

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL TITANO GRADO 2 MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Ing. Erián Cruz González, MSc. Bárbaro Luis Peña Rodríguez.

*Dirección de Criminalística, Calle Embil y Sur
Alta Habana, La Habana.*

*Universidad de Matanzas – Sede “Camilo Cienfuegos”, Vía
Blanca Km.3, Matanzas, Cuba. barbaro.pena@umcc.cu*

Resumen

En el presente trabajo se muestra un análisis preliminar de la Corrugación y Estiramiento Repetitivo, utilizando el Método de Elementos Finitos, utilizando el software DEFORM. El trabajo se realiza a partir de la no existencia de datos referenciales y resultados de simulación que permitan interpretar los fenómenos ocurridos en láminas delgadas de Titanio Grado 2 sometidas al proceso de Corrugación y Estiramiento Repetitivo. Los resultados obtenidos fueron: la influencia de la geometría sin holgura en la deformación del Titanio Grado 2 y del Ti6Al4V, la influencia de la geometría sin holgura y con holgura en la deformación del titanio, la influencia de los radios de redondeo de un diente y las ranuras en la deformación del titanio, variación geométrica y dimensional de la placa, los daños que se producen en la placa por la interacción con la herramienta, 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 Severa; Corrugación y Estiramiento Repetitivo; Titanio Grado 2, Ti6Al4V; DEFORM; Método de Elementos Finitos.

1. INTRODUCCIÓN

La Deformación Plástica Severa ha sido de gran utilidad y se le ha prestado atención por parte de investigadores como un método eficaz para obtener materiales con microestructura a escala nanométrica. En la actualidad se desarrollan un número considerable de procedimientos para la obtención de materiales con tamaño de grano ultrafino. Dentro de los procedimientos con mayor auge se encuentran la Estrucción por Canal Angular de Sección Constante, Torsión a Alta Presión y la Laminación Acumulativa. El primer método se utiliza para procesar barras, el segundo para discos de pequeño espesor y el último es aplicado a placas metálicas. Sin embargo, los métodos previamente mencionados presentan limitaciones en cuanto al aprovechamiento del material debido a la falta de homogeneidad de la estructura cristalina del material el primero, limitaciones en el espesor de la muestra el segundo y el tercero dificultades en el procesamiento por la desunión de capas de material.

Con la Corrugación y Estiramiento Repetitivo se logran propiedades mecánicas similares a las obtenidas con los demás procedimientos de Deformación Plástica Severa utilizados para procesar placas y se minimizan efectos indeseables como la pérdida excesiva de material por falta de homogeneidad y defectos producidos por las características específicas de los procedimientos. En la Corrugación y Estiramiento Repetitivo la interacción herramienta espécimen es de gran importancia debido a que el espécimen debe estar sometido a deformaciones que faciliten el re direccionamiento del material y con este la modificación de la micro estructura. Los parámetros geométricos como la holgura entre dientes de la herramienta y los radios de redondeo en la cabeza y el pie de los dientes de los dados juegan un papel fundamental en el proceso del material.

2 DESARROLLO

2.2 Corrugación y Estiramiento Repetitivo

La Corrugación y Estiramiento Repetitivo, (RCS) por sus siglas en inglés Repetive carugation 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 cristalina. También se expresa por los autores que es un procedimiento en tempranas etapas de desarrollo.

La RCS es un procedimiento de Deformación Plástica Severa (DPS) que es definida por OTEA AIMME (2009) como un método 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.

Por su parte, la simulación mediante el Método de Elementos Finitos, utilizando el software DEFORM, permite obtener datos preliminares del efecto de la configuración geométrica en de la herramienta en la deformación de los especímenes. Dada la relación existente entre la evolución de la microestructura y el comportamiento de las tensiones y deformaciones, realizar la simulación de este proceso posibilitará obtener información preliminar que permitirá tomar decisiones sobre la experimentación real utilizando el procedimiento Corrugación y Estiramiento Repetitivo en láminas de Titanio Grado 2. Con la aplicación del procedimiento anteriormente mencionado se pretende elevar las propiedades mecánicas del Titanio Grado 2 a partir de la obtención de microestructura nanométrica y de esta forma ampliar su utilidad como biomaterial.

2.2 El Método de Elementos Finitos y Software DEFORM

El método de los elementos finitos (MEF) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de la ingeniería y la física. (Liu, 2003; Felippa, 2004).

El MEF está diseñado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. Se usa en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos complejos. La variedad de problemas a los que puede aplicarse ha crecido enormemente, siendo el requisito básico que las ecuaciones constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema sean conocidas de antemano (Felippa, 2004).

DEFORM™ (*Design Environment for FORMing*) es un sistema ingenieril utilizado para analizar procesos complejos incluyendo el conformado de metales, tratamiento térmico, mecanizado, troquelado y uniones mecánicas. Está basado en algoritmos de solución con un método de elementos finitos (MEF) no lineal y transitorio, con un mallado completamente 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 (User's Manual DEFORM™ 3D, 2007).

Con sus raíces en el conformado de metales, el paquete es muy robusto para forja, recalcado en caliente, extrusión, trefilado, recalcado en frío y laminado. Puede predecir llenado de la herramienta, fuerza de conformado, defectos, flujo de granos y otros parámetros críticos sin el tiempo y el costo del herramental físico (Martínez, 2011).

Martínez (2011) también agrega que DEFORM puede predecir los resultados del proceso antes de realizar la prueba de taller, reduciendo tanto el tiempo como los costos de desarrollo. Los usuarios a menudo analizan variantes antes de comprometerse con un diseño, resultando en un proceso más óptimo y robusto.

2.3 Características de los materiales a utilizar

Según Elias et. al. (2013) el titanio con tamaño de grano ultrafino obtenido por la Deformación Plástica Severa presenta grandes potencialidades para las aplicaciones que proporciona resistencia al titanio sin que posea los elementos de aleación tóxicos como el aluminio Al y el vanadio V que disueltos fuera del implante resultan dañinos para el cuerpo humano. El mismo autor presenta resultados donde los valores de resistencia y otras propiedades mecánicas del Titanio Grado 2 con grano ultrafino, obtenido por Estrucción por Canal Angular de Sección Constante, superan las del Ti6Al4V con tamaño de grano micrométrico.

En cuanto a la interacción con el entorno circundante el Titanio Grado 2 se comporta como un material inerte; es decir que no emite elementos de su composición química fuera del implante. El Ti6Al4V se manifiesta como un material biocompatible; lo que implica emisión de elementos de su composición química fuera del implante en concentraciones no tóxicas. En dependencia del PH del cuerpo humano la reacción del implante Ti6Al4V con los fluidos corporales puede ocasionar el rechazo del implante. Los niveles de toxicidad aceptables también dependen de la parte del cuerpo humano donde se coloca el implante. En el caso de miniplacas maxilofaciales, estas se colocan en áreas de gran sensibilidad próximas al cerebro, el sistema auditivo y los órganos de la visión, donde los niveles de toxicidad deben ser bajos.

