

# Medición de temperatura en la cara del pistón de un motor CFR de gasolina

## Piston temperature measurement on a SI CFR engine

J. O. Araque, L. T. Araujo\* y H. J. Castellano  
Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Los Andes. Mérida. Venezuela  
\*lennytha@hotmail.com

### Resumen

*El objetivo del trabajo consiste en medir el cambio de temperatura en la cara del pistón del motor CFR empleando termocuplas superficiales tipo J colocadas en puntos estratégicos en la cabeza del mismo. Se construye un sistema telemétrico para llevar las lecturas de temperatura desde el pistón hasta el sistema de adquisición de datos. Las mediciones de temperatura con el sistema de adquisición de datos se hicieron trabajando el motor en un rango de relaciones combustible/aire de 0,88 hasta 1,28. Los datos analizados (con y sin combustión) corresponden a una termocupla superficial en las cercanías de la válvula de admisión y dos termocuplas de profundidad, una bajo la válvula de admisión y otra bajo la válvula de escape. En el primer ensayo "sin combustión", los niveles de temperaturas alcanzados muestran sólo el cambio de temperatura ocasionado por el proceso de compresión del aire, observándose poca diferencia en las zonas próximas a la válvula de admisión y escape. La temperatura en el segundo ensayo "con combustión", aumenta rápidamente debido al proceso de combustión y en función de la riqueza de la mezcla. El diseño de las termocuplas superficiales permitió solo observar la variación en la temperatura promedio, sin mostrar detalles característicos del proceso de combustión.*

**Palabras claves:** Temperatura superficial, relación combustible aire relativa, combustión, válvulas de admisión y escape, sistema de adquisición de datos.

### Abstract

*Using thicker film thermocouple the piston temperature on a CFR engine was measured. The temperature readings were accomplished with a telemetric system to carry the signal from the piston to the acquisition unit. A range of fuel/air equivalence ratio between 0.88 to 1.28 was used to do the temperature measurements. Temperature data with and without combustion on piston surface and underneath intake and exhaust valve area was analyzed. The experiments without combustion showed temperature changes due only to compression effects. During the combustion experiments the higher temperature increase proper to the process itself showed the strong relationship with the fuel/air mixture. The thermocouple design allow to see the mean temperature during the engine cycle but the combustion process characteristics.*

**Key words:** Surface temperature, fuel/air equivalence ratio, combustion, intake and exhaust valves, acquisition data system.

### 1 Introducción

El estudio del proceso real de la combustión en los motores de combustión interna alternativos está afectado directamente por una serie de variables que modifican continuamente las características del proceso. Una de las principales variables es la temperatura dentro de la cámara de combustión y esta se presenta relacionada directamente con los parámetros de funcionamiento del motor (Alkidas, 1987) como lo son: velocidad de giro del cigüeñal (R.P.M.); relación combustible/aire; ángulo de avance de

chispa; condiciones del sistema refrigerante; características del combustible y del aceite lubricante; condiciones de carga aplicadas al motor; entre otras. En investigaciones para medir la temperatura en los ciclos del motor, se han definido modelos matemáticos que describen el comportamiento de temperatura y transferencia de calor, esto en conjunto con técnicas y equipos para registrar la variación de la combustión y con ello la temperatura en las paredes.

En el siguiente trabajo las pruebas se efectuaron en un motor de combustión interna CFR de gasolina monocilíndrico, un conjunto pistón-cabezal instrumentado con termo-

cuplas coaxiales tipo J se utilizó para el registro de temperatura.

Las señales se registraron con un sistema de adquisición de datos (DAQ System) el cual utiliza una tarjeta DAQ conectada a un computador, cableado a un bloque conector y a su vez al conjunto termocupla-sistema acondicionador. El sistema de adquisición de datos utiliza LabVIEW como paquete de computación, este es un sistema de programación gráfica que usa lenguaje G, permitiendo tomar, almacenar y presentar datos de manera rápida y sencilla.

## 2 Metodología para medición de temperatura superficial

### 2.1 Material y propiedades térmicas.

El aislamiento cerámico en los motores origina enormes gradientes de temperatura a través de sus paredes, las cuales causan cambios significantes en las propiedades térmicas del material influyendo en la transferencia de calor.

