



Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas



SIMULACIÓN POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA SEVERA EN LÁMINAS DE TITANIO

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

Autor: Ing. Yordany Reyes Cruz

Tutores: MSc. Bárbaro Luis Peña Rodríguez

Dr.C. Elpidia Caridad Cruz Cabrera

Matanzas, 2017

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD Y NOTA LEGAL

Yo, Yordany Reyes Cruz, declaro que soy el único autor de la siguiente tesis, titulada **SIMULACIÓN POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA SEVERA EN LÁMINAS DE TITANIO** 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, 30 de junio de 2017.

Yordany Reyes Cruz

PENSAMIENTO

“Si buscas resultados distintos, no hagas siempre lo mismo”

Albert Einstein

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis Padres y Hermano por tanto apoyo y confianza, a mis profesores, a todos los que de una forma u otra han influido en mi formación profesional.

AGRADECIMIENTOS

- A mis padres y hermano.
- A mis tutores.
- A mis profesores.
- A todos los que de un modo u otro me han apoyado y contribuido en la formación del profesional que hoy soy.

A todos muchas gracias

RESUMEN

Cuba ostenta destacados resultados médicos con el uso de fijadores óseos en la ortopedia y la ortodoncia, que son perfectibles si se mejora la resistencia mecánica de las láminas metálicas que se utilizan, lo que es posible mediante la disminución y homogenización del tamaño del grano, por el Método de Deformación Plástica Severa, con el Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo. En este trabajo se simula dicho procedimiento por el Método de Elementos Finitos, con el uso del *software* DEFORM, de láminas de Titanio Grado 5 (Ti6Al4V) en una etapa preliminar que argumenta la etapa de simulación del Titanio Grado 2 que se realiza según un Diseño Factorial Completo de tres factores a tres niveles (3^3), donde los factores o variables independientes son ángulo, radio y ancho. Se analiza la calidad superficial y la variación de longitud (ΔL) de las láminas y se les determinan y analizan los comportamientos de los valores de las variables dependientes que se definen (deformaciones de Von Mises y tensiones tangenciales alternantes y efectivas), en cinco puntos. Se desechan los resultados de las simulaciones en que las láminas no clasifican según la Escala de Calidad Superficial que se define en el trabajo y se realiza un Análisis de Regresión a la data de los máximos valores que se obtienen para las variables dependientes. Finalmente se determina la combinación óptima para las variables de diseño de la herramienta que se propone.

Palabras claves: Método de Elementos Finitos, Deformación Plástica Severa, tensiones, deformaciones, Corrugación y Estiramiento Repetitivo, láminas de titanio, herramienta deformadora, variables de diseño, DEFORM y simulación.

ABSTRACT

Cuba shows highlighted medical results with the use of osseous fixers in orthopedics and the orthodontics, that they are perfectible if the mechanical resistance to the metallic sheets that are utilized is bettered, that is possible by means of the decrease and homogenization of the size of the grain, for the Method of Severe Plastic Deformation, with the Procedure of Corrugation and Repetitive Stretching. In this work the above mentioned procedure is simulated for the Finite-Element Method, with the use of the *software* DEFORM, of Titanium Grade 5 sheets (Ti6Al4V) in a preliminary stage that arguments the stage of simulation of Titanium Grade 2 that it comes true according to a Design Factorial Complete of three factors to three levels (3^3), where factors or independent variables are angle, radio and width. The superficial quality and the variation of length (ΔL) of sheets are analyzed and they determine them and they analyze the behaviors of the values of the dependent variables that are defined (Von Mises deformations and tangential alternating and effective stress), in five points. They dismiss the results of the simulations that the sheets do not classify according to Calidad Superficial's Scale that is defined at work and a Regression Analysis to the information of the maximum values that are obtained for dependent variables comes true. Finally is determined the optimal combination for the designing variables of the tool that is proposed.

Keywords: Finite-Element Method, Severe Plastic Deformation, stress, strain, corrugation and repetitive straightening, titanium plates, distorting tool, designing variables, DEFORM and simulation

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	1
Capítulo 1. Estado del Arte.....	5
1.1 Marco socio económico y medioambiental	5
1.2 Generalidades sobre las miniplacas	6
1.2.1 Breve reseña histórica de la evolución de las miniplacas	6
1.2.2 Aspectos generales sobre las miniplacas	7
1.2.3 Aplicaciones de las miniplacas para osteosíntesis	8
1.3 Elementos sobre las propiedades mecánicas de materiales	9
1.3.1 Modelo del material	10
1.3.2 Tensión y deformación de ingeniería vs tensión y deformación verdadera.....	11
1.4 Fundamentos teóricos sobre los procedimientos de deformación para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de metales	12
1.5 Nanoestructura y teoría de las dislocaciones en materiales metálicos.....	14
1.6 Materiales nanoestructurados para el campo de la medicina.....	15
1.6.1 Propiedades físico químicas del Ti6Al4V y el titanio grado 2	17
1.7 Método de deformación plástica severa.....	19
1.7.1 Extrusión en canal angular de sección constante	21
1.7.2 Torsión a alta presión.....	21
1.7.3 Presión en superficie restringida	21