2.3 Criterios para la selección de los especímenes.

Las razones fundamentales que justifican la selección de los especímenes están relacionadas con la utilidad que se pretende dar a las láminas de titanio nanoestructurado. La primera está asociada a los niveles de asimilación por el cuerpo humano; en estos niveles Titanio Grado 2 supera al Ti6Al4V. La segunda está relacionada con la necesidad de elevar la resistencia mecánica del Titanio Grado 2 para que cumpla con las exigencias funcionales de los elementos para osteosíntesis. Y la tercera está relacionada con la obtención de piezas brutas de material nanoestructurado con 2 mm de espesor que garanticen la fabricación de placas para osteosíntesis maxilofacial; debido a que las miniplacas poseen espesores que se encuentran en el rango de los 2mm.

2.4 Parámetros geométricos de los dados corrugadores.

En el análisis se tienen en cuenta un grupo de parámetros geométricos que poseen importancia en el procesamiento de la placa como son la holgura entre los dientes y las ranuras de la herramienta corrugadora, el radio de redondeo de los dientes, la cantidad de dientes de la herramienta y la longitud de la placa. Otros parámetros como la altura, el ancho y el ángulo de inclinación de los dientes se mantuvieron con los mismos valores que asignaron Thangapandian y Balasivanandha (2015) en su trabajo de investigación.

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

En la Figura 1. se muestra la geometría de los dados corrugadores y sus dimensiones. En la figura 2 se muestra los dados planos paralelos. La elaboración del modelo en AutoCAD se realizó en dos dimensiones para así exportarlo con extensión IGS hacia el DEFORM 3D. Ya en ese formato se importa al programa DEFORM 3D y dentro de este se convierte en un volumen y a su vez en una geometría 3D.

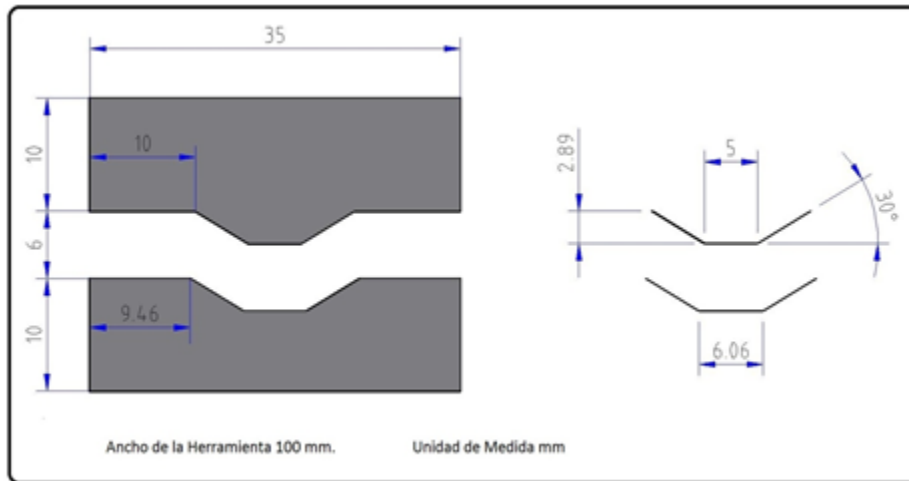


Figura 1. Esquemas de los dados corrugadores.

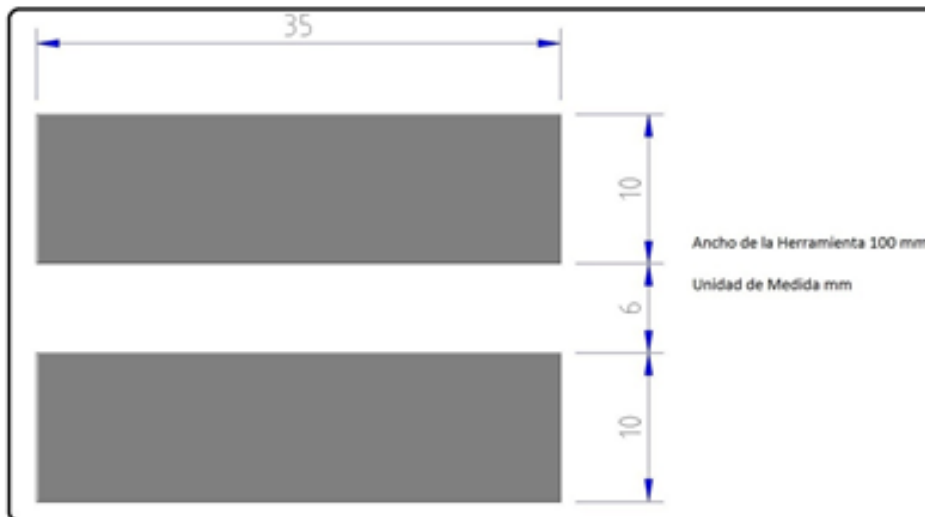


Figura 2. Esquema de los dados planos paralelos.

2.6 Secuencia de análisis para la simulación.

Para facilitar la interpretación de la influencia de los diferentes parámetros geométricos, anteriormente mencionados, en el proceso de Corrugación y Estiramiento Repetitivo de láminas delgadas de la aleación Ti6Al4V se ideó una secuencia que permitiera establecer comparaciones y escalonar el análisis de los parámetros.

2.7 Comparación de la influencia de la geometría sin holgura en la deformación del titanio grado 2 y el titanio grado 5

En el primer paso de análisis se tendrá en cuenta la geometría de dientes y ranuras de los dados corrugadores utilizados por Thangapandian y Balasivanandha (2015) en la deformación por Corrugación y Estiramiento Repetitivo de placas de 2 mm de espesor en la aleación de aluminio (AA 5083).

