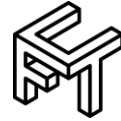




Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas



SIMULACIÓN DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA POR CORRUGACIÓN- ESTIRAMIENTO DEL TITANIO GRADO 2

Tesis Presentada como Requisito Parcial
para la Obtención del Título de
Máster en Ingeniería Asistida por Computadora

Autor: Ing. Erián Cruz González

Tutor: MSc. Bárbaro Luis Peña Rodríguez.

Matanzas, 2019

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD Y NOTA LEGAL

Yo, Erián Cruz González, declaro que soy el único autor de la siguiente tesis, titulada *Simulación de la deformación plástica por corrugación-estiramiento del titanio grado 2* y, en virtud de tal, cedo el derecho de copia de la misma a la Universidad de Matanzas, bajo la licencia *Creative Commons* de tipo *Reconocimiento No Comercial Sin Obra Derivada*, con lo cual se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de la obra y no realice ninguna modificación de ella.

Matanzas, 2 de febrero de 2019.

Erián Cruz González.

DEDICATORIA

... A mi padre por ser ejemplo de sacrificio para lograr las metas que se propone,
A mi madre por ser mi guía y por la inmensa educación que me ha
brindado,
A mi hermano por sentirse orgulloso de mí,
A mi eterno amor por su gran apoyo y comprensión,
A Rojitas por haberlo conocido,
A toda mi familia y a todo el que de alguna forma influyo en la creación del
profesional y hombre que soy ahora.

PENSAMIENTO

... siempre mediremos por encima de todo a un técnico o a un profesional no por su conocimiento sino por el grado de humanidad y modestia con que sea capaz de aportar al género humano esos conocimientos...

Fidel Castro Ruz

RESUMEN

La presente investigación aborda la simulación del comportamiento microestructural por el Método de Elementos Finitos, a través del software DEFORM, de una placa de titanio grado 2 sometida a deformación plástica severa por el procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo, debido a que no existe información referencial sobre el empleo de este material procesado por esta vía con fines biomédicos en placas de osteosíntesis. Tras realizar el análisis por dicho método se obtuvo información con la cual se puede contar para investigaciones posteriores donde se observan cuáles son las zonas donde se logran mejores resultados estructurales, se comprueban las relaciones entre tensiones, deformaciones y microestructuras de estudios anteriores, se analiza el comportamiento del tamaño de los granos, las direcciones cristalográficas, el comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes en el proceso de deformación y las Deformaciones Von Misses producto del proceso de deformación plástica severa.

Palabras claves: Deformación plástica; Corrugado; Estirado; Tensiones; Simulación; Titanio; Microestructura.

ABSTRACT

The present investigation approaches the simulation of the microstructural behavior for the Method of Finite Elements, through the software DEFORM, of a badge of titanium grade 2 subjected to severe plastic deformation for the procedure of Repetitive Corrugation and Straightening, because information referential doesn't exist on the employment of this material processed by this road with biomedical ends in osteosynthesis badges. After carrying out the analysis for this method information it was obtained with which can be for later investigations where they are observed which the areas are where better structural results are achieved, they are proven the relationships among tensions, deformations and microstructure of previous studies, the behavior of the size of the grains is analyzed, as the addresses crystallographic, tangent alternating stress's behavior in the strain process and Von Misses deformation witch is the result of severe plastic deformation.

Key words: Plastic deformation; Corrugation; Straightening; Stress; Simulation; titanium; Microstructure.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	1
Capítulo 1 Estado del Arte	6
1.1 Marco socio económico y medioambiental	6
1.2 Generalidades sobre las miniplacas	7
1.2.1 Breve reseña histórica de la evolución de las miniplacas.	7
1.2.2 Aspectos generales sobre las miniplacas.	9
1.2.3 Aplicaciones de las miniplacas para Osteosíntesis.	9
1.3 Elementos sobre las propiedades mecánicas y la resistencia de materiales.....	11
1.3.1 Modelo del material.	13
1.3.2 Tensión y deformación de ingeniería vs tensión y deformación verdadera. 14	
1.4 Fundamentos teóricos sobre los procedimientos de deformación para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de metales.	15
1.5 Nanoestructura y Teoría de las dislocaciones en materiales metálicos.	17
1.6 Materiales nanoestructurados para el campo de la medicina.....	18
1.6.1 Propiedades físico químicas de la aleación de Ti6Al4V y del Titanio Grado 2.....	20
1.7 Método de Deformación Plástica Severa.....	23
1.7.1 Extrusión en Canal Angular de Sección Constante.	25
1.7.2 Torsión a Alta Presión.	25
1.8 Corrugación y Estiramiento Repetitivo.	27
1.8.1 Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo Continuo y Discontinuo.	28

1.8.2 Casos de Estudio del Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo.....	30
1.8.3 Parámetros que influyen en el Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo.....	34
1.9 Método de Simulación por Elementos Finitos.....	35
1.9.1 Simulación por Elementos Finitos. Potencialidades del <i>Software</i> DEFORM.....	35
1.9.2 Simulación por Elementos Finitos. Aplicaciones en los procedimientos de la Deformación Plástica Severa.	37
1.10 Mecanismos de endurecimiento.....	37
1.10.1 Endurecimiento por reducción del tamaño del grano.	38
1.10.2 Endurecimiento por deformación plástica en frío.....	40
1.11 Conclusiones parciales del capítulo.....	43
Capítulo 2 Materiales y Métodos.....	45
2.1 Elaboración del modelo en AutoCAD y compatibilidad con DEFORM 3D.....	45
2.2 Geometría de la herramienta.....	46
2.3 Propiedades de la aleación Titanio Grado 2.	48
2.4 Comportamiento de los cuerpos.....	49
2.4.1 Demostración en el software DEFORM.....	49
2.4.2 Selección del material en el software DEFORM.....	50
2.5 Condiciones de frontera y de cargas.	51
2.6 Mallado del modelo.	53
2.7 Generación del contacto.....	54

2.8 Proceso de estirado.	56
2.8.1 Herramientas a utilizar.	56
2.8.2 Proceso de remallado de la placa en el proceso de estirado.	57
2.8.3 Generación del contacto en el estiramiento.	58
2.9 Conclusiones parciales del capítulo	58
Capítulo 3 Análisis de los Resultados.....	60
3.1 Selección y medición de los parámetros estudiados.	60
3.2 Comportamiento de las tensiones.	61
3.2.1 Análisis del comportamiento de las tensiones equivalentes (efectivas).	61
3.2.2 Análisis del comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes.	64
3.2.3 Análisis del comportamiento de las tensiones residuales.	66
3.3 Análisis de las deformaciones.....	68
3.3.1 Deformaciones Von Misses.	68
3.3.2 Velocidad de deformación.	71
3.4 Análisis del comportamiento de la microestructura.....	72
3.4.1 Comportamiento del tamaño de grano.	73
3.4.2 Orientación cristalográfica de los granos.....	76
3.4.3 Relación entre las tensiones y la microestructura.	77
3.4.4 Relación entre la deformación y la microestructura.	78
3.5 Conclusiones parciales del capítulo	78
Conclusiones	80
Recomendaciones	81
Referencias Bibliográficas	82

INTRODUCCIÓN

Los materiales nanoestructurados poseen en la actualidad gran aplicación en diferentes campos de la ciencia y la tecnología. Son muy utilizados en las industrias aeroespacial, automovilística, química y médica. Existen numerosos investigadores que estudian la obtención de materiales con estas características y los procedimientos de la deformación plástica severa, para la obtención de materiales con estructuras nanométricas. El interés fundamental en estos materiales está sustentado por las propiedades mecánicas, químicas y térmicas que se logran. La bibliografía especializada (Marulanda *et al.* 2014; Sakai *et al.* 2013), demuestra un mejoramiento de las propiedades hasta tres veces de los obtenidos con estructuras micrométricas.

En la actualidad el titanio es un elemento cuyas propiedades han posibilitado avances impresionantes en la industria aeroespacial y química de nuestros días. Se puede decir que ya es el metal del futuro. Como biomaterial utilizado en las técnicas de osteosíntesis se ha consolidado como de primera elección frente al acero. Su extraordinaria biocompatibilidad y las posibilidades que la biometalurgia ofrece le están abriendo las puertas en numerosos campos de aplicación médica como por ejemplo la Odontología. Las aleaciones de titanio son muy conocidas por los ingenieros pues ofrecen propiedades que no se pueden conseguir por otras vías. Una forma de mejorar aún más estas propiedades es a través de la formación de granos ultrafinos o llegar a obtener materiales nanoestructurados.

Según Quintero (2012) y Peña (2012) la intención crucial del análisis por elementos finitos es recrear matemáticamente el comportamiento de un sistema de ingeniería real, es decir, el análisis debe ser un modelo matemático preciso de un prototipo físico. En un sentido

amplio, este modelo comprende todos los nodos, elementos, propiedades del material, constantes reales, condiciones de frontera y otras características que son usadas para representar el sistema físico. El Método de Elementos Finitos está considerado como una de las herramientas más potentes y probadas para la solución de problemas de ingeniería y ciencia aplicada, es una técnica numérica en la cual las ecuaciones rectoras son representadas de forma matricial y como tales son adecuadas para la solución por computadora digital. Por lo que se puede utilizar para la simulación de procesos de deformación, donde se puede incluir los procedimientos utilizados en la Deformación Plástica Severa.

La Deformación Plástica Severa (DPS) es definida por OTEA AIMME (2009) como un procedimiento de endurecimiento por deformación de los metales mediante la aplicación de presión hidrostática, que genera transformaciones en la estructura cristalina a partir del redireccionamiento del flujo material sin que varíen las dimensiones ni la geometría de la pieza.

El desarrollo de la técnica de DPS se justifica a partir del interés en producir granos ultrafinos (GUF) en los metales. Las transformaciones de la estructura a una escala nanométrica, se realizan con el objetivo de lograr combinaciones beneficiosas de propiedades físicas, químicas y mecánicas (Marulanda *et al.*; 2014).

Debe ser notado que la DPS es un método único para producir el refinamiento del grano en metales que no pasan por la transformación de fase, debido a que el tamaño del grano que es producido durante el proceso depende de las condiciones de deformación (Sakai *et al.* 2013)

Investigadores vanguardistas en el área como Valiev (2002), Zhu (2004) y Askeland (2008) han denominado a materiales policristalinos con tamaño de grano inferior a 1 μm como materiales con grano ultrafino (*ultra-fine grain*, UFG), y esta denominación se subdivide a su vez en materiales submicrométricos (100 a 1 000 nm) y materiales nanométricos (inferiores a 100 nm)

La mejora simultánea es responsable también de la marcada mejora de resistencia a la fatiga y tenacidad a la fractura. Además, se potencian propiedades poco comunes como la posibilidad de presentar comportamiento súper plástico a temperaturas relativamente bajas y altas velocidades de deformación, característica importante si nos referimos a la oportunidad de obtener piezas de forma compleja a una alta velocidad, optimizando procesos de conformado. Esta excepcional combinación de alta resistencia y alta ductilidad fue observada primero en cobre y titanio gracias a los trabajos de Valiev, (2002) y luego extendida a otros metales puros y aleaciones.

La Corrugación y Estiramiento Repetitivo, (RCS) por sus siglas en inglés Repetitive corrugation and straightening, es considerado por Valiev *et al.*; (2006), Siddesha y Shantharaja (2013) como un método novedoso para la obtención de láminas delgadas de material nanoestructurado. Estas laminas obtenías poseen condiciones favorables en cuanto a la homogeneidad, tamaño y a la forma de la estructura. También se expresa por los autores que es un procedimiento en tempranas etapas de desarrollo.

La bibliografía reporta la obtención de Titanio Grado 2 con estructura nanométrica a partir del procedimiento de Extrusión en Canal Angular de Sección Constante, con el fin de lograr mayor resistencia, en su aplicación en tornillos para implantes dentales (Elías *et al.*, 2013),

pero no se reportan estudios de mejoría de las propiedades mecánicas de dicho material u otra variante de titanio por el procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo, ni la simulación del mismo para lograr adecuadas propiedades de la lámina de Titanio a la que se le aplique dicho procedimiento, de ahí que se formule el siguiente **problema científico**: Se desconoce la posibilidad de mejoramiento de las propiedades mecánicas de mini placas de titanio grado 2 a través de la corrugación y el estiramiento repetitivo.

El *software* DEFORM es un sistema ingenieril que se utiliza para el análisis de procesos complejos entre ellos la conformación de metales, tratamiento térmico, mecanizado, troquelado y uniones mecánicas. Se basa en algoritmos de solución con un procedimiento de elementos finitos no lineal y transitorio, con un mallado optimizado y automático. (Aguilera, 2014; Scientific Forming Technologies Corporation, 2011; Martínez, 2011) también agregan que DEFORM puede predecir los resultados del proceso antes de realizar la prueba de taller, reduciendo tanto el tiempo como los costos de desarrollo, basándose en estos planteamiento se formula la siguiente **hipótesis**: Si se simula la Deformación Plástica Severa por el Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo, de láminas de titanio, mediante el Método de Elementos Finitos con el uso del *software* de simulación DEFORM; es posible el mejoramiento de las propiedades mecánicas de dicha lámina.

Para validar o refutar la hipótesis anterior se propone como **objetivo** del presente trabajo: Mejorar las propiedades mecánicas a través de la Deformación Plástica Severa por el Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo, a una lámina de titanio, a partir de la aplicación del Método de Elementos Finitos con el uso del *software* de simulación DEFORM.

Para el cumplimiento del objetivo general se trazaron un grupo de **tareas de investigación**:

1. Revisión bibliográfica del estado actual de la temática.
2. Simulaciones de familiarización con el software DEFORM y estudio de los manuales de usuario.
3. Selección el modelo geométrico de las partes y componentes, y las propiedades mecánicas del material.
4. Aplicación de los parámetros de contacto al modelo y definición el sistema de cargas al que estará sometido el modelo.
5. Establecimiento los criterios para la solución del problema.
6. Simulación del Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo, de la lámina de Titanio Grado 2.

CAPÍTULO 1 ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se exponen los principales aspectos teóricos que se relacionan con el estudio de uno de los procedimientos del Método de Deformación Plástica Severa, la Corrugación y Estiramiento Repetitivo del que se reportan resultados satisfactorios en el mejoramiento de las propiedades mecánicas de materiales metálicos, por la reducción del tamaño del grano hasta escala nanométrica (obtención de materiales nanoestructurados).

1.1 Marco socio económico y medioambiental

La creación de materiales con mejores prestaciones ha constituido una necesidad creciente del desarrollo científico-técnico, en la que se han logrado significativos avances, en dos vertientes principales: creación de nuevos materiales a partir de su combinación (aleaciones) y mejoramiento de sus propiedades a partir de tratamientos químicos, térmicos, mecánicos o la combinación de estos. Dentro de los procesos mecánicos se encuentran los Métodos de Deformación Plástica SPD que han transitado desde la escala de laboratorio hasta la producción comercial de materiales de tamaño de grano ultrafino (Kiuchi, 2005). Se reportan investigaciones de su aplicación en materiales como cobre, aluminio, aleaciones de éstos y aceros martensíticos (Huang, 2001; Kwaśny, 2013; Mirsepasi, 2012; Pandey, 2012; Rajinikanth, 2008; Siddesha, 2013; Thangapandian y Balasivanandha, 2015). El Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo de láminas RCS es una de los más recientes procedimientos y aún en etapa de investigación, de este método (Huang, 2004; Sheikh, 2010).

La investigación de procedimientos de SPD en nuestro país, implica inexorablemente su vinculación a problemáticas del desarrollo socio-económico, según corresponde a la formación ética de un profesional formado en Cuba y preferentemente en problemáticas que impliquen sustitución de importaciones y/o mayor aprovechamiento de los recursos y mejor calidad de los servicios a la población. Con estas direcciones se relaciona la obtención de materiales para la fabricación de fijadores metálicos para el sistema óseo en campos como la Ortopedia y la Ortodoncia, en los que Cuba ha alcanzado logros de reconocimiento internacional. Resultados que pueden ser perfectibles en cuanto a la compatibilidad y durabilidad que se requieren para lograr uniones óseas más eficientes.

El tratamiento mecánico del material para la construcción de fijadores óseos, por el Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo RCS, aumentaría su resistencia mecánica y durabilidad, con la posibilidad de la disminución del espesor del elemento de fijación con las ventajas que le implicaría al paciente y la consiguiente disminución de los gastos en que incurre el país por concepto de importación.

1.2 Generalidades sobre las miniplacas

Las miniplacas son elementos de fijación que se fabrican a partir de láminas metálicas delgadas y que se utilizan en la osteosíntesis, tratamiento quirúrgico de fracturas en el que éstas se reducen y se fijan en forma estable. (Martínez, 2004).

1.2.1 Breve reseña histórica de la evolución de las miniplacas.

El comienzo de la fijación con placas y tornillos para osteosíntesis se remonta a 1886, cuando el alemán Karl Hansmann presenta su experiencia clínica en la que se incluían dos

casos de fracturas mandibulares. Sin embargo no se puede hablar de avance en este campo sin referirse a dos momentos históricos, las dos grandes guerras mundiales, estas fueron el motor impulsor en el desarrollo de técnicas y sistemas de reparación ósea.

En 1949, el belga Robert Danis enuncia el principio de la compresión axial del foco de fractura. Partiendo de esta idea, el grupo suizo ASIF desarrolló diferentes líneas de investigación que dieron sus frutos a principios de los años 60 para su aplicación clínica en el tratamiento de las fracturas de los huesos largos. En 1968, Luhr diseña una placa de compresión axial para la osteosíntesis mandibular. En 1973 Michelet y en 1975 Champy, describen los principios de la osteosíntesis monocortical, no compresiva, para el territorio maxilofacial. Gracias a estos progresos técnicos, y al desarrollo de la biometalurgia, la consecución de buenos resultados clínicos con la mínima morbilidad asociada, comenzaron a ser objetivos alcanzables (Martínez, 2004).

Actualmente las miniplacas, como elementos guías de los huesos en el tratamiento quirúrgico de fracturas, se fabrican a partir de láminas, fundamentalmente de titanio aleado, en la osteosíntesis ortopédica (Zambrano y Muller, 2008), el cual garantiza buena resistencia mecánica y en algunos casos titanio comercialmente puro se utiliza en la osteosíntesis maxilofacial (Castro, et al., 2016) y maxilomandibular con tratamiento de mejoramiento de sus propiedades, fundamentalmente por su adecuada biocompatibilidad y elevación de la resistencia a partir de la obtención de material nanoestructurado (Elías, et al., 2013).

1.2.2 Aspectos generales sobre las miniplacas.

A toda placa de osteosíntesis se le exigen propiedades mínimas, fundamentalmente: resistencia adecuada (para proporcionar estabilidad), ductilidad suficiente (para permitir un moldeado anatómico) y biocompatibilidad (para no producir efectos adversos locales o sistémicos). Los materiales con los que se fabrican estos implantes son variados; se usan principalmente acero inoxidable (una aleación de los metales hierro, cromo, níquel y molibdeno en proporciones bien definidas (62,5 %, 17,5 %, 14,5 % y 2,8 % respectivamente) y el titanio, puro o aleado).

Durante muchos años, el acero inoxidable fue el material de elección, hasta 1977 en que Steinemann describe cierta potencialidad autocorrosiva, por interacción entre los diferentes componentes metálicos de implantes de dicho material. Es por esta situación que se aconseja la retirada de los elementos de acero inoxidable en un período aproximadamente no mayor de un año tras la intervención, una vez consolidada y mineralizada la fractura. Esta potencialidad autocorrosiva del acero inoxidable deja como protagonistas indiscutibles al titanio y sus aleaciones como material primario para la fabricación de las miniplacas y otros elementos en la construcción de implantes médicos de largo plazo (Martínez, 2004).

1.2.3 Aplicaciones de las miniplacas para Osteosíntesis.

La aplicación de las miniplacas está dada en el tratamiento quirúrgico de fracturas faciales, mandibulares y en el tratamiento de huesos largos como implantes ortopédicos. Actualmente el uso de las miniplacas como sistema de fijación interna está en todo su

esplendor y se continúa investigando su aplicación en diferentes líneas, tanto en el diseño como en la biocompatibilidad y sus propiedades químicas y mecánicas, ejemplo de ello son los siguientes estudios de aplicación realizados en los últimos años:

Se desarrollan estudios comparativos, en el campo del diseño, entre dos técnicas de estabilización interna de fracturas mediante la implantación de clavos intramedulares y placas de osteosíntesis, donde se realiza una comparación biomecánica por elementos finitos de ambos implantes y así desarrollan una herramienta preclínica para guiar a los cirujanos en la elección del método de estabilización más adecuado para cada fractura (Planell, 2004).

Estudios en que se analiza la influencia de la aplicación de placas de fijación en el proceso de osteosíntesis en la fractura de tibia proximal donde se realizan experimentos con tibias sintéticas. Se comparan modelos de tibias fracturadas con y sin placas bajo cargas de compresión; las tibias con placas se comportan como un cuerpo rígido deformable, en cambio en el modelo sin placas los fragmentos se separan del hueso, colapsando el sistema (Zambrano y Muller, 2008).

La aplicación de las miniplacas también se manifiesta en la restauración de fracturas de la pared torácica, ofreciendo una buena alternativa para disminuir la morbilidad asociada, y permitir al paciente su pronto retorno a su vida laboral (Jiménez, *et al.*, 2015).

Se realizan estudios comparativos recientes entre dos sistemas de miniplacas de osteosíntesis para el tratamiento de fracturas faciales, donde se comparan 24 muestras desde el punto de vista químico y mecánico por medio del análisis de la composición química y pruebas de tracción y flexión (Castro, *et al.*, 2016).