1.8 Corrugación y estiramiento repetitivo	22
1.8.1 Procedimiento de corrugación y estiramiento repetitivo continuo y discontinuo	23
1.8.2 Casos de estudio del procedimiento de corrugación y estiramiento repetitivo	25
1.8.3 Parámetros que influyen en el procedimiento de corrugación y estiramiento repetitivo	27
1.9 Método de simulación por elementos finitos	28
1.9.1 Reseña histórica del método de elementos finitos	29
1.9.2 Simulación por elementos finitos: Potencialidades del software DEFORM...	30
1.9.3 Simulación por elementos finitos: Aplicaciones en los procedimientos de la deformación plástica severa	31
1.10 Diseño experimental	31
1.11 Conclusiones parciales del capítulo	32
Capítulo 2 Materiales y Métodos	35
2.1 Procedimientos para la simulación preliminar de la corrugación y estiramiento repetitivo de láminas de titanio grado 5 (Ti6Al4V).....	35
2.1.1 Procedimiento para analizar el comportamiento de láminas de titanio grado 5 ante la corrugación y estiramiento repetitivo.....	36
2.1.2 Procedimiento para analizar el comportamiento de láminas de Titanio Grado 5 ante la Corrugación y Estiramiento Repetitivo para diferentes valores de holguras	37
2.1.3 Procedimiento para analizar el comportamiento de láminas de titanio grado 5 ante la aplicación de corrugación y estiramiento repetitivo para diferentes números de dientes del punzón de la herramienta	37

2.1.4 Procedimiento para analizar el comportamiento de láminas de titanio grado 5 ante la corrugación y estiramiento repetitivo para diferentes valores radios de diente y ciclos de corrugación y estiramiento.....	38
2.2 Procedimiento para la simulación de la corrugación y estiramiento repetitivo de láminas de titanio grado 2.....	40
2.2.1 Definición de los niveles y las variables para el diseño de experimentos	41
2.2.2 Metodología para la simulación de la corrugación y estiramiento repetitivo de láminas de titanio grado 2.....	44
2.2.2.1 Premisas y valores de los parámetros que no son objeto de estudio en la simulación.....	45
2.2.2.2 Procedimiento informático para la elaboración del banco de información geométrica.....	45
2.2.2.3 Procedimiento para la simulación de la corrugación y estiramiento repetitivo de láminas de titanio grado 2.....	46
2.2.2.3.1 Procedimiento para la simulación de la etapa de corrugación.....	46
2.2.2.3.2 Procedimiento para la simulación de la etapa de estiramiento	47
2.2.2.3.3 Procedimiento para el análisis de los resultados de la simulación de la corrugación y estiramiento repetitivo de láminas de titanio grado 2.....	47
2.3 Conclusiones parciales del capítulo.....	49
Capítulo 3 Análisis de los Resultados.....	51
3.1 Análisis de los resultados de la simulación preliminar de la corrugación y estiramiento repetitivo de láminas de titanio grado 5.....	51
3.1.1 Análisis de los resultados del comportamiento de láminas de titanio grado 5 ante la aplicación del procedimiento de corrugación y estiramiento repetitivo.....	51

3.1.2. Análisis de los resultados del comportamiento de láminas de titanio grado 5 ante la aplicación del procedimiento de corrugación y estiramiento repetitivo para diferentes valores de holguras.....	53
3.1.3. Análisis de los resultados del comportamiento de láminas de titanio grado 5 ante la aplicación del procedimiento de corrugación y estiramiento repetitivo para diferentes números de dientes del punzón de la herramienta	54
3.1.4 Análisis del comportamiento de láminas de titanio grado 5 ante la aplicación del procedimiento de corrugación y estiramiento repetitivo para diferentes valores radios de diente y ciclos de corrugación y estiramiento	55
3.1.4.1 Análisis del comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes y las deformaciones de Von Mises para diferentes valores de radios de dientes y ciclos de corrugación y estiramiento.....	56
3.2 Análisis de los resultados de la simulación de la corrugación y estiramiento repetitivo de láminas de titanio grado 2.....	60
3.3 Determinación de la geométrica de la herramienta a emplear en el procedimiento de corrugación y estiramiento repetitivo de láminas de titanio grado 2	69
3.4 Conclusiones parciales del capítulo.....	74
Conclusiones.....	77
Recomendaciones	78
Referencias Bibliográficas	79
Anexos	85

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 y Sakai *et al.*, 2013), demuestra un mejoramiento de las propiedades hasta tres veces de los obtenidos con estructuras micrométricas.

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 (SPD) 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 SPD se justifica a partir del interés en producir granos ultrafinos 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).

Investigadores vanguardistas en el área como Valiev, (2006), Zhu (2004) y Askeland, (2008) han denominado a materiales policristalinos con tamaño de grano inferior a 1 μm como: materiales con grano ultrafino, y esta denominación se subdivide a su vez en materiales sub micrométricos (100 a 1000 nm) y materiales nanométricos (inferiores a 100 nm)

La SPD es un método único que produce el refinamiento del grano en metales que no pasan por la transformación de fase, debido a que el tamaño del grano que se produce durante el proceso, depende de las condiciones de deformación (Sakai, *et al.*, 2013). Esta mejora 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 para la obtención de 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 aluminio gracias a los trabajos de Valiev, (2006) y luego extendida a otros metales puros y aleaciones.