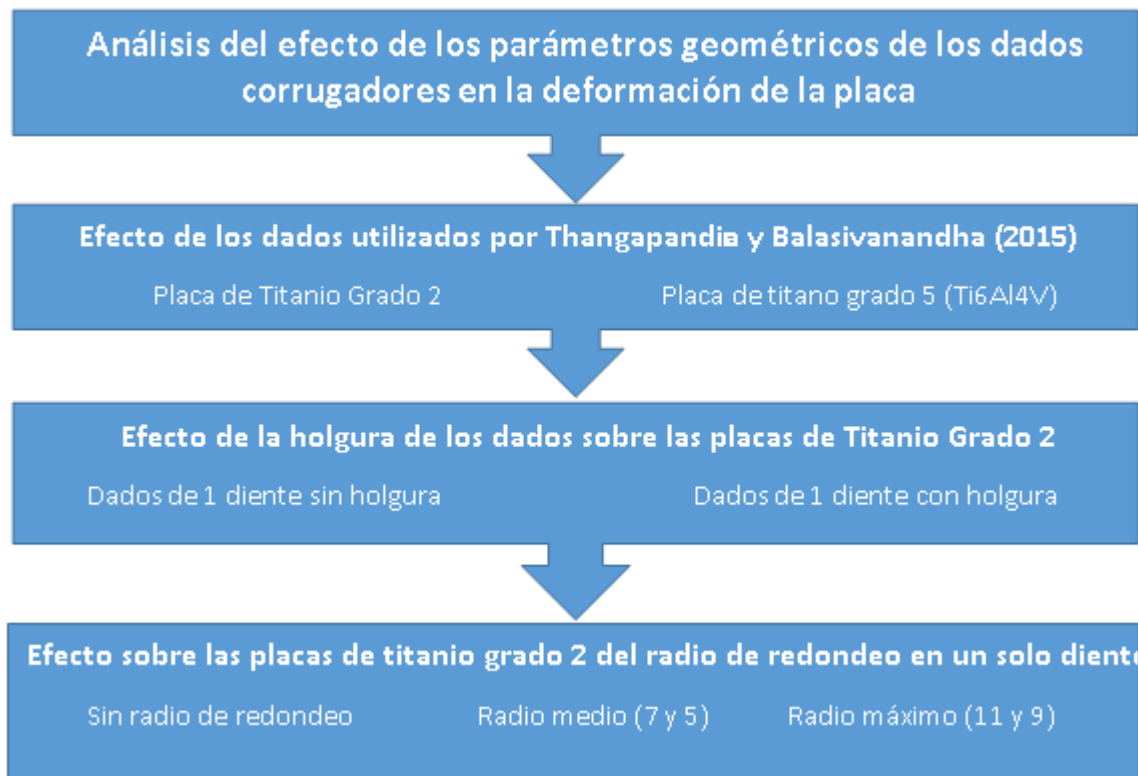


Figura 3. Secuencia de análisis para la simulación de la deformación.

En la experimentación realizada por los investigadores mencionados se compara la influencia en la deformación de dados semicirculares y semiacanalados, los resultados obtenidos con los dados semiacanalados son superiores en cuanto a la obtención de microestructura de tamaño nanométrico. En la presente investigación se utilizarán los dados semiacanalados, anteriormente mencionados, para aplicar deformación a una placa de 2

mm de la aleación de Titanio Ti6Al4V y Titanio de grado 2 ver cuál es el efecto de esta geometría sobre estos materiales con propiedades mecánicas diferentes.

Atendiendo a las propiedades del titanio Ti6Al4V antes mencionadas en el apartado 2.2 inferimos que las propiedades de la aleación de aluminio (AA 5083) son superadas por las del titanio.

Tabla 1. Comparación de propiedades mecánicas.

	Titanio Ti6Al4V	Titanio Grado 2
Módulo de Young (GPa)	113,8	103
Límite de fluencia (MPa)	860	275
Módulo Tangente (MPa)	930	345
Coefficiente de poisson	0.38	0.34

Como se puede apreciar en la *tabla 1.1*, en el límite de fluencia el titanio grado 5 supera al grado 2 en 3,13 veces, el módulo de Young en 1,1 veces, el módulo tangente es mayor en 2,7 veces mientras que el coeficiente de poisson es 1,2 aproximadamente.

2.8 Comparación de la influencia de la geometría sin holgura y con holgura en la deformación del titanio.

En el segundo paso, se hará una comparación de la herramienta con holgura – sin holgura, *figura 3*. En la herramienta sin holgura utilizada por Thangapandian y Balasivanandha (2015), realizaron una comparación entre dados deformadores con perfil semiacanalado y con perfil semicircular. Ellos analizaron las propiedades alcanzadas en las dos variantes como son: la resistencia a la tracción del material, la microdureza y el tamaño del grano. También se define el número de pasadas (8 y 14) a la que empieza a disminuir la resistencia producto de la aparición de micro grietas.

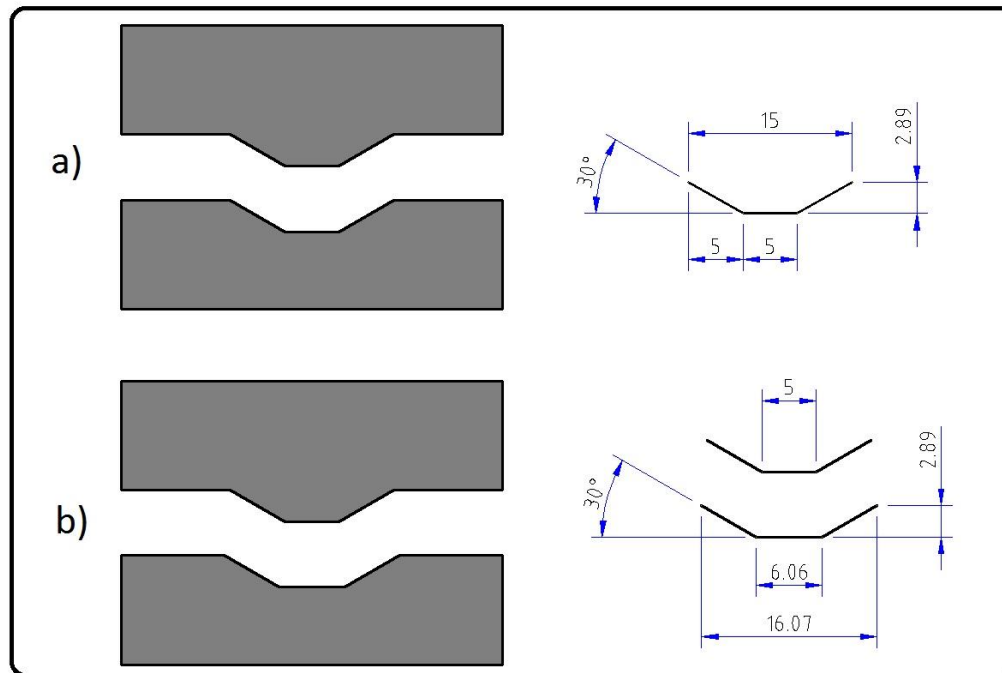


Figura 4. Datos deformadores. a) Sin holgura y b) con holgura.

Mediante el procedimiento utilizando dados semiacanalados los autores plantean que se logra un incremento de la resistencia a la tracción y de la dureza un 25%, esto sucede en la pasada 6, en la pasada 8 reportan una disminución en el valor de estos parámetros. En cuanto al refinamiento de los granos se plantea que con el perfil semiacanalado es superior al semicircular. En cuanto a la geometría es necesaria la modificación de la misma, dado por la elevada dureza del titanio, por lo que se hará una modificación de la geometría de la herramienta, asignado una holgura entre los dientes y las ranuras de los dados corrugadores, para obtener datos sobre el efecto de dicha holgura en el flujo del material. La holgura será de 2mm, esta se asume en función del espesor de la placa, el cual también es de 2mm, con el objetivo de permitir el flujo del material e impedir que el mismo se cizalle.

2.9 Comparación de la influencia de los radios de redondeo de los dientes y las ranuras en la deformación del titanio.

Para la comparación del efecto de la herramienta, sin radio y con radio, sobre la placa, se utilizarán tres variantes de radios de redondeo, como se muestra en la figura 5. En el paso 3 se analizará la influencia de los radios de los dientes y de las ranuras en el flujo del material.