1.3 Elementos sobre las propiedades mecánicas y la resistencia de materiales.

En la actualidad debido al sin número de aplicaciones estructurales que demandan el creciente desarrollo tecnológico, es necesario el desarrollo de materiales con composiciones, microestructuras y texturas cristalográficas especiales que cumplan con los requerimientos de las mismas.

Las propiedades mecánicas de los materiales de ingeniería son el resultado de la distribución espacial de las características microestructurales, que además de la red cristalina comprenden defectos puntuales, dislocaciones, límites de granos, partículas de soluto o los límites de fases, para mencionar sólo algunos. Entre estas características subestructurales, dos de las principales características que influyen el comportamiento plástico de los metales son el tamaño de grano y la densidad de dislocaciones.

Como consecuencia del procesamiento, la mayoría de los materiales para aplicaciones ingenieriles son policristalinos, es decir, presentan una amplia variedad de granos con diferentes orientaciones cristalográficas y definidos por dislocaciones geoméricamente necesarias que constituyen los límites de granos. Dentro de estos granos, existe un gran número de defectos lineales de red como consecuencia de la historia del procesamiento y de las perturbaciones de la red (Le, 2009).

Diversos autores coinciden en sus investigaciones en que la microestructura de los materiales que utilizan, cambia drásticamente, principalmente cuando el tamaño del grano cambia a escala nanométrica, de (1 ... 100) nm (material nanoestructurado), además de que manifiestan un significativo endurecimiento (aumento en más menos 1,5 veces la dureza)

(Hahn, 2002; Ono, 2003; Mueller, 2007; Le, 2009; Higuera, 2013; Siddesha y Shantharaja, 2013).

Se conoce que en la fabricación de elementos mecánicos de materiales dúctiles, se toman en cuenta para el diseño dos teorías básicas de falla, el criterio del esfuerzo cortante máximo y el de energía de distorsión máxima o de Von Mises, de modo que el material no fluya bajo las condiciones de carga, a partir del criterio de que los esfuerzos que se obtienen en el diseño, sean inferiores al esfuerzo de fluencia del material (Peña, 2013).

El criterio del esfuerzo cortante máximo se rige por las condiciones de que $|\sigma_1| < \sigma_F$ y $|\sigma_2| < \sigma_F$ para el caso de que σ_1 y σ_2 presenten igual símbolo, en caso de ser diferente se regirá por la condición de $|\sigma_1 - \sigma_2| < \sigma_F$

El criterio de energía de distorsión máxima o de Von Mises se tiene en cuenta para el diseño con los materiales dúctiles como los metales, donde se consideran seguras las tensiones de diseño siempre que se cumpla que la tensión de Von Mises o Equivalente sea menor que la tensión de fluencia del material $\sigma_e < \sigma_F$.

La tensión de Von Mises está definida por la (Ecuación 1.1).

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (1.1)$$

Donde σ_1 , σ_2 y σ_3 son las tres tensiones principales y σ_F es la tensión de fluencia (Mott, 2006). Las tensiones de Von Mises también son conocidas por la bibliografía como tensiones efectivas (*effective stress*) (Dassault Systemes Solid Works Corporation, 2016).

Cada material se caracteriza por una curva de tensión-deformación (*Stress-Strain Curve*), la que está sujeta a cambios tras la modificación de condiciones térmicas o mecánicas iniciales del material. Por una parte la elaboración de esta curva está dada por las (*effective stress*) o tensiones de Von Mises y por las deformaciones efectivas o (*Von Mises strain*), según la bibliografía (Dassault Systemes Solid Works Corporation, 2016).

La deformación efectiva está definida por la (Ecuación 1.2).

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (1.2)$$

Donde ε_1 , ε_2 y ε_3 son las tres deformaciones principales.

1.3.1 Modelo del material.

Uno de los modelos para definir el límite elástico para el tratamiento de plasticidad de un material, por el criterio de Von Mises, es el modelo termo-visco-plástico de Johnson-Cook, siendo el más ampliamente usado en altas deformaciones, el cual describe el flujo de tensiones del material en función de las deformaciones, la razón de deformación y el efecto de la temperatura, según la (Ecuación 1.3).

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] [1 + C \ln(\dot{\varepsilon}' / \varepsilon'_0)] \left[1 - \left\{ (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room}) \right\}^m \right] \quad (1.3)$$

Este modelo propuesto por Johnson-Cook consta de tres factores en su expresión. El primero se refiere al comportamiento elastoplástico del material, el segundo a la viscosidad y el tercero al comportamiento térmico del mismo. En (1.3), A es el esfuerzo de fluencia inicial (MPa); B es el módulo de dureza (MPa); C es coeficiente de sensibilizado por la tasa de

deformación; D es la constante del material; m es el coeficiente de suavizado térmico; n es el coeficiente de endurecimiento; T es la temperatura del material de trabajo (K); T_{melt} es la temperatura de fusión del material de trabajo (K); T_{room} es la temperatura del local (K); σ es el flujo de tensiones (MPa); ε es la deformación plástica equivalente; $\dot{\varepsilon}$ es la velocidad de deformación (s^{-1}) y $\dot{\varepsilon}_0$ la velocidad de deformación plástica de referencia (s^{-1}).

1.3.2 Tensión y deformación de ingeniería vs tensión y deformación verdadera.

La deformación de diseño o ingeniería es una medida pequeña de la deformación, esta no es válida una vez que la deformación del modelo ya no es pequeña (aproximadamente 5 %). La deformación verdadera, es una medida no lineal de la deformación que es dependiente del largo final del modelo, sirve para simular grandes deformaciones. Si la deformación de una barra bajo tensión se vuelve significativa, entonces su área de sección transversal se alterará. Las definiciones tradicionales de ingeniería para la tensión y la deformación ya no son precisas y nuevas medidas conocidas como tensión y deformación verdadera son introducidas. La tensión verdadera es $\sigma = \frac{F}{a}$, cuando (a) es el área de la sección transversal tras la deformación final y (F) la fuerza a la que está sometida la barra.

La deformación verdadera es $\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{L}\right)$, cuando (l) es la longitud final de la barra y (L) es la longitud inicial no deformada de la barra (Fig. 1.1). La tensión de ingeniería o tensión nominal es $\sigma_{nom} = \frac{F}{A}$, cuando (A) es el área de la sección transversal antes de la deformación de la barra (Fig. 1.1). La deformación de ingeniería o deformación nominal es $\varepsilon_{nom} = \ln\left(\frac{\Delta l}{L}\right)$, cuando (Δl) es la deformación final de la barra (Fig. 1.1).

Tanto las tensiones como las deformaciones verdaderas y de ingeniería o nominales se relacionan por medio de $\sigma = \sigma_{nom}(1 + \epsilon_{nom})$ y $\epsilon = \ln(1 + \epsilon_{nom})$ respectivamente, de modo que se pudiese concluir que las tensiones y deformaciones verdaderas son mayores que sus homólogas de ingeniería o nominales y que las tensiones y deformaciones verdaderas son las utilizadas como base para el cálculo y elaboración de los resultados de *software* DEFORM y otros *softwares* de simulación (Dassault Systemes Solid Works Corporation, 2016; Scientific Forming Technologies Corporation, 2011).

1.4 Fundamentos teóricos sobre los procedimientos de deformación para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de metales.

El refinamiento de grano puede afectar propiedades mecánicas de los materiales policristalinos como es la dureza, cuestión que se explica por el modelo de Hall–Petch, que define el efecto del refinamiento del grano en el endurecimiento de materiales metálicos, el que se atribuye a los límites de grano que actúan como los obstáculos eficaces al movimiento de las dislocaciones (Siddesha y Shantharaja, 2013)

Hall y Petch (Higuera, 2013; Siddesha y Shantharaja, 2013) fueron los primeros en examinar la influencia del tamaño de grano en la resistencia de los materiales. Según ellos, la dureza aumenta con el inverso de la raíz cuadrada del tamaño del grano. En los sistemas metálicos la relación de Hall-Petch (Ecuación 1.4) describe la dependencia del tamaño de grano como resultado de la interacción de las dislocaciones y los límites de grano:

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (1.4)$$

Donde (σ_y) representa el esfuerzo de fluencia, (σ_0) es el esfuerzo cortante de la red cristalina debido a la fricción, (d) es la dimensión del subgrano y (k) es una constante que depende del contenido de impurezas de materiales y elementos de aleación (Ono, 2003).

El concepto de apilamiento de dislocaciones ha sido la explicación de la relación Hall-Petch. Sin embargo, al considerar un nivel fijo de esfuerzo, cuando el tamaño de grano disminuye el número posible de dislocaciones apiladas decrece, ya que este número es función del esfuerzo aplicado y de la distancia a la fuente. Para un tamaño de grano crítico no es posible referirse al concepto de apilamiento de dislocaciones para explicar el flujo plástico, de tal forma que la relación Hall-Petch no explicaría el comportamiento mecánico del material.

Los materiales nanocristalinos fueron definidos por Herbert Gleiter (Higuera, 2013) en 1989, como materiales con un tamaño de grano inferior a 100 nm, los cuales han tenido un rápido desarrollo en los últimos años debido a su importancia tecnológica y científica (Mueller, 2007).

Estos materiales nanoestructurados tienen cinco características principales: comportamiento súper plástico sin grietas, granos ultrafinos, homogeneidad en cuanto a forma y tamaño de los granos, no variación en las dimensiones y forma geométrica de la muestra e incremento considerable de la resistencia (Otea Aimme, 2009).

Para la obtención de materiales nanoestructurados se utilizan dos técnicas fundamentales, de abajo hacia arriba (*bottom-up*) y de arriba hacia abajo (*top-down*).

Técnica de abajo hacia arriba. Incluye diferentes métodos que se basan en procesos en fase líquida o gas. Clásicamente, los procesos químicos húmedos tales como la precipitación y sol-gel se han empleado para obtener nanopartículas, sin embargo, presentan una grave desventaja, la aglomeración. En esta técnica la nanoestructura se construye átomo por átomo o capa por capa (Zhu, 2004; Guerrero, 2014).

Técnica de arriba hacia abajo. Se emplea en materiales convencionales con microestructuras cristalinas, normalmente metales y aleaciones a los que se le modifican la microestructura por el incremento y movimiento de las dislocaciones a partir de la deformación plástica severa, seccionando la microestructura hasta lograr nanoestructurarlo (Zhu, 2004; Guerrero, 2014).

1.5 Nanoestructura y Teoría de las dislocaciones en materiales metálicos.

Teniendo en cuenta lo planteado por Peinado, (2012), la granulometría es uno de los factores que influyen sobre la resistencia mecánica, una de las más importantes propiedades de los materiales metálicos.

El estudio de la granulometría se basa fundamentalmente en la Teoría de las Dislocaciones. Las dislocaciones son defectos que dan lugar a una distorsión de la red centrada en torno a una línea. Se crean durante la solidificación de los sólidos cristalinos o por deformación plástica, por condensación de vacantes.

Taylor, citado por (Higuera, 2013) propuso una fórmula que relaciona la resistencia mecánica con la densidad de dislocaciones:

$$\sigma = \sigma_0 + \alpha M G b \rho^{1/2} \quad (1.5)$$

Donde (σ_0) es el esfuerzo de cizallamiento causado por la fricción, (α) es una constante que depende del arreglo de las dislocaciones, (M) es el factor de Taylor, (G) es el módulo de cizalladura, (b) es la longitud del vector de Burgers y (ρ) representa la densidad de dislocaciones (Gubicza, 2009).

Hay dos tipos de dislocaciones básicas, la de cuña y la helicoidal. También puede darse una combinación de ambas, denominada dislocación mixta.

Un obstáculo introducido dentro del cristal evita que una dislocación se deslice a menos que sea aplicada una fuerza muy grande. Es posible encontrar un gran número de dislocaciones en los materiales. La densidad de las dislocaciones o longitud total de las dislocaciones por unidad de volumen, se usa generalmente para representar la cantidad de dislocaciones presentes. La densidades de dislocaciones se pueden aumentar por medio de los procesos de deformación del material (Peinado, 2012).

1.6 Materiales nanoestructurados para el campo de la medicina.

Se conoce que los materiales metálicos con altos valores de resistencia y dureza son de una demanda creciente por la industria y que estas propiedades dependen en gran medida del tamaño del grano, de ahí que entre las investigaciones actuales se coloca la de los estudios de aplicaciones de métodos para lograr materiales nanoestructurados que son de particular uso en la industria automotriz y aeroespacial así como en el campo médico en la fabricación de fijadores óseos tanto externos como internos para distintas partes del cuerpo. Según

Reig, (2009) existen un grupo de factores que deben ser tenidos en cuenta para el diseño de un implante tales como:

- Seguridad biológica: No generar reacciones dañinas al interaccionar con el cuerpo humano.
- Biofuncionalidad: el diseño y propiedades de los materiales deben adecuarse a cada uso en específico.
- Respuesta apropiada de los tejidos: La integración de un elemento ajeno al cuerpo humano, genera reacciones (fisiológicas y biológicas) por lo que la compatibilidad del implante con los tejidos y los fluidos del cuerpo resulta de vital importancia.
- Propiedades mecánicas: Resulta fundamental que la rigidez del implante sea lo más semejante posible a la de hueso con el fin de regenerar un hueso sano y saludable estimulando las células de producción de hueso nuevo (osteoblastos).
- Resistencia a la fatiga: A diferencia del hueso que se remodela los implantes generalmente fracasan por fatiga en el tratamiento de fracturas óseas.
- Resistencia a la corrosión: en los implantes resulta de gran importancia la liberación de los productos de corrosión a los tejidos biológicos por lo que se utilizan metales pasivos y nobles.

La mayoría de los factores que condicionan el diseño de los implantes se engloban dentro de un único concepto: “biocompatibilidad” entendiendo como tal la habilidad del componente para permanecer en una situación específica con una buena respuesta por parte

del huésped. Dentro de este concepto, pueden definirse distintas categorías de materiales en función de la interacción entre el implante y el tejido humano (Reig, 2009).

- Incompatibles: Aquellos que generan sustancias tóxicas pudiendo provocar desde simples alergias, hasta la no asimilación por parte del individuo.
- Biocompatibles: Aquellos que generan sustancias pero en concentraciones no tóxicas.
- Bioinertes: Aquellos que no generan partículas tóxicas.
- Bioactivos: Aquellos que presentan una interacción positiva con los tejidos circundantes, formándose una unión química en la interfaz entre ambos.

Entre los materiales más utilizados en el campo médico se encuentra el titanio por su elevada dureza y resistencia aún en estado puro. Es uno de los metales biocompatibles y cumple con los requerimientos principales para su uso con fines médicos (Peña, *et al.*, 2016).

1.6.1 Propiedades físico químicas de la aleación de Ti6Al4V y del Titanio Grado 2.

El titanio es un elemento de número atómico 22 y distribución electrónica $[Ar] 3d^2 4s^2$ por lo que se ubica en el Grupo IV- B, Período 4 de la tabla periódica. Como sus compañeros de grupo el circonio y el hafnio se emplean en la fabricación de aceros especiales. Entre sus usos se encuentra en la fabricación de aceros especiales al obtener el ferro titanio por la reducción del mineral ilmenita con carbón en un horno eléctrico. El titanio le confiere al acero gran resistencia y tenacidad al eliminarle impurezas como el nitrógeno formando nitruros. Una barra de titanio de 1cm^2 de sección soporta una presión de 8700 kg. Por su

ligereza y gran resistencia, el titanio se emplea en la construcción de aeroplanos, y por su resistencia a la corrosión se usa en depósitos para agua, e incluso del mar (Babor y Ibarz, 1962).

La aleación de Ti6Al4V se conoce comercialmente como Titanio Grado 5 y además de los elementos predominantes como el aluminio y el vanadio está compuesta por otros elementos en menores porcentajes en masa (Tabla 1.1) y algunas de sus propiedades mecánicas se reflejan en la (Tabla 1.2) (Aguilera, 2014).

Tabla 1.1 Porcentaje en masa de los elementos de aleación en el Ti6Al4V.

O	N	C	H	Al	Fe	V
0,18	0,015	0,04	0,006	6	0,13	4

Tabla 1.2 Propiedades mecánicas de la aleación Ti6Al4V.

Dilatación térmica, [$\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$]	4,7
Densidad, [g/cm^3]	4,43
Coefficiente de Poisson, [adim]	0,34
Calor específico, [$\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$]	$f(T)$
Conductividad, [$\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$]	$f(T)$
Módulo de Young, [GPa]	113,8
Emisividad, [adim]	0,7

El Titanio Grado 2 o comercialmente puro presenta una serie de elementos de aleación, según la (Tabla 1.3), así como algunas propiedades mecánicas según la (Tablas 1.4).

Tabla 1.3 Porcentaje en masa de los elementos de la aleación del Titanio Grado 2.

C	O	N	H	Fe
0,1 máx.	0,25 máx.	0,03 máx.	0,015 máx.	0,3 máx

Tabla 1.4 Propiedades mecánicas del Titanio Grado 2.

Dureza Vickers, [HV]	145
Módulo de Young, [GPa]	105
Coefficiente de Poisson, [adim]	0.38
Resistencia al impacto, [J]	114-171
Módulo cortante, [GPa]	45
Emisividad, [adim]	0.3

Al igual que el Ti6Al4V es ideal para la construcción de implantes quirúrgicos y particularmente para implantes odontológicos. Posee una menor cantidad y diferentes elementos de aleación, lo que se refleja en una mejor compatibilidad biológica y menores propiedades mecánicas como se muestra en la (Tabla 1.5).

Tabla 1.5 Tabla comparativa entre el Ti Grado 2 y Ti Grado 5

Grado	Límite de Fluencia (MPa)	Resistencia a la Tracción (MPa)	Elongación (%)	Reducción de Área (%)
2	275	345	20	30
5	795	860	10	25

La aleación de Ti6Al4V se emplea ampliamente con fines biomédicos para fijadores óseos, particularmente en ramas como la ortopedia, en la cual Cuba ha alcanzado considerables avances de reconocimiento internacional. De igual modo el Titanio Grado 2 se emplea

particularmente en la ortodoncia con buenos resultados. Dichos resultados pueden ser perfectibles en cuanto a la compatibilidad y precisión requeridas para lograr uniones eficaces, si se mejora la resistencia de la lámina de Titanio Grado 2 con vista a sustituir la aleación de Ti6Al4V que se emplea para la fabricación de las placas y miniplacas y disminuir el tamaño de estos elementos, lo que es posible mediante la disminución y homogenización del tamaño del grano, lo que se puede lograr por el Método de Deformación Plástica Severa, con el Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo.

1.7 Método de Deformación Plástica Severa.

El Método de Deformación Plástica Severa SPD surgen a partir de las investigaciones realizadas por P.W. Bridgman (1882-1961), en la Universidad de Harvard, Estados Unidos, en la década del treinta del siglo pasado. Se conoce que Bridgman recibió el Premio Nobel de Física en 1946, precisamente por el estudio del comportamiento de sólidos sometidos a grandes presiones hidrostáticas y el efecto de las deformaciones en los mismos (Huang y Langdon, 2013).

Deformación plástica severa SPD es el nombre que se aplicada a los procesos que involucran la utilización de altas deformaciones plásticas para la obtención de materiales con granos ultrafinos. Los procedimientos de deformación de los materiales metálicos aumentan las dislocaciones y el cizallamiento de los planos tangenciales con el consiguiente aumento de las tensiones y disminución del tamaño del grano, y por tanto aumento de su resistencia mecánica.

Las técnicas SPD implican la aplicación de deformaciones muy grandes, sin cambiar las dimensiones iniciales de la muestra (Otea Aimme, 2009). Estas operaciones se realizan mediante el uso de equipos y dispositivos de trabajo con características geométricas especiales que impiden el flujo libre del material durante la deformación plástica y por lo tanto resulta en la aparición de una presión hidrostática con valores significativos (Valiev, *et al.*, 2006).

La alta presión hidrostática combinada con un alto esfuerzo cortante, resulta en una gran densidad de defectos en la red, que producen un refinamiento significativo de los granos en el material. El mecanismo de deformación de los procesos SPD involucra la subdivisión de la red gruesa (granos gruesos) en áreas mucho más pequeñas (subgranos) con diferentes sistemas de cizallamiento y rotación de granos (Valiev, *et al.*, 2006).

El Método de Deformación Plástica Severa ha evolucionado y en la actualidad cuenta con un número considerable de procedimientos tales como: forja multidireccional (Belyakov, 2003; Yoshida, 2002), extrusión torsional (Beygelzimer, 2002), presión en superficie restringida (Shin, 2002; Raj, *et al.*, 2011), corrugación y estiramiento repetitivo (Huang, 2001; Huang, 2004 y Raj, *et al.*, 2011), deformación por torsión severa (Nakamura, 2004), laminado corto de pasadas múltiples (Kiuchi, 2005), forja cíclica en matriz cerrada, presión o extrusión en canal angular de sección constante, torsión a alta presión, molienda mecánica, compresión cíclica de extrusión (Higuera, 2013), unión por laminación acumulada (Raj, *et al.*, 2011; Higuera, 2013).

Huang y Langdon, (2013) plantean que los dos procedimientos más conocidos y aplicados en la práctica son: la Deformación en Canal Angular de Sección Constante, concebido y

desarrollado por V.M. Segal y colaboradores de la década de los ochenta y Torsión a Alta Presión, creado en el Instituto de Física de los Metales de Yekateriburg Rusia, en la década de los ochenta.

