

DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO DE ENSAYOS MINIATURA DE PUNZONAMIENTO PARA DETERMINAR PROPIEDADES MECÁNICAS DE ACERO DE BAJA ALEACIÓN AL CROMO-NÍQUEL DEL ANCLAJE DE UN PUENTE

**PUNCHING SHEAR MINIATURE TESTING DEVICE TO DETERMINE
THE MECHANICAL PROPERTIES OF LOW CHROME-NICKEL
STEEL OF A BRIDGE ANCHOR**

Luis Alejandro Alcaraz Caracheo

Tecnológico Nacional de México en Celaya
alejandro.alcaraz@itcelaya.edu.mx

Erik López Vargas

Tecnológico Nacional de México en Celaya
erik.lopez@itcelaya.edu.mx

Elías Daniel Valadez González

Tecnológico Nacional de México en Celaya
eldanvgz@hotmail.com

Gilberto Ruiz Mondragón

Tecnológico Nacional de México en Celaya
gilberto.ruiz@itcelaya.edu.mx

Resumen

El conocer las propiedades mecánicas de un elemento estructural en servicio es fundamental para prevenir alguna posible falla, sin embargo, una problemática que se puede presentar es la limitación de material necesario para fabricar las probetas bajo las normas convencionales. Por lo que es importante contar con un ensayo alternativo que permita determinar las propiedades de tensión empleando muestras pequeñas de material. En el presente trabajo se da a conocer el diseño y fabricación de un dispositivo para la técnica de ensayos miniatura de punzonamiento con el fin de evaluar las propiedades a tensión de un anclaje de acero de baja aleación al cromo-níquel de un puente atirantado ubicado en el

Golfo de México. Con el dispositivo se busca extender el uso de la técnica y caracterizar otros materiales de elementos mecánicos donde se tenga como limitación la disponibilidad de material. Con la fabricación de los utillajes se pudo observar las ventajas de la prueba de punzonamiento miniatura y mediante la comparación de los resultados obtenidos se considera a los elementos, como satisfactorios en su servicio.

Palabras clave: ensayo miniatura de punzonamiento, propiedades de tensión, acero colado, anclaje de acero cromo níquel.

Abstract

Knowing the mechanical properties of a structural element in service is essential to prevent any possible failure, however a problem that may arise is the limitation of material needed to manufacture the specimens under conventional standards. Therefore it is important to have an alternative test that allows to determine the tensile properties using small samples of material. In the present work, the design and manufacture of a device for the technique of miniature punching tests is presented in order to evaluate the tensile properties of a low alloy steel anchor to the chrome-nickel of a cable-stayed bridge located in the Gulf of Mexico. The device seeks to extend the use of the technique and characterize other materials of mechanical elements where the availability of material is limited. With the manufacture of the tools, the advantages of the miniature punching test were observed and by comparing the results obtained, the elements are considered as satisfactory in their service.

Keywords: *miniature punching shear test, tensile properties, cast steel, chromium nickel steel anchor.*

1. Introducción

La caracterización mecánica de propiedades resulta ser una evaluación fundamental de cualquier componente o estructura, sin embargo, con frecuencia las zonas de evaluación resultan tan pequeñas o incluso el elemento estructural puede ser de dimensiones estrechas, llegando a presentar una limitante en la

cantidad de material para la fabricación de probetas bajo una normativa convencional, como lo es la norma estándar ASTM E8. Debido a esta problemática alrededor de los años 80s nace la “prueba miniatura de punzonamiento” (Manahan, 1981), con la cual es posible obtener información del comportamiento del material mediante probetas de dimensiones muy pequeñas. Esto permite evaluar estructuras, como son plantas nucleares y tuberías con el fin de anticiparse a una falla y evitar accidentes que ocasionen pérdidas humanas.

