

ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN MEDIANTE SMALL PUNCH TEST DE ACEROS AISI 1045 Y AISI 4140

ESTIMATION OF TENSILE MECHANICAL PROPERTIES BY MEANS OF SMALL PUNCH TEST OF AISI 1045 AND AISI 4140 STEELS

Hugo González González

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México
hugo.glez1988@gmail.com

Erik López Vargas

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

Luís Alejandro Alcaraz Caracheo

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

Jaime Navarrete Damián

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México
jaime.navarrete@itcelaya.edu.mx

Ramón Rodríguez Castro

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México
ramon.rodriguez@itcelaya.edu.mx

Recepción: 16/septiembre/2019

Aceptación: 2/octubre/2019

Resumen

Este documento presenta la estimación de las propiedades resistencia a la fluencia, S_y , y resistencia última, S_u , en aceros laminados AISI 1045 y AISI 4140 mediante la técnica de Small Punch. Los resultados en el acero 1045 comparados con los obtenidos por norma convencional presentaron errores de 7 y 10 por ciento, y para el 4140, errores de 16 y 5 por ciento. También se analizaron cada una de las orientaciones que se pueden obtener para la técnica Small Punch. Para el acero 1045 los resultados fueron muy similares sin importar su orientación. En el acero 4140 se presentó un comportamiento diferente en dos de las tres orientaciones analizadas.

Palabra(s) Clave: Aceros, Caracterización, Propiedades mecánicas, Small Punch.

Abstract

This paper presents the estimation of tensile properties yield strength, S_y , and ultimate strength, S_u , in AISI 1045 and AISI 4140 steels, using small punch test. The results in 1045 steel compared to those obtained by conventional standard presented an error of 7 and 10 percent, and for 4140, errors of 16 and 5 percent. It was also analyzed each of the orientations that can be obtained for the Small Punch test. For 1045 steel the results were very similar regardless of their orientation. In steel 4140 a different behavior was presented in two of the three orientations analyzed

Keywords: *Characterization, Mechanical properties, Small Punch, steels.*

1. Introducción

La técnica Small Punch ha sido utilizada desde los años 80's para la evaluación de la degradación de propiedades de vasijas nucleares, debido a que es un componente crítico en las plantas de energía nuclear y la evaluación continua de sus propiedades mecánicas es necesidad para una operación larga y segura [Kapusňák, 2018], en donde la manipulación de material irradiado es un tema delicado. Por ello, la técnica ha resultado ser muy útil, debido a que requiere de pequeñas cantidades de material para evaluar sus propiedades. Desde entonces, esta técnica ha tomado gran importancia lo cual ha propiciado un continuo estudio sobre ella.

Actualmente, se están realizando estudios sobre la caracterización de materiales en Corrosión Bajo Tensión que es un tipo de degradación ambiental que tiene lugar cuando influyen factores como puede ser un ambiente agresivo, presencia de tensiones de tracción en dichos ambientes o cuando el material es susceptible a la agresividad del ambiente [Arroyo, 2017], y Creep, donde autores han evaluado las propiedades a fluencia de aceros que exhiben fracturas frágiles y dúctiles [Andrés, 2016], y en todas aquellas aplicaciones en donde no se puede obtener grandes muestras de material, como pueden ser recubrimientos superficiales [Chen, 2013],

uniones por soldadura [Rodríguez, 2012], o incluso para evaluar las propiedades mecánicas en huesos [Giddings, 2001].

