

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS TROQUELES PROPIOS DEL MÉTODO DE  
PRESIÓN ACANALADA RESTRINGIDA Y SIMULACIÓN DE ESTE MÉTODO EN  
PLACAS DE HIERRO ARMCO**

**JOHAN SEBASTIÁN ARCILA GARCÍA  
FABIÁN DARÍO CRUZ RESTREPO**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
INGENIERÍA MECÁNICA  
PEREIRA  
2017**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS TROQUELES PROPIOS DEL MÉTODO DE  
PRESIÓN ACANALADA RESTRINGIDA Y SIMULACIÓN DE ESTE MÉTODO EN  
PLACAS DE HIERRO ARMCO**

**JOHAN SEBASTIÁN ARCILA GARCÍA  
FABIÁN DARÍO CRUZ RESTREPO**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico**

**Profesor Luis Carlos Flórez García**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
INGENIERÍA MECÁNICA  
PEREIRA**

**2017**

# CONTENIDO

	<b>pág.</b>
LISTA DE FIGURAS.....	4
LISTA DE TABLAS.....	5
INTRODUCCIÓN.....	6
1. MARCO TEÓRICO.....	8
2. HIERRO ARMCO.....	12
3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA CGP.....	13
3.1 TROQUELES.....	13
3.2 BASES.....	17
3.3 BRIDAS.....	18
3.4 COLUMNAS GUÍA.....	19
3.5 BUJES.....	20
4. SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS.....	21
4.1 MODELOS DE LOS MATERIALES.....	21
4.2 MALLADO POR ELEMENTOS FINITOS.....	22
4.3 CONDICIONES DE CONTACTO.....	23
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	24
5.1 PRIMERA PASADA EN EL MÉTODO CGP.....	24
5.2 VARIACIÓN DE LA LONGITUD DEL DIENTE.....	30
5.3 VARIACIÓN DEL ÁNGULO DEL DIENTE.....	31
6. CONCLUSIONES, APORTES Y RECOMENDACIONES.....	35
BIBLIOGRAFÍA.....	37
ANEXOS	

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Esquema de los troqueles propios del método CGP.....	9
Figura 2. Evolución de la deformación total para una pasada del método CGP.....	10
Figura 3. Centro de mecanizado vertical CNC, modelo V-40, marca Leadwell.....	14
Figura 4. Horno de mufla, modelo E.S, marca Terrígeno.....	14
Figura 5. Caja de Acero A36.....	15
Figura 6. Diagrama TTT del tratamiento térmico completo realizado al acero XW41.....	15
Figura 7. Máquina electroerosionadora de corte por hilo, modelo FW 1U, marca GF.....	16
Figura 8. Esquema del corte por hilo al que fue sometido al acero XW41.....	16
Figura 9. Juegos de troqueles obtenidos.....	17
Figura 10. Máquinas con las que se mecanizan las bases.....	18
Figura 11. Bases del sistema.....	18
Figura 12. Brida del sistema CGP.....	19
Figura 13. Columna guía del sistema CGP.....	20
Figura 14. Buje del sistema CGP.....	20
Figura 15. Deformación plástica de Von Mises para la primera pasada del hierro ARMCO en el método CGP.....	25
Figura 16. Deformación plástica equivalente de Von Mises para diferentes longitudes del diente..	30
Figura 17. Deformación plástica equivalente de Von Mises para diferentes ángulos del diente.....	32

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero estructural usado en la simulación.....	22
Tabla 2. Propiedades mecánicas del hierro ARMCO usado en la simulación.....	22

## INTRODUCCIÓN

Para la obtención de grano ultrafino se han desarrollado diversas técnicas de deformación plástica severa, basadas en una de las categorías principales conocidas como *Top Down* (de arriba hacia abajo) en la cual se secciona la microestructura de un material hasta lograr nano estructurarlo. Dentro de las distintas técnicas que hacen parte del *Top Down*, la investigación se basó específicamente en la técnica CGP (*Constrained Groove Pressing*). Dicha técnica implica la utilización de deformaciones muy grandes en una hoja de material, por medio de una matriz de troqueles corrugados y una matriz plana en las cuales se garantiza que el material no sufra cambios dimensionales significativos.

El diseño de los troqueles propios para el modelo CGP se determinó siguiendo un modelo esquemático planteado de acuerdo a las necesidades de la técnica y los costos que podría incurrir el procesamiento del material. El ancho de los dientes de la matriz corrugada en este método viene sujeto al espesor de la probeta  $t$  (2 mm), el ancho de la región inclinada es igual a  $t$  también y su ángulo de inclinación igual a  $45^\circ$ , esto debido a que esta configuración entrega una combinación óptima de propiedades mecánicas. El acero que se usó para la fabricación de los troqueles fue un acero de herramientas para trabajo en frío XW41 (AISI D2), esto debido a sus buenas propiedades mecánicas como su alta resistencia a la compresión. Con el fin de potenciar las propiedades mecánicas del acero XW41, éste se sometió a un tratamiento térmico de temple en un horno de mufla, protegiéndose de la oxidación y decarburación en una caja de acero estructural inmerso con arena. Se diseñaron dos bases que por medio de elementos de sujeción se adaptaron a las matrices de los troqueles, para a través de dos columnas guías tener movimiento ascendente y descendente controlados, al deformar la hoja de hierro ARMCO la cual es objeto de estudio en esta investigación.

Haciendo uso del análisis de elementos finitos a través del software Ansys Workbench supeditado a un sistema de análisis en Dinámica Explícita (*Explicit Dynamics*) en 2D, se simuló la primera pasada del hierro ARMCO en el método CGP con el fin de conocer el comportamiento y distribución de las deformaciones a lo largo de la lámina. También se realizaron simulaciones en

donde se variaron parámetros de la geometría de los troqueles, tales como la longitud del diente y su ángulo, con el objetivo de conocer su influencia en la concentración de deformaciones.

En términos generales se encontró que las zonas de interface son determinantes en el comportamiento y distribución de las deformaciones a lo largo del material, éstas son las que menor deformación reciben y además afectan sustancialmente a sus zonas adyacentes. Los valores de deformación aumentan a la par del número de ciclos, aunque con cierta heterogeneidad.

En cuanto a los resultados de las variaciones de la geometría, se observó que con el aumento de la longitud del diente disminuyeron las deformaciones, asimismo cuando se aumentó el ángulo del diente, éste aumentó los valores de deformación.

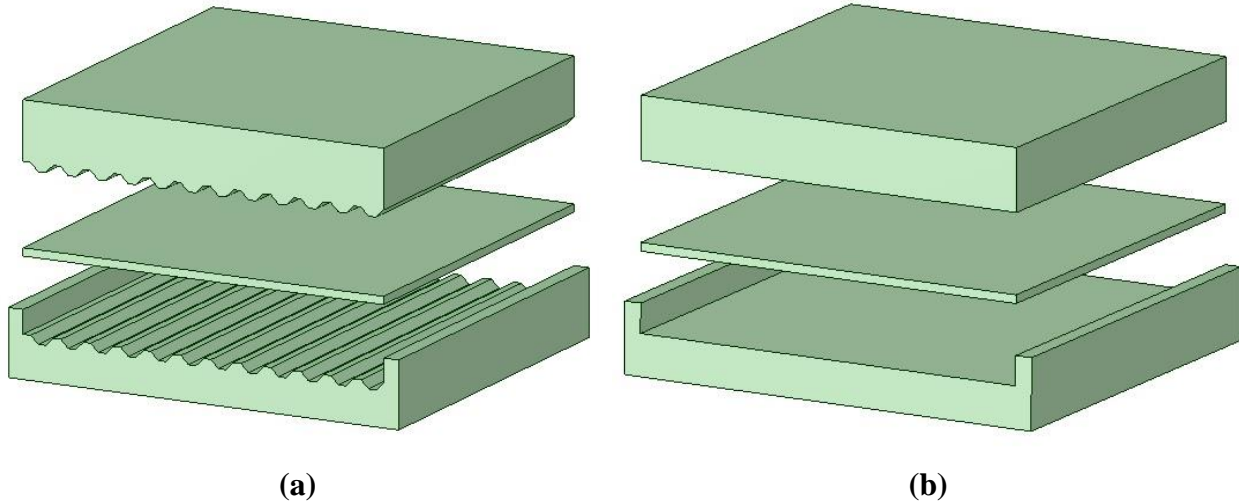
## 1. MARCO TEÓRICO

Los materiales metálicos con grano refinado exhiben características mecánicas especiales, una de las más relevantes es la combinación de una alta resistencia con ductilidad; también presentan propiedades como la superplasticidad, alta resistencia a la fatiga y a la corrosión [1]. Por éstas y muchas características más, los materiales metálicos que presentan grano refinado resultan interesantes en diversas aplicaciones de ingeniería. A esto, se debe el interés del procesamiento de materiales para la obtención de estructuras con tamaños de grano ultrafino, UFG (del inglés *Ultra-Fine Grain*), es decir, tamaños de grano menores a 1  $\mu\text{m}$ ; ésta denominación a su vez, se subdivide en materiales submicrométricos, los cuales presentan tamaños de grano de 100 a 1000 nm, y materiales nanométricos, con tamaños de grano inferiores a 100 nm [2].

