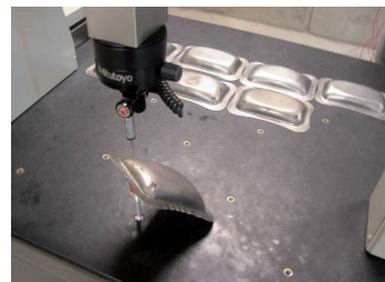


Análisis teórico-numérico-experimental de un proceso de hidroconformado usando diámetro equivalente



THEORETICAL-NUMERICAL-EXPERIMENTAL ANALYSIS OF AN HYDROFORMING PROCESS USING EQUIVALENT DIAMETER

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7259> | Recibido: 30/07/2014 • Aceptado: 23/11/2014

Elías Rigoberto Ledesma-Orozco, Eduardo Aguilera-Gómez, Israel Castillo-Hinojosa, Juan Francisco Reveles-Arredondo, Alberto Saldaña-Robles

UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO. División de Ingenierías. Campus Irapuato-Salamanca. Carretera Salamanca-Valle de Santiago Km 3.5+1.8. - 36885 Comunidad de Palo Blanco. Salamanca (México). Tfn: +52 464 6479940 Ext. 2362. jf.revelesarredondo@ugto.mx

ABSTRACT

• The main goal of this work is to propose the application of the concept of equivalent diameter in the calculation of the hydraulic pressure required to conduct an hydroforming process in non-circular pieces. Although this approach was carried out initially for the conventional stamping process, this paper demonstrates that it can also be applied in hydroforming.

In a first phase experimental tests were carried out to form a part using this methodology, measuring the reduction in resulting thickness. It was found that difference between the calculated pressure and the experimental required pressure was 2.6%.

To perform a numerical-experimental comparison, the simulation of the process was carried out using several material models by explicit finite element method in a commercial software. It was observed that using the material model HILL'90 deviation between experimental and numerical results for the thickness reduction was lower than 5.5%.

• **Keywords:** Hydroforming, Equivalent Diameter, ANSYS/LS-DYNA, HILL'90, Thickness Reduction.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es proponer la aplicación del concepto de diámetro equivalente en el cálculo de la presión hidráulica requerida para llevar a cabo un proceso de hidroconformado de piezas no circulares. Aunque esta metodología fue aplicada inicialmente para el conformado de chapas convencionales, en este trabajo se demuestra que también puede aplicarse en el hidroconformado.

En una primera fase se llevaron a cabo pruebas experimentales para conformar una pieza usando esta metodología, midiendo la reducción de espesor resultante. Se encontró que la diferencia entre la presión calculada y la presión requerida experimentalmente era del 2.6%.

Para llevar a cabo un comparativo numérico-experimental, se desarrolló la simulación del proceso usando varios modelos de material por el método explícito de elementos finitos. Se observó que usando el modelo de material HILL'90 la desviación entre los resultados experimentales y numéricos para la reducción de espesor fue inferior al 5.5%.

Palabras clave: Hidroconformado, Diámetro equivalente, ANSYS/LS-DYNA®, HILL'90, Reducción de Espesor.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los procesos más utilizados en la manufactura industrial es el conformado de metales, donde se usa la deformación plástica para cambiar la forma de las piezas metálicas. Dentro del conformado de metales, se encuentra el confor-

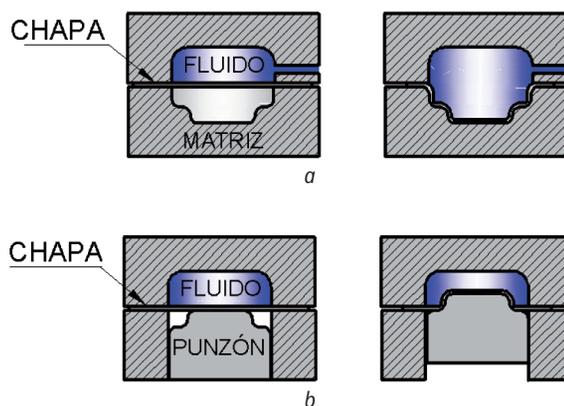


Fig. 1: Posibles configuraciones para desarrollar un proceso de hidroconformado. a) El fluido haciendo la función de punzón y b) el fluido como matriz

NOMENCLATURA

A_c	Área de círculo
A_L	Área de la chapa
A_p	Área proyectada del punzón
D	Diámetro inicial de la chapa
d	Diámetro del punzón
D_E	Diámetro equivalente de la chapa
d_E	Diámetro equivalente del punzón
E	Módulo de Young
E_T	Modulo tangente
F	Carga de conformado
F_H	Carga del pisador
K	Coefficiente de esfuerzo
m	Exponente de Barlat
n	Exponente de endurecimiento por deformación
r	Coefficiente de anisotropía plástica
r_{00}	Coefficiente Lankford a 0°
r_{45}	Coefficiente Lankford a 45°
r_{90}	Coefficiente Lankford a 90°
r_d	Radio de conformado
R_{PROM}	Anisotropía promedio
t	Espesor
ϵ_0	Deformación en el límite elástico
ϵ_t	Variación en el espesor
ϵ_w	Deformación transversal
ν	Razón de Poisson
ρ	Densidad
σ_{ut}	Carga de rotura
σ_y	Límite elástico

mado de chapas, en este proceso la pieza inicial es una chapa, es decir, una pieza metálica cuya superficie es mucho mayor en comparación a su espesor. El conformado de chapas incluye procesos tales como: hidroconformado, doblado, repujado, corte, *roll hemming*, etc [1-2].

El hidroconformado o conformado hidromecánico, es un proceso de manufactura semejante al conformado de chapas, solo que se sustituye el uso de la matriz o del punzón por la acción de algún fluido presurizado para empujar el material y que adquiera la forma deseada. El fluido presurizado toma el lugar de la matriz o del punzón, dependiendo de la configuración utilizada, tal como se ilustra en la Fig. (1).

En la Fig. (1a), el fluido presurizado tiene la función de punzón, ya que ejerce presión sobre la chapa forzándola a adquirir la forma de la matriz. La segunda configuración se ilustra en la Fig. (1b), el fluido tiene la función de matriz, ya que ofrece resistencia hidrostática mientras el punzón empuja la chapa.

Una ventaja que ofrece el hidroconformado sobre el conformado convencional es que es posible obtener geometrías complejas sin que la chapa sufra un adelgazamiento excesivo.

Un ejemplo de piezas complejas generadas por hidroconformado se muestra en la Fig. (2).



Fig. 2: Pieza generada por hidroconformado [3]

Los fundamentos del proceso de hidroconformado se establecieron en la década de los 40's como resultado de buscar aumentar la competitividad en los procesos de conformado de chapas. Para lograr lo anterior, se buscó un proceso de conformado que redujera costos en la inversión inicial, aumentara la tasa de producción, lograra la conformabilidad de partes complejas y redujera las operaciones de montaje. En un principio, el hidroconformado fue utilizado para fabricar accesorios sanitarios y partes simples para aplicaciones aeroespaciales (Grey 1939, Dohmann 1991 y Koc, 2001) [3]. La primera aplicación patentada de hidroconformado se presentó en 1950 por Milton Schaible Garvin de la empresa de Cincinnati, Ohio, para la producción de tarjas de cocina.

