

## ACONDICIONAMIENTO DE EQUIPO PARA PRUEBA ERICHSEN DE EMBUTIDO

### RESUMEN

En este trabajo se describe el proceso utilizado para adaptar un equipo de ensayo de embutido profundo WPM-TZP para que pueda realizar la prueba Erichsen siguiendo como norma guía la ASTM E643. La metodología se enfoca hacia la adaptación del sistema electrohidráulico y del diseño de la herramienta de ensayo a partir de la identificación y recuperación del equipo. Por último, se valida el adecuado funcionamiento y la confiabilidad del sistema de medición.

**PALABRAS CLAVES:** Copa, prueba Erichsen, dados, electrohidráulica.

### ABSTRACT

*This document describes the process carried out to adapt a deep-drawing equipment WPM-TZP so that it can execute the Erichsen test following the ASTM E643 as standard. The methodology is focused on the electrohydraulic system adaptation and also on the test tooling design, starting from the equipment identification and recovery. Finally, the appropriate operating and the measuring system confidence are validated.*

**KEYWORDS:** Cup, Erichsen test, dies, electrohydraulics.

### 1. INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de la industria dedicada a darle forma a los metales por métodos en frío, ha propiciado el ambiente para el desarrollo en los últimos 40 años de mejores técnicas y procesos de manufactura en busca de optimizar la calidad de sus productos y al mismo tiempo disminuir los costos productivos, basados en estudios de teoría plástica y de formabilidad [5]. Dentro del proceso de investigación, para cuantificar y cualificar la ductilidad y formabilidad de los materiales metálicos, se ha utilizado ampliamente el ensayo *Erichsen*, evaluando con él todas las propiedades del material inherentes a los procesos de trabajo en frío ya sea estampado, embutido y estirado.

El método *Erichsen* es preferido por los investigadores y por el sector industrial en todo el mundo, llegando a ser el recomendado por la ISO [2] lo que ha conllevado a que sea mundialmente normalizado cubriendo los aspectos del equipo y de procedimiento. En el presente trabajo se realiza la adaptación de una unidad de ensayo de embutido profundo (*deep-drawing*) Engelhardt WPM-TZP para realizar la prueba *Erichsen* bajo condiciones estándar ASTM E643 aprovechando las ventajas de adaptabilidad que presentan éste y en general todos los sistemas hidráulicos.

### 2. ENSAYO ERICHSEN ESTANDAR

El embutido es básicamente una operación de formado de láminas metálicas que se usa para hacer piezas de forma acopada o de otro tipo más complejas. Se realiza colocando una lámina (sheet) sobre un dado (die) o

### ANDRES FELIPE CUARTAS C.

Estudiante.

Facultad de Ingeniería Mecánica.

Universidad Tecnológica de Pereira.

afecavi@yahoo.es

### ALEXANDER DÍAZ ARIAS.

Profesor Asistente.

Facultad de Ingeniería Mecánica.

Universidad Tecnológica de Pereira.

alexdiaza@utp.edu.co

### EDISON HENAO CASTAÑEDA.

Profesor Especial.

Facultad de Ingeniería Mecánica.

Universidad Tecnológica de Pereira.

edisonhenao@utp.edu.co

troquel y empujando el metal sobre la cavidad de éste con un punzón (punch) mientras el sujetador (blank holder) aplana la lámina contra el dado [4]. Para el caso del ensayo *Erichsen* de embutido, se restringe el flujo de la región sujetada provocando así el estiramiento de las paredes de la copa como se muestra en la figura 1.

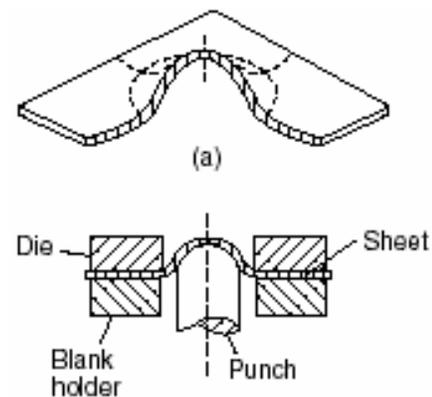


Figura 1. Ensayo de embutido *Erichsen*

El ensayo *Erichsen* es una forma de estirado y establece el índice de embutición Erichsen (*IE*) o profundidad de la copa formada.

