

# LA ELECTROEROSIÓN POR HILO APLICADA A LA MANUFACTURA DE PROBETAS PLANAS DE TRACCIÓN NORMALIZADAS OBTENIDAS A PARTIR DE CHAPAS FINAS DE ACERO GALVANIZADAS

D. Martínez Krahmer<sup>(1)</sup>, A. Paredes<sup>(1)</sup>, D. Russo<sup>(1)</sup> y P. Torres<sup>(1)</sup>.

<sup>(1)</sup> Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Centro de Investigación y Desarrollo en Mecánica, Casilla de Correo 1650, Miguelete, Provincia de Buenos Aires, Argentina. [mkrahmer@inti.gov.ar](mailto:mkrahmer@inti.gov.ar)

## RESUMEN

Con el objeto de mostrar que la electroerosión por hilo, denominada en inglés WEDM (Wire Electrical Discharge Machining) es apta para la manufactura de probetas planas de tracción obtenidas a partir de chapas finas de acero galvanizadas, cuando se lo compara con el fresado, considerado como método de referencia, se estudiaron las condiciones geométrico – dimensionales, y las propiedades mecánicas (Resistencia a la tracción, límite de fluencia y alargamiento), de probetas normalizadas construidas por ambos métodos.

La comparación de los resultados ponen en evidencia que a pesar de las diferencias observadas en los aspectos superficiales, y sus parámetros de rugosidad asociados, el proceso WEDM es un método apto para la fabricación de probetas planas de tracción, por cuanto cumple con los requisitos geométrico - dimensionales, y además, cuando se contrastan las propiedades mecánicas en el rango de espesores evaluado mediante el método del análisis de la varianza (ANOVA), los promedios que las representan no tienen diferencias significativas.

**Palabras claves:** electroerosión por hilo, probetas planas de tracción, chapas finas de acero galvanizadas.

## 1. INTRODUCCIÓN

El único método aceptado internacionalmente para la manufactura de probetas planas de tracción normalizadas obtenidas a partir de chapas finas, es el proceso de mecanizado por arranque de viruta denominado fresado [1-2-3].

Sin embargo, la construcción de este tipo de probetas por fresado, implica una serie de dificultades a saber:

- Demanda la construcción de un dispositivo especial de sujeción, por cada tipo de probeta.
- Previo al mecanizado deben cortarse sectores aproximados a partir de las chapas a evaluar, por cizallado, aserrado o punzonado en matriz.
- Para llevar las probetas a la forma deseada debe recorrerse el perfil varias veces durante el corte.
- Como las probetas se mecanizan en paquetes, el espesor del mismo viene determinado por la longitud del filo de la herramienta de corte (Para espesores superiores a 10mm se emplean necesariamente fresas de acero rápido), y su esbeltez.
- Tiempo de preparación - mecanizado elevado.
- Dependiendo del tipo de máquina empleada, es difícil cumplir con el error de forma Efm.

Respecto del proceso WEDM su principal desventaja radica en su bajo índice de remoción de material. A pesar de ello, operando en condiciones de corte de desbaste o también llamadas de primer corte, que si bien produce una rugosidad elevada en la superficie cortada, existen evidencias para suponer que las propiedades mecánicas de las probetas planas de tracción no serían afectadas significativamente [4,5].

Si bien es factible la aparición de otro efecto no deseado, como es la generación de una Zona Afectada Térmicamente (Zona ZAT), típica de los procesos electro-térmicos o térmicos, como el proceso de corte por láser, también hay certidumbre para pensar que estas alteraciones acotadas no debieran afectar los resultados de las propiedades mecánicas [5]. En este sentido, algunos autores, han verificado inclusive que, según sea la combinación del material a cortar, el material del electrodo y el tipo de dieléctrico empleado, esta Zona Afectada Térmicamente podría no llegar a producirse [6].

Entre sus ventajas se hallan, la posibilidad de realizar el corte por paquete, de recorrer una sola vez el perímetro a cortar, los avances alcanzados por esta tecnología en los últimos años, fundamentalmente en lo que respecta al generador de impulsos que han permitido elevar sustancialmente los regímenes de remoción de material [7], el empleo como electrodo de un alambre universal y la utilización de agua como dieléctrico – que elimina la posibilidad de incendio, propiciando el trabajo durante las 24hs sin atención - [6], posicionan al WEDM en condiciones competitivas respecto del fresado cuando se comparan las capacidades de mecanizado para la realización de este tipo de trabajo, constituyendo entonces una alternativa moderna para realizar las citadas probetas, según las condiciones establecidas por la norma IRAM-IAS U500-102 Parte III [3].

