

Estimación de propiedades mecánicas de chapa de acero inoxidable 304L mediante ensayos SPT

Mechanical properties estimation of AISI 304L stainless steel sheet using SPT

Victor Eduardo Fierro¹, Nelson Alvarez Villar¹, Esteban Wenger, Andrea Ansaldi¹, Rodrigo Gabarain

¹ Departamento de Mecánica Aplicada – CP: B1603ALO – Juan B. de La Salle 4397, Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina
e-mail: vfierro@citedef.gob.ar

RESUMEN

La caracterización mecánica de los materiales mediante ensayos no destructivos es de gran interés en Ingeniería Estructural. El ensayo de mini-probetas por punzonado (SPT, Small Punch Test) se aplica para estimar propiedades mecánicas de materiales con probetas que pueden extraerse de componentes y estructuras sin afectar la operación en servicio. En este trabajo se reporta el desarrollo del dispositivo de ensayo, construido según la recomendación CWA 15627:2007. Seleccionamos como material de prueba acero inoxidable AISI 304L para estimar las propiedades mecánicas de tracción. Los resultados obtenidos se comparan con los resultados de ensayos de tracción estándar. Analizamos los parámetros experimentales que permiten interpretar los resultados y comparamos las expresiones analíticas disponibles en la literatura con las indicadas por la recomendación de referencia. Finalmente, se implementa la simulación de curvas carga-desplazamiento por elementos finitos. En base a los resultados de este trabajo, se propone un procedimiento para evaluar el efecto del espesor de las probetas en la estimación de las propiedades mecánicas.

Palabras-clave: SPT, caracterización mecánica, mini probetas, simulación por FEM.

ABSTRACT

The mechanical characterization of materials by small specimen testing has growing interest in Structural Engineering. Small Punch Test (SPT) is applied to estimate mechanical properties of samples that can be extracted from components or structures without affecting service operation. In this paper the development of the test device is reported, constructed according to the CWA 15627: 2007 recommendation. Stainless steel AISI 304L was selected to estimate tensile mechanical properties. The results obtained are compared with standard tensile tests results. We analyze the experimental parameters involved and compare the analytical expressions available in the literature with those indicated by the reference recommendation. Finally, we have implemented finite element simulation of load-displacement curves. Based on the results of this work, a method for evaluating the effect of specimen thickness on the estimation of mechanical properties is proposed.

Keywords: SPT, mechanical characterization, small specimens, finite element simulation.

1. INTRODUCCIÓN

Los ensayos de Punzonado de Miniprobetas (Small Punch Test, SPT) originalmente se desarrollaron para el estudio de la degradación de propiedades mecánicas con la radiación neutrónica como indican MANAHAN et al en [1].

En la actualidad, los ensayos SPT resultan de gran utilidad como método no destructivo para evaluar la pérdida de tenacidad en materiales estructurales como consecuencia de alta temperatura y/o ambientes agresivos en instalaciones y componentes en servicio, como indica RODRÍGUEZ et al.[2] entre otros autores.

Las aplicación de los ensayos SPT continúa en la industria nuclear como señala ALTSTADT et al. en [3], pero también se encuentran ejemplos de estudios detallados respecto de propiedades mecánicas en

soldadura RODRÍGUEZ et al. [4], tenacidad a la fractura MARTÍNEZ-PAÑEDA et al. [5] y fluencia lenta NOBAKHTI y SOLTANI [6]. Sobre estos trabajos, los ensayos SPT contribuyen a la determinación en servicio de la integridad estructural y la vida residual de componentes y estructuras mecánicas como indican por ejemplo DOGAN y HYDE en [7].