El índice de embutición Erichsen (*IE*) se convierte en la variable más importante dentro de los resultados y reportes del ensayo, éste corresponde al máximo desplazamiento alcanzado por la punta de la copa (hasta la rotura del material). Indirectamente el *IE* es una predicción del comportamiento del material a tomar formas por procesos de estampado y embutido. Este ensayo es considerado un ensayo crítico, en él se busca

solamente realizar un estiramiento de la región entre el punzón y la zona restringida o comúnmente llamada pared de forma que allí se presente una sollicitación biaxial a tracción hasta que ocurra una reducción drástica en el espesor de la lámina y su consecuente rotura.

### 2.1 Estándar ASTM E643

La *American Society for Testing Materials* (ASTM) redactó un estándar encaminado a normalizar las condiciones de los ensayos *Erichsen* y *Olsen* cubriendo los aspectos constructivos del equipo de ensayo y las variables de procedimiento, los más relevantes son: [1]

- Dimensiones de la herramienta de ensayo. Ver Figura 2.
- La capacidad de carga del equipo debe ser como mínimo de 9800 N (1000 kg).
- Propiedades físico-mecánicas de la herramienta. El punzón debe tener una dureza de 62 HRC como mínimo y una rugosidad de al menos  $R_y 4$ . De igual forma los dados deben cumplir ese mínimo valor de rugosidad además de una dureza de al menos 56 HRC.
- El espesor de las muestras a ensayar debe estar entre 0,2 y 2,0 mm. Mientras el ancho o diámetro debe ser de 90 mm como mínimo.
- Velocidad del punzón entre 0,08 y 0,4 mm/s.
- El método preferido o recomendado para determinar el punto final del ensayo es por caída de carga en el punzón, en general esto indica la formación de cuello y consecuente rotura en el domo de la copa.

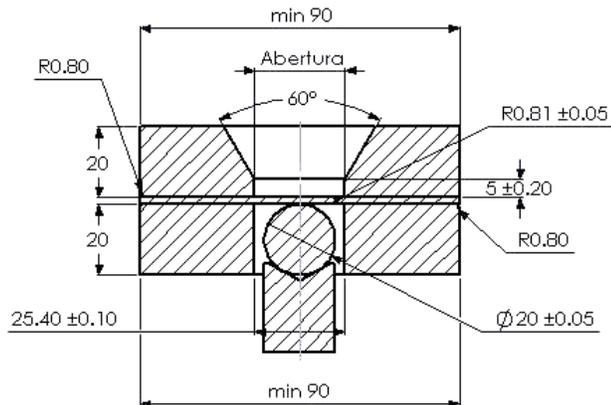


Figura 2. Dimensiones estándar ASTM de la herramienta de ensayo (medidas en mm) [1]

## 3. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO WPM-TZP

La máquina WPM-TZP fue fabricada en 1963 por la compañía alemana *Werkstoffprüfmaschinen WPM* con la función de realizar el ensayo de embutido profundo *Engelhardt* usado para cuantificar la capacidad del material a dejarse embutir (Embutibilidad  $T$ ) mediante la

diferencia porcentual de fuerza máxima requerida en cada una de las dos etapas de la prueba.

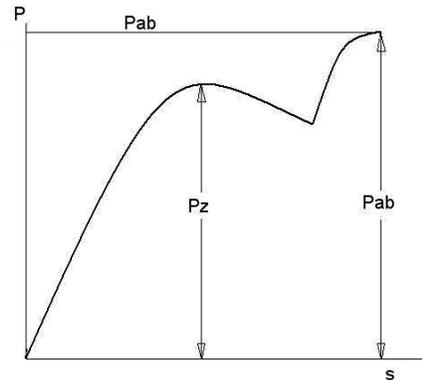


Figura 3. Evolución de fuerza del punzón con respecto a su desplazamiento en el ensayo Engelhardt [10]

De esta forma se define la Embutibilidad  $T$  como: [10]

$$T = \frac{P_{ab} - P_z}{P_{ab}} \times 100 \quad (1)$$

### 3.1 Sistema electrohidráulico

El equipo WPM-TZP contaba con tres actuadores hidráulicos (ver figura 4), uno de sujeción (18) y otro de medición (15), montados sobre el principal llamado pistón de trabajo (12). Este disponía de 283 cm<sup>2</sup> de área efectiva que le permitía alcanzar fuerzas del orden de 15 ton, como primer paso la máquina cortaba muestras de 52 mm de diámetro con la acción de este pistón.

