

MEDIÇÃO DE TEMPERATURA TRANSIENTE EM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

BRUNO SOUZA SORIANO
CHARLES RECH

RESUMO

A proposta deste trabalho é a de analisar a medição transiente de temperatura no interior da câmara de combustão em um motor monocilíndrico (Honda 35,8 cm³) tracionado a uma velocidade angular de 1413 rpm. O sistema de medição de temperatura utilizado foi composto de três termopares, tipo K, com diâmetros diferentes: 25 µm (comercial), 60 µm (confeccionado manualmente) e 1,3 mm (comercial). Os dados de temperatura foram adquiridos a partir de um software comercial, LabView 8.5 e uma placa conversora A/D 6024E, ambos da National Instruments. Os resultados revelaram que os sensores 60 µm e 1,3 mm não são adequados para medir a evolução do fenômeno transiente para as condições de teste utilizadas.

Palavras-chave: Medição dinâmica, análise transiente de temperatura, motor de combustão interna.

ABSTRACT

The objective of this paper is the analysis of transient temperature measurement in the combustion chamber of an internal combustion engine (Honda 35,8 cm³) motored at 1413 rpm. The measurement system was composed of three k type thermocouples with different diameters: 25 µm (commercial), 60 µm (handmade) and 1,3 mm (commercial). Temperature data was obtained with the data acquisition board A/D 6024E with its commercial LabView 8.5 software, both National Instruments. The results revealed that the sensors of 60 µm and 1,3 mm aren't appropriated to measure the transient phenomena for the test condition utilized.

Keywords: Dynamic measurement, transient temperature analysis, internal combustion engine.

INTRODUÇÃO

Na análise do ciclo de combustão em motores de combustão interna, o calor transferido entre o fluido

de trabalho e a câmara de combustão é um importante parâmetro para simulação, pois a transferência de calor influencia os níveis de pressão e temperatura, bem como a eficiência do motor e as emissões de gases nocivos

¹ Acadêmico do Curso de Engenharia Mecânica Automotiva/ULBRA – Bolsista PROICT/ULBRA

² Professor – Orientador do Curso de Engenharia Mecânica Automotiva/ULBRA (charlesrech@uol.com.br)

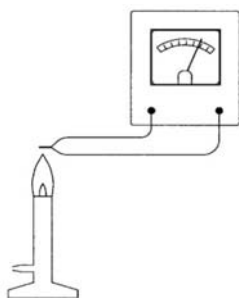
provenientes da combustão (HEYWOOD, 1988). Medir a temperatura ao longo do ciclo em relação à árvore de manivelas contribui para o entendimento dos fenômenos físicos que ocorrem no interior de motor. Sistemas capazes de informar a temperatura ou outras grandezas físicas tem sido um desafio complexo no decorrer da evolução das máquinas térmicas. No interior da câmara de combustão de um motor, grandezas transientes como a temperatura estão presentes. Este fenômeno físico ocorre em pequena escala de tempo e, portanto, o sensor para medição deve ter alta frequência de resposta para caracterizar a evolução da temperatura durante o ciclo. Alguns modelos de sensores apresentam características específicas para medição de temperaturas transientes, como é o caso dos termopares de $25\ \mu\text{m}$ de diâmetro que possuem tempo de resposta igual a $0,003\ \text{s}$ (OMEGA, 2011). Sistemas de medição de temperatura sem contato também são indicados para temperaturas transientes, pois possuem baixa constante de tempo, contudo, o custo de tais equipamentos de medição é elevado.

Neste trabalho é apresentada uma comparação da medição de temperatura em um motor de combustão interna sem o ciclo de combustão com dois termopares comerciais de $25\ \mu\text{m}$ e $1,3\ \text{mm}$ e um termopar de $60\ \mu\text{m}$ confeccionado manualmente

SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA UTILIZADOS EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

O fenômeno transiente ocorre quando há variação das condições de contorno de um sistema (Incropera, 2008). Para caracterizar a evolução da temperatura ao longo do ciclo Otto de um motor de combustão interna, optou-se por utilizar três termopares de diâmetros diferentes, $25\ \mu\text{m}$, $60\ \mu\text{m}$ e $1,3\ \text{mm}$. O termopar é caracterizado pela união de dois fios metálicos diferentes. Se esta união é aquecida, e um voltímetro for ligado às outras duas extremidades dos fios, conforme a Figura 1, este deve medir uma tensão elétrica causada pelo Efeito de Seebeck (POLAK, 1999).