La Corrugación y Estiramiento Repetitivo (RCS) por sus siglas en inglés, es considerado por Valiev, *et al.*, (2006) y Siddesha y Shantharaja, (2013) como un procedimiento novedoso para la obtención de láminas delgadas de material nanoestructurado. Estas láminas obtenidas 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.

Las aleaciones de titanio convencionales son fuertes, rígidas, resistentes a la corrosión y tienen baja densidad (densidad de Ti puro es 4,5 g/cm^3). El Ti6Al4V (Titanio Grado 5) y el titanio comercialmente puro son de gran utilidad para fines biomédico, debido a la

alta compatibilidad mecánica y biológica con las estructuras óseas y con el cuerpo humano en sentido general.

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, y por ende se desconoce la combinación de las variables de diseño de la herramienta que se requieren para lograr adecuados valores de resistencia de la lámina de Titanio a la que se le aplique dicho procedimiento, de ahí que se formule el siguiente **problema científico**: Se desconoce cómo es posible determinar la variante óptima para las variables de diseño de la herramienta que se requiere para aplicar la Deformación Plástica Severa por el Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo, a láminas de titanio con vistas a mejorar las propiedades mecánicas de las mismas.

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 determinar la variante óptima de parámetros geométricos de la herramienta que se requiere el mejoramiento de las propiedades mecánicas de dichas láminas.

Para validar o refutar la hipótesis anterior se propone como **objetivo** del presente trabajo: Determinar la variante óptima de parámetros geométricos de la herramienta que se requiere para aplicar la Deformación Plástica Severa por el Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo, a láminas 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. Simulación de la Deformación Plástica Severa por el Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo, de láminas de Titanio Grado 5 (Ti6Al4V), con vistas a valorar su comportamiento, así como determinar las variables con sus niveles de experimentación y premisas de trabajo, a tener en cuenta en la etapa de simulación de láminas de Titanio Grado 2.
4. Definición de las variables dependientes e independientes a estudiar en la Deformación Plástica Severa de láminas de Titanio Grado 2, así como los niveles de estas últimas.
5. Definición del diseño de experimentos.
6. Simulación del Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo, de la lámina de Titanio Grado 2, según el diseño de experimentos que se define.
7. Análisis de los resultados y toma de decisiones sobre la configuración geométrica de la herramienta corrugadora a utilizar en la experimentación real.

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se presentan 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 procedimientos 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 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 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 nanómetros (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 según Mott, (2006) citado por (Peña, 2013). Las tensiones de Von Mises también son conocidas por la bibliografía como tensiones efectivas (*effective stress*) (Dassault Systemes SolidWorks 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 SolidWorks 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).

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

Este modelo propuesto por Johnson-Cook consta de tres factores en su expresión. El primer se refiere al comportamiento elastoplástico del material, el segundo a la viscosidad y el tercero al comportamiento térmico del mismo. Donde:

A- Esfuerzo de fluencia inicial (MPa)

B- Módulo de dureza (MPa)

C- Coeficiente de sensibilizado por la tasa de deformación (adim)

D- Constante del material (adim)

m- Coeficiente de suavizado térmico (adim)

n- Coeficiente de endurecimiento (adim)

T- Temperatura del material de trabajo (K)

T_{melt}- Temperatura de fusión del material de trabajo (K)

T_{room}- Temperatura del local (K)

σ- Flujo de tensiones (MPa)

ε- Equivalente de deformación plástica (mm)

ε'- Velocidad de deformación (s⁻¹)

ε'o- Velocidad de deformación plástica (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 (Fig. 1.1).

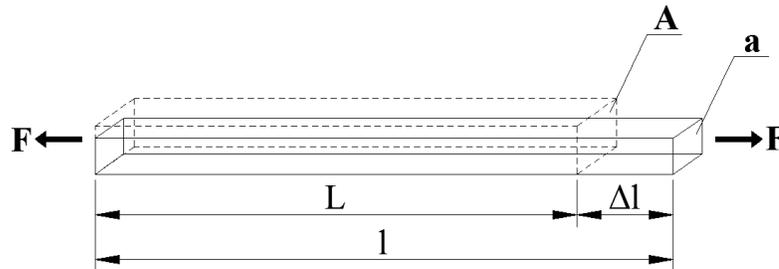


Figura 1.1 Barra sometida a deformación por tracción

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 $\sigma = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom})$ y $\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{nom})$ 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 SolidWorks 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” entendiéndose 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 del Ti6Al4V y el titanio grado 2

El titanio es un elemento de número atómico 22 y distribución electrónica [Ar] 3d² 4s² 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 1cm² 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

<i>O</i>	<i>N</i>	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>Al</i>	<i>Fe</i>	<i>V</i>
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
Coeficiente 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

<i>C</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>H</i>	<i>Fe</i>
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

<i>Grado</i>	<i>Límite de Fluencia (MPa)</i>	<i>Resistencia a la Tracción (MPa)</i>	<i>Elongación (%)</i>	<i>Reducción de Área (%)</i>
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. En la Figura 1.2 se muestran esquemas de ambos procedimientos (Huang y Langdon, 2013).