La evolución metodológica del Ensayo Miniatura de Punzonamiento (EMP) o en inglés Small Punch Test (SPT), ha dado pie a determinar las propiedades de tracción, temperatura de transición dúctil-frágil, comportamiento a la fractura, así como el fenómeno de fragilización. Por lo que es una alternativa para la caracterización de materiales, ofreciendo las siguientes ventajas:

- La prueba requiere probetas pequeñas (10x10x0.5 mm). Por lo que es posible la evaluación de elementos que se encuentren en servicio sin necesidad de retirarlos de sus funciones.
- La evaluación es local. Es posible conocer el estado de alguna zona particular de los elementos.
- El costo de la prueba es bajo en comparación a otras pruebas mecánicas (Saucedo, 2015).

En el desarrollo de la primera sección del presente trabajo se ilustra la técnica de punzonamiento miniatura, posteriormente se muestran los diseños de utillajes propuestos por otros autores que han desarrollado la técnica, en base a ello se formula una propuesta de diseño. En la segunda sección se lleva a cabo la selección de material mediante una matriz de comparación, la cual se realiza considerando diferentes materiales, evaluando las características que son de mayor importancia para la fabricación de los utillajes. En la tercera sección se ilustra la selección de las tolerancias para los utillajes que son necesarias en algunos elementos, para garantizar que no existan alteraciones de los resultados debido a huelgos o interferencia causados por el ensamble y funcionamiento del mismo utillaje. Por último, se presenta la fabricación del utillaje y la realización de

la prueba de punzonamiento, comparando los resultados obtenidos en la literatura mediante el mismo método y formulación.

2. Métodos

El ensayo EMP (*ensayo miniatura de punzonamiento*) consiste en anclar la periferia de la probeta, de dimensiones 10X10 mm y 0.5 mm de espesor, entre dos matrices y deformar a continuación la probeta hasta su rotura, con un punzón de cabeza semiesférica de 2.5 mm de diámetro como se muestra en la figura 1, (Autillo, 2006).

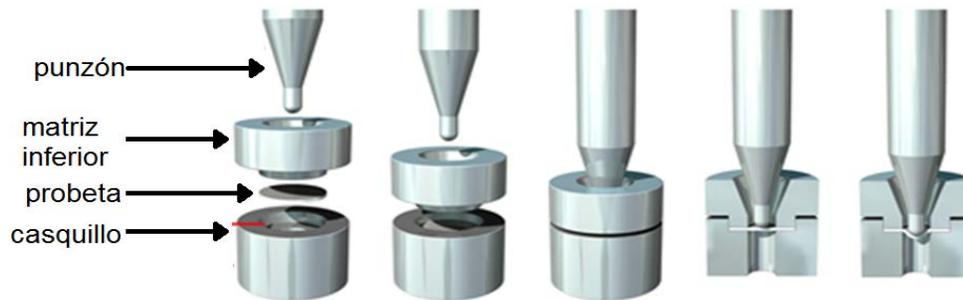


Figura 1 Método de Small Punch (Bache, 2016).

Diseño de utillajes

En la literatura nos encontramos con varios diseños de utillajes, uno de los cuales es el diseño usado en la Universidad de Cantabria en España figura 2, el cual consta de un presionador encargado de transmitir a la celda de carga la resistencia ofrecida por la probeta, e ir registrando los valores para obtener la gráfica esfuerzo-deformación, mediante el contacto de punzón, el cual tiene la función de penetrar a la probeta, deslizándose a través de la matriz superior que tiene la tarea de fijar la probeta junto con la matriz inferior evitando movimientos o deslizamiento de la probeta, estos elementos son protegidos mediante el casquillo exterior, y se ajustan mediante el tornillo de apriete, figura 2.

Para centrar el diseño del instrumental se revisaron algunos diseños utilizados por otros autores dentro de la literatura figura 3, considerando aspectos importantes como el diseño y dimensiones.

