

EL CORTE POR CHORRO DE AGUA CON ABRASIVOS APLICADO A LA MANUFACTURA DE PROBETAS PLANAS DE TRACCIÓN OBTENIDAS A PARTIR DE CHAPAS FINAS DE ACERO GALVANIZADAS

D. Martínez Krahmer, A. Paredes, E. Ruiz, P. Pombo y P. Torres.

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

RESUMEN

Con el objeto de mostrar en que rango de espesores el corte por chorro de agua con abrasivos, en inglés AWJC (Abrasive Water Jet Cutting) es apto 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.

Los resultados de la comparación mostraron que, debido a la conicidad generada por el AWJC sobre el perímetro de corte, resulta aplicable desde el punto de vista geométrico – dimensional, cuando se emplean condiciones de corte comerciales, sólo para espesores comprendidos entre 0,5 a 1,5mm. Por otra parte, contrastadas las propiedades mecánicas en el rango de espesores descrito mediante el método del análisis de la varianza (ANOVA), los promedios que las representan no tienen diferencias significativas.

Palabras claves: Chorro de agua con abrasivos, 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], si bien, en la industria metalmecánica, son el punzonado por control numérico, el corte por láser y el AWJC, las tecnologías de corte válidas para la fabricación de piezas elaboradas a partir de chapas [4].

Sin embargo, construir estas probetas por fresado, implica una serie de dificultades:

- 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.
- Tiempo de preparación - mecanizado elevado.
- Dependiendo del tipo de máquina empleada, es difícil cumplir con el error de forma Efm.

Siendo el AWJC un servicio de corte accesible en Argentina, que como el fresado tampoco afectaría las características mecánicas por tratarse de un corte “frío”, que ocasiona un ligero o nulo endurecimiento [5], y que además elimina o disminuye cada uno de los inconvenientes citados (Se lleva a la máquina directamente la chapa a cortar y el contorno se recorre una sola vez durante el corte), podría constituir entonces una alternativa moderna y económica para realizar las citadas probetas, según las condiciones establecidas por la norma IRAM-IAS U500-102 Parte III [3]. Sin embargo, como genera una conicidad caracterizada por el ángulo de flanco Af, se vería limitado el espesor máximo de chapa al que sería

aplicable, por cuanto deben respetarse las condiciones geométricas que dicha norma establece.

En tal sentido, se efectuaron pruebas preliminares evaluatorias sobre una chapa de 2,8mm de espesor nominal, arrojando un Af promedio de 3,6°, por lo que se limitó el rango de espesores analizados ante la imposibilidad de respetar la cota de $12,5 \pm 0,09$ mm (En consecuencia, se decidió construir probetas obtenidas de chapas con espesores comprendidos en el intervalo de 0,5 a 2mm).

Las evidencias citadas permiten presuponer que las diferencias en las propiedades mecánicas de probetas obtenidas partiendo de una misma chapa por fresado y corte AWJC, no serían significativas, admitiendo así una nueva tecnología de corte para la manufactura de estas probetas, aunque en un rango restringido de espesores.

2. OBJETIVOS

- Evaluar un método de corte alternativo para la manufactura de probetas planas de tracción, en un rango acotado de espesores.
- Fijar estrategias de fabricación de probetas planas de tracción cuando se emplea AWJC.
- Comparar la terminación superficial lograda por ambos métodos, y establecer en la obtenida por AWJC, su relación con la velocidad de corte.
- Presentar las características geométricas de las probetas cortadas por AWJC.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 Materiales y diseño del experimento

La extracción de las muestras a partir de chapas finas de acero galvanizadas correspondientes a 4 espesores diferentes, comprendidos en el intervalo de 0,5 a 2mm, se efectuó según IRAM-IAS U500-214 [6].

En la tabla I se da el listado correspondiente a la composición química de las chapas (% en masa), según su espesor nominal (mm) con revestimiento (Los porcentajes de Ti, V, Mo, Ni, Ba, Nb y Cr resultaron $\leq 0,002\%$).

Tabla I.

Espesor	C	Mn	S	P	Si	Al	Cu	N
0,5	0,04	0,2	0,01	0,013	0,014	0,04	0,08	---
1	0,06	0,21	0,014	0,016	0,025	0,029	0,14	---
1,5	0,05	0,27	0,011	0,009	0,017	0,054	0,2	0,037
2	0,07	0,4	0,01	0,007	0,016	0,035	0,06	0,055

La dimensión inicial aproximada de las chapas fue 1220mm (ancho) x 500mm (longitud).