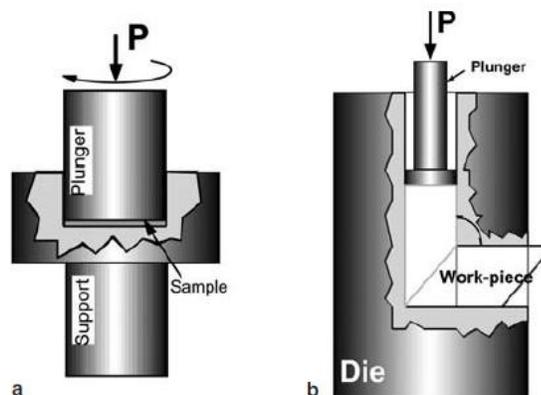


Figura 1.2 a) Torsión a Alta Presión y b) Extrusión en Canal Angular de Sección Constante (Lowe y Valiev, 2004)

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 $3,5 \mu\text{m}$ y 200 nm , respectivamente; con el consiguiente aumento de la dureza del material.

Los autores antes mencionados utilizan dados corrugadores con dientes de 45° 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. 1.3). Estos criterios de diseño del dado coinciden con los de otros autores (Shaban y Vajd, 2014; Soon, *et al.*, 2015).

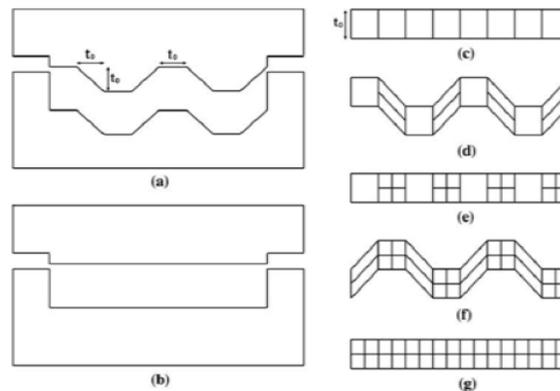


Figura 1.3 Dados deformadores a) y b), Lámina sin procesar c) y lámina corrugada y estirada durante primer ciclo d) y e) y segundo ciclo f) y g) (Shantharaja, 2013)

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 μm 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. 1.4). 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).

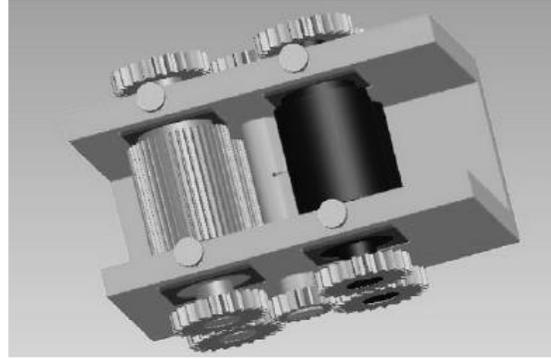


Figura 1.4 Herramienta para el Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo continuo (Pandey, 2012)

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. 1.5) (Huang, 2004).

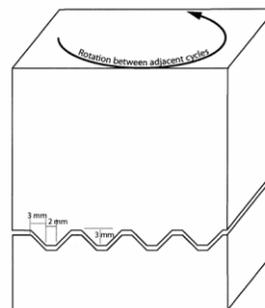


Figura 1.5 Herramienta para el Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo discontinuo, etapa de corrugación (Huang, 2004)

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.

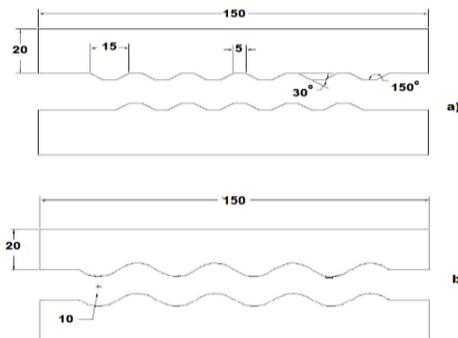


Figura 1.6 Perfiles de dados deformadores (a) geometría semiacanalada, b) geometría semicircular (Thangapandian y Balasivanandha, 2015)

De la Figura 1.6 que reportan los autores, se interpreta que en el estudio con perfil semiacanalado, utilizaron una herramienta de cinco dientes sin radio de redondeo, con ángulo y ancho de 30° y 5 mm, respectivamente, tanto para el punzón como para la matriz.

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 Reseña histórica del método de elementos finitos

Los basamentos de lo que hoy se conoce como Método de Elementos Finitos poseen siglos de evolución en tanto desde la antigüedad se aplican a problemas ingenieriles o físicos en procedimientos de discretizado (espacial y temporal) y de aproximación numérica, de los que parte el concepto de Elementos Finitos. Ejemplos de estas aplicaciones son la determinación del volumen de las pirámides por los egipcios, procedimiento similar al aplicado por Arquímedes para el cálculo del volumen de sólidos y de áreas de superficies (287-212 a.C.), así como en épocas posteriores (300 d.C.) por el matemático chino Lui Hui quien también aplicó procedimientos de aproximación para el cálculo de longitudes de circunferencias con lo que conseguía una aproximación al número (Π) igual a 3,1416.