Estudios relacionados con el campo de la producción y caracterización de materiales con estructura de grano UFG han contribuido al desarrollo de diversas formas de obtenerlos, ya sea por vía química, como lo es la condensación en gas inerte, IGC (*Inert Gas Condensation*); o por vía mecánica, como lo son los procesos de deformación plástica severa, SPD (*Severe Plastic Deformation*). Algunos de los procesos de SPD más comunes son, por ejemplo, presión en canal angular constante, ECAP (*Equal Channel Angular Pressing*); torsión a alta presión, HPT (*High Pressure Torsion*); entre otros.

Existe un método aún en etapas tempranas de investigación, pero con gran expectativa en su proyección a escala industrial debido a la simplicidad del proceso, éste método es el de presión acanalada restringida, CGP (*Constrained Groove Pressing*); método introducido inicialmente por Shin *et al.* [3]. Durante el proceso CGP, la hoja de material es prensada a través de un juego de troqueles confinados, con los cuales se garantiza que el material no sufra cambios dimensionales en ninguna dirección a lo largo del proceso. En éste proceso, el material está sujeto a repetitivas deformaciones plásticas introducidas por los troqueles corrugado y plano, respectivamente, mostrados en la Figura 1.





**Figura 1.** Esquema de los troqueles propios del método CGP, (a) troquel corrugado y (b) plano.

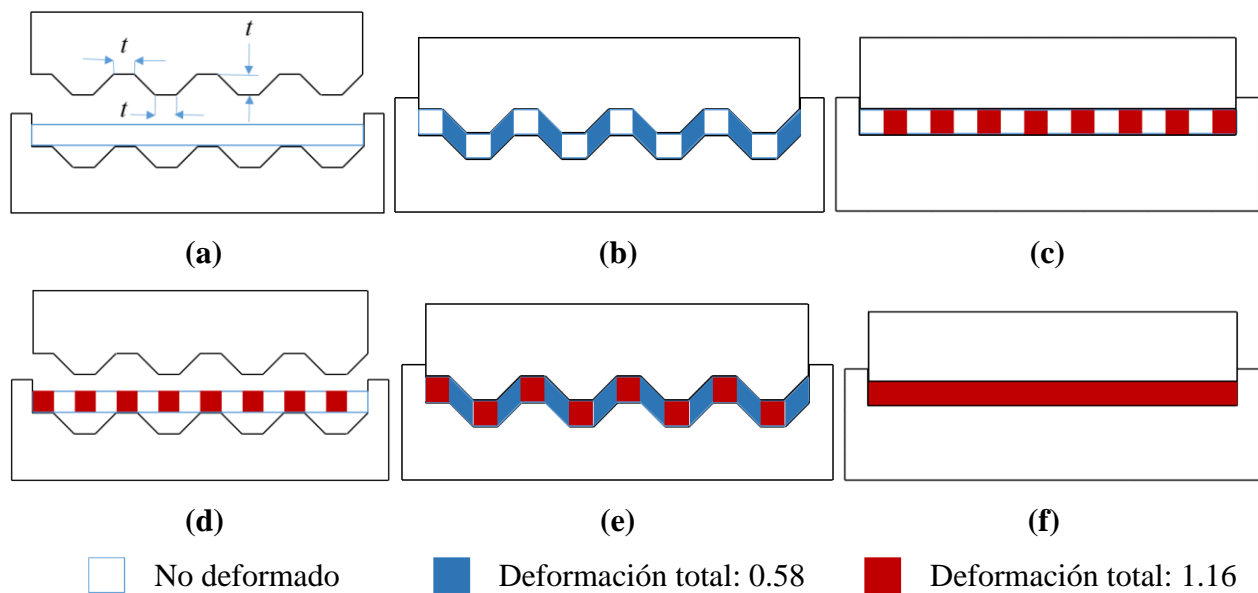
El ancho de los dientes del troquel acanalado en este método viene sujeto al espesor de la probeta ( $t$ ); inicialmente en esta investigación, el ancho de la región inclinada será igual a  $t$  también y su ángulo de inclinación igual a  $45^\circ$ , esto debido a que esta configuración entrega una combinación óptima de propiedades mecánicas [4]. Lo anterior significa que todas las dimensiones del diente del troquel son iguales a  $t$ , esto se muestra en la Figura 2a. Al ser todas estas dimensiones iguales al espesor de la probeta, se presenta sobre la probeta deformación por cizalladura pura bajo la condición de esfuerzo plano, en las regiones inclinadas de los troqueles (Figura 2b) [5].

La Figura 2 muestra el esquema de los 4 ciclos que comprenden una pasada en el método CGP, el primer ciclo consiste en deformar la hoja de material con los troqueles acanalados (Figura 2b); teóricamente se sabe que las magnitudes de la deformación por cizalla ( $\gamma$ ) y la deformación total ( $\epsilon$ ) después del primer ciclo en el método CGP, están dadas por las Ecuaciones (1) y (2) [6]. Donde  $H$  y  $T$ , son el alto y ancho del diente respectivamente.

$$\gamma = \frac{H}{T} = \frac{t}{t} = 1 \quad (1)$$

$$\epsilon = \left( \frac{4}{3} (\gamma/2)^2 \right)^{1/2} = 0.58 \quad (2)$$

Después del primer ciclo, las zonas deformadas obtienen una deformación total de 0.58; después de que el material es aplanado en el segundo ciclo (Figura 2c), la deformación total se duplica en las zonas previamente deformadas, obteniéndose así una deformación total de 1.16. Antes del tercer ciclo (Figura 2d), la hoja de material debe ser rotada 180° alrededor del eje perpendicular del plano de la hoja para ahora deformar las zonas intermedias con el troquel acanalado. Después del tercer ciclo (Figura 2e), las zonas intermedias obtienen una deformación total de 0.58; finalmente después del cuarto ciclo cuando el material es aplanado, las zonas intermedias se exponen a una deformación total de 1.16 (Figura 2f), homogenizándose así la deformación sobre toda la probeta.



**Figura 2.** Evolución de la deformación total para una pasada del método CGP. (a) Antes del primer ciclo, (b) después del primer ciclo, (c) después del segundo ciclo, (d) rotada 180°, (e) después del tercer ciclo y (f) después del cuarto ciclo.

El proceso de CGP exhibe gran potencial en cuanto al refinamiento del grano, sin embargo, dentro del marco investigativo de dicho proceso se han llevado a cabo variaciones en los parámetros de diseño, como la variación de las longitudes del diente, incluyendo variaciones en los ángulos del diente corrugado, distintas investigaciones se han enfocado en hacer modificaciones al proceso general CGP. Una de las investigaciones se basó específicamente en la implementación de dos distintos procedimientos con dos ángulos distintos (45° y 50°), comparando dichos ángulos encontraron que un aumento a 50° podría generar una mejora en las propiedades mecánicas, pero

reducir la homogeneidad del grano [7]. Sin embargo, en otro trabajo se demostró que un incremento del ángulo a  $53^\circ$ , podría no permitir más pasadas en el proceso CGP, pero aun así se notó una mejora en las propiedades mecánicas [8].

Además de las modificaciones en el ángulo del troquel acanalado en la técnica CGP, se ha analizado el comportamiento de las propiedades mecánicas de una aleación de Cu-Zn en el cual se llevó a cabo un incremento del ancho del diente de 5 mm a 7 mm, observándose una disminución en la dureza y en el refinamiento del grano [9]. De igual modo Wang *et al.* [4] en una investigación más reciente, demostró teórica y experimentalmente por medio de simulaciones, que el ángulo y longitud del diente óptimos son  $45^\circ$  y 2 mm respectivamente, sin embargo se realizaron distintas variaciones con un ángulo mínimo de  $30^\circ$  hasta un ángulo máximo de  $60^\circ$  y longitudes mínima de 1 mm y máxima de 4 mm, encontrando que la deformación efectiva tiene un aumento hasta una longitud del diente de 2 mm de allí en adelante las regiones sometidas a cizalladura disminuían su deformación efectiva considerablemente, en cuanto a la variación del ángulo se observó que al éste incrementarse se obtenían valores en aumento hasta llegar al ángulo máximo de  $60^\circ$ , no obstante se cabe denotar que en dicho ángulo el material recrea un fenómeno de embutido, haciendo que la hoja de material experimente distintos adelgazamientos pasando de deformación por cizallamiento puro a curvado.

