

SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



**MEMORIAS DEL
CONGRESO INTERNACIONAL
DE METALURGIA Y MATERIALES**

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

ISSN: 2007-9540

**36 CIMM NOVIEMBRE 2014
SALTILLO COAH. MEXICO**

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SALTILLO

**MEMORIAS DEL CONGRESO INTERNACIONAL DE
METALURGIA Y MATERIALES**

36

EDITOR

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

COMPILADOR

DR. JAIME ENRIQUE PÉREZ TERRAZAS

Revista Electrónica

ISSN: 2007-9540

Saltillo, Coahuila, México

Determinación de la constante acústico-elástica en aceros cementados 4320 y soldados por el proceso GMAW

Determination of the acoustic-elastic constant in the 4320 cemented steels and welded by the GMAW process.

M. A. Solís-Álvarez^{*1}, H.M. Hdz-García¹, F. García-Pastor², I. Medina², Fernando Martínez-Díez³

¹Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V., Ciencia y Tecnología No. 790 Fracc. Saltillo 400; Saltillo, Coah. CP. 25290. mario.solis@comisa.com*

²Cinvestav IPN Unidad Saltillo. Ave. Industria Metalúrgica No. 1062, Parque Industrial Saltillo-Ramos Arizpe, Ramos Arizpe, Coah. CP. 25900

³Caterpillar México S.A. de C.V. Carretera a villa García Km 4.5 P. O. Box 237 Santa Catarina N. L. 66350 MX

Resumen

Las ondas acústicas generadas por un equipo de ultrasonido se propagan en dos ondas: 1) longitudinales y 2) transversales. Las primeras, muestran perturbaciones por una tensión normal y las segundas son perturbadas por tensiones de cizallamiento. Por lo tanto, en este trabajo de investigación mediante el análisis de las ondas ultrasónicas, se llevó a cabo la medición de la constante acústico-elástica usando un equipo de ultrasonido para correlacionar los esfuerzos residuales con las constantes acústico-elástico durante el calentamiento y enfriamiento de muestras de aceros 4320 soldados por el proceso GMAW. Los resultados de la constante acústico-elástica muestran que el acero tiene un valor de 2.37 durante el calentamiento y 2.18 en el enfriamiento. Estos valores muestran la correlación del efecto del esfuerzo térmico con la velocidad de propagación de la onda de ultrasonido (viaje) en el acero, es decir, a mayor temperatura, la onda tarda más en recorrer la muestra de acero, indicando deformación. En contraste, en el enfriamiento la velocidad de onda es más rápida, el cual indica menor deformación. Cabe mencionar que la determinación de la constante acústico-elástica se midió en aceros con granos austeníticos de 8.92 ASTM, previamente medido.

Abstract

The acoustic waves can be transfer by an ultrasonic equipment as: 1) longitudinal and 2) across. The first one can detect perturbations due to the normal-stress and, the second one by the strain-stress. So, in this work using analysis of ultrasonic waves was carried out the measurement of the acoustic-wave constant by an ultrasonic equipment in order to calculate the correlations of residual-stresses with the acoustic-waves during the heating and cooling of specimens of 4320 cemented steels and welded by the GMAW process. The results of acoustic-wave constant showed that the steels have a value of 2.37 during the heating and 2.18 in the cooling. These values show the correlation of effect of the thermal stress as a function of the rate of wave propagation is higher during the heating than the cooling. At high temperature the constant increases due to that the rate of wave is slower than at below temperature, it means that during the heating there is strain. It is important to mention that the steels had a grain size of 8.92 ASTM, previously measurement.

Palabras clave: Ultrasonido, Esfuerzos Residuales, Velocidad de Onda, Soldadura, Soldadura GMAW