En los años 40 del siglo XX, Courant propone la formulación de problemas elásticos en subregiones triangulares con funciones polinómicas, como un procedimiento especial del Método Variacional de Rayleigh-Ritz para la aproximación de soluciones. Posteriormente Turner, Clough, Martin y Topp aplicaron al análisis de estructuras aeronáuticas, los conceptos de discretizado y funciones de forma con la introducción de la forma con que se acepta actualmente el Método de Elementos Finitos, con la aplicación de elementos finitos simples, al utilizar barras y placas triangulares con cargas en su plano en el análisis de las estructuras en estudio (Peña, 2013).

De la temática se reportan trabajos que han contribuido al desarrollo y aplicación del método, entre ellos el trabajo de revisión de Oden que realiza importantes contribuciones matemáticas al método, así la presentación de aplicaciones del mismo al análisis estructural en los libros de Przemieniecki y de Zienkiewicz y Holister. Los libros de Zienkiewicz y Cheung o Zienkiewicz y Taylor presentan la aplicación del método a cualquier problema de campo, así como una amplia interpretación del mismo, según la

cual se demuestra que las ecuaciones de los elementos finitos pueden obtenerse con un procedimiento de aproximación de pesos residuales o de mínimos cuadrados, enfoques que incentivó la aplicación del método por los matemáticos para la solución de ecuaciones diferenciales lineales y no lineales, permitiendo resolver ecuaciones diferenciales parciales y resultando de gran utilidad en la solución de problemas con geometrías complejas. De ahí su creciente empleo en el diseño y mejora de productos a partir de la simulación de fenómenos físicos complejos (Peña, 2013).

El uso de este método está asociada al *softwares* de simulación, los que permiten la realización de etapas discriminatorias en la investigación con vistas a minimizar tiempo y recursos en la realización de experimentos, al solo realizar en esta etapa aquellos de los que ya se espere resultados que meriten la inversión.

1.9.2 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.

1.9.3 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 Shaban y 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 Restrigida mediante el *software* ABAQUS. Para ello utilizan un modelo bidimensional vasado 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 Diseño experimental

La investigación científica requiere del diseño de experimentos, en tanto es una herramienta que le confiere a la experimentación eficiencia y objetividad, por lo que los

resultados que se obtienen son confiables si además se analizan según un análisis estadístico. El tipo de diseño se debe escoger por el investigador. Si el diseño está bien concebido, el resultado del estudio tiene mayores probabilidades de ser confiable (Sampieri, *et al.*, 1997).

Entre los tipos de diseños de experimentos se encuentran: el estudio de caso con una sola medición, los diseños experimentales de series cronológicas múltiples, los diseños de series cronológicas con repetición del estímulo, los diseños con tratamientos múltiples y los diseños factoriales.

Los diseños factoriales son de amplia aplicación en la investigación de comportamientos en tanto trabajan con dos o más variables independientes, cada una con dos o más niveles. Son los más eficientes para el estudio de los efectos que producen dos o más factores e incluye las posibles combinaciones entre las variables independientes y la acción de éstas sobre la variable dependiente (Sampieri, *et al.*, 1997; Montgomery, 2001).

El diseño factorial (n^k) manipula (k) variables con (n) niveles cada una. De esta manera se pueden planificar diseños factoriales tales como un de 2×2 ($n^k = 2^2$), o de 3×3 ($n^k = 3^3$), que generan cuatro y veintisiete experimentos, respectivamente.

Los factores y las interacciones se representan mediante letras mayúsculas. Los tres niveles de los factores se refieren al nivel inferior, intermedio y superior; que se representan en la matriz experimental por -1, 0 y 1; respectivamente.

1.11 Conclusiones parciales del capítulo

1. 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).

2. 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.
3. 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 45⁰ 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 30⁰ 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).
4. 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.
5. 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 láminas metálicas. El

Diseño experimental de dicho procedimiento es factible realizarlo según un Diseño Factorial Completo (n^k).

CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

En la actualidad toda investigación responsable y eficaz, se rige por los cánones de la investigación científica, según los cuales la definición de los métodos y medios que se utilizan juega un importante papel para la solución exitosa de un problema, así como el uso de los medios informáticos que permiten minimizar el tiempo y los recursos materiales y humanos que se requieren en la investigación, a partir del empleo de *softwares* estadísticos y de simulación. En este capítulo se tienen en cuenta los criterios que anteriormente se plantean.

Se presentan los procedimientos que se aplican en la simulación por el Método de Elementos Finitos de la corrugación y estiramiento de láminas de Titanio Grado 2, así como los de la etapa preliminar que la argumenta con el Titanio Grado 5 (Ti6Al4V), utilizando el *software* DEFORM.

2.1 Procedimientos para la simulación preliminar de la corrugación y estiramiento repetitivo de láminas de titanio grado 5 (Ti6Al4V)

En el estudio preliminar se realiza la simulación con el *software* DEFORM versión 10.2 de 2011 del proceso de corrugación y estiramiento de láminas de Titanio Grado 5 (Ti6Al4V), material convencional con el que se fabrican los elementos para las fijaciones óseas y al que según la literatura consultada no se ha aplicado el método en estudio.

