

EL PUNZONADO POR CONTROL NUMERICO APLICADO A LA MANUFACTURA DE PROBETAS PLANAS DE TRACCIÓN NORMALIZADAS OBTENIDAS A PARTIR DE CHAPAS FINAS DE ACERO GALVANIZADAS

D. Martinez Krahmer^a, D. Russo^a, P. Torres^a, H. Lorusso^a y D. Egidi^a

^a Centro de Investigación y Desarrollo en Mecánica - Instituto Nacional de Tecnología Industrial – Avenida General Paz 5445 - Buenos Aires - Argentina.

Email: mkrahmer@inti.gov.ar

RESUMEN

Con el objeto de evaluar las posibilidades del punzonado de control numérico, como un método no normalizado para ser empleado en la manufactura de probetas planas de tracción obtenidas a partir de chapas finas, se construyeron probetas normalizadas por fresado, considerado como método de referencia, y por punzonado CNC, a partir de las mismas chapas finas de acero galvanizadas.

De las probetas resultantes, se estudiaron las condiciones geométrico – dimensionales, las características de los perímetros de corte obtenidos y las propiedades mecánicas (Resistencia a la tracción, límite de fluencia y alargamiento porcentual de rotura). Particularmente en las probetas punzonadas, se efectuaron análisis metalográficos para establecer la profundidad de la zona deformada en frío, como también las variaciones de dureza resultantes, entre la zona deformada y la zona sin deformar.

La comparación de los resultados muestra que, es el alargamiento porcentual de rotura la propiedad más sensible al endurecimiento en frío provocado por el punzonado CNC. En lo que respecta a los límites de fluencia y resistencia a la tracción, cuando se los contrasta en el rango de espesores evaluado mediante el método del análisis de la varianza (ANOVA), los promedios que los representan no tienen diferencias significativas respecto de los obtenidos en las probetas fresadas.

Palabras clave: punzonado, control numérico, probetas, tracción, chapas.

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 denominado fresado [1-2-3].

Sin embargo, en la industria metalmeccánica, son el corte por láser, el corte por chorro de agua con abrasivos, el punzonado con matriz cortante convencional y el punzonado de control numérico, las tecnologías de corte empleadas para la fabricación de piezas obtenidas a partir de chapas.

Adicionalmente, es también factible el empleo de la electroerosión por hilo, a pesar de su bajo índice de remoción de material, por cuanto es posible realizar cortes apilando las chapas y el proceso puede operar en forma continua sin atención humana.

El empleo del fresado para la construcción de estas probetas, implica las siguientes dificultades:

- Demanda la construcción de un dispositivo especial de sujeción, por cada tipo de probeta (las probetas normalizadas presentan variaciones en la forma y sus dimensiones).
- 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 10 mm se emplean necesariamente fresas de acero rápido), y su esbeltez.
- La fabricación de estas probetas insume tiempos de preparación y mecanizado elevados.
- Dependiendo del tipo de máquina empleada, es difícil cumplir con la tolerancia de forma.

Siendo el punzonado de control numérico un servicio de corte accesible en Argentina, que elimina o minimiza cada uno de los inconvenientes citados, por cuanto se lleva a la máquina directamente la chapa a cortar y el contorno se recorre una sola vez durante el corte, podría constituir una alternativa moderna y económica para realizar probetas, según los requisitos de la norma IRAM-IAS U500-102 Parte III.

La principal desventaja del punzonado radica en que produce un contorno deformado en frío y endurecido, además de provocar un cambio de forma en la sección de la probeta [4].

Si bien pareciera a priori que esta situación podría ser determinante sobre las propiedades mecánicas de probetas punzonadas, fundamentalmente sobre el alargamiento porcentual de rotura, y a pesar que la normalización vigente [3] indica que ante el empleo de un método de corte que produzca endurecimiento en frío - como el punzonado de control numérico -, el perímetro de corte debe ser removido por fresado, no existen antecedentes que evalúen las posibilidades del punzonado de control numérico aplicado a la manufactura de probetas planas de tracción y que lo compare con el método de fabricación normalizado (fresado). Son estos dos los objetivos principales del presente trabajo.

