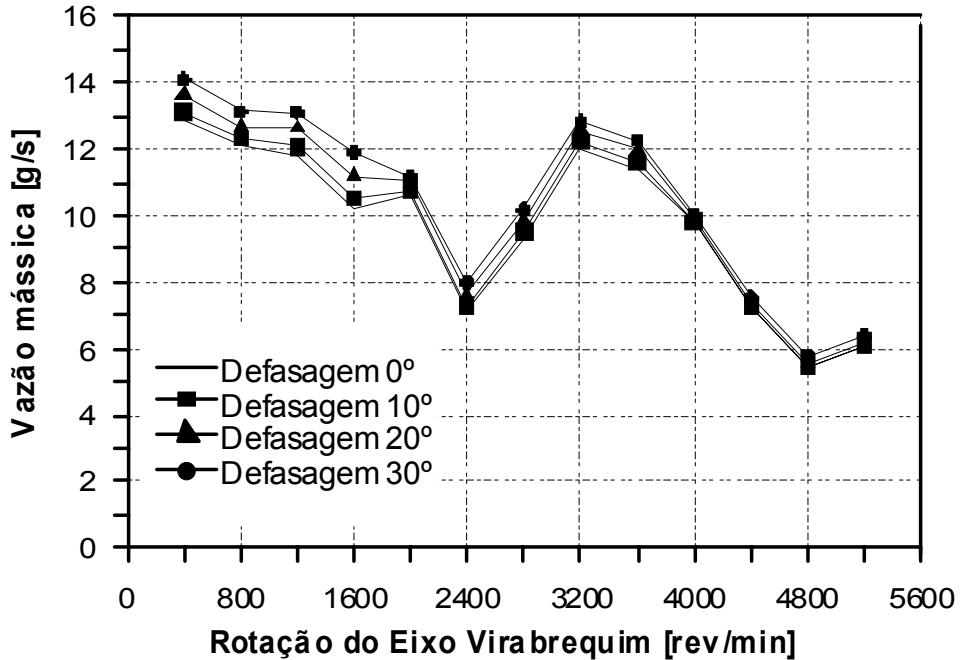
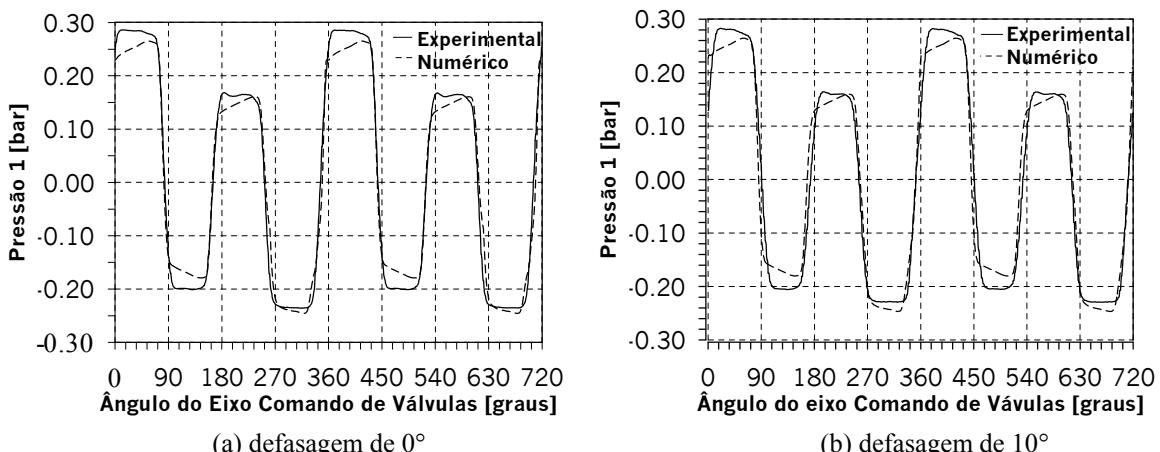
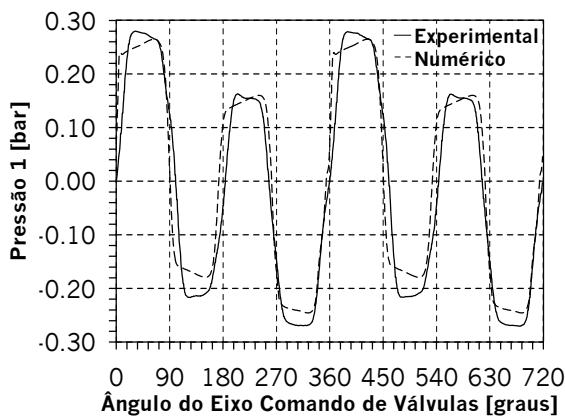