La creciente competencia y regulaciones ambientales, han obligado a la industria automotriz a desarrollar vehículos de bajo peso para ahorrar combustible y reducir emisiones, pero además, se busca que ofrezcan estructuras seguras; por tal motivo, desde la década de 1990 el hidroconformado ha beneficiado a esta industria. Actualmente los automóviles cuentan con diversos componentes fabricados mediante hidroconformado, componentes tales como: componentes de la suspensión, flechas, chasis, tubos de escape, entre otros.

Una ventaja del hidroconformado es el hecho de que puede ser aplicado en piezas tubulares y generar formas complejas. En los 90's, se desarrolló un método para fabricar conexiones de tubería T para fontanería como la mostrada en la Fig. (3).



Fig. 3: Generación de tuberías en T por hidroconformado [3]

El hidroconformado en general puede dividirse en dos grandes categorías: hidroconformado de chapas e hidroconformado de tubos. Estos procesos generalmente manejan un

rango de presiones de entre 103.4 MPa (15000 psi) a 413.7 MPa (60000 psi) [3]. En la Fig. (4) se muestra un esquema con las diferentes variaciones que pueden tener los procesos de hidroconformado.

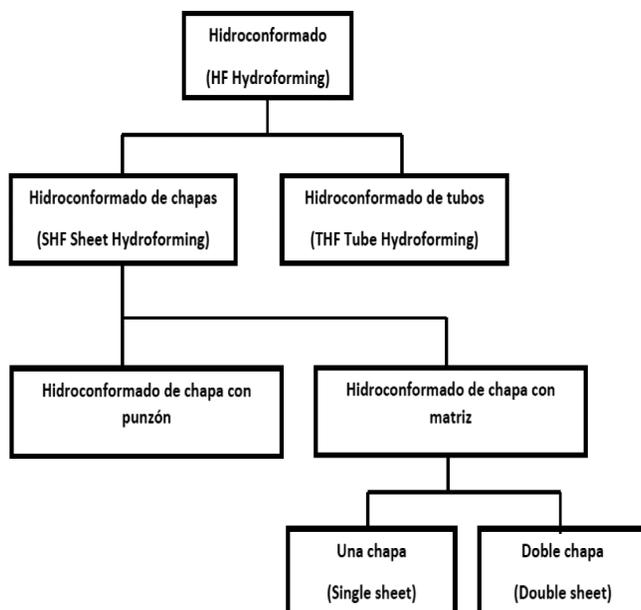


Fig. 4: Clasificación de los tipos de procesos de hidroconformado [3]

El hidroconformado de chapas (SHF) es un proceso similar al embutido profundo, solo que en lugar de usar un punzón se usa la aplicación de presión mediante un fluido. El hidroconformado de chapas emplea una matriz o un punzón, dependiendo del tipo de proceso (SHF-P o SHF-D), haciendo uso de una presión hidráulica para deformar el material. La presión sobre el contorno del material es controlada por un circuito hidráulico.

El hidroconformado de tubo (THF) es un proceso de conformado mediante el cual un tubo (recto o pre-doblado) es deformado en formas complejas dentro de la cavidad de la matriz, mientras se aplica presión hidrostática interna y cargas de compresión axial externa en uno o ambos extremos del tubo. Un ejemplo de piezas fabricadas con este proceso se ilustra en las Fig. (5).



Fig. 5: Ejemplo de hidroconformado en tubos [4]

El hidroconformado es una tecnología relativamente nueva y por lo tanto con investigación en desarrollo. Entre los

aspectos sujetos a investigación se encuentran el diseño de los troqueles, el sistema hidráulico, concentración de esfuerzos, fricción, recubrimiento para las piezas, parámetros de proceso y selección de material para las chapas, entre otros.

En resumen, el hidroconformado ha demostrado ser una tecnología que ofrece un conformado exitoso y ahorro en costos. A continuación se enumeran algunas de las ventajas que ofrece este proceso sobre el conformado convencional [5-7]:

- Se puede desarrollar conformado profundo con una sola operación.
- La probabilidad de que se presenten errores de conformado disminuye.
- Piezas cónicas y parabólicas son generadas con una sola operación de conformado; en el conformado convencional son requeridas de 4 a 5 operaciones de re-conformado con tratamientos térmicos intermedios.
- La reducción de espesor en el fondo de la copa es muy baja, permitiendo el uso de chapas más delgadas para generar las piezas.
- El espesor de la chapa no importa, y se puede probar con varios espesores sin necesidad de fabricar varios troqueles (punzones y/o matrices).
- Los costos de producción son más bajos ya que disminuyen los gastos de lubricación, tratamientos térmicos, fabricación de matrices, etc.
- No son necesarias máquinas programables.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. FASE EXPERIMENTAL

2.1.1. Descripción del problema

Como parte de un convenio apoyado por CONCYTEG (número de convenio: 06-16-k117-31) entre la Universidad de Guanajuato y el Lawrence Livermore National Laboratory, se desarrolló el proyecto: “Fabricación y Pruebas de un tanque de almacenamiento de hidrógeno para su uso en un automóvil”. Uno de los resultados de este proyecto fue el diseño del tanque de almacenamiento de hidrógeno. En este trabajo se buscó obtener una versión reducida de las tapas del tanque (reducción 4:1) por medio de hidroconformado, aplicando el concepto de diámetro equivalente, estas tapas y el tanque diseñado se muestran en la Fig (6).

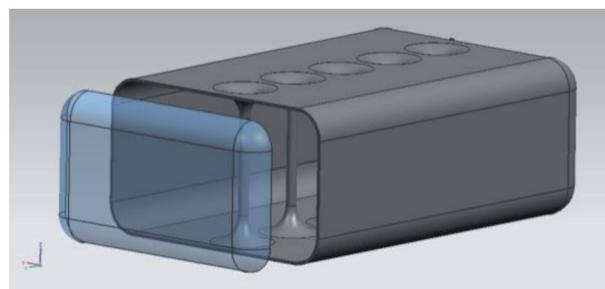


Fig. 6: Tapas de tanque para almacenamiento de hidrogeno (en azul)

Las especificaciones dimensionales usadas para fabricar las tapas laterales reducidas se muestran en la Fig. (7).

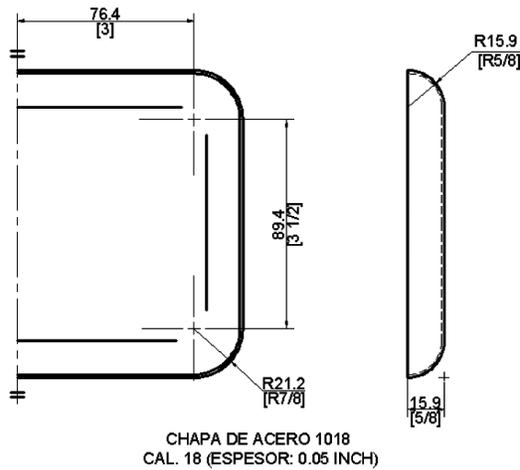


Fig. 7: Dimensiones de la tapa (reducción 4:1). Unidades en mm/[inch]

Para conformar la pieza se optó por usar el hidroconformado SHF-D, es decir, hidroconformado de chapa con matriz. Los componentes necesarios para desarrollar este proceso se muestran en la Fig. (8).