Como objetivos adicionales, se establecen estrategias de fabricación de probetas planas de tracción cuando se emplea punzonado de control numérico, se comparan los aspectos superficiales generados por ambos métodos de corte, como así también, se exponen los cambios metalúrgicos introducidos por el punzonado en la zona afectada por el corte.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materiales y procesos

Las probetas se extrajeron según IRAM-IAS U500-214 [5], de chapas finas de acero galvanizadas de bajo carbono ($\cong 0,06\%C$), correspondientes a 3 espesores, comprendidos en el intervalo 0,5 a 3mm. La dimensión aproximada de las chapas fue 1000 mm (ancho) x 500 mm, con espesores de 0,5; 1,6 y 2,5 mm.

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

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 12,5 mm).

La terminación superficial de los perímetros cortados fue caracterizada por medio de tres parámetros medidos en un plano paralelo al plano de la chapa: la rugosidad media aritmética R_a , la rugosidad total R_t (ambos describen el perfil superficial en dirección vertical) y la rugosidad S_m (describe el perfil superficial en dirección horizontal). Se empleó una longitud de referencia L_c de 0,8mm y de evaluación L_n de 4 mm.

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 2% (solución de 2 ml de HNO_3 en 100 ml de alcohol etílico 95%). Las microdurezas Vickers fueron determinadas empleando una carga de 50g.

Se ensayaron todas las probetas a tracción, resultando 3 propiedades mecánicas: Resistencia a la tracción (R_m), límite de fluencia (R_e) y alargamiento porcentual de rotura (A). Las condiciones generales del ensayo fueron las establecidas por IRAM-IAS U500-102 parte I [6].

Para medir el ancho de las probetas se utilizó un calibre digital NSK, 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 Shimadzu HMV 2000, las observaciones metalográficas con un microscopio Zeiss Axiotech, y se ensayaron en una máquina de tracción Shimadzu UH-1000 KNA.

Muestra

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

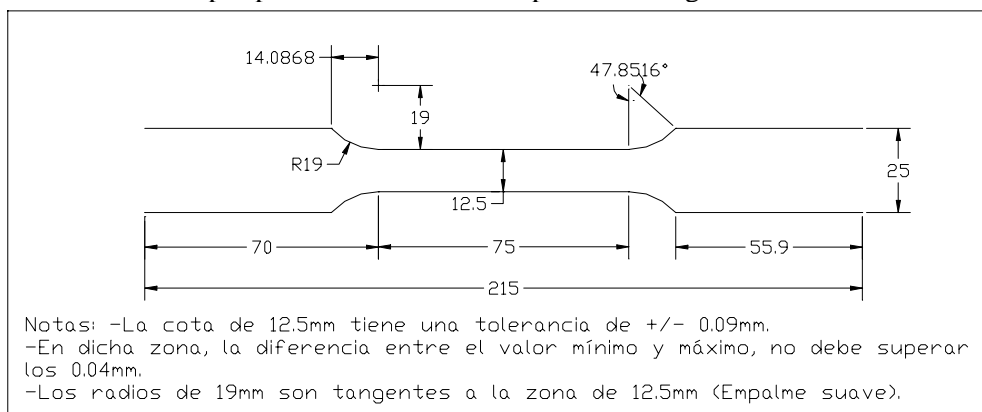


Figura 1. Plano de fabricación de probeta plana de tracción normalizada.

Las probetas de tracción fresadas se elaboraron en un Centro de Mecanizado horizontal con control numérico Kearney & Trecker MM200 y las cortadas por punzonado, se construyeron en una punzonadora Euromac BX 1000/30.

Condiciones operativas del proceso de fresado

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

En la Tabla I se presentan los valores para las principales variables empleadas durante el fresado: la velocidad de corte (V_c) en m/min, la velocidad de avance (V_a) en mm/min, el perímetro a cortar por pasada (P) en mm y el número total de pasadas (N_{tp}) (como las probetas fueron mecanizadas en un sólo paquete de unos 18,4 mm de espesor total aproximado, las condiciones de corte no dependieron del espesor de cada una de las chapas cortadas).