Después de aplicarle la holgura a la herramienta se analizará la influencia del radio de redondeo de la herramienta. Se utilizan tres valores de redondeo, ver figura 5.b), a). Las líneas mostradas en la figura 5.a), representan la configuración geométrica de la punta de los dientes y del fondo de las ranuras para los tres radios que se utilizarán en la simulación.

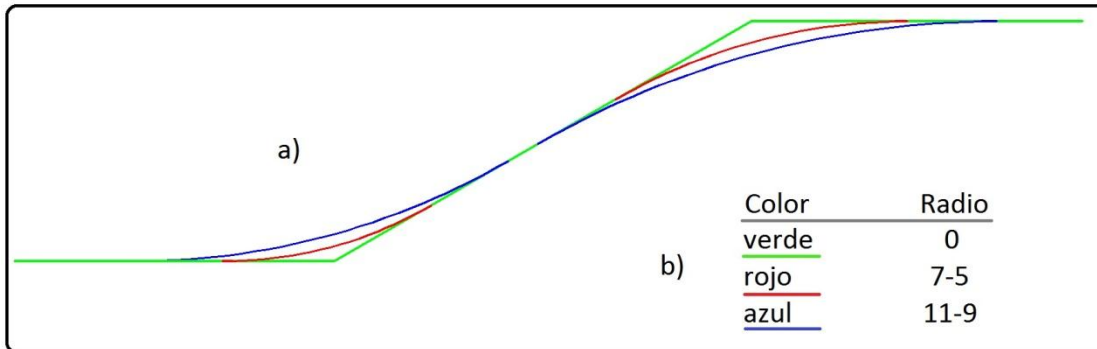


Figura 5. Diferentes radios de redondeo utilizados. a) Líneas que representan los diferentes radios y b) Valores de los radios de redondeo.

2.10 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 siendo de 32000 elementos para una placa de dimensión 35x100x2 mm, se escoge esta cantidad de elementos por la complejidad de la simulación al aplicarle un mallado con mayor rigor dado los recursos informáticos y por ser solo un análisis preliminar.

Hay que resaltar, como se expuso anteriormente 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 6 se muestra la placa mallada y una sección de la misma.

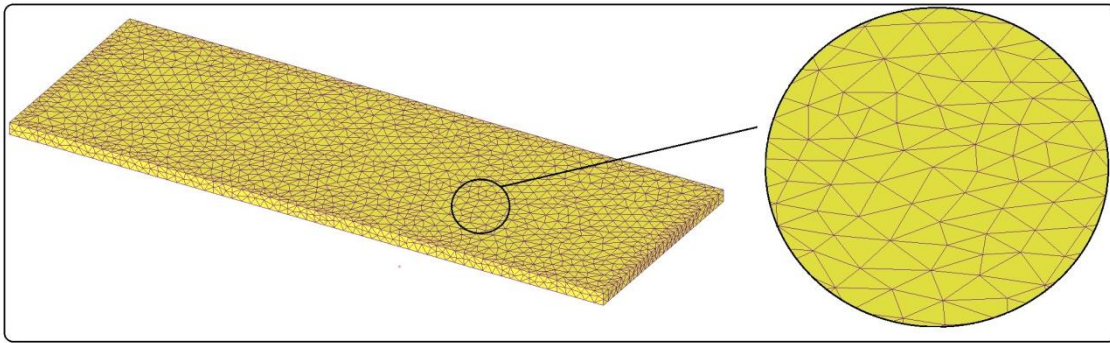


Figura 6. Placa con mallado tetraédrico y 32000 elementos.

2.11 Condiciones de fronteras y cargas.

Las partes tienen diferentes características en el comportamiento.

Placa: Cuerpo deformable

Punzón: Cuerpo rígido

Matriz: Cuerpo rígido

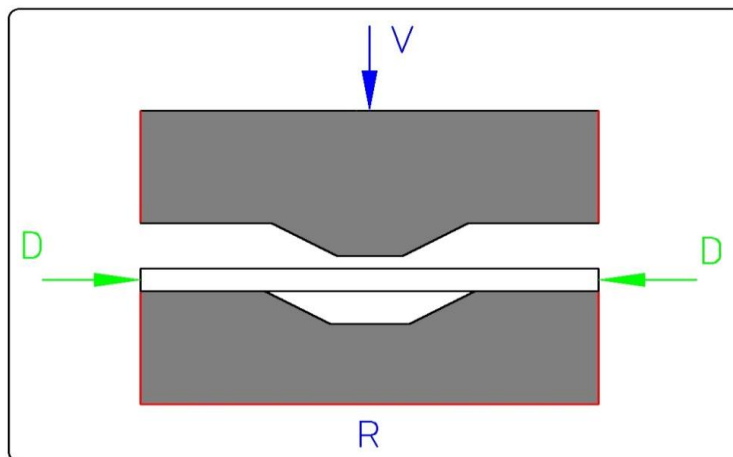


Figura 7. Parámetros que intervienen en el análisis.

Como posiciones iniciales la placa se encontrará apoyada encima de la matriz, el punzón a 6 mm de la matriz y 4 mm de la placa siendo esta de 2 mm de espesor, la placa se le restringirá el desplazamiento en el eje Y así como de rotación en el plano XY para que el movimiento de la placa sea deslizarse hacia dentro como indica en la figura la letra D. La matriz se le restringirá tanto el desplazamiento como la rotación en todos los ejes y al punzón se le restringirá las rotaciones en todos los ejes y el desplazamiento en los ejes de coordenadas X y Y como nos muestra la letra R en la figura 2.7. La secuencia de movimientos de las herramientas comienza con el desplazamiento del punzón en el eje Z (sentido negativo) a una velocidad constante V de 1mm/s, el desplazamiento máximo del punzón será de cuatro milímetros permitiendo así que no ocurra el aplastamiento de la placa lo cual sería desfavorable.

2.12 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 (Ver figura 8).

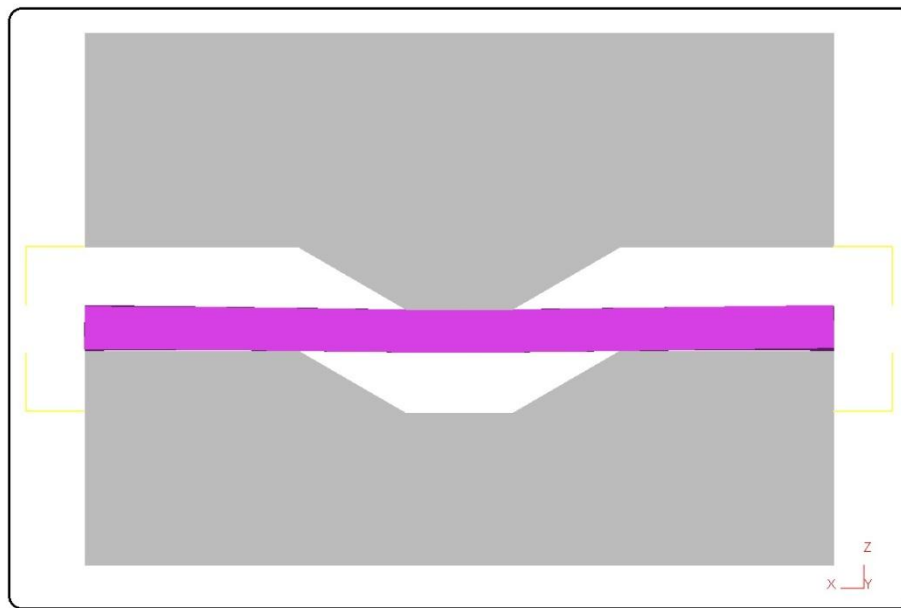


Figura 8. Datos de formadores y placas finales.

