

EVALUACIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES EN SEMIEJE TUBULAR DE JUNTA HOMOCINÉTICA POR EL MÉTODO DEL ANILLO DIVIDO

EVALUATION OF RESIDUAL STRESSES IN TUBULAR HALF-SHAFTS OF CONSTANT VELOCITY JOINTS BY THE SPLIT-RING METHOD

Francisco Arturo Ramírez Hernández

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
M2003034@itcelaya.edu.mx

Luis Daniel Aguilera Camacho

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
daniel.aguilera@itcelaya.edu.mx

Benjamín Arroyo Ramírez

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
benjamin.arroyo@itcelaya.edu.mx

Recepción: 28/septiembre/2021

Aceptación: 30/noviembre/2021

Resumen

La presente investigación se enfocó en la determinación de los esfuerzos residuales generados en un tubo de pared gruesa sin costura, del cual se fabrican los semiejes tubulares de las juntas homocinéticas. Para ello, se aplicó el método del anillo dividido (Split Ring) en una probeta de acero aleado modificado de 36 mm de diámetro exterior. La determinación del esfuerzo residual inducido en el tubo se realizó aplicando el método de la ranura (Split Ring) en base al postulado de Crampton y la norma ASTM 1928-13, comparando ambas metodologías en la obtención del esfuerzo residual. El promedio de los esfuerzos residuales obtenidos mediante la norma ASTM y el postulado de Crampton fue de 11923 y 12917 kPa, respectivamente. En base a los resultados se puede concluir que son mayores los esfuerzos residuales que se liberan con la longitud que sugiere Crampton, ubicándose en la parte exterior del tubo, ya que el diámetro exterior sufrió una expansión al realizarse la ranura.

Palabras clave: Esfuerzos residuales, anillo dividido, tubo sin costura, flecha homocinética.

Abstract

The present investigation focused on the determination of the residual stresses generated in a thick-walled seamless tube, from which the tubular half-shafts of the constant velocity joints are manufactured. For this purpose, the Split Ring method was applied on a modified alloy steel specimen of 36 mm outer diameter. The determination of the residual stress induced in the tube was carried out by applying the Split Ring method based on Crampton's postulate and ASTM 1928-13, comparing both methodologies in obtaining the residual stress. The average of the residual stresses obtained using the ASTM standard and Crampton's postulate was 11923 and 12917 kPa, respectively. Based on the results, it can be concluded that the residual stresses that are released with the length suggested by Crampton are greater, being located on the outside of the pipe, since the outer diameter underwent an expansion when the groove was made.

Keywords: Residual Stresses, Split Ring, Seamless Tube, Homokinetic Arrow.

1. Introducción

En los procesos de fabricación de tubos sin costura, éstos se generan por medio del proceso de estirado en frío del material, el cual comienza con una barra de acero que se convertirá en un tubo sin costura. La barra de acero se guía hacia un par de rodillos no paralelos, con diámetros exteriores variados, ambos rodillos girando al mismo sentido. El tocho es prensado por ambos rodillos, adquiriendo un avance helicoidal girando en sentido contrario de los rodillos, el avance empuja al tocho hacia una lanza estática, la cual provoca una abertura continua, desplazando el material del tocho hacia afuera, produciendo un perfil tubular de pared gruesa y diámetro interior calibrado y alisado [Alejandro 2017]. Dicho proceso genera distorsiones en el material, mismas que inducen esfuerzos que a simple vista no se consideran en el diseño y aplicación en la industria automotriz. Es común que debido a las distorsiones de los procesos de manufactura se induzcan esfuerzos

residuales que afectan las propiedades del material. Se produce una deformación plástica permanente en un metal al someterlo a un esfuerzo superior a su límite elástico. Al eliminar este esfuerzo y volver a producir uno nuevamente, el metal comenzará a deformarse de manera plástica. Se define el esfuerzo de flujo como el esfuerzo que se requiere para iniciar el flujo plástico en un material deformado con anterioridad [Hibbeler, 2011]. El ciclo de carga y descarga induce esfuerzos atrapados en las fibras internas del elemento, que oponen resistencia a los esfuerzos que deformaron plásticamente el material. En determinado momento el metal se endurece de modo que el esfuerzo de flujo, la resistencia a la tensión y la ruptura son iguales, siendo la ductilidad nula de manera que el material metálico no puede deformarse más de manera plástica. Al aplicar un esfuerzo que supera la resistencia a la deformación de un material metálico, este se endurece por deformación o trabajo en frío, y de manera simultánea se deforma [Jiménez Arenas 2016].