La información comentada y experiencias previas [5], permiten presuponer que las diferencias en las propiedades mecánicas de probetas obtenidas, partiendo de una misma chapa, por fresado y WEDM,

no serían significativas, admitiendo así otra tecnología de corte apta para la fabricación de estas probetas.

Como objetivos adicionales, se establecen estrategias de fabricación de probetas planas de tracción cuando se emplea WEDM, se comparan los aspectos superficiales generados por ambos métodos, como así también, se exponen los cambios metalúrgicos introducidos por la electroerosión por hilo.

**2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

**2.1 Materiales y procesos**

Las muestras se extrajeron según IRAM-IAS U500-214 [8], de chapas finas de acero galvanizadas de bajo carbono ( $\approx 0,05\%C$ ), correspondientes a 3 espesores diferentes, comprendidos en el intervalo 0,5 a 3mm.

La dimensión inicial aproximada de las chapas fue 1000mm (ancho) x 500mm (longitud), con espesores nominales de 0,5; 1,6 y 2,5mm.

En primer lugar se obtuvieron las probetas cortadas por WEDM paralelas a la dirección de laminación, a razón de 4 probetas por espesor (Las dimensiones y especificaciones de fabricación, se detallan en 2.2). Posteriormente se construyeron las fresadas totalizando en conjunto un total de 24 probetas.

Para medir el ancho de las probetas se utilizó un calibre digital Etalon, para el espesor un micrómetro Mitutoyo, para la rugosidad un rugosímetro Taylor-Hobson, para el alargamiento un sistema de medición láser Hewlett-Packard, las imágenes SEM se tomaron en un microscopio Philips SEM 505, los perfiles de microdureza con un microdurómetro Karl Frank, las observaciones metalográficas con un microscopio Olympus MO2, y se ensayaron en una máquina de tracción Shimadzu UH-1000 KNA.

**2.2 Muestra**

Las especificaciones geométricas responden a IRAM-IAS U500-102 parte III y el plano de fabricación para las construidas por WEDM corresponde a la Fig. 1.

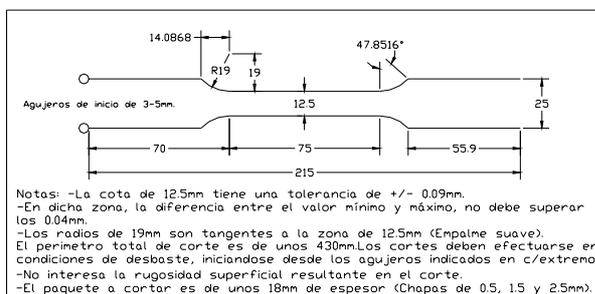


Fig. 1: Plano de fabricación de probeta plana de tracción normalizada para ser cortada por WEDM.

Las probetas de tracción fresadas se elaboraron en un Centro de Mecanizado horizontal Kearney & Trecker MM200 mediante el programa mectra.txt, y las cortadas por WEDM, se construyeron en un equipo CT Electromecánica W1.

**2.3 Condiciones operativas del proceso de fresado**

Se empleó una fresa de acero rápido helicoidal de 6 cortes y 25mm de diámetro.

En la Tabla I se presentan los valores para las principales variables empleadas durante el fresado: la velocidad de corte (Vc) en m/min, la velocidad de avance (Va) en mm/min, el perímetro a cortar por pasada (P) en mm y el número total de pasadas (Ntp) (Como las probetas fueron mecanizadas en un sólo paquete de unos 18,4mm de espesor, las condiciones de corte no dependieron del espesor de cada chapa).

Tabla I. Condiciones de corte de probetas fresadas

Vc (m/min)	Va (mm/min)	P (mm)	Ntp
20	70	620	12

**2.4 Condiciones operativas del proceso WEDM**

Las probetas construidas por electroerosión por hilo, fueron cortadas con alambre de latón de 0,25mm de diámetro, empleando como dieléctrico agua desionizada.

En la Tabla II se presentan los valores para las principales variables empleadas en el corte WEDM[7]: la tensión de descarga (Vd) en voltios, el tiempo de duración del pulso (Ton) en microsegundos, el tiempo entre dos pulsos (Toff) en microsegundos, la intensidad de corriente eléctrica (I) en Ampère, el perímetro a cortar por pasada (P) en mm y el número total de pasadas (Ntp) (Como las probetas fueron mecanizadas en un sólo paquete, las condiciones de corte no dependieron del espesor de cada chapa).