1.7.1 Extrusión en Canal Angular de Sección Constante.

El Procedimiento de Presión en Canal Angular de Sección Constante (ECAP), conocido también como extrusión en canal angular de sección constante consiste en presionar una pieza metálica a través de una matriz especial (Fig. 1.2b), que contiene dos canales de igual sección transversal que se interceptan en un ángulo interno (Φ), que puede estar comprendido entre 60° y 160° . El procedimiento tiene como objetivo imponer una gran deformación en el material procesado cuando cruza el canal. Durante el procesamiento por ECAP el material sufre una deformación plástica intensa por corte simple, sin ningún cambio correspondiente en el tamaño de la sección transversal de la muestra. La principal deficiencia de este procedimiento es que se pierde de un 30 a un 50 % del material, esta pérdida está dada por no lograrse la homogeneidad del material en los extremos de la barra (Huang y Langdon, 2013). Este procedimiento es muy usado en la obtención de barra de titanio nanoestructurado para la fabricación de implantes dentales.

1.7.2 Torsión a Alta Presión.

En el Procedimiento de Torsión a Alta Presión (Fig. 1.2a) la muestra es un disco fino y es colocado entre una cavidad de forma cilíndrica y una barra cilíndrica para garantizar una presión P y luego de presionándolo se aplica una rotación de cualquiera de las partes del dispositivo de deformación, inferior o superior. Se registra en la bibliografía que este

procedimiento tiene la dificultad de que solo puede aplicarse en discos de pequeño espesor y diámetro (Huang y Langdon, 2013).

1.7.3 Presión en Superficie Restringida

El Procedimiento de Presión en Superficie Restringida es el más parecido al de Corrugación y Estiramiento Repetitivo, en tanto se aplica con dados deformadores semiacanalados y planos paralelos, que difieren en que se restringen los extremos de los mismos, con vistas a evitar el alargamiento de la lámina metálica que se procesa.

La utilización del procedimiento brinda buenos resultados en el endurecimiento y la disminución del grano del material (Shantharaja, 2013; Morattab, *et al.*, 2011). Estos autores plantean que al utilizar este procedimiento en cinco (Shantharaja, 2013) y cuatro (Morattab, *et al.*, 2011) pasadas, se logra disminuir el tamaño del grano a 3,5 μm y 200 nm, respectivamente; con el consiguiente aumento de la dureza del material.

Los autores antes mencionados utilizan dados corrugadores con dientes de 45⁰ de ángulo y ancho y altura iguales al espesor de la lámina que procesan y sin radios de redondeo, tanto para el punzón como para la matriz (Fig. 1.1). Estos criterios de diseño del dado coinciden con los de otros autores (Shaban y Vajd, 2014; Soon, *et al.*, 2015).

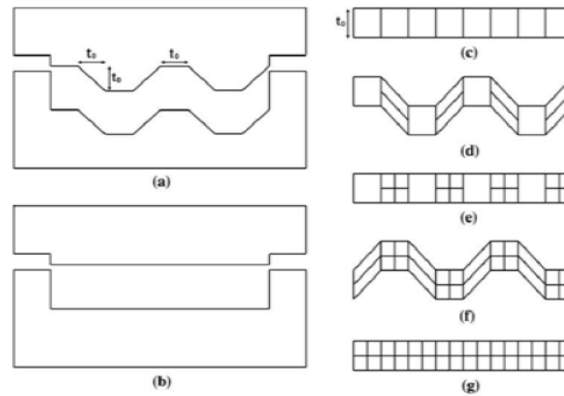


Figura 1.1 Dados deformadores a) y b), Lámina sin procesar c) y lámina corrugada y estirada durante primer ciclo d) y e) y segundo ciclo f) y g) (Shantharaja, 2013)

1.8 Corrugación y Estiramiento Repetitivo.

El Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo RCS se reporta por varios autores en el procesamiento de diferentes metales, dado el cambio favorable que genera en los materiales metálicos en cuanto a su microestructura con la disminución del tamaño del grano y el aumento de la dureza del material.

Ejemplo de los resultados que se obtienen en la microestructura de los materiales los presenta Siddesha y Shantharaja, (2013) cuando expone que los límites de grano cambian drásticamente de $70 \mu\text{m}$ a $30 \mu\text{m}$ después de tres pasadas. Después de una pasada de RCS, la estructura de los granos se refina y la microestructura de la lámina evoluciona en una estructura con una fracción considerable de límites de bajo ángulo, con una textura promedio de $30 \mu\text{m}$ lo que reafirma la influencia del número de pasadas en el refinamiento de los granos. Los aspectos antes mencionados están ligados a la no aparición de

microgrietas, en tanto son la causa de la disminución de la resistencia del material (Kawasaki, *et al.*, 2014).

Los bordes de grano que se forman poseen unos ángulos bajos. Un borde de grano de ángulo bajo es un conjunto de dislocaciones que producen una pequeña desviación de la orientación cristalográfica entre redes adyacentes. Dado que la energía de superficie es menor que la energía en borde de grano normal, los bordes de grano de ángulo pequeño no son tan eficaces para bloquear el deslizamiento (Marulanda, *et al.*, 2014).

Los parámetros con mayor influencia en la variación de las propiedades mecánicas y de la microestructura de la muestra metálica son: el número de pasada, la velocidad de la deformación, el espesor de la muestra y la configuración geométrica de los dados corrugadores (Thangapandian y Balasivanandha, 2015). Para la aplicación del procedimiento, los investigadores plantean el uso de herramientas con dados deformadores de diferentes geometrías.

1.8.1 Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo Continuo y Discontinuo.

Para la obtención de granos ultrafinos el Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo se manifiesta por medio de dos técnicas, la continua y la discontinua, sus nombres están dados por la característica de la herramienta en cuanto a la condición del procesamiento de láminas metálicas.

La corrugación y estiramiento continuo se lleva a cabo con una herramienta compuesta por un par de rodillos dentados y un par de rodillos cilíndricos, donde la lámina pasa a través

de los rodillos dentados durante la etapa de corrugación y seguidamente a través de los rodillos cilíndricos durante la etapa de estiramiento (Fig. 1.2). Este procedimiento se aplica según la bibliografía a láminas de aleación de aluminio-cobre, aluminio-cobre-escandio y láminas de cobre, obteniéndose resultados favorables en cuanto a la disminución de tamaño de grano a escala nanométrica y aumento de la dureza del material que se procesa (Pandey, 2012; Huang, 2001).

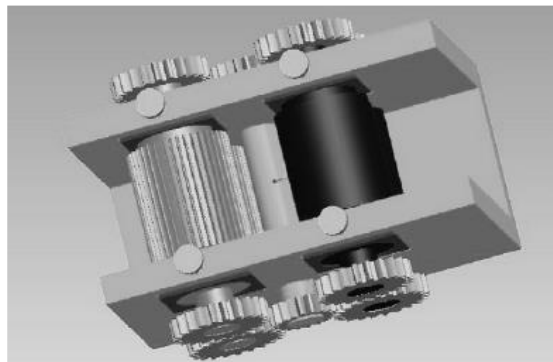


Figura 1.2 Herramienta para el Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo continuo (Pandey, 2012).

La corrugación y estiramiento discontinuo se lleva a cabo con dos herramientas de dados deformadores, la primera dentada para la etapa de corrugación y la segunda plana para la etapa de estiramiento. Según la bibliografía permite la obtención de granos a escala nanométrica de láminas de cobre comercialmente puro, con la posibilidad de girar la lámina con respecto a los dados deformadores permitiendo un considerable cizallamiento que propicia un eficaz refinamiento del grano (Fig. 1.3) (Huang, 2004).

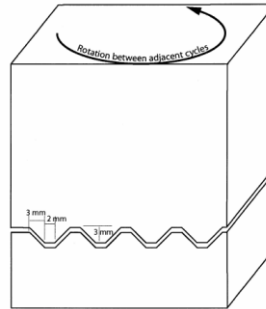


Figura 1.3 Herramienta para el Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo discontinuo, etapa de corrugación (Huang, 2004).

La selección de un Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo, continuo o discontinuo, se realiza fundamentalmente por la forma geométrica de las láminas y otros aspectos relacionados con la obtención de la estructura y las propiedades del material que se desea obtener así como las condiciones de procesamiento (Mirsepasi,*et al.*,2012; Huang, *et al.*,2004).

1.8.2 Casos de Estudio del Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo.

En este epígrafe se tiene como objetivo recopilar información sobre los materiales y condiciones de trabajo, así como las variables y niveles de las mismas, que utilizan los autores en sus estudios, con vistas a tenerlos en cuenta en la simulación del procedimiento que se pretende realizar.

Sheikh y colaboradores en el 2010 investigan el efecto del procedimiento RCS en el endurecimiento de la súper aleación Duratherm 600. Para la aplicación del RCS se utiliza un proceso de envejecimiento a 650°C por dos horas. Realizaron hasta 25 ciclos de deformación, usando dados semicirculares con múltiples dientes, la muestra se rotó 90

grados entre cada ciclo. Los resultados mostraron que al aumentar el número de ciclos el valor de la dureza se incrementa. También, la microestructura de la muestra evidencia bandas de deslizamiento durante la aplicación de la deformación al material. Como resultado, el aumento de la dureza puede atribuirse a la formación de subgranos y a las grandes deformaciones que experimenta la lámina.

Pandey y colaboradores en el 2012 utilizan dos aleaciones de Al-Cu y Al-Cu-Sc, se procesaron mediante 4 pasadas de corrugación y estirado repetitivo pero con la característica de la utilización de un ciclo completo donde la lámina entra en un cilindro dentado y sale por un cilindro plano, que tiene de negativo que la lámina no se puede rotar 90° grados y es menos probable lograr la homogeneidad en la estructura del material. Trabajan a temperatura ambiente. Midieron los valores de dureza de la muestra procesada y se les realizó ensayo de tracción. Los resultados demuestran que el procedimiento de RCS produce un aumento significativo en la dureza a lo largo de cada lámina. No existen pérdida de la forma ni disminución de las dimensiones de las muestras. Los valores de resistencia en la aleación Al-Cu-Sc es superior que en la aleación de Al-Cu.

Siddesha y Shantharaja en el 2013 someten al aluminio a un procedimiento RCS, por medio de 27 experimentos derivados del Método de Taguchi para un arreglo ortogonal de tres variables a tres niveles, donde definen como variables independientes la velocidad de traslación del punzón a (1mm/s, 1,5mm/s y 2mm/s), el número de ciclos de corrugación y estiramiento a (1, 3 y 5) y el espesor de la lámina de aluminio a (3mm, 4mm y 5mm). Por medio de un análisis de varianza evalúan la influencia de las variables independientes sobre la microdureza, tensión a la tracción y tamaño de grano, de modo que la variable independiente de mayor influencia en el refinamiento del tamaño del grano estuvo dada

por el número de ciclos de corrugación y estiramiento, seguido por el espesor de la lámina de aluminio y la velocidad de traslación del punzón.

Kwasny y colaboradores en el 2013 someten al procedimiento de RCS una aleación de Cu6Sn a 8 y 13 ciclos de manera comparativa con la aplicación de la Laminación en Frío en 8 ciclos. Las mediciones de tensiones mostraron que después de la deformación de la muestra mediante el Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo, aparecieron tensiones de compresión en la dirección de la laminación y transversal del laminado, independientemente al número de ciclos de deformación. Con el laminado clásico se detectan los mismos tipos de tensiones pero con valores mayores para mayor tamaño de grano (35,1 nm). En el caso del RCS se obtienen tamaños de grano de 19,5 nm, lo que evidencia que por este procedimiento se puede obtener un tamaño de grano menor en 15,6 nm que por el procedimiento clásico de laminación para el mismo número de ciclos

Thangapandian y Balasivanandha en el 2015 reportan el uso de dos geometrías de herramientas, la semiacanalada y la semicircular (Fig. 1.6). Deforman láminas de aluminio AA 5083 de 2 mm de espesor con dos juegos de dados (semiacanalado y semicircular), en la obtención de la superficie corrugada y dados planos paralelos entre sí en la obtención de la superficie estirada. Con el perfil semiacanalado logran transformaciones mayores en el material con un número menor de pasadas, en cuanto a la obtención de microestructura de tamaño nanométrico. Son mejores los valores de resistencia a la tracción del material, la microdureza, el tamaño de los granos y la homogeneidad de los mismos. Los autores detectan la aparición de microgrietas en las pasadas 8 y 14 (para los perfiles semiacanalados y semicircular respectivamente) las cuales se conoce que son responsables de la disminución de la resistencia de las muestras. Determinan la microdureza Vickers y

obtienen como resultado que de 68 HV inicial, aumenta a 98 HV en 12 pasadas con el dado semicircular, mientras que con el dado semiacanalado se alcanza una dureza de 101 HV con 8 pasadas, en la que disminuyen los valores de resistencia a la tracción y dureza que se habían incrementado en la pasada 6, llegando a ser de un 25% en esta última.

Se puede apreciar que en los estudios de Thangapandian y Balasivanandha se alcanzan resultados superiores con el perfil semiacanalado. Se logra menor tamaño de grano y 3HV más de dureza con 4 pasadas menos, lo que implica mejores resultados en menor tiempo de operación.

Los parámetros con mayor influencia en la variación de las propiedades mecánicas y de la microestructura de la muestra metálica son: el número de pasada, la velocidad de la deformación, el espesor de la muestra y la configuración geométrica de los dados corrugadores (Thangapandian, 2015). Para la aplicación de dicha técnica, los investigadores plantean el uso de herramientas con dados deformadores de diferentes geometrías como las que se muestra la Fig. 1.4.

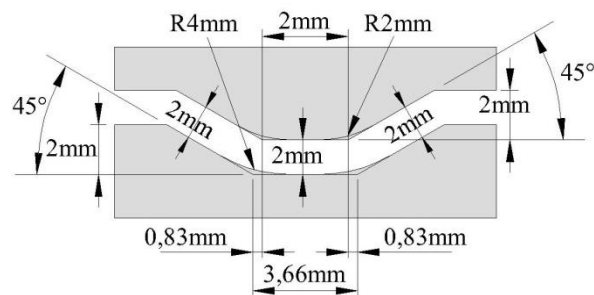


Figura 1.5 Herramientas con dados deformadores (Cruz, 2017)

Según el autor la geometría de la herramienta que propone para la aplicación del Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo a láminas de Titanio Grado 2 es

semiacanalada, de holgura 2 mm y con las siguientes dimensiones para el diente del punzón y la matriz: altura 2 mm, ángulo 45° , ancho y radio de cresta de 2 mm y ancho y radio de pie de diente de 3.66 mm y 4 mm; respectivamente (Cruz, 2017).

1.8.3 Parámetros que influyen en el Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo.

En este epígrafe se realiza un análisis de los diferentes casos de estudio con el procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo con vistas a definir fundamentalmente las tendencias de los autores.

Del análisis de los casos de estudio se puede concluir que los parámetros de mayor importancia en la RCS como coinciden muchos autores son la velocidad de desplazamiento del punzón, el número de pasadas, la temperatura y la geometría de la herramienta, todo esto contribuye en un buen desarrollo del procedimiento.

Las velocidades generales mayormente utilizadas son de 1 mm/s, 1,5 mm/s y 2 mm/s, (Siddesha y Shantharaja, 2013; Shaban y Vajd, 2014)

Con respecto al número de pasadas y perfil de la herramienta varían dependiendo del autor, por ejemplo (Sheikh, *et al.*, 2010) utiliza dados deformadores con perfil semicircular y realiza 25, pasadas también antes del procedimiento aplica un proceso de envejecimiento a 650°C por dos horas.

(Kwasny, *et al.*, 2013; Siddesha y Shantharaja, 2013; Thangapandian y Balasivanandha, 2015) coinciden en utilizar como geometría de los dientes del dado deformador un perfil

semiacanalado teniendo en cuenta que estos últimos aplicaron un análisis también para dados con perfil semicircular teniendo como resultado un mejor desempeño el perfil semiacanalado. En cuanto al número de ciclos varía la cantidad desde uno hasta 14 ciclos. Trabajan a temperatura ambiente, no aplican ningún tipo de tratamiento térmico.

Thangapandian y Balasivanandha, 2015, son los únicos autores que reportan información sobre la geometría semiacanalada que emplean. Reportan 30° y 5 mm como ángulo y ancho del diente, respectivamente; para los dos dados de la herramienta y sin radio de curvatura.

1.9 Método de Simulación por Elementos Finitos

En la actualidad la aplicación de un método de investigación aún a pequeña escala debe ser precedida siempre que proceda de una simulación en aras de minimizar los gastos de experimentación. La aplicación de un procedimiento del Método de Deformación Plástica Severa es uno de los casos en que es posible adelantar el comportamiento experimental por medio de simulaciones, para las que en la actualidad es conveniente la aplicación del Método de Elementos Finitos.

El Método de Elementos Finitos es hoy el principal método de simulación que se aplica dada su versatilidad, que permite la obtención de resultados acertados en diferentes tipos de procesos.

1.9.1 Simulación por Elementos Finitos. Potencialidades del *Software* DEFORM.

Según García (2009) la aparición en la industria de nuevos materiales, ha obligado a los fabricantes a replantear los procesos de diseño, dada la complejidad de tratamiento de

algunos materiales y al nivel de tolerancias que se exige. Un factor clave en el desarrollo de los componentes son los costes de diseño de los útiles de fabricación y la maquinaria necesaria, además del coste de los ensayos necesarios para lograr la obtención tanto de la pieza final como de los útiles y herramientas (generalmente los procesos se optimizan a partir de continuas pruebas y errores). Las empresas y centros de investigación se han dado a la búsqueda de procedimientos de reducción del número de ensayos, cuestión que resuelven las simulaciones por medio de *software* los que en el campo del diseño, se utilizaban principalmente en procedimientos de conformación clásicos como el doblado, embutido, etc. Y que hoy ya es posible extenderla al estudio de los materiales nanoestructurados.

El *software* DEFORM es un sistema ingenieril que se utiliza para el análisis de procesos complejos entre ellos la conformación de metales, tratamiento térmico, mecanizado, troquelado y uniones mecánicas. Se basa en algoritmos de solución con un procedimiento de elementos finitos no lineal y transitorio, con un mallado optimizado y automático. Este *software* provee un ambiente virtual de pruebas que permite evaluar la producción en la computadora en lugar de en la empresa (Aguilera, 2014; Scientific Forming Technologies Corporation, 2011).

Martínez (2011) refiere que las compañías usan DEFORM para diseñar herramientas con una vida más prolongada al diseñar el proceso para que induzca menores tensiones en las mismas. DEFORM puede ahora incluir el ciclo completo de manufactura. Esto incluye desde la producción de la materia prima, el conformado, tratamiento térmico, mecanizado, distorsión en el mecanizado e instalación del producto.

1.9.2 Simulación por Elementos Finitos. Aplicaciones en los procedimientos de la Deformación Plástica Severa.

Aunque no es muy común el empleo de los métodos de simulación aplicado a los procedimientos del Método de Deformación Plástica Severa, de modo que se prefieran las técnicas experimentales para la determinación de resistencia, dureza y granulometría, ya sea por medio de ensayos de tracción, dureza o por microscopía óptica de barrido, se encuentran casos como el trabajado por Shabany Vajd en 2014. En este se utiliza el Método de Elementos Finitos para analizar el comportamiento de la deformación de la aleación de aluminio Al - Mg durante la aplicación de la Presión en Superficie Restringida mediante el *software* ABAQUS. Para ello utilizan un modelo bidimensional basado en el criterio de deformaciones y analizan la distribución de las deformaciones plásticas equivalentes obtenida en la simulación de la muestra después de cada pasada de corrugación y estiramiento. Comprueba que tras dos ciclos de deformación el factor de homogeneidad no aumenta en relación con el aumento de la deformación plástica, por otra parte al girar la lámina tras cada ciclo se aprecia una mejora en la distribución de las deformaciones.

1.10 Mecanismos de endurecimiento.

Es innegable que la estructura es un factor primordial para definir el comportamiento mecánico de los sólidos. Este parámetro depende de la composición química y los procesamientos térmicos y mecánicos posteriores, entre los que se incluyen fundición, sinterización, trabajado en caliente, y tratamientos térmicos. Estas etapas de la producción afectan las propiedades mecánicas debido a su efecto en el tamaño de grano, gradientes de

concentración, inclusiones, huecos, fases metaestables, fases dispersas y otros tipos de imperfecciones cristalinas (Denoso, 2015).

Debido a que la deformación plástica corresponde al movimiento de un número de dislocaciones, la capacidad de un metal para deformarse plásticamente depende de la capacidad de las dislocaciones para moverse. Puesto que la dureza y la resistencia están relacionadas con la facilidad con que la deformación plástica puede ocurrir, la resistencia mecánica se puede aumentar reduciendo la movilidad de las dislocaciones. Virtualmente todas las técnicas de endurecimiento se basan en este principio: la restricción y el impedimento del movimiento de las dislocaciones convierte el material en más duro o más resistente (Callister, 1995).

Entre los mecanismos de endurecimiento existente están: endurecimiento por temple, endurecimiento por reducción del tamaño del grano, endurecimiento por solución sólida y endurecimiento por precipitación, endurecimiento por deformación en frío. De estas se analizarán el endurecimiento por afinamiento del grano y endurecimiento por deformación en frío.

1.10.1 Endurecimiento por reducción del tamaño del grano.

El endurecimiento por afino del grano (también denominado “de Hall-Petch”) es consecuencia de que los bordes de grano actúan como una barrera infranqueable para el movimiento de las dislocaciones, y que el número de dislocaciones dentro de un grano, afecta a cómo éstas pueden transmitir su efecto a granos vecinos a través de los bordes. El

tamaño de grano de un material depende del tratamiento térmico posterior a la deformación plástica, o bien de la velocidad de solidificación (Denoso, 2015).

El borde de grano actúa como punto de fijación, impidiendo la propagación de las dislocaciones. Por un lado, la estructura reticular de los granos adyacentes difiere en la orientación, por lo que se requeriría más energía para cambiar de dirección de deslizamiento. Además, el límite de grano es una región desordenada con campos de tensión muy elevados. Cuando varias dislocaciones que se mueven en un sentido, por efecto de un esfuerzo aplicado, se encuentran con esos campos elásticos y se detienen cada vez a mayor distancia provocando un apilamiento de las mismas. Esto aumenta la tensión interna acumulada y obstaculiza el inicio de la elasticidad, aumentando la resistencia a la fluencia del material (Denoso, 2015, Callister, 1995).