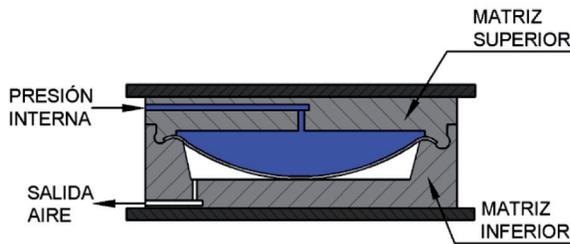


Fig. 8: Componentes requeridos para desarrollar un hidroconformado de chapa con matriz (SHF-D)

Se requiere de una matriz que contenga la forma deseada, también se requiere un sistema de suministro para el fluido y por lo tanto, se necesita un sistema de sellado para evitar que el fluido salga. Conforme entra el fluido ejerce presión sobre la chapa deformándola y forzándola a adoptar la forma de la matriz.

Ya que se cuenta con la forma y dimensiones de la pieza requerida, es necesario desarrollar su geometría para poder determinar la forma inicial de la chapa (Fig. (9)). Para obtener esta forma, se sigue el procedimiento propuesto en la literatura especializada para conformado convencional [8].

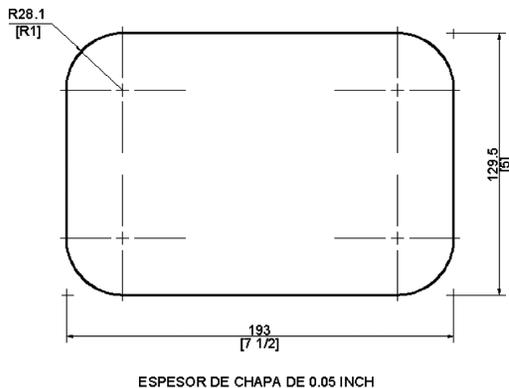


Fig. 9: Dimensiones iniciales de la chapa. Unidades en mm/[inch]

En el análisis de un proceso de conformado de chapas, es necesario considerar que el material de la chapa pasa de la fase elástica a la plástica en varias zonas, por lo que deben considerarse los esfuerzos que se presentan dentro de la fase plástica de su deformación. Por lo anterior, es que el diagrama esfuerzo-deformación de ingeniería no es útil y se necesita la curva esfuerzo-deformación real o verdadera. En el conformado de chapas se acostumbra ajustar la curva esfuerzo-deformación real con la expresión propuesta en la ley de Ludwik-Hollom ($\sigma = K\epsilon^n$), donde los parámetros n y K se obtienen al graficar la curva esfuerzo-deformación real en una gráfica log-log como se ilustra en la Fig. (10); la constante K es el esfuerzo real cuando $\epsilon = 1$ y n es igual a la pendiente de la gráfica. El procedimiento necesario para obtener n y K viene contenido en la norma ASTM E646-00.

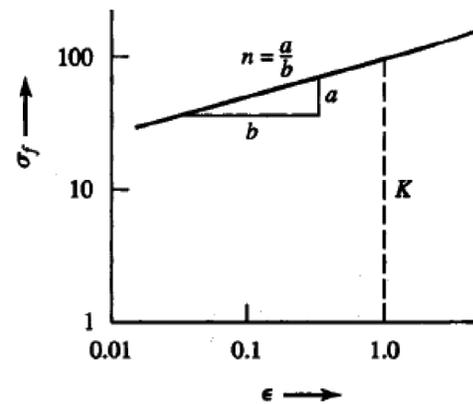


Fig. 10: Grafica log-log de la curva esfuerzo-deformación real [9]

Debido a que las chapas son conformadas por medio de un proceso de laminado, deben considerarse con un comportamiento ortotrópico. Una manera de evaluar esta anisotropía es por medio de los coeficientes de Lankford (r_{00} , r_{45} y r_{90}). Estos coeficientes se obtienen al calcular la razón de deformación de anisotropía plástica (r), esta se obtiene al dividir la deformación transversal (ϵ_w) entre la variación en el espesor (ϵ_t) (ver Fig. (11)). La norma que rige esta prueba es la ASTM E517-00.

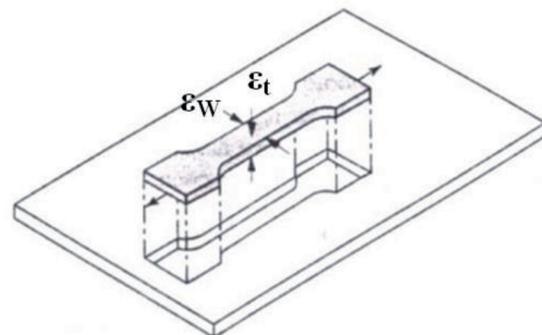


Fig. 11: Parámetros utilizados para calcular la razón de deformación de anisotropía plástica (r) [9]

Para obtener los coeficientes de Lankford, se lleva a cabo la prueba descrita anteriormente pero con probetas obtenidas a 0° , 45° y 90° con respecto a la dirección de laminado (Fig. (12)).

DIRECCIÓN DE LAMINADO



Fig. 12. Direcciones consideradas para los coeficientes de Lankford [9]

El material de la chapa es acero AISI 1018, sus propiedades mecánicas se obtuvieron de la literatura [10] y se muestran en la Tabla 1.

Descripción	Simb.	Valor
Densidad [kg/m ³]	ρ	2840.0
Módulo de Young [GPa]	E	204.77
Razón de Poisson	ν	0.30
Límite elástico [MPa]	σ_y	270.60
Carga de rotura [MPa]	σ_{ut}	359.07
Deformación en el límite elástico	ϵ_0	0.0013
Deformación en la rotura	ϵ_{ut}	0.17
Coefficiente de esfuerzo [MPa]	K	577.30
Exponente de endurecimiento por deformación	n	0.17
Exponente de Barlat	m	6
Coefficiente Lankford a 0°	r_{00}	0.94
Coefficiente Lankford a 45°	r_{45}	1.10
Coefficiente Lankford a 90°	r_{90}	1.10

Tabla 1: Propiedades mecánicas de la chapa [10]

2.1.2. Aplicación del concepto de diámetro equivalente

Para desarrollar la fase experimental era necesario contar con un estimado de la presión hidráulica necesaria para conformar la pieza. En el conformado de chapas convencional se utiliza la Ec. (1) (Groover [11]) para calcular la carga que debe ejercer el punzón (F) y la Ec. (2) para calcular la carga del pisador (F_H). En la Ec. (1), el valor constante de 0.7 es un factor de corrección para considerar la fricción que debe vencerse durante el proceso.

$$F = \pi \cdot t \cdot d \cdot \sigma_{ut} \cdot \left(\frac{D}{d} - 0.7 \right) \tag{1}$$

$$F_H = 0.015 \sigma_y \pi [D^2 - (d + 2.2t + 2r_d)^2] \tag{2}$$

Un inconveniente de estas ecuaciones es que solo se aplica a figuras cilíndricas donde la chapa inicial es circular, tal como se muestra en la Fig. (13), donde D es el diámetro de la chapa inicial y d es el diámetro del macho o punzón.

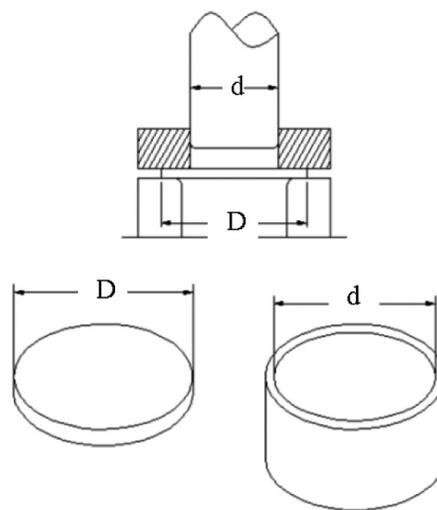


Fig. 13: Parámetros considerados en piezas cilíndricas [11]

Para formas no circulares o irregulares se utiliza el diámetro equivalente (D_E) propuesto por el Dr. Piotr Maciej Rusek Piela [12-15]. Este concepto se utiliza en hidráulica cuando se desea estudiar un fluido en canales y tubos no circulares, al utilizar éste término se puede estudiar el comportamiento del flujo de la misma forma como si fuera una tubería de sección circular.