La penetración térmica (PT) depende fundamentalmente de la propiedad del material, es función de la diferencia de temperatura entre los gases y las paredes de la cámara y de la velocidad con que se presentan los fenómenos de la combustión; representa la longitud medida a partir de la superficie del cuerpo donde se presentan cambios en la temperatura, una vez alcanzada su valor la temperatura se estabiliza y se mantiene constante. Esta es función de la conductividad térmica ( $k$ ), la densidad ( $\rho$ ) y el calor específico ( $C_p$ ) del material, encontrándose una relación entre estas propiedades. Para simplificar el análisis, estas propiedades en la mayoría de los casos se estudian agrupadas en el producto  $k\rho C_p$  y el resultado se representa en términos de este grupo de propiedades. Para los materiales con baja conductividad térmica, como es el caso de los cerámicos, este grupo de propiedades presenta valores pequeños, su PT igualmente es pequeño encontrándose en el orden de 0,5 a 1.0 mm. En contraste con lo anterior los materiales metálicos poseen valores elevados de este grupo de propiedades, lo cual también implica valores altos en la penetración térmica, tal es el caso del aluminio que tiene una PT del orden de 10 mm (Rasihhan y Wallace, 1991).

Los motores que emplean materiales con bajo  $k\rho C_p$  en las paredes de la cámara de combustión presentan altos valores de temperatura superficial, con oscilaciones en  $T_s$  similares a la temperatura que posee el gas. Esto limita la transferencia de calor convectiva del gas hacia las paredes, alcanzando una condición con tendencia similar al comportamiento del motor adiabático. Cuando el material tiene un  $k\rho C_p$  elevado se presenta una amplia diferencia entre las oscilaciones de la temperatura del gas y el comportamiento dinámico de la temperatura de la superficie, cuyos valores son menores, facilitando el flujo de calor hacia las paredes.

Durante el proceso de combustión se producen partículas de hollín, algunas de las cuales se adhieren a la super-

ficie de la cámara de combustión formando depósitos de ciertos espesores, los cuales afectan la transferencia de calor del gas a las paredes. Durante la combustión la temperatura en la superficie de los depósitos (Rasihhan y Wallace, 1991) es más elevada que la temperatura en zonas donde no hay formación de depósitos.

Una serie de trabajos experimentales (Alkidas, 1987); Alkidas y Myers, 1982; Assanis y Badillo, 1989; Keltner y Beck, 1983) se han llevado a cabo con la finalidad de medir la variación de temperatura superficial en la cámara de combustión de motores alternativos. Los resultados de las investigaciones señalan que las mediciones de las temperaturas superficiales en las paredes bajo condiciones de operación, requieren de sensores con masas muy pequeñas a fin de proveer una rápida y exacta respuesta. Este tipo de juntas medidoras es conocida como termocupla de película y la misma es muy frágil, haciéndose difícil su uso en los experimentos. Las termocuplas de película delgada son usadas para medir los cambios de temperatura instantánea sobre la superficie de las paredes de la cámara de combustión en motores de combustión interna. El tipo de termopar que se va a utilizar para la medición de la temperatura superficial puede causar alteraciones en el comportamiento del perfil de la misma, por lo que es determinante que el material de la termocupla de película sea en términos de conductividad y difusividad térmica igual al material del cuerpo medido. Empleando termocuplas tipo J con material de constantan en el alambre del centro y tubo externo de hierro, empotradas en un pistón de material igual a este último, se consiguen buenos resultados durante la admisión, compresión y escape en el ciclo del motor, la excepción ocurre en los valores picos de temperatura donde se registra respuestas que se alejan por encima de la verdadera.

### 2.2 Transferencia de calor en MCIA

El conocimiento de los perfiles de temperatura tanto en la superficie como a determinada profundidad en los componentes de la cámara de combustión, son necesarios para efectuar: análisis de las tensiones térmicas a que están expuestos dichos componentes y así obtener las características de fatiga en los mismos. La medición de temperatura transitoria se emplea para determinar la parte del flujo de calor que atraviesa las paredes del motor durante el ciclo y así poder cuantificar la distribución de la energía liberada. Lo anterior permite estimar la cantidad de líquido refrigerante necesario por unidad de tiempo para mantener los rangos de temperatura de pared deseados en el motor.