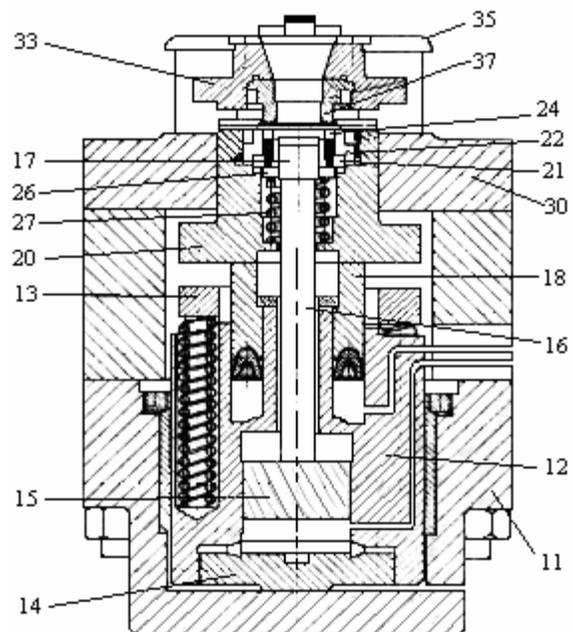


Figura 4. Esquema seccionado y simplificado de los actuadores hidráulicos de la unidad WPM-TZP [10]

A continuación, la lámina se sujetaba entre los dados (37 y 24) por acción del pistón de sujeción de forma que se pasara a la embutición de la muestra gracias al incremento de presión que el pistón de trabajo ejercía sobre el cilindro de medición cuyo pistón estaba ligado al movimiento del punzón (17). Era así como se iba formando la copa hasta que la lámina se suelta del sujetador alcanzándose el valor de  $P_z$  y terminando con la primera etapa del proceso, a continuación el pistón de trabajo hace contacto con el sujetador, manteniendo de esta forma la lámina para la siguiente etapa del ensayo donde por último, el punzón sigue avanzando hasta que el estiramiento permite alcanzar la fuerza de rotura  $P_{ab}$  provocando la falla de la copa. [10]

En cuanto a la herramienta de ensayo, el equipo disponía del portadado (33) y un conjunto de dados superiores para determinado espesor de lámina, además de un sujetador con una región lisa y otra perfilada para la segunda etapa del ensayo, todos estos componentes eran intercambiables y se ajustaban en el respectivo portadado.

El suministro de aceite se da gracias a una bomba de engranajes sumergida en el tanque y la distribución se logra gracias a una electroválvula direccional que da paso de fluido hacia el cilindro de trabajo, mientras otra dirige el paso hacia el cilindro de sujeción. El sistema puede alcanzar una presión de 5,5 MPa (5,5 bar) pero esta llega hasta cierto valor según la carga necesaria para deformar la lámina. La presión dentro del pistón de sujeción se puede graduar desde el exterior entre 0 y 1,5 MPa (0 y 15 bar) por medio de una reguladora manual, de igual forma se puede graduar la velocidad de avance del pistón de trabajo con una válvula reguladora de caudal.

Para comandar todo este sistema hidráulico, el equipo contaba con cuatro solenoides con su respectivo grupo de elementos para control, al igual que un componente llamado *switch* de presión que dispone de un contacto que tiene como función abrirse cuando se da la caída de presión después de alcanzar el valor correspondiente a  $P_{ab}$ . Esto provocaba interrumpir el flujo de corriente a la electroválvula encargada de dirigir aceite hacia el sistema, retornando los actuadores de nuevo a su posición inicial.