Aunque la investigación a nivel global en este proceso está comenzando, se ha aplicado con éxito en la obtención de estructuras nanométricas de latón [10] y aluminio [11]. La presente investigación está encaminada a finalizar con la realización del proceso CGP a un hierro ARMCO en futuros proyectos de investigación; para lo anterior es necesario que en esta se diseñen y construyan físicamente los troqueles del método además de simularse los modelos aproximados del proceso. Para cumplir con lo anterior, primero se diseñaron y construyeron los troqueles corrugados propios del método CGP con los que posteriormente se pretende realizar el proceso al hierro en mención. La investigación también presentará la simulación del proceso y el análisis de la misma, por medio del método de elementos finitos. Los resultados serán validados y verificados con este modelo matemático, comparando los resultados con los modelos físicos y los resultados de otras investigaciones.

## 2. HIERRO ARMCO

Desarrollado en 1909 por la compañía Americana Rolling Mill (*American Rolling Mill Company* ARMCO), y producido en Alemania por primera vez en 1927, el hierro puro ARMCO, con su historia de más de un siglo, es aún un producto importante debido a las posibilidades flexibles de aplicación.

El hierro puro tiene un número de formas alotrópicas, donde la estabilidad de cada una de estas formas varía en función de la temperatura, presión, campos magnéticos y tamaño. Puede tener muchas estructuras cristalinas, incluyendo cúbica centrada en el cuerpo, cúbica centrada en las caras, hexagonal compacta, tetragonal centrada en las caras, trigonal y, posiblemente, doble hexagonal compacta. Esta última forma se cree que existe en el núcleo de la tierra donde las extremas temperaturas y presiones crean las condiciones apropiadas para esta forma de otra manera inestable. Es un producto único para el acero con un contenido de Fe mín. del 99.85%, sin aditivos de aleaciones. Las impurezas naturales ya están eliminadas en su gran mayoría [12].

El hierro puede llegar a tomar distintas soluciones con gran número de otros elementos atómicos, obteniéndose reacciones y transformaciones de fase que pueden ser inducidas con la aleación apropiada. Puede ser económico cuando se fabrica en grandes cantidades, además se usa en gran medida como material base para fundir aceros poco carbonatados, resistentes al oxido y a ácidos.

El hierro ARMCO posee un campo variado de aplicaciones como lo es en la construcción de automóviles, pantallas magnéticas, fabricación de imanes (bornes, inducidos, núcleos polares), industrias químicas y petroquímicas, construcción de plantas eléctricas, entre otras.

### **3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA CGP**

El diseño de los troqueles y aditamentos necesarios para llevar a cabo el proceso de SPD, se realizó tomando como base los diferentes avances y propuestas alrededor del método CGP. A continuación, se enumeran las diferentes partes que componen el sistema, su función y cómo fueron construidas.

#### **3.1 TROQUELES**

Son el componente principal del sistema, su función es la de doblar el material en el caso de los corrugados, y la de aplanarlo en el caso de los planos. El diseño de éstos fue fiel al concepto principal del método CGP, en el cual el material debe estar confinado siempre y en el que las dimensiones de los dientes del troquel corrugado, dependen del espesor del material a procesar. Los planos de los troqueles corrugados superior e inferior se presentan en el Anexo A y Anexo B, respectivamente; y los planos de los troqueles planos superior e inferior se muestran en el Anexo C y D, respectivamente.

Para la elaboración de los troqueles se escogió como material un acero de herramienta para trabajo en frío, entre los que se eligió al XW41 (AISI D2) como el acero más idóneo para cumplir con las exigencias del proceso, debido a su alto contenido de cromo, alta resistencia al desgaste abrasivo y a la compresión. Se adquirió un bloque de dimensiones 108 mm × 108 mm × 45 mm, con el cual se obtuvieron ambos juegos de troqueles (corrugados y planos).

El bloque de acero se rectificó en un centro de mecanizado vertical CNC como el mostrado en la Figura 3, hasta obtenerse las dimensiones deseadas, éstas fueron 105 mm × 96 mm × 43.5 mm. Después de esto, el acero se sometió a un tratamiento térmico (ver Figura 6) con el fin de potenciar sus propiedades mecánicas y su rendimiento a lo largo del proceso, para esto se hizo uso de un horno de mufla igual al mostrado en la Figura 4, y se protegió la pieza con arena contra la descarburación y oxidación; para la inmersión de la pieza en arena, se hizo necesaria la construcción de una caja en acero A36 con la mostrada en la Figura 5 que cumpliera con la función de contener la arena y la pieza.



**Figura 3.** Centro de mecanizado vertical CNC, modelo V-40, marca Leadwell.



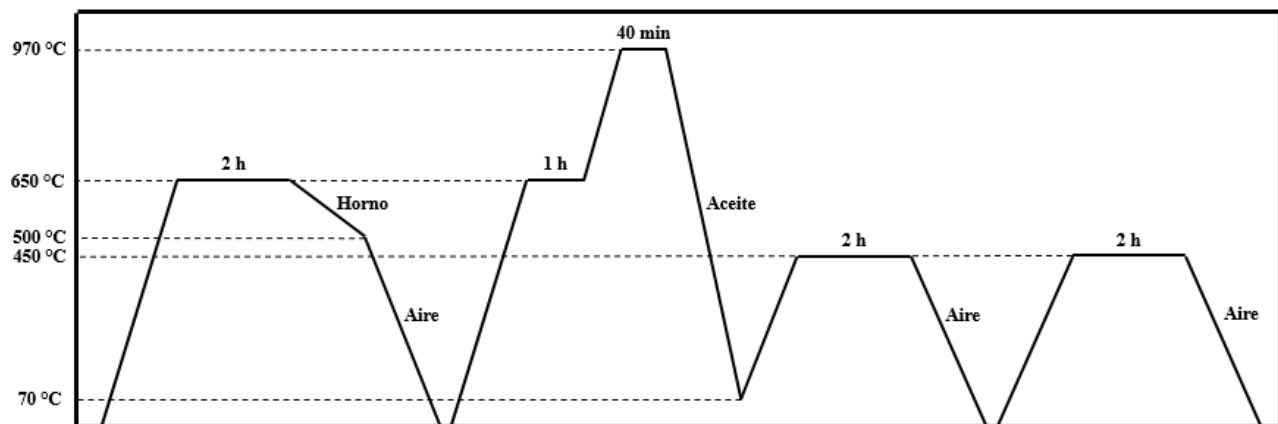
**Figura 4.** Horno de mufla, modelo E-S, marca Terrígeno.



**Figura 5.** Caja de acero A36.

El acero se sometió inicialmente a un proceso de eliminación de tensiones, dentro del cual el material se calentó en toda su masa hasta 650 °C, se mantuvo a esta temperatura durante 2 horas, después se dejó enfriar lentamente dentro del horno hasta 500 °C y finalmente se enfrió libremente al aire hasta alcanzar la temperatura ambiente.

Después del proceso de eliminación de tensiones, se realizó el temple del acero, para esto se precalentó la pieza a 650 °C durante 1 hora y posteriormente se austenizó a 970 °C durante 40 minutos. La pieza fue enfriada en aceite sólo hasta una temperatura de 70 °C, ya que, en este punto el acero debió ser revenido inmediatamente durante 2 horas a 450 °C, finalmente se dejó enfriar al aire.

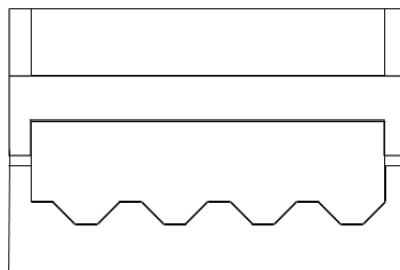


**Figura 6.** Diagrama TTT del tratamiento térmico completo realizado al acero XW41.

La pieza ya templada fue cortada por el método de electroerosión con hilo a través de la máquina mostrada en la Figura 7, y siguiendo el esquema mostrado en la Figura 8, de donde se obtuvieron el juego de troqueles planos y corrugados del bloque de acero de herramienta. Debido a recomendaciones del fabricante, el acero se sometió a un revenido adicional después de ser cortado con hilo, en el cual se calentó durante 2 horas a una temperatura de 450 °C y posteriormente se enfrió al aire, tal como se muestra en la Figura 6.