Tabla I. Condiciones de corte de probetas fresadas

V_c (m/min)	V_a (mm/min)	P (mm)	N_{tp}
20	70	620	12

Condiciones operativas del punzonado CNC

Las probetas construidas por punzonado, fueron cortadas por mascado con punzones estándar de sección rectangular de 25,4 x 6,35 mm con vértices redondeados para los cortes lineales y cilíndricos de diámetro 38 mm para la zona del radio (produce el corte del radio de 19mm de la probeta en un solo golpe).

En la Tabla II se presentan los valores para las principales variables empleadas en el punzonado de control numérico: el paso de mascado (P_m) para los cortes lineales en mm, la cantidad de golpes (C_g) por minuto, el perímetro a cortar por pasada (P) en mm y el número total de pasadas (N_{tp}), en función del espesor nominal (E) de chapa a cortar en mm.

Tabla II. Condiciones de corte de las probetas punzonadas.

E (mm)	P_m (mm)	C_g (g/min)	P (mm)	N_{tp}
0,5	18	120	430	1
1,6	18	108	430	1
2,5	18	90	430	1

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dimensional

En la Tabla III se presentan los anchos medidos promedios (A_{mp}) en mm y los errores de forma máximos (E_{fm}) resultantes en mm (representa la conicidad) de la zona calibrada de 12,5 mm 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)	Fresadas		Punzonadas	
	A_{mp}	E_{fm}	A_{mp}	E_{fm}
0,5	12,57	0,02	12,57	0,16
1,6	12,55	0,01	12,51	0,10
2,5	12,57	0,04	12,54	0,04

Del análisis de los resultados dimensionales se desprende que si bien ambos métodos proporcionan probetas con valores del ancho medido promedio (A_{mp}) dentro del rango tolerado, las probetas punzonadas no cumplen con el error de forma máximo admisible (E_{fm}) de 0,04 mm [3], en los espesores de 0,5 y 1,6 mm estudiados. Además, dicho error de forma, aumenta conforme disminuye el espesor de la chapa cortada.

Rugosidad, aspecto superficial y tipo de borde del perímetro de corte

En las Tablas IV, V y VI se presentan los valores de R_a , R_t y S_m promedio con sus incertidumbres expandidas U_{95} promedio, en función del espesor nominal de chapa y tipo de proceso.

Tabla IV. Rugosidad Ra de las probetas de tracción

Espesor (mm)	Fresadas		Punzonadas	
	Ra(μm)	U ₉₅ (μm)	Ra(μm)	U ₉₅ (μm)
0,5	0,90	$\pm 0,14$	2,21	$\pm 0,32$
1,6	0,87	$\pm 0,06$	1,49	$\pm 0,27$
2,5	0,73	$\pm 0,08$	2,03	$\pm 0,68$