#### 4. ADAPTACIONES

Para efectuar el ensayo *Erichsen*, es necesaria la acción de dos pistones hidráulicos, uno para sujetar la lámina y otro para embutirla, este proceso se realiza solamente en una fase. Para adaptar el equipo de ensayo a condiciones estándar, el primer paso consiste en identificar de que elementos se pueden prescindir y cuáles se pueden acondicionar, en resumen la etapa de recuperación arrojó lo siguiente:

El conjunto de cilindros hidráulicos se encuentran en buen estado. Usando fuente fluida externa se verificó el correcto movimiento de los actuadores. De igual manera, las electroválvulas funcionaban conmutando correctamente.

El conjunto de componentes eléctricos ubicados en la caja de control se desecharon y se prefirió diseñar un sistema eléctrico desde cero a excepción de algunos que se encontraron en buenas condiciones y que serían además de útiles, muy complicados de sustituir.

El portadado superior, encargado de mantener los dados en su posición dispone de un mecanismo de bloqueo que se abre para insertar y descargar las muestras y que a la vez se apoya sobre un soporte (30), este grupo de elementos era necesario para las condiciones del ensayo. Para la correcta colocación de las probetas estándar se modificó la apertura del soporte porque este sólo permitía insertar láminas de 80 mm de ancho.

Las partes que componían los dados fueron desechadas ya que no cumplían ninguna aplicación dentro del ensayo *Erichsen*

#### 4.1 Diseño de los dados

Según el estándar, la herramienta de ensayo debe cumplir con las dimensiones que se especifican en la figura 2. Aprovechando que los portadados tanto inferior como superior de la WPM-TZP disponen de partes roscadas, se diseñaron los dados superiores y el dado sujetador (inferior) con una región roscada para que permitan intercambiar los elementos y al mismo tiempo faciliten un correcto ajuste a la unidad. En la norma se establece la apertura que deben tener los dados superiores según el espesor de la lámina a ensayar, es por eso que se habla de dos dados superiores.

Dado Número	Espesor pulg (mm)	Apertura del dado pulg (mm)
1	0,060 (1,5) o menos	1,000 (25,40)
2	0,060 a 0,080 (1,5-2,0)	1,25 (28,58)

Tabla 1. Apertura de los dados superiores según espesor de la lámina [1]

Los dados superiores se fabricaron en acero AISI 4140. Con el fin de satisfacer los requerimientos de la norma, estos fueron templados de acuerdo con las recomendaciones de [9] para ser posteriormente pulidos. Los resultados de dureza y rugosidad promedio se consignaron en la tabla 2.



Figura 5. Fotografía de los dados superiores

Dado N°	HRC	Rmax (µm)
1	59	2,66 ± 0,64
2	57	3,10 ± 0,29

Tabla 2. Durezas y rugosidades resultantes de los dados

El dado sujetador se fabricó en Acero AISI1020, por no ser un elemento que requiera propiedades especiales, y posteriormente se le efectuó el temple y el pulido superficial.

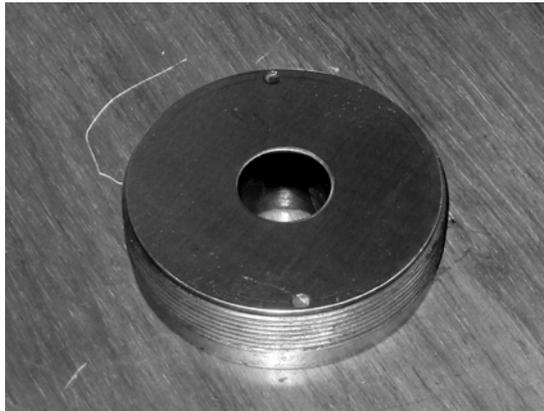


Figura 6. Fotografía del dado sujetador o inferior

El otro elemento básico en la herramienta de ensayo es el punzón esférico, este debe cumplir con los requerimientos de la norma especificados en el ítem 2.1. Para tal fin, se consiguen en el mercado esferas de acero endurecidas para aplicaciones en rodamientos, ejes homocinéticos, transmisiones, etc. La caracterización dimensional se hizo mediante una máquina de medición por coordenadas (CMM), como resultado se obtuvo de diámetro:  $20,006 \pm 0,005$  mm. A continuación la caracterización superficial entregó como resultado de rugosidad máxima promedio  $R_{max} = 0,97 \pm 0,11$  µm, y por último se obtuvo un promedio de dureza de 65 HRC. Estos resultados permiten afirmar que la esfera a usar como punzón sobrepasa los aspectos estándar.