Figura 1. Efeito de Seebeck. Retirado de Polak (1999).



Lee et al (2005), utilizaram um termopar de resposta rápida para medir a variação da temperatura em um sensor piezoelétrico acoplado à câmara de combustão de um motor de combustão interna. Ficou evidente para os autores que a variação de temperatura no ciclo de combustão acarreta um erro de medição de pressão devido à deformação térmica do sensor. Para minimizar este erro foi gerada uma equação empírica de correção da pressão em relação a deformação térmica. O resultado obtido mostrou boa acurácia na correção do sinal lido e segundo os autores, a metodologia utilizada é adequada para investigações mais exigentes. Rech (2010) utilizou um termopar tipo K, com $25\ \mu\text{m}$ de diâmetro e tempo de resposta de $0,05\ \text{s}$ para medir a temperatura do ar dentro do cilindro de um motor de combustão interna CFR (Cooperative Fuel Research) durante a compressão a frio, obtendo resultados de variações de temperatura com boa repetitividade. Torregrosa et al. (2012), utilizou cinco termopares do tipo E com tempo de resposta igual a $10\ \mu\text{s}$ para medir a influencia de diferentes parâmetros como a rotação do motor, a pressão no duto de admissão e temperatura do fluido de arrefecimento na transferência de calor da câmara de combustão. Os autores concluem que a transferência de calor é fortemente influenciada pela massa de ar admitida pelo motor, portanto, a eficiência volumétrica deve ser levada em consideração para a avaliação da influência da rotação na transferência de calor. A transferência de calor não é uniforme ao longo da câmara de combustão devido ao comportamento irregular da camada limite térmica. Lin et al. (1990), mediram a distribuição de temperatura em um motor tracionado diesel a partir da técnica de dupla exposição holográfica, utilizando *laser* durante a fase de compressão. Os autores concluíram que o método fornece resultados dos gradientes de temperatura durante a compressão, observando que a máxima diferença de temperatura em toda a câmara de combustão foi em torno de $40\ \text{K}$ a $60\ \text{K}$ durante todo o ciclo de compressão. Outra constatação desses autores foi que a temperatura no centro da câmara de combustão apresenta uma região homogênea e pode ser tratada como adiabática.

Devido às vantagens e custo inferior em relação aos termômetros sem contato, foram utilizados termopares do tipo K para medir a temperatura no motor de combustão interna ao longo do ciclo.

TEMPO DE RESPOSTA DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

O tempo de resposta pode ser encontrado considerando-se um sistema físico que apresente uma

variável com comportamento temporal, $x(t)$, e que possa ser representado na forma diferencial:

$$F(t) = a_n \frac{d^n x}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x$$

em que $F(t)$ representa uma função imposta pelo sistema. A ordem do sistema é determinada pela ordem da equação diferencial que o representa (Holman, 2001). Considerando o número de Biot (Eq. 2) menor que 0,1, os termopares utilizados são considerados de primeira ordem.