1.Introducción

La soldadura es un proceso ampliamente utilizado en la industria aeroespacial nuclear y construcción. Sin embargo, una alta cantidad de calor de entrada y un rápido enfriamiento conlleva a la generación de esfuerzos residuales. Estos afectan las propiedades mecánicas y la resistencia a la fatiga de los materiales soldados. Por lo tanto, es indispensable emplear diferentes métodos de medición para conocer la magnitud y tipo de esfuerzo residual: transformación de fase, térmico, etc. En este contexto, se tienen dos métodos de medición de esfuerzos residuales: 1) no destructivo y 2) destructivo. El segundo, se lleva a cabo por la destrucción del equilibrio de los esfuerzos residuales y, en consecuencia, se obtiene la relajación de los mismos por la destrucción del estado de equilibrio de los esfuerzos residuales presentes en el componente, dentro de estos métodos se clasifica el de holle drilling. En el caso de los métodos no destructivos se clasifican dentro de ellos la difracción de rayos X, difracción de electrones, técnicas de interferometría y ultrasonido. Una de las principales variables para medir los esfuerzos residuales por el método de ultrasonido, es la determinación de la constante acústico elástica del material. Debido a que esta varía dependiendo de la microestructura del material [1] [2] [3] [4] [5].

Por lo tanto, en este trabajo se llevó a cabo la determinación de la constante acústico-elástico en las etapas de calentamiento y enfriamiento de un acero 4320 cementado y soldado por GMAW. Con el fin de correlacionar los cambios en la propagación de onda con pequeños esfuerzos residuales debido al proceso de calentamiento y enfriamiento del acero.

2. Desarrollo experimental

2.1 Tratamiento térmico del acero 4320 y caracterización metalográfica del acero

Se utilizó un acero 4320 que es empleado en el rodamiento de un equipo de minería. Este material tiene un proceso de cementado para incrementar la dureza superficial. En este proceso de cementación, conlleva una serie de tratamientos térmicos de temple y revenido. Por lo tanto, las muestras de acero 4320 se cementaron y trataron térmicamente en hornos marca Afc-Holcrof-Mattsas. En el proceso de cementado, se programaron tres rampas de calentamiento: 1) 0 a 60°C por 80 min, 2) 60 a 160°C por 45 min y 3) 160 a 270°C por 45 min. El tiempo del proceso de cementación fue de 10 h en una atmósfera gaseosa endotérmica rica en metano. Posteriormente, el acero cementado, se precalentó a 865°C por 90 min y se enfrió mediante inmersión en agua que previamente oscilada entre 40 y 56°C. En la etapa del revenido, el acero templado se revino a 180°C por 110 min. Cabe señalar que la composición química del acero antes del proceso de cementación, se analizó por espectroscopía de absorción atómica. Así mismo, se preparó una muestra por etapas de desbaste, pulido y ataque químico con Nital 2 para revelar la microestructura resultante y, analizarla por microscopía óptica. Por otro lado, con el fin de determinar que en la etapa de los tratamientos térmicos del rodamiento no se originan los esfuerzos residuales, se determinó el tamaño de grano austenítico antes y después del proceso de cementado y tratamiento térmico. Este consistió en realizar una preparación metalográfica para revelar microestructura por ataque térmico en un horno marca Thermolyne. La medición del tamaño de grano se realizó en diez campos.

2.2 Soldadura por GMAW.

En este caso, se empleó el proceso de soldadura por arco gas metal para 5 muestras empleando un micro-alambre ER70S-3 de 1.1 mm de espesor, así mismo, una máquina Miller Delta-Well 652, pistola y punta-contacto de uso rudo marca Tregasqui. En este proceso de soldadura, las muestras de aceros se pre-calentaron a 127°C empleando seis pasadas a 30 V, 280 A y a una velocidad de alimentación de 13.5 m/min. Así mismo, se empleó una mezcla de gas de protección 80/20 (Ar/CO₂) a un flujo de 24 L/min.

Posteriormente, se colocó una colcha cerámica Velvet Shield Blanket para retardar la velocidad de enfriamiento.

2.3 Procedimiento de la medición de la constante acústico-elástico

Para obtener la constante acústico-elástica durante el calentamiento y enfriamiento del acero, se utilizaron 5 muestras de acero 4320 de 200 X 100 X 18 mm, preparados como se describió en el punto 2.2. Estas se calentaron en incrementos de 10 °C, 22 °C hasta 142 °C, usando una plancha de calentamiento marca Struers. En cada incremento se calculaba el tiempo de recorrido de onda ultrasónica en modo pulsado empleando un equipo y transductor lineal plano marca Omniscan y, como acoplante se utilizó un aceite SAE 40. Posteriormente, se realizó el mismo procedimiento pero enfriando la pieza de 142°C a 22 °C. La adquisición de estos datos se calcula la velocidad de recorrido de la onda de acuerdo a la ASTM E494-10, ecuación (1). Por otro lado, se calcula el esfuerzo térmico en las probetas en cada incremento de temperatura con la ecuación 2. Finalmente, se realiza una regresión lineal entre el esfuerzo térmico y la velocidad de propagación de la onda de ultrasonido. Con el fin de determinar la pendiente de la ecuación de la línea o el coeficiente de la variable de entrada. En este caso el esfuerzo térmico y la respuesta velocidad de recorrido para poder determinar el coeficiente de expansión térmica del material.