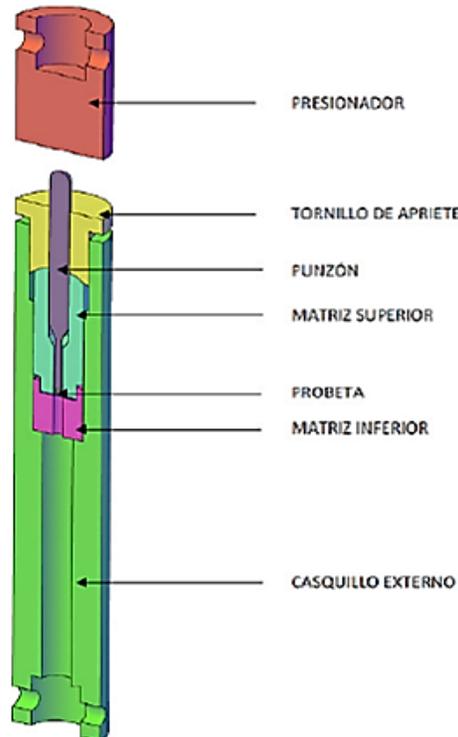
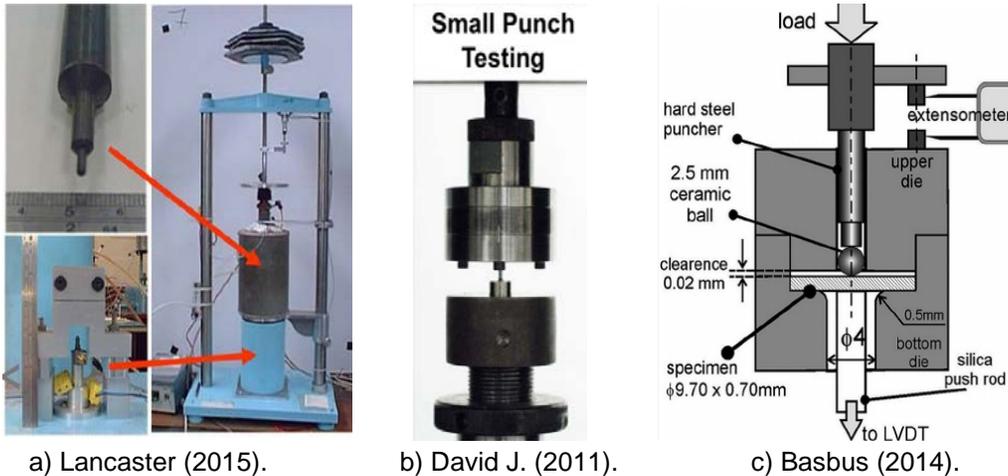


Figura 2 Diseño de utillaje Universidad de Cantabria, (López, 2015).



a) Lancaster (2015).

b) David J. (2011).

c) Basbus (2014).

Figura 2 Utillajes de diversos autores de la literatura.

Propuesta de diseño

A continuación, se muestra la alternativa de diseño que se formuló como aportación al proyecto. El diseño fue pensado para tener acceso a la probeta directo antes y después de ensayarse figura 3, en la tabla 1 se muestra el análisis de las ventajas y desventajas del diseño.



Figura 3 Propuesta de diseño.

Tabla 1 Ventajas y desventajas del diseño.

Diseño	Desventajas	Ventajas
Los utillajes se montan directo a la máquina y se incorpora el elemento de ajuste del diseño original.	Mayor cantidad de piezas.	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de los elementos de sujeción de la máquina. • Fácil montaje y desmontaje. • Fácil acceso a la probeta.

Selección del Material

De acuerdo con las especificaciones de la CEN (Comisión Europea de Normalización), el material de los utillajes debe de cumplir con la característica de dureza de 55 HRC, para garantizar que no se deformen durante la prueba y los resultados no tengan variación por medio de dicha deformación, (CEN, 2007). Se prosiguió a realizar una matriz de comparación con algunos materiales de acero inoxidable, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2 Matriz de comparación (Escala de evaluación: 6= Bueno 3=Regular 1=malo).