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.

También se pueden introducir otros valores como son la temperatura ya sea constante o variable que en nuestro caso se utilizará la temperatura de laboratorio constante a 20°C.

2.13 Selección y medición de los parámetros estudiados.

Para la medición de la deformación plástica severa y las deformaciones Von Mises se utilizaron en la placa tres puntos (P1, P2, P3, P4 y P5) ubicados en una línea media, en la superficie del espesor, coinciden verticalmente con los puntos definidos sobre el dado que son: los puntos P1, P3 y P5 están ubicados en el medio de las aristas del diente del dado deformador a una distancia de 5 mm entre cada uno de ellos. Los puntos P2 y P4 se encuentran en las aristas de la cresta del diente a una distancia de 5 mm entre ellos y a 2,5 mm del P1, lugar donde se espera que ocurran las tensiones y las deformaciones más bruscas en la placa. (Ver figura 9). 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.

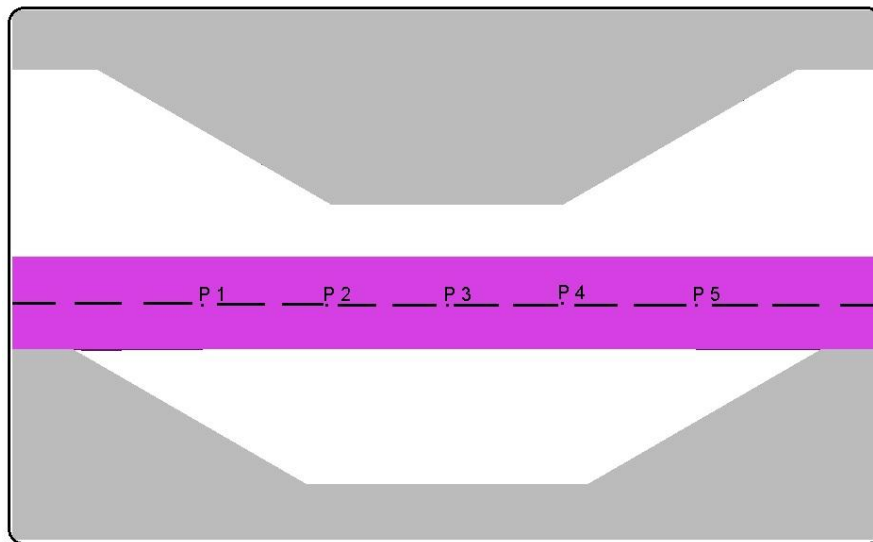


Figura 9. Ubicación de los puntos de referencia en la placa.

2.14 Análisis de la influencia de la geometría sin holgura en la deformación del titanio grado 2 y del titanio grado 5.

Después del análisis de los resultados de las simulaciones pudimos apreciar que la placa de titanio y la placa de aluminio con los mismos dados deformadores se comportaban de diferentes formas para los dos materiales.

El comportamiento del titanio grado 5 con respecto al de grado 2 es que las tenciones tangenciales alternantes y la tenciones promediadas del primero son mucho más elevadas que el segundo alcanzando valores de 801 MPa y 372 MPa respectivamente y en el titanio de grado 5 estas tenciones son para las tenciones tangenciales alternantes 785 MPa y 269 MPa en las tensiones promediadas.

2.15 Análisis de la influencia de la geometría sin holgura y con holgura en la deformación de los titanios.

Las comparaciones de la influencia de la holgura se puede apreciar a través de los resultados de la simulación donde la comparación de los valores de las terceras pasadas de simulación demuestra que en el titanio de grado 2 las tensiones disminuyen y las deformaciones aumentan lo cual es favorable por ser el resultado esperado en la investigación no pasando así con el titanio de grado 5 el cual paso todo lo opuesto.

Tabla 1. Comparación de la influencia de la holgura en las placas de titanio.

	<u>Sin holgura</u>	<u>Sin holgura</u>	<u>Con holgura</u>	<u>Con holgura</u>
<u>Titanio</u>	Tenciones tangenciales alternantes (MPa)	Deformaciones Von Misses (mm)	Tenciones tangenciales alternantes (MPa)	Deformaciones Von Misses (mm)
Grado 2	785	1,42	763	1,44
Grado 5	801	2,62	817	2,51

2.16 Variación geométrica y dimensional de la placa.

En la figura 10 se puede ver más claramente las diferencias de longitudes de la placa después de cada pasada así como la influencia de los radios de redondeo en cada una de ellas. Demostrando así que a mayor radio de redondeo en la geometría de los dados, menores serán los cambios con respecto a la geometría inicial de la placa.