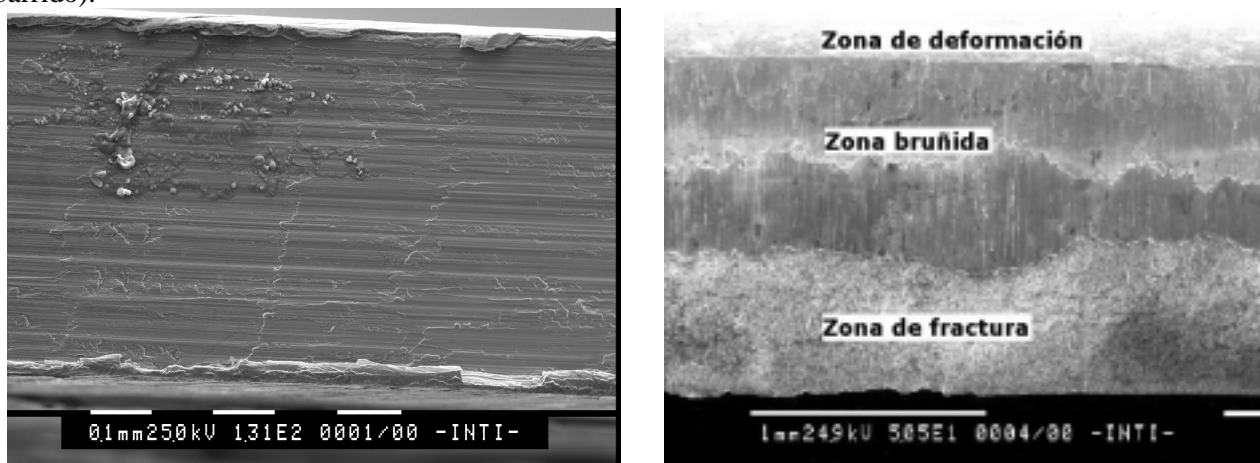
Tabla V. Rugosidad Rt de las probetas de tracción

Espesor (mm)	Fresadas		Punzonadas	
	Rt(μm)	U ₉₅ (μm)	Rt(μm)	U ₉₅ (μm)
0,5	6,7	$\pm 0,8$	21,8	$\pm 3,0$
1,6	6,4	$\pm 0,5$	12,0	$\pm 2,6$
2,5	5,7	$\pm 0,7$	17,3	$\pm 5,5$

Tabla VI. Rugosidad Sm de las probetas de tracción

Espesor (mm)	Fresadas		Punzonadas	
	Sm(μm)	U ₉₅ (μm)	Sm(μm)	U ₉₅ (μm)
0,5	72	± 11	64	± 7
1,6	70	± 2	67	± 12
2,5	62	± 5	75	± 10

En la Fig. 2 puede observarse el aspecto superficial en todo el espesor de una probeta de 0,5 mm fresada (izquierda) y de 1,6 mm punzonada (las imágenes se obtuvieron por microscopía electrónica de barrido).

**Figura 2.** Imagen SEM de la superficie perimetral cortada por fresado (izquierda) y punzonado.

Sobre la imagen SEM correspondiente al perímetro punzonado, se han indicado las tres zonas características generadas por dicho proceso, que ordenadas en el sentido que se efectuó el punzonado son: Zona de deformación (R), Zona bruñida (B) y Zona de fractura (F). Los espesores porcentuales correspondientes a cada zona relativos al espesor de la chapa, dependen del juego entre el punzón y la matriz, y según sean sus valores, permiten calificar el tipo del borde cortado (van de tipo 1 a 5, aumentando cada vez la Zona bruñida B) [4]. En la Tabla VII se presentan los valores promedios porcentuales obtenidos para cada zona, la máxima altura de rebaba Hr y se califica el tipo de borde según el criterio de Le Grand.

Tabla VII. Tipo de borde de las probetas punzonadas

Espesor (mm)	R (%)	B (%)	F (%)	Hr (mm)	Tipo de borde
0,5	45	36	19	0,07	No calificable
1,6	26	42	31	0,12	4
2,5	14	51	35	0,14	4

Los resultados obtenidos respecto de los valores de rugosidad indican que el punzonado produce una rugosidad en sentido vertical un 150% mayor en promedio que la generada por el fresado, mientras en sentido horizontal no hay una diferencia apreciable entre ambos métodos de corte. Respecto del tipo de borde de las probetas punzonadas, la zona de mayor deformación (R) corresponde a las probetas de menor espesor, mientras dicha zona (R) disminuye conforme aumenta el espesor de chapa.

Análisis microestructural y microdureza.

En la Tabla VIII se presentan en función del espesor nominal (E) de chapa punzonada, la microdureza Vickers promedio en el núcleo (HVn), la microdureza Vickers promedio en la zona deformada (HVzd), el porcentaje de incremento de microdureza Vickers de la zona deformada respecto del núcleo (PHV%), la profundidad de la deformación plástica (Pdp) en mm y la relación porcentual Pdp/E.