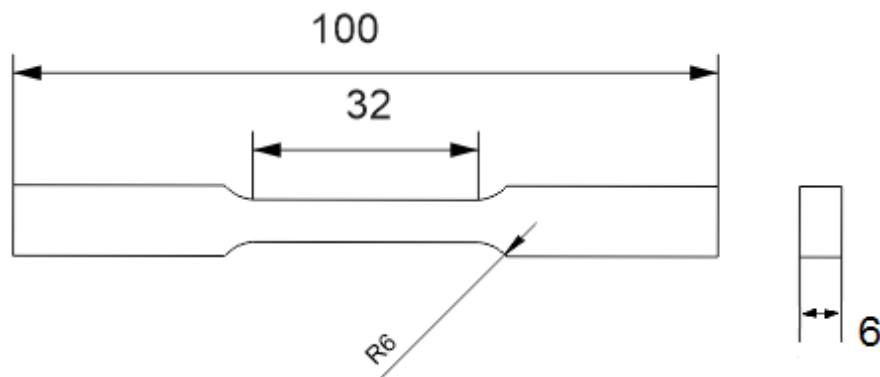
En este trabajo se presenta la evaluación de las propiedades mecánicas de aceros AISI 1045 y AISI 4140, aceros que han sido usados en anclajes de un puente atirantado, según el trabajo reportado en [Teran, 2016].

La finalidad de este trabajo es estudiar la viabilidad de la técnica de Small Punch para estudiar la evolución en las propiedades de los anclajes. Para ello, se han utilizado placas de acero laminado de estos dos materiales, en donde se han obtenido las propiedades mediante normativa convencional y se han comparado con las obtenidas mediante la técnica de Small Punch. Además, se ha estudiado el efecto sobre los resultados cuando las probetas son obtenidas en diferentes orientaciones.

2. Métodos

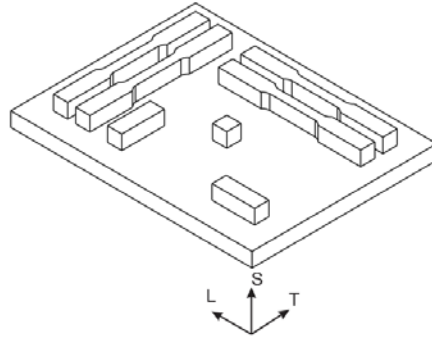
Descripción de normativa convencional

Las probetas utilizadas en este trabajo fueron de sección cuadrada como se muestra en la figura 1, las cual cumple con las recomendaciones requeridas por la norma ASTM E 8 [2004] y fueron obtenidas de una placa de acero laminado 1045 y 4140. Las probetas fueron fabricadas y ensayadas en dos direcciones, para ver el efecto que tienen el laminado en este tipo de placas de acero, como se puede ver en la figura 2.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1 Dimensiones de probeta para ensayos mediante ensayos convencionales.



Fuente: Elaboración propia.

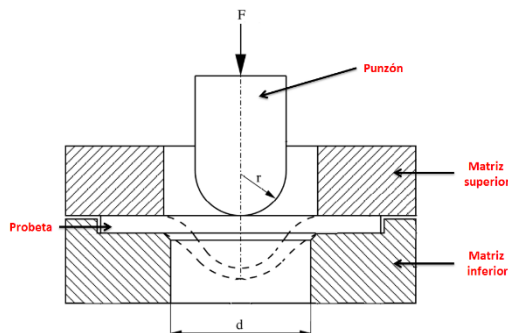
Figura 2 Orientaciones de probetas para ensayos Small Punch y ensayos convencionales.

Descripción del ensayo “Small Punch”

Los ensayos Small Punch son una técnica alternativa en la caracterización de materiales, y consiste básicamente en punzonar una probeta plana de pequeñas dimensiones, deformándola hasta rotura, registrando la carga frente al desplazamiento experimentado por el punzón. Para este trabajo se seleccionaron probetas cuadradas de dimensiones de 10 mm x 0.5 de espesor según European standard on small punch testing of metallic materials [2018]. La fabricación de las probetas fue por medio de electroerosión por corte por hilo.

Procedimiento

El ensayo se realiza siguiendo las recomendaciones del código en una máquina universal Zwick Z050 y una celda de 5 kN colocando el utillaje propio del Small Punch. Una vez preparado el utillaje la maquina se pone en marcha en la modalidad de compresión y control por desplazamiento, figura 3.