MATRIZ DE ALTERNATIVAS						
Criterios de Valoración	Opción 1 AISI 304	Opción 2 AISI 440 B	Opción 3 SAE O1	Opción 4 SISA CR8	Opción 5 AISI 1060	Opción 6 AISI D2
Dureza 55 HRC	1	6	3	6	3	6
Resistencia a la Corrosión	6	6	3	3	1	6
Maquinabilidad	6	6	6	3	6	3
Comercial	6	1	3	3	6	6
Total	19	19	15	15	16	21

El resultado nos arroja el material AISI D2 que es un acero grado herramental mediante un tratamiento térmico alcanza la dureza requerida por la CEN. Para los elementos exteriores que no están sometidos a cargas y cuya función solo es guiar y proteger a los elementos internos, se seleccionó el acero 304 por ser de fácil maquinado y más comercial.

Selección de ajustes y tolerancias

La selección de los ajustes y las tolerancias, fue respecto a la norma ANSI B4.1–1967 (R1978), considerando la clasificación de las tolerancias LC, los cuales son ajustes holgados de localización, que permiten el deslizamiento de los elementos sin huelgo o interferencia, por lo cual se consideró la tolerancia LC6 debido a que ofrece una pequeña holgura que permite el deslizamiento de los elementos, el LC6 es el más usado cuando se trata de uniones por perno, el cual es muy parecido a la aplicación que se le dará a los utilajes, figura 4.

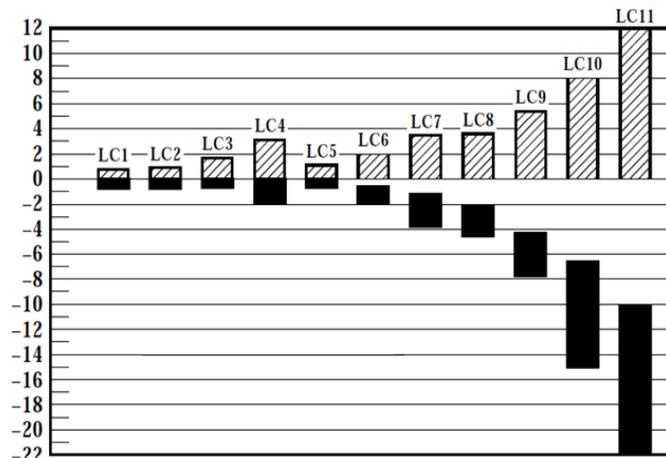


Figura 4 Ajustes y tolerancias LC.

Fabricación de los utillajes

Después de haber seleccionado el material adecuado, así como las tolerancias requeridas para el buen funcionamiento de los utillajes se prosiguió a la fabricación en acero, como se muestra en la figura 5.

Cada uno de los elementos fue revisado dimensionalmente y contra plano de fabricación, todas entraron dentro de tolerancia por lo que no hubo ningún problema con el ensamble.



Figura 5 Utillajes.

Prueba de Small Punch con los utillajes

Debido a que la técnica aún no ha sido estandarizada bajo una norma para su implementación, se han creado 3 maneras diferentes para llevar a cabo una estimación: correlaciones empíricas, métodos analíticos y simulaciones numéricas. Se han empleado modelos propuestos por Mao (1987), Lacalle (2012) y Wang (2008), los cuáles se usan para estimar el límite elástico S_y y la resistencia a la tracción S_u de materiales metálicos, en la tabla 3 se muestran las relaciones empleadas, donde las unidades en el sistema internacional son kN/mm^2 o bien MPa. La caracterización a tracción del material se realizó mediante correlaciones empíricas; la selección del método se debe a que los resultados de las pruebas fueron comparados con López (2015), el cual lleva a cabo dicho análisis.

Tabla 3 Modelos para la obtención de las propiedades a la tracción.