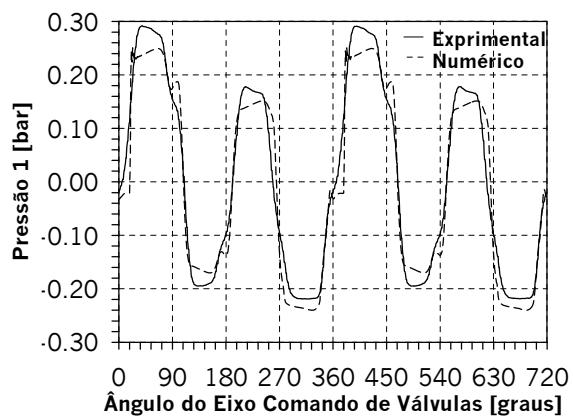
Figura 3. Vazão mássica em função da rotação do eixo virabrequim para as diferentes defasagens

As rotações de 2400 rpm e 4800 rpm do eixo virabrequim são pontos críticos do sistema de admissão. Na rotação de 4800 rpm ocorre a ressonância do conduto de admissão adotado, com 2000 mm de comprimento. A rotação de 2400 rpm é um ponto de instabilidade no funcionamento do motor e será analisada através dos gráficos de pressão. A Figura 4 apresenta as curvas de variação de pressão ao longo do ângulo do eixo de manivelas para o caso sem defasagem e as respectivas defasagens de 10°, 20° e 30°. O transdutor de pressão P1, por estar localizado mais próximo da porta da válvula de admissão indica como as ondas de pressão estão se comportando na porta das válvulas. Os resultados mostram um comportamento muito similar entre o experimental e o numérico, o que foi utilizado também para validação do modelo. Pode-se notar que, ao adiantar o comando, ocorre o deslocamento da onda de pressão na abertura e no fechamento da válvula.





(c) defasagem de 20°



(d) defasagem de 30°

Figure 4 – Sinais de pressão fornecidos pelos transdutores de pressão para uma rotação de 2400rpm do virabrequim.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou através de simulação numérica o efeito produzido na vazão mássica pela defasagem das válvulas de admissão em motores de combustão interna alternativos. A partir dos estudos realizados, verificou-se que:

- O ângulo de defasagem das válvulas afeta a curva de vazão mássica em função da rotação do virabrequim;
- Há um ponto de defasagem ótimo para todo o intervalo de rotação estudado.
- A maximização da vazão mássica ocorre em todo o intervalo de rotação requerido, sendo que em alguns pontos se obtém um ganho menor.
- Observou-se ainda que um dos indicadores que revelam o comportamento do sistema de variação das válvulas é a forma das ondas de pressão na porta da válvula de admissão.
- O ângulo de defasagem afeta significativamente a quantidade de massa admitida.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo suporte financeiro a este projeto.

8. REFERÊNCIAS

- Cunha, S. B. *et al.*, 2000, “Variable Valve Timing By Means of a Hydraulic Actuation”, *Variable Valve Actuation 2000 – SAE*, Paper n.2000-01-1220, pág. 1-17.
- Dresner, T. L., e Barkan, P., 1989, “The Application of a Two Input Cam-Actuated Mechanism to Variable Valve Timing”, *SAE*, Paper n.890676.
- Flierl, R., e Klüting, M., 2000, “The Third Generation of Valvetrains – New Fully Variable Valvetrains for Throttle – Free Load Control”, *Variable Valve Actuation 2000 – SAE*, Paper n.2000-01-1227, pág. 81-91.
- Hanriot, S. M. *et al*, 1999, “Estudo Experimental dos Fenômenos Pulsantes em um coletor de aspiração de Tubo Reto de um Motor de Combustão Interna Alternativo”, *Congresso Ibero Americano de Engenharia Mecânica – CIDIM*, Santiago do Chile.
- Hanriot, S. M., 2001, *Estudo dos Fenômenos Pulsantes do Escoamento de ar nos Condutos de Admissão em Motores de Combustão Interna*, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- Hara, S. *et al.*, 1989, “Application of a Valve Lift and Timing Control System to an Automotive Engine”, *SAE*, Paper n.890681.