Tabla VIII. Microdurezas y profundidad de la deformación de las probetas punzonadas

E (mm)	HVn promedio	HVzd promedio	PHV%	Pdp (mm)	Pdp/E (%)
0,5	150	246	+ 64	0,4	80
1,6	221	251	+ 13,6	0,65	40
2,5	205	233	+ 13,8	0,55	22

La Fig. 3 corresponde imágenes metalográficas de las secciones transversales de probetas punzonadas, la izquierda de espesor nominal 0,5 mm y la derecha de espesor nominal de 1,6 mm.

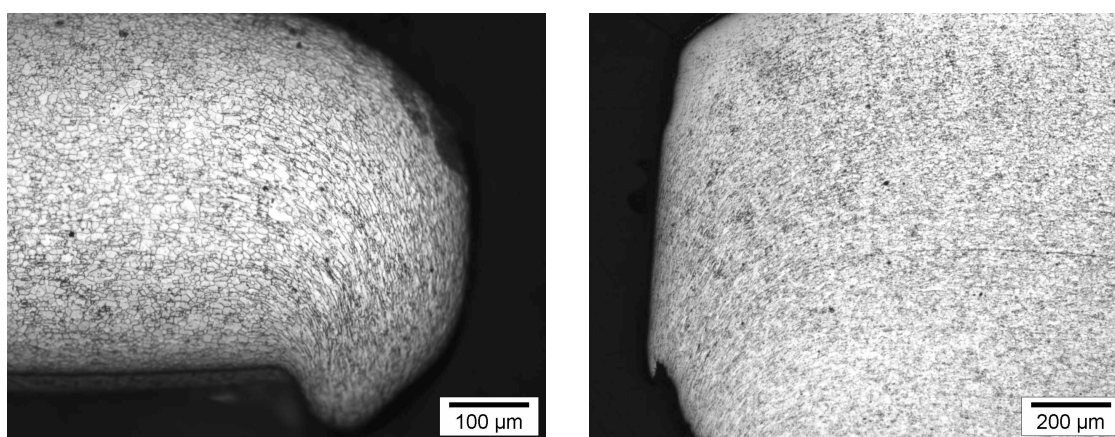


Figura 3. Imágenes metalográficas correspondientes a secciones de probetas punzonadas.

Los valores de microdureza resultantes para los tres espesores evaluados, tomados en las zonas deformadas y sin deformar, así como los estudios metalográficos realizados, revelan que el punzonado produjo un incremento promedio de dureza en la zona deformada respecto de la zona sin deformar no menor al 13%, mientras la zona afectada por la deformación no es menor de 0,4 mm medida desde el perímetro cortado. Adicionalmente, es evidente que el mayor grado de deformación (Pdp/E) y de endurecimiento del borde por deformación plástica (PHV), se produce en las probetas de menor espesor (0,5 mm).

Propiedades mecánicas

Los valores correspondientes promedios, se presentan en las Tablas IX a XVII con los resultados estadísticos de los 9 test ANOVA, agrupados por propiedad mecánica y espesor nominal de chapa "E" (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 IX. Resistencia a la tracción en 0,5 mm

E = 0,5mm	Rm(MPa)	Va	n	Fo	$F_{0.05,3,4}$
Punzonado	423,7	13,1	4	88,4	6,59
Fresado	443,2	4,1	4		

Tabla X. Resistencia a la tracción en 1,6 mm

E = 1,6mm	Rm(MPa)	Va	N	Fo	$F_{0.05,3,4}$
Punzonado	483,7	30,3	4	2,0	6,59
Fresado	492,1	108,9	4		

Tabla XI. Resistencia a la tracción en 2,5 mm

E = 2,5mm	Rm(MPa)	Va	N	Fo	$F_{0.05,3,4}$
Punzonado	430,0	17,9	4	2,4	6,59
Fresado	426,6	1,3	4		

Tabla XII. Límite de fluencia en 0,5 mm (*)

