

# Ductos

PUBLICACIÓN TRIMESTRAL  
NO. 34 AÑO 5 ABRIL-JUNIO 2003

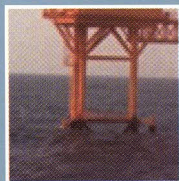
ÓRGANO DE INFORMACIÓN DEL  
COMITÉ DE DUCTOS DE PETRÓLEOS MEXICANOS  
Y ORGANISMOS SUBSIDIARIOS





# Contenido

3  
12  
17  
26  
32



## Editorial

Una alternativa de solución para eliminar en sitio la corrosión bajo abrazaderas ancla en los ductos ascendentes en las plataformas marinas de producción

## Evaluación de la Calidad Radiográfica

El análisis de decisiones y sus principales herramientas de modelación

## Disminuyendo el riesgo Vs. "SCC" y "SC"

Determinación experimental de las propiedades termofísicas en aceros API5L-X52, usando técnica fotoacústica.

## Eventos especiales

## Cartas a la Redacción



# Determinación experimental de las propiedades termofísicas en aceros API5L-X52, usando técnica fotoacústica

Autores: Oscar Flores-Macias, G. Peña-Rodríguez, A. Calderón y R.A. Muñoz-Hernández

## Resumen

En este trabajo se reportan mediciones experimentales de las propiedades termofísicas (difusividad y efusividad térmica) en aceros API5L-X52. La determinación de estos parámetros termofísicos se realizó usando la técnica fotoacústica en configuración de transmisión y difusión de calor. Los valores de la conductividad térmica y el calor específico por unidad de volumen se determinaron a partir de los valores obtenidos para la difusividad y la efusividad térmica y la relación que existe entre éstos.

## Introducción

El conocimiento de las propiedades físicas y químicas de los materiales es de un interés relevante en los criterios de selección de los mismos para cada determinada aplicación. La importancia del conocimiento de las propiedades mecánicas, térmicas y estructurales en un material, son cruciales en el uso de diversas aleaciones industriales, en particular en aquellos materiales que son sometidos a condiciones extremas de seguridad. En particular, en los procesos de diseño y fabricación de ductos, las características y propiedades de los materiales elegidos impactarán, en buena medida, sobre las normas y especificaciones a tener en cuenta en la instalación, operación y mantenimiento de los sistemas de transporte de fluidos a través de ellos. En los últimos años, el estudio de la correlación entre propiedades mecánicas y térmicas ha sido de particular interés para las industrias de aceros y metales en general, y existen reportes recientes de estudios de correlación entre la dureza y la difusividad térmica ( $\alpha$ ) de diversos tipos de aceros [1, 2].

En México se mantiene en operación más de cincuenta mil kilómetros de ductos terrestres y alrededor de dos mil kilómetros en zonas submarinas, los cuales transportan petróleo y sus refinados [3], y es de vital importancia la seguridad e integridad en los ductos utilizados en el sistema de transporte de sus productos.

Motivados por lo anterior, y debido a que no hay reportes de las propiedades térmicas de los aceros con especificación 5L y grado X52 por la American Petroleum Institute (API) [4,5], en este trabajo reportamos la determinación experimental de la difusividad ( $\alpha$ ) y efusividad ( $\epsilon$ ) térmica a temperatura ambiente de este tipo de aceros. El calor específico por unidad de volumen



( $\rho c$ ) y la conductividad térmica ( $k$ ) de este material, se halló usando los valores encontrados para ( $\alpha$ ) y ( $\epsilon$ ). Para lo anterior se utilizó la técnica fotoacústica (FA) en una configuración de transmisión y difusión de calor, la primera para determinar ( $\alpha$ ) y la segunda para hallar ( $\epsilon$ ), la cual ha probado ser una poderosa herramienta precisa y versátil para la caracterización térmica en sólidos [6-11].

### Procedimiento Experimental

#### Preparación de las muestras

Se utilizó una cortadora de baja velocidad marca South Bay Technology (SBT-650) con discos de diamante Buehler 11-4244 para realizar cinco cortes de poco menos de 200 micras de espesor y  $1 \text{ cm}^2$  de área, a una sección sin costura de la pared de un tubo con costura y especificación API5L-X52 cuya composición química en porcentaje en peso dada por: 0.092 % C, 1.03 % Mn, 0.014 % P, 0.005 % S, < 0.005 % Nb, < 0.001 % V y < 0.002 % Ti. La uniformidad en la superficie de las muestras se realizó, usando maquina pulidora de baja velocidad SBT- 910 y discos de papel abrasivo Buehler 30-5118-240. Los espesores de las muestras (ver tabla 1) fueron medidos utilizando el micrómetro digital Mitutoyo 543-252. Las muestras limpias se colocaron en el interior de una campana de vidrio con silica gel, con el objetivo de evitar la presencia de algún tipo de oxidación en las superficies de las muestras.