$$V = \frac{2d}{t} \quad (1)$$

Donde V, la velocidad propagación de la onda (mm/μs); d, el espesor (mm) y t, el tiempo de vuelo de la onda ultrasónica (μs).

$$\sigma = E\alpha_L\Delta T \quad (2)$$

Donde σ , es el esfuerzo termico (N/m²); α_L , es coeficiente de expansión térmica (°C⁻¹) y ΔT , es cambio de temperatura (°C).

3.Resultados y discusiones

3.1 Caracterización metalográfica del acero 4320 antes y después del proceso de cementado

La tabla 1 muestra la composición química del acero 4320 realizado por la técnica de chispa. De acuerdo al contenido de carbono se clasifica un acero de bajo carbono. Estos

aceros son susceptibles de realizar métodos de endurecimiento superficial, en este caso por cementación. Se menciona de forma relevante los contenidos mayores a 1 % de Mn, ya que incrementan la resistencia la tenacidad del acero.

Tabla 1. Composición química del rodamiento de acero 4320 analizado por la técnica de chispa.

| Elem (%) | C | S | Mn | P | Si | Cr | Ni | Mo | Cu | V | Nb | Ti | W |
|------------|-----|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|--------|--------|-------|--------|
| Acero 4320 | 0.2 | 0.021 | 1.21 | 0.014 | 0.24 | 0.61 | 0.09 | 0.11 | 0.186 | <0.004 | <0.004 | 0.031 | <0.002 |

Observaciones por microscopía óptica muestran un acero revenido con fases de martensita revenida, perlita y austenita retenida (fig. 1).

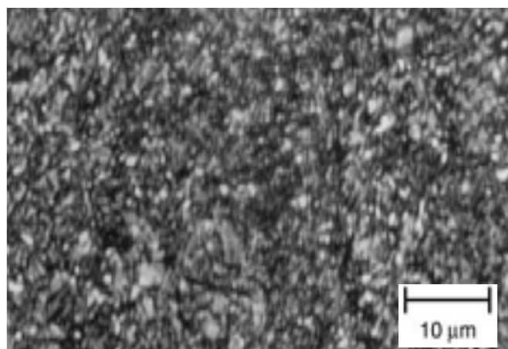


Figura 1. Imagen por microscopía óptica de un acero 4320 revenido y atacado químicamente con Nital 2.

La figura 2 (a) y (b) muestra el grano austenítico antes y después del proceso de cementación y tratamiento térmico. El tamaño de grano es indispensable en los procesos de cementación debido a que un tamaño de grano ASTM menor permite transformaciones completas de fases y una mejor homogeneización de granos. Con el fin de descartar que los procesos de cementación y sus respectivos tratamientos térmicos no fueran mal aplicados, el tamaño de grano promedio en el acero es de 8.92 ASTM (fig. 3). En base a este resultado de grano, indica que el proceso del rodamiento de acero antes de la soldadura GMAW está bien controlado.

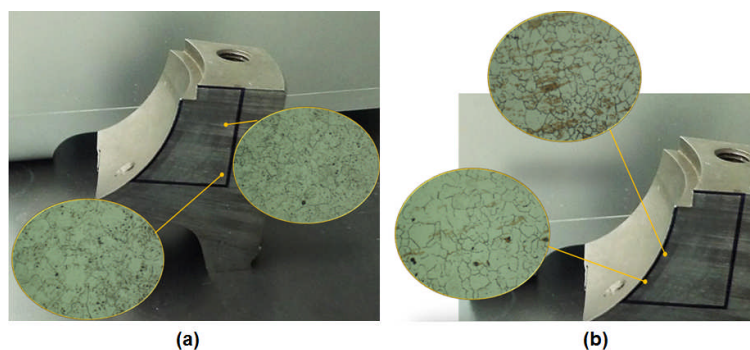


Figura 2 (a) y (b). Imágenes por microscopía óptica de granos austeníticos. **a)** Antes del cementado y **b)** después del cementado.