REFERENCIA	MODELO
Mao	$S_y = 360 \frac{P_y}{t^2}$
	$S_u = 130 * \frac{P_{max}}{t^2} - 320$
Lacalle	$S_y = 5.75 * P_y$
	$S_u = 0.74 * P_{II-III} + 0.17 * P_{max}$
	$S_u = 0.91 * P_{max}$
Wang	$P_y = 0.158 * 2\pi * r * t_0 * S_y + 94.37$
	$P_{max} = 0.1644 * 2\pi * r * t_0 * S_u + 202.17$

Los criterios más usados para determinar la carga límite de la zona elástica (P_y) en un ensayo, básicamente se pueden clasificar en 3 grupos:

- Aquellos donde se traza una recta paralela al tramo inicial-elástico de la curva, análogo al método convencional ASTM E8, para determinar el límite elástico S_y . Las distancias más comúnmente utilizadas son la décima o la centésima parte del espesor inicial de la probeta ($P_{y_t/10}$, $P_{y_t/100}$), ASTM E8-04, (2004).
- El método de las tangentes, que consiste en trazar dos tangentes, una perteneciente al tramo elástico, y otra en la zona de inicios de plasticidad; el corte de estas dos tangentes, indicará la carga (P_{y_ct}). Una variable de este método es trazar una recta vertical hacia abajo a partir de este punto y, el punto de intersección de la recta con la curva carga-desplazamiento, corresponderá al valor de la carga (P_{y_CEN}).
- El método del punto de inflexión, cuyo principio se basa en un cambio de convexidad en la curva carga-desplazamiento que señala los inicios de las deformaciones plásticas (P_{y_inf}). Este método es uno de los más recientes y tiene en cierto grado un fundamento más teórico, (López, 2015).

Los tres procedimientos planteados anteriormente para obtener P_y , son usados por los diferentes autores de la literatura, por lo que, en la obtención de los resultados fue necesario implementar cada uno de los procedimientos descritos

mediante la formulación aquí presentada. En la figura 6 se muestran de manera gráfica la utilización del procedimiento para la obtención de P_y .

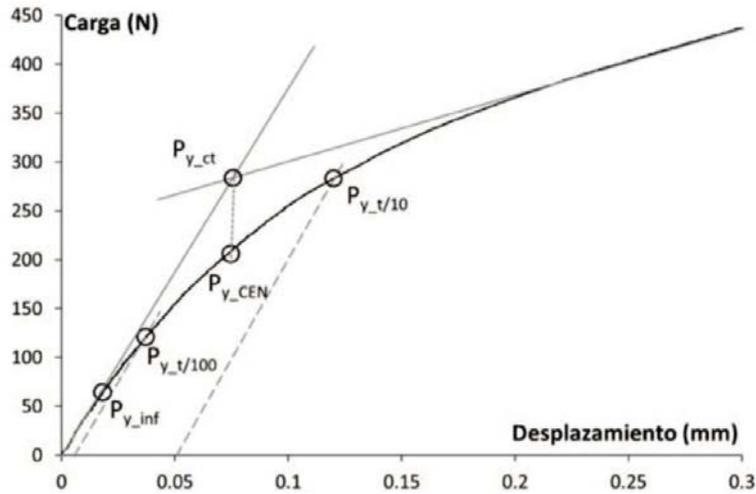


Figura 6 Obtención de P_y .

3. Resultados

Para verificar la prueba, así como los resultados, se usó la formulación expresada en la tabla 3, y la metodología de análisis usada por López (2015), así como el mismo material ensayado (acero colado), por lo que es posible la comparación con su trabajo realizado en la Universidad Cantabria España.

En la figura 7 se muestra la probeta del anclaje del puente, ensayada con los utillajes fabricados para la máquina Zwick Z050.



Figura 7 Probeta ensayada.

Se ensayaron 9 probetas con los mismos parámetros; velocidad de 0.01 mm/s, a temperatura ambiente y una precarga de 2 N. En la figura 8 se muestran las gráficas obtenidas de los ensayos.