En primer lugar se obtuvieron las probetas cortadas por AWJC paralelas a la dirección de laminación, a razón de 4 probetas por espesor (Las dimensiones y especificaciones de fabricación, se detallan en 3.2). Posteriormente se construyeron las fresadas totalizando en conjunto un total de 32 probetas.

Para medir el ancho de las probetas se utilizó un calibre digital NSK, para el espesor un micrómetro Mitutoyo, para el ángulo de flanco un proyector de perfiles Prazis, para la rugosidad un rugosímetro Taylor-Hobson, para el alargamiento un sistema de medición láser Hewlett-Packard, y se ensayaron en una máquina de tracción Shimadzu UH-1000 KNA.

3.2 Muestra

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

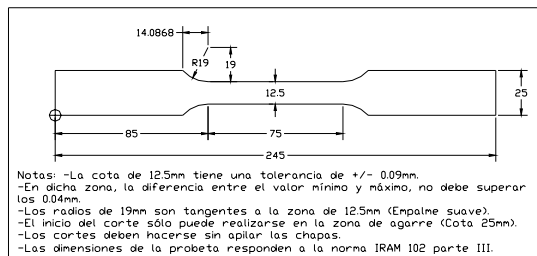


Fig. 1: Hoja de fabricación de probeta plana de tracción normalizada para ser cortada por AWJC.

Las probetas fresadas se elaboraron en un Centro de Mecanizado Kearney & Trecker MM200 mediante el programa mectra.txt y las cortadas por AWJC, se construyeron en un equipo OMAX modelo 2626 con cabezal de corte fijo.

El software OMAX Lay-out fue usado para generar la trayectoria de corte a partir de un archivo de extensión dwg, y el software OMAX Make estableció las condiciones de corte AWJC en función del material y espesor a cortar.

3.3 Condiciones operativas del proceso AWJC

El abrasivo empleado fue garnate mesh 80, el diámetro del orificio de la abrasive nozzle fue de 0,8mm y la presión utilizada de 282 MPa a 15kw. En la Tabla II se presentan los valores para las principales variables [5] empleadas durante el corte AWJC: la velocidad de corte (Vc) en mm/min, la

distancia standoff (X) – distancia entre la superficie a cortar y la abrasive nozzle - en mm, el offset (R) – distancia a que se ubica el centro de la abrasive nozzle respecto del perímetro a cortar en mm y el caudal másico de abrasivo (Ma) en g / min, en función del espesor nominal (mm) de la chapa revestida.

Tabla II

Espesor	Vc	X	R	Ma
0,5	590	0,5 – 0,6	0,4	420
1	420	0,6 – 0,8	0,35	379
1,5	347	0,6 – 0,8	0,35	375
2	232	0,6 – 0,8	0,35	376

3.4 Procedimiento de ensayo y resultados

3.4.1 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).

La geometría resultante para la sección transversal de probetas cortadas por AWJC se indica en Fig. 2 (Espesor de chapa “s”, base mayor del trapecio “Amp”, ángulo de flanco “Af” y conicidad por lado “delta” = $s * \text{tg Af}$).

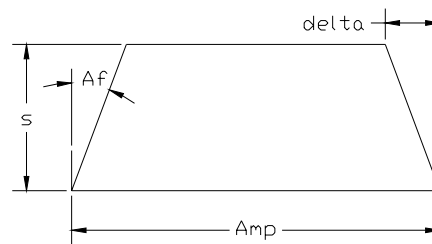


Fig. 2: Variables geométricas de la sección transversal de una probeta cortada por AWJC.

En el caso de las probetas cortadas por AWJC las determinaciones se efectuaron en la base mayor (Amp) de la sección en forma de trapecio.

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 (Sólo para las probetas cortadas por AWJC, se presentan los ángulos de flanco promedio Af en grados (°) correspondientes a la conicidad producida por el corte).

Tabla III

Espesor (mm)	Probetas fresadas		Probetas AWJC		
	Amp	Efm	Amp	Efm	Af
0,5	12,53	0,01	12,57	0,02	6,2
1	12,54	0,01	12,58	0,01	4,5
1,5	12,53	0,02	12,58	0,02	3,3
2	12,53	0,01	12,57	0,01	3,4

3.4.2 Rugosidad superficial de la zona de corte

Para caracterizar la terminación superficial se midieron las rugosidades Ra (Media aritmética) y Rt (Total), con parámetros Lc=0,8mm y Ln=4mm.

En las tablas IV y V se presentan los valores de Ra y Rt promedio con sus incertidumbres expandidas U₉₅ promedio, en función del espesor nominal y tipo de proceso.