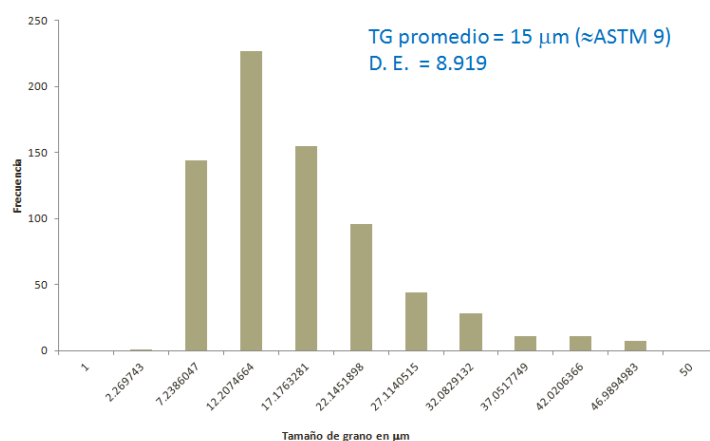


Figura 3. Gráfico de barras de la medición de tamaños de grano medido en aceros 4320

3.2 Análisis de la constante acústico-elástico

Antes de analizar los resultados, reportes en la literatura sugieren [6-13] que las ondas acústicas generadas por un equipo de ultrasonido en un material idealizado isotrópicamente se propagan dos ondas: 1) longitudinales y 2) transversales. Las ondas longitudinales son una perturbación ocasionada por una tensión normal y, el desplazamiento de las partículas del material ocurre en la misma dirección de propagación de la perturbación. Mientras que las ondas transversales son ocasionadas por tensiones de cizallamiento y, el desplazamiento de las partículas ocurre en el plano perpendicular a la propagación. Mediante el análisis de las ondas ultrasónicas, es factible determinar el comportamiento elástico de los materiales isotrópicos, a través de la medición de la velocidad de propagación de las ondas. Donde las ondas longitudinales presentan una velocidad de propagación de aproximadamente la mitad de la generada por una onda transversal. La velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas puede

variar dentro de un rango muy estrecho a consecuencias de factores ambientales como la temperatura o por factores internos del material: esfuerzos residuales o tipo de microestructura.

En base a lo anterior, la técnica de ultrasonido, para la estimación de esfuerzos residuales a bajas temperaturas, se basa en el efecto acústico-elástico de acuerdo a reportes en la literatura [9, 10, 11]. Debido a que la velocidad de propagación de la onda elástica a través de un sólido, depende directamente de los esfuerzos mecánicos. Por lo que cualquier cambio en la constante elástica por efecto de un esfuerzo aplicado o residual, se manifiesta en la variación de la velocidad de propagación de la onda. El método empleado para medir la velocidad de la onda ultrasónica, se basa en la medición del tiempo de vuelo o en la medición de la frecuencia de la misma. Porque con la variación del estado de los esfuerzos en función del espesor del material también varía, en consecuencia, la longitud de la trayectoria de la onda se modificará. Por lo que la relación entre el tiempo de vuelo y el esfuerzo en el plano está dada por la ecuación (3).

$$\sigma = \frac{E(t-t_0)}{(\nu+KE)t_0} \quad (3)$$

Donde σ , es el esfuerzo (N/m²); E es el modulo de elasticidad (N/m²), t y t₀ son el tiempo de vuelo con y sin la presencia de esfuerzos, respectivamente (μs); ν , es el coeficiente de Poisson y K, es la constante acústico-elástico.