La recomendación CWA 15627 (2007) del Comité Europeo de Estandarización CEN para la realización del ensayo SPT en materiales metálicos, describe propuestas para la preparación de las probetas, la conducción de los ensayos y el análisis de las curvas experimentales. La estimación de las propiedades de tracción se realiza normalizando las cargas características P_Y y P_{max} como es desarrollado por GARCÍA [8]. Las expresiones utilizadas para estimar tensión de fluencia S_Y y resistencia mecánica S_{UTS} en este trabajo, son las siguientes:

$$S_{Y[1]} = \alpha_1 \cdot \frac{P_{Y[1]}}{t^2} + \alpha_2 \quad (1)$$

$$S_{Y[2]} = \beta_1 \cdot \frac{P_{Y[2]}}{t^2} + \beta_2 \quad (2)$$

$$S_{UTS[3]} = \eta_1 \cdot \frac{P_{max}}{t} + \eta_2 \quad (3)$$

$$S_{UTS[4]} = \gamma_1 \cdot \frac{P_{max}}{t \cdot d_{max}} + \gamma_2 \quad (4)$$

donde t es el espesor de probeta, P es la carga, d es la deflexión de la probeta, P_Y es la carga de transición, P_{max} es la carga máxima y d_{max} es la deflexión de la probeta a carga máxima.

En las ecuaciones (1) a (4), se ha considerado nulo el término independiente y la constante de la relación lineal ha sido calculada considerando las cargas del ensayo SPT y los valores de tensión extraídos del ensayo convencional de tracción.

En los ensayos SPT es fundamental la extracción y preparación de probetas, de manera que no se afecten las propiedades del material y se obtengan resultados representativos. LACALLE et al. [9] estudian la influencia de distintos factores, entre los que se destaca el espesor.

Si bien los modelos de análisis y estimación de propiedades contemplan distintos espesores de probetas, el CEN recomienda 0,50 mm. En este trabajo se analiza la variación de las propiedades estimadas a partir de mediciones sobre probetas de un mismo material pero de distintos espesores de probeta. El material elegido es acero inoxidable AISI 304L, en forma de chapa laminada de 4 mm de espesor.

Por otra parte, un estudio similar fue reportado por FIERRO et al. en [10] pero realizado sobre acero inoxidable en forma de chapa de espesor 0,7 mm. Las características metalúrgicas similares de ambas chapas permiten establecer la sensibilidad del ensayo frente a pequeñas variaciones en las propiedades mecánicas y comparar a su vez esta sensibilidad con el grado de incertidumbre que puede originarse en el uso de probetas de espesores diferentes al recomendado.

La simulación por elementos finitos presentado por FIERRO et al. en [11] para las curvas experimentales de Small Punch Test, se usó con la finalidad de verificar las variaciones que produce el uso de distintos espesores de las probetas y evaluar su sensibilidad.

2. MÉTODOS

2.1 Experimental

Para este trabajo se seleccionó el acero inoxidable AISI 304L, que se caracterizó química, metalúrgica y mecánicamente por técnicas convencionales. Las muestras se extrajeron de una chapa laminada en frío con recocido (solubilizado), de 4 mm de espesor.

En la Tabla 1 se indica la composición química, mientras que las propiedades de tracción obtenidas experimentalmente se informan en la Tabla 2 y Figura 1. Los ensayos fueron realizados en una máquina universal MTS 810 conforme a ASTM E8M.

La metalografía realizada por pulido mecánico y ataque con agua regia metanólica reveló una microestructura constituida fundamentalmente por granos de austenita, de tamaño de grano 7 según ASTM E112. En todos los casos se agregan los valores correspondientes a chapa de 0,7 mm estudiada previamente

por FIERRO et al [12].

Tabla 1: Composición química porcentual, método espectrométrico ASTM E41, remanente Fe. A: muestra de espesor 4mm, B: muestra de espesor 0,7mm, C: AISI 304L.

	C	Cr	Ni	Si	Mn	P	S
A	0,03	19,7	8,0	0,45	1,62	0,032	0,005
B	0,03	19,9	8,0	0,40	1,60	0,030	0,004
C	0,03	18-20	8-12	1	<2	<0,04	<0,03

Tabla 2: Propiedades de tracción. Dirección de laminación L y transversal T. S_y : tensión de fluencia; S_{UTS} : tensión máxima; ϵ_F : deformación a la rotura.