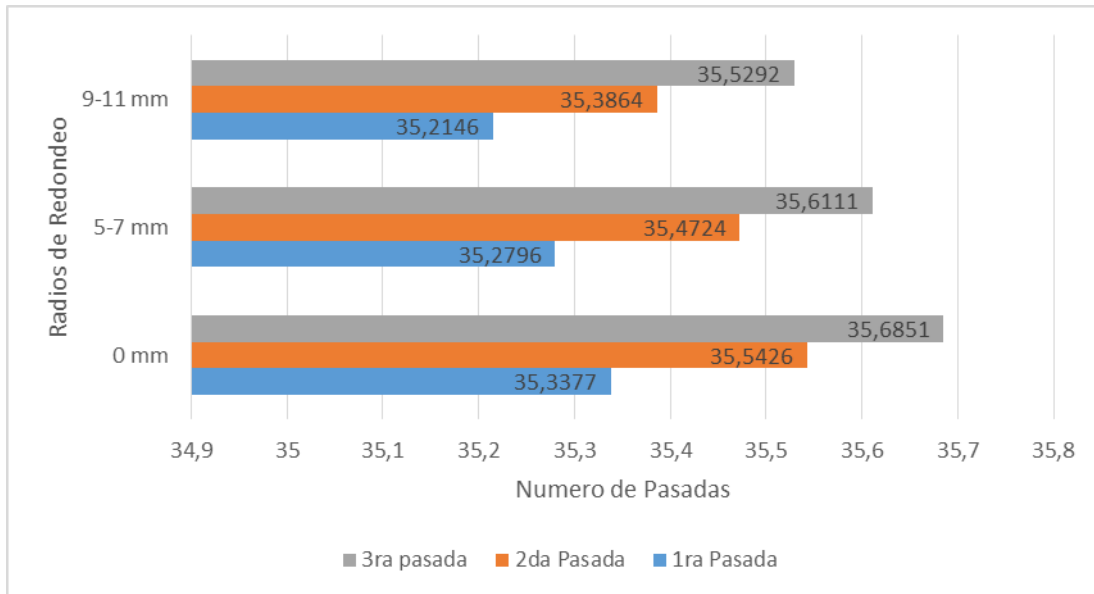


Figura 10. Relación de distancia entre los radios y las pasadas

2.17 Daño en las placas

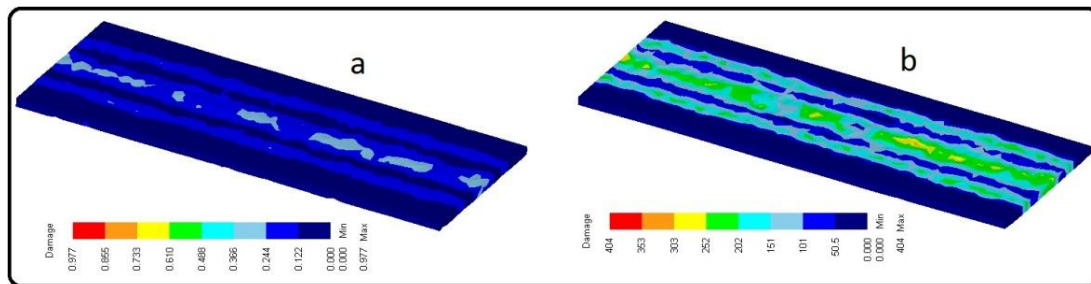


Figura 11. Daño de las placas con holgura. a) Titanio grado 2 y b) Titanio grado 5.

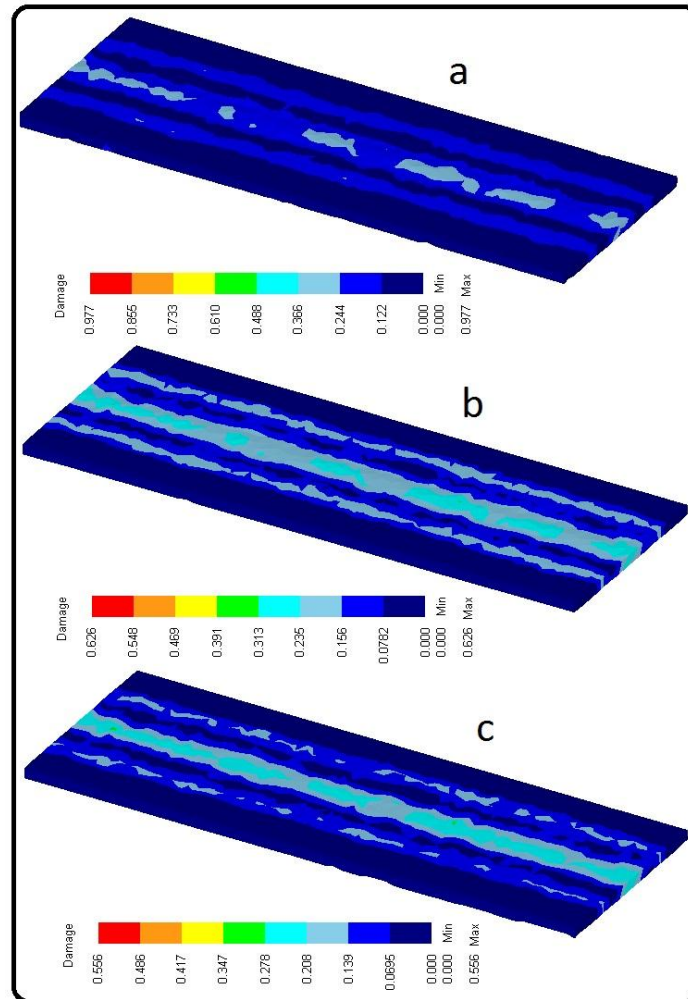


Figura 12. Daño de las placas con: a) sin radio de redondeo, b) radio medio 5-7 mm, y c) radio máximo 9-11 mm.

2.18 Comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes en el proceso de deformación.

En cada una de las tres posiciones analizadas 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. Este efecto es causado por valores de tensiones que en este caso no sobrepasan el límite de fluencia del material.

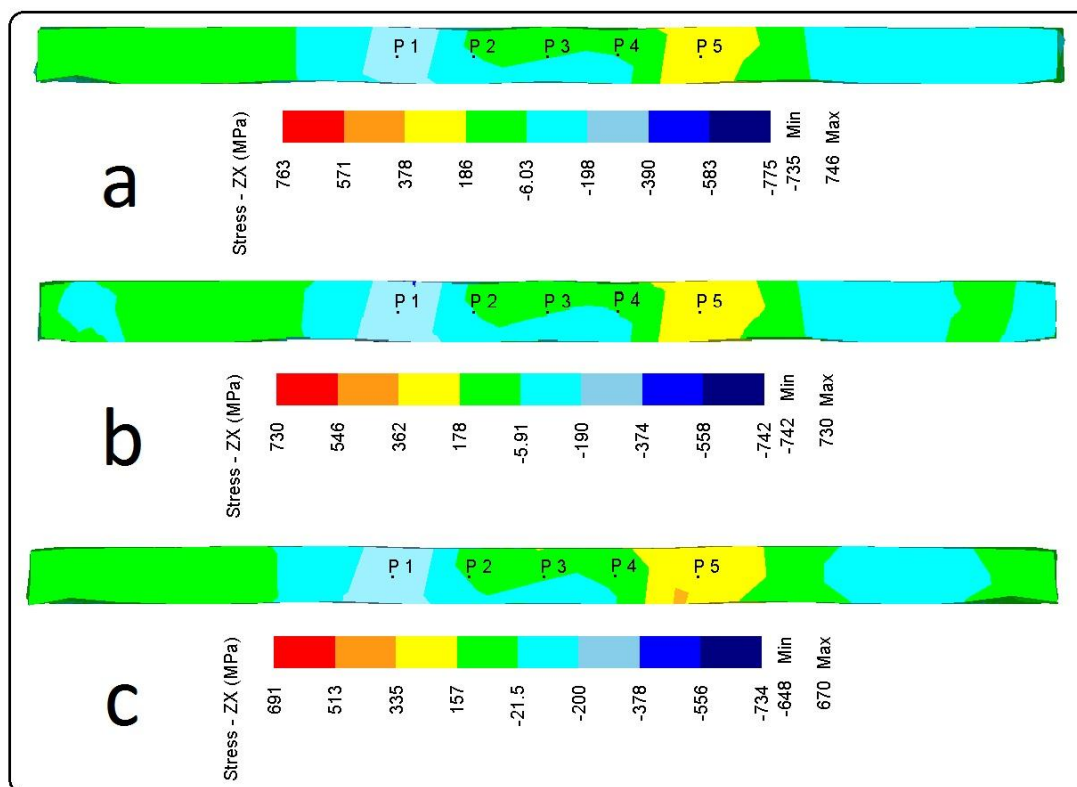


Figura 13. Relación de tensiones en la tercera pasada, a) sin radio de redondeo, b) radio de redondeo medio 5-7 mm y c) radio de redondeo máximo 9-11 mm .