Cabe mencionar que esta constante acústico-elástica es calculada observando la variación de la velocidad de la onda de acuerdo a la ecuación (2). Por otro lado, este principio se desarrolló mediante la técnica de ultrasonido computarizado para la evaluación de esfuerzos residuales. Este es capaz de evaluar de manera superficial y volumétrica la cantidad de esfuerzos generados en un componente. [7-10]

La tabla 2 resume los valores medidos por el equipo de ultrasonido en el rango de temperaturas de 22 a 142°C. Se aprecia que a raíz de que aumenta la temperatura de la probeta el tiempo propagación de la onda también aumenta, por ende la velocidad de recorrido de la onda, es decir, si el esfuerzo térmico aumenta la velocidad de la onda disminuirá. En los cálculos se mantienen constantes el coeficiente de expansión térmica y el módulo de elasticidad. En la figura 4 se muestra la pendiente obtenida por la relación esfuerzo térmico velocidad de onda que describe la relación de cómo el esfuerzo térmico influye en la velocidad de propagación de la onda. Se aprecia un cambio de pendiente en

el rango de 0.036 a 0.062 debido a la dilatación del material. Estos valores indican que a mayores esfuerzos térmicos existe una menor velocidad de propagación de la onda. Cabe mencionar que la constante acústico elástica se utiliza para determinar los esfuerzos residuales por medio de la técnica de ultrasonido en la ecuación 3.

Tabla 2. Velocidades de recorrido y esfuerzos térmicos (calentamiento)

| TEMP °C | TIEMPO μ s | VEL mm/ μ s | CET α °C ⁻¹ | ME E exp 10 N/m ² m | ET= α E Δ T exp 10 N/m ² m | $y=(V-V_0)/V_0$ mm/ μ s |
|---------|----------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------------|---|-----------------------------|
| 22 | 6.040 | 5.9602649 | 0.000013 | 20.6 | 0 | 0 |
| 32 | 6.120 | 5.88235294 | 0.000013 | 20.6 | -0.002678 | -0.013071895 |
| 42 | 6.150 | 5.85365854 | 0.000013 | 20.6 | -0.005356 | -0.017886179 |
| 52 | 6.270 | 5.74162679 | 0.000013 | 20.6 | -0.008034 | -0.036682616 |
| 62 | 6.360 | 5.66037736 | 0.000013 | 20.6 | -0.010712 | -0.050314465 |
| 72 | 6.410 | 5.61622465 | 0.000013 | 20.6 | -0.01339 | -0.057722309 |
| 82 | 6.440 | 5.59006211 | 0.000013 | 20.6 | -0.016068 | -0.062111801 |
| 92 | 6.450 | 5.58139535 | 0.000013 | 20.6 | -0.018746 | -0.063565891 |
| 102 | 6.480 | 5.55555556 | 0.000013 | 20.6 | -0.021424 | -0.067901235 |
| 112 | 6.490 | 5.54699538 | 0.000013 | 20.6 | -0.024102 | -0.069337442 |
| 122 | 6.520 | 5.52147239 | 0.000013 | 20.6 | -0.02678 | -0.073619632 |
| 132 | 6.560 | 5.48780488 | 0.000013 | 20.6 | -0.029458 | -0.079268293 |
| 142 | 6.610 | 5.44629349 | 0.000013 | 20.6 | -0.032136 | -0.08623298 |
| 152 | 6.630 | 5.42986425 | 0.000013 | 20.6 | -0.034814 | -0.088989442 |

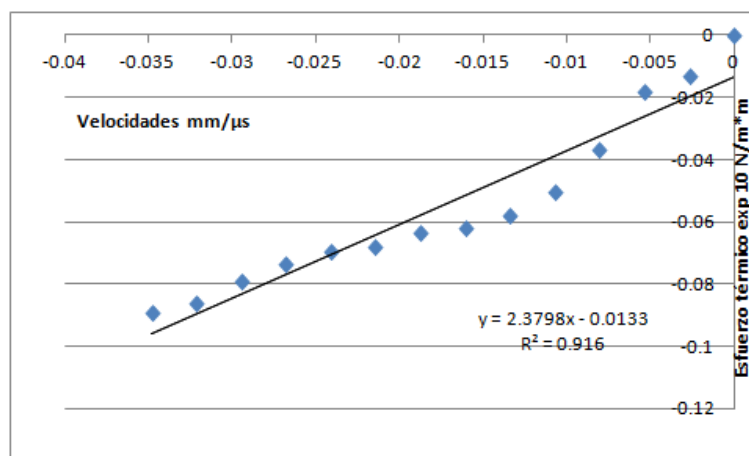


Figura 4. Regresión lineal que muestra relación de velocidad de propagación y esfuerzo térmico, ajuste (R^2), valor de la constante acústico elástica (pendiente de la línea o β_0) (Calentamiento)

En contraste, la medición de la constante acústica-elástica en el enfriamiento se resume en la tabla 3. Se observa que al disminuir la temperatura en el acero, la velocidad de onda se eleva, lo que significa que el esfuerzo térmico disminuye. Así mismo, en la fig. 5, se

aprecia cambios en el ajuste, debido a que el material se está relajando al disminuir la temperatura. No obstante, al no controlar el enfriamiento, se presentan ciertas deformaciones que no estaban presentes durante el incremento de la temperatura durante el calentamiento del acero.