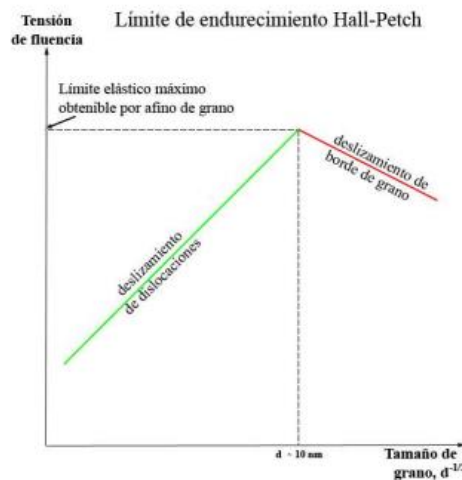


Figura 1.5. Influencia del tamaño del grano en el endurecimiento.

La relación entre el tamaño de grano y la tensión de fluencia, está dada por la ecuación de Hall-Petch (1.4). No existen materiales infinitamente fuertes; este modo de endurecimiento

tiene un límite. Los granos pueden variar aproximadamente entre 100 μm (granos grandes) y 1 μm (granos pequeños). Por debajo de este valor, el tamaño de las dislocaciones se aproxima al del grano; en uno de 10 nm sólo puede contenerse una o dos dislocaciones, evitándose el apilamiento. En este caso, como se observa en la Figura 1.5, la tensión aplicada induce al deslizamiento de los bordes, resultando en una disminución de la resistencia del material (Denoso, 2015, Callister, 1995).

1.10.2 Endurecimiento por deformación plástica en frío

El endurecimiento por deformación plástica en frío es el fenómeno por medio del cual un metal dúctil se vuelve más duro y resistente a medida que es deformado plásticamente. Generalmente a este fenómeno también se le llama trabajo en frío, debido a que la deformación se da a una temperatura “fría” relativa a la temperatura de fusión absoluta del metal (Askeland and Phulé, 2003). El porcentaje de trabajo en frío se define como:

$$\text{Porcentaje de trabajo en frío} = \frac{A_0 - A_d}{A_0} \cdot 100 \quad 1.6$$

donde: A_0 es el área transversal del material antes de la deformación y A_d es el área transversal del material después de ser deformado.

La resistencia del material aumenta al aumentar el porcentaje de trabajo en frío, sin embargo la ductilidad del material disminuye (Askeland and Phulé, 2003).

El fenómeno de endurecimiento por deformación se explica así: el metal posee dislocaciones en su estructura cristalina; cuando se aplica una fuerza sobre el material, las dislocaciones se desplazan causando la deformación plástica; al moverse las dislocaciones,

aumentan en número; al haber más dislocaciones en la estructura del metal, se estorban entre sí, volviendo más difícil su movimiento; al ser más difícil que las dislocaciones se muevan, se requiere de una fuerza mayor para mantenerlas en movimiento; se dice entonces que el material se ha endurecido. (Askeland and Phulé, 2003, Callister, 1995).

Distintos metales tienen diferente capacidad para endurecerse cuando se deforman plásticamente. Esa habilidad de endurecerse se mide con el coeficiente de endurecimiento por deformación (n). Entre mayor es n para un metal, más se endurece al ser deformado plásticamente (Callister, 1995).

El trabajo en frío no solo causa un aumento de las dislocaciones en la estructura del metal, sino que también causa la deformación de sus granos. La combinación de los granos deformados con el aumento de las dislocaciones causa esfuerzos residuales dentro del material. Los esfuerzos residuales no son más que zonas de tensión o compresión que existen dentro del material sin que sean generados por fuerzas externas. Los esfuerzos residuales pueden causar el debilitamiento del material, haciendo que falle a esfuerzos aplicados menores a su resistencia nominal (Callister, 1995).

Durante la recuperación, alguna de la energía interna guardada en la deformación de la estructura cristalina es liberada a causa del movimiento de las dislocaciones como resultado de la difusión atómica. Existe alguna reducción en el número de dislocaciones y la configuración de estas cambia de modo que poseen bajas energías de deformación. Además, algunas propiedades físicas como la conductividad eléctrica y térmica se recuperan a los valores previos a la deformación (Callister, 1995).

El proceso de recristalización implica la nucleación y crecimiento de nuevos granos libres de deformación con el fin de reemplazar la microestructura deformada o recuperada. La recristalización de la microestructura deformada es a menudo llamada recristalización primaria con el fin de distinguirla del proceso de crecimiento anormal del grano que puede ocurrir en un material completamente recristalizado y que a veces se llama recristalización secundaria (Higuera Cobos, 2013).

La recristalización ocurre por dos mecanismos principales: un núcleo aislado puede expandirse dentro de un grano deformado, o un límite de grano de ángulo alto puede emigrar a una región más deformada del metal. En cada caso, la estructura del lado cóncavo del límite que se mueve está libre de deformación y tiene una energía interna relativamente baja, mientras que la estructura del lado convexo de la interfaz que se mueve está altamente deformada y presenta una gran densidad de dislocaciones y una energía interna alta. Por lo tanto, el crecimiento de un nuevo grano en expansión durante la recristalización primaria conduce a una disminución global en la energía interna del metal por la sustitución de regiones deformadas por regiones libres de deformación (Humphreys and Hatherly, 1996).

Después de la recristalización, los granos libres de deformación continuarán creciendo si el metal se mantiene a la temperatura elevada. Este fenómeno es llamado crecimiento de grano. El fenómeno de crecimiento del grano ocurre debido a que a medida que el grano crece, disminuye la energía total almacenada en el material (Callister, 1995).

Las propiedades mecánicas a temperatura ambiente de un metal con tamaño de grano pequeño son normalmente superiores a aquellos con tamaño de grano grande. Si la estructura del grano de una aleación monofásica es mayor que aquel que se desea, el

refinamiento puede realizarse por deformación plástica del material, y entonces sometiendo el material a un tratamiento térmico de recristalización, tal como se ha descrito.

1.11 Conclusiones parciales del capítulo.

Los materiales metálicos con altos valores de resistencia y dureza son de una demanda creciente para su aplicación y en particular en un campo sensible como la osteosíntesis El titanio (Grado 2 y Grado 5, entre otros) son los materiales más utilizados en este campo, en tanto son biocompatibles y presentan elevada dureza y resistencia (el Grado 2 mayor biocompatibilidad y el Grado 5 mayor resistencia).

La Corrugación y Estiramiento Repetitivo de láminas se reporta en bibliografía reciente como un procedimiento de Deformación Plástica Severa, que genera cambios favorables en los materiales metálicos dados por la disminución del tamaño del grano y el aumento de la dureza, la que aumenta significativamente cuando el tamaño del grano cambia a escala nanométrica; situación que se asocia a la no aparición de micro grietas, en tanto son la causa de la disminución de la resistencia del material. Los parámetros con mayor influencia en la variación de la microestructura de la muestra y por ende de sus propiedades mecánicas son: el número de pasada, la velocidad de la deformación, el espesor de la muestra y la configuración geométrica de los dados corrugadores.

La geometría para el dado corrugador de la herramienta, más factible es el perfil semiacanalado. Las dimensiones de los dientes de los dados corrugadores que reportan varios autores en el Procedimiento de Presión en Superficie Restringida son 45° de ángulo y ancho y altura iguales al espesor de la lámina que procesan, tanto para el diente del

punzón como para la matriz, o sea holgura cero; criterios que rebasan en mayoría al de usar 30° de ángulo y 5 mm de ancho de diente igualmente con holgura cero en dados corrugadores para el Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo. En todos los casos trabajan los dientes sin radio de curvatura (radio de curvatura cero).

No se encontraron referencias sobre la aplicación del Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo a láminas de titanio, ni del uso de *softwares* de simulación a la aplicación de este procedimiento a otros materiales.

El Método de Elementos Finitos es hoy el principal método de simulación que se aplica dada su versatilidad, que permite la obtención de resultados acertados en diferentes tipos de procesos. Es el método en que se basa el software DEFORM que es uno de los sistemas de simulación de procesos más usados y que permite simular el procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo de una lámina metálica.

CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS.

En este capítulo se describen los materiales y métodos utilizados para la simulación, por el método de elementos finitos, del proceso de deformación plástica severa de láminas de titanio grado 2, mediante corrugado y estirado repetitivo.

2.1 Elaboración del modelo en AutoCAD y compatibilidad con DEFORM 3D.

En la Figura 2.1 se muestra la geometría de los dados corrugadores y sus dimensiones. En la figura 2.2 se muestra los dados planos paralelos. La elaboración del modelo en AutoCAD se realizó en tres dimensiones para así exportarlo con extensión SLT hacia el DEFORM 3D, como se muestra en la figura 2.3.

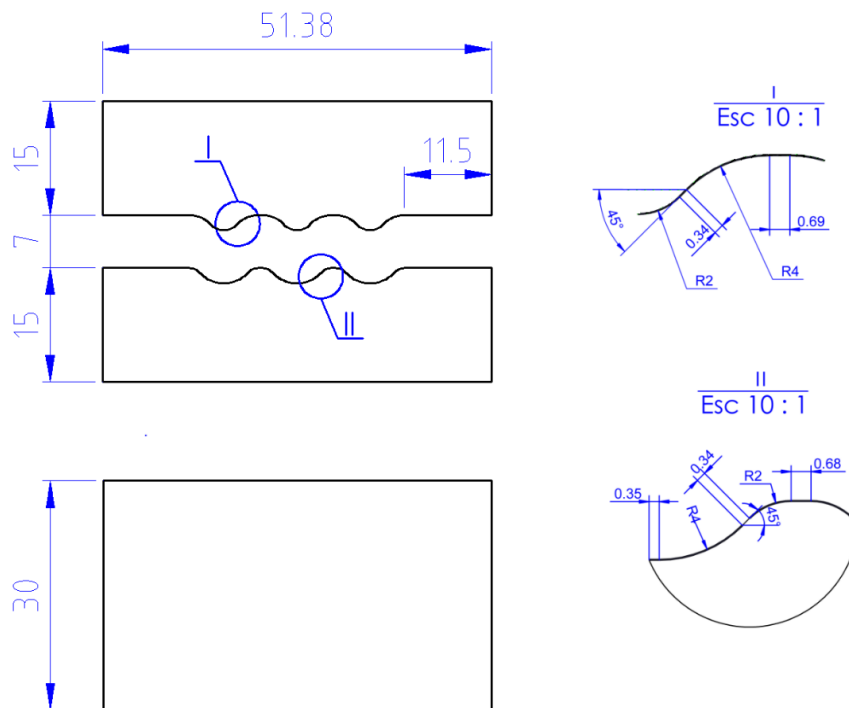


Figura 2.1. Esquema de los dados corrugadores.

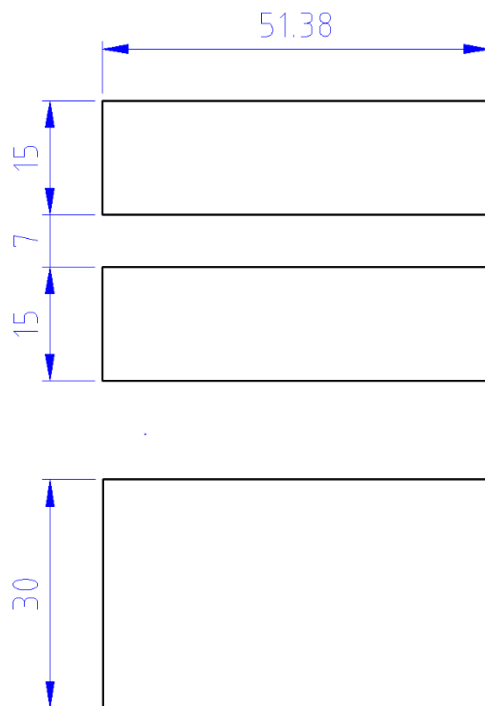


Figura 2.2. Esquema de los dados planos.

2.2 Geometría de la herramienta.

Fue obtenida la variante óptima de parámetros geométricos de la herramienta que se requiere para aplicar la SPD por el Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo a láminas de Titanio Grado 2, a partir de la aplicación del Método de Elementos Finitos con el uso del software de simulación DEFORM, donde realizó 27 simulaciones de corrugación y estiramiento de láminas de Titanio Grado 2, según el Diseño Factorial Completo que se aplica (3^3), donde los factores o variables y niveles que se trabajan son; Ángulo: máximo (50°), medio (45°) y mínimo (40°), Ancho: máximo (6 mm), medio (4 mm) y mínimo (2 mm) y Radio: máximo (2 mm), medio (1 mm) y mínimo (0 mm), información aplicable a la construcción de la herramienta a utilizar en la etapa experimental

con el consiguiente ahorro de tiempo y recursos en la misma (Cruz, 2017), dichos parámetros se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Valores de las variables de diseño de la herramienta que se propone (Cruz, 2017)

Símbolo	Variable de Diseño	Valor	Unidad	Símbolo
A_p	Ángulo del diente del punzón	45	grados	($^{\circ}$)
A_m	Ángulo del diente de la matriz	45	grados	($^{\circ}$)
B_{CP}	Radio de la cresta del diente del punzón	2	milímetros	mm
B_{PM}	Radio del pie del diente de la matriz	4	milímetros	mm
H	Holgura	2	milímetros	mm
C_{CP}	Ancho de la cresta del diente del punzón	2	milímetros	mm
C_{PM}	Ancho del pie del diente de la matriz	3.66	milímetros	mm
h_p	Altura del diente del punzón	2	milímetros	mm
h_m	Altura del diente de la matriz	2	milímetros	mm
L	Mitad de la diferencia entre el ancho de la cresta del diente del punzón y ancho del pie de la matriz	0.83	milímetros	mm

Para elaborar el dibujo en tercera dimensión de los dados corrugadores se utilizó el software DEFORM, donde se realizó una operación de extrusión una vez se dibujó el perfil

de la herramienta en AUTOCAD y se exporta como una extensión SLT, para lograr la compatibilidad, debido a la complejidad de la herramienta.

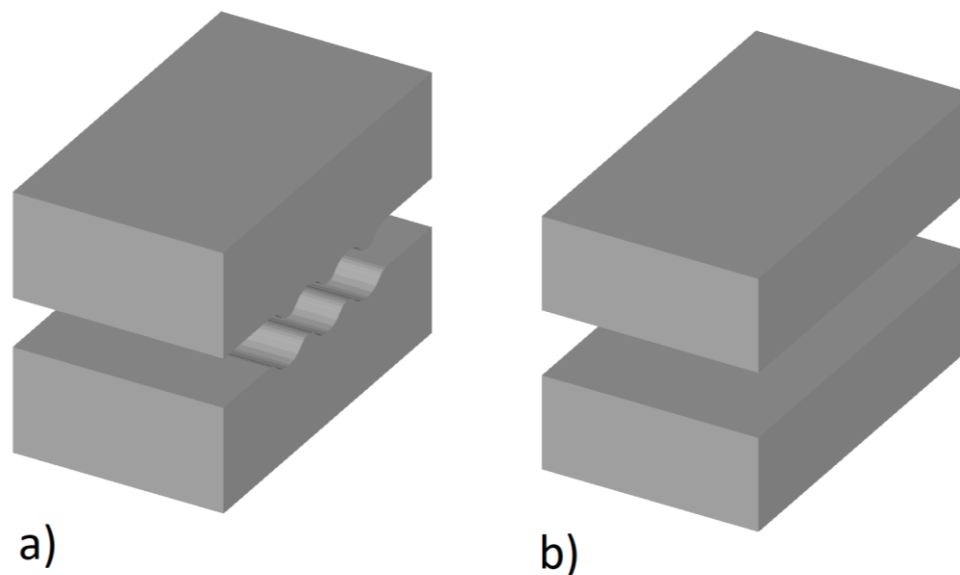


Figura 2.3 Modelos en DEFORM 3D. a) Dados corrugadores y b) Dados planos.

2.3 Propiedades de la aleación Titanio Grado 2.

Como propiedades mecánicas y composición química del titanio Grado 2 se tomaron las mostradas en las tabas 2.2 y 2.3, según (Aguilera, 2014).

Tabla 2.2. Porcentaje en masa de los elementos de la aleación del Titanio Grado 2.

C	O	N	H	Fe
0,1 máx.	0,25 máx.	0,03 máx.	0,015 máx.	0,3 máx

Tabla 2.3. Propiedades mecánicas del Titanio Grado 2.

Dureza Vickers, [HV]	145
Módulo de Young, [GPa]	105
Coefficiente de Poisson, [adim]	0.38
Resistencia al impacto, [J]	114-171
Módulo cortante, [GPa]	45
Emisividad, [adim]	0.3

2.4 Comportamiento de los cuerpos.

Las partes tienen diferentes características en el comportamiento que están compuestas por tres objetos de simulación dos que se comportarían como rígidos, los cuales serían, el punzón y la matriz y uno que es la placa, que se comportaría como cuerpo deformable elasto-plástico, siendo el modelo ofrecido por el software que más se asemeja a un proceso real de corrugación y estiramiento repetitivo.

2.4.1 Demostración en el software DEFORM.

Para la selección del comportamiento de los cuerpos tridimensionales a utilizar se deberá primeramente añadirlos al análisis. Posteriormente se seleccionan de manera individual su comportamiento como se muestra en la figura 2.4.

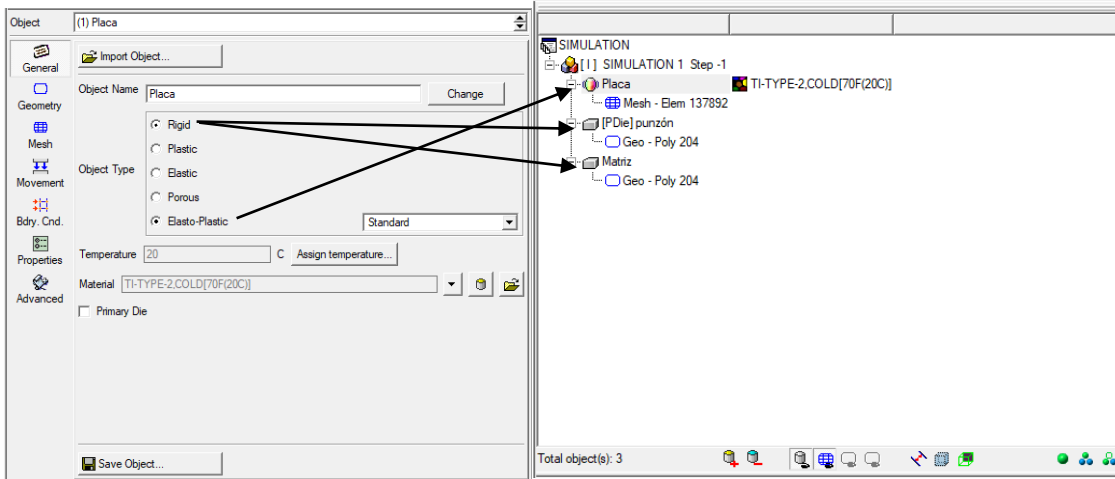


Figura 2.4 Selección del comportamiento de los tres cuerpos.

2.4.2 Selección del material en el software DEFORM.

Otras de las muchas bondades de este software es que viene incluida en el mismo una librería de materiales de la cual aplicamos a este análisis el Titanio grado 2 a una temperatura de laboratorio de 20°C, esta sería la temperatura bajo la cual va a ser deformada la placa de este material, por lo que durante la simulación esta se mantendrá constante. En la selección del titanio de grado 2 tenemos la posibilidad de ver dentro del mismo software los gráficos de tensión contra deformación a una temperatura constante de 20°C, mostrado en el gráfico de la figura 2.5.

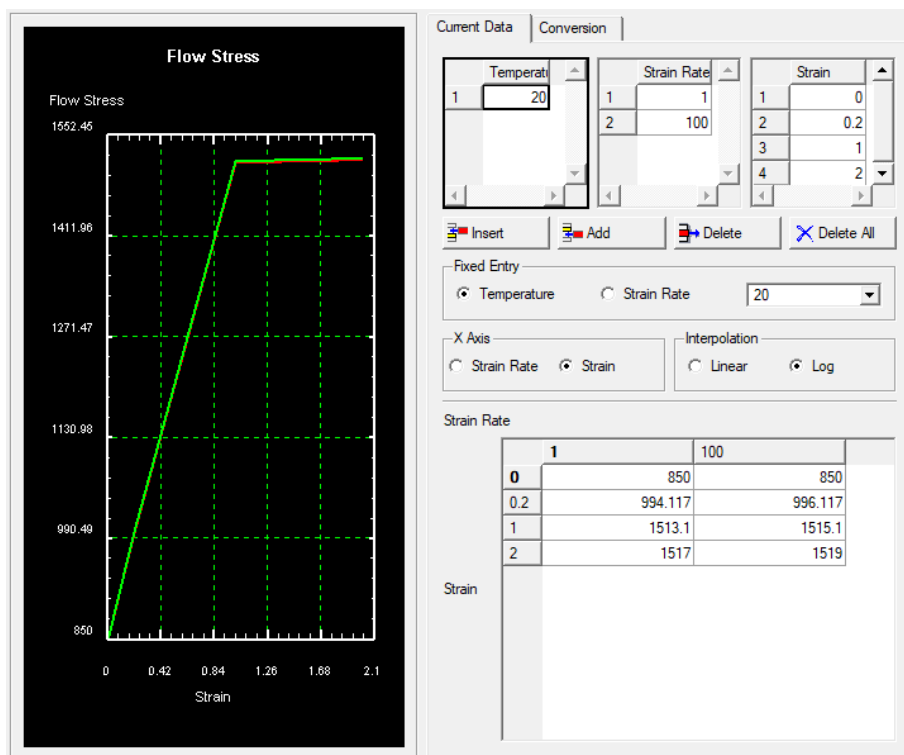


Figura 2.5 grafico de tensión contra deformación.