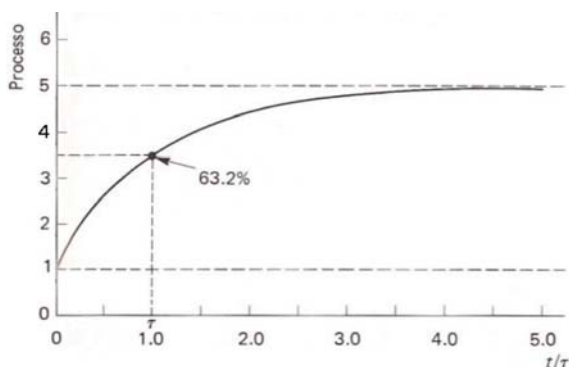
$$Bi = \frac{h \cdot l}{k}$$

Sendo h o coeficiente convectivo, l o comprimento característico do sensor e k sua condutividade térmica. A Eq. 3 representa a solução da Eq. 1 para um sistema de primeira ordem. Quando t for igual a τ , tem-se uma constante de tempo, o que representa 63,2% do tempo necessário para que o evento se estabeleça da condição inicial até a final. A constante de tempo é dependente das características do instrumento de medição e do meio em que este está sendo usado. Usualmente, utiliza-se 5τ para que o sistema se estabilize na condição final, o que representa 99,3% (BECKWITH, 1995).

$$\frac{x(t) - x_\infty}{x_0 - x_\infty} = e^{-t/\tau}$$

A resposta ao degrau do sistema em condições dinâmicas está ilustrada na Figura 2, de conforme Beckwith (1995).

Figura 2. Resposta transitória de um sistema de primeira ordem. Adaptado de Beckwith (1995).



MATERIAL E MÉTODOS

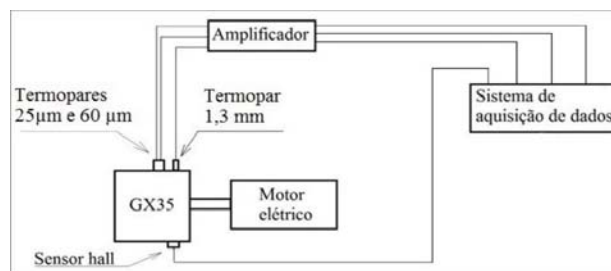
A medição de temperatura transiente em um motor de combustão interna Honda GX35 (Honda, 2011), tracionado por um motor elétrico a 1413 rpm, foi realizada com três termopares diferentes: 25 μm , 60 μm e 1,3 mm. O sensor de 60 μm foi desenvolvido a partir de fios de cabo de compensação para termopar tipo K, isolados e codificados por cores de acordo com o padrão da ANSI/MC 96.1 (GODINHO, 2011). Os outros dois termopares são produzidos pela empresa Omega com 25 μm e 1,3 mm de diâmetro.

Os termopares foram inseridos em isolantes ou tubos pirométricos distintos para isolamento elétrico entre os fios. Para os dois sensores de menor diâmetro, um suporte rígido e robusto foi confeccionado a partir do corpo de uma vela de ignição, onde a cerâmica e o eletrodo foram retirados. Os isolantes de alumina foram inseridos no suporte, fixados com cola epóxi e instalados no alojamento da vela de ignição do motor. Já o sensor de 1,3 mm de diâmetro foi instalado motor através de um orifício realizado na câmara de combustão. As juntas quente dos termopares ficaram cerca de 1 mm expostas na câmara de combustão. O sinal foi amplificado com o uso de um circuito integrado modelo AD595 (Analog Devices, 2011) precalibrado para termopares tipo K, com amplificação de 10 mV/ $^{\circ}\text{C}$.

A posição angular da árvore de manivelas foi medida com um sensor tipo hall, modelo A1102 fabricado por Allegro Microsystems (2011), instalado no volante do motor e posicionado para gerar o pulso elétrico no Ponto Morto Superior (PMS). O pulso elétrico lido na forma de frequência foi convertido em rotação.

Os dados foram adquiridos a 20 kHz a partir de um software comercial, LabView 8.5 (2008) e de uma placa conversora A/D 6024E, ambos da National Instruments. A Figura 4 ilustra a montagem do experimento para medir temperatura e rotação no motor de combustão interna.