Tabla II. Condiciones de corte de probetas electroerosionadas.

Vd (V)	Ton (µs)	Toff (µs)	I (A)	P(mm)	Ntp
180	24	32	12	430	1

**3. RESULTADOS**

**3.1 Dimensional**

Para evaluar la capacidad de manufactura de cada uno de los procesos de fabricación estudiados, se midió el ancho de las probetas en la zona calibrada (Cota nominal 12,5mm).

En la Tabla III se presentan los anchos medidos promedios (Amp) en mm y los errores de forma máximos (Efm) resultantes en mm, de la zona calibrada de 12,5mm nominal, en función del espesor nominal de la chapa revestida y el tipo de proceso.

Tabla III. Dimensiones de las probetas de tracción.

Espesor (mm)	Probetas fresadas		Probetas WEDM	
	Amp	Efm	Amp	Efm
0,5	12,57	0,01	12,47	0,02
1,6	12,57	0,01	12,51	0,03
2,5	12,57	0,02	12,53	0,03

**3.2 Rugosidad superficial de la zona de corte**

La terminación superficial fue caracterizada por medio de tres parámetros: la rugosidad media aritmética Ra,

la rugosidad total Rt y la rugosidad Sm. Los mismos fueron medidos empleando una longitud de referencia  $L_c=0,8\text{mm}$  y una longitud de evaluación  $L_n=4\text{mm}$ . Ra y Rt describen el perfil superficial en dirección vertical (Profundidad), mientras que Sm lo describe en dirección horizontal (Ancho) [9].

En las tablas IV, V y VI se presentan los valores de Ra, Rt y Sm promedio con sus incertidumbres expandidas  $U_{95}$  promedio, en función del espesor nominal y tipo de proceso.

**Tabla IV.** Rugosidad Ra de las probetas de tracción

Espesor (mm)	Probetas Fresadas		Probetas WEDM	
	Ra( $\mu\text{m}$ )	$U_{95}$ ( $\mu\text{m}$ )	Ra( $\mu\text{m}$ )	$U_{95}$ ( $\mu\text{m}$ )
0,5	1,08	$\pm 0,16$	2,75	$\pm 0,23$
1,6	0,89	$\pm 0,04$	3,31	$\pm 0,37$
2,5	0,72	$\pm 0,09$	2,93	$\pm 0,12$

**Tabla V.** Rugosidad Rt de las probetas de tracción

Espesor (mm)	Probetas Fresadas		Probetas WEDM	
	Rt( $\mu\text{m}$ )	$U_{95}$ ( $\mu\text{m}$ )	Rt( $\mu\text{m}$ )	$U_{95}$ ( $\mu\text{m}$ )
0,5	7,8	$\pm 0,9$	22,0	$\pm 1,6$
1,6	6,8	$\pm 0,4$	27,5	$\pm 3,2$
2,5	6,2	$\pm 0,8$	22,4	$\pm 1,2$

**Tabla VI.** Rugosidad Sm de las probetas de tracción

Espesor (mm)	Probetas Fresadas		Probetas WEDM	
	Sm( $\mu\text{m}$ )	$U_{95}$ ( $\mu\text{m}$ )	Sm( $\mu\text{m}$ )	$U_{95}$ ( $\mu\text{m}$ )
0,5	79	$\pm 12$	82	$\pm 10$
1,6	70	$\pm 2$	73	$\pm 2$
2,5	60	$\pm 7$	64	$\pm 4$

En la Fig. 2 puede observarse el aspecto superficial en todo el espesor de una probeta de 0,5mm, cortada por electroerosión por hilo, obtenido por medio de una imagen SEM.

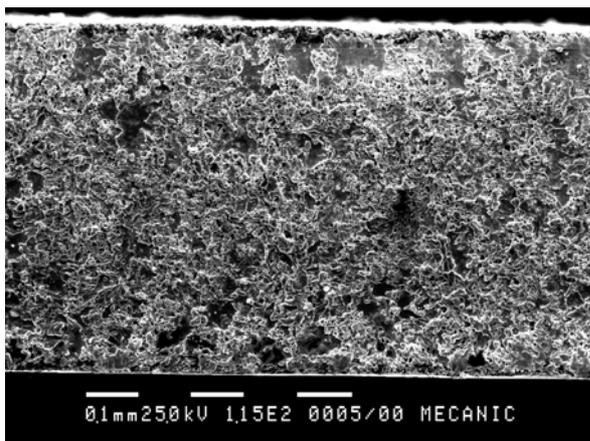


Fig. 2: Imagen SEM de superficie cortada por WEDM

**3.3 Análisis microestructural y microdureza.**

Se prepararon metalográficamente para su análisis secciones transversales correspondientes a cada uno de los tres espesores de chapas evaluadas. Las microestructuras fueron reveladas usando como reactivo nital al 3%. Las microdurezas fueron determinadas empleando una carga de 100g.