E = 0,5mm	Re(MPa)	Va	N	Fo	F _{0.05,3,4}
Punzonado	397,0	18,3	4	2,7	6,59
Fresado	389,1	72,8	4		

Tabla XIII. Límite de fluencia en 1,6 mm (*)

E = 1,6mm	Re(MPa)	Va	N	Fo	F _{0.05,3,4}
Punzonado	414,9	23,9	4	2,2	6,59
Fresado	406,2	112,6	4		

Tabla XIV. Límite de fluencia en 2,5 mm

E = 2,5mm	Re(MPa)	Va	N	Fo	F _{0.05,3,4}
Punzonado	388,9	38,3	4	3,87	6,59
Fresado	378,0	86,6	4		

(*) Se obtuvo el límite convencional de fluencia 0,2% (Rp0,2)

Tabla XV. Alargamiento % de rotura en 0,5 mm

E = 0,5mm	A(%)	Va	n	Fo	F _{0.05,3,4}
Punzonado	12,9	1,9	4	105,3	6,59
Fresado	25	3,6	4		

Tabla XVI. Alargamiento % de rotura en 1,6 mm

E = 1,6mm	A (%)	Va	N	Fo	F _{0.05,3,4}
Punzonado	21,2	6,2	4	22,0	6,59
Fresado	27,5	1,1	4		

Tabla XVII. Alargamiento % de rotura en 2,5 mm

E = 2,5mm	A (%)	Va	N	Fo	F _{0.05,3,4}
Punzonado	25,2	2,2	4	16,3	6,59
Fresado	32,6	11,3	4		

La comparación de los resultados correspondientes a las propiedades mecánicas analizadas por el método ANOVA, muestran que los valores obtenidos para el alargamiento % de rotura presentan diferencias significativas en todo el rango de espesores estudiados, mientras que para la resistencia a la tracción y el límite de fluencia, estas diferencias no son significativas (con la salvedad para Rm en 0,5mm de espesor).

Comparados los valores promedios obtenidos para las distintas propiedades mecánicas se observa que, mientras las diferencias para los límites de fluencia son pequeñas y prácticamente constantes (de +2 a +2,9%), para la resistencia a la tracción como el alargamiento porcentual de rotura, estas diferencias entre los valores promedios obtenidos para cada método, disminuyen conforme aumenta el espesor de la chapa.

CONCLUSIONES

1. De las tres propiedades mecánicas obtenidas, el alargamiento porcentual de rotura, fue la más sensible al endurecimiento en frío del contorno de las probetas punzonadas. Para estas probetas, se observó durante los ensayos de tracción, que la fisura se inicia por el borde y se propaga hacia el centro, adelantando la fractura y reduciendo el alargamiento. Los resultados obtenidos indican que si bien no es válido determinar el alargamiento en probetas punzonadas, si sería posible establecer límites de fluencia y resistencia a la tracción, si las probetas poseen errores de forma dentro de los valores tolerados.
2. Las mayores diferencias entre las propiedades mecánicas de probetas punzonadas y fresadas se producen en las probetas de menor espesor (0,5 mm). Esta situación se explica porque la mayor deformación en frío ocurre sobre dichas probetas (Pdp/E = 80%).

REFERENCIAS

1. BS EN 10002-1:2001, Metallic Materials – Tensile Testing. Part 1: Method of Test at Ambient Temperature, September 2001, pp. 34 (*norma*)
2. ASTM E 8M-00b, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, February 2001, pp. 2-3 (*norma*)
3. IRAM-IAS U500-102 Parte III, Chapas y flejes finos de acero, Método de ensayo de tracción, Junio de 1987, pp. 4 (*norma*)
4. Mateos Díaz S. y otros, Punzonado de la chapa, Servicio de publicaciones de la Universidad de Oviedo, España, año 2000 (*libro*)
5. 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 (*norma*)
6. IRAM-IAS U500-102 Parte I, Método de ensayo de tracción de productos de acero. Condiciones Generales, Junio de 1987 (*norma*)