#### Diseño Experimental

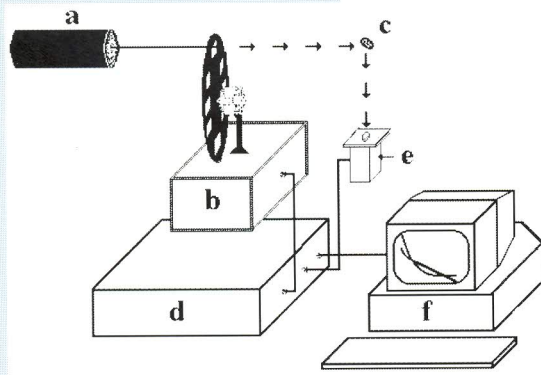


Figura 1. Diseño experimental de la técnica FA, a) Láser, b) Cortador óptico tipo chopper, c) Espejo, d) Amplificador tipo Lock-in, e) Celda FA, y f) Computadora.

En la figura 1, se presenta el diseño experimental de la técnica FA. En ésta la radiación que sale del láser se modula al pasar por el chopper, con ayuda de un espejo se hace incidir sobre la muestra, la cual se ha colocado

previamente sobre la celda FA usando grasa de vacío, la muestra absorbe la radiación modulada y genera en su interior una respuesta térmica la cual produce dentro de la cámara acústica variaciones de la presión, generando una señal acústica la cual es capturada por un sensible micrófono, esta señal es filtrada y amplificada por el lock-in, registrándose en la computadora la amplitud de esta señal en función de la frecuencia de modulación de la radiación incidente. En este diseño experimental se utilizó un láser de argón Omnichrome 543-BS-A2, chopper SR-540 y lock-in SR-850. La configuración de transmisión de calor en la celda FA se presenta en la fig. 2, la cual es utilizada para determinar ( $\alpha$ ). En la fig. 3, se presenta la configuración de difusión de calor, la cual se utilizó para hallar ( $\epsilon$ ), en ésta configuración, la muestra a estudio se adhirió a una muestra de plata de alta pureza marca Goodfellow de espesor  $l_{Ag} = 230 \text{ m}$  y de parámetros térmicos conocidos usando pintura de plata de alta pureza marca SPI #5001.

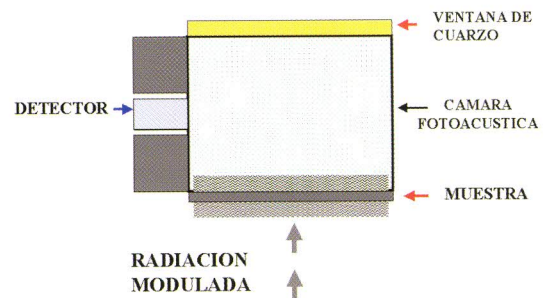


Figura 2. Configuración de transmisión de calor de la celda FA, utilizada para hallar ( $\alpha$ )

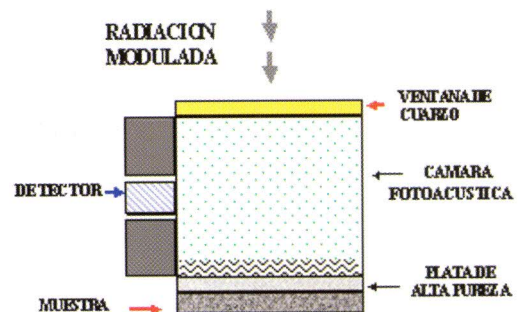


Figura 3. Configuración de difusión de calor de la celda FA, utilizada para hallar ( $\epsilon$ )

#### Aspectos teóricos

Para determinar ( $\alpha$ ), se realiza el ajuste a los datos experimentales de la amplitud de la señal FA en función de la frecuencia  $f$  de modulación de la radiación incidente, para la cual se usa la siguiente ecuación [7]:



(1)

$$A = C_0 \frac{\sqrt{f_c}}{f} \frac{1}{\sqrt{\cosh^2(\sqrt{f/f_c}) - \cos^2(\sqrt{f/f_c})}}$$