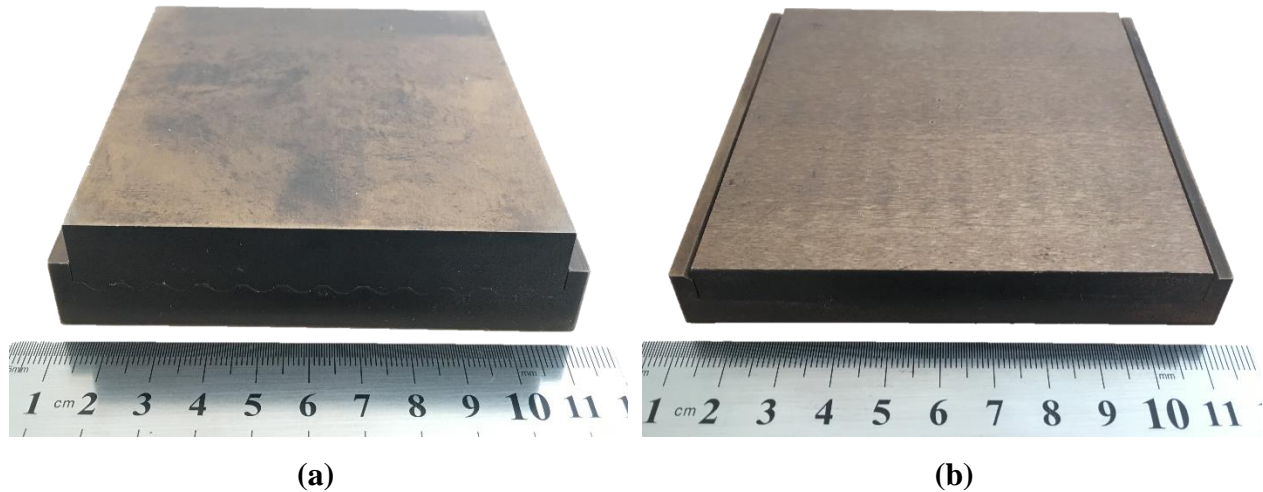
**Figura 7.** Máquina electroerosionadora de corte por hilo, modelo FW 1U, marca GF.



**Figura 8.** Esquema del corte por hilo al que fue sometido el acero XW41.

Finalmente, en la Figura 9 se muestran los troqueles corrugados y planos obtenidos después de todo el proceso descrito.





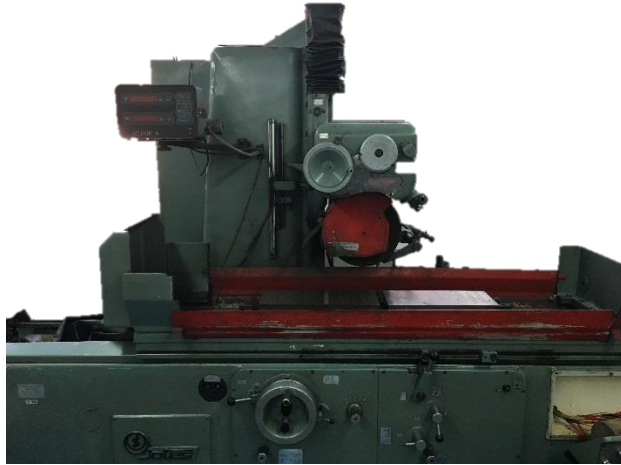
**Figura 9.** Juegos de troqueles obtenidos, (a) corrugados y (b) planos.

### 3.2 BASES

Son las encargadas de portar y sostener los juegos de troqueles, además de transmitir a los troqueles la carga aplicada por la prensa y estar sometidas a su vez al contacto directo con el pistón de la máquina. La base inferior sostiene a los troqueles corrugado y plano, inferiores, y la base superior hace lo mismo con los troqueles superiores. Los planos de la base superior e inferior se presentan en el Anexo E y Anexo F, respectivamente.

La base inferior porta a los troqueles inferiores y además de esto, sostiene las columnas guía del sistema; la base superior hace lo mismo con los troqueles superiores y también posee agujeros con bujes, por los cuales se deslizan las columnas guías.

Las bases se construyeron en acero estructural, para esto se obtuvieron 2 planchas de acero A36 con dimensiones 220 mm × 160 mm ×  $\frac{3}{4}$  in. Éstas planchas primero se rectificaron en una rectificadora planeadora como la que se muestra en la Figura 10a, y después se mecanizaron en un centro de mecanizado (Figura 10b) siguiendo el diseño previo. En la Figura 11 se presentan las bases finalmente obtenidas.

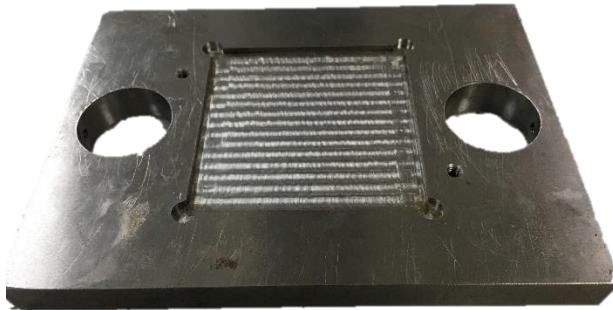


(a)



(b)

**Figura 10.** Máquinas con las que se mecanizaron las bases. (a) Rectificadora planeadora y (b) centro de mecanizado CNC, modelo XHS7145, marca HNC.



(a)



(b)

**Figura 11.** Bases del sistema, (a) base superior e (b) inferior.

### 3.3 BRIDAS

Se les llamaron así a los elementos del sistema encargados de sujetar los troqueles a su respectiva base, ya que, permiten montar y desmontar los troqueles de las bases fácilmente. Son unas placas rectangulares alargadas, que se insertan en los agujeros que poseen los troqueles con el fin de sujetarlos a su base. Los planos de las bridas son presentados en el Anexo G.

Para su construcción se obtuvo una plancha de acero A36 con dimensiones  $90 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times \frac{1}{4} \text{ in}$ , la cual se mecanizó en un torno CNC de acuerdo a su diseño. La Figura 12 muestra a la brida finalmente obtenida.



**Figura 12.** Brida del sistema CGP.

### **3.4 COLUMNAS GUÍA**

Son las encargadas de conducir y garantizar el movimiento sobre el eje Z, de la base superior y por ende del troquel superior. Deben asegurar que los troqueles siempre encajen en el mismo lugar. Los planos de éstas son presentados en el Anexo H.

Fueron construidas en barra cromada para cilindros hidráulicos, ésta barra es de acero AISI 1045 y viene recubierta de cromo duro. Para la elaboración de las columnas guía, se adquirió una barra de 1 in de diámetro y una longitud de 300 mm, la cual fue mecanizada en un torno CNC y se obtuvieron las columnas mostradas en la Figura 13.



**Figura 13.** Columna guía del sistema CGP.

### **3.5 BUJES**

Su función es la de permitir y facilitar el deslizamiento de la base superior a través de las columnas guía. Son unos cilindros huecos que encajan en los agujeros de la base superior y sostienen a ésta a través de tornillos prisioneros, además garantizan el deslizamiento de las columnas guía a través de ellos. Los planos de los bujes se muestran en el Anexo I.

El material escogido para la elaboración de los bujes fue el bronce SAE 65, del cual se adquirió una barra de dimensiones  $1 \frac{3}{4}$  in de diámetro con 40 mm de longitud. El material se mecanizó con ayuda de un torno CNC y se obtuvo el resultado mostrado en la Figura 14.



**Figura 14.** Bujes del sistema CGP.

## 4. SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

Con el fin de conocer la distribución de las deformaciones durante el proceso CGP, se llevó a cabo la simulación de la primera pasada en éste método a una placa de hierro ARMCO. Dicha simulación se hizo con los parámetros antes definidos, espesor de lámina y dimensiones del troquel de 2 mm y un ángulo de 45°. Se comenzó simulando el primer ciclo (que corresponde al primer troquelado) y se controlaban en éste variables como el tiempo de troquelado y el tamaño de malla, hasta encontrarse el punto óptimo en la simulación y continuar así con los siguientes ciclos. Finalmente se simuló una pasada totalmente y se obtuvieron de ésta los resultados correspondientes a la deformación plástica equivalente de Von Mises.

Para conocer la influencia de la geometría del troquel en la deformación del material, se realizaron dos simulaciones más de sólo el primer ciclo de la pasada, en donde se varió la longitud de los dientes del troquel con valores de 1 mm y 4 mm, dejándose fijo el ángulo de 45°. También se hicieron dos simulaciones variando el ángulo de los dientes y dejando fijo el ancho y alto de éstos; los ángulos que se simularon fueron 30° y 60°. De las anteriores simulaciones, también se obtuvieron los valores de la deformación plástica equivalente de Von Mises.