Para encontrar el diámetro equivalente de la chapa (D_E), se iguala el área de un círculo de diámetro D_E (Ec. 3) con el área de la chapa inicial A_L , es decir, $A_C = A_L$.

$$A_C = \pi \frac{D_E^2}{4} \tag{3}$$

Después de igualar las áreas y despejar D_E se obtiene la Ec. 4.

$$D_E = 2 \sqrt{\frac{A_L}{\pi}} \tag{4}$$

Para encontrar el diámetro equivalente del punzón (d_E), se iguala el área de un círculo de diámetro d_E , con el área proyectada del punzón (A_P). Después de igualar A_C con A_P y despejar d_E se obtiene la Ec. 5.

$$d_E = 2 \sqrt{\frac{A_P}{\pi}} \tag{5}$$

Considerando lo anterior, ya es posible calcular las cargas de conformado y de sujeción en piezas no circulares, ya que se modifican las ecuaciones 1 y 2 dando lugar a la Ecuaciones 6 y 7.

$$F = \pi \cdot t \cdot d_E \cdot \sigma_{ut} \cdot \left(\frac{D_E}{d_E} - 0.7 \right) \quad (6)$$

$$F_H = 0.015 \sigma_y \pi [D_E^2 - (d_E + 2.2t + 2r_d)^2] \quad (7)$$

Para evaluar la presión hidráulica requerida se consideró un punzón hipotético, calculando la razón entre la carga de conformado (F) calculada con la Ec. 6 y el área de la chapa que recibiría la presión del fluido.

Usando las herramientas de un programa comercial de CAD fue posible evaluar el área inicial de la chapa y haciendo una sección transversal en el punzón hipotético fue posible determinar la magnitud del área proyectada. Usando las ecuaciones 4 y 5 se calcularon los diámetros equivalentes D_E y d_E ; al aplicarlos en la Ec. 6 resulta una carga de conformado (F) de 166.8 kN (37.5 kip), al dividirlo entre el área que recibiría la presión del fluido se encuentra que la presión requerida para el proceso es de 13.43 MPa (1948.15 psi) para fines prácticos se redondeó la magnitud de la presión a 13.80 MPa (2000 psi). En el caso de la carga para el pisador (F_H), se requiere de 73.9 kN (16.6 kip) de acuerdo a la Ec. 7.

2.1.3. Pruebas experimentales

Ya que se cuenta con un valor aproximado de la presión hidráulica requerida, se fabricó el banco hidráulico mostrado en la Fig. 14, este puede alcanzar una presión de operación de hasta 20.7 MPa (3000 psi). El banco está equipado con una válvula de alivio, una válvula de presión y un manómetro con un rango de 0.7 a 34.5 MPa (100 a 5000 psi).

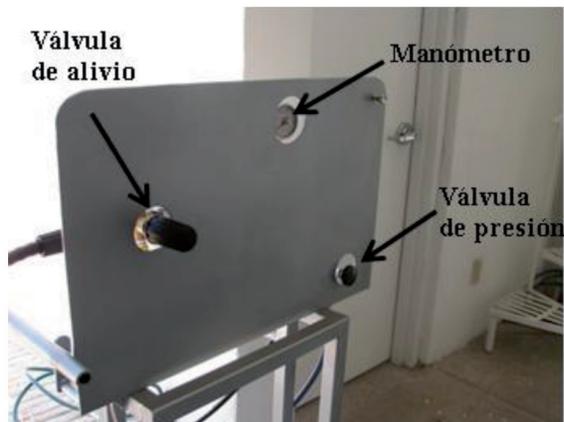


Fig. 14: Componentes del banco hidráulico

Tomando como base la forma de la tapa, se diseñaron los componentes necesarios para la celda de hidroconformado, estos componentes se muestran en la Fig. (15).

El conjunto consta de tres partes principales: matriz inferior, matriz superior y pisador. La matriz inferior contiene la cavidad con la forma geométrica deseada. En la matriz superior se encuentra una cavidad por donde entra el fluido y una cavidad donde se aloja el pisador. El pisador evita la formación de arrugas en la chapa y se dispuso de este modo para que fuera posible variar la carga que ejerce sobre la chapa auxiliándose de tornillos. Lo anterior es necesario ya que la carga requerida por el pisador suele ser inferior a la carga que ejercería de la presión hidrostática. Se determinó usar acero AISI 1018 para fabricar los troqueles, las propiedades mecánicas de este material se muestran en la Tabla 2. Como no se trata de chapas, debe considerarse como un material isotrópico.

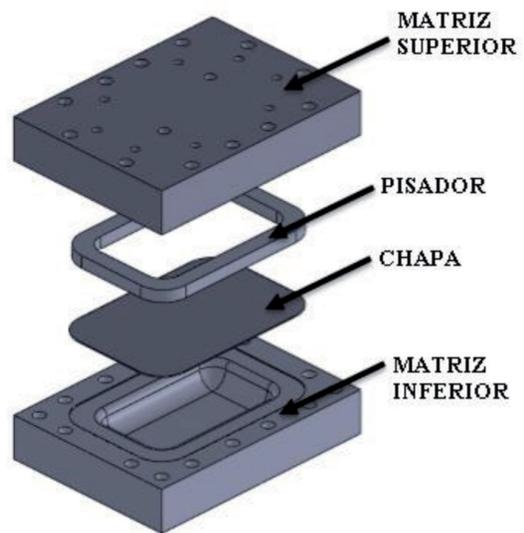


Fig. 15: Componentes de la celda de hidroconformado

Descripción	Simb.	Valor
Densidad [kg/m ³]	ρ	2840.0
Módulo de Young [GPa]	E	204.77
Razón de Poisson	ν	0.30
Límite elástico [MPa]	σ_y	370.2

Tabla 2: Propiedades mecánicas del acero AISI 1018 para los troqueles [9]

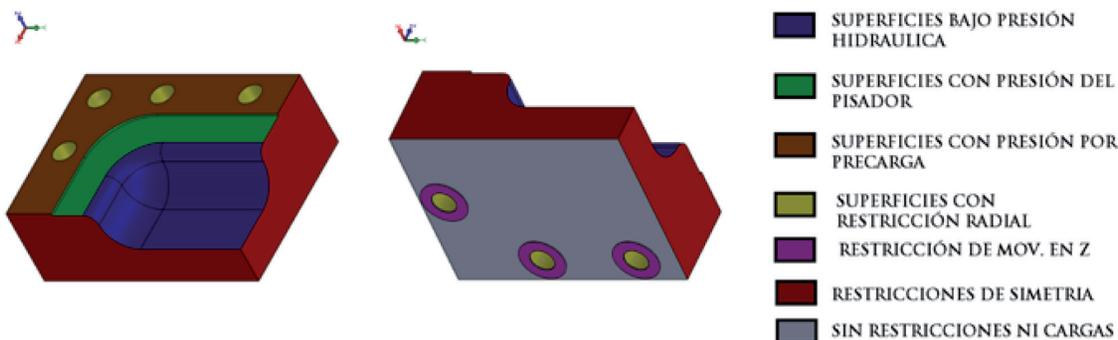


Fig. 16: Distribución de restricciones y cargas

Antes de maquinar los elementos de la celda, se llevó a cabo un análisis por el método de elemento finito en ANSYS® para evaluar la confiabilidad de las geometrías propuestas. En la Fig. (16) se muestra un diagrama con la distribución de cargas y restricciones para la matriz inferior, con la matriz superior se llevó a cabo un análisis semejante.