#### 4.2 Adaptación del sistema electrohidráulico

La siguiente etapa del proceso consiste en la adaptación del sistema electrohidráulico de embutición de forma que este conjunto de elementos funcionen y permitan alcanzar las condiciones estándar del ensayo. Este propósito se logra haciendo las variaciones de forma tal que se suministre aceite a determinada presión y a determinado caudal. Para simplificar el sistema, se optó por eliminar el pistón de medición, ubicando en el cilindro un suplemento de acero de tal forma que el pistón de trabajo se encargue de embutir la muestra directamente.

En primer lugar se verifica que el equipo satisfaga las condiciones de carga, para tal fin se deforman adecuadamente láminas de acero de 2 mm de espesor, que es el máximo permitido para la prueba *Erichsen*. Con este mismo experimento inicial, se demostró que la fuerza de sujeción es apropiada para mantener la lámina en su posición y para evitar flujo de material de la región restringida hacia la cavidad del dado. De esta misma manera se verificó que el pistón de trabajo contaba con 20 mm de avance o carrera, suficiente para alcanzar las profundidades normales de las copas.

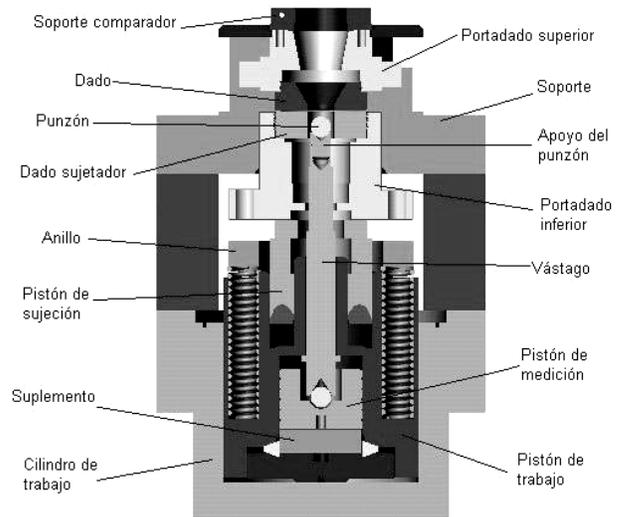


Figura 7. Esquema de los actuadores modificados

Ahora, en busca de cumplir con el numeral de la norma que establece un rango de velocidad de ensayo entre 0,08 y 0,40 mm/s, se intentó regular la válvula de estrangulación para que suministrara un caudal adecuado al cilindro de trabajo, sin embargo, esta no garantizaba la suficiente regulación al cambiar el espesor de la muestra es decir al variar la carga.

Ya que el área del pistón es de 283 cm<sup>2</sup>, se hace necesario un rango de flujo entre 0,14 y 0,68 L/min, estos valores tan bajos exigen una válvula con excelente

capacidad de regulación independientemente de las condiciones de carga establecidas. Por lo tanto se optó por instalar sobre la vía una válvula de control de flujo unidireccional de alta presión que demostró muy buen comportamiento manteniéndose en el rango de velocidad con distintos espesores. El sistema hidráulico final se muestra en la figura 8.

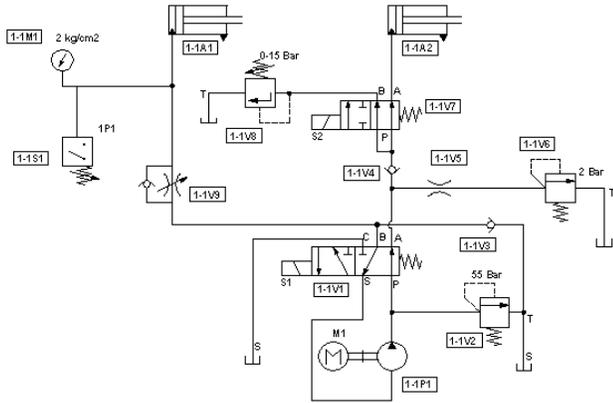


Figura 8. Esquema hidráulico modificado

El sistema eléctrico de control, se diseñó por completo manteniendo algunos componentes como el motor, los solenoides y el switch de presión. El esquema aparece en la figura 9.