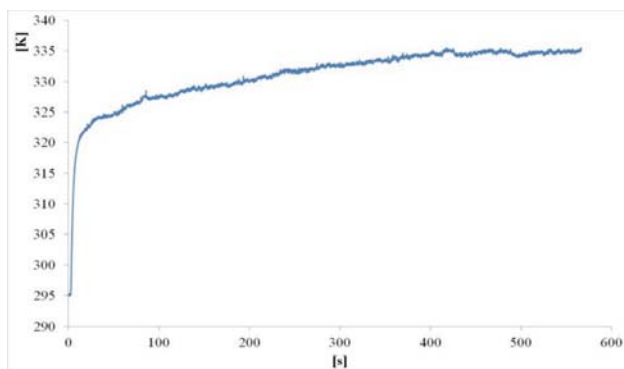
Figura 3. Sistema de medição de temperatura com três termopares.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

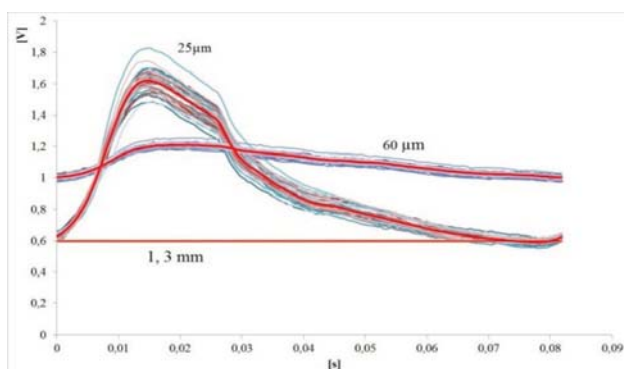
A temperatura no interior da câmara de combustão foi medida utilizando três termopares do tipo K com diâmetros diferentes. Primeiramente, mediu-se à taxa de aquisição de 300 Hz o tempo necessário para que o sensor de maior inércia térmica entrasse em regime permanente, deixando o motor funcionar por um longo período (cerca de 10 minutos) de acordo com a Figura 4.

Figura 4. Tempo necessário para o termopar de 1,3mm entrar em regime permanente.



A Figura 5 apresenta o resultado de 30 ciclos de cada sensor, a 1413 rpm, em termos de tensão elétrica por tempo. No gráfico, a curva com maior amplitude é o resultado da medição do termopar de 25 μm e sua média representada pela curva vermelha. O desvio padrão máximo de 0,0753 V. O mesmo foi feito para o outro sensor e neste caso o desvio padrão máximo foi de 0,0177 V. Verifica-se, portanto, que houve boa repetitividade das 30 medições para ambos os termopares. Como pode ser visto o termopar de 60 μm não possui tempo de resposta suficiente para medir a evolução do fenômeno transiente, pois há um atraso de fase e diminuição da amplitude em relação ao termopar de 25 μm . Já o termopar de 1,3 mm de diâmetro, não é capaz de detectar a variação de temperatura no ciclo.

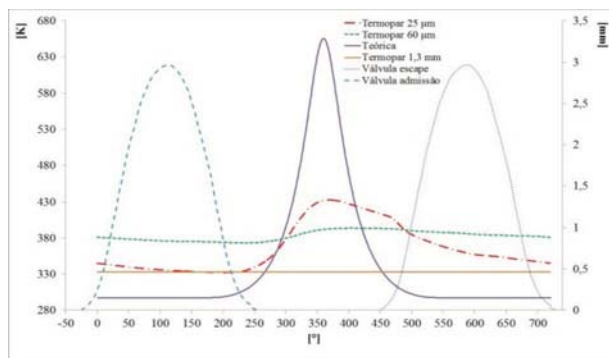
Figura 5. Tensão elétrica dos termopares em relação ao tempo.



Devido à diferença de medição entre os três sensores, é coerente comparar a máxima variação de temperatura teórica com o tempo de resposta do sensor de menor diâmetro, para determinar se este está medindo o fenômeno real. Para gerar a curva teórica de temperatura, foi adotada a relação politrópica $PV^k = \text{constante}$ e o ar tratado como gás perfeito. A relação entre os calores específicos foi de $k=1,33$ (HEYWOOD, 1988), pressão atmosférica de 1 atm, temperatura ambiente de 25°C e o incremento de 1° da árvore de manivela. A máxima variação de temperatura teórica, para este caso, é de 2,72°C e ocorre em torno de 68° em relação ao ponto morto inferior no ciclo de compressão. Considerando a relação entre o tempo de resposta do sensor por unidade de temperatura igual a 0,0077 ms/°C, o tempo de resposta do termopar (25 μm) é 5,5 vezes mais rápido que o fenômeno.