Para ahorrar recursos computacionales se aprovechó la simetría de los componentes, modelando solo la cuarta parte de estos usando restricciones de simetría en X y Y . Para mantener unidos los troqueles, se propuso usar un arreglo de 12 tornillos G5-1/2"-20-UNF-2A- 4 1/2" precargados, la precarga calculada fue de 45.35 kN (10.2 kip), esta precarga se consideró en la simulación aplicando sobre las superficies que están en contacto entre troqueles la presión resultante. También se consideró la presión ejercida por el pisador, esta se obtuvo al dividir la carga del pisador (F_H) entre el área de contacto entre pisador y matriz. Sobre las áreas que están en contacto con las roldanas se aplicó restricciones de movimiento en Z . En los orificios para los tornillos se aplicaron restricciones radiales para que no pudieran cerrarse y así considerar las restricciones de movimiento debidas a los tornillos. En la simulación se aplicó una carga de presión de 13.80 MPa (2000 psi) ya que esa fue la presión calculada anteriormente en la sección 2.1.2.

En la Fig. (17) se muestran los resultados de la simulación para los esfuerzos de Von Mises en la matriz inferior. Después de revisar los resultados de la simulación, se encontró que los troqueles tenían un factor de seguridad de 1.5, por lo que se procedió a fabricarlos.

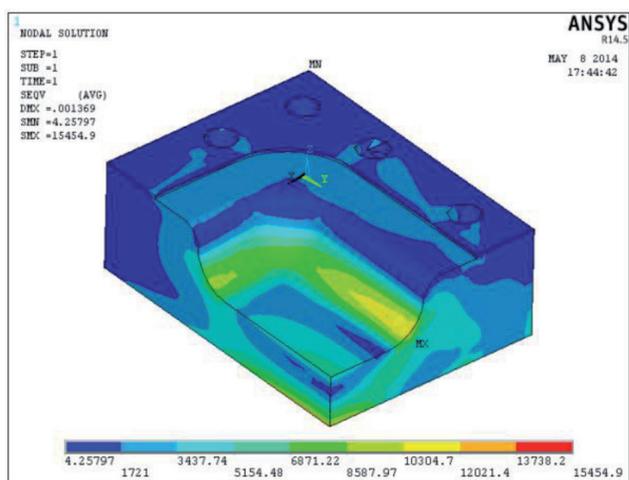


Fig. 17: Análisis por elemento finito de los componentes. Unidades en lb/in²

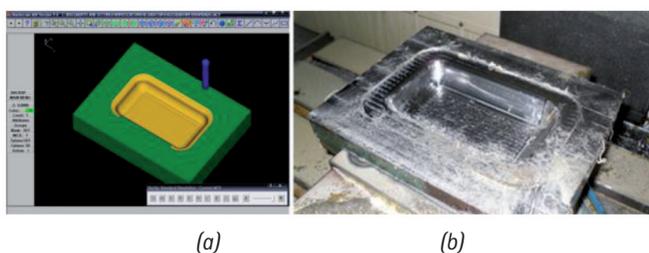


Fig. 18: Maquinado de los troqueles. (a) Generación de códigos CNC en Mastercam® (b) Pieza resultante

Con ayuda del software Mastercam®, se generaron códigos CNC para fabricar los troqueles en centros de maquinado vertical FADAL VMC 3016L y KIWA S10-COLT (Fig. (18)). Tanto el maquinado de los troqueles como las pruebas de hidroconformado, se realizaron en el laboratorio de manufactura de la División de Ingeniería Campus Irapuato-Salamanca (DI-CIS) de la Universidad de Guanajuato.

Las piezas resultantes (matriz inferior, pisador y matriz superior) se muestran en la Fig. (19).

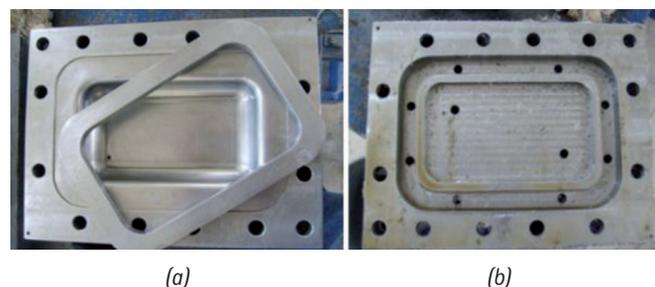


Fig. 19: Piezas maquinadas. (a) Matriz inferior y pisador (b) Matriz superior o tapa

Ya que se contaba con todo lo necesario, se procedió a llevar a cabo las pruebas experimentales (Fig. (20)). Los elementos de la celda se lubricaron con aceite hidráulico de la serie Mobil DTE 20 empleado en sistemas con engranajes y cojinetes, sistemas que requieren un alto nivel de protección anti-desgaste y de capacidad para soportar cargas, sistemas donde se requiere una película de protección contra la corrosión y donde pequeñas cantidades de agua son inevitables. Como sellador se probó usando teflón, cámara de neumático y otras variantes, pero fue hasta que se usó asbesto que se pudo llegar a una presión de 13.80 MPa (2000 psi) sin que se presentará fuga de líquido. Con ayuda de tornillos era posible variar la carga del pisador, sin embargo, no fue posible medir la magnitud de la misma por lo que se varió esta carga de forma iterativa hasta que no se presentaron arrugas en la chapa.



Fig. 20: Desarrollo de las pruebas experimentales. (a) Troqueles ensamblados (b) Proceso de hidroconformado

2.2. PROCESO DE MODELADO POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Con el fin de realizar un comparativo numérico-experimental, se desarrollaron cuatro simulaciones del proceso de hidroconformado variando únicamente el tipo de material, estas simulaciones se desarrollaron en ANSYS/LS-DYNA®

el cual es un software que usa el método explícito de elementos finitos. Los materiales utilizados fueron 012-ISOTROPIC ELASTIC PLASTIC, 036-3 PARAMETER BARLAT, 037-TRANSVERSELY ANISOTROPIC ELASTIC PLASTIC (también conocido como HILL'48) y 243-HILL 90. La geometría requerida se importó de CAD y para ahorrar recursos computacionales se usaron restricciones de simetría modelando solo la cuarta parte del sistema, tal y como se muestra en la Fig. (21). El modelo cuenta con 9927 elementos de los cuales 3400 se usaron en la chapa.

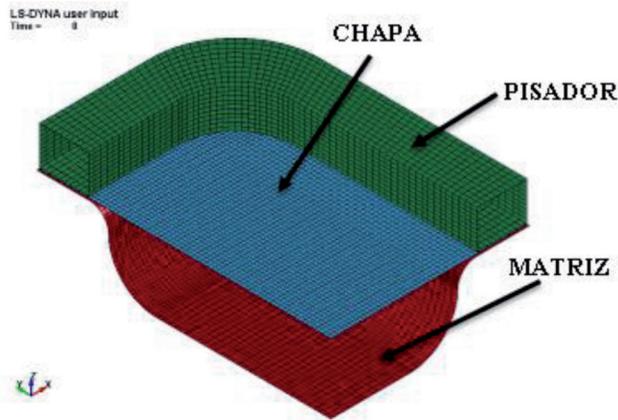


Fig. 21: Modelado de los componentes dentro de LS-DYNA®

En el caso de la chapa, su ancho y largo son mucho mayores a su espesor, por lo que se puede usar elementos tipo *Shell*. Para los troqueles (matriz y pisador) se eliminó el uso de volúmenes ya que estos pueden ser tratados como cuerpos rígidos y solo las áreas externas influyen en el proceso. Para mallar todos los componentes se usó el elemento SHELL163 ilustrado en la Fig. (22). Este elemento es usado para análisis dinámicos y tiene 12 grados de libertad en cada nodo: translaciones, aceleraciones, velocidades y rotaciones en las direcciones nodales x , y y z . La formulación del elemento usada fue *Belytschko-Tsay*.