Donde  $f_c$  es la frecuencia de corte o característica de la muestra, la cual es igual a la frecuencia de modulación para la cual la longitud de difusión térmica y el espesor de la muestra son iguales, y  $C_0$  es una constante dada por:

(2)

$$C_0 = \frac{\gamma P_0 \beta I_0 \eta l}{4k_s T_0 l_g \sqrt{\pi}}$$

Donde  $\gamma$  es la razón de los calores específicos del aire,  $P_0$  la presión ambiental,  $\beta$  el coeficiente de absorción óptico de la muestra,  $I_0$  es la intensidad de la luz,  $\eta$  es la razón de la energía incidente y la absorbida por la muestra,  $l$  el espesor de la muestra,  $k_s$  la conductividad térmica de la muestra,  $T_0$  la temperatura ambiente y  $l_g$  la longitud de la columna de aire de la celda fotoacústica.

Luego del ajuste a los datos experimentales usando la expresión (1) se obtiene  $f_c$  y por ende se obtiene  $\alpha$  del material, ya que  $f_c$ ,  $\alpha$  y el espesor de la muestra ( $l$ ) están relacionadas por la siguiente expresión:

(3)

$$\alpha = \pi f_c l^2$$

Para la determinación de la muestra, se determina el parámetro  $b$  del ajuste a los datos experimentales para la amplitud de la señal FA en función de la frecuencia  $f$  de modulación usando la expresión [12]:

(4)

$$A = \frac{cte}{x} \left[ \frac{\sqrt{[(b+1)^2 e^{2\sqrt{x}} - (b-1)^2 e^{-2\sqrt{x}}]^2 + [2(b+1)(1-b)\text{sen}(2\sqrt{x})]^2}}{[(b+1)^2 e^{2\sqrt{x}} + (b-1)^2 e^{-2\sqrt{x}}] + [2(b+1)(b-1)\text{Cos}(2\sqrt{x})]} \right]$$

Donde  $x = f/f_c$ , con  $f_c$  la frecuencia de corte de la muestra de plata (ver figura 3) cuyo valor reportado para una muestra de espesor de 230 m es  $f_c = 1047$  Hz [13]. El parámetro  $b = \epsilon_s/\epsilon_{Ag}$  es la razón de las efusividades de la muestra en estudio ( $\epsilon_s$ ) a la de la muestra de plata ( $\epsilon_{Ag}$ ). Por lo tanto de (4) se obtiene el parámetro  $b$  al ajustar los datos experimentales, del cual se despeja la efusividad térmica de la muestra en estudio  $\epsilon_s$ . Para lo anterior se utilizó el resultado de la efusividad térmica de la plata reportado en la literatura  $\epsilon_{Ag} = 3.25 \cdot 10^{-3} \text{ W S}^{1/2} \text{ cm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  [13].

Resultados y Discusión

En la tabla 1, se presentan los resultados experimentales de la difusividad y efusividad térmica de las cinco muestras de aceros API5L-X52. En ésta se puede ver que la rapidez con la que el flujo de calor se propaga a través del material no tiene una variación significativa entre una y otra muestra, obteniéndose un valor promedio para  $\alpha$  de  $0.116 \text{ cm}^2/\text{s}$  con un error aproximado del 5%.

De los valores de ( $\alpha$ ) reportados para otros tipos de aceros a bajo carbón se puede ver que a medida que la concentración de carbono y manganeso aumenta el valor de ( $\alpha$ ) disminuye, y que éste valor es del orden del 50% el valor de ( $\alpha$ ) para el hierro puro [13, 14]. Lo anterior nos permite corroborar que el valor obtenido de ( $\alpha$ ) para las muestras a estudio en este trabajo son del orden de los reportados para los aceros a bajo carbón (ver tabla 2).

Tabla 1. Difusividad y efusividad térmica de las muestras de aceros API5L-X52.

Muestras	$l_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$\alpha \times 10^{-3}$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	$\epsilon$ ( $\text{w.S}^{1/2} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )
A1	167 3	118 5	1.38 0.008
A2	170 3	116 5	1.35 0.020
A3	175 6	116 6	1.29 0.008
A4	176 3	116 5	1.38 0.016
A5	170 5	115 6	1.29 0.014

Tabla 2. Valores de ( $\alpha$ ) a temperatura ambiente reportados para el hierro puro y algunos tipos de aceros al carbón manganeso [13, 14].