Para llevar a cabo estas simulaciones se utilizó el software computacional Ansys Workbench, el cual trabaja bajo la teoría de elementos finitos para sólidos estructurales. La simulación se llevó a cabo a través de un sistema de análisis en Dinámica Explícita (*Explicit Dynamics*) y se consideró bajo la condición de deformación plana en 2D, ya que, las deformaciones a lo largo de la sección transversal son insignificantes.

### 4.1 MODELOS DE LOS MATERIALES

Los troqueles corrugados y planos, fueron simulados como acero estructural cuyas propiedades se muestran en la Tabla 1, además se consideraron como cuerpos flexibles, ya que, sus deformaciones son prácticamente despreciables.

Densidad [kg/mm <sup>3</sup> ]	7.85E-06
Módulo de Young [MPa]	2E+05
Coefficiente de Poisson	0.3
Módulo de Bulk [MPa]	1.6667E+05
Módulo de cizalladura [MPa]	76923
Límite de elasticidad [MPa]	250

**Tabla 1.** Propiedades mecánicas del acero estructural usado en la simulación.

La lámina que fue objeto de estudio se simuló como hierro ARMCO y sus propiedades fueron tomadas de la información suministrada por el fabricante [12], estas propiedades se presentan en la Tabla 2. El coeficiente de Poisson se asumió igual al del acero estructural (0.3). Ésta lámina se consideró como un cuerpo flexible y se permitieron en él grandes deflexiones.

Densidad [kg/mm <sup>3</sup> ]	7.86E-06
Módulo de Young [MPa]	2.07E+05
Coefficiente de Poisson	0.3
Módulo de Bulk [MPa]	1.725E+05
Módulo de cizalladura [MPa]	79615
Límite de elasticidad [MPa]	186
Módulo tangente [MPa]	446

**Tabla 2.** Propiedades mecánicas del hierro ARMCO usado en la simulación.

## 4.2 MALLADO POR ELEMENTOS FINITOS

La lámina de hierro ARMCO se modeló con cuadriláteros planos bilineales de cuatro nodos, los cuales se definieron con un tamaño de malla fijo igual a 0.1 mm. El número de elementos que conformaron el modelo fue de 3319, éstos fueron suficientes para obtener resultados consistentes y coherentes.

Los troqueles corrugados y planos se modelaron con una malla de relevancia media, donde la longitud máxima de sus elementos fue de 0.40745 mm.

### **4.3 CONDICIONES DE CONTACTO**

Los contactos entre todas las superficies involucradas en las simulaciones se consideraron sin fricción, ya que, en la práctica la lubricación reduciría la fricción al mínimo, tanto así que se puede considerar despreciable. A demás al simularse sin fricción se requiere menos carga computacional y por ende se reduce el tiempo de cómputo.

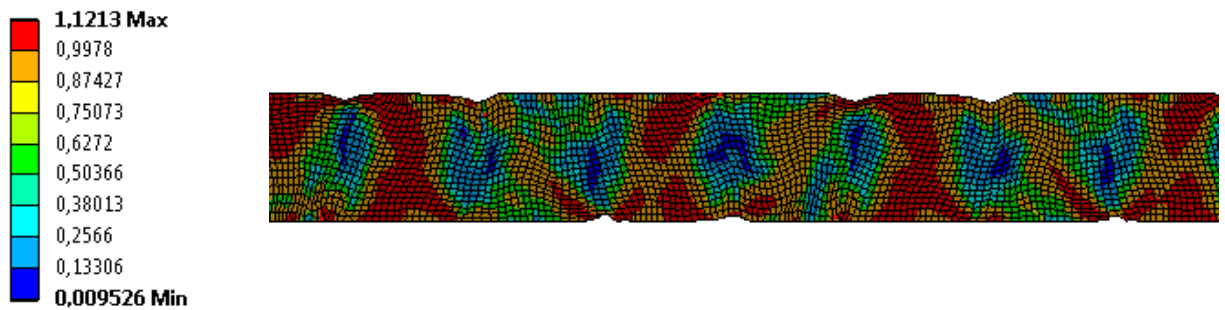
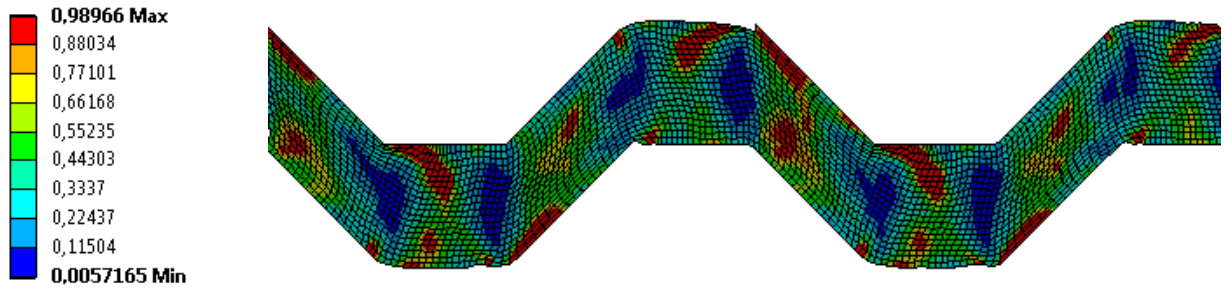
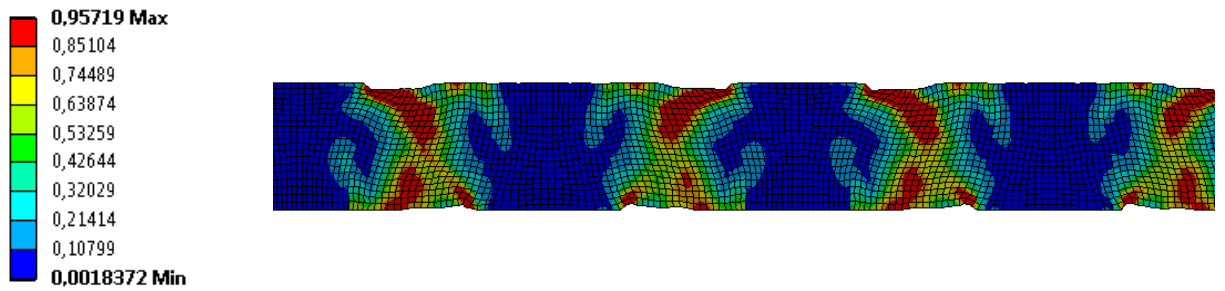
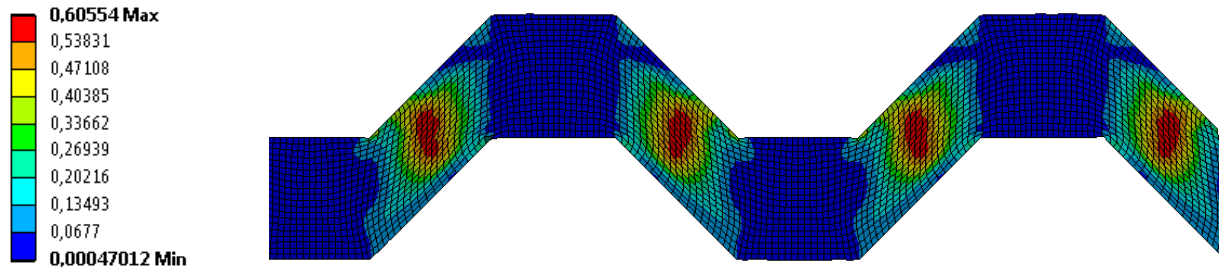
## **5. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos para cada una de las simulaciones realizadas, se hará un análisis y estudio de lo observado en base al objetivo de cada una de éstas, y se realizarán comparaciones con investigaciones realizadas previamente alrededor de este tema con el fin de revisar similitudes o discrepancias con las mismas y entender el por qué.

### **5.1 PRIMERA PASADA EN EL MÉTODO CGP**

Se realizó la simulación de la primera pasada en el método CGP a una lámina hierro ARMCO, los cuatro ciclos típicos fueron incluidos como un todo dentro de la misma simulación. Después de cada uno de los cuatro ciclos, se obtuvieron los resultados de las deformaciones equivalentes de Von Mises, para así analizar las variaciones en éstas conforme avanzan los ciclos. Los resultados de la deformación plástica equivalente de Von Mises para la primera pasada del hierro ARMCO a través del método CGP se muestran en la Figura 15.