A Figura 6 apresenta o resultado médio das trinta medições de temperatura para cada termopar, a variação politrópica e a abertura das válvulas de admissão e exaustão.

Figura 6. Curvas de temperatura experimental, teórica e abertura de válvula em relação à árvore de manivelas.



De acordo com a Figura 6, a variação de temperatura da câmara de combustão está relacionada também com o tempo de abertura de válvulas. Como a válvula de exaustão abre antes do término da fase de expansão, em que a pressão no interior do cilindro é maior do que a atmosférica, a temperatura decai rapidamente em função da expansão causada pelo escoamento de ar através da válvula. Já na fase de admissão, a temperatura decresce devido à depressão gerada na câmara de combustão e principalmente ao ar de admissão da atmosfera estar à temperatura ambiente.

CONCLUSÕES

A temperatura transiente foi medida através de termopares do tipo K em um motor de combustão interna

sem o ciclo de combustão. Verificou-se que o termopar de 25 μm apresentou tempo de resposta suficiente para caracterizar o fenômeno de variação de temperatura durante a compressão e expansão do ciclo no motor. Contudo, o termopar confeccionado de 60 μm possui maior inércia térmica, apresentando um atraso de fase e diminuição da amplitude em relação ao termopar de 25 μm . Já o sensor de 1,3 mm demorou cerca de 10 minutos para entrar em regime permanente e, portanto, não é capaz de detectar a variação da temperatura na câmara de combustão ao longo de um ciclo.

REFERÊNCIAS

- ALLEGRO MICROSYSTEMS. **Continuous-Time Switch Family**. Massachusetts: Allegro Microsystems, 2006. Disponível em: <http://www.allegro-micro.com/en/Products/Part_Numbers/1101/1101.pdf>. Acesso em: 05 maio 2011.
- ANALOG DEVICES. **AD595 Monolithic thermocouple amplifiers with cold junction compensation**. Disponível em: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD594_595.pdf>. Acesso em: 05 maio 2011.
- BECKWITH, T. G. **Mechanical measurements**. 5. ed. Massachusetts: Addison-Wesley, 1995.
- GODINHO, A. S. T. **Desenvolvimento de um sistema de medição para temperatura transiente**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia: Energia, Ambiente e Materiais) - Universidade Luterana do Brasil, Canoas, 2011.
- HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1988.
- HOLMAN, J. P. **Experimental methods for engineers**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
- Honda Engines. **Make light work of hard tasks: GX35**. 2012. Disponível em: <<http://engines.honda.com/models/model-detail/gx35>>. Acesso em: 05 abril 2011.
- INCROPERA, F.P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- NATIONAL INSTRUMENTS. **User guide**. [S.l.]: Labview, 2008.
- LEE, S. et al. **Quantification of thermal shock in a piezoelectric pressure transducer**. [S.l.]: SAE Technical Paper, 2005. Series 2005-01-2092.
- LIN, Q. Z. et al. Investigation on compression temperature field in a diesel combustion chamber. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM COMODIA, 1990. **Anais...** 1990. p. 337-340.
- Omega. **Engineering technical reference thermocouple**. Disponível em: <<http://www.omega.com/thermocouples.html>>. Acesso em: 05 abril 2011.
- POLAK, T. A.; PANDE, C. **Engineering measurement**. Suffolk: Professional Engineering Publishing, 1999.
- RECH, C. **Análise numérica e experimental do escoamento em motores de combustão interna**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.
- TORREGROSA, A. J. et al. O. Experimental assessment for instantaneous temperature and heat flux measurements under Diesel motored engine conditions. **Energy Conversion and Management**, v. 54, p. 57–66, 2012.