En el gráfico de la figura 13 Se muestra que a medida que los valores de radio en la geometría de los dados deformadores aumentan los valores de tensiones tangenciales alternantes en la placa son menores, esto es debido a que la incidencia de la geometría sobre la placa es menos severa pasando de concentrarse en una arista a un radio facilitando también un mayor flujo del material.

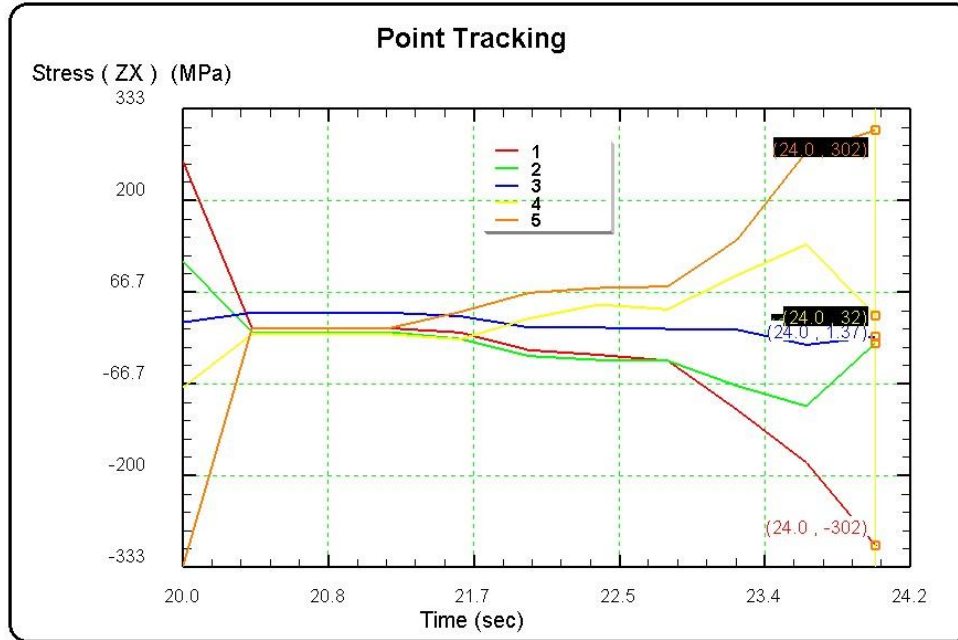


Figura 11. Relación de tensiones en la tercera pasada, a) sin radio de redondeo, b) radio de redondeo medio 5-7 mm y c) radio de redondeo máximo 9-11 mm .

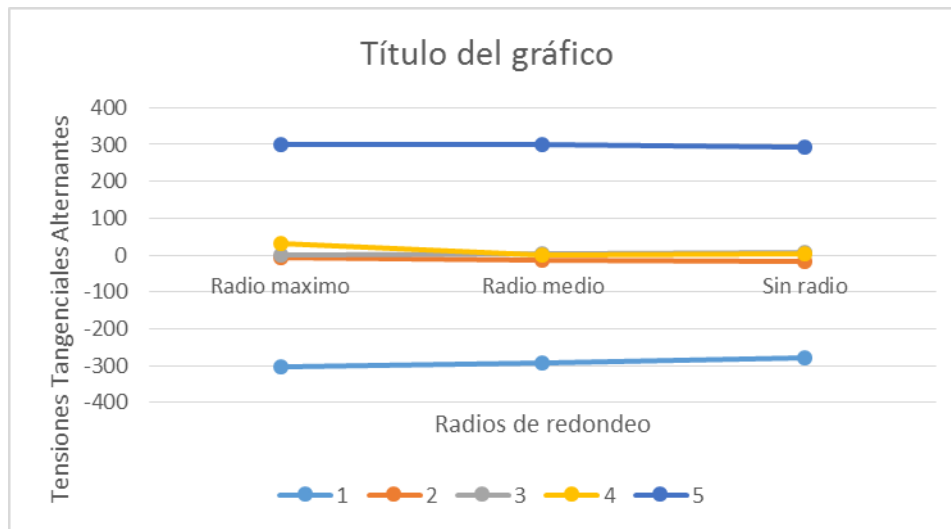


Figura 14. Gráfico de los valores de tensiones tangenciales de los puntos P1, P2, P3, P4 y P5 en las terceras pasadas para los radios 0 mm, medio 5-7 y máximo 9-11.

En la figura 14 se muestra el gráfico de las tensiones en los puntos para las últimas pasadas con los radios 0 mm, 2 mm y 4 mm. Como se puede observar en los puntos P2, P3 y P4 donde las tensiones para 0 mm, medio 5-7 y máximo 9-11 eran similares para esos tres

puntos ya que estaban ubicados en las aristas de la cresta el cual es el lugar con mayor deformación debido a las tensiones que ahí se generan, también hay una unificación de los valores. En los puntos P1 y P5 que se ubicaban en el centro de las aristas los valores de tensión son aún mayores debido al alargamiento que sufre esa zona por la interacción de la placa con las aristas.

2.19 Deformaciones Von Mises producto del proceso de deformación plástica severa.

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. Para los diferentes radios podemos observar que las deformaciones aumentan pero también a su vez todas se acercan en el producto final, que es el estiramiento a un valor próximo entre si esto indica un aumento en la homogeneidad del material producto al movimiento de los planos interatómicos y de las dislocaciones, (ver figura 15) donde se observa por gráfica de colores las tensiones en los puntos y de la placa en general.

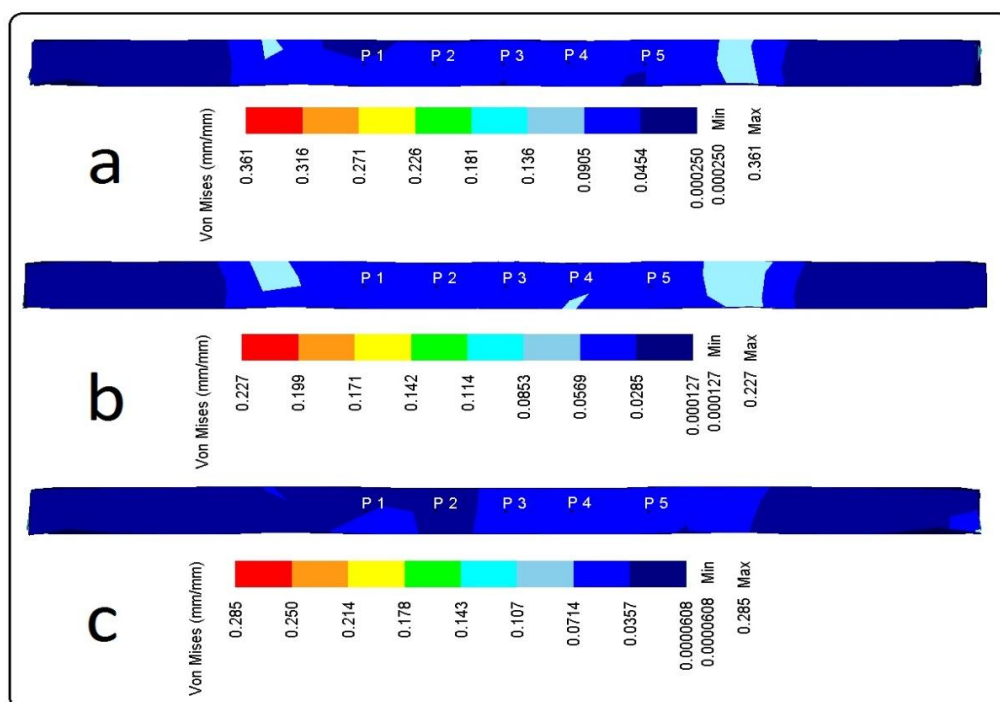


Figura 15. Relación de deformaciones en la tercera pasada, a) sin radio de redondeo, b) radio medio 5-7 mm y c) radio máximo 9-11 mm.