La medición de flujo de calor instantáneo se presenta como un método complejo. El modelo básico se desarrolló en 1930 por Eichelberg, quien empleó termocuplas de respuesta rápida para medir las fluctuaciones de temperaturas en la superficie de la cámara de combustión. Sus investigaciones emplearon los mejores métodos posibles convirtiendo estas señales a flujos instantáneos de calor. Estos flujos

se calcularon a partir de dichas temperaturas por un método numérico basado en la difusión de calor. Las señales de ruido presentadas fueron de valores bajos, y se requirieron del registro de un gran número de ciclos para luego obtener valores promedios.

Los cálculos (Alkidas, 1987) del flujo de calor superficial en la cámara de combustión se plantean en dos partes: componente *estable* y componente *transitoria*. La primera se evalúa considerando la diferencia de temperatura entre una termocupla superficial y otra empotrada a una determinada profundidad. La componente transitoria se evalúan a partir de las mediciones cíclicas de la temperatura superficial, la cuales se representan por series de Fourier.

### 2.3 Parámetros de funcionamiento del motor

En MCIA se ha encontrado que tanto la liberación de calor como su transferencia dentro de la cámara de combustión son influenciados por parámetros de funcionamiento. (Alkidas, 1987; Araque, 1995) Los estudios muestran que: incrementando la relación combustible/aire (F/A) se presentan aumentos de presión y temperatura tanto en los valores picos como en los registros promedios, como consecuencia de la gran cantidad de masa de combustible quemado. Esto incrementa la proporción de calor instantáneo liberado por grado de giro del cigüeñal. La transferencia de calor refleja valores elevados, a causa de la alta temperatura de los gases y los efectos radiantes resultado de la alta concentración de hollín en la cámara de combustión. Aumentando la velocidad del motor se incrementa la proporción de calor liberado a causa del aumento de mezcla quemada y se incrementa la razón de transferencia de calor como resultado de las elevadas velocidades de flujo obtenida, lo cual contribuye en un aumento del coeficiente convectivo de calor. La transferencia de calor se reduce con el retardo del inicio de la combustión, a causa de los bajos niveles de presión y temperatura durante el período de combustión. El desarrollo óptimo del proceso de combustión se consigue con ángulos de avance ajustados en función del incremento de revoluciones.

### 2.4 Temperatura superficial

B. Lawton consigue determinar los perfiles de temperaturas a partir de la fórmula usual  $T = T_0 (V_0 / V)^{\gamma-1}$ . Esta ecuación es válida cuando no hay combustión, debido a que fuera de las capas de frontera el gradiente de temperatura es cero y además la compresión y expansión pueden considerarse como adiabáticas (Lawton, 1987). El valor de  $T_0$  se toma como temperatura de admisión del aire y  $V_0$  es el volumen del cilindro con las válvulas cerradas. La temperatura es baja durante la admisión creciendo a pasos durante el período de compresión y luego presenta un descenso en las primeras etapas de expansión. Lawton describe la distribución de temperatura de la manera siguiente: el aire admi-

tido choca con la superficie caliente de la cámara ocasionando pequeños enfriamientos, allí se registra un pequeño flujo de calor (de la pared hacia el gas). Durante la compresión, la dirección del flujo de calor se revierte y se mantiene en pequeñas magnitudes hasta el punto en el cual la presión del gas comienza a elevarse, a partir de allí el flujo de calor crece a saltos y encuentra un máximo valor en las proximidades al punto muerto superior. Luego este flujo de calor cae muy rápidamente hasta conseguir valores cercanos a cero al final del ciclo.

## 3 Medición de temperatura

### 3.1 Sistema telemétrico

Para el presente trabajo se diseñó y construyó un sistema de cableado que permitiera registrar la temperatura superficial en la cara del pistón y llevar la misma hasta el sistema de adquisición de datos.

Se usó un pistón instrumentado con seis termocuplas tipo J, un termistor como junta de referencia, y cables de extensión de cobre (Peña y Rondon, 1998). Los cables de extensión permiten llevar la señal de temperatura medida en la cara del pistón desde un conector ubicado en la parte interna de la falda del pistón hasta la tarjeta de adquisición de datos. Una banda metálica de acero inoxidable es utilizada para evitar el libre movimiento de los cables de extensión entre el fondo del pistón y la biela. Los cables luego pasan a lo largo de la biela, y para protección de los mismos se utiliza una lámina acanalada de acero inoxidable que se fija al cuerpo de la biela mediante tornillos. Estos cables son luego conectados a un tercer punto en el muñón de la biela.