En la gran mayoría de casos al ocurrir una falla repentina en un elemento mecánico en la industria automotriz, es causada por la existencia de esfuerzos residuales. [Reséndiz, Calderón, 2011]. En ese sentido, la industria automotriz, en particular la industria de las transmisiones, en 1995 en Alemania registró pérdidas superiores a 850 millones de euros (mil millones de dólares) debido a las distorsiones por efecto del tratamiento térmico. El estudio realizado por Thoben no incluye el resto de Europa, Asia o América [D. Scott MacKenzie, 2016].

La transmisión en un vehículo juega un papel crucial en el funcionamiento de un automóvil, como su nombre lo dice, transmite la fuerza del motor a la caja de cambios y la convierte en rotación al llegar a las ruedas. La transmisión se somete a diferentes condiciones de trabajo, es por ello por lo que la flecha homocinética otorga total libertad a cada llanta de desplazarse de manera independiente, adaptándose al camino mientras transmite fuerza de rotación a la llanta, tal como se muestra en la figura 1 [SCHAEFFLER and RUVILLE 2018].

La evaluación de los esfuerzos residuales generados en una flecha homocinética, la cual es un componente de la transmisión de los vehículos automotrices, es de gran importancia para no sobre pasar los límites a los cuales este elemento puede

trabajar y sea un elemento que brinde seguridad. La evaluación de los esfuerzos residuales en los semiejes de las flechas homocinéticas marca la pauta para producir un componente de calidad, al conocer la magnitud de los esfuerzos, se determina si requiere un alivio o la reducción de dichos esfuerzos, con la finalidad de obtener un material robusto y seguro.

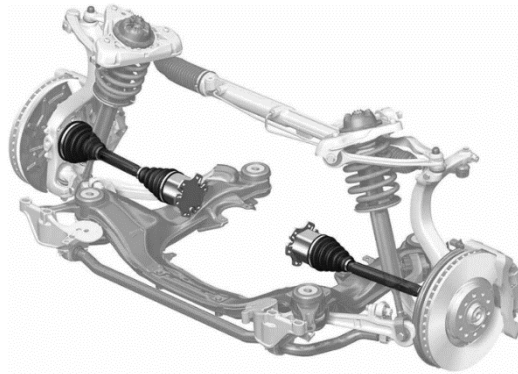


Figura 1 Juntas homocinéticas de tracción delantera [SCHAEFFLER, 2018].

2. Métodos

El tubo de acero sin costuras de pared gruesa que se utiliza como elemento de una flecha homocinética es una aleación con una composición química que se describe en la tabla 1, con un diámetro exterior de 36 mm y un espesor de pared de 6 mm.

Tabla 1 Composición química del acero.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	N	Ti	Ti/N
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0.24	max.	0.60	max.	max.	0.90	0.20	max.	max.	0.020	0.004	0.016	min
0.29	0.40	0.90	0.025	0.025	1.20	0.30	0.25	0.25	0.050	0.020	0.035	2

La determinación de los esfuerzos residuales se puede realizar mediante experimentos utilizando una técnica destructiva llamada método anillo dividido (Split Ring), la cual se utiliza principalmente en la industria [Schajer and Whitehead 2017]. El enfoque de este método es medir la desviación en el componente después de realizar corte en la sección longitudinal del tubo, luego combinar la medición de la deformación con la solución elástica para obtener el esfuerzo residual en la tubería.

Varios investigadores han realizado análisis mediante la prueba del anillo dividido y proporcionan diferentes ecuaciones para estimar la tensión residual del anillo en el tubo [Nasim, 2015]. De forma sencilla, Crampton en 1930 desarrolló una técnica que mide la tensión residual en la circunferencia en tubos delgados, cortando longitudinalmente y midiendo el cambio de diámetro.