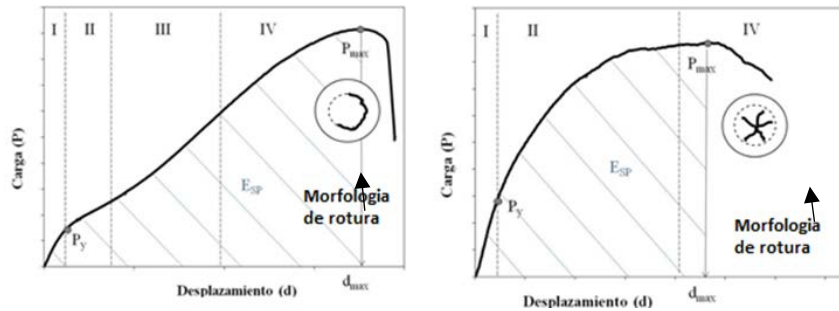


Fuente: Bruchhausen, 2018.

Figura 3 Esquema general del dispositivo.

La velocidad de desplazamiento del punzón para evitar trazar curvas inadecuadas, debe estar comprendida entre 0.2 y 2 mm/min, según el documento European standard on small punch testing of metallic materials [2018]. El ensayo Small Punch finaliza cuando existe un descenso del 20% de la carga máxima registrada.

Las curvas registradas pueden ser de dos diferentes tipos, las cuales se observan si son de un material dúctil o un material frágil, figura 4.

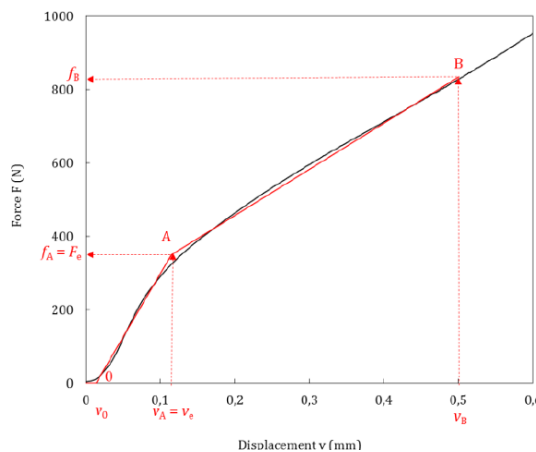


Fuente: Bruchhausen, 2018.

Figura 4 Curva carga-desplazamiento características de un ensayo Small Punch con un material dúctil izquierda y material frágil derecha.

La evaluación de la resistencia a la fluencia se obtiene a través de la ecuación 1, en donde F_A es un parámetro calculado mediante la intersección de dos líneas trazadas en la curva descrita por el ensayo, tal como muestra la figura 5, t_0 es el espesor inicial de la probeta.

$$S_y = 0.479 \frac{F_A}{t_0^2} \quad (1)$$



Fuente: Bruchhausen, 2018.

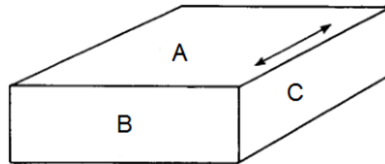
Figura 5 Curva fuerza-desplazamiento del ensayo Small.

Por otro lado, la resistencia última se estima mediante la ecuación 2, en donde R_m representa la fuerza registrada durante el ensayo a un valor de desplazamiento del punzón igual a 0.645mm, y t_0 , es el espesor inicial de la probeta.

$$Su = 0.179 \frac{R_m}{t_0^2} \quad (2)$$

Metalografía

El procedimiento que se siguió fue el recomendado por la norma ASTM E3-11 [2011], para este documento se seleccionaron dos orientaciones de cada uno de nuestros materiales siendo las caras B y C como se muestra en la figura 6, se montaron en baquelita para después pulir la superficie para eliminar impurezas del material hasta obtener un acabado espejo en el material. Por último, se aplicó un ataque químico con el reactivo Nital al 3% cuidando el tiempo de exposición para evitar obscurecimientos en la muestra.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6 Identificación de caras de la placa para metalografía: A(LT), B(TS), C(LS).