2.5 Condiciones de frontera y de cargas.

En la placa no se le aplicarán restricciones, estará apoyada encima y en el centro de la matriz a una distancia a 5 mm de las crestas del punzón para que su movimiento sea de deslizamiento entre los dientes del punzón y la matriz, esta tendrá una dimensión de 30mm de largo, 30mm de ancho y un espesor de 2 mm par.

El punzón estará ubicado a 7mm de la matriz y se le restringirá las rotaciones en todos los ejes y el desplazamiento en los ejes de coordenadas X y Y para que su movimiento sea en el eje Z. En el software esto es posible gracias a que solo debemos de introducir el eje en el cual queremos que el punzón haga el recorrido, que en nuestro caso sería el Z con una función de velocidad con respecto al tiempo como se muestra en la gráfica de la figura 2.6, aportada por el DEFORM.

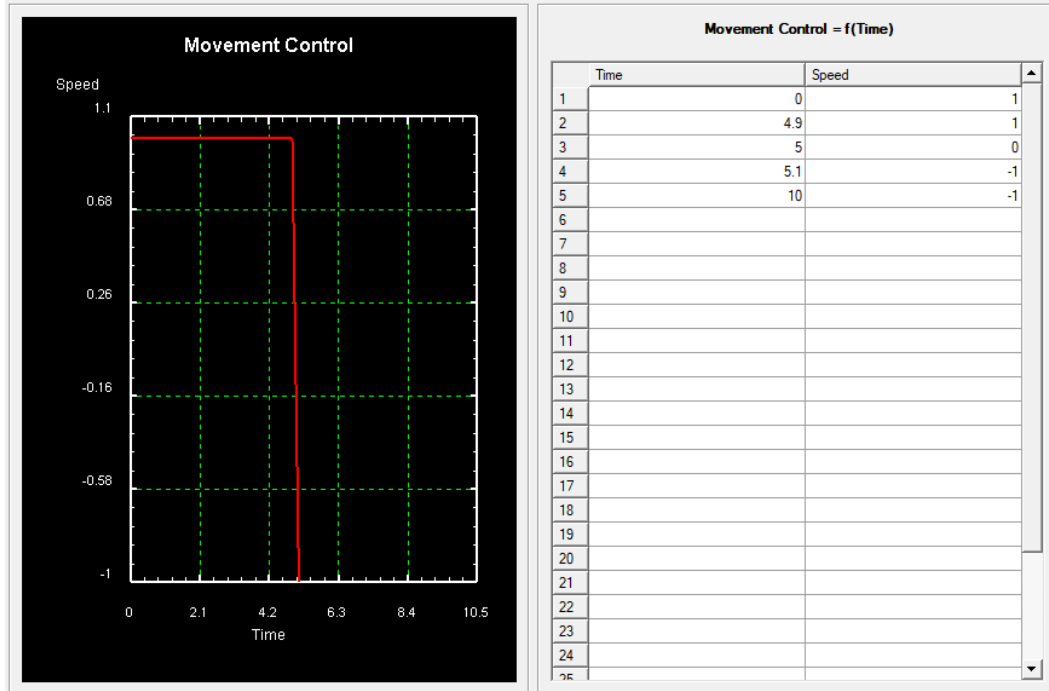


Figura 2.6. Grafica de movimiento del punzón.

La secuencia de movimientos de las herramientas comienza con el desplazamiento del punzón en un recorrido de 0,05 mm/paso, ya que son 100 pasos en un recorrido de 5 mm, introducido en el programa (ver figura 2.7).

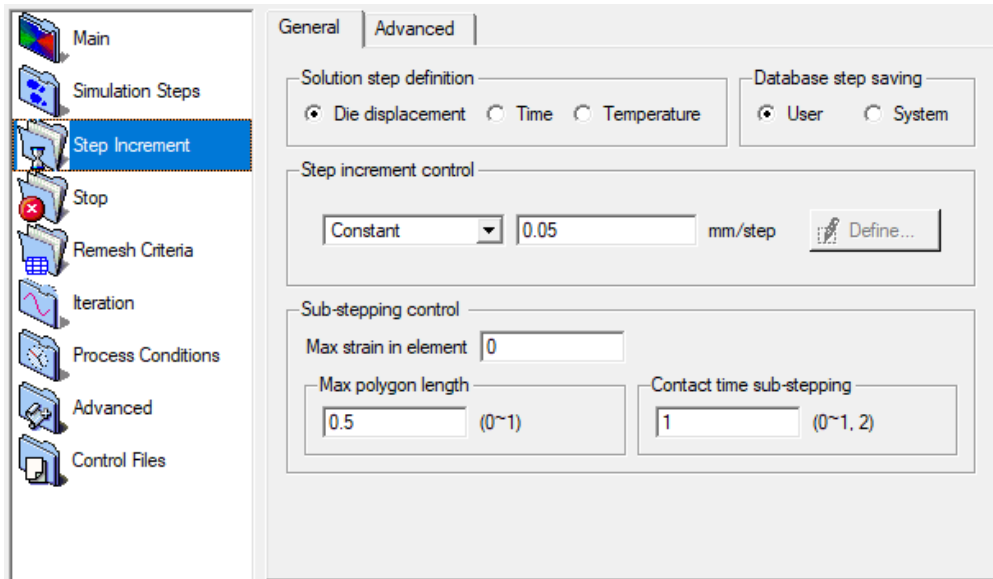


Figura 2.7. Valor del desplazamiento del punzón.

Este recorrido será en el eje Z (sentido negativo) a una velocidad constante V de 1mm/s hasta alcanzar el desplazamiento máximo del punzón que será de cinco milímetros, cambiando después el sentido del desplazamiento a positivo para que la herramienta se retire hasta su posición inicial, permitiendo así que no ocurra el aplastamiento de la placa lo cual sería desfavorable y permitiendo así analizar las tensiones residuales que quedarían en la placa.

La matriz le será restringido tanto el desplazamiento como la rotación en todos los ejes quedando todo el conjunto de condiciones de fronteara y de cargas como se muestra en la figura 2.8.

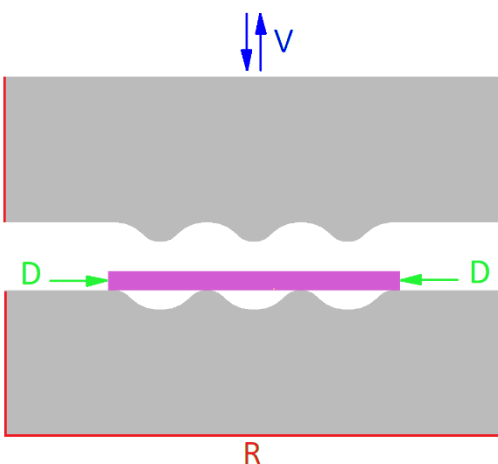


Figura 2.8. Parámetros que intervienen en el análisis.

2.6 Mallado del modelo.

El mallado, del programa nos brinda la posibilidad de utilizar dos tipos, el tetraédrico o el hexaédrico. La utilización del elemento tetraédrico en el mallado de la placa para esta simulación se debe a que nos brinda en un mismo espacio de mallado mayor cantidad de elementos lo que nos facilita la comprensión de los resultados así como mayor exactitud de los mismos.

Una vez definida y creada la geometría de la herramienta, se genera el mallado de la misma, la densidad de mallado que se utiliza es de 200000 para una longitud de la placa de 30 mm de largo, por 30 mm de ancho y 2 mm de espesor para un volumen 1800 mm^3 , un área superficial de 2040 mm^2 y una dimensión mínima de elemento de 0,1621mm. Esta densidad de mallado nos da una calidad de elementos de 267655 y 43504 nodos.

Hay que resaltar, como ya se dijo en el capítulo 1 que el DEFORM ofrece un remallado completamente optimizado y automático. Su generador de malla crea elementos más finos en las regiones más críticas y reduce los requerimientos de cómputo. En la figura 2.9 se muestra la placa mallada y una sección de la misma.

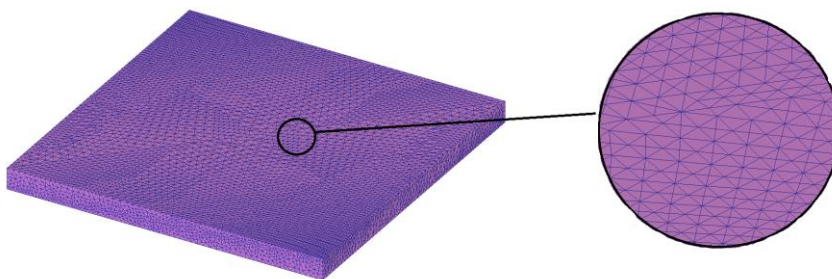


Figura 2.9. Placa con mallado tetraédrico y 267655 elementos.

2.7 Generación del contacto.

El contacto entre las partes se divide en dos, una interrelación entre el punzón-placa por la cara superior y matriz-placa por la cara inferior como se puede apreciar en la figura 2.10.

La definición de estos contactos los escoge el programa de manera automática pero en caso que no estén correctos se pueden utilizar los que queramos. Una vez que tengamos los pares de contactos tenemos que introducir como dato el coeficiente de fricción de 0,08 Coulomb.

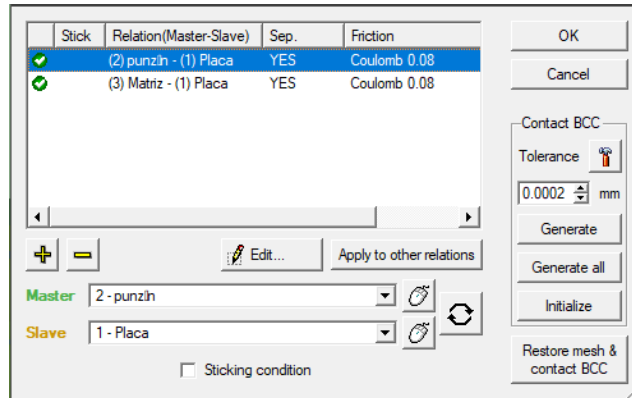


Figura 2.10. Pares de contactos.

También se pueden introducir otros valores como son la temperatura ya sea constante definida por la temperatura del titanio Grado 2 que se encuentra en la librería de materiales del DEFORM, o una temperatura variable con respecto al tiempo, la configuración de estos puntos en la placa y la matriz de manera inicial se pueden ver en la figura 2.11.

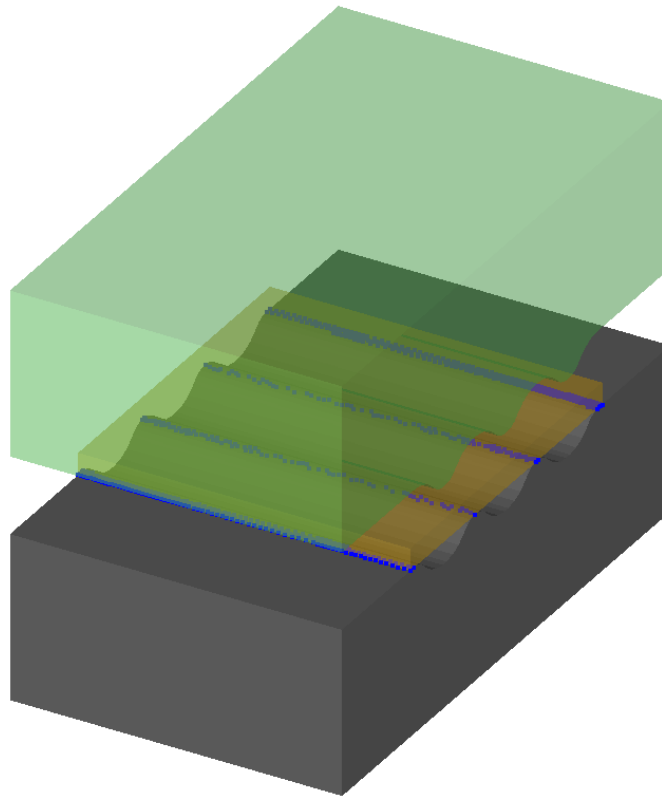


Figura 2.11. Dados deformadores y placa finales.

2.8 Proceso de estirado.

Para el proceso de estirado en la simulación se utilizan de igual manera que en el corrugado los mismos valores de coeficiente de fricción, la temperatura es de 20°C ya que el modelo del material es el mismo, las condiciones de fronteras y de cargas que se aplican son las mismas, solo son los parámetros de mayado, parámetros de contacto y las herramientas los que sufren cambios, pero no influyen en los valores a analizar.

2.8.1 Herramientas a utilizar.

Las herramientas que se utilizaran son las expuestas al principio del capítulo 2, el proceso comienza con cargar la base de datos anteriormente simulada en su último paso y posteriormente cambiar el punzón y la matriz del proceso de corrugado por las que vamos a utilizar en el proceso de estirado tal como se muestra en la figura 2.12.

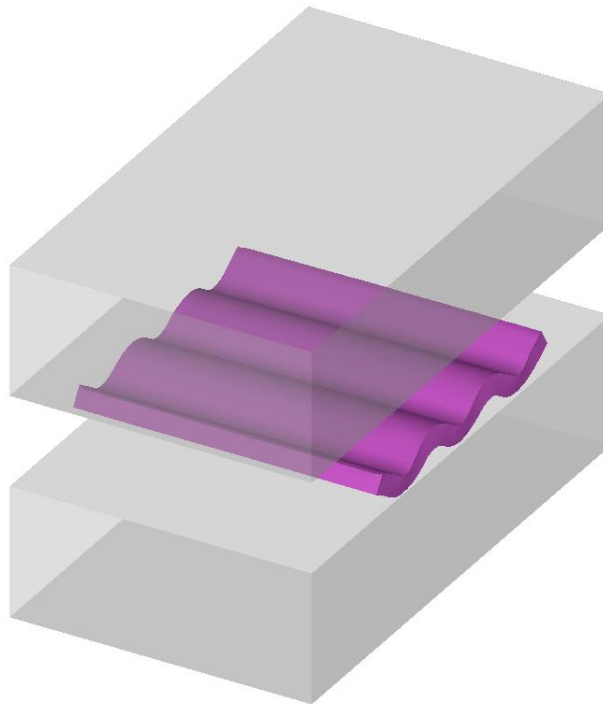


Figura 2.12. Matriz y punzón planos para el proceso de estirado.

2.8.2 Proceso de remallado de la placa en el proceso de estirado.

Al cargar la base de datos del proceso de corrugado es necesario aplicar un remallado en la placa para que sea posible un nuevo proceso de deformación en la misma. Este remallado que realiza el software DEFORM, después de reestructurar la malla, interpola los datos de la maya anterior lo que evita que se pierdan los resultados y continúen para el próximo proceso de estirado como se aprecia en la figura 2.13.

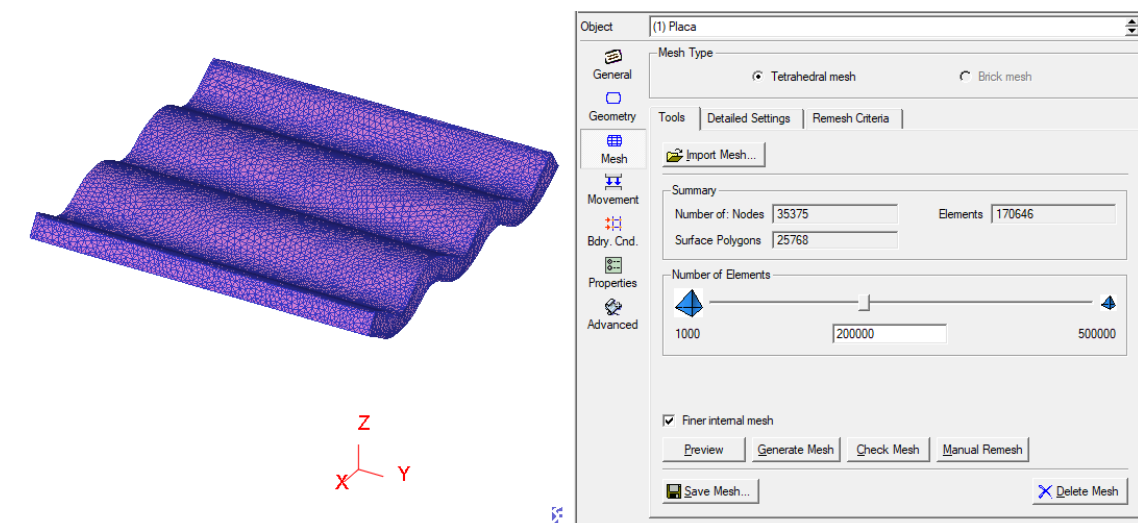
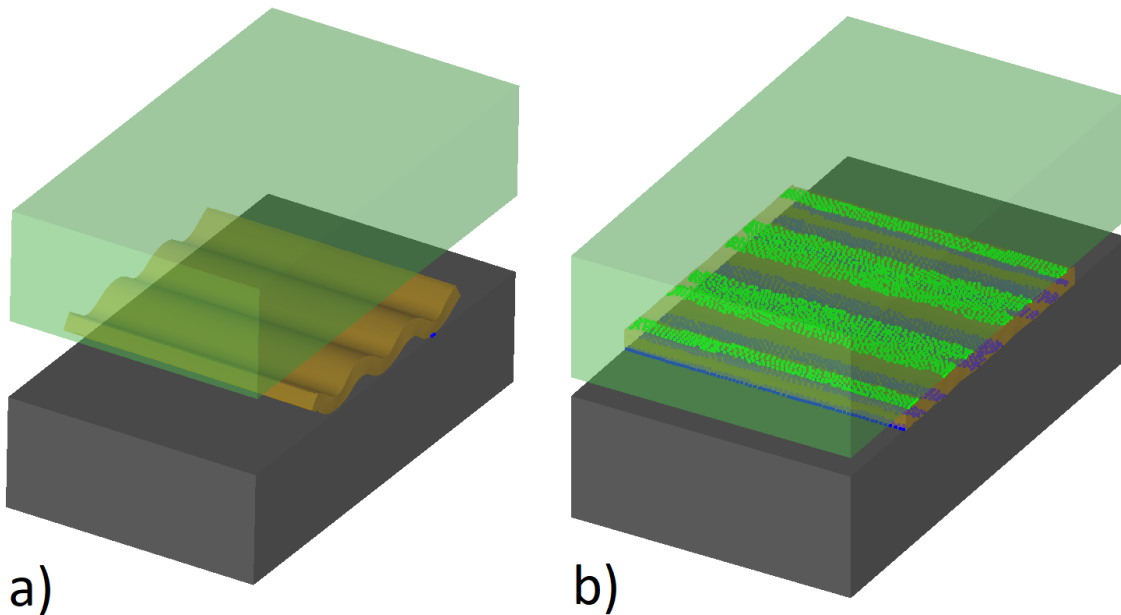


Figura 2.13. Matriz y punzón planos para el proceso de estirado.

Se genera el remallado de la misma, la densidad, longitud, volumen y área superficial es la misma, siendo solo diferentes la calidad de elementos que pasa de 137892 a 170646 y la cantidad de nodos que pasan de 29378 a 35375 siendo razonable que el proceso de corrugación y estiramiento repetitivo tiene como uno de sus objetivos la disminución del grano, que se demuestra en el aumento de los elementos de la placa, ya que por este proceso se generan nuevos elementos.

2.8.3 Generación del contacto en el estiramiento.

La generación del contacto es entre dos superficies una que es la placa que habrá pasado por el proceso de corrugado y otra es la superficie plana de la matriz, pasando a tener contacto con la superficie plana en el punto de desplazamiento máximo del punzón, que sería cuando este se encuentre a 2mm de la matriz, donde los puntos de color verde es el contacto con el punzón y los puntos azules el contacto con la matriz, como se puede apreciar en la figura 2.14.



a) b)
Figura 2.14. Contactos: a) contacto inicial, b) contacto en el punto de desplazamiento máximo.

2.9 Conclusiones parciales del capítulo

Al finalizar el presente capítulo, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones parciales:

1. Se han definido los modelos geométricos y las propiedades físico-mecánicas de los cuerpos involucrados en la simulación de la deformación plástica severa, mediante corrugado y estirado, de una placa de titanio grado 2.
2. Se han establecido los parámetros del proceso de simulación mediante el método de elementos finitos, del proceso la simulación de la deformación plástica severa, mediante corrugado y estirado, de una placa de titanio grado 2, considerando un comportamiento elastoplástico del mismo.
3. Se ejecutó la simulación, mediante el método de elementos finitos, de los procesos de corrugado y estirado de la placa de titanio grado 2.

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

En el presente capítulo, se analizan los resultados del proceso de deformación plástica severa de una placa de aleación de titanio grado 2, mediante corrugación y estiramiento, analizando la mejora obtenida en sus propiedades mecánicas.

3.1 Selección y medición de los parámetros estudiados.

Para la medición de las tensiones, las deformaciones, la producción de las tensiones tangenciales alternantes y la microestructura se utilizaron en la placa tres grupos de puntos ubicados en tres líneas (L1, L2 y L3) con 6 puntos cada una para un total de 18 puntos que coinciden con; una primera con el centro del contacto del diente superior con la placa, segunda, en el contacto del diente inferior izquierdo y tercera en el centro de las otras dos líneas, lugar donde ocurra las tensiones y las deformaciones más bruscas en la placa (Ver figura 3.1). Con la ubicación de estos puntos se obtienen valores de ellos en gráficos los cuales mostrarán qué valor toman esos puntos en el recorrido que realiza el dado en la deformación de la placa.