MATERIAL	S_y [MPa]	S_{UTS} [MPa]	ϵ_F
Muestra T 4,0mm	288	655	0,747
Muestra L 4,0mm	288	660	0,496
Muestra T 0,7mm	281	634	0,570
Muestra L 0,7mm	296	674	0,496
AISI 304L L	295	660	0,560

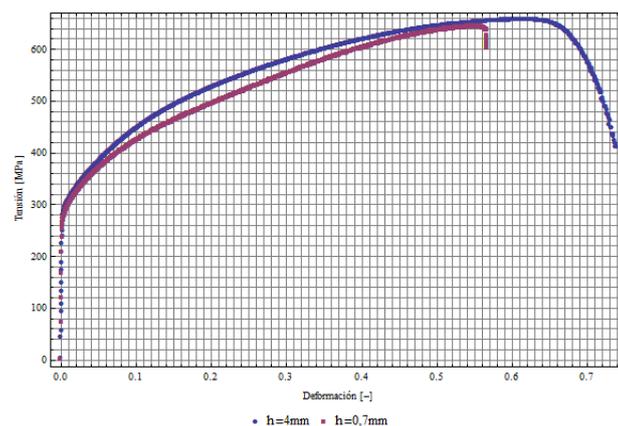


Figura 1: Curvas tensión-deformación para probetas muestra T, espesor de 4,0mm y 0,7mm.

Se prepararon cinco grupos de probetas de sección de $10 \times 10 \text{ mm}^2$ para los ensayos SPT, con espesores de 0,48 hasta 0,52mm, con el objeto de estudiar la sensibilidad del ensayo con el espesor. Para obtener estos espesores partiendo de la chapa, se la seccionó por electroerosión hasta un espesor de 1mm y luego ambas superficies se sometieron a un proceso de pulido semiautomático optimizado. El pulido se realizó con papeles abrasivos hasta un pulido final con papel grit 600. El espesor de cada probeta se controló mediante un micrómetro en cinco posiciones (una en el centro y una en cada centro de los lados).

El dispositivo para el ensayo SPT está adaptado a una máquina universal de ensayos Sintech 2DL que adquiere en forma continua la carga aplicada, mientras que la deflexión de la probeta se registra con un comparador digital también en forma continua, de acuerdo con lo estudiado por MORENO et al. [13]. Al montar cada probeta en el dispositivo de ensayo, se aplicó un torque de 2Nm en cada tornillo del dispositivo.

En los ensayos SPT las probetas se deforman hasta la rotura mediante la acción del punzón esférico, aplicando carga con una velocidad de 1mm/min entre cabezales.

Se ensayaron 24 probetas, cuya designación y espesor se incluyen en la Tabla 3. En las curvas experimentales se identificaron las cargas correspondientes a la transición elástico-plástica P_Y y carga máxima $P_{m\acute{a}x}$. Los resultados obtenidos están incluidos en la Tabla 3, donde también se informan las tensiones de fluencia S_Y y la resistencia mecánica S_{UTS} estimadas para cada probeta con las expresiones (1), (2), (3) y (4).

Tabla 3: Cargas de ensayo SPT y tensiones estimadas según distintas expresiones.

ID	t [mm]	P _{Y[1]} [N]	P _{Y[2]} [N]	P _{max} [N]	S _{Y[1]} [MPa]	S _{Y[2]} [MPa]	S _{UTS[3]} [MPa]	S _{UTS[4]} [MPa]
1	0,48	186	254	2226	308	302	698	681
4	0,48	197	268	2227	327	318	698	695
Media	0,48	191±8	261±10	2227±0	317±13	310±12	698±0	688±10
3	0,49	194	266	2185	308	303	671	691
5	0,49	202	277	2304	320	315	707	695
6	0,49	184	256	2244	293	292	689	677
18	0,49	200	283	2353	317	322	722	732
22	0,49	193	266	2226	306	303	683	693
Media	0,49	194±7	270±10	2262±66	309±11	307±12	695±20	697±21
13	0,50	212	292	2349	324	272	707	731
15	0,50	202	279	2344	309	305	705	710
19	0,50	156	232	2352	238	254	708	684
24	0,50	176	249	2246	269	272	676	669
Media	0,50	187±26	263±27	2323±51	285±39	276±21	699±15	698±27
7	0,51	201	281	2326	294	295	686	669
8	0,51	224	309	2373	328	324	700	705
9	0,51	193	270	2273	284	284	670	670
10	0,51	155	225	2160	227	237	637	633
11	0,51	167	245	2267	245	257	669	645
12	0,51	218	293	2265	320	308	668	680
16	0,51	236	321	2424	346	338	715	736
17	0,51	182	263	2356	267	276	695	690
20	0,51	202	285	2368	296	299	698	702
21	0,51	198	273	2355	290	287	695	684
23	0,51	216	294	2332	317	309	688	687
Media	0,51	199±24	278±27	2318±72	292±36	292±29	684±21	682±28
14	0,52	232	317	2351	331	320	690	725