Como ya me ha hecho mención los materiales utilizados en este trabajo fueron los aceros AISI 1045 y 4140 laminados en caliente, al analizarlos mediante microscopia solo fueron seleccionadas dos caras de las tres posibles siendo que solo se pretendía conocer como estaban los granos dispersos en el material.

3. Resultados

En el presente apartado del documento se resumirán los resultados de la evaluación por la técnica Small Punch para los dos tipos de aceros mencionados, y serán discutidos en la sección posterior.

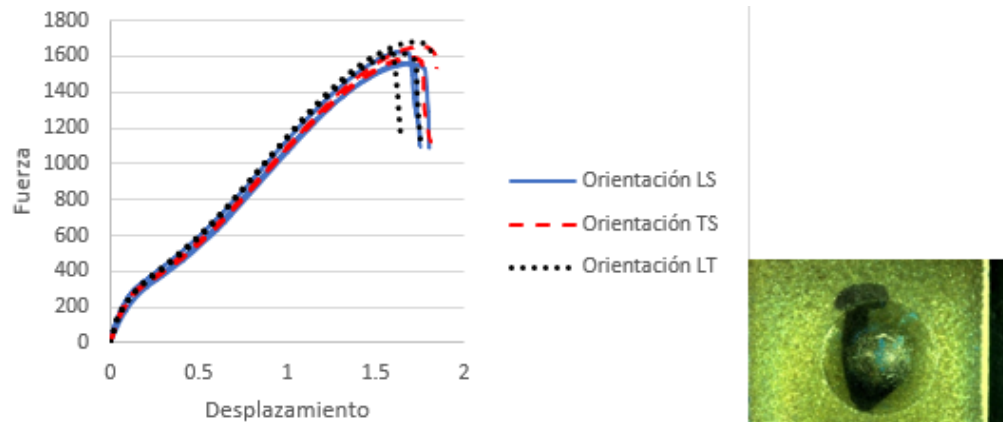
Como ya se mencionó se ensayaron probetas de dos diferentes materiales mediante metodología convencional, los valores obtenidos se muestran en tabla 1.

Tabla 1 Resultados mediante normativa convencional.

Acero AISI	Resistencia a la fluencia (MPa)	Resistencia última (MPa)	Alargamiento %
1045 transversal	398.34	656.29	18.82
1045 longitudinal	402.23	655.43	17.21
4140 transversal	851.75	1030.21	7.34
4140 longitudinal	823.93	1024.03	7.87

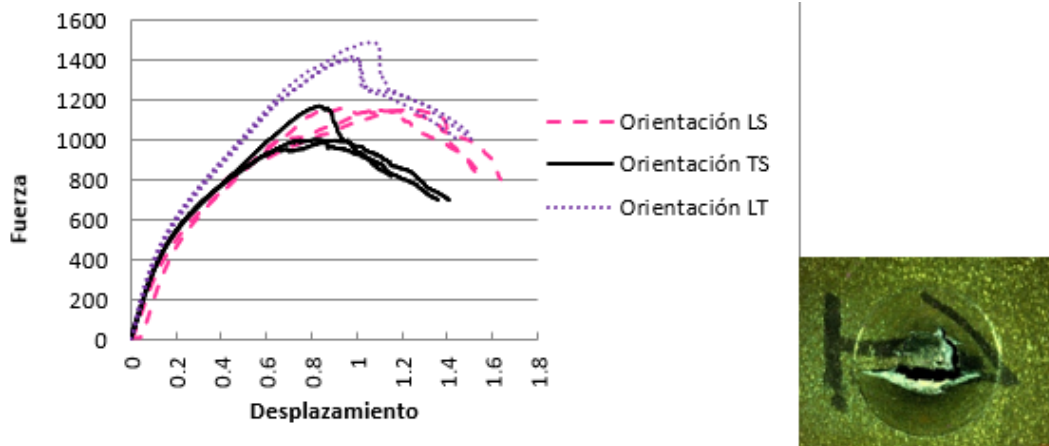
Fuente: Elaboración propia.