La tensión del aro se expresa como una función del espesor de pared, el diámetro original y el diámetro final, sin embargo, la ecuación sólo satisface cuando el residuo de la longitud del tubo entre el diámetro original del tubo es mayor o igual a 1.7 [Amirat, 2006]. Por otro lado, en el 2017 Damjanovic y Kozak realizaron una investigación con el objetivo de estimar el estado o estados de tensión residual en los tubos mediante tres métodos: el método de perforación de agujeros incrementales (IHMD), la difracción de rayos X (XRD) y el método de separación (SM), concluyendo que el XRD es más confiable, costoso y requiere mayor instrumentación. Por otro lado, el método IHMD obtiene un perfil del esfuerzo residuales, pero es más caro, y el método SM es más fácil, es robusto y más rápido para la estimación de los esfuerzos residuales en tubos, con resultados aceptables [Damjanović, 2017]. La norma ASTM E1928-13 supone que el diámetro del tubo se encuentra una distribución lineal en el espesor de la pared del tubo, tal como se muestra en la figura 2, en la cual ID es el diámetro interior y OD el diámetro exterior [ASTM E1928-13 2013].

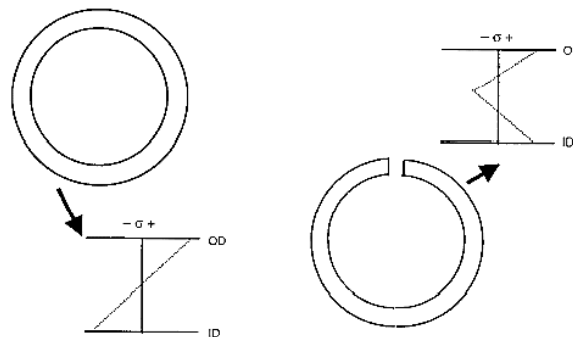


Figura 2 Esfuerzos residuales, tubo antes y después del corte [ASTM E1928-13 2013].

Si bien la norma es para tubos de pared delgada, la cual sugiere que el espesor de pared sea una décima parte del diámetro, no existe ninguna limitación teórica para

dicha relación, por lo cual es aplicable para el tubo de 36 mm. La norma sugiere que la longitud de la probeta sea al menos debe ser tres veces el diámetro exterior del tubo. En la mitad de la probeta se debe medir al menos en cuatro puntos cada 45° alrededor de la circunferencia y una más a 90° de la división. De pues del corte, se determina el diámetro exterior final nuevamente promediando los cuatro puntos y uno más de igual manera a 90° de la división.

En la ecuación 1, se describe la expresión para determinar los esfuerzos residuales a partir del diámetro inicial antes de realizar la división y final después de realizar la división [ASTM E1928, 2013].

$$S = \pm \frac{Et}{1 - \mu^2} * \frac{D_1 - D_0}{D_1 D_0} \quad (1)$$

Donde:

- D_0 : Diámetro exterior antes de la división
- D_1 : Diámetro exterior después de la división
- t : Espesor efectivo de la pared del tubo
- E : Modulo de elasticidad
- μ : Coeficiente de Poisson

$D_1 > D_0$ Esfuerzo residual máximo se encuentra en la superficie exterior del tubo.

$D_1 < D_0$ Esfuerzo residual máximo se encuentra en la superficie interior del tubo.

Como parte de la caracterización del tubo, se realizó un ensayo de tensión con el objetivo de conocer las propiedades mecánicas del material del tubo tales como: resistencia a la fluencia, resistencia a la tensión, módulo de elasticidad, y relación de Poisson; lo anterior en base a la norma ASTM E8/E8M-09, empleando una máquina universal de ensayo de la marca GALDABINI con una carga de 10 toneladas a una velocidad 4 mm/min con probetas extraídas del tubo de 36 mm de diámetro exterior y 6 mm de espesor. Las probetas se obtuvieron del tubo tal como se muestra en la figura 3. Para la prueba del anillo dividido se utilizaron dos tipos de longitud basados en el postulado de Crampton y la norma ASTM E1928-13. Se cortaron tres probetas de una longitud de 60 mm (Crampton) y tres probetas de 109 mm (ASTM E1925-13).

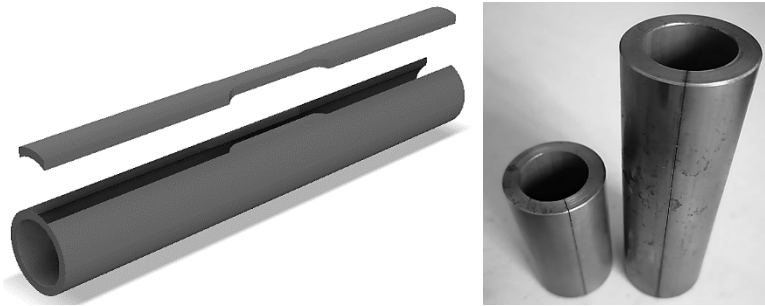


Figura 3 Probeta de tubo.