Esta etapa tiene como objetivo determinar el comportamiento del Titanio Grado 5 (Ti6Al4V), sometido a corrugación y estiramiento repetitivo para obtener valores referenciales sobre la interacción herramienta-lámina que permitan el procesamiento del Titanio Grado 2 hasta alcanzar propiedades similares a las del Grado 5. Para ello se establecen cuatro momentos asociados a diferentes condiciones de trabajo.

1. Utilización de láminas de Titanio Grado 5 (Ti6Al4V) con una herramienta cuyos valores de variables de diseño, reporta la bibliografía para estudios con el uso de otros materiales.

2. Utilización de diferentes valores de holguras entre el punzón y la matriz de la herramienta. Se parte de la definición de la geometría y la conceptualización de las variables de diseño de la herramienta.
3. Utilización de diferentes números de dientes de la herramienta.
4. Utilización de diferentes radios de dientes.

2.1.1 Procedimiento para analizar el comportamiento de láminas de titanio grado 5 ante la corrugación y estiramiento repetitivo

Se conoce que la aleación de Titanio Grado 5 es de interés en el campo de la medicina y que el procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo no se ha aplicado a aleaciones de titanio, por estas razones se decide comprobar la incidencia de este tratamiento en la misma, a pesar de que presenta valores de Módulos de Young y Tangente (Aguilera, 2014) superiores a los de la aleación de aluminio (AA 5083) que estudian en el 2015 Thangapandian y Balasivanandha y para el que reportan un aumento de la resistencia del material.

Para tener criterios comparativos del comportamiento, se simula la corrugación y estiramiento repetitivo de láminas de Titanio Grado 5 bajo las mismas condiciones que aplicaron Thangapandian y Balasivanandha en el 2015, para lo que se aplica el siguiente procedimiento:

1. Asignación de 2 mm como espesor de las láminas y una herramienta semiacanalada sin holgura y con 5 dientes sin curvatura (radio cero), para la etapa de corrugación. El ángulo y ancho de dientes es de 30° y 5 mm respectivamente (Fig. 2.1).

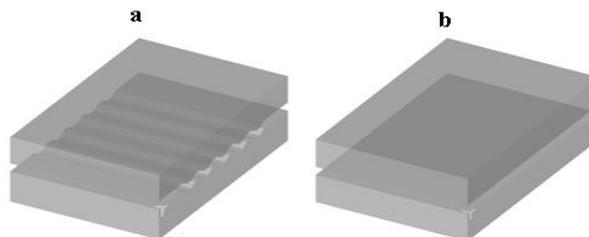


Figura 2.1 Representación de las herramientas de las dos etapas a: etapa de corrugación b: etapa de estiramiento

2. Definición de una herramienta plana para la etapa de estiramiento (Fig. 2.1).

3. Simulación de tres ciclos de corrugación y estiramiento.
4. Determinación de los valores de tensiones para el tercer ciclo.
5. Inspección a la calidad de la superficie de la lámina después de cada ciclo.
6. Comparación de la calidad de la lámina al concluir los tres ciclos con los resultados de similar análisis, que se reporta en la bibliografía (Thangapandian y Balasivanandha, 2015).

2.1.2 Procedimiento para analizar el comportamiento de láminas de Titanio Grado 5 ante la Corrugación y Estiramiento Repetitivo para diferentes valores de holguras

Se define la geometría y la conceptualización de las variables de diseño de la herramienta para el estudio de la influencia de la holgura en los resultados, en la que se aplica el mismo procedimiento del epígrafe 2.1.1 con la modificación del valor de holgura, en este caso 2 mm, e igual al espesor de la lámina que se utiliza para el estudio, con vistas a evitar la variación de las dimensiones de la misma, por aplastamiento y alargamiento en las consecutivas etapas de corrugación y estiramiento, así como la posible afectación de la calidad de la superficie, por la aparición de roturas y/o huellas provocadas por los dientes de la herramienta. Al concluir se compararán los resultados que se obtienen de tensiones tangenciales alternantes y de calidad de la lámina después de los tres ciclos de corrugación y estiramiento con los que se obtienen a partir de la variable definida en el epígrafe anterior.

2.1.3 Procedimiento para analizar el comportamiento de láminas de titanio grado 5 ante la aplicación de corrugación y estiramiento repetitivo para diferentes números de dientes del punzón de la herramienta

Para el estudio de la influencia del número de dientes de la herramienta, se aplicará el siguiente procedimiento:

1. Utilización de una herramienta semiacanalada con holgura de 2 mm igual al espesor de las láminas con ángulo, ancho y radio de dientes de 30⁰, 5 mm y 4 mm respectivamente; para la etapa de corrugación.

2. Simulación de las etapas de corrugación, con el uso de la herramienta que se define en el punto anterior para variantes de diseños con uno, tres y cinco dientes.
3. Definición de una herramienta plana para la etapa de estiramiento.
4. Simulación de tres ciclos de corrugación y estiramiento.
5. Determinación de los valores de tensiones para el tercer ciclo.
6. Inspección de la calidad de la superficie de las láminas después del tercer ciclo.
7. Comparación de los valores de tensiones y la calidad de la superficie de las láminas después del tercer ciclo para los resultados de la simulación con el uso de herramientas de uno, tres y cinco dientes.