2.2 Simulación computacional

Se utilizó una simulación desarrollada previamente [10] con el código ALGOR v.12, donde se modeliza la deformación a la fractura de las probetas, asumiendo una configuración axisimétrica. Para el material se consideró un modelo multilíneal con endurecimiento isotrópico, sin considerar daño mecánico por lo que la simulación será precisa mientras la deformación sea uniforme. Se tomaron como propiedades elásticas: Módulo de elasticidad $E=199000$ MPa y coeficiente de Poisson $\nu = 0,285$. El contacto entre la probeta y el punzón se ha elegido con un coeficiente de fricción $\eta = 0,3$.

Para el modelo multilíneal, se utiliza como base la curva de tensión real-deformación real obtenida de los ensayos de tracción que se muestran en la Figura 1. Como el modelo no incluye un criterio de falla, la caída de carga observada es atribuible a la reducción del espesor y el endurecimiento producidos por la deformación plástica.

En las simulaciones se obtienen curvas carga-desplazamiento, donde este último se define de la misma manera que los desplazamientos medidos en los ensayos como la deflexión en el centro de la probeta.

3. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Para la evaluación de las curvas experimentales y simuladas, se aplicaron los métodos descritos en la

Sección 1, donde se describe la identificación de las cargas características y la estimación de las propiedades mecánicas de tracción. Las simulaciones se corrieron para espesores de 0,48 hasta 0,52mm. En la Tabla 4 se muestran las cargas P_Y y P_{max} obtenidas de las simulaciones así como las tensiones estimadas para cada espesor de probeta.

Tabla 4: Resultados de cargas y tensiones de la simulación numérica.

t [mm]	$P_{Y[1]}$ [N]	$P_{Y[2]}$ [N]	P_{max} [N]	$S_{Y[1]}$ [MPa]	$S_{Y[2]}$ [MPa]	$S_{UTS[3]}$ [MPa]	$S_{UTS[4]}$ [MPa]
0,48	186	259	2634	309	308	822	785
0,49	182	267	2692	291	306	823	793
0,50	177	272	2755	272	299	825	783
0,51	168	279	2812	248	295	826	794
0,52	174	293	2886	247	297	831	779

En la Tabla 5 se presenta un resumen de los resultados obtenidos experimentalmente y mediante la simulación para distintos espesores de probeta correspondientes a la chapa de 4mm de espesor del presente trabajo. Allí se añaden también los resultados para la chapa de 0,7mm de espesor estudiada previamente. Los valores obtenidos de las determinaciones experimentales en la chapa de 4mm son más homogéneos que las de chapa de 0,7mm. Cambian dentro de un rango de 11% para la fluencia y 6% para la rotura, pero además son más certeros respecto de los datos de tracción. En particular, si bien las fórmulas están desarrolladas para cualquier espesor t , en ambos casos, chapa de 4 y de 0,7mm, los resultados se acercan más a los valores de tracción con el espesor de probeta recomendado 0,5mm.

Tabla 5: Tabla comparativa ensayo y simulación computacional. Referencias: h =espesor de chapa; t = espesor de mini probeta. Resultados de cargas y tensiones de la simulación numérica.