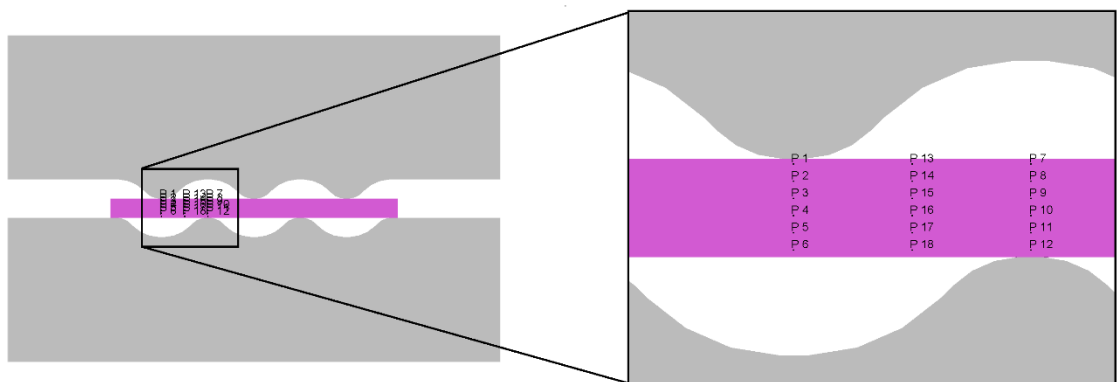


Figura 3.1. Ubicación de los puntos de referencia en la placa.

3.2 Comportamiento de las tensiones.

En este epígrafe se analizan los resultados de la aplicación del Método de Corrugación y Estiramiento Repetitivo a una lámina de Titanio Grado 2 con el uso del DEFORM como *software* de simulación, con vistas a determinar el comportamiento de las tensiones equivalentes, tensiones tangenciales alternantes y las tensiones residuales. Para esto analizaremos los valores de estas tensiones en el punto de contacto inicial y máximo de desplazamiento del punzón tanto cuando baja como cuando se retira, utilizando para esta medición los puntos que se encuentran ubicados en la placa.

3.2.1 Análisis del comportamiento de las tensiones equivalentes (efectivas).

Al analizar las tensiones equivalentes en el proceso de corrugado se pudo apreciar que en el primer contacto, al igual que en el resto del recorrido del punzón hasta el punto máximo de desplazamiento, las tensiones aumentan a medida que este hace el recorrido hasta alcanzar su punto máximo. En este momento la placa se encuentra en un estado tensional máximo por la acumulación de dislocaciones alrededor de toda la placa tanto en el proceso de corrugado como en el estirado, (ver figura 3.2) alcanzando los siguientes valores para los puntos ubicados en las líneas L1, L2 y L3 antes definidas (Tabla 3.1 y 3.2).

Tabla 3.1. Valores de tensión en el punto máximo de desplazamiento del punzón en el corrugado de la placa.

	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	<i>P5</i>	<i>P6</i>
L1	934	889	825	804	875	993
L2	1041	960	869	830	877	922
L3	908	928	978	987	950	920

Tabla 3.2. Valores de tensión en el punto máximo de desplazamiento del punzón en el estirado de la placa.

Tensiones	P1	P2	P3	P4	P5	P6
L1	1211	1035	901	970	1120	1215
L2	1280	1120	951	895	1026	1171
L3	1213	1058	1099	1099	1021	949

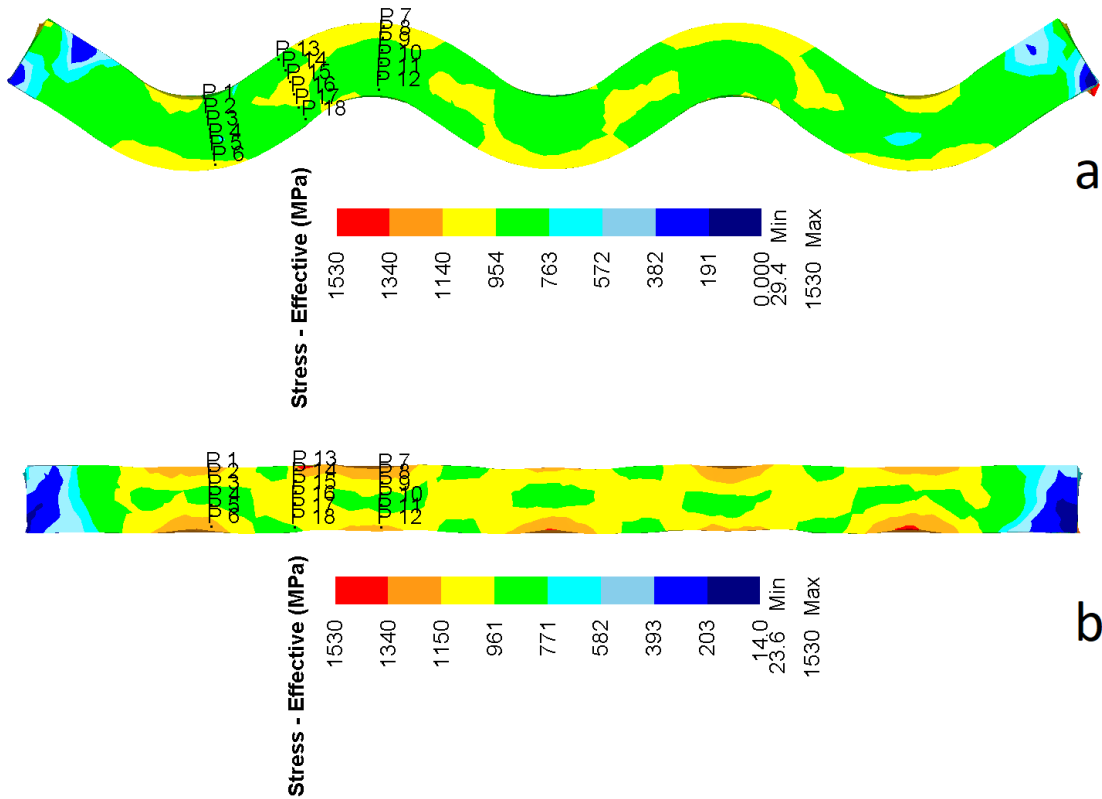


Figura 3.2. Estado tensional en el punto máximo de desplazamiento del punzón, a) corrugado y b) estirado.

Durante el proceso de retirada del punzón, desde su punto máximo de desplazamiento hacia su punto de partida se pudo apreciar que la placa pasa de un estado tensional crítico a un estado tensional liberado, debido a la retirada del punzón y con este la presión que ejercía, por lo que la placa se recupera, liberando parte de las tensiones que existían en la misma.

Esto se puede apreciar en los dos momentos del proceso, el corrugado y el estirado cuando el punzón vuelve al punto de partida, tal y como se muestra en la figura 3.3. Apreciándose valores de tensiones que oscilan alrededor de 511.896 MPa y 152.287 MPa, en el proceso de corrugado y 534.566 MPa a 202.466 MPa en el proceso de estirado, tomando como referencia los valores de los puntos ubicados en la placa (Tabla 3.3 y 3.4).

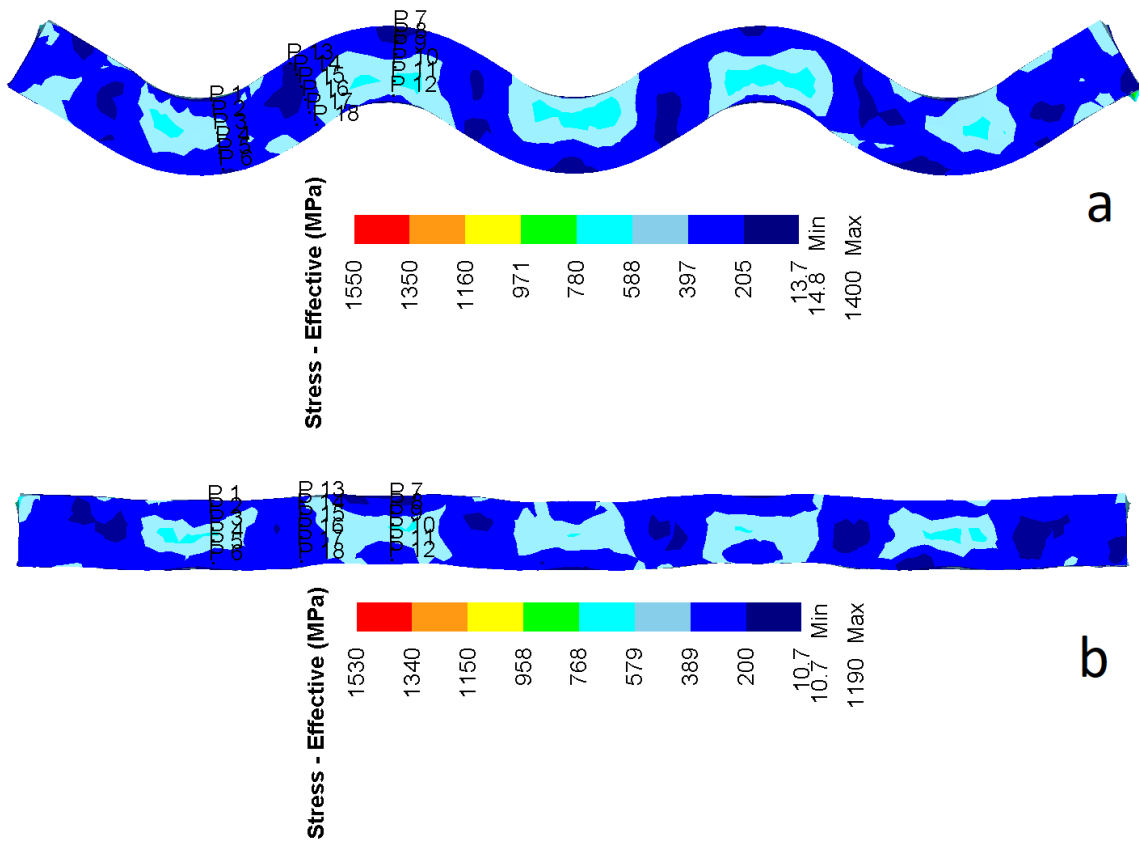


Figura 3.3. Estado tensional en el punto de retorno del punzón, a) corrugado y b) estirado.

Tabla 3.3. Valores de tensión cuando el punzón retorna al punto inicial en el corrugado de la placa.

<i>Tensiones Equivalentes</i>	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	<i>P5</i>	<i>P6</i>
L1	245	349	396	336	250	193
L2	217	219	305	491	512	363
L3	175	152	199	218	336	311

Tabla 3.4. Valores de tensión cuando el punzón retorna al punto inicial en el estirado de la placa.

<i>Tensiones Equivalentes</i>	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	<i>P5</i>	<i>P6</i>
L1	276	290	507	500	332	261
L2	202	307	535	486	294	319
L3	337	337	325	212	212	227

3.2.2 Análisis del comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes.

En cada uno de los cuatro momentos de la posición del punzón con respecto a la paca, las tensiones tangenciales alternantes poseen un comportamiento diferente en cuanto a su magnitud y a la posición que ocupa en el área del modelo. Tanto la magnitud como la posición van variando según se vaya produciendo el proceso de deformación de la placa. Las tensiones tangenciales alternantes surgen con el desplazamiento de los planos interatómicos, produciendo la disminución del grano.

En la figura 3.4.a, el proceso de corrugado de la placa, en el punto de desplazamiento máximo del punzón, las tensiones tangenciales alternantes toman valores entre 695 MPa

y -705 MPa, como valores máximos y mínimos, apreciándose que la homogeneidad no es la adecuada por la diferencia de tensiones en la placa. En el momento que el punzón se retira volviendo al punto de partida (Figura 3.4.a), se puede observar que las tensiones entre las cuales se mantiene la placa se encuentra entre 512 MPa y -528 MPa, apreciándose una disminución en las tensiones así como una mayor homogeneidad.

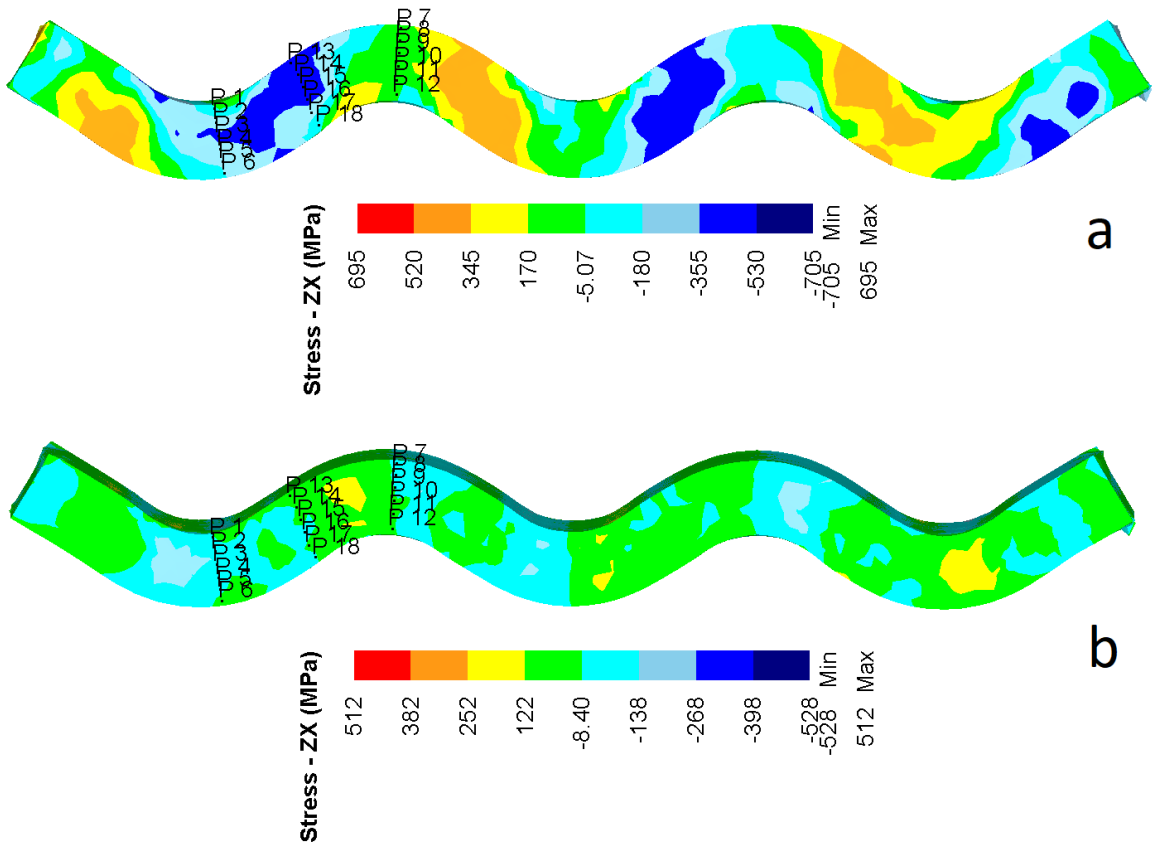


Figura 3.4. Relación de tensiones tangenciales alternantes en el corrugado, a) punto de desplazamiento máximo y b) punto de partida del punzón.

En el proceso de estirado de la placa el comportamiento es similar en el proceso de corrugado, solo existe un pequeño cambio de valores en el desplazamiento máximo del punzón tomando valores de 731 MPa y -679 MPa como valores máximos y mínimos

respectivamente y en desplazamiento del punzón a la posición inicial estos valores son de 482 MPa como valor máximo y -499 MPa como valor mínimo, apreciándose al igual que en el corrugado una mayor homogenización de la placa, esto se puede apreciar en la figura 3.5.

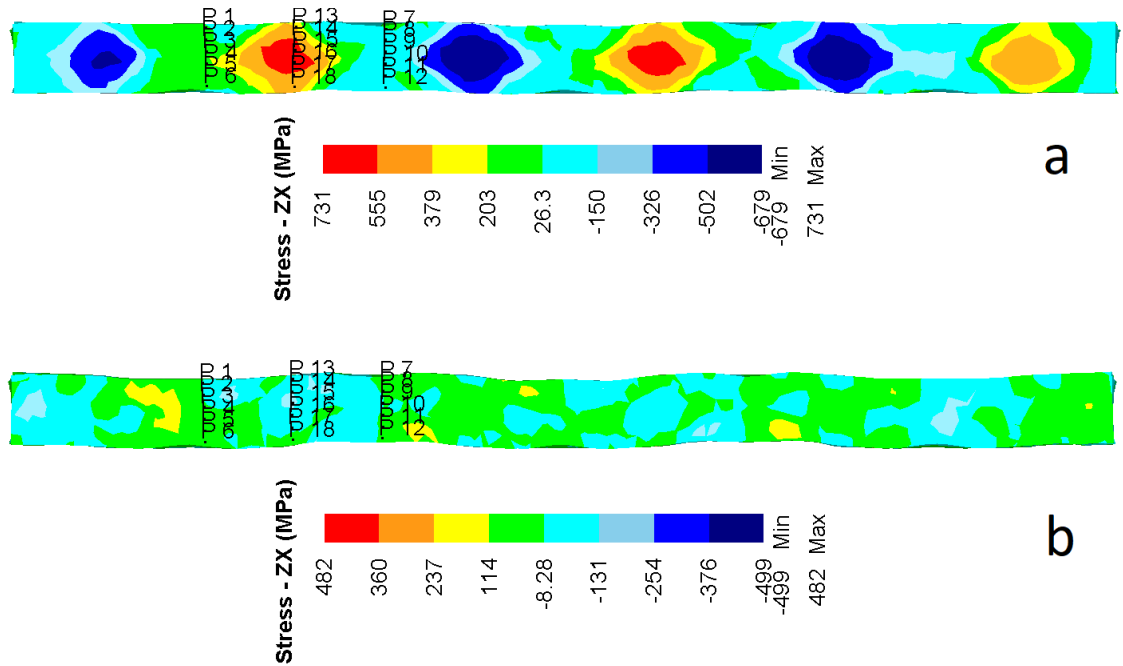


Figura 3.5. Relación de tensiones tangenciales alternantes en el estirado, a) punto de desplazamiento máximo y b) punto de partida del punzón.

3.2.3 Análisis del comportamiento de las tensiones residuales.

Durante el proceso de corrugado y estirado, en su primera etapa, que es cuando el punzón se desplaza de su punto de partida hasta el punto de desplazamiento máximo que es de 5 mm como se explica en el capítulo anterior, las tensiones efectivas van en aumento durante todo el proceso, no siendo de igual forma en la segunda etapa, que es cuando el punzón se desplaza desde la posición de desplazamiento máximo hasta su punto de partida.

El comportamiento de la placa en este caso, es que las tensiones van disminuyendo en la placa hasta hacerse constantes en el tiempo, (ver figura 3.6). Tomando como referencia los puntos antes expuestos utilizados para la medición de parámetros se puede observar en las tablas 3.3 y 3.4, los valores de tensiones residuales que permanecen en la placa después de concluida la segunda etapa del corrugado y el estirado como se puede apreciar en la figura 3.3.

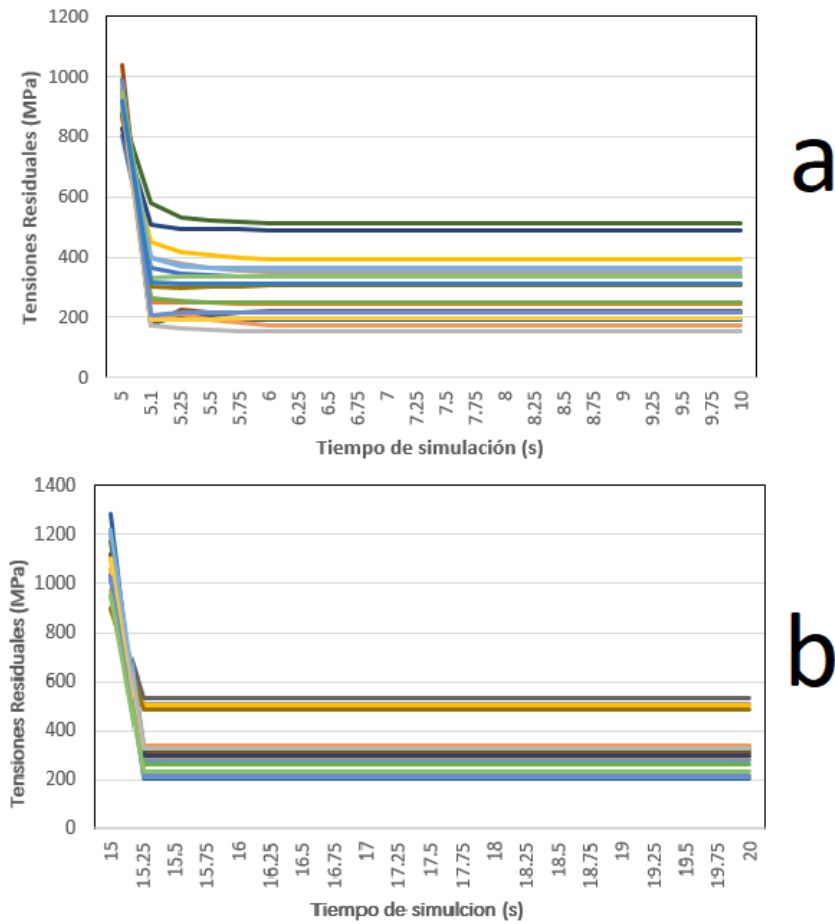


Figura 3.6. Gráficos de valores de tensiones residuales de las segundas etapas: a) corrugado y b) estirado.