2.1.4 Procedimiento para analizar el comportamiento de láminas de titanio grado 5 ante la corrugación y estiramiento repetitivo para diferentes valores radios de diente y ciclos de corrugación y estiramiento

Para el análisis del comportamiento de las láminas de Titanio Grado 5 se definen cuatro puntos de obtención de información sobre el comportamiento de las variables (P_1 , P_2 , P_3 y P_4) donde se espera que tengan lugar los mayores valores de tensiones tangenciales alternantes y deformaciones de Von Mises, dado que se ubican en las zonas que se corresponden con el cambio de dirección de las láminas cuando se somete a la acción del punzón.

Los puntos P_1 , P_2 , P_3 y P_4 representan la proyección de los puntos (P_1' , P_2' , P_3' y P_4') que se ubican en el diente. Los puntos P_1' y P_3' coinciden con el cambio de dirección de las líneas de contorno del diente y se ubican geométricamente donde dichas líneas se tornan tangentes a la circunferencia que se traza con el radio de curvatura del mismo. El punto P_2' se ubica en el punto medio de la cuerda que se define entre los puntos P_1' y P_3' . El punto P_4' constituye la imagen del punto P_2' en la cara opuesta del diente (Fig. 2.2).

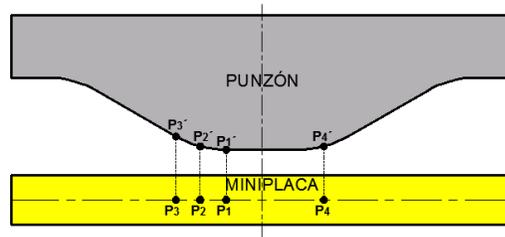


Figura 2.2 Ubicación de los puntos de observación del comportamiento de las variables

La simulación del comportamiento de láminas de Titanio Grado 5 para diferentes valores de radios de diente y ciclos de corrugación y estiramiento, se realiza según el siguiente procedimiento:

1. Definición de los diferentes valores de radio de diente: 0 mm, 2 mm y 4 mm (Fig. 2.3) para un ancho y ángulo de diente de 5 mm y 30° respectivamente, valores que utilizan Thangapandian y Balasivanandha en el 2015. En la definición de los valores de radio se tiene en cuenta que no se pierda la forma semiacanalada de la herramienta.

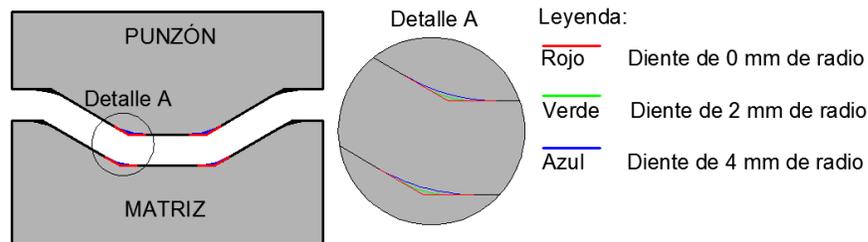


Figura 2.3 Representación de un diente para diferentes valores de radios

2. Simulación de tres ciclos de corrugación y estiramiento de las láminas para un diente con tres valores de radio de diente, con el uso del *software* DEFORM versión 10.2 de 2011.
3. Análisis de la calidad superficial de las láminas al finalizar cada ciclo (etapa de estiramiento) en busca de huellas y roturas.
4. Análisis de los valores que se obtienen de tensiones tangenciales, deformaciones de Von Mises en los puntos que se definen (P_1 , P_2 , P_3 y P_4) para los tres valores de radios de diente y de ciclos de corrugación y estiramiento, así como la variación de la longitud de las láminas.
5. Graficado y análisis de los valores de la variación de longitud de las láminas para los tres valores de radios de diente y de ciclos de corrugación y estiramiento.

6. Análisis de los gráficos obtenidos del *software* asociados con el comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes y deformaciones de Von Mises con respecto al tiempo en los 4 puntos de obtención de información, para los tres valores de radios de diente y de ciclos de corrugación y estiramiento.
7. Tabulación de los valores que se obtendrán sobre variación dimensional, tensiones tangenciales alternantes y deformaciones de Von Mises
8. Análisis comparativo de los resultados.

2.2 Procedimiento para la simulación de la corrugación y estiramiento repetitivo de láminas de titanio grado 2

En este epígrafe resulta conveniente la definición por este autor de algunos de los parámetros de diseño de la herramienta, que serán utilizados en el trabajo, tales como:

- **Par dentado.** Conformado por un diente del punzón y las dos mitades de los dos dientes de la matriz con los que interactúa (Detalle A de la Fig. 2.4). Constituye la unidad básica de una herramienta, en tanto la misma se conforma por n pares dentados.
- **Ancho del diente.** Es la longitud de la zona del diente que primero contacta con la lámina en la etapa de corrugación, o sea la longitud de la cresta del diente, (a) para el diente del punzón y (b') para el diente de la matriz, ambos iguales en valores (Fig. 2.4).
- **Ángulo del diente.** Es el ángulo que se forma entre la arista de la cresta y la cara del diente (A_P), igual en valor al que se crea hacia el interior de la herramienta entre la cara y la arista del pie del diente (A_M), válido para el diente del punzón y la matriz (Fig. 2.4).
- **Radio del diente.** Es el valor del radio de la circunferencia tangente a la cara y cresta del diente (Fig. 2.4).
- **Holgura.** Se define por este autor como holgura de la herramienta (H) a la distancia mínima y constante entre las superficies del diente del punzón y sus correspondientes superficies con los dientes de la matriz en un par dentado, o sea la distancia cresta-pie y entre las caras de los dientes del punzón y la matriz respectivamente (Fig. 2.4).