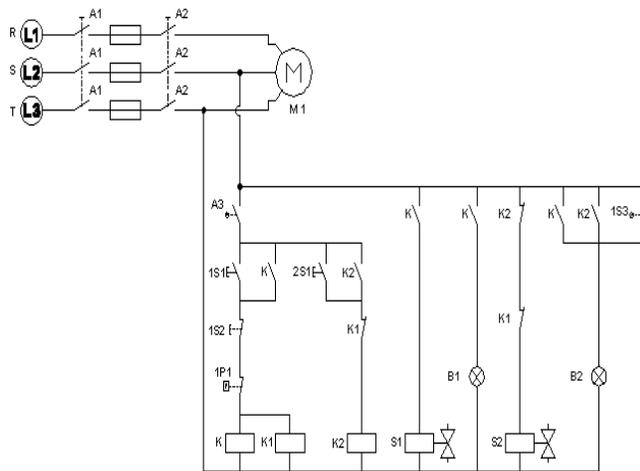


Figura 9. Esquema eléctrico final

### 4.3 Implementación del sistema de medición

El método *Erichsen* arroja dos resultados básicos, ellos son el índice de embutido *Erichsen* (*IE*) y la carga máxima de ensayo. Los datos se reportan con una precisión de centésimas de milímetro, de otra parte la carga máxima corresponde a la fuerza máxima requerida para formar la copa y se presenta justo antes de que se rompa. [1]

Para medir el *IE*, se integró un comparador de carátula montado sobre un soporte diseñado exclusivamente para

este fin. El comparador se encarga de medir la profundidad con una resolución de 0,01mm, satisfaciendo los 0,05 mm que exige la norma. Por otra parte, se instala sobre la vía de flujo hacia el cilindro de trabajo un manómetro con aguja testigo para que indique el valor de máxima presión en la cámara.

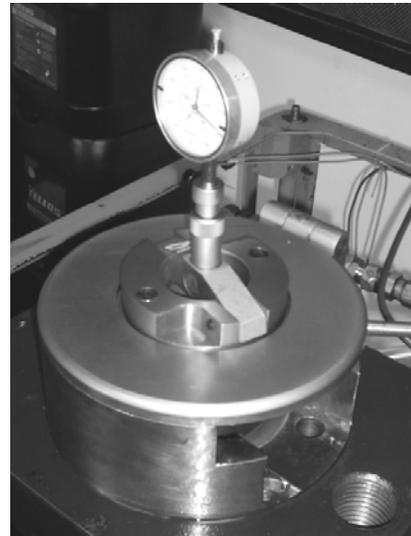


Figura 10. Fotografía del indicador de profundidad

## 5. FASE DE PRUEBAS

Ahora que el equipo de ensayo está en condiciones estándar de operación, las pruebas permiten validar tanto el correcto funcionamiento del equipo como la exactitud del instrumento de medición del *IE*. Teóricamente existe una relación directa entre el *IE* y el espesor de las láminas para un mismo material, las pruebas se realizan ensayando con seis muestras de acero con bajo contenido de carbono (0.2%) para cinco espesores distintos. Los resultados y la línea de tendencia aparecen en la figura 12.