3.3 Análisis de las deformaciones.

Las deformaciones remanentes en el proceso tratado están estrechamente relacionadas con el valor de las tensiones ya que son directamente proporcionales, lo cual quiere decir que a medida que aumenta una la otra también lo hará.

3.3.1 Deformaciones Von Misses.

En un análisis de deformaciones a la placa a través de los puntos ubicados en la misma, citados con anterioridad, se pudo apreciar que al estirar la placa las deformaciones en la placa se repartía con valores medios por toda la placa en el momento en que el punzón se encuentra en su punto máximo de desplazamiento pudiéndose observar los valores de deformaciones para las líneas L1, L2 y L3, los cuales oscilan entre 0,024 y 0,265 en el corrugado y 0,0512 y 0,203 en el estirado (ver tablas 3.5 y 3.6). Esto indica un aumento en la homogeneidad del material producto al movimiento de los planos interatómicos y de las dislocaciones, mostrándose en la figura 3.7 el estado de las deformaciones de la placa para estos dos momentos.

Tabla 3.5. Valores de deformación Von Misses cuando el punzón se encuentra en el punto máximo de desplazamiento en el corrugado de la placa.

<i>Tensiones Equivalentes</i>	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	<i>P5</i>	<i>P6</i>
L1	0.192195	0.090623	0.031706	0.114005	0.204464	0.265160
L2	0.246467	0.178583	0.095419	0.024013	0.065659	0.137049
L3	0.081320	0.107623	0.180134	0.190464	0.137916	0.093228

Tabla 3.6. Valores de deformación Von Mises cuando el punzón se encuentra en el punto máximo de desplazamiento en el estirado de la placa.

Tensiones	P1	P2	P3	P4	P5	P6
L1	0.071489	0.066570	0.061304	0.069266	0.090315	0.112063
L2	0.120643	0.061647	0.051197	0.073264	0.115962	0.148479
L3	0.202513	0.057275	0.078300	0.082236	0.060821	0.053739

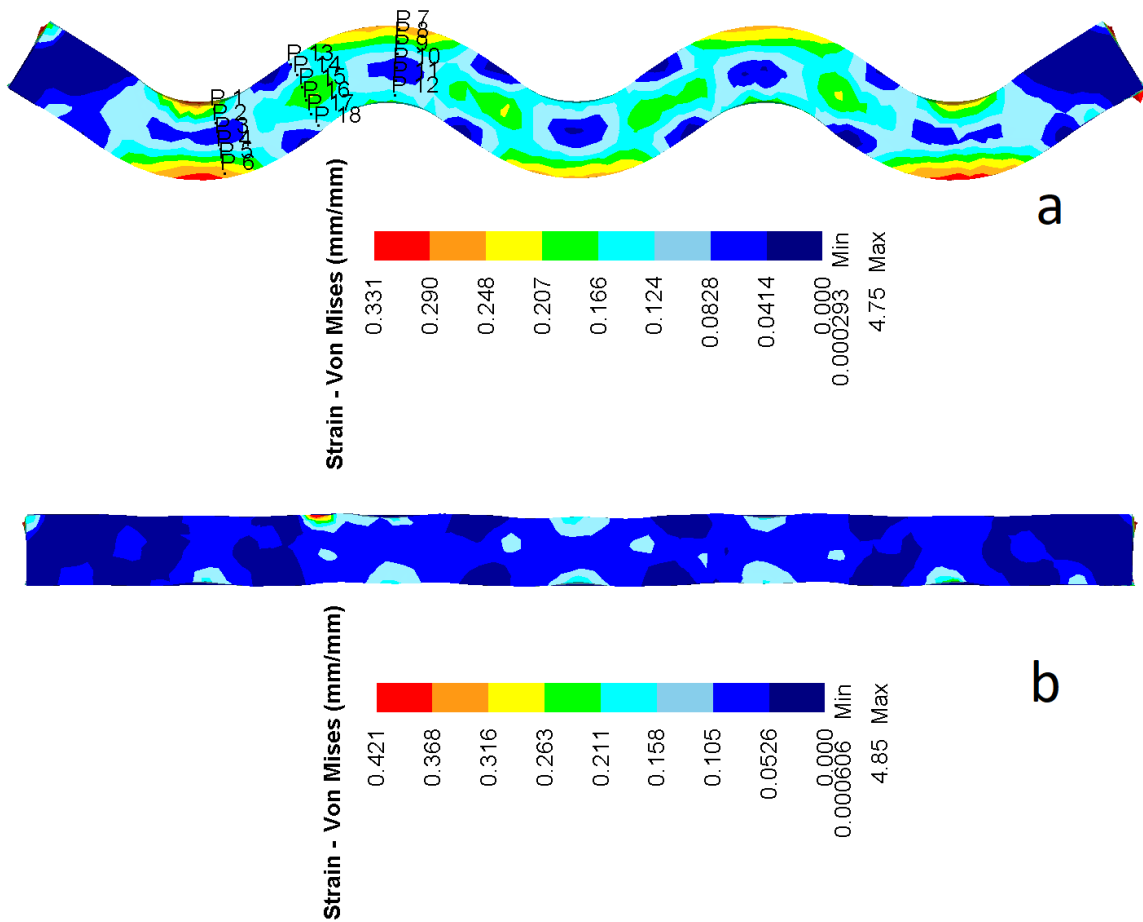


Figura 3.7. Estado de las deformaciones en el punto máximo de desplazamiento del punzón, a) corrugado y b) estirado.

En el momento que el punzón se retira hasta su punto de retorno la placa va liberando las tensiones , pudiéndose observar los valores de deformaciones para las líneas L1, L2 y L3,

los cuales oscilan entre 0,0218 y 0,258 en el corrugado y 0,0532 y 0,208 en el estirado (ver tablas 3.7 y 3.8). Esto indica un aumento en la homogeneidad del material producto al movimiento de los planos interatómicos y de las dislocaciones, propiciando un estado tensional y de deformaciones beneficioso para el mejoramiento de las propiedades del material (ver figura 3.8).

Tabla 3.7. Valores de deformación Von Misses cuando el punzón retorna al punto inicial en el corrugado de la placa.

	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	<i>P5</i>	<i>P6</i>
L1	0.186261	0.087317	0.028627	0.110210	0.198656	0.258044
L2	0.238081	0.171014	0.089899	0.021851	0.063656	0.132005
L3	0.074257	0.101898	0.173820	0.183454	0.132148	0.088803

Tabla 3.8. Valores de deformación Von Misses cuando el punzón retorna al punto inicial en el corrugado de la placa.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
L1	0.061413	0.060216	0.058474	0.070512	0.095358	0.118876
L2	0.124119	0.065778	0.053217	0.070881	0.108907	0.138501
L3	0.207938	0.057471	0.083438	0.089566	0.067894	0.059594

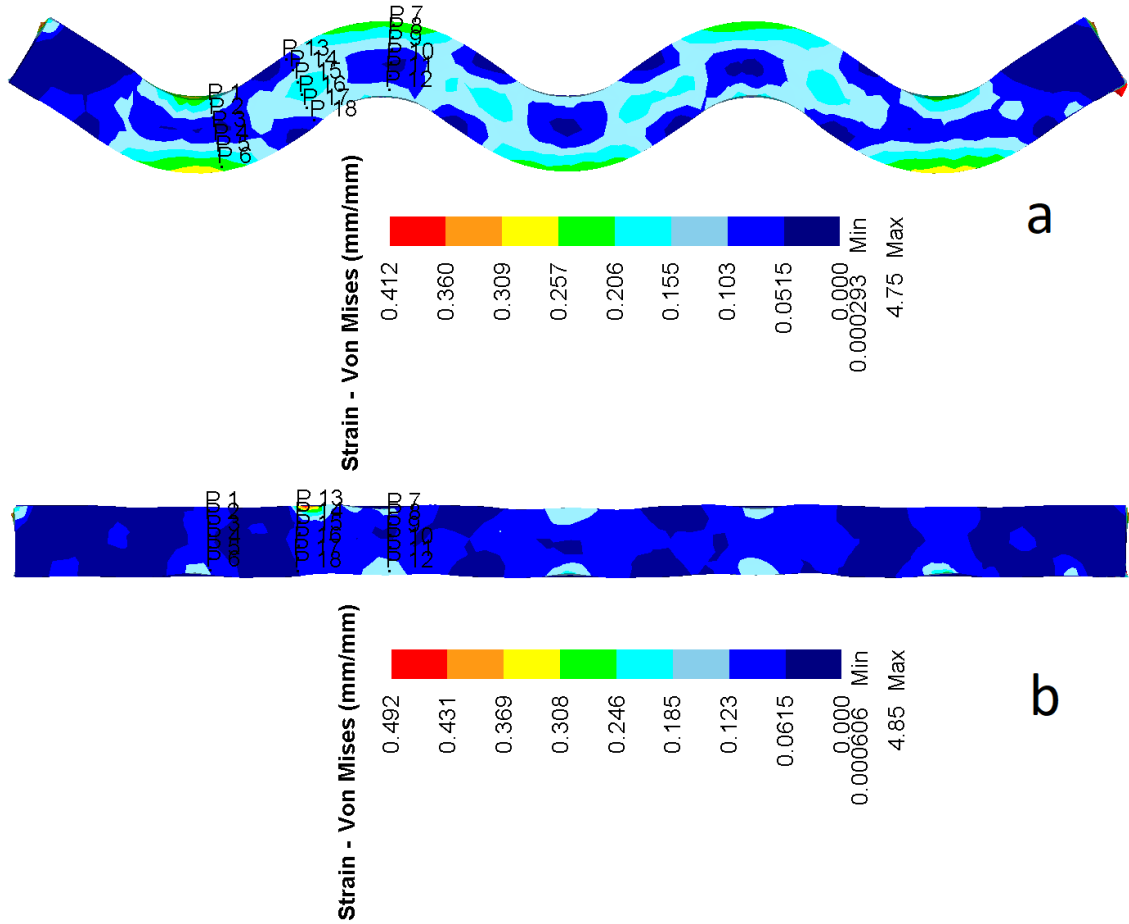


Figura 3.8. Estado de las deformaciones en el punto de retorno del punzón, a) corrugado y b) estirado.

3.3.2 Velocidad de deformación.

Los momentos en que el punzón se desplaza desde el punto de inicio, hasta su punto máximo de desplazamiento en la simulación tanto en la corrugación como en el estiramiento son los factibles para realizar el análisis ya que en el momento de retorno del punzón hasta su punto de partida la velocidad de deformación es despreciable con respecto a la que sufre la placa en la deformación. Teniendo en cuenta los puntos para el análisis de los resultados se pudo apreciar que en el estiramiento es donde hay mayor velocidad de

deformación producto al acomodamiento forzado a los que son sometidos los planos cristalográficos, siendo un poco menores en el corrugado (ver figura 3.9).

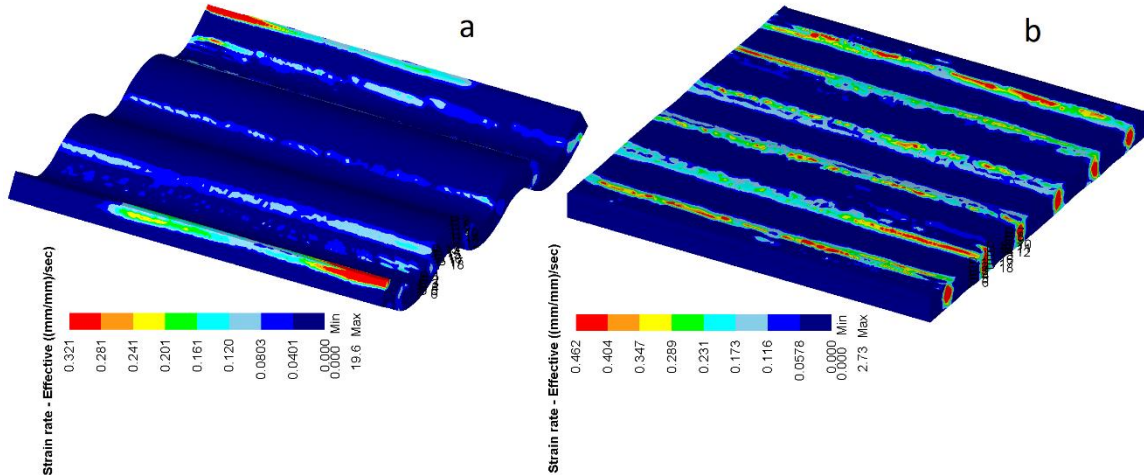


Figura 3.9. Comportamiento de la velocidad de deformación en el punto de desplazamiento máximo del punzón, a) corrugado y b) estirado.

3.4 Análisis del comportamiento de la microestructura.

Para el análisis del comportamiento microestructural tendremos en cuenta varios aspectos como el comportamiento del tamaño del grano, la orientación de los planos cristalográficos, el comportamiento de las fronteras de los granos. Aquí se pudo constatar la aparición de estructuras con tamaño de grano de alrededor 1 μm con mayor influencia en las zonas que sufren mayor cambio de dirección de la geometría. A pesar de no lograrse una estructura totalmente homogénea, por lo que no se obtienen las propiedades óptimas que se pudieran, se logra tener una mejora en cuanto a propiedades mecánicas se refiere.

Para el siguiente análisis se utilizarán tres puntos que coinciden con los puntos P3, P9 y P15 de las líneas L1, L2 y L3, los cuales tomaran los indicativos de P1, P2 y P3 ubicados en la superficie de la placa cercano al centro de la misma (ver figura 3.10).

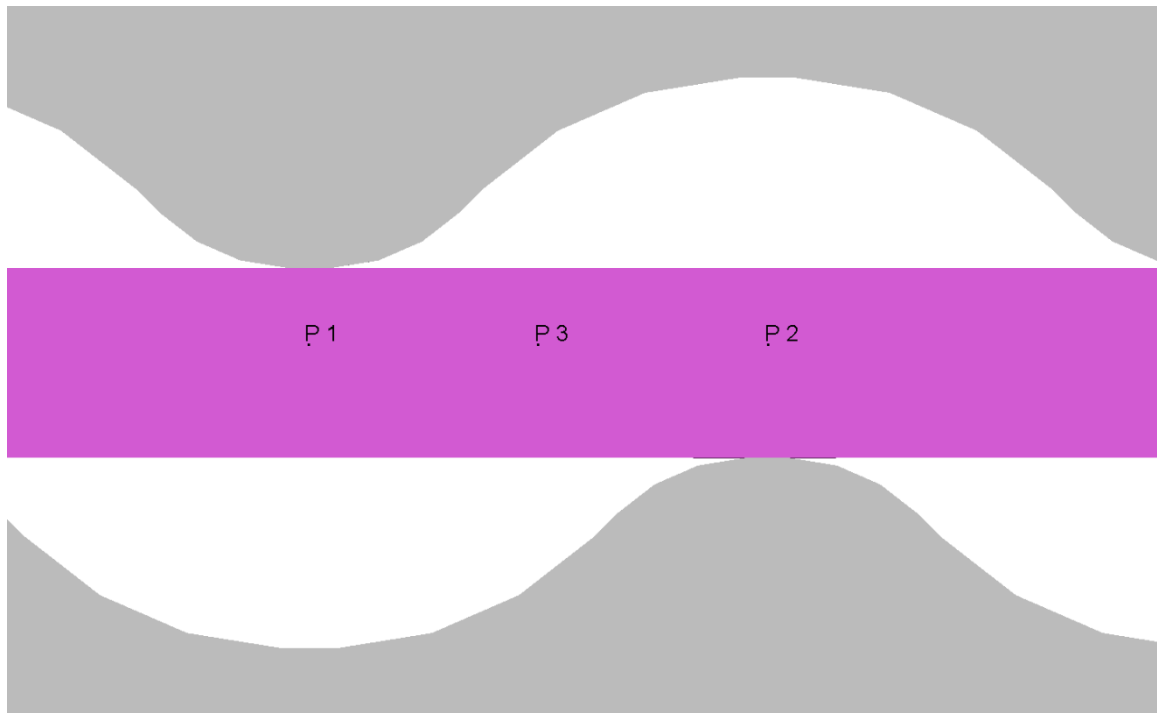


Figura 3.10. Ubicación de los puntos para el análisis de la microestructura.

3.4.1 Comportamiento del tamaño de grano.

Durante la investigación se constató que durante el proceso de deformación plástica severa la microestructura del titanio grado 2 sufre cambios en su microestructura como es la disminución del tamaño del grano hasta tamaños micrométricos, lográndose un material de propiedades diferentes al original.

Se pudo observar una disminución considerable del tamaño del grano en la zona donde ocurre la deformación, pero donde se logró mayor cantidad de granos micrométricos fue

donde ocurrieron las mayores deformaciones, y donde ocurren los cambios en la geometría de la pieza. En el presente trabajo se realiza una sola pasada por lo que se consigue una pequeña homogenización, no es la que se consideraría óptima por lo que se recomienda analizar las vías de deformación para lograr una homogenización óptima de la estructura cristalina. Esta disminución del tamaño del grano provoca un aumento en la dureza del material pues aumenta la densidad de dislocaciones y dado que la dureza se relaciona con el movimiento de las dislocaciones, al haber tantas, ellas se interfieren en su movimiento y al no poder desplazarse el material se torna más duro. Pero como no se logra con una pasada que todo el material quede con esta estructura micrométrica, el material no se torna tan frágil; lográndose así una mejora en las propiedades mecánicas que es lo que se pretende.

En la figura 3.11 se puede apreciar los gráficos para la primera etapa del corrugado y en la figura 3.12, la segunda etapa del estirado, en las cuales se puede observar el tamaño y la cantidad de grano en una superficie de $50 \times 50 \mu\text{m}$ alrededor de los puntos utilizados para el análisis. Los valores de tamaño de grano con respecto a la cantidad de granos con dicha dimensión, es favorable, demostrando un aumento en la cantidad y tamaño de los mismos.

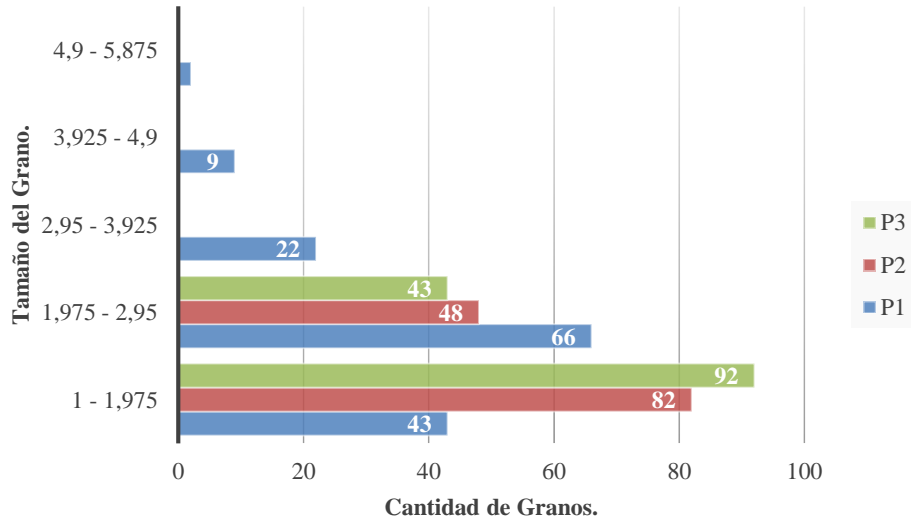


Figura 3.11. Valores de cantidad y tamaño de grano en la primera etapa del corrugado para los puntos P1, P2 y P3.

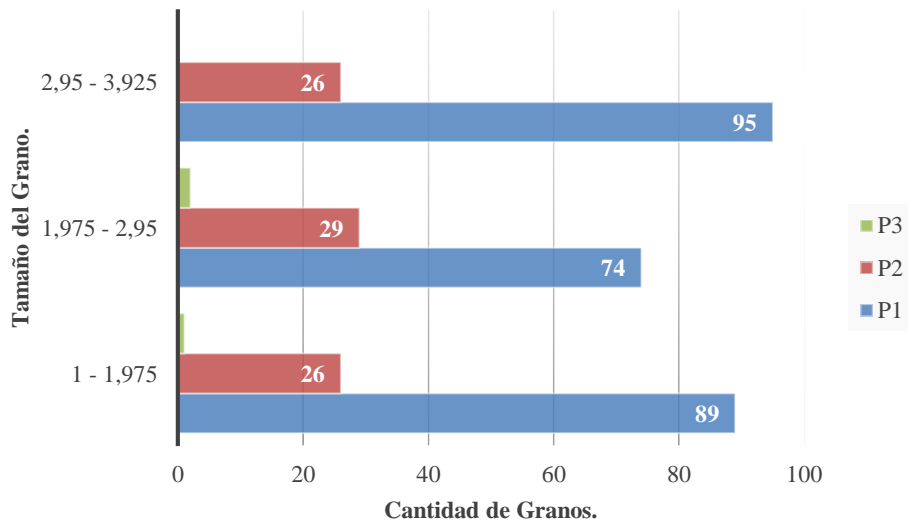


Figura 3.12. Valores de cantidad y tamaño de grano en la primera etapa del estirado para los puntos P1, P2 y P3.

En los gráficos de las figuras anteriores arrojo que en los puntos donde mayor movimiento de los granos hay es en los puntos P1 y P2, siendo estos los que se encuentran sometidos a

una mayor tensión y deformación ya que se encuentran ubicados en el accionar de los dientes del punzón.

3.4.2 Orientación cristalográfica de los granos.

Se aprecia en este proceso un cambio drástico en las orientaciones cristalográficas producto a los procesos de transformaciones que sufre el material. En los granos micrométricos surgidos producto del cizallamiento que sufre el material, los planos cristalográficos toman orientaciones muy variadas y diferentes proporcionando dureza y resistencia al material de acuerdo a lo planteado por (Callister, 1995), mientras que en las cercanías los granos se reorientan y toman la misma dirección cristalográfica, proporcionando flexibilidad al material, mejorando sus propiedades mecánicas al disminuir la fragilidad.