**Figura 15.** Deformación plástica equivalente de Von Mises para la primera pasada del hierro ARMCO en el método CGP. (a) Primer ciclo, (b) segundo ciclo, (c) tercer ciclo y (d) cuarto ciclo.

En la Figura 15a se aprecian los resultados obtenidos para la deformación plástica equivalente de Von Mises para el primer ciclo de la primera pasada del hierro ARMCO en el método CGP, éste ciclo corresponde al primer doblez realizado a la lámina con los troqueles corrugados. Fácilmente se puede observar que las deformaciones son simétricas y presentan un patrón de comportamiento muy marcado a lo largo de la lámina, es decir, que las deformaciones y las regiones donde éstas aparecen, se repiten con uniformidad en la lámina.

Conforme a lo que se esperaba, las zonas que no están sujetas a deformación por cizalla, presentan resultados de prácticamente 0 en las deformaciones plásticas equivalentes de Von Mises y las zonas cizalladas muestran en su pico máximo, deformaciones plásticas equivalentes de Von Mises de aproximadamente 0.6.

Los valores máximos se alcanzaron justo en el centro las regiones deformadas, éstos se aprecian como una especie de zonas circulares alargadas hacia arriba. Los valores de deformación decrecen gradualmente hacia afuera de la zona más deformada, varían desde 0.6 hasta 0.2 aproximadamente. Las zonas de interface son bien marcadas y consistentes a lo largo de la lámina, éstas zonas corresponden al límite donde se dividen las zonas deformadas de las indeformadas.

La diferencia entre el valor obtenido en la simulación (0.6) y el valor teórico para el primer ciclo (0.58), fue considerablemente pequeña; el error de éste valor es de 3.45 %. Teóricamente el valor de deformación de 0.58 debía ser alcanzado en toda la sección deformada, pero se encontró que esto no fue así y que el valor más cercano a éste valor sólo se obtuvo en una zona muy pequeña en el centro de la región sometida a deformación, las demás partes de la sección deformada son conformadas por el desvanecimiento paulatino de las deformaciones plásticas equivalentes de Von Mises desde 0.6 hasta 0.2.

Comparando el valor obtenido en este primer ciclo con los encontrados en investigaciones similares [13], se encontró que el valor del presente estudio fue el más cercano al valor teórico. El valor encontrado en [13] fue de 0.86, éste fue algo superior al encontrado en esta investigación y obviamente al teórico.

En la Figura 15b se puede observar el segundo ciclo de la primera pasada en el método CGP del hierro ARMCO, éste segundo ciclo corresponde a la primera aplanada de la lámina. En general, se observa repetitividad en las deformaciones y en su distribución a lo largo de la lámina aplanada.

Las zonas que han estado sujetas a deformación y aplanado muestran valores máximos de deformación de 0.96, y las zonas indeformadas se mantienen prácticamente invariables con valores de casi 0. Los valores máximos están presentes en las zonas esperadas, las que han sido dobladas y aplanadas; a pesar de ser uniformes en la lámina, su forma y distribución dentro de la zona es bastante irregular, mostrándose como regiones alargadas que se extienden desde el centro hacia la parte superior e inferior de la superficie de la lámina. El resto de la zona deformada, está compuesta por deformaciones menores que van desde 0.85 hasta 0.2 y se termina con la transición hacia las zonas indeformadas.

Se observa nuevamente, que las máximas deformaciones plásticas equivalentes de Von Mises no son alcanzadas en toda la zona deformada, sino sólo en pequeñas regiones de ésta, presentando distribuciones y formas, irregulares y aleatorias. El resto de la zona se compone de deformaciones de menor valor, incluso menores que los obtenidos en el anterior ciclo.

El valor teórico para las zonas deformadas correspondientes a este ciclo es de 1.16, el cual es mayor al obtenido en esta investigación, que es de 0.96 como se mencionó anteriormente. El error del valor encontrado respecto del teórico es de 17.24 %, el cual es mayor que el del anterior ciclo. Ésta discrepancia acompañada de la poca homogeneidad de la deformación máxima dentro las zonas en cuestión, puede deberse a que, dentro de la simulación, las deformaciones plásticas equivalentes de Von Mises no se acumularon como era debido o como se esperaba, sino que más bien se trataron de revertir o simplemente se quedaron invariantes.

Comparando el resultado obtenido en esta investigación con [13], se nota que el valor base en mención es superior al encontrado en las simulaciones de esta investigación. El valor del artículo consultado es de 1.5, que dista considerablemente del 0.96 encontrado en esta investigación y del teórico 1.16.

La Figura 15c muestra los resultados de las deformaciones plásticas equivalentes de Von Mises para el tercer ciclo de la primera pasada en el método CGP del hierro ARMCO, éste ciclo corresponde al segundo dobléz de la lámina con los troqueles corrugados, o el primer dobléz de las zonas que hasta ahora habían permanecido indeformadas.

Las otrora zonas indeformadas ahora presentan deformaciones de entre 0.77 y 0.44, distribuidas en toda la zona deformada sin un patrón ni uniformidad tan clara. Se observan también dentro de las zonas ahora deformadas, pequeñas regiones con deformaciones aproximadamente de hasta 0.99, las cuales teóricamente no deberían aparecer en estas zonas durante su primera deformación.

Cabe destacar que en las interfaces entre las zonas deformadas y las no deformadas se presentan valores de deformación plástica equivalente de Von Mises de casi 0. También es particular que las deformaciones plásticas equivalentes de Von Mises de las zonas no deformadas en este ciclo, aumentaron levemente en algunas de sus regiones, pero otras disminuyeron también, comparadas con los resultados que habían sido obtenidos en el ciclo anterior.

Teóricamente para la el tercer ciclo o primera deformación de las zonas indeformadas, el valor de la deformación plástica equivalente de Von Mises como es sabido, es de 0.58, el cual es menor que el máximo obtenido para este ciclo, que es de 0.77. El error del obtenido con respecto al teórico es de 32.76 %.

Se observa fácilmente que el valor de deformación obtenida en este ciclo es mayor a la obtenida en el primer ciclo, valores que se supone deberían ser similares, por corresponder a la primera deformación de una zona que hasta el momento era indeformada. Esto es muestra de que a medida que aumentan los ciclos, las deformaciones de ciclos pasados van afectando a las deformaciones de nuevos ciclos, aunque sea muy levemente.

Si se hace referencia a [13] y [14], se encuentra que obtuvieron valores aproximadamente de 1 y 0.8 respectivamente, valores mayores al encontrado en esta investigación y al teórico. Se observa que en dichas investigaciones el valor de deformación también aumentó con respecto a sus anteriores ciclos.

La Figura 15d muestra los resultados de las deformaciones plásticas equivalentes de Von Mises para el cuarto ciclo de la primera pasada en el método CGP del hierro ARMCO, éste ciclo es el correspondiente al segundo aplanado de la lámina. Se observa que la homogeneidad y distribución de las deformaciones a lo largo de la lámina aplanada es poco consistente y bastante particular.

Las regiones que presentan el valor máximo de deformación plástica equivalente de Von Mises, aparecen con deformaciones de 1.12 en forma de región alargada que se extiende desde el centro de la zona hasta las superficies superior e inferior de la lámina. En medio de las zonas con mayor deformación, aparecen zonas con una deformación plástica equivalente de Von Mises de aproximadamente 1.