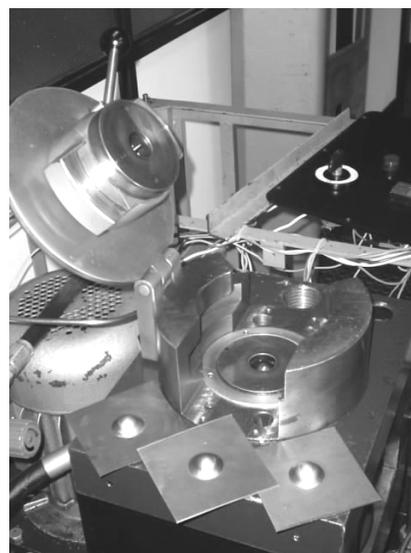


Figura 11. Herramienta de ensayo con algunas copas formadas

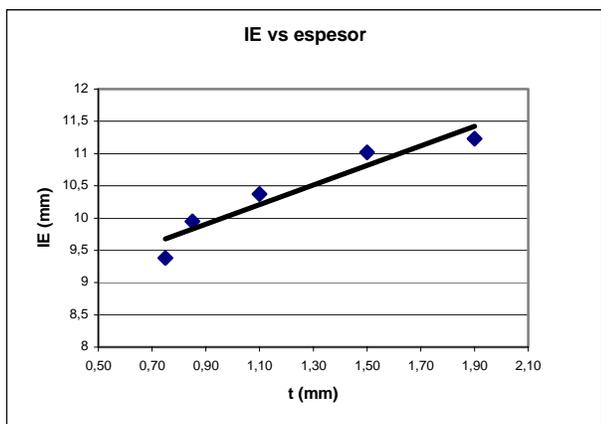


Figura 12. Gráfica IE contra espesor para lámina de acero

Claramente se observa el comportamiento proporcional alcanzándose un buen ajuste. Para la tendencia lineal se logró un factor de correlación de 0,91.

Para verificar los resultados arrojados por el comparador de carátula, se realizó la medición en la profundidad de las copas por medio de la máquina de medición por coordenadas CMM, obteniéndose de esta forma un error relativo máximo de 3,11% para la lámina de 1,90mm de espesor y de menos de 1% para los otros casos.

Espesor (mm)	IE promedio CMM (mm)	Error relativo (%)
0,75	9,37	0,11
0,85	9,95	0,00
1,10	10,42	-0,48
1,50	11,00	0,18
1,90	11,59	-3,11

Tabla 3. IE promedio usando la CMM. Error relativo con respecto a las medidas del comparador

## 6. CONCLUSIONES

Se acondicionó un equipo hidráulico para efectuar la prueba *Erichsen* cumpliendo con la normatividad ASTM, permitiendo además cierto nivel de automatización ya que el ensayo se detiene por el método de caída de carga. La metodología de acondicionamiento involucró un proceso que inició con la recopilación de información del equipo disponible seguido de la fase constructiva y de adaptación del sistema electrohidráulico terminando con la implementación de los elementos de medición.

Una de las ventajas de los sistemas de potencia fluida es la versatilidad y adaptabilidad [7], es así que variando ciertas condiciones y variables del sistema se pueden obtener acciones completamente diferentes. Para el caso del equipo WPM-TZP, se modificó el flujo, se combinaron conexiones, se instalaron nuevas líneas y nuevos componentes, todo esto permitió que el sistema

hidráulico y todo el equipo de ensayo se comportaran como se deseaba.

La repetibilidad y la alta correlación en los resultados obtenidos durante la fase de pruebas permiten concluir que independientemente de la variabilidad en las características del material, el equipo de ensayo permite un elevado nivel de confiabilidad para la realización de la prueba.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Ball Punch Deformation of Metallic Sheet Material. United States of America: ASTM, 1984, Reapproved: 2000, 4 p. (ASTM E-643-84).
- [2] ERICHSEN GmbH & Co. Catalogue. Sheet Metal Testing. Hermer. Germany. 2006. Available in: <http://www.erichsen.de>
- [3] GONZÁLEZ, Carlos. ZELNY, Ramón. Metrología. Primera edición, páginas 53-54, McGraw Hill, España, 1995.
- [4] GROOVER, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna. Primera edición, páginas 513-518, Prentice Hall, México, 1997.
- [5] HECKER, S.S, GHOSH, A.K. The Forming of Sheet Metal. Research and Science Magazine. USA. 1974.
- [6] MITUTOYO CORPORATION. Surface Roughness Tester SJ-201. User's Manual. Kanagawa. Japan.
- [7] NATIONAL FLUID POWER ASOCIATION. The Advantages of Fluid Power. Milwaukee. United States of America: NFPA, 2006. Available in: [www.nfpa.com](http://www.nfpa.com)
- [8] ROCA R., Felip. Oleohidráulica Básica. Diseño de Circuitos. Anexo 1. Simbología. Alfaomega UPC. México, México. 1999.
- [9] SIDELPA S.A. Tabla de manejo de aceros especiales. Información comercial. Cali. Colombia. 2000.
- [10] VEB Werkstoffprüfmaschinen WPM. Operating Instructions for Deep Drawing Tester TZP. Leipzig, Germany.