Muestras	C (% Wt)	Mn (% Wt)	$\alpha \times 10^{-3}$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
He Pure	-	-	227
SAE 1010	0.1	0.42	191
AISI 1018	0.18	~ 0.50	165
AISI 1020	0.20	~ 0.60	130

El ajuste a los datos experimentales usando la expresión (1) se presenta en la figura 4, éste se realizó con ayuda del software Origin 6.0. En esta figura, se puede apreciar un excelente ajuste de los datos experimentales en un rango de 90 a 140 Hz, a la expresión (1), lo cual se refleja en el valor de la desviación cuadrática media del ajuste a los datos experimentales que fue del orden de  $10^{-6}$ , lo anterior garantiza confiabilidad en los resultados encontrados.



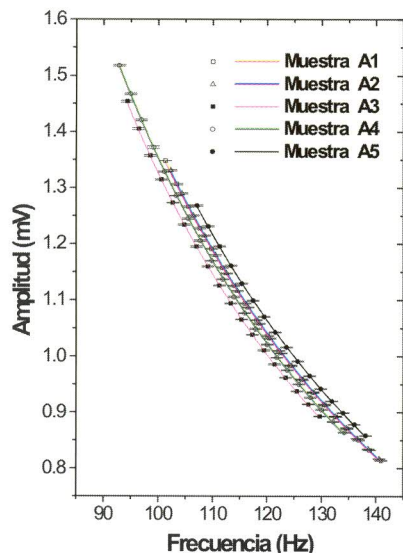
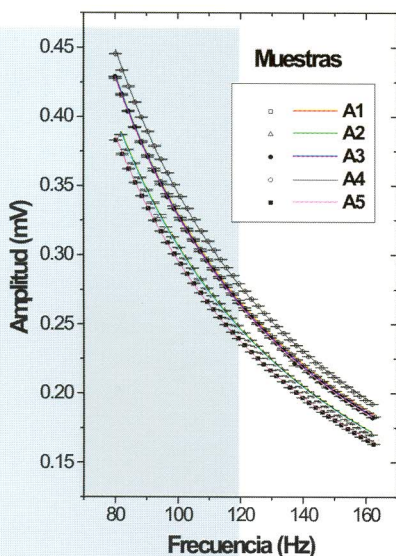


Figura 4. Amplitud de la señal FA vs frecuencia, utilizado para hallar ( $\alpha$ ) de las muestras de acero API5L-X52, la curva sólida indica el mejor ajuste de la ecuación (1) a los datos experimentales.

La capacidad de intercambiar calor de las muestras con su entorno ( $\epsilon$ ), (ver tabla 1), da un valor promedio de  $1.34 \text{ W.S}^{1/2} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  con un error no mayor al 3%. Si se compara este valor con el reportado para el acero AISI 1010 ( $\epsilon = 1.47 \text{ W.S}^{1/2} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ) [13], podemos ver que se encuentran en el mismo orden de magnitud, lo cual nos garantiza que nuestro valor reportado para ( $\epsilon$ ) es confiable.



En la figura 5, se presenta el ajuste de los datos experimentales usando la expresión (4), para la determinación de ( $\epsilon$ ), donde se puede observar un muy buen ajuste de los datos experimentales ya que la desviación cuadrática media del ajuste a los datos experimentales fue del orden de  $10^{-7}$ .

La determinación de  $k$  y  $\rho c$  de las muestras (ver tabla 3), se obtuvo a partir de los valores de ( $\alpha$ ) y ( $\epsilon$ ) para lo cual se utilizó la relación dada por

$$k = \epsilon \sqrt{\alpha} \quad \text{y} \quad \rho c = \epsilon / \sqrt{\alpha} \quad [13].$$

De los resultados de la tabla 3, se puede apreciar que el valor promedio de  $k$  y  $\rho c$  es de  $0.46 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  y  $3.9 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$  respectivamente, con un error inferior al 5%. Al compararse estos valores de  $k$  y  $\rho c$  con los reportados para otros tipos de aceros a bajo carbón se puede apreciar que están dentro del mismo orden, lo cual muestra que los resultados encontrados en este trabajo para estos parámetros termofísicos son confiables desde el punto de vista experimental [15, 16].

Tabla 3. Conductividad térmica y calor específico por unidad de volumen de las muestras de aceros API5L-X52.