	t [mm]	h [mm]	$S_{Y[1]}$ [MPa]	$S_{Y[2]}$ [MPa]	$S_{UTS[3]}$ [MPa]	$S_{UTS[4]}$ [MPa]
Ensayo	0,48	4,0	317±13	310±12	698±0	688±10
FEM			309	308	822	785
Ensayo		0,7	273±16	265±10	638±6	632±5
FEM			275	270	633	636
Ensayo	0,49	4,0	309±11	307±12	695±20	697±21
FEM			291	306	823	793
Ensayo		0,7	263±58	258±42	647±4	643±15
FEM			274	270	634	635
Ensayo	0,50	4,0	285±39	276±21	699±15	698±27
FEM			272	299	825	783
Ensayo		0,7	316±13	298±10	656±9	664±7
FEM			272	272	635	638
Ensayo	0,51	4,0	292±36	292±29	684±21	682±28
FEM			248	295	826	794
Ensayo		0,7	277±29	272±15	633±12	631±22
FEM			271	271	636	635
Ensayo	0,52	4,0	331	320	690	725
FEM			247	297	831	779
Ensayo		0,7	239±26	256±13	614±7	616±15
FEM			267	274	640	629

En la Fig. 4 se comparan curvas experimentales y la curva simulada para espesor $t = 0,50$ mm. Se observa que la simulación está ajustando correctamente la curva hasta la región cercana a la caída de carga,

para apartarse bruscamente cerca del máximo de carga sobreestimándolo por alrededor del 20%. Este fenómeno también se aprecia en el resto de los valores reportados en la Tabla 5. Es claro que al no considerar el daño en el modelo de simulación, se produce un apartamiento radical en los valores simulados respecto de los medidos, en la vecindad de la formación de la estricción.

En las Fig. 5 y Fig. 6 se muestran en detalle las curvas de simulación y las ensayadas por separado.

La simulación demuestra ser útil para estimar correctamente la discrepancia de los valores de carga y tensión de fluencia en el caso de probetas de distinto espesor al recomendado.

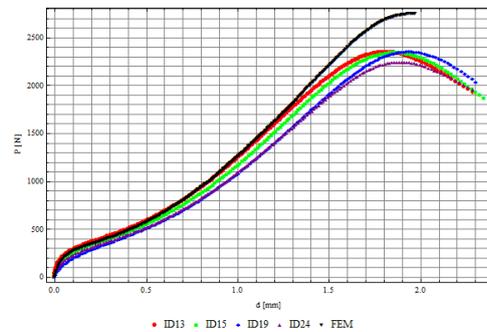


Figura 2: Curvas experimentales y simulada para espesor $t=0,50$ mm.

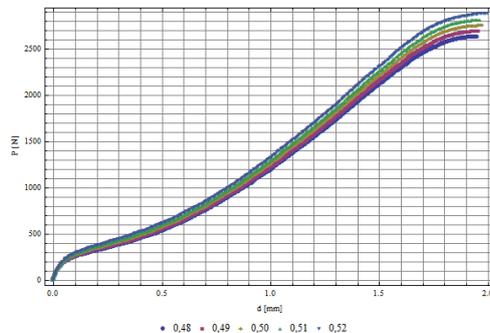


Figura 3: Curvas de simulación numérica para distintos espesores.

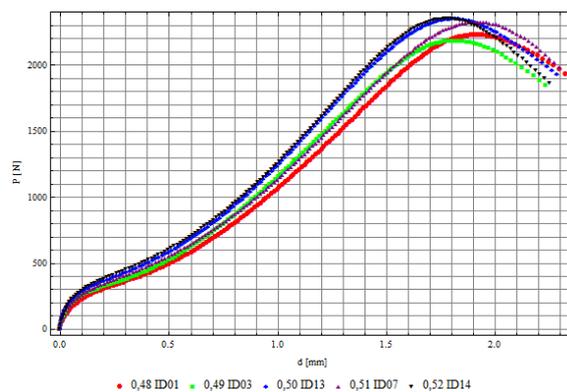


Figura 4: Curvas de ensayo para distintos espesores.

4. CONCLUSIONES

Las propiedades mecánicas de aceros inoxidables austeníticos tipo AISI-SAE304 pueden obtenerse mediante el uso de miniprobetas y la técnica SPT, complementada con la simulación.

Se ensayó un material del mismo fabricante en dos espesores de chapa (4mm y 0,7mm). Estas tenían similares características de tratamiento mecánico y térmico y estructura metalográfica. Sus propiedades mecánicas de tracción eran comparables teniendo diferencias menores al 5%, con excepción de la deformación a rotura que es levemente superior en la chapa gruesa. Se comprobó que los ensayos SPT permiten estimar esas propiedades en tracción con una precisión adecuada y distinguir entre pequeñas

diferencias en un mismo material.