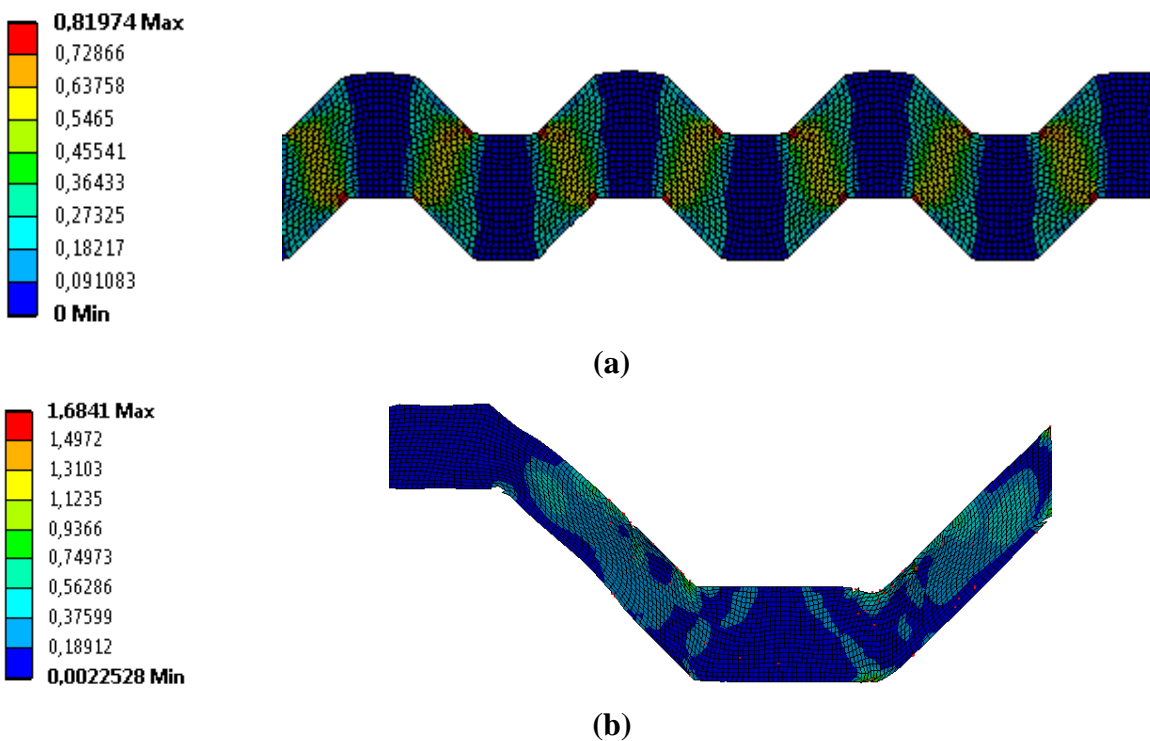
Es interesante ver que las zonas que habían sido deformadas en el ciclo anterior y ahora aplanadas, son las que presenten menor deformación plástica equivalente, que las zonas que permanecieron planas sean las que aumentaron su valor de deformación además decreció su distribución sobre las zonas.

El valor teórico de la deformación plástica equivalente de Von Mises para todas las zonas de este último ciclo se espera sea de 1.16, lo cual no fue así según los resultados obtenidos en la simulación correspondiente a esta investigación. Las zonas con máximo valor de deformación presentaron valores de 1.12 como ya se mencionó, valor que presenta un error 3.45 % respecto del teórico; y las zonas de menor deformación, que son las que muestran valores iguales a 1, presentan un error de 13.8 %. A pesar de la poca homogeneidad en los resultados de las deformaciones y en la distribución de éstas en la lámina, los valores fueron muy cercanos a los teóricos esperados al final de la primera pasada.

A lo largo de todos los ciclos de la primera pasada, se notó que las zonas de interface permanecían prácticamente invariables con deformaciones plásticas equivalentes de casi 0; además de que afectaban en cierto modo los valores de deformación de las zonas adyacentes a ellas. Al recibir valores tan pequeños de deformación éstas zonas de interface, generan esas variaciones y falta de homogeneidad en los resultados de las deformaciones después de cada ciclo [13].

## 5.2 VARIACIÓN DE LA LONGITUD DEL DIENTE

Con el objetivo de conocer la influencia y afectación de la geometría de los troqueles en la generación de deformación en la lámina de hierro ARMCO, se realizaron dos simulaciones en donde se varió la longitud del diente del troquel. Se realizó una simulación con un valor menor al ya establecido (2 mm) y con una mayor; se simuló la deformación de la lámina con dientes de 1 mm y también con dientes de 4 mm, dejándose fijo el ángulo de  $45^\circ$ . Con lo anterior se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 16.



**Figura 16.** Deformación plástica equivalente de Von Mises para diferentes longitudes de diente. (a) 1 mm y (b) 4 mm.

En la Figura 16a se observan los resultados de la deformación plástica equivalente de Von Mises para el troquel con diente de 1 mm. Se observa gran uniformidad en los valores de deformación y en su distribución entre las zonas deformadas. El máximo valor de deformación se alcanzó en el centro de las zonas cizalladas y estuvo alrededor de 0.64; las regiones donde se muestra éste valor aparecen como elipses que van de una esquina a otra, atravesando el plano inclinado de la deformación.

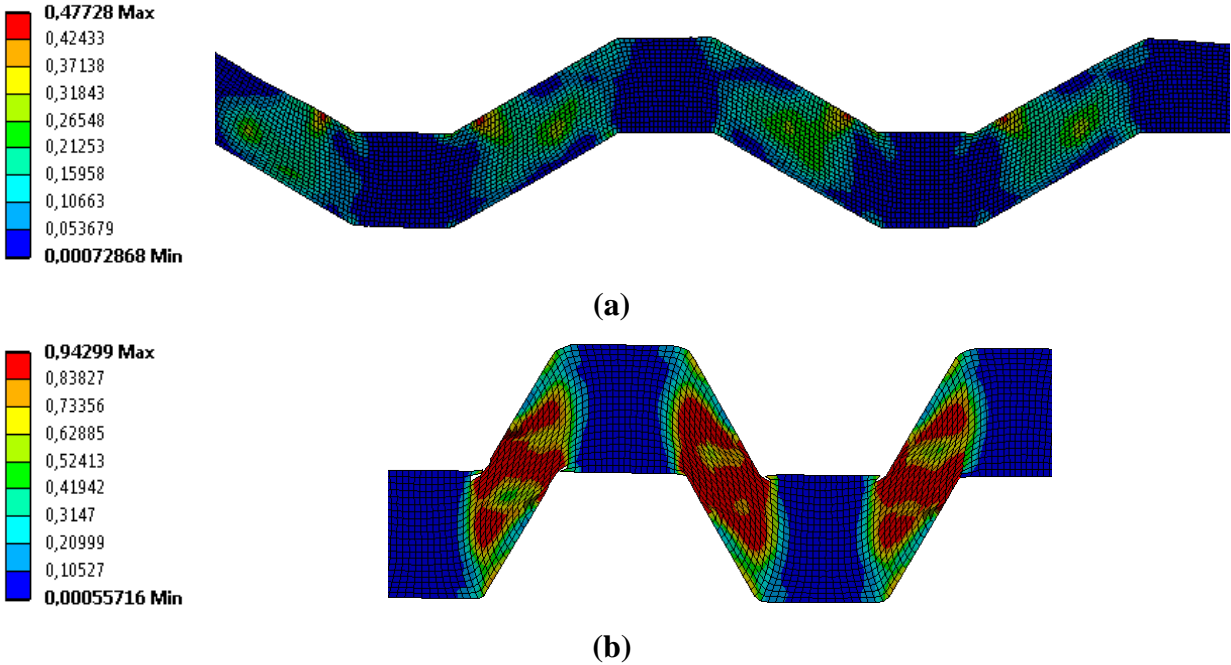
Alrededor de las regiones de mayor valor, se encuentra una región de valor 0.45. El resto de la zona de deformación es conformado por regiones con valor de deformación de 0.27, las cuales permiten diferenciar muy bien las zonas planas de las deformadas, es decir, se demarca bien su interface. En los puntos donde la lámina estuvo en contacto con las esquinas de los dientes de los troqueles, se crearon unas concentraciones de deformación plástica equivalente de hasta 0.82.

En la Figura 16b en donde se incrementó la longitud del diente a 4 mm, con dicho incremento se puede observar que en las zonas del plano inclinado no existe uniformidad en cuanto a la deformación equivalente, pero cabe denotar que hubo una disminución considerable en la deformación con respecto a los resultados de la simulación con longitud de diente igual a 1 mm, sin embargo se aprecia que las máximas deformaciones se establecieron en las esquinas del diente (0,75) y no en las zonas centrales de los planos inclinados del diente (0,5).

El valor de la deformación en las zonas de cizalladura corresponde a un valor próximo de 0.64 para la longitud de 1 mm, lo que indica que es un valor mayor al obtenido en la simulación de la longitud base de 2mm, además sobrepasando el valor de la deformación para la longitud de 4mm que corresponde aproximadamente a 0.5.

### **5.3 VARIACIÓN DEL ÁNGULO DEL DIENTE**

Para conocer el efecto del ángulo del diente de los troqueles en la generación de deformación en la lámina de hierro ARMCO, se llevaron a cabo dos simulaciones en las cuales se varió el ángulo del diente del troquel. Se simuló la deformación de la lámina con dientes de ángulo 30° y 60°. Con lo anterior se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 17.



**Figura 17.** Deformación plástica equivalente de Von Mises para diferentes ángulos del diente. (a) 30° y (b) 60°.

Un comportamiento particular en la técnica CGP se observa en la Figura 17a, en donde se realizan variaciones en los ángulos de 30°, 45° y 60°, en cuanto al ancho del diente se consideró pertinente un valor de 2 mm, para garantizar una deformación razonable. En una investigación revisada [4], se estableció numéricamente que el ángulo crítico del diente de la matriz troquelada correspondía a 50.8°, además cuando se variaba el ángulo se encontraban diferencias en las deformaciones equivalentes.