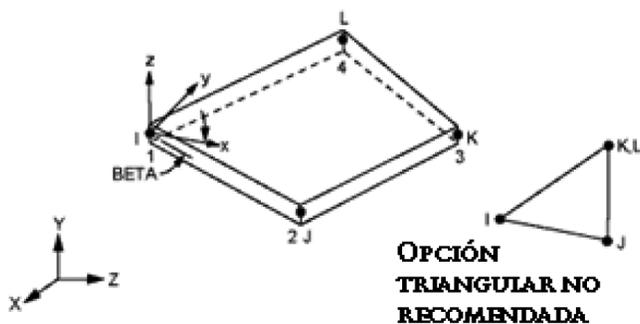


Fig. 22: Elemento SHELL163 para el modelado de los componentes [16]

Los tipos de material considerados requieren de parámetros comunes tales como: ρ , E , ν , ϵ_0 y σ_y . Además de estos parámetros, modelos como los de Barlat y HILL'90 requieren de parámetros adicionales tales como n , K y del exponente de Barlat (m). El exponente de Barlat depende de la forma

de la red cristalina del material, los aceros al bajo carbono tienen configuración cubica centrada en cuerpo (BCC) por lo que $m = 6$ [17]. Para considerar la anisotropía de la chapa, estos tipos de material también solicitan los coeficientes de Lankford (r_{00} , r_{45} y r_{90}), en el caso de HILL'48 el parámetro utilizado es R_{PROM} el cual es un promedio de los coeficientes de Lankford.

Los modelos de material utilizados también requiere de una curva que describa la variación del límite elástico bajo el efecto de endurecimiento por deformación, esta curva es igual a la curva esfuerzo-deformación (σ - ϵ) en la zona plástica Fig. (23).

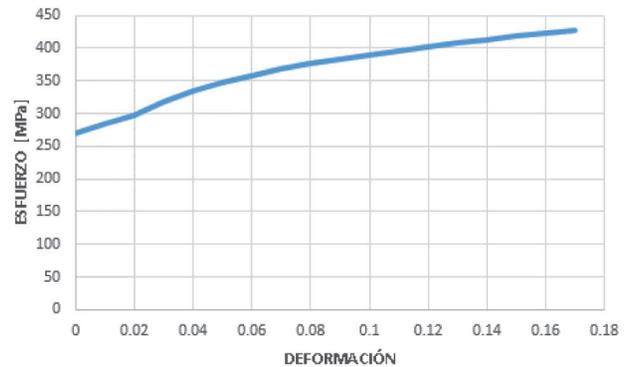


Fig. 23: Gráfica esfuerzo-deformación en la zona plástica para el acero AISI 1018

El tipo de contacto utilizado fue superficie a superficie para conformado (FORMING_SURFACE_TO_SURFACE). Este tipo de contacto solicita coeficiente de fricción estático (FS) entre componentes, según [14], para trabajos en frío se puede considerar un coeficiente de fricción estático de 0.1. Para aplicar cargas se consideró la presión ejercida por el fluido como se ilustra en la Fig. (24).

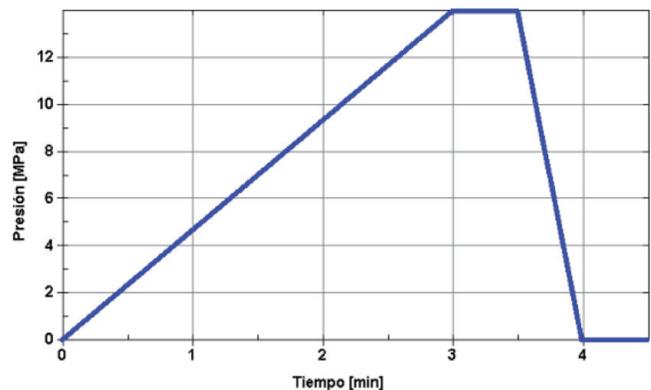


Fig. 24: Curva de carga para la presión

La presión crece en forma lineal por 3 minutos hasta llegar a 13.80 MPa (2000 psi), esta presión se mantiene por 0.5 min y se descarga en la misma cantidad de tiempo. En la parte final de la simulación se deja sin carga el modelo para verificar si existe regreso del material. El pisador se manejó como un cuerpo rígido estático para analizar la carga de reacción de la chapa sobre él y así evaluar la carga de sujeción mínima requerida.

3. RESULTADOS

3.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Durante la fase experimental, el problema principal fue lograr alcanzar altas presiones hidráulicas sin que se presentara fuga de líquido. Se usaron empaques de neopreno, caucho y teflón; pero fue hasta que se usó asbesto y una carga de apriete de 122.02 N•m (90 lb•ft) en los 12 tornillos (G5-1/2-20-UNF-2A- 4 1/2), que fue posible llegar a una presión de 13.80 MPa (2000 psi) sin que se presentara fuga de líquido. Se aplicaron presiones hidráulicas de 6.90, 8.96, 9.65, 10.34, 13.10 y 13.8 MPa (1000, 1300, 1400, 1500, 1900 y 2000 psi). Hasta que se llegó a los 13.8 MPa (2000 psi) fue que se conformó la pieza completamente como se muestra en la Fig. (25).

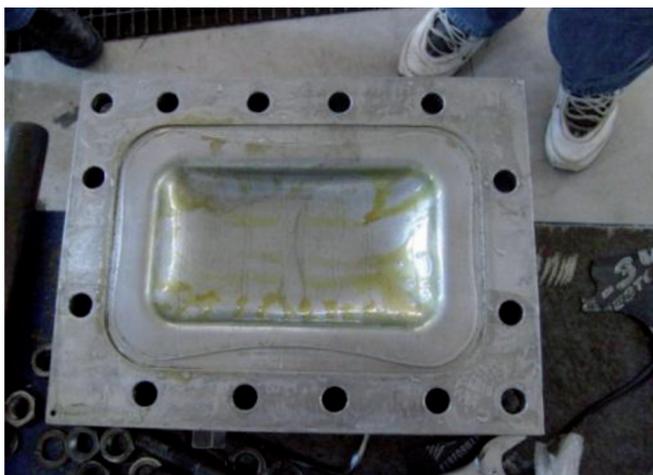


Fig. 25: Pieza conformada

Fue muy importante en el diseño de los troqueles para hidroconformado el poder separar la función de sello respecto a la sujeción del material (pisador), simplificando muchos problemas con la funcionalidad de la matriz. Del mismo modo, fabricar los troqueles con ayuda de una máquina CNC permitió un acabado superficial con baja rugosidad que aunado a una buena lubricación facilitó el conformado de la pieza.