La división del tubo se realizó con una electroerosionadora de corte por hilo, utilizando un hilo metálico de latón, de 0.2 mm de diámetro, que produce una descarga eléctrica. Cada descarga se realiza en un medio dieléctrico generando una temperatura de 8000 a 12000 °C, la cual funde el material ocasionando un desprendimiento de este. El medio dieléctrico reduce la liberación de esfuerzos residuales por temperatura en el material que no es erosionado en el elemento a cortar [Guerrero, n.d.]. Figura 4 muestra esquema del proceso de electroerosión.

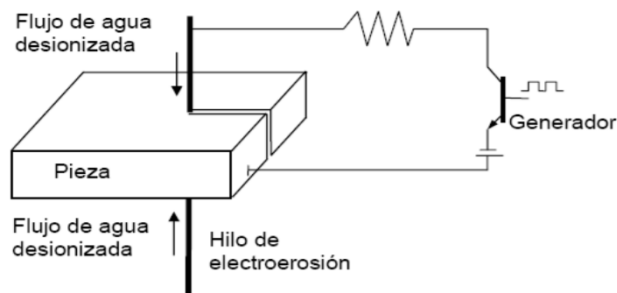
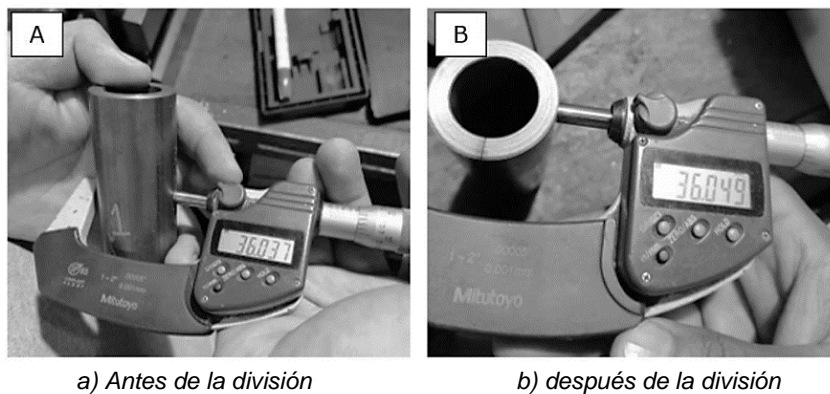


Figura 4 Esquema de electroerosión por hilo [Guerrero, n.d.].

La probeta se colocó en una base magnética tal como se muestra en la figura 5. La velocidad de trabajo, en la operación de corte de metal, es de aproximadamente de 8 cm²/h. Después del corte de la probeta, se mide con un micrómetro digital en varias secciones, la norma sugiere que debe medir en al menos en cuatro puntos cada 45° alrededor de la circunferencia y una más a 90° del corte. Se determina el diámetro exterior promediando los cuatro puntos y uno más de igual manera a 90° de la división. En la figura 6 se muestra la lectura del micrómetro digital antes y después del corte.



Figura 5 Corte por electroerosión de tubo.



a) Antes de la división

b) después de la división

Figura 6 Diámetro del tubo.

3. Resultados

Los resultados de la prueba de tensión para conocer la resistencia a la cedencia conocida como S_y y la resistencia última conocida como S_{ut} , se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Resultados de prueba de tensión.

Probeta	Área mm	Carga cedencia kg	Carga ultima kg	S_y N/mm^2	S_{ut} N/mm^2
1	75.7	3400	4620	440.6	598.7
2	75.3	3400	4620	442.9	601.9
3	75.5	3600	4620	467.8	600.3
Promedio				450.43	600.3

Cabe hacer notar que los valores de módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson, se toman de la literatura como 200 GPa y 0.29, respectivamente.

Por otro lado, los resultados del esfuerzo residual en cada probeta se muestran en la tabla 3, donde se observa que el diámetro exterior en las probetas aumentó, esto quiere decir que el esfuerzo residual máximo se encuentra en la superficie exterior del tubo.

Tabla 3 Resultados de esfuerzos residuales por el método del anillo dividido.