- Hara, S., Hidaka, A., Tomisawa, N., Nakamura, M., Todo, T., Takemura, S., Nohara, T., 2000, "Application of a Variable Valve Event and Timing System to Automotive Engines", *Variable Valve Actuation 2000 – SAE*, Paper n.2000-01-1224, pág. 55-63.
- Hosoya, H., Yoshizawa, H., Watanabe, S., Tomisawa, N., Abe, K., 2000, "Development of New Concept Control System for Valve Timing Control", *Variable Valve Actuation 2000 – SAE*, Paper n.2000-01-1226, pág. 71-79.
- Kreuter, P., Heuser, P., Reinicke-Murmann, J., Erz, R., Peter, U., 1999, "The Meta VVH System – The Advantages of Continuously Mechanical Variable Valve Timing", *SAE*, Paper n. 1999-01-0329.
- Lancefield, T., Methley, L., Räse, U., Kuhn, T., 2000, "The Application of Variable Event Valve Timing to a Modern Diesel Engine", *Variable Valve Actuation 2000 – SAE*, Paper n.2000-01-1229, pág. 105-118.
- Lenz, H. P. *et al.*, 1989, "Initial Test Results of an Hydraulic Variable – Valve Actuation System on a Firing Engine", *SAE*, Paper n.890678.
- Leone, T. G., Christenson, E. J., Stein, R. A., 1996, "Comparison of Variable Camshaft Timing Strategies at Part Load", *SAE*, Paper n.960584.
- Morse *et.al*, 1938, "Acoustic Vibrations and Internal Combustion Engine Performance", *Journal of Applied Physics*, v.9.
- Pierik, R. J., e Burkhard, J. F., 2000, "Design and Development of a Mechanical Variable Valve Actuation System", *Variable Valve Actuation 2000 – SAE*, Paper n.2000-01-1221, pág. 19-26.
- Pischinger, M., Salber, W., Staay, F. V. D., Baumgarten, H., Kemper, H., 2000, "Benefits of the Electromechanical Valve Train in Vehicle Operation", *Variable Valve Actuation 2000 – SAE*, Paper n.2000-01-1223, pág. 43-54.
- Riemann, B., 1958, "Über die Fortpflanzung ebener Luftwellen von endlicher Schwingungsweite", *Gott. Abh. 8 (Math.)*, 43-65.
- Riemann, B., 1892, *Gesammelte Mathematische Werke*, Second Edition (Teubner, Leipzig).
- Urata, Y. *et al.*, 1993, "A Study of Vehicle Equipped whit Non-Throttling S.I. Engine with Early Intake Valve Closing Mechanism", *SAE*, Paper n.930820.
- Winterbone, D. E., and Pearson, R. J., 1999, *Design Techniques for Engine Manifolds – Wave action methods for IC engines*, USA, SAE International.
- Winterbone, D. E., and Pearson, R. J., 2000, *Theory of Engine Manifolds Design – Wave action methods for IC engines*, USA, SAE International.
- Roe, P.L., 1986, "Characteristic-based schemes for the Euler equations", *Annual Review of Fluid Mechanics* 18 – pág.337-365.

Effect of the Intake Valves Phase Shift in the Volumetric Efficiency of Engines - a Numerical Study

Luciana Bassi Marinho Pires

Pontifical Catholic University of Minas Gerais / PUC – MG

Department of Engineering Mechanics

Av. Dom José Gaspar, 500 – Coração Eucarístico – Belo Horizonte – MG – BRASIL

CEP – 30535-610 – Fax: +55 (31) 3319 4910 – Tel: +55 (31) 3319 4583

lubmp@ig.com.br

Leonardo da Mata Guimarães

Pontifical Catholic University of Minas Gerais / PUC – MG

Department of Engineering Mechanics

Av. Dom José Gaspar, 500 – Coração Eucarístico – Belo Horizonte – MG – BRASIL

CEP – 30535-610 – Fax: +55 (31) 3319 4910 – Tel: +55 (31) 3319 4583

engmecatronica@bol.com.br

Gabriel Godoy Pereira Russi

Pontifical Catholic University of Minas Gerais / PUC – MG

Department of Engineering Mechanics

Av. Dom José Gaspar, 500 – Coração Eucarístico – Belo Horizonte – MG – BRASIL

CEP – 30535-610 – Fax: +55 (31) 3319 4910 – Tel: +55 (31) 3319 4583

gabriel.russi@russitelecom.com.br

Sérgio de Moraes Hanriot

Pontifical Catholic University of Minas Gerais / PUC – MG

Department of Engineering Mechanics

Av. Dom José Gaspar, 500 – Coração Eucarístico – Belo Horizonte – MG – BRASIL

CEP – 30535-610 – Fax: +55 (31) 3319 4910 – Tel: +55 (31) 3319 4583

hanriot@pucminas.br

Abstract. *The present work analyzes the angular intake valves phase shift in internal combustion engine with two intake valves for cylinder. The study of axis rotation regimes has the objective to dephase one of the intake valves in relation to the other for several command degrees. The intake valves phase shift produces alterations in the amount of air mass admitted in relation to the original situation. The numerical methodology is based on the Method of the Characteristics, a unidimensional analytical model. This method consists of a mathematical technique to solve hyperbolic partial differential equations, transforming them into ordinary differential equations. Thus, the development of such analytical methodology provides the necessary information without the necessity of experimental assemblies. In short, a validated numerical methodology for the study of the effect of the phase shift in the volumetric efficiency in alternative engines of internal combustion is presented in this work.*

Keywords. *Engines, Transient Flow, Method of the Characteristics.*