Los perfiles de microdureza resultantes sobre dichas secciones, así como los estudios metalográficos realizados, revelan que el método de corte WEDM no produjo cambios de estructura (La microestructura observada en la zona de influencia del corte, como en zonas alejadas, fue fundamentalmente ferrita equiaxial), ni del tamaño de grano, ni variaciones apreciables de dureza, ni siquiera cambios de coloración en las zonas próximas a la superficie.

La Fig. 3, corresponde a uno de los perfiles de microdureza obtenidos, y la Fig. 4 a una imagen metalográfica (500X) de la sección transversal de una probeta cortada por WEDM.

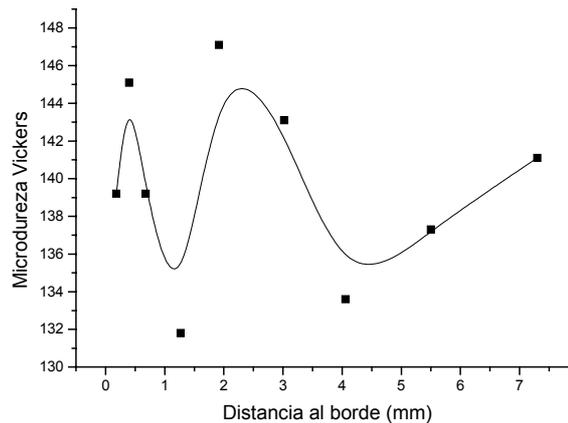


Fig.3 Perfil de microdureza (s=0,5mm)

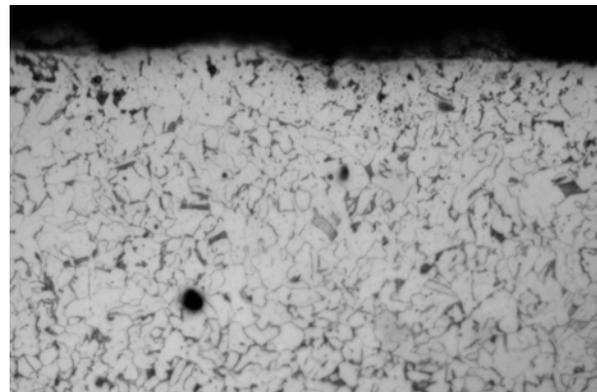


Fig. 4: Imagen metalográfica de la sección transversal correspondiente a una probeta (s=2,5mm).

**3.4 Propiedades mecánicas**

Se ensayaron todas las probetas a tracción, resultando 3 propiedades mecánicas: Resistencia a la tracción (Rm), límite de fluencia (Re) y alargamiento (A).

Las condiciones generales del ensayo fueron las establecidas por IRAM-IAS U500-102 parte I [10].

Los valores correspondientes promedios, se presentan en las tablas VII a XV con los resultados estadísticos de los 9 test ANOVA, agrupados por propiedad mecánica y espesor nominal de chapa "s" (Se indican por tipo de proceso: valor promedio de la propiedad mecánica, varianza Va, número de mediciones n y valores Fo y  $F_{0.05,3,4}$ ).

**Tabla VII.** Resistencia a la tracción en 0,5mm

.s = 0,5mm	Rm(MPa)	Va	n	Fo	F <sub>0.05,3,4</sub>
WEDM	428,5	29,9	4	4,73	6,59
Fresado	421,1	16,7	4		

**Tabla VIII.** Resistencia a la tracción en 1,6mm

.s = 1,6mm	Rm(MPa)	Va	n	Fo	F <sub>0.05,3,4</sub>
WEDM	499,6	162	4	0,26	6,59
Fresado	494,8	192,2	4		

**Tabla IX.** Resistencia a la tracción en 2,5mm

.s = 2,5mm	Rm(MPa)	Va	n	Fo	F <sub>0.05,3,4</sub>
WEDM	470,5	33,3	4	0,03	6,59
Fresado	469,4	131,6	4		