Método	Probeta	L (mm)	D0 (mm)	D1 (mm)	S (kPa)
ASTM	1	109.24	36.037	36.049	11 920
E1928	2	109.34	36.027	36.039	11 927
Promedio					11 923
Crampton	3	60.64	36.029	36.042	12 919
	4	60.48	36.033	36.046	12 916
Promedio					12 917

4. Discusión

Los resultados obtenidos por el método de Crampton son más elevados que los obtenidos mediante el método descrito en la norma ASTM E1925-13, con una variación entre ellos de alrededor del 8%. Es evidente que se necesitan realizar más ensayos con ambos métodos para determinar si esa variación se mantiene o existe algún factor que pudiera afectar los resultados obtenidos.

También, para validar los resultados obtenidos, es necesario contrastar los resultados obtenidos mediante estos dos métodos con el método del barreno ciego, que es un método empleado para la determinación de esfuerzos residuales.

5. Conclusiones

El método del anillo dividido es una herramienta que ayuda a determinar los esfuerzos de una manera rápida y económica, la confiabilidad se determina estableciendo el método de corte y las dimensiones de la probeta. Con longitud de probeta que sugiere Crampton, los esfuerzos liberados son mayores. Para futuras investigaciones se sugiere comparar los esfuerzos obtenidos con la prueba del barreno ciego, de manera que se tenga un punto de comparación. Existen trabajos enfocados al análisis de esfuerzos residuales en secciones planas, por lo que la importancia de este trabajo radica en dirigirlo hacia el análisis del semieje de una flecha homocinética elaborada de un tubo de acero de pared gruesa.

6. Bibliografía y referencias

- [1] M. Alejandro, S. Alonso, L. Guadalupe, and C. Ávila, “Rolado en frío y tratamiento térmico de recocido en aceros bajo carbono,” pp. 1–10, 2017.
- [2] R. C. Hibbeler, “Mecánica de Materiales,” in PEARSON EDUCACIÓN, Octava., L. M. Cruz Castillo, Ed. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2011, pp. 80–81.
- [3] J. M. Jiménez Arenas, “Efecto de la deformación en fría sobre la microestructura y propiedades de un acero,” vol. 1, p. 102, 2016.
- [4] C. D. Reséndiz Calderón, “Evaluación del campo de esfuerzos residuales en cilindros sometidos a presión interna, aplicando el método de elemento finito,” México, 2011.
- [5] “Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods,” in Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods, 1997, p. iii. doi: 10.1016/b978-0-444-82476-9.50022-0.
- [6] D. Scott MacKenzie, “Metallurgical Aspects of Distortion and Residual Stresses in Heat Treated Parts,” IFHTSE, HTS, ASM, 2016.
- [7] SCHAEFFLER and RUVILLE, “MOBILITY FOR TOMORROW,” 2018.
- [8] [8] G. S. Schajer and P. S. Whitehead, “Hole-Drilling Method For Measuring Residual Stresses,” in BMC Public Health, no. 1, K. B. Zimmerman, Ed. Morgan & Claypool, 2017, pp. 49–56.
- [9] K. Nasim, A. F. M. Arif, Y. N. Al-Nassar, and M. Anis, “Investigation of residual stress development in spiral welded pipe,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 215, no. 1, pp. 225–238, 2015, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.08.009.
- [10] A. Amirat, A. Mohamed-Chateaneuf, and K. Chaoui, “Reliability assessment of underground pipelines under the combined effect of active corrosion and residual stress,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 83, no. 2, pp. 107–117, Feb. 2006, doi: 10.1016/j.ijpvp.2005.11.004.
- [11] ASTM E1928-13, “Standard practice for estimating the approximate residual circumferential stress in straight thin-walled tubing,” ASTM International, West Conshohocken, PA, vol. i, pp. 1–3, 2013, doi: 10.1520/E1928-13.2.

- [12] D. Damjanović, D. Kozak, S. Brod, S. Marsoner, and N. Gubelj, "Residual stress state in pipe cut ring specimens for fracture toughness testing," *Materialpruefung Materials Testing*, vol. 59, no. 6, pp. 530–535, 2017, doi: 10.3139/120.111038.
- [13] ASTM E1928-99, "Standard Practice for Estimating the Approximate Residual Circumferential Stress in Straight Thin-walled Tubing E1928-99," Distribution, pp. 5–7, 1999.
- [14] V. A. Moreno Guerrero, "Análisis Multivariable en el Proceso de Corte Electro abrasivo por Hilo para su Aplicación en un Sistema CAPP," Universidad De Holguín.