Muestras	$k$ ( $\text{w} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$\rho c$ ( $\text{J} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ )
A1	0.47 0.01	4.02 0.2
A2	0.46 0.02	3.96 0.3
A3	0.44 0.01	3.79 0.2
A4	0.47 0.01	4.05 0.2
A5	0.44 0.01	3.80 0.2

### Conclusiones

En este trabajo se reportan por primera vez las propiedades térmicas a temperatura ambiente de aceros de bajo carbón en la especificación 5L y grado X52 de la API. Estas propiedades térmicas se determinaron usando la técnica FA en las configuraciones de transmisión y difusión de calor, y los resultados son reportados en las tablas 1 y 3 respectivamente. Así mismo se observa que nuestros resultados para las propiedades térmicas de las muestras en estudio, se encuentran dentro de los valores reportados para las propiedades térmicas de otros tipos de aceros a bajo carbón, lo cual junto con las desviaciones cuadráticas medias encontradas en el ajustes de los datos experimentales que son del orden de  $10^{-6}$ , muestran confiabilidad y seguridad en los valores reportados en este trabajo.

Dentro de las perspectivas está el utilizar los valores reportados para la difusividad térmica, y los datos microestructurales (tamaño de grano y composición química), para predecir la dureza de este tipo de aceros y comparar estos resultados con lo reportado para la dureza de estos materiales. Así mismo estos resultados experimentales encontrados para este tipo de acero serán



utilizados por el grupo de investigación a cargo del proyecto D.0049 del IMP, dentro de los procesos de simulación para determinar la confiabilidad estructural en tubos de este tipo de acero.

#### Agradecimientos

Los autores agradecemos al biólogo Ignacio Martínez Loza por su colaboración en los procesos de preparación de las muestras, y en especial a la competencia de seguridad y operación en ductos a través del proyecto D.00049 del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP).

#### Bibliografía

1. D. Fournier, JP Roger, A. Bellouati, C. Boué, H. Stam y F. Lakestani. *Analytical Science*. Vol 17. s158-s160, (2001).
2. H. G. Walther, D. Fournier, J.C. Krapez, M. LuuKKala, B. Schmitz, C. Sibilia, H. Stamm y J. Thoen. *Analytical Science*. Vol 17. s165-s168, (2001).
3. "La investigación en el Instituto Mexicano del Petróleo", IMP, 107, (2000).
4. Comunicación vía e-mail con Mike Spanhel Coordinator, Upstream Standards, American Petroleum Institute, 1220 L Street, NW, Washington, DC 20005-4070 Tel.202-682-8292, Fax. 202-962-4797, E-mail [spanhel@api.org](mailto:spanhel@api.org)
5. Comunicación vía e-mail con Marie T Brisman. NACE International. Member Service Department. E-mail: [marie@mail.nace.org](mailto:marie@mail.nace.org)
6. A. Calderón, R.A. Muñoz Hernández, S.A. Tomás, A. Cruz Orea y F. Sánchez Sinencio. *J. Appl. Phys.* Vol. 34, 6327-6329, (1998).
7. G. Peña Rodríguez, A. Calderón Arenas, R.A. Muñoz Hernández, S. Stolik, A. Cruz Orea y F. Sánchez Sinencio. *Analytical Science*. Vol. 17, s357-s360, (2001).
8. A. Calderón, J.J. Alvarado, Yu. G. Gurevich, A. Cruz Orea, I. Delgadillo H. Vargas y L.C.M. Miranda. *Physical Review Letters*. Vol. 79 (25) 5022-5025 (1997).
9. A. Calderón, R. A. Muñoz Hernández, J. F. Sánchez, J. L. Herrera, A. Cruz y F. Sánchez Sinencio. *High Temperature-High Pressures*, Vol. 32, 355-360, (2000)
10. A. M. Mansanares, A.C. Bento, H. Vargas, N.F. Leite y L.C. M. Miranda, *Phys. Rev. B* 42, 4477 (1990).
11. E. Marín, J.L. Pichardo, A. Cruz-Orea, P. Diaz, G. Torres-Delgado, I. Delgadillo, J.J. Alvarado-Gil, J. G. Mendoza-Alvarez y H. Vargas. *J. Phys. D* 29, 981 (1996)
12. Gabriel Peña Rodríguez. Tesis Maestría, ESFM-IPN (2000).
13. D.P. Almond and P.M. Patel. "Photothermal science and techniques", p. 16-17, Chapman & Hall. London (1996).
14. Y. S. Touloukian, *Thermophysical Properties of Matter*. Vol. 10. New York-IFI/Plenum. (1973)
15. Y. S. Touloukian, *Thermophysical Properties of Matter*. Vol. 1. New York-IFI/Plenum. (1973)
16. Y. S. Touloukian, *Thermophysical Properties of Matter*. Vol. 9. New York-IFI/Plenum. (1973)