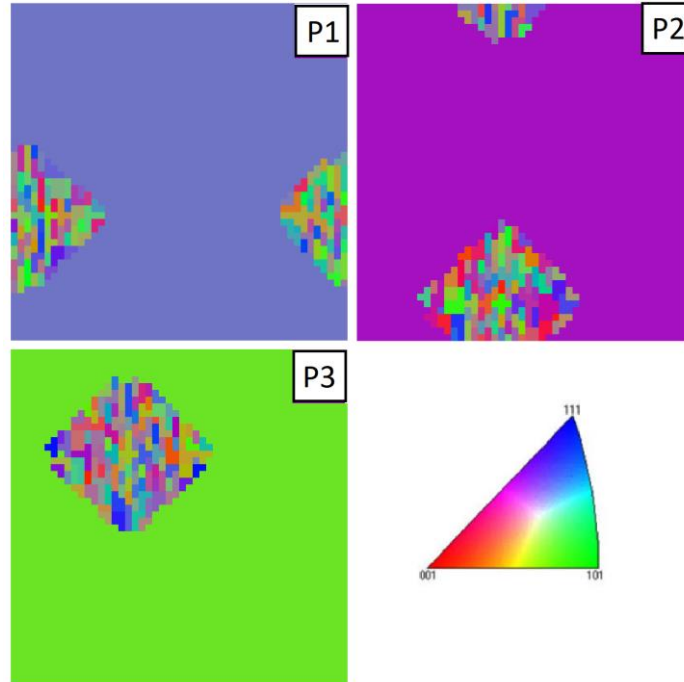


Figura 3.13. Valores de cantidad y tamaño de grano en la primera etapa del corrugado para los puntos P1, P2 y P3.

En la figura 3.13 se puede observar la orientación de los planos cristalográficos alrededor de los puntos P1, P2 y P3, apreciándose una disminución de los granos semejantes entre los tres puntos indicando homogeneidad, debido a la utilización de una configuración geométrica optimizada de los dados corrugadores, a pesar de haberse aplicado solamente una pasada. Además se aprecia una tendencia notable en el punto 1 a la orientación [111].

3.4.3 Relación entre las tensiones y la microestructura.

Como se aprecia, el comportamiento de la microestructura está directamente ligado a las tensiones que sufre el material. Estas tensiones están dadas por la geometría de la pieza; en los lugares donde ocurren los cambios de dirección de la geometría es donde se manifiestan en la placa tensiones alternantes, que producen un cizallamiento en el metal, provocando una disminución del tamaño del grano, un redireccionamiento de las direcciones cristalográficas de los mismos y un cambio en las propiedades mecánicas; dada la deformación plástica ocurrida y los efectos recién mencionados aumenta la densidad de dislocaciones interfiriéndose el movimiento de las mismas. Tras el estudio de la teoría de las dislocaciones, queda claro que la dureza y la resistencia de los metales están determinadas por la facilidad del movimiento de las deformaciones; por tanto se puede afirmar que este metal ha mejorado sus propiedades mecánicas a partir de este proceso de deformación plástica.

Por lo antes expuesto en el epígrafe 3.2.3 donde se analizó las tensiones residuales en la placa al retirarse el punzón, en esta quedan tensiones producto de los cambios en la microestructura y viceversa, lo que indica que al someter a la placa de titanio de grado 2 a tensiones, cuales quiera que fueran estas, estamos propiciando un mejoramiento de las

propiedades mecánicas del material, las cuales varían dependiendo del proceso que se le aplique. En el caso de la corrugación y el estiramiento repetitivo está estrechamente ligado al número de veces que apliquemos este proceso y de la posición de la placa para así lograr una mayor homogeneidad en la placa.

3.4.4 Relación entre la deformación y la microestructura.

Analizando el comportamiento del material en los puntos tomados para el estudio, se observa que en los lugares donde ocurren los cambios en la geometría, dígame en el centro de los dientes, es donde ocurren las mayores deformaciones y donde sufre el material las mayores tensiones, siendo en esta zona donde se obtiene también mejor microestructura ya que esta presenta mayor homogeneidad y menor tamaño del grano. En los lugares donde no ocurren tales deformaciones de esa magnitud, el proceso no es tan efectivo como pudiera desearse, es por esto que se debe continuar investigando para lograr una homogenización óptima de la microestructura.

3.5 Conclusiones parciales del capítulo

Al finalizar el presente capítulo se ha arribado a las siguientes conclusiones parciales que resumen sus resultados:

1. A través de la simulación mediante el método de elementos finitos, se ha determinado el estado tensional, de la placa de titanio grado 2, durante el proceso de deformación plástica severa. Se han analizado las tensiones equivalentes, las tensiones alternantes y las tensiones residuales.

2. Se realizó un análisis del comportamiento de las deformaciones y velocidades de deformación, que tuvieron lugar durante el proceso simulado de deformación plástica severa de la placa de titanio grado 2.

3. Se realizó un análisis de la microestructura obtenida luego de la simulación del proceso de deformación plástica severa de la placa de titanio grado 2, lo cual incluyó el tamaño y la orientación cristalográfica de los granos, así como de su relación con las tensiones y las deformaciones.

CONCLUSIONES

Como resultados del trabajo se ha podido arribar a las siguientes conclusiones generales:

1. Se le dio cumplimiento al objetivo propuesto en el presente trabajo puesto que se logró obtener, a partir de la simulación mediante el método de elementos finitos, información referencial del mejoramiento de las propiedades mecánicas de miniplacas de titanio grado 2 procesado mediante la corrugación y estiramiento repetitivo a partir de un modelo de herramienta deformadora utilizado en el procedimiento de deformación plástica severa anteriormente mencionado.
2. Se lograron obtener resultados sobre la evolución de las tensiones tangenciales alternantes, las tensiones residuales, las deformaciones de Von Mises y la microestructura en la miniplaca de titanio grado 2.
3. Mediante el análisis del comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes, las tensiones residuales, de las deformaciones de Von Mises y de la microestructura, se pudo tener una idea más exacta sobre la ubicación de los valores más significativos, el área que ocupan dentro del modelo dichas tensiones, deformaciones y microestructura, el movimiento dentro del modelo de las tensiones, deformaciones y la microestructura y el valor que poseen en dependencia de la posición de los puntos de medición para la pasada final.

RECOMENDACIONES

Como recomendaciones para la futura continuación del presente trabajo, se proponen las siguientes:

1. Realizar otros análisis de la RCS empleando el MEF, con el fin de definir la influencia de otros parámetros geométricos en la deformación Plástico Severa del Material, para de esta forma, poder obtener resultados más integrales sobre el comportamiento del campo del material sujeto a este proceso.
2. Utilizar los resultados de la simulación realizada para la toma de decisiones en cuanto a: selección de la geometría de la herramienta real, la placa, los materiales y otros aspectos de la experimentación real.
3. Realizar experimentos y mediciones reales que permitan complementar y confirmar los resultados obtenidos mediante la simulación del proceso de RCS en láminas delgadas de titanio de Grado 2.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, J. (2014). *Modelado de un proceso de corte ortogonal a través del método de elementos finitos*. Tesis de Maestría. Departamento de Mecánica Universidad Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”, Pueblo y Educación.
- ASKELAND, D. R. & PHULÉ, P. 2003. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Thomson.
- Askeland, R., 2008. *Ciencia y energía de los materiales*. América: 2da edición.
- Batanero, C., Díaz, C., 2008. *Análisis de datos con Statgraphics*. Granada: La Gioconda, S. L, ISBN: 978-84-691-4796-2.
- Belyakov, A., et al., 2003 “Effect of initial microstructures on grain refinement in a stainless steel by large strain deformation”. *Acta Materialia*, Vol. 51, pp. 847-861.
- Beygelzimer, Y., et al., 2002 “A new severe plastic deformation method: Twist Extrusion/Ultrafine Grained Materials II”, *Proceedings of a Symposium held during the 2002 TMS Annual Meeting I*, Seattle, WA (USA), pp. 297-304.
- Castro, L. E., Naranjo, R.F., Duque, F.L., 2016. “Comparación mecánica de dos sistemas de fijación interna rígida utilizados en la fijación de fracturas faciales (estudio in vitro)”. *Revista Facultad de Odontología Universidad de Antioquia*, Vol. 27, No. 2, pp. 262-280. DOI: 10.17533/udea.rfo.v27n2a2.
- CALLISTER, W. 1995. *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*.
- Cruz González, E. 2016. *Análisis preliminar de la corrugación y estiramiento repetitivo utilizando el método de elementos finitos*. Trabajo de Diploma en Ingeniería Mecánica., Universidad de Matanzas.
- Cruz, I. Y. R. 2017. “*Simulación por el método de elementos finitos de la deformación plástica severa en láminas de titanio*”. Máster en Ingeniería Asistida por Computadora, Universidad de Matanzas
- Cruz, E., Reyes, Y., Peña, R., Cruz, C., Reyes, K., 2017. “Análisis preliminar de la corrugación y estiramiento repetitivo utilizando el método de elementos finitos”. *VIII Convención Científica Internacional. Universidad Integrada e Innovadora. Universidad de Matanzas, Cuba*. ISBN: 978-959-16-3296-8.
- DassaultSystemesSolidWorks Corporation, 2016. *Introduction to Simulation: SOLIDWORKS Simulation*, United States.
- DENOSO, E. 2015. *Metalografía y tratamientos térmicos*.
- De Veaux, R.D., 2001. *Elements of Experimental Design*. Williams College, pp. 222.

- Elias, C. N., Meyers, M. A., Valiev, R. Z., Monteiro, S. N., 2013. “Ultrafine grained titanium for biomedical applications: An overview of performance”. *Journal of Materials Research Technology*, Vol. 2, No. 4, pp. 340–350, DOI: 10.1016/j.jmrt.2013.07.003.
- Gubicza, J., et al., 2009 “Correlation between microstructure and mechanical properties of severely deformed metals”. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 483, pp. 271–274.
- Guerrero, E.R., 2014. *Nanoindentación y caracterización microestructural de una aleación de aluminio 2024 procesada por unión por laminación acumulada*. Tesis de Maestría. Nuevo León, España, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Hahn, H., 2002. *Unique Features and Properties of Nanostructured Materials*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Vienna, Austria, pp. 3 - 17.
- HIGUERA COBOS, O. F. 2013. *Relación microestructura y propiedades de cobre sometido a deformación plástica severa mediante presión en canal angular de sección constante*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Higuera, O. F, 2013. *Relación microestructura y propiedades de cobre sometido a deformación plástica severa mediante presión en canal angular de sección constante*. Tesis de Doctorado. Barcelona, España, Universidad Politécnica de Catalunya.
- Huang, J., Zhu, Y.T., Jiang, H., Lowe, T.C., 2001 “Microstructures and Dislocation Configurations in Nanostructured Cu Processed by Repetitive Corrugation and Straightening”. *Acta Materialia*, Vol. 49, pp. 1497-1505.
- Huang, J., Zhu, Y.T., Alexander, D.J., Liao, X., Lowe, T.C., Asaro, R.J., 2004 “Development of repetitive corrugation and straightening”. *Materials Science and Engineering*, Vol. 371, pp.35–39.
- Huang, T., Langdon, G., 2013. “Advances in ultrafine-grained materials”. *Materials Today*, Vol. 16, No. 3, pp. 86-93, DOI: 10.1016/j.mattod.2013.03.004.
- HUMPHREYS, F. J. & HATHERLY, M. 1996. *Recrystallization and related Annealing Phenomena*, Pergamon.
- Jiménez, A., Varón, J.C., Herreros, L.G.G., Espinosa B., Rivero O., Salazar M., 2015. “Osteosíntesis de reja costal. Revisión de la bibliografía y reporte de casos”. *Cirugía y Cirujanos*, Vol. 83, No. 4, pp. 339-344, DOI: 10.1016/j.circir.2015.05.023.
- Joseph A. Babor, José Ibarz, 1969. *Química General Moderna*. Sexta Edición, Tercera Reimpresión. Editorial Ciencia Técnica. La Habana, Cuba.
- Kawasaki, M., Lee, H.J., Ahn, B., Zhilyaev, A.P., Langdon, T.G., 2014. “Evolution of hardness in ultrafine-grained metals processed by high-pressure torsion”. *Materials Research and Technology*, Vol. 3, No. 4, pp. 311-318, DOI: 10.1016/j.jmrt.2014.06.002.

- Kiuchi, M., 2005 “Integrated development of metal forming technologies for ultrafine grained steel, advanced technology of plasticity”. *Proceedings of the 8th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP)*, Verona, Italy, pp. 55–57.
- Kwasny, W., Nuckowski, P., Jung, T., Rdzawski, Z., Gluchowski, W., 2013. “Effect of Plastic Deformation on the Structure and Texture of CUSN6 Alloys”. *Technical Transactions Mechanics I-M*, pp. 213 – 219.
- Le, K.C., Kochmann, D.M., 2009. “A simple model for dynamic recrystallization during severe plastic deformation”. *Archive of Applied Mechanics*, Vol. 79, pp. 579-586.
- Lowe, T., Valiev, R., 2004. “The Use of Severe Plastic Deformation Techniques in Grain Refinement”. *Nanomaterials by SPD*, pp. 64-68.
- Martínez, S., 2004. “Osteosíntesis maxilofacial con titanio”. *Revista Española de Cirugía Oral y Maxilofacial*, Vol. 26, pp. 351-368.
- Martínez, J. (2011). *Análisis Termo mecánico mediante Elementos Finitos de Procesos de Corte Ortogonal de INCONEL 718*. Trabajo de Diploma. España, Universidad Carlos III Madrid.
- Marulanda, D.M., Cuellar, J., Rojas, C., Acosta, L.M., Páez, A., 2014. “Microstructure and mechanical properties of cold drawn AISI 1016 steel processed by ECAP”. *Universities Scientiarum*, Vol. 19, No. 2, pp. 139-146, DOI: 10.11144/Javeriana.SC19-2.mpma
- Mirsepasi, A., Nili, M. Habibi, M., Ghasemi, H. Dizaji, A.F., 2012. “Microstructure and mechanical behavior of martensitic steel severely deformed by the novel technique of repetitive corrugation and straightening by rolling”. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 551, pp. 32– 39, DOI: 10.1016/j.msea.2012.04.073.
- Morattab, S., Ranjbar, K., Reihanian, M., 2011. “On the mechanical properties and microstructure of commercially pure Al fabricated by semi-constrained groove pressing”. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, pp. 6912– 6918.
- Mueller, K., Mueller, S., 2007 “Severe plastic deformation of the magnesium alloy AZ31”. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187, pp. 775–779.
- Nakamura, K., et al., 2004 “Development of Severe Torsion Straining Process for Rapid Continuous Grain Refinement”. *Materials Transactions*, Vol. 45, pp. 3338-3342.
- Ono, N., et al., 2003 “Effect of deformation temperature on Hall–Petch relationship registered for polycrystalline magnesium”. *Materials Letters*, Vol. 58, pp. 39– 43.
- Otea, A., 2009. *Introducción a la deformación plástica severa*. Sur América: Elsevier Ltd.
- Pandey, S.C., Joseph, M.A., Pradeep, M.S, Raghavendra, K., Ranganath, V.R., Venkateswarlu, K., Langdon, T.G., 2012 .“A theoretical and experimental evaluation of repetitive corrugation and straightening: Application to Al–Cu and Al–Cu–Sc alloys”. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 534, pp. 282– 287, DOI:10.1016/j.msea.2011.11.070.

- Pavón, J.J., 2006. *Fractura y Fatiga por Contacto de Recubrimientos de Vidrio Sobre Ti6Al4V para Aplicaciones Biomédicas*. Tesis Doctoral. España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Peinado, S., 2012. *Efecto de la deformación plástica severa en la resistividad eléctrica de una aleación al 5% mg- 1.2%*. Trabajo de Diploma. España: Universidad Carlos III Madrid.
- Peña, R., 2013. *Análisis del comportamiento de las tensiones tangenciales Alternantes Producidas por el contacto en la Zona Próxima al Polo de Engrane de Engranajes cilíndricos de Dientes Rectos*. Tesis de Maestría. Universidad de Matanzas. Cuba.
- Peña, R.,González, O., Cruz, E., Reyes, Y., López, O.,2016. “El Titanio y sus potencialidades como biomaterial”. *Monografía UM 2016*. ISBN: 978-959-16-3242-5.
- Planell, J. A., Harris, M., Lacroix, D., Proubasta, I., 2004. “Clavos intramedulares vs. placas de osteosíntesis para fracturas de fémur: Análisis por elementos finitos”. *Biomecánica*, Vol. 12, No. 1, pp. 64-70.
- Raj, K., Sharma, S., Singh, P., Dayal, A., 2011. “Study of friction stir processing (FSP) and high pressure torsion (HPT) and their effect on mechanical properties”. *Procedia Engineering*, Vol. 10, pp. 2904-2910, DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.482.
- Rajinikanth, V., Arona, G., Narasaiah, N., Venkateswarlu, K., 2008 “Effect of repetitive corrugation and straightening on Al and Al–0.25Sc alloy”. *Materials Letters*, Vol. 62, pp. 301–304, DOI:10.1016/j.matlet.2007.05.014.
- Reig, L., 2009. *Desarrollo de piezas porosas de Ti6Al4V mediante técnicas pulvimetalúrgicas*. Tesis Doctoral. España, Universidad Politécnica de Valencia.
- Rodríguez, B., Cabrera, J., Marrero, J., 2007. “Procesos de severa deformación plástica para obtener materiales de grano nanométricos y ultrafinos”, *Ingeniería e Investigación*, Vol. 27, No. 1, 2007, pp. 101-105.
- Rodríguez, R., Cabrera, J.M., Benito, A., 2011. “Estudio de la relación Hall-Petch en aceros (0,6% C) submicrométricos”. *Ingeniería e Investigación*, Vol. 31, No. 3, pp.112 -120.
- Roque, G., 2018. “Tecnología de fabricación de las herramientas para el procedimiento de corrugado y estirado repetitivo en Titanio Grado 2 por control numérico”. Trabajo de Diploma en Ingeniería Mecánica., Universidad de Matanzas.
- ScientificForming Technologies Corporation, 2011. *User’s Manual. DEFORM™ Integrated 2D-3D Version 10.2 and DEFORM™ v11.0 (Beta)*. Columbus, Ohio, United States.

- Shaban, M. S., Vajd, A., 2014, “Finite Element Analysis of the Groove Pressing of Aluminum Alloy”. *Modeling and Numerical Simulation of Material Science*, Vol. 4, pp.32-36, DOI: 10.4236/mnsms.2014.41006.
- Shantharaja, M., 2013. “Mechanical Behaviour of Pure Aluminum Processed by Constrained Groove Pressing”. *Material Science and Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 1-5, DOI: 10.4172/2169-0022.1000124.
- Sheikh, H., Paimozd, E., Hashemi, S.M., 2010 “Work Hardening of Duratherm 600 Cobalt Superalloy Using Repetitive Corrugation and Straightening Process”. *Russian Journal of Non Ferrous Metals*, Vol. 51, No. 1, pp. 59–61, DOI: 10.3103/S1067821210010116.
- Sakai, T., Belyakov, A., Kaibishev, R., Hiromi, M. y Jonas, J. (2013). "Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions". UEC Tokyo (The University of Electro Communications) Chofu Tokyo, Japan: Belgorod State University, RussiaMc Gill University, University Street, Montreal Canada.
- Shin, D.H., et al., 2002 “Constrained groove pressing and its application to grain refinement of aluminium”. *Material Science and Engineering*, Vol. 238, pp. 98-103.
- Siddesha, H., Shantharaja, M., 2013. “Characterization of Mechanical Properties of Aluminum Processed by Repetitive Corrugation and Straightening Process using Taguchi Analysis”. *JOM: the Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 65, No. 2, pp. 294-298, DOI: 10.1007/s11837-012-0503-1.
- Siddesha, H., Shantharaja, M., 2014. “Thermal Stability Of Ultra-Fine Grained Al6061 Alloy Processed Through Cyclic Constrained Groove Pressing”. *Advanced Engineering and Applied Sciences*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-6.
- Soon, K., Jen, M., Wah, B., Atsushi, D., 2015. “Enabling wider use of Magnesium Alloys for lightweight applications by improving the formability by Groove Pressing”. *Procedia CIRP*, Vol. 26, pp. 449 – 454, DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.031.
- Thangapandian, N., Balasivanandha, S., 2015. “The Role of Corrugation Die Parameters on the Mechanical Properties of Aluminum Alloy (AA 5083) Processed by Repetitive Corrugation and Straightening”. *Journal of Materials Science and Chemical*

Engineering, Vol. 3, pp. 208-212, DOI: 10.4236/msce.2015.37028.

Valiev, Z., Estrin, Y., Zenji, H., Langdon, G., Zehetbauer, J. y Zhu, T., 2006. “Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation”. *JOM: the Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 58, No. 4, pp. 33-39.

Yoshida, Y., et al., 2002 “Effect of microstructural factors on tensile properties of ECAE-processed AZ31 magnesium alloy”. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, Vol. 52, No. 11, pp. 559–565.

Zambrano L.A., Muller C., 2008. “Estudio del efecto de placas de fijación en fracturas de tibia proximal utilizando el método de elementos finitos”. *Boletín Técnico IMME*, Vol. 46, No. 3, pp. 43-60.

Zhu, Y., Lowe, T. y Langdon, T., 2004 “Performance and Applications of Nanostructured Materials Produced by Severe Plastic Deformation”. *Scripta Materialia*, Vol. 51, pp. 825-830.