En los procesos de formado de chapas, un factor muy importante a considerar es la reducción de espesor en la chapa, por convención, se busca que no sobrepase el 25%. Para verificar lo anterior, se midió el espesor final de la pieza en varias zonas de interés como se ilustra en la Fig. (26). La zona A comprende el lado corto de la tapa, la zona B es la esquina, la Zona C es el lado más largo y la Zona D es el fondo.

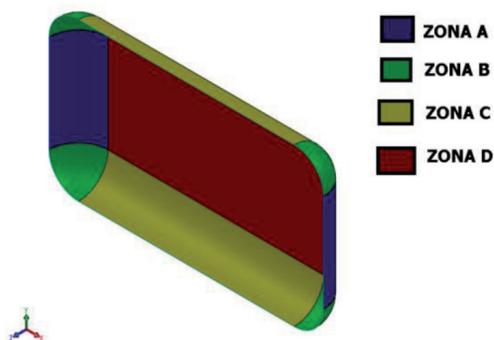


Fig. 26: Zonas de interés para medir el espesor

Para poder medir el espesor de la chapa en las diferentes zonas de interés, se usó una máquina de coordenadas Mitutoyo BH-V504 determinando un punto de referencia por encima de la mesa como se muestra en la Fig. (27). En el centro de cada zona bajo análisis se seleccionaron cinco puntos cercanos al azar, midiendo el espesor de cada uno de ellos y calculando la media aritmética. Se optó por tomar mediciones del centro de cada zona ya que se considera es el área que sufrirá mayor adelgazamiento. El espesor promedio del área central de cada zona se muestra en la Tabla 3. Se evaluó la reducción de espesor de todas las pruebas realizadas, pero en este trabajo solo se consideró el espesor resultante de la prueba con 13.80 MPa (2000 psi).

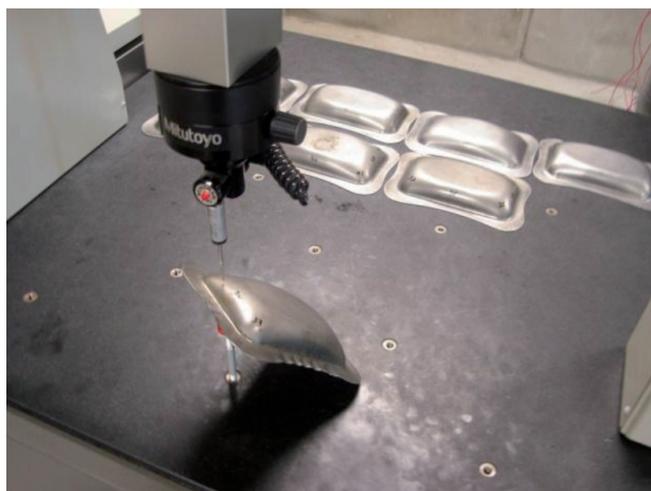


Figura 27: Medición del espesor final en la pieza

	ZONA			
	A	B	C	D
Espesor [mm]	1.087	1.084	1.148	1.148
Reducción de espesor [%]	9.41	9.62	4.33	4.33

Tabla 3: Espesor resultante de las pruebas experimentales en las zonas de análisis

3.2. RESULTADOS NUMÉRICOS

Después de llevar a cabo las simulaciones con los cuatro modelos de material, se obtuvieron resultados tales como: reducción de espesor, esfuerzos y deformaciones. En la Fig. (28) se muestra la distribución de espesor en la chapa en la parte final del proceso usando el modelo de material HILL'90. De acuerdo a esta figura, la mayor reducción de espesor se presenta en el fondo, principalmente en las "cabeceras" (zonas en azul oscuro), esto debido a que en las esquinas converge el material y es más difícil que "fluya", provocando que se estire y adelgace la chapa. Las zonas en rojo es donde converge el material, produciendo un engrosamiento de la chapa además de ser zonas con tendencia a arrugas.

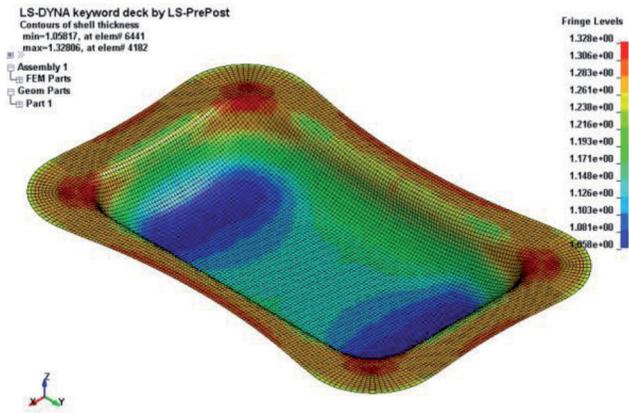


Fig. 28: Distribución espesor resultante en la chapa usando HILL'90 [mm]

Para determinar el espesor promedio de cada una de las zonas bajo análisis, se seleccionaron 5 elementos al azar dentro del área central de cada zona, registrando su espesor y calculando la media aritmética de sus valores. En la Fig. (29) se muestra un comparativo de la desviación entre los resultados experimentales y los numéricos para cada zona con los distintos tipos de material.

Ya que el pisador fue considerado como un cuerpo rígido estático sobre la chapa, LS-DYNA® permite registrar en archivos ASCII la carga que ejerce la chapa sobre el pisador y así encontrar la carga de sujeción mínima requerida. De acuerdo a la gráfica de la Fig. (30), la carga de sujeción mínima requerida es 94.5 kN.

4. CONCLUSIONES

Entre los puntos más importantes a destacar como resultado de este trabajo, está la propuesta de aplicar las ecuaciones de conformado convencional en el hidroconformado. También se demostró que es posible desarrollar el hidroconformado de piezas rectangulares tomando como base el conformado de piezas circulares utilizando el concepto de diámetro equivalente. Se recomienda llevar a cabo un análisis semejante considerando figuras irregulares, ya sea usando conformado de chapas o hidroconformado.

La diferencia entre la presión calculada con la Ec. 6 (13.43 MPa) y la requerida experimentalmente (13.80 MPa) es 2.6%, por lo que se puede concluir que aplicar el concepto de diámetro equivalente para calcular la presión hidráulica necesaria en un proceso de hidroconformado brinda una buena aproximación.

De acuerdo a los resultados mostrados en la Fig. (29), el modelo de material Hill'90 presenta un mejor desempeño en

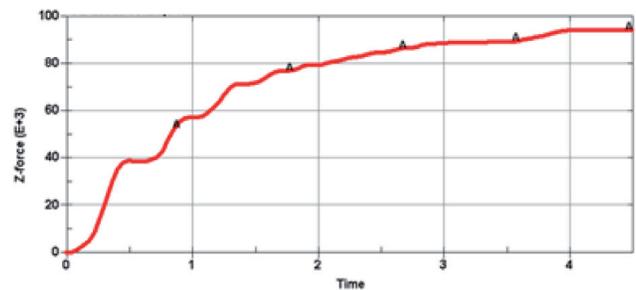


Fig. 30: Carga ejercida por la chapa sobre el pisador [N]