Para una herramienta de holgura cero:

- Las dimensiones de los dientes del punzón y la matriz son iguales.
- El radio del diente se iguala al radio de la circunferencia tangente a la cara y pie del mismo, en tanto la cresta del diente del punzón acopla perfectamente, sin que medie una distancia entre las superficies de las dos partes que conforman el par dentado (cresta con pie y entre las caras del diente del punzón con las de la matriz, respectivamente) (Variante I, Fig. 2.4), no así para un valor diferente de holgura en que el radio del pie rebasa el radio de la cresta, precisamente para mantener iguales geometrías manteniendo constante la holgura o distancia entre las superficies que se corresponden entre el punzón y la matriz en un par dentado (Variante II, Fig. 2.4).
- El ancho de la cresta del diente (a) se iguala al ancho del pie (a') (Variante I, Fig. 2.4), no así para un valor diferente de holgura en que el ancho del pie rebasa el ancho de la cresta ($a' = b$) > ($a = b'$), precisamente para mantener constante la holgura o distancia entre las superficies que se corresponden entre el punzón y la matriz en un par dentado (Variante II, Fig. 2.4).

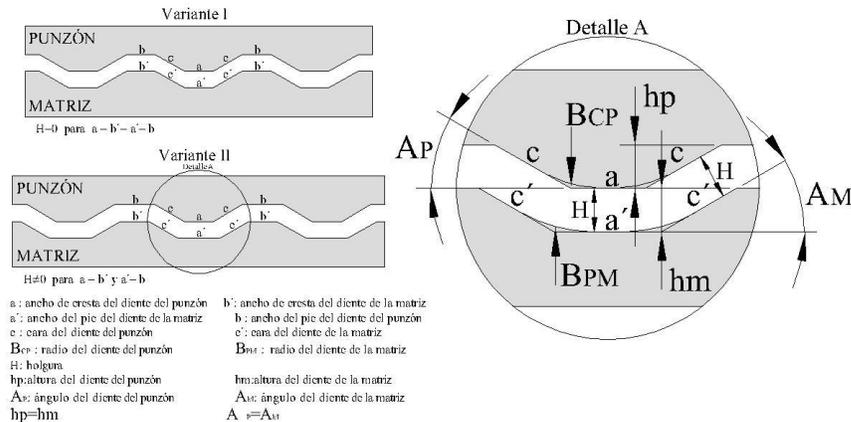


Figura 2.4 Representación de la herramienta, Variante I: con holgura y Variante II: sin holgura ($H=0$)

2.2.1 Definición de los niveles y las variables para el diseño de experimentos

Se realiza un diseño de experimentos para la definición del número de simulaciones mínimas que se requiere para la obtención de resultados confiables. El diseño se realiza

con el *software* estadístico Statgraphics. Se aplica un Diseño Factorial Completo (n^k), de tres factores a tres niveles (3^3). Los factores o variables que se trabajan para el diente son: ángulo, radio y ancho. La matriz experimental codificada del Diseño Factorial Completo que se aplica se muestra en el Anexo 4.

La definición de las variables y niveles más factibles se basa en los criterios que se obtienen de la revisión bibliográfica. Se le asigna como ancho mínimo del diente del punzón, un valor de 2 mm, igual al espesor de la lámina y 45^0 al valor medio del ángulo (Morattab, et al., 2011; Shantharaja, 2013; Siddesha y Shantharaja, 2014; Shaban y Vajd, 2015; Soon, et al., 2015).

A partir de los valores que se toman como referencia, se definen para las variables Ángulo y Ancho, valores (máximo, medio y mínimo) de (50^0 , 45^0 y 40^0) y (6 mm, 4 mm y 2 mm) respectivamente.

Para la variable radio se toma como cero milímetros el valor mínimo en correspondencia con el que reportan los autores antes mencionados y además Thangapandian y Balasivanandha en el 2015 y el máximo valor a partir del análisis de las geometrías de los diseños del diente que se obtienen para las condiciones extremas: Variantes I y II (Fig. 2.5), con la premisa de que se mantenga la geometría semiacanalada del perfil del dado corrugador. Las combinaciones de los valores para las dos condiciones extremas de diseño son: Variante I: Ancho mínimo y ángulo máximo (2 mm de ancho y ángulo de 50^0) y Variante II: Ancho máximo y ángulo mínimo (6 mm de ancho y ángulo de 40^0).

La Figura 2.5 muestra el diseño con el uso del *software* SolidWork-2016, de las dos variantes, en las que se trazan circunferencias de diferentes radios, tangentes a la cara y cresta del diente. Se observa que en la medida en que aumentan los radios de las circunferencias, disminuye el ancho de la cresta.