Considerando el movimiento del sistema pistón-biela-cigüeñal resulta muy difícil sacar los cables desde la biela sin que los mismos se rompan. Por lo tanto, para asegurar la vida de los cables así como una continua conexión durante el movimiento del motor se construyó un mecanismo articulado de barras articuladas y acanaladas que permiten el alojamiento y protección de los cables. Este mecanismo se une en uno de sus extremos al muñón de la biela y en el otro a la parte externa del bloque del motor, facilitando sacar los cables del motor y permitiendo su movimiento con el del mecanismo.

### 3.2 Termistor

La dinámica del pistón requiere del empleo de cables con alta resistencia a la fatiga. Para mediciones de temperatura usando termopares lo recomendable es usarlos con cables de extensión del mismo material, sin embargo la poca resistencia a la fatiga de los mismos requiere del empleo de cables de extensión de cobre. Por lo cual esta técnica necesita compensar la variación de temperatura debido al cambio de material y para ello se utilizan medidores de

temperatura del tipo resistencia eléctrica. Es conocido como termómetro de resistencia. Su principio de trabajo se fundamenta en los cambios de resistencia eléctrica de un metal con los cambios de temperatura. Es un instrumento de medición de gran exactitud y simplicidad. Presenta una relación estable y continua entre el cambio de resistencia y la variación de temperatura. Adicionalmente estos medidores tienen un coeficiente térmico de resistencia relativamente elevado. Este coeficiente indica que la mayoría de los metales aumentan su resistencia con la temperatura y lo hacen según un comportamiento polinómico.

### 3.3 Cabezal del pistón instrumentado

Se emplea un disco metálico de 5 mm de espesor y diámetro externo igual al diámetro del pistón. La sujeción de estos discos al pistón se logra mediante un método de soldadura. Cuatro termopares se distribuyeron en la superficie del cabezal simétricamente enumerados del 1 al 4, y a 4 mm de profundidad se fijaron dos termopares (juntas frías) ubicadas en la diagonal que une los termopares 2 y 4. El diseño de termopares empleados en este trabajo fue usando una junta medidora no lo suficientemente pequeña como para que su velocidad de respuesta sea "instantánea" y poder obtener una lectura de temperatura con el detalle adecuado que describa el comportamiento en tiempo real del perfil de la temperatura superficial en la cara del pistón. Los termopares 1 y 2 son ubicados a ambos lados de VE, y los termopares 3 y 4 a ambos lados de VA, lo cual puede ser observado en la Fig.1. Esta distribución física permite registrar los cambios de temperatura superficial en varias zonas sobre la cara del pistón con la finalidad de poder encontrar una distribución de la variación de la temperatura no sólo en función de la riqueza de la mezcla sino también, estudiar el efecto de variación en la composición de la mezcla con la posición en la cámara de combustión. Consi-guiéndose con esto tener una buena descripción de los fenómenos que ocurren durante todos los procesos del ciclo de trabajo del motor.

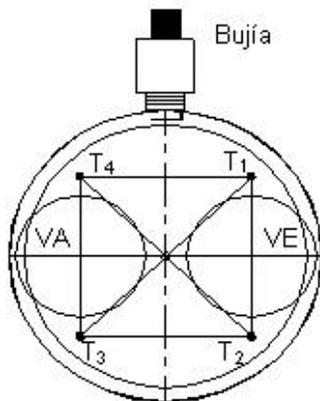


Fig. 1 Disposición de las termocuplas en el cabezal.

## 4 Ensayos experimentales

### 4.1 Control de la relación combustible/aire (F/A)

La relación F/A se varió en los ensayos para obtener distintas condiciones de nivel de temperatura superficial promedio dentro de la cámara de combustión. Usando la variación de altura de los depósitos del carburador se consigue mayor o menor atomización del combustible para una cantidad aproximadamente constante de suministro de aire. Lo anterior permite obtener valores de riqueza de mezclas combustible/aire en el rango de trabajo normal para MECH.

### 4.2 Descripción de los ensayos y conclusiones

Las Figuras muestran los valores de temperatura superficial promedio en función del ángulo de giro para las condiciones de mezcla pobre  $\phi = 0,88$ ; mezcla rica 1,28 y próxima a la estequiométrica 1,04. La Fig. 2 corresponde a la termocupla superficial 4 ( $T_{S4}$ ) ubicada en la cercanía de la válvula de admisión. La Fig. 3 representa la junta fría 2 ( $T_{P2}$ ) a una profundidad de 4 mm ubicada en la cercanía de la válvula de escape. La Fig. 4 muestra la junta fría 4 ( $T_{P4}$ ) colocada a 4 mm de profundidad en la cercanía de la válvula de admisión.