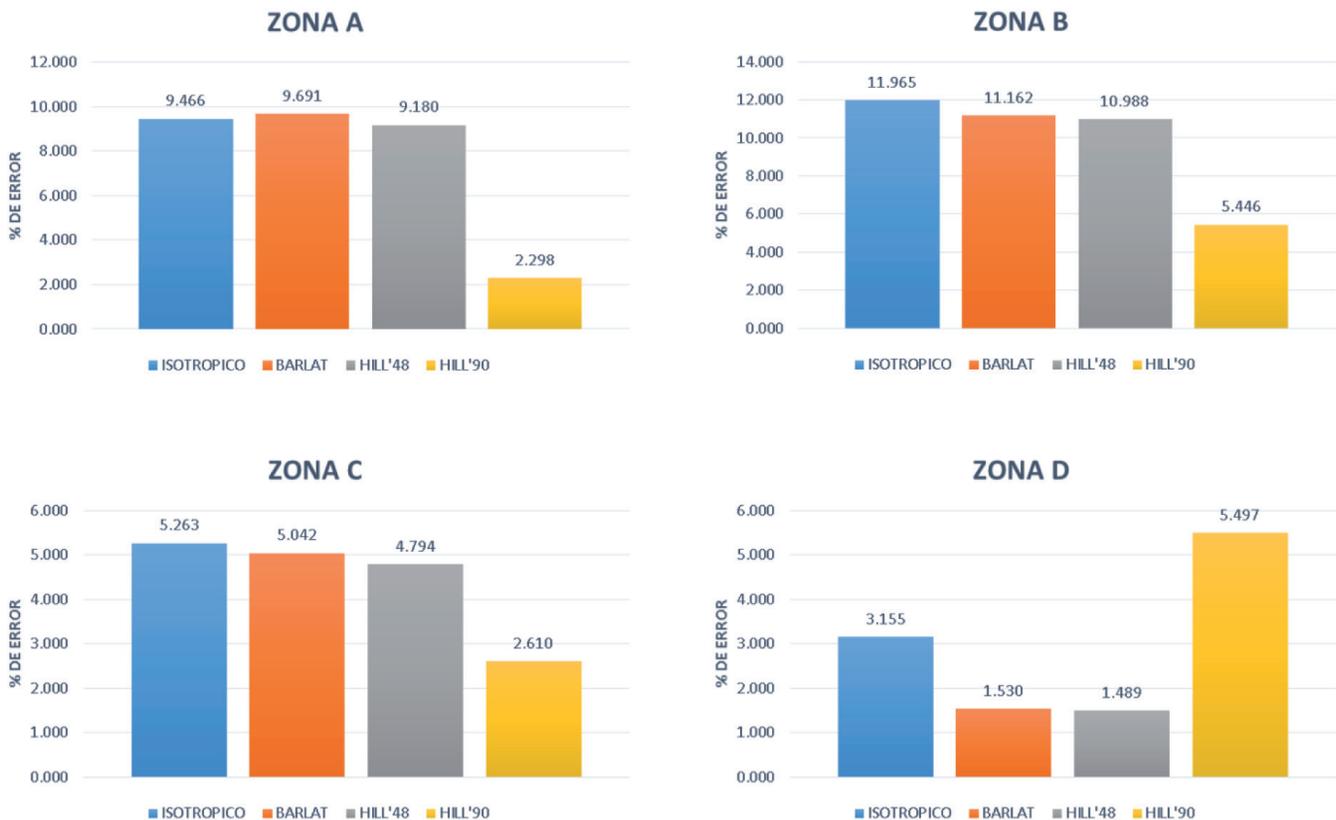


Fig. 29: Comparativo del porcentaje de error para el espesor resultante entre varios tipos de material

comparación con los otros modelos de material ya que el error promedio para la reducción de espesor en todas las zonas es inferior al 5.5%. Se puede observar que no existe una gran diferencia de resultados entre considerar el material como isotrópico o usar los modelos de Hill'48 o el de Barlat. Se aconseja desarrollar un comparativo del desempeño entre varios modelos de material evaluando la reducción de espesor considerando además modelos recientes tales como los de Yoshida-Uemori. En este trabajo no se incluyó este análisis ya que estos modelos requieren de parámetros que se obtienen experimentalmente y que por cuestiones de logística no fue posible obtener.

En la Fig. (30) se muestra la carga de sujeción registrada por LS-DYNA® (94.5 kN), esta es 21.8% mayor a la calculada teóricamente con la Ec. 7 (73.9 kN). Lo anterior lleva a la conclusión que aplicar el diámetro equivalente para calcular la carga del pisador podría servir como punto de partida para encontrar esta carga en forma iterativa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento, por el apoyo recibido para esta investigación al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), al Cuerpo Académico de Diseño y Manufactura de DICIS, a la Dirección de Apoyo a la Investigación y el Posgrado (DAIP) de la Universidad de Guanajuato y a la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Tshaetsch Heinz. Metal Forming Practise. Springer. 2006. ISBN: 978-3-540-33216-9.
- [2] Schuler GmbH. Metal forming handbook. Ed. Springer, 1998. ISBN: 978-3-642-63763-6.
- [3] Muammer Koc. Hydroforming for advanced manufacturing. Woodhead Publishing in Materials, 2008. ISBN: 9781845693282.
- [4] Disponible en Web: https://www.apgroup.com/products/Parts/Hydroformed_Parts.
- [5] Karabegovic E, Rosic H, Mahmic M. "Comparison and substitution of conventional processes of plastic forming applying hydroforming". *Mechanika*. 2006. ISSN 1392-1207
- [6] Dorel Banabic. Advanced methods in material forming. Springer. 2007. ISBN: 3540698450.
- [7] Kalpakjian S. Manufacturing engineering and technology. 4th edition. Prentice Hall. Upper Saddle River NJ. 2001. ISBN: 0201361310.
- [8] Szumera James A. The Metal Stamping Process. Your product from concept to customer. Industrial Press Inc. New York. 2003. ISBN: 0831131640 / 0-8311-3164-0.
- [9] Davis Joshep R. ASM Handbook Volume 14 Forming and Forging. ASM International. Metal Parks, Ohio. ISBN: 0871700204.
- [10] PamStamp User's guide, Pacific ESI, Inc release V2012.1.
- [11] Groover Mikell. Fundamentals of modern manufacturing. John Wiley & sons. New York. 2000. ISBN: 1118231465.
- [12] García-Zugasti PJ. "Proceso de embutido de productos rectangulares de lámina (estudio teórico-práctico)". Directores: Rusek P, Vázquez-Lasso VH, Aguilera-Gómez E. Tesis doctoral. Universidad de Guanajuato, División de Ingeniería Campus Irapuato-Salamanca, 2005.
- [13] García-Zugasti PJ, Rusek-Piela P, Aguilera-Gómez E, Mendoza-Razo A. "Embutido de productos rectangulares empleando el concepto de diámetro equivalente (deep drawing rectangular parts evaluation using the equivalent diameter concept)". En: Memorias del 8º Congreso Ibero-Latinoamericano de Ingeniería Mecánica, (Cusco Perú 23-25 Octubre 2007). ISBN 978-9972-2885-3-1.
- [14] Serrato-Hernández S. "Aplicaciones del diámetro equivalente para el estampado profundo no circular". Director: Aguilera-Gómez E. Tesis de maestría. Universidad de Guanajuato, División de Ingeniería Campus Irapuato-Salamanca, 2007.
- [15] Reveles-Arredondo JF. "Simulación de estampado e hidroconformado". Directores: Aguilera-Gómez E, Ledesma-Orozco ER. Tesis de Maestría. Universidad de Guanajuato, División de Ingeniería Campus Irapuato-Salamanca, 2009.
- [16] ANSYS LS-DYNA User's guide, ANSYS, Inc release 14.5.
- [17] Aryanpour A, Green DE. "Evaluation of LS-DYNA material models for the analysis of sidewall curl in advanced high strength steels". En: 12 th LS-DYNA user's conference, (Detroit USA 3-5 Junio 2012).