Dadas las diferentes orientaciones que se pueden hacer por medio de ensayos Small Punch se ensayaron los 3 tipos de planos en los cuales se puede obtener probetas de tipo Small Punch (figuras 7 y 8).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7 Curvas obtenidas acero AISI 1045 para ensayos Small Punch en sus diferentes orientaciones y fotografía de morfología de rotura presentada en probeta.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8 Curvas obtenidas acero AISI 4140 para ensayos Small en sus diferentes orientaciones y fotografía de morfología de rotura presentada en probeta.

A partir de las curvas mostradas en la figuras 7 y 8, se obtuvieron los parámetros F_A , y R_m que demandan los modelos empleados en la metodología propuesta en European standard on small punch testing of metallic materials [2018]. Estos valores, se presenta en la tabla 2 para el caso del acero AISI 1045, y en la tabla 3 para el acero AISI 4140.

Tabla 2 Parámetros obtenidos de las curvas carga-desplazamiento del acero AISI 1045

PROBETA	F_A	R_m
1 LS	223.01	708.10
2 LS	259.54	885.77
3 LS	214.67	839.42
PROMEDIO	232.40	811.09
1 TS	226.76	851.98
2 TS	214.4	836.49
3 TS	224.39	835.91
PROMEDIO	221.85	841.46
2 LT	214.47	905.11
3 LT	210.79	894.25
4 LT	225.51	900.75
PROMEDIO	216.92	900.03

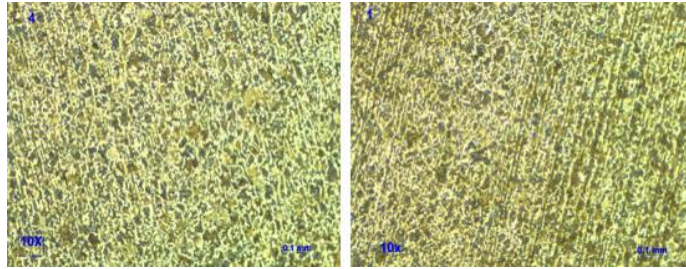
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3 Parámetros obtenidos de las curvas carga-desplazamiento del acero AISI 4140

PROBETA	F_A	R_m
1 LS	474.90	1134.03
2 LS	476.33	1031.11
3 LS	489.00	1003.48
PROMEDIO	480.07	1056.20
1 TS	483.47	1164.43
2 TS	477.60	997.62
3 TS	516.12	968.64
PROMEDIO	492.39	1043.56
1 LT	503.32	1376.09
2 LT	487.34	1342.26
3 LT	511.74	1350.46
PROMEDIO	500.08	1356.27

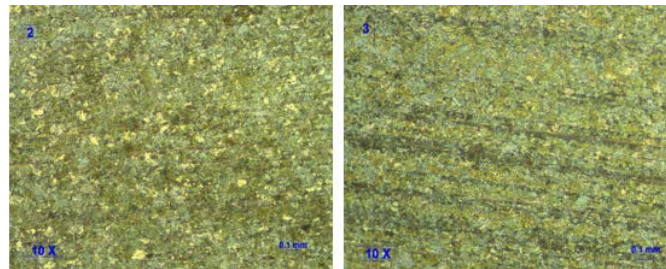
Fuente: Elaboración propia.

En las figuras 9 y 10 se muestran las imágenes obtenidas en el análisis metalográfico con base a los planos anteriormente mencionados.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9 Microestructura acero AISI 1045. Izquierda: plano TS. Derecha: plano LS.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10 Microestructura acero AISI 4140. Izquierda: plano TS. Derecha: plano LS.

4. Discusión

La resistencia a la fluencia, S_y , del acero 1045 por la técnica Small Punch fue 445.30, 425.07 y 415.54 MPa en las orientaciones LS, TS y LT, respectivamente. Los resultados de resistencia última, S_u fueron 580.74, 602.48 y 644.42 MPa en las orientaciones LS, TS y LT, respectivamente (tabla 4). Así mismo la curva característica y la morfología de fractura de este material correspondiente es la de un material dúctil (Figuras 4-izquierda y 7-derecha).