Los mayores niveles de temperatura corresponden a la relación combustible/aire próximas a la estequiométrica ( $\phi=1,04$ ). Esta tendencia es la esperada, debido a que para los motores de encendido por chispa la mayor eficiencia de la combustión (Alkidas y Myers, 1982), se logra cuando la composición de mezcla de trabajo corresponde a valores ligeramente enriquecidos ( $\phi \approx 1,04$ ). Un aumento o disminución en la cantidad de combustible en la mezcla de trabajo respecto a un valor estequiométrico hace que las temperaturas de las paredes de la cámara de combustión sean inferiores. La riqueza  $\phi=1,28$ , muestra los valores menores de temperatura para todos los casos indicando un sobre-enriquecimiento excesivo. La  $T_{P2}$  registra mayores niveles de temperatura promedio por estar en la cercanía de la zona de escape donde los gases quemados tienen mayor temperatura.

En la Fig. 4 se observa una curva del comportamiento ideal, en la cual se tiene que al acercarse la llama al punto muerto superior debiera existir un máximo de temperatura, mostrando un crecimiento repentino para el momento de la combustión. Este comportamiento no pudo ser observado debido al tamaño de las termocuplas, por lo cual en los resultados solo se obtienen valores promedio de temperatura superficial en la cara del pistón.

En la Fig. 2 se observa una temperatura mas alta y una mayor dispersión para la señal de la termocupla superficial 4 ( $T_{S4}$ ), pudiendo ser esto debido al contacto más directo con el proceso de la combustión. Esta dispersión puede atribuirse a pequeñas variaciones en la composición de las mezclas dentro de la cámara de combustión, a efectos tales

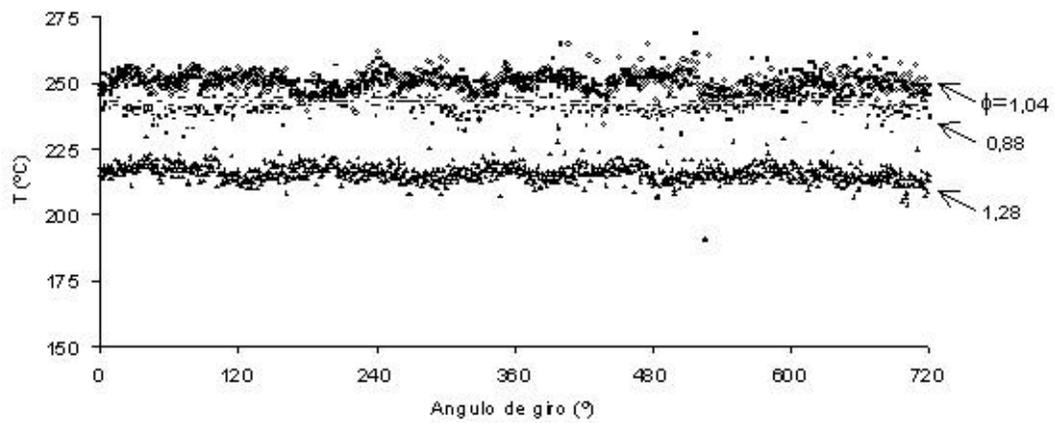


Fig. 2. Temperatura superficial promedio para varias riquezas. (1000 R.P.M.,  $T_{S4}$ , cercanía de VA).