**Tabla X.** Límite de fluencia en 0,5mm

.s = 0,5mm	Re(MPa)	Va	n	Fo	F <sub>0.05,3,4</sub>
WEDM	403,9	118,3	4	0,33	6,59
Fresado	399,7	90,5	4		

**Tabla XI.** Límite de fluencia en 1,6mm

.s = 1,6mm	Re(MPa)	Va	n	Fo	F <sub>0.05,3,4</sub>
WEDM	478	443	4	0,25	6,59
Fresado	468,6	996,3	4		

**Tabla XII.** Límite de fluencia en 2,5mm

.s = 2,5mm	Re(MPa)	Va	n	Fo	F <sub>0.05,3,4</sub>
WEDM	402	50,5	4	0,60	6,59
Fresado	396,8	128,6	4		

**Tabla XIII.** Alargamiento en 0,5mm

.s = 0,5mm	A(%)	Va	n	Fo	F <sub>0.05,3,4</sub>
WEDM	31,1	11,6	4	0,54	6,59
Fresado	29,5	8,1	4		

**Tabla XIV.** Alargamiento en 1,6mm

.s = 1,6mm	A(%)	Va	n	Fo	F <sub>0.05,3,4</sub>
WEDM	27,6	7,7	4	0,26	6,59
Fresado	28,7	10,6	4		

**Tabla XV.** Alargamiento en 2,5mm

.s = 2,5mm	A(%)	Va	n	Fo	F <sub>0.05,3,4</sub>
WEDM	31,4	2,4	4	0,54	6,59
Fresado	30,8	0,1	4		

#### 4. CONCLUSIONES

Se verificó que el WEDM es apto para la manufactura de probetas planas de tracción obtenidas a partir de chapas finas de acero galvanizadas, por cuanto las probetas cumplen las exigencias dimensionales de IRAM-IAS U500-102 parte III y los resultados inherentes a las propiedades mecánicas, no presentan diferencias significativas.

Los resultados obtenidos en términos de la rugosidad indican que existe una marcada diferencia en los perfiles de rugosidad en sentido vertical (Tanto los valores de Ra como Rt, de las probetas cortadas por WEDM, son en promedio un 240% más elevados que en las probetas fresadas), mientras en sentido horizontal, es prácticamente inexistente (Para la

rugosidad Sm la variación promedio resultó de sólo un 5%). Sin embargo, estas modificaciones no parecen afectar las propiedades mecánicas.

Finalmente, a pesar de tratarse de un proceso electrotérmico, la influencia térmica fue despreciable.

#### 5. REFERENCIAS

1. BS EN 10002-1:2001, Metallic Materials – Tensile Testing. Part 1: Method of Test at Ambient Temperature, September 2001, pp. 34.
2. ASTM E 8M-00b, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, February 2001, pp. 2-3.
3. IRAM-IAS U500-102 Parte III, Chapas y flejes finos de acero, Método de ensayo de tracción, Junio de 1987, pp. 4.
4. Sánchez J.A., Integridad superficial en piezas cortadas por hilo, EDMworld, pp. 10-11.
5. Martínez Kraemer D., Paredes A., El proceso de corte láser aplicado a la manufactura de probetas planas de tracción normalizadas obtenidas a partir de chapas finas de acero galvanizadas, Congreso Conamet/Sam Simposio Materia 2002, Santiago de Chile, 2002, pp. 389-393.
6. Teoría y práctica de la electroerosión. ONA.
7. Klocke F., Innovations and performance in wire-EDM, 13th International Symposium for Electromachining ISEM XIII, Bilbao, España, 2001, Vol. I, pp.39-59.
8. IRAM-IAS U500-214, Chapas y bobinas de acero al carbono y de baja aleación, de calidad estructural, cincadas o de aleación cinc-hierro por el proceso continuo de inmersión en caliente, Abril de 2001, pp. 13 y 15.
9. Capello E., Filice L., Micari F., Vedani M., Surface integrity and quality induced by EDM processes, 13th International Symposium for Electromachining ISEM XIII, Bilbao, España, 2001, Vol. II, pp. 701-715.
10. IRAM-IAS U500-102 Parte I, Método de ensayo de tracción de productos de acero. Condiciones Generales, Junio de 1987.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a M. Zatarain de Tekniker, S. Cechet de CT Electromecánica, P. Borello de Siderar, y a M.B. Parodi del SEM de INTI-Mecánica. Este trabajo fue financiado por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial de Argentina.

#### DEDICATORIA

A nuestros compañeros Mario Quinteiro, Director de INTI-MECANICA, y Hugo Helguero.