Tabla 4 Resultados obtenidos de aproximaciones mediante ensayos Small Punch del acero AISI 1045 en sus diferentes orientaciones.

Orientación	S_y (MPa)	S_u (MPa)
LS	445.30	580.74
TS	425.07	602.48
LT	415.64	644.42

Fuente: Elaboración propia.

Si se atiende a la tabla 4, se puede observar que tanto los valores de resistencia a la fluencia, S_y , como los respectivos a la resistencia última, S_u , son muy similares, y

mantienen congruencia con los resultados de ensayos normalizados en la orientación transversal y longitudinal (ver tabla 1). Su microestructura mostrada en la figura 9-izquierda presenta granos definidos y no alargados (plano TS). En la figura 9-derecha se pueden apreciar los granos más alargados en dirección del rolado de la pieza (plano LS). Se puede apreciar también en esta misma figura que, en las orillas, las direcciones están perfectamente definidas, y en la parte central se presenta una mayor uniformidad de los granos, lo cual indica que el material pudiera estar normalizado, pero no uniformemente. Lo anterior puede justificar la pequeña variación de sus propiedades en las diferentes orientaciones.

Debido a que se tiene 3 orientaciones en las que se realizaron los ensayos Small punch, se seleccionó la cara LT de ensayos Small punch para comparar los resultados con los obtenidos con probetas longitudinales de ensayos convencionales, ya que este tipo de probetas son las que se ajustan mejor debido a las componentes de esfuerzo que actúan en las probetas. Por una parte, las probetas convencionales se traccionan en dirección longitudinal y por otra, las probetas LT tienen componentes longitudinal y transversal durante el ensayo.

Los valores obtenidos mediante ensayos normalizados correspondientes al acero 1045 son $S_y=402.23$ y $S_u=655.43$, y los resultados Small Punch LT son $S_y=415.64$ y $S_u=644.43$, muy similares a los obtenidos en los ensayos normalizados, teniendo un error de -3% y 2% respectivamente (tabla 5).

Tabla 4 Comparación de pruebas convencionales ensayos Small Punch en acero 1045

Método	S_y (MPa)	S_u (MPa)
SMALL PUNCH (LT)	415.64	644.43
ASTM E8 (LONGITUDINAL)	402.23	655.43
% ERROR	-3%	2%

Fuente: Elaboración propia.

El acero 1045 se aproxima muy bien en sus estimaciones de las propiedades mecánicas, lo cual es benéfico para el análisis de integridad para los anclajes que cuenten con este tipo de acero.

Respecto al acero 4140, se puede observar (ver figura 8-derecha) que la morfología típica de rotura exhibida en las probetas es la característica a materiales de tipo

frágil (figura 4-derecha). Los resultados obtenidos en la resistencia a la fluencia, S_y , mediante la técnica Small Punch fueron 919.83, 943.41 y 959.54 MPa en las orientaciones LS, TS y LT, respectivamente. Los valores de la resistencia última, S_u , son 763.50, 747.20 y 971.09 MPa para las orientaciones LS, TS y LT, respectivamente (tabla 6).

Tabla 6 Resultados obtenidos de aproximaciones mediante ensayos Small Punch del acero AISI 4140 en sus diferentes orientaciones.

Orientación	S_y (MPa)	S_u (MPa)
LS	919.83	756.23
TS	943.41	747.20
LT	959.54	971.09

Fuente: Elaboración propia.