Tabla 3. Velocidades de recorrido y esfuerzos térmicos (Enfriamiento)

| TEMP °C | TIEMPO μ s | VEL mm/ μ s | CET α °C ⁻¹ | ME E exp 10 N/m ² *m | ET= α E Δ T exp 10 N/m ² *m | $y=(V-V_0)/V_0$ mm/ μ s |
|---------|----------------|-----------------|-------------------------------|---------------------------------|--|-----------------------------|
| 142 | 6.620 | 5.43806647 | 0.000013 | 20.6 | 0 | 0 |
| 132 | 6.600 | 5.45454545 | 0.000013 | 20.6 | 0.002678 | 0.003030303 |
| 122 | 6.610 | 5.44629349 | 0.000013 | 20.6 | 0.005356 | 0.001512859 |
| 112 | 6.606 | 5.44959128 | 0.000013 | 20.6 | 0.008034 | 0.002119285 |
| 102 | 6.590 | 5.46282246 | 0.000013 | 20.6 | 0.010712 | 0.004552352 |
| 92 | 6.580 | 5.47112462 | 0.000013 | 20.6 | 0.01339 | 0.006079027 |
| 82 | 6.510 | 5.52995392 | 0.000013 | 20.6 | 0.016068 | 0.016897081 |
| 72 | 6.490 | 5.54699538 | 0.000013 | 20.6 | 0.018746 | 0.020030817 |
| 62 | 6.470 | 5.56414219 | 0.000013 | 20.6 | 0.021424 | 0.023183926 |
| 52 | 6.410 | 5.61622465 | 0.000013 | 20.6 | 0.024102 | 0.03276131 |
| 42 | 6.320 | 5.69620253 | 0.000013 | 20.6 | 0.02678 | 0.047468354 |
| 32 | 6.240 | 5.76923077 | 0.000013 | 20.6 | 0.029458 | 0.060897436 |
| 22 | 6.160 | 5.84415584 | 0.000013 | 20.6 | 0.032136 | 0.074675325 |

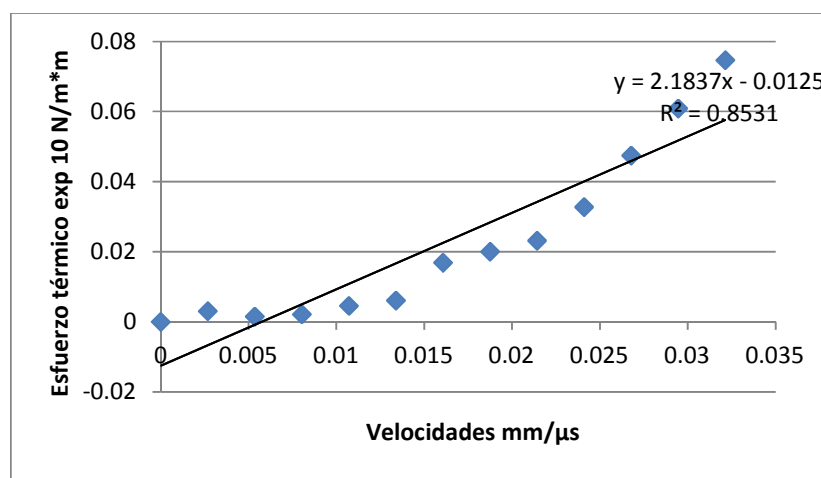


Figura 5. Regresión lineal que muestra relación de velocidad de propagación y esfuerzo térmico, ajuste (R^2), valor de la constante acústico elástica (pendiente de la línea o β_0) (Enfriamiento)

4. Conclusiones

Al realizar el calentamiento en la muestra de acero para obtener la constante acústico elástica del acero, el tiempo de recorrido de la onda se incrementa, por lo tanto, la