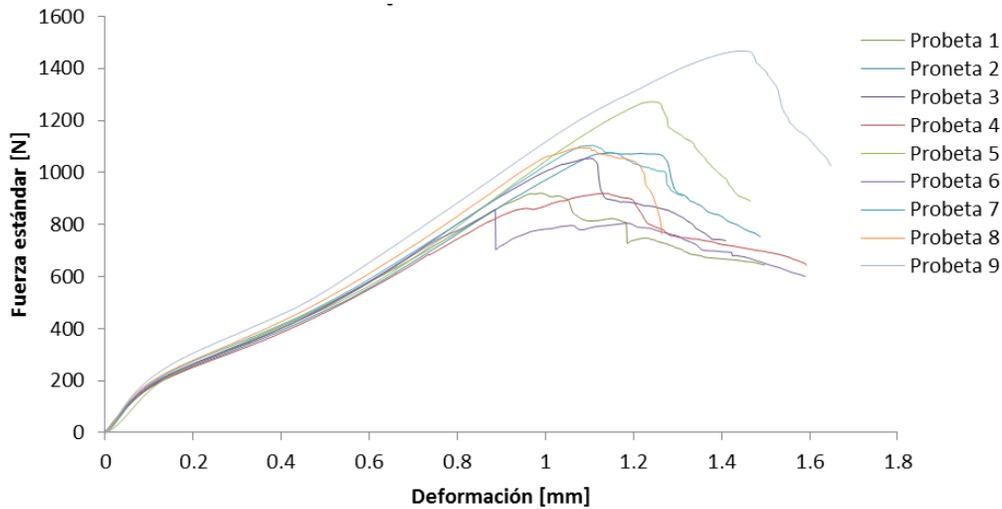


Figura 8 Concentrado de gráficas de las probetas ensayadas.

Como puede observarse en la figura 8, una de las gráficas se eleva más que las otras, esto puede ser consecuencia de alguna impureza o inclusión del material, sin embargo, la tendencia en su gráfica es muy semejante al resto por lo que los datos obtenidos son muy cercanos. En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos usando la formulación de los autores de manera analítica.

Tabla 4 Resultados obtenidos.

Método	Sy [Mpa]	Su [Mpa]
Mao	259	196
Lacalle	326	510
Wang	138	313

Comparación de resultados con otros trabajos

En la figura 9 se muestra la comparación de las gráficas con los valores obtenidos en las pruebas realizadas con los utillajes y los resultados obtenidos en la Universidad de Cantabria en España, ver referencia de López (2015), del lado izquierdo inciso a), se muestran los resultados obtenidos en las pruebas, con la máquina del Zwick Z050 del Instituto Tecnológico Nacional de México en Celaya y en el lado derecho inciso b), se muestran los valores que obtuvo López (2015).

La tabla 5 muestra la comparación de los resultados analíticos, usando la formulación de los diversos autores.

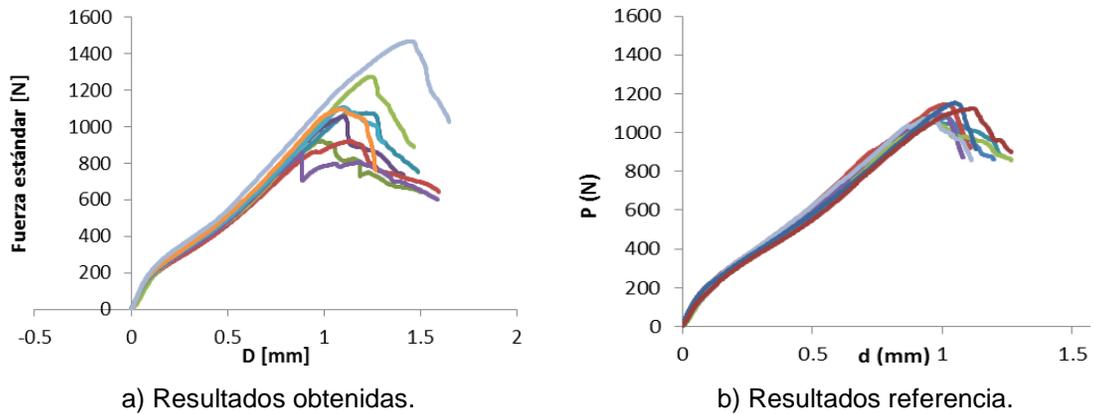


Figura 9 Comparación de las gráficas.

Tabla 5 Comparación de los valores obtenidos.