Si se atiende a la tabla 6, se puede observar que los valores de resistencia a la fluencia, S_y , son muy similares en las diferentes orientaciones, lo cual es congruente con los resultados (en las dos orientaciones presentadas) de los ensayos normalizados (tabla 1); sin embargo, los valores de resistencia última, S_u , son significativamente menores en las orientaciones LS y TS. Analizando la microestructura de este tipo de acero se puede observar en la figura 10-izquierda una microestructura perlita-ferrita con algunos carburos, así como también bainita que se aprecia en forma de plumas, así también se pueden observar los granos más definidos y no tan alargados (plano TS). Por otro lado, a diferencia del acero 1045, el cual mostraba granos medianamente uniformes en las dos orientaciones analizadas, el acero 4140 presenta granos visiblemente más alargados en el plano LS (figura 10-derecha). Lo anterior puede justificar las diferencias presentadas en la resistencia última a la tensión, S_u , en las orientaciones LS y TS, ya que durante el ensayo small punch, las probetas presentan una componente de esfuerzo a lo largo del espesor, la cual, con base a la forma de granos presentada, resulta ser menos resistente debido a la influencia en los planos del laminado. Para comparar la aproximación del ensayo SPT, se tomará la orientación LT, por las mismas razones explicadas con anterioridad en el acero 1045. Se pueden observar en tabla 7 errores de estimaciones de -16% en S_y y 5% en S_u siendo errores aceptables.

Tabla 7 Comparación de pruebas convencionales con Small Punch en acero 1045.

Método	S _y (MPa)	S _u (MPa)
SMALL PUNCH (LT)	959.54	971.09
ASTM E8 (LONGITUDINAL)	823.93	1024.03
% ERROR	-16%	5%

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a las orientaciones LS y TS, se tiene como trabajo futuro analizar y justificar por qué disminuye la resistencia última, S_u, lo cual no es congruente con los ensayos normalizados.

Finalmente, es necesario comentar que los resultados del ensayo Small Punch pueden variar con base a la orientación de las probetas. Por tal motivo, es necesario tener este efecto en consideración, cuando se realicen ensayos Small Punch sobre algún material.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Kapusňák, M., Petzová, J., Březina, M., & Adamech, M. (2018). Interim results of the reactor pressure vessel materials evaluation within the framework of the implemented Advanced Surveillance Specimen Programme. *Ubiquity Proceedings*, 1(S1).
- [2] Arroyo Martínez, B. (2017). Caracterización mecánica de aceros de alta y media resistencia en condiciones de fragilización por hidrógeno mediante ensayos small punch.
- [3] Andrés, D., Lacalle, R., & Álvarez, J. A. (2016). Creep property evaluation of light alloys by means of the small punch test: creep master curves. *Materials & Design*, 96, 122-130.
- [4] Chen, H., Hyde, T. H., Voisey, K. T., & McCartney, D. G. (2013). Application of small punch creep testing to a thermally sprayed CoNiCrAlY bond coat. *Materials Science and Engineering: A*, 585, 205-213.
- [5] Giddings, V. L., Kurtz, S. M., Jewett, C. W., Foulds, J. R., & Edidin, A. A. (2001). A small punch test technique for characterizing the elastic modulus and fracture behavior of PMMA bone cement used in total joint replacement. *Biomaterials*, 22(13), 1875-1881.

- [6] Rodríguez, C., & Belzunce, F. J. (2012). Estudio de la idoneidad del ensayo miniatura de punzonado para la caracterización mecánica de los aceros y de sus uniones soldadas. *Dyna*, 79(175), 53-60.
- [7] Teran Guillen, J., Cicero Gonzalez, S., Arroyo Olvera, M., del Valle Moreno, A., Torres Acosta, A., & Martinez Madrid, m. (2016). Evaluación de defectos tipo entalla en aceros de baja aleación para uso estructural. *Publicación técnica*, (463).
- [8] ASTM E8-04, (2004), Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.
- [9] Bruchhausen, M. Altstadt, E., Austin, T. Dymacek, P., Holmström, S., Jeffs, S., Lacalle, R., Lancaster, R., Matocha, K., Petzova, J. 2018. European standard on small punch testing of metallic materials. *Ubiquity Proceedings*, 1(S1): 11 DOI
- [10] ASTM E3-11. (2011). Standard guide for preparation of metallographic specimens. ASTM Copyright, 1-12.
- [11] López Vargas, Erik, marzo 2015. Aplicación del ensayo Small punch en la evaluación de la integridad estructural de los anclajes de acero colado procedentes de un puente.