Tabla IV

Espesor (mm)	Probetas Fresadas		Probetas AWJC	
	Ra(μm)	U ₉₅ (μm)	Ra(μm)	U ₉₅ (μm)
0,5	0,7	± 0,11	4,9	± 0,5
1	0,78	± 0,16	3,9	± 0,6
1,5	0,85	± 0,08	3,6	± 0,4
2	0,75	± 0,07	3,4	± 0,2

Tabla V

Espesor (mm)	Probetas Fresadas		Probetas AWJC	
	Rt(μm)	U ₉₅ (μm)	Rt(μm)	U ₉₅ (μm)
0,5	5,6	± 0,8	38,4	± 4,7
1	5,9	± 1	32,1	± 4,1
1,5	6,1	± 0,6	29,9	± 3,0
2	5,2	± 0,6	30,1	± 2,8

3.4.3 Propiedades mecánicas

Se ensayaron a tracción sólo las probetas que cumplieron los requisitos dimensionales de IRAM-IAS U500-102 parte III (Es decir, aquellas con espesores de 0,5 a 1,5mm), resultando 3 propiedades mecánicas: Resistencia a la tracción (Rm), límite de fluencia (Re) y alargamiento (A).

Los valores correspondientes promedios, se presentan en las tablas VI a XIV 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 VI

.s = 0,5mm	Rm(MPa)	Va	n	Fo	F _{0.05,3,4}
AWJC	426,1	93,4	4	7,87	6,59
Fresado	441,4	25,1	4		

Tabla VII

.s = 1mm	Rm(MPa)	Va	n	Fo	F _{0.05,3,4}
AWJC	414,1	38,5	4	6,36	6,59
Fresado	423,8	21,6	4		

Tabla VIII

.s = 1,5mm	Rm(MPa)	Va	n	Fo	F _{0.05,3,4}
AWJC	383,6	7,7	4	6,02	6,59
Fresado	391,1	30,6	4		

Tabla IX

.s = 0,5mm	Re (MPa)	Va	n	Fo	F _{0.05,3,4}
AWJC	375,2	59,5	4	5,83	6,59
Fresado	388,7	66,4	4		

Tabla X

.s = 1mm	Re (MPa)	Va	n	Fo	F _{0.05,3,4}
AWJC	346,5	131,1	4	0,15	6,59
Fresado	349,1	41,3	4		

Tabla XI

.s = 1,5mm	Re (MPa)	Va	n	Fo	F _{0.05,3,4}
AWJC	284,8	5,0	4	4,98	6,59
Fresado	292,2	38,9	4		

Tabla XII

.s = 0,5mm	A (%)	Va	n	Fo	F _{0.05,3,4}
AWJC	28,6	0,6	4	0,09	6,59
Fresado	28,4	0,7	4		

Tabla XIII

.s = 1mm	A (%)	Va	n	Fo	F _{0.05,3,4}
AWJC	35,4	1,7	4	4,19	6,59
Fresado	33,8	0,8	4		

Tabla XIV

.s = 1,5mm	A (%)	Va	n	Fo	F _{0.05,3,4}
AWJC	36,6	1,2	4	0,20	6,59
Fresado	35,9	7,6	4		

4. DISCUSION

4.1 Dimensional

Ambos procesos cumplen los requerimientos dimensionales de IRAM-IAS U500-102 parte III. Sin embargo, cuando se consideran simultáneamente el ancho Amp y el ángulo Af para las probetas cortadas por AWJC, deben descartarse aquellas cuyo espesor es ≥ 1,5mm, pues en dichos espesores el ancho de la base menor del trapecio (Amp -2*delta) tiene una dimensión inferior al límite estipulado de 12,41mm, como se advierte en la Tabla XV.

Tabla XV

Espesor	Af (°)	2*delta	Amp -2*delta	Cumple
0,5	6,2	0,10	12,47	SI
1	4,5	0,16	12,41	SI
1,5	3,3	0,17	12,41	SI
2	3,4	0,24	12,33	NO

Observando la tabla XV se desprende que Af disminuye con el aumento del espesor (Ver Fig. 3).

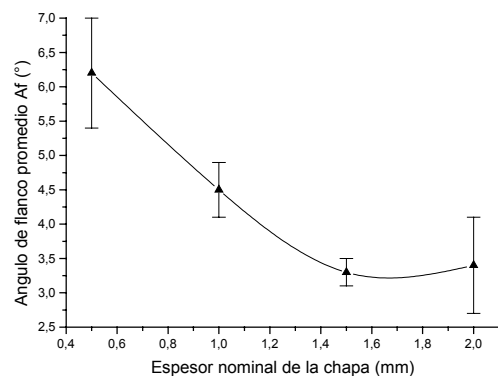


Fig. 3: Af vs espesor de la chapa cortada .