Los efectos del ángulo en la Figura 17a permiten establecer que las zonas planas inclinadas poseen una distribución uniforme en las deformaciones, en las región central del plano inclinado se dio una deformación próxima a 0.3, no obstante, se concentran unos puntos de máxima deformación junto a la zona de interface entre la región plana e inclinada del diente cercano a 0.5, la deformación guarda asimetría en las zonas de cizallamiento, es decir, no toda la región fue deformada creándose pequeñas zonas en las que no hubo ningún tipo de deformación al igual que el comportamiento de las zonas planas.



Con respecto al ángulo de  $45^\circ$  tomando como base la Figura 17b con ancho del diente de 2mm, se puede establecer que la probeta en dicha prueba tuvo mayores deformaciones, la distribución de las deformaciones sigue siendo uniforme, pero existe una concentración particular de la máxima deformación en la zona central del plano inclinado que fue sometido a cizalladura, alrededor del punto de deformación máxima se disgrega la deformación hasta aproximadamente 0.2 en la zona contigua a la interface entre planos.

En la Figura 17b se indican la deformación equivalente para un ángulo de  $60^\circ$ , cabe destacar que la distribución y concentración de deformación es más marcada que en las anteriores simulaciones, por otro lado, se encontró que al someter la lámina de hierro ARMCO a la matriz de troqueles de  $60^\circ$ , las dimensiones de la probeta en las zonas sometidas a cizalladura cambian sus parámetros geométricos como espesor y longitud, incluso los picos de los dientes toman forma de redondeo, pese a los cambios geométricos que toma la lámina de hierro, ésta alcanzó valores mayores en la zona central de la región plana que en las pruebas de los ángulos de  $30^\circ$  y  $45^\circ$  de alrededor de 0.9, asimismo las zonas de interface entre los planos inclinado y plano obtuvo valores de aproximadamente 0.6

Teóricamente para la primera deformación de las zonas que no están sujetas a cizalladura para el ángulo de  $45^\circ$ , el valor de la deformación plástica equivalente de Von Mises como es sabido, es de 0.58 [15], el cual es menor que el máximo obtenido para este ciclo, que es de 0.6.

El error obtenido con respecto al teórico es 3.45 %, se considera que dicho error establece un margen de error mínimo. De igual manera y haciendo uso de la ecuación de la deformación efectiva (3), se obtienen los valores teóricos esperados para los ángulos de  $30^\circ$  y  $60^\circ$  que dan como resultado 0.33 y 1 respectivamente. El valor de deformación máxima equivalente en la simulación para el ángulo de  $30^\circ$  corresponde aproximadamente a 0.3 en la zona central del plano inclinado, lo que indica que el error es 9%, valor no muy alejado del margen teórico, En cuanto al ángulo de  $60^\circ$  corresponde a una deformación máxima de 0.94 comparándola con el valor que se espera teórico de 1, resulta un error del 6% por lo que se demuestra que dichos valores porcentuales son congruentes con respecto a los valores esperados teóricamente y no poseen un gran margen de discrepancia.

Se notó que las zonas de interface permanecían prácticamente invariables con deformaciones plásticas equivalentes de casi 0; además de que afectaban en cierto modo los valores de deformación de las zonas adyacentes a ellas. Al recibir valores tan pequeños de deformación éstas zonas de interface, generan esas variaciones y falta de homogeneidad en los resultados de las deformaciones después de cada ciclo [13].

## 6. CONCLUSIONES, APORTES Y RECOMENDACIONES

Se diseñaron y construyeron satisfactoriamente los troqueles y aditamentos necesarios para llevar a cabo el proceso CGP. Para esto, fueron tenidos en cuenta aspectos tales como conceptos fundamentales alrededor del método, las propiedades mecánicas del material que será prensado, limitaciones físicas a las que se está supeditado, entre otras. Dichos elementos podrán ser utilizados para procesar las láminas de hierro ARMCO en futuras investigaciones.

El análisis por elementos finitos es una herramienta válida a la hora de simular y modelar el proceso CGP y la respuesta del hierro ARMCO al ser sometido a éste. Los resultados obtenidos con éste método son satisfactorios y coherentes, comparados con la teoría e investigaciones alrededor del tema.

Se realizó el análisis por elementos finitos de la primera pasada a través del método CGP a una lámina de hierro ARMCO. Se encontró que después del primer ciclo, los valores de deformación comienzan a variar significativamente entre ciclos, esto se debe en gran medida a la influencia de las zonas de interface sobre las demás zonas. En términos generales, se obtuvieron valores cercanos a los teóricos, pese a la heterogeneidad en la distribución de éstos a lo largo la lámina de material.

La influencia de las variaciones de los parámetros geométricos, influenciaron los resultados de las simulaciones obtenidas mediante el software Ansys Workbench. Se encontró que, al aumentar la longitud del diente del troquel, se disminuyó la deformación plástica equivalente de Von Mises; asimismo se observó un adelgazamiento paulatino del espesor de la probeta en las zonas inclinadas. La deformación máxima se obtuvo en la longitud de 1 mm, sin embargo, la mejor distribución de las deformaciones se obtuvo en el ancho de 2 mm.

Con respecto a la variación en los ángulos, se acrecentó la deformación en las zonas inclinadas del diente a medida que éste aumentaba; sin embargo, en el ángulo de  $60^\circ$ , se encontró que las zonas donde la lámina estaba en contacto con las aristas del diente, sufrieron un redondeo durante el troquelado. También se determinó un aumento en la deformación en las zonas centrales de la región

inclinada y un fenómeno en el cual la hoja experimenta distintos adelgazamientos, especialmente en las zonas sometidas a cizalladura.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] VERLINDEN, Bert. Severe plastic deformation of metals. *Metalurgija*, 2005, vol. 11, no 3, p. 165-182.
- [2] RODRÍGUEZ BARACALDO, Rodolfo, et al. Procesos de severa deformación plástica para obtener materiales de grano nanométricos y ultrafinos. *Ingeniería e Investigación*, 2007, vol. 27, no 1, p. 101-105.
- [3] SHIN, Dong Hyuk, et al. Constrained groove pressing and its application to grain refinement of aluminum. *Materials Science and Engineering: A*, 2002, vol. 328, no 1, p. 98-103.
- [4] WANG, Zong-Shen, et al. Influences of die structure on constrained groove pressing of commercially pure Ni sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 215, p. 205-218.
- [5] KHODABAKHSHI, F.; KAZEMINEZHAD, M. The effect of constrained groove pressing on grain size, dislocation density and electrical resistivity of low carbon steel. *Materials & Design*, 2011, vol. 32, no 6, p. 3280-3286.
- [6] HUANG, Jianyu, et al. Development of repetitive corrugation and straightening. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 371, no 1, p. 35-39.
- [7] BORHANI, M.; DJAVANROODI, F. Rubber pad-constrained groove pressing process: Experimental and finite element investigation. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, vol. 546, p. 1-7.
- [8] SAJADI, A.; EBRAHIMI, M.; DJAVANROODI, F. Experimental and numerical investigation of Al properties fabricated by CGP process. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, vol. 552, p. 97-103.

- [9] PENG, Kaiping, et al. Microstructure dependence of a Cu–38Zn alloy on processing conditions of constrained groove pressing. *Acta Materialia*, 2009, vol. 57, no 18, p. 5543-5553.
- [10] EBRAHIMI, M., et al. Wear properties of brass samples subjected to constrained groove pressing process. *Materials & Design*, 2014, vol. 63, p. 531-537.
- [11] KUMAR, SS Satheesh; RAGHU, T. Structural and mechanical behaviour of severe plastically deformed high purity aluminium sheets processed by constrained groove pressing technique. *Materials & Design*, 2014, vol. 57, p. 114-120.
- [12] AK Steel International (2015): *ARMCO pure iron, high purity iron*. Product data bulletin, Breda, 22 p.
- [13] YOON, Seung Chae, et al. Severe plastic deformation and strain localization in groove pressing. *Computational Materials Science*, 2008, vol. 43, no 4, p. 641-645.
- [14] HOSSEINI, E.; KAZEMINEZHAD, M. Integration of physically based models into FE analysis: Homogeneity of copper sheets under large plastic deformations. *Computational Materials Science*, 2010, vol. 48, no 1, p. 166-173.
- [15] NIRANJAN, G. Ganesh; CHAKKINGAL, Uday. Deep drawability of commercial purity aluminum sheets processed by groove pressing. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, vol. 210, no 11, p. 1511-1516.