En el gráfico siguiente se observa la disminución de los valores de deformación Von Mises presentes en los radios de redondeo para los puntos P1, P2, P3, P4 y P5 los cuales

forman líneas que muestran los valores. En la línea correspondiente al punto P5 se muestran los mayores valores para cada uno de los radios, los cuales van en disminución a medida que aumenta el radio de redondeo esto es causado porque son más bruscas cuando el perfil deformador es la arista de los dados, bajando después su valor cuando se aplican los radios. Los menores valores se encuentran en la línea de P1 que se encuentra ubicado en el centro entre las dos aristas. En los puntos P2, P3 y P4 se ve que sus valores son similares llegando a tener prácticamente el mismo.

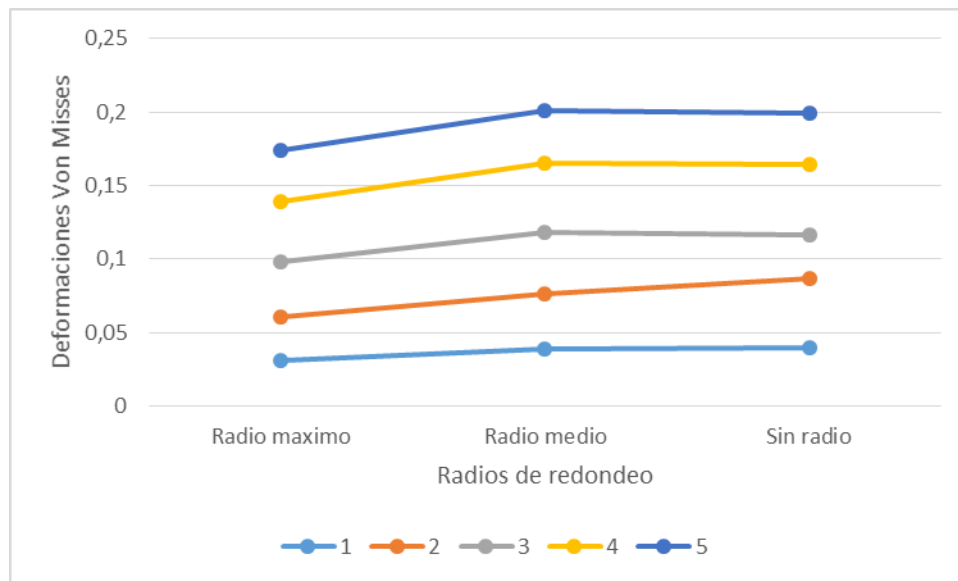


Figura 16. Gráfico de los valores de deformaciones Von Mises de los puntos P1, P2, P3, P4 y P5 en las terceras pasadas para los radios 0 mm, medio 5-7 mm y máximo 9-11 mm.

2.20 Relación tensión - deformación

Después de lo observado en los gráficos de tensiones tangenciales y de deformaciones Von Mises se puede ver que los valores de tensión y de deformación a medida que los radios de redondeo de los dados deformadores tienen una influencia directa. En la herramienta sin radio de redondeo, en el transcurso de las tres pasadas las tensiones aumentan y las deformaciones también; esto ocurre igual para los radios medio 5-7 mm y máximo 9-11 mm. Pero el comportamiento de los radios atendiendo solo a las últimas pasadas y comparándolos entre sí, las tensiones y las deformaciones disminuye a medida que aumenta el radio, dando mejores resultados en la herramienta de radio de redondeo máximo 9-11 mm. Por los resultados del redondeo máximo 9-11 mm se concluye que es el óptimo para este proceso.

3 CONCLUSIONES

Se le dio cumplimiento al objetivo propuesto en el presente trabajo puesto que: se logró obtener, a partir de la simulación mediante el MEF, información referencial de la influencia del radio de redondeo y la holgura entre los dientes en la deformación del material, utilizando el RCS. Se lograron obtener resultados sobre la evolución de las Tensiones Tangenciales Alternantes y las Deformaciones de Von Misses para cada configuración geométrica en cada una de las pasadas de RCS. Mediante el análisis del comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes y de las Deformaciones de Von Misses se pudo tener una idea más exacta sobre: la ubicación de los valores más significativos, el área que ocupan dentro del modelo dichas tensiones y deformaciones, el movimiento dentro del modelo de las tensiones y deformaciones en dependencia de la geometría utilizada y el valor que poseen en dependencia de la posición de los puntos de medición para la pasada final.

BIBLIOGRAFÍA

- ELIAS, C. N.; MEYERS, M. A. ; VALIEV, R. Z.; MONTEIRO, S. N. Ultrafine grained titanium for biomedical applications: An overview of performance".Journal of Material Research and Technology (2013), [online].
- FELIPPA, C. A., Introduction to Finite Element Methods. University of Colorado Boulder (2004), USA.
- LIU, Y., Lecture Notes: Introduction to the Finite Element Method. University of Cincinnati (2003). USA.
- MARTÍNEZ, J."Análisis Termo mecánico mediante Elementos Finitos de Procesos de Corte Ortogonal de INCONEL 718 (2011)..Proyecto Final. España, Universidad Carlos III Madrid.
- OTEA, A. Introducción a la deformación plástica severa (2009). Sur América: Elsevier Ltd.
- SIDDESHA, H. Y SHANTHARAJA, M. Characterization of Mechanical Properties of Aluminum Processed by Repetitive Corrugation and straightening Process using Taguchi Analysis (2013). [en línea]. Springerlink. Disponible en: <http://www.springerlink.com> [Consulta: 10 febrero 2016].
- THANGAPANDIAN, N. Y BALASIVANANDBA, S. The Role of Corrugation Die Parameters on the Mechanical Properties of Aluminum Alloys (AA 5083) Processed by Repetitive Corrugation and Straightening (2015). [en línea]. Journal of Materials

Science and Chemical Engineering. Disponible en: <http://www.scup.org/journal/msce>
[Consulta: 20 enero 2016].

USER'S MANUAL DEFORMTM 3D, (2007). Disponible en: www.deform.com

VALIEV, Z., ESTRIN, Y., ZENJI, H., LANGDON, G., ZEHETBAUER, J. Y ZHU, T.
Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation (2006).
Script: Materialia.