Como todo aumento del espesor a cortar significa una reducción de la velocidad de corte Vc, se confirmó que el ángulo de flanco Af aumenta cuando aumenta la velocidad de corte Vc [5].

4.2 Rugosidad superficial de la zona de corte

Tanto Ra como Rt de las cortadas por AWJC son más altas y presentan un rango más amplio en todo el espectro de espesores, respecto de las fresadas.

La correlación entre Ra y Rt para las probetas cortadas por agua es significativamente alta ($R^2= 0,978$), sugiriendo que la superficie no presenta picos o valles aleatorios, y que la textura se debe a un mecanismo regular de remoción de material. Esta situación no ocurre en las probetas fresadas, en las que esta correlación es pequeña ($R^2=0,479$).

Para aquellas probetas cortadas por AWJC se observa que, tanto Ra cuanto Rt disminuyen a medida que aumenta el espesor de la chapa cortada (Fig.4), comprobándose que Ra y Rt aumentan cuando aumenta la Vc [5].

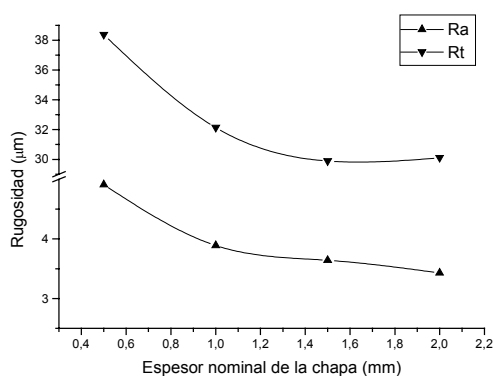


Fig. 4: Rugosidad vs espesor de la chapa cortada.

4.3 Propiedades mecánicas

Analizados los 9 test ANOVA, se deduce que los promedios que representan las propiedades mecánicas en ambos procesos no exhiben diferencias significativas.

5. CONCLUSIONES

Se verificó que el AWJC con cabezal fijo (90° respecto de la superficie a cortar), es apto para construir probetas planas de tracción a partir de chapas finas de acero galvanizadas, aunque sólo en el rango de 0,5 a 1,5mm de espesor, por cuanto las mismas cumplen las exigencias dimensionales de IRAM-IAS U500-102 parte III y los resultados inherentes a sus propiedades mecánicas, no poseen diferencias significativas cuando se las compara con las resultantes de probetas fabricadas por el método normalizado denominado fresado.

Sin embargo, los trabajos efectuados han puesto en evidencia que, este proceso está en el límite de las posibilidades desde el punto de vista dimensional, aún en el rango de espesores de 0,5 a 1,5mm, y que para lograr probetas aptas en este sentido, debe ajustarse el corte de modo que la base mayor del trapecio resultante sea de una dimensión cercana al máximo tolerado de 12,59mm (Con las condiciones de corte comerciales usadas se obtuvieron probetas dimensionalmente aptas que abarcan el 40% del rango

de espesores de IRAM-IAS U500-102 parte III (Desde 0,5 hasta 3mm)).

Se comprobó que el ángulo Af disminuye a medida que se reduce la Vc [5], por lo cual existe certidumbre para suponer que el empleo de Vc menores a las utilizadas, permitiría ampliar el rango de espesores, aunque con un incremento en el costo de fabricación.

Una manera más racional de disminuir la conicidad perimetral y ampliar así la aplicación del AWJC a todo el rango de espesores, consistiría en emplear un desarrollo tecnológico reciente denominado "Dynamic Waterjet" [7], basado en un sistema con cabezal de corte inclinable por software en tiempo real según sea el espesor, material y contorno a ejecutar.

Finalmente, el AWJC produce un contorno con una rugosidad superior a la obtenida por fresado, e incluso a la generada por corte láser [8], aunque el rango obtenido cuando se lo compara con este último es significativamente menor.

6. 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. Anónimo, Metalurgia y electricidad, **655**, 1993, pp. 92-95.
5. Momber A. y Kovacevic R., Principles of Abrasive Water Jet Machining, Springer-Verlag London, 1998.
6. 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.
7. www.flowcorp.com
8. Martinez Krahmer 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.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a G. Maidana de Siderar, O. Rípoli de Sinpar, M. Georgiou de Woma Apparatebau GmbH, y a H. Pilot de Flow Argentina.