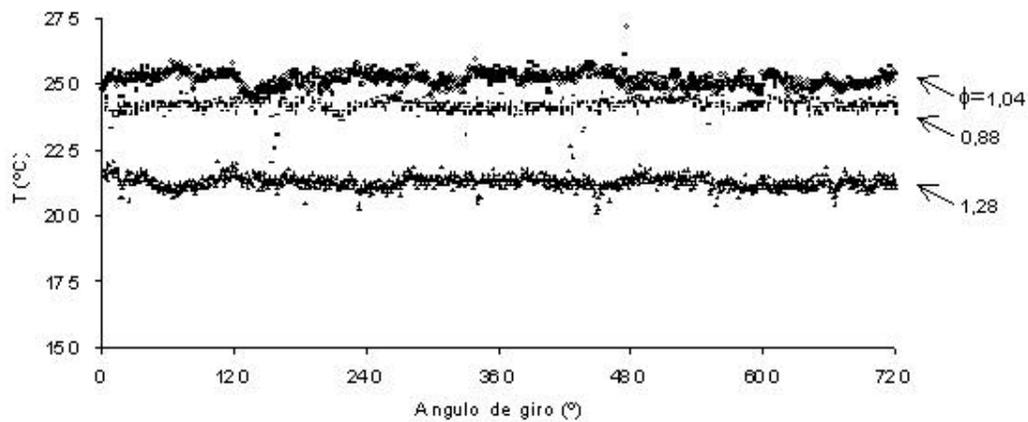


Fig. 3. Temperatura superficial promedio para varias riquezas. (1000 R.P.M.,  $T_{P2}$ , cercanía de VE).

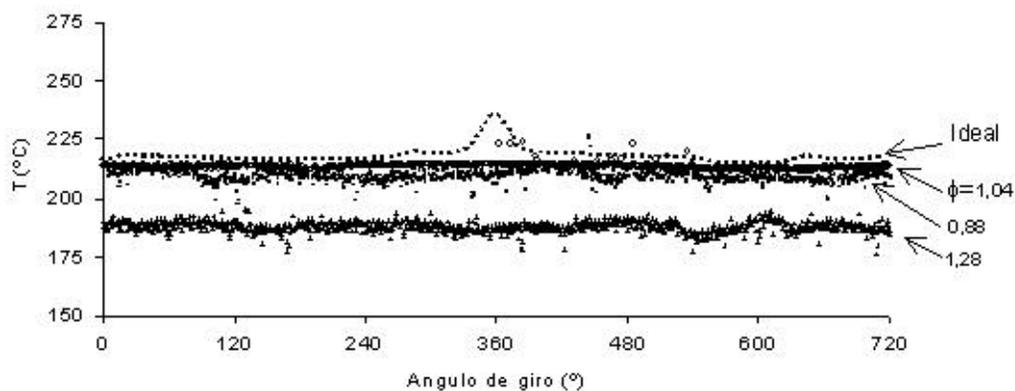


Fig. 4. Temperatura superficial promedio para varias riquezas. (1000 R.P.M.,  $T_{P4}$ , cercanía de VA)

como ligeras turbulencias en los gases y desuniformidad en el avance del frente de llama.

Se registraron 20 ciclos para cada ensayo realizado, con lo cual se observó que ciclo a ciclo no existe mucha

diferencia entre la temperatura promedio, sin embargo debido a que con el cabezal instrumentado no se pudo observar el cambio de temperatura superficial durante la combustión, esta afirmación no puede generalizarse.

## 5 Referencias

Alkidas A, 1987, Heat release studies in a divided-chamber diesel engine, *Journal of engineering for gas turbines and power*. Vol. 109, pp.193-199.

Alkidas A y Myers J, 1.982, Transient heat-flux measurements in the combustion chamber of a spark-Ignition engine, *Transactions of the ASME*, Vol. 104, pp. 62-67.

Araque J, 1995, Study of air fuel ration on piston surface temperature and deposit development in a spark ignition engine, MSc Thesis, University of Illinois, Urbana. May.

Assanis D y Badillo E, 1989, On heat transfer measurements in diesel engines using fast-response coaxial thermocouples, *transactions of the ASME*, Vol. 111, pp. 458-465.

Keltner N y Beck J, 1983 Surface temperature measurement errors, *Transactions of the ASME*. Vol. 105, pp. 312-318.

Lawton B, 1987, Effect of compression and expansion on instantaneous heat transfer in reciprocating internal combustion engines, *Proc. Instn. Mech. Engrs*. Vol. 201, No. A3, pp. 175-186.

Peña J y Rondón N, 1998, Diseño y construcción de un Mecanismo para medir temperatura en la cara del pistón de un motor de combustión interna, Tesis de Pre-grado. Universidad de Los Andes.

Rasihhan Y y Wallace J, 1991, Temperature transients on engine combustion chamber walls-II, Geometry and general material property, Including temperature-dependent, effects, *Int. J. Mech. Sci*, Vol. 33, No. 10, pp. 793-803.