Se realizaron múltiples ensayos con probetas de espesores entre 0,47 y 0,52 mm, distintos al recomendado (0,50mm) y se estableció que para obtener las propiedades de tracción con un nivel de certidumbre del orden de 5% el espesor de probeta no debe variar más del 1% (0,49-0,51mm). Dentro de este rango es completamente válida la conclusión del párrafo anterior.

La simulación por modelado por elementos finitos del ensayo SPT es una herramienta adecuada para predecir la respuesta del material en los alrededores del espesor nominal recomendado y mostró ser precisa en la estimación de la tensión de fluencia. La no incorporación del daño en el modelo del material produce una sobrestimación de la tensión máxima del orden del 20%.

5. AGRADECIMENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Defensa el apoyo económico para el desarrollo del proyecto dentro del programa PIDDEF N°16/12.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] MANAHAN, M.P., ARGON, A.S., HARLING, O.K., "The development of a miniaturized disk bend test for the determination of postirradiation mechanical properties", *Journal of Nuclear Materials*, n. 103-104, pp 1545-1550, 1981.
- [2] RODRÍGUEZ, C., FERNÁNDEZ, M., CABEZAS, J.G., *et al.*, "The use of the small punch test to solve practical engineering problems", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* v. 86, parte A, pp 109-116, 2016.
- [3] ALTSTADT, E., GE, H.E., KUKSENKO, V., *et al.*, "Critical evaluation of the small punch test as a screening procedure for mechanical properties", *Journal of Nuclear Materials*, v. 472, Jul. 2015.
- [4] RODRÍGUEZ, C., GARCÍA CABEZAS, J., CÁRDENAS, E., *et al.*, "Mechanical properties characterization of Heat-Affected Zone using the Small Punch Test", *Welding Journal*, v. 88, pp. 188–192, 2009.
- [5] MARTÍNEZ-PAÑEDA, E., GARCÍA, T.E., RODRÍGUEZ, C., "Fracture toughness characterization through notched small punch test specimens", *Materials Science and Engineering: A*, v. 657, pp 422–430, 2016.
- [6] NOBAKHTI, H., SOLTANI, N., "Evaluating Small Punch Test as Accelerated Creep Test Using Larson–Miller Parameter", *Experimental Techniques*, v. 40, pp 645 –650, 2016.
- [7] DOGAN, B., HYDE, T., "Industrial application of Small Punch Testing for in-service component condition assessment: An Overview Proceedings of the ASME 2012", *Pressure Vessels & Piping Conference PVP2012*, Toronto, Jul. 2012.
- [8] RODRÍGUEZ, C., GARCÍA, T., BELZUNCE, F.J., *et al.*, "Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test", *Journal of Alloys and Compounds*, v. 582, pp 708-717, 2014
- [9] LACALLE, R., ÁLVAREZ, J. A., GUTIÉRREZ-SOLANA, F., "Analysis of key factors for the interpretation of small punch test results", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, v. 31, n.10, pp 841–849, 2008.
- [10] FIERRO, V., ANSALDI, A., GABARAIN, R., *Método de obtención de probetas para ensayo SPT (Small Punch Test)*, CITEDEF, ISSN 0325 1527, n. 932, 2015.
- [11] FIERRO, V., ALVAREZ VILLAR, N., ANSALDI, A., *et al.*, "Modelado y aplicación del ensayo de punzonado en miniprobetas de acero AISI 304L", *Anales SAM/CONAMET*, pp. 17-20, 2015.
- [12] FIERRO, V., ÁLVAREZ VILLAR, N., ANSALDI, A., *et al.*, *Método de obtención y evaluación de propiedades mecánicas en ensayo SPT*, CITEDEF, ISSN 0325 1527, n. 935, 2015.
- [13] MORENO, M.F., BERTOLINO, G., YAWNY, A., "The significance of specimen displacement definition on the mechanical properties derived from Small Punch Test", *Materials and Design*, v. 95, pp. 623-631, 2016.