Método	Resultados obtenidos		Resultados López (2015)	
	Sy [MPa]	Su [MPa]	Sy [MPa]	Su [MPa]
Mao	259	196	288	254
Lacalle	326	510	251	475
Wang	138	313	171	357

El error porcentual del límite elástico obtenido es de 17.65 y un valor de 20.32 para la resistencia a la tracción. El error promedio está dentro del rango de los valores obtenidos por López (2015), en la resistencia última se observa una mayor variación, lo cual puede atribuirse al alto contenido de inclusiones e impurezas del acero colado en estudio.

4. Discusión

Mediante la reproducción de la prueba de punzonamiento miniatura, se abren las puertas a una nueva técnica de caracterización de materiales metálicos en el Tecnológico Nacional de México en Celaya, que permitirá evaluar materiales donde el volumen de material disponible no sea una limitante.

Con los resultados obtenidos se puede afirmar que los utillajes fabricados cumplen con su función, sin embargo, es necesario evaluar otros materiales donde la cantidad de impurezas sea controlada, ya que inclusiones o poros presentes en el acero colado pudieran estar afectando en los resultados debido al pequeño tamaño de las probetas.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] ASTM American Society for Testing and Materials. (2009). Standard test methods for tension testing of metallic materials. ASTM international.
- [2] CEN, (2007), Workshop Agreement CWA 15267, European Code of Practise: Small Punch Test Method for Metallic Materials.
- [3] Jaekel, D. J., MacDonald, D. W., & Kurtz, S. M. (2011). Characterization of PEEK biomaterials using the small punch test. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 4(7), 1275-1282.
- [4] López, E. (2015). Aplicación del ensayo small punch en la evaluación de la integridad estructural de los anclajes de acero colado procedentes de un puente. (Tesis de Maestría), Tecnológico Nacional de México en Celaya.
- [5] Autillo, J., Contreras, M. A., Betegón, C., Rodríguez, C., & Belzunce, F. J. (2006). Utilización del ensayo miniatura de punzonamiento (small punch test) en la caracterización mecánica de aceros. In *Anales de Mecánica de Fractura* (Vol. 23, pp. 77-83).
- [6] Basbus, J. F., Moreno, M., Caneiro, A., & Mogni, L. V. (2014). Effect of Pr-Doping on Structural, Electrical, Thermodynamic, and Mechanical Properties of BaCeO₃- δ as Proton Conductor. *Journal of The Electrochemical Society*, 161(10), F969-F976.
- [7] Lacalle, R., (2012). Determinación de las propiedades de tracción y fractura de materiales metálicos mediante ensayos Small Punch. (Tesis doctoral), Universidad de Cantabria.
- [8] Mao, X., & Takahashi, H. (1987). Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for tem disk (\varnothing 3 mm) small punch tests. *Journal of Nuclear Materials*, 150(1), 42-52.
- [9] Martin Bache, (2016) The benefits of additive layer manufacturing.
- [10] Manahan, M. P., Argon, A. S., & Harling, O. K. (1981). The development of a miniaturized disk bend test for the determination of postirradiation mechanical properties. *Journal of Nuclear Materials*, 104, 1545-1550.
- [11] Saucedo M., Maribel R., Mario O. (Junio 2015). Correlación de la Prueba de Indentación Miniatura contra pruebas mecánicas convencionales:

Prueba de Impacto Charpy, Termofluencia y Tenacidad a la Fractura.
Aplicaciones de la Ingeniería, 2, 7.

- [12] Lancaster, R. J., Harrison, W. J., & Norton, G. (2015). An analysis of small punch creep behaviour in the γ titanium aluminide Ti-45Al-2Mn-2Nb. *Materials Science and Engineering: A*, 626, 263-274.
- [13] Wang, Z. X., Shi, H. J., Lu, J., Shi, P., & Ma, X. F. (2008). Small punch testing for assessing the fracture properties of the reactor vessel steel with different thicknesses. *Nuclear engineering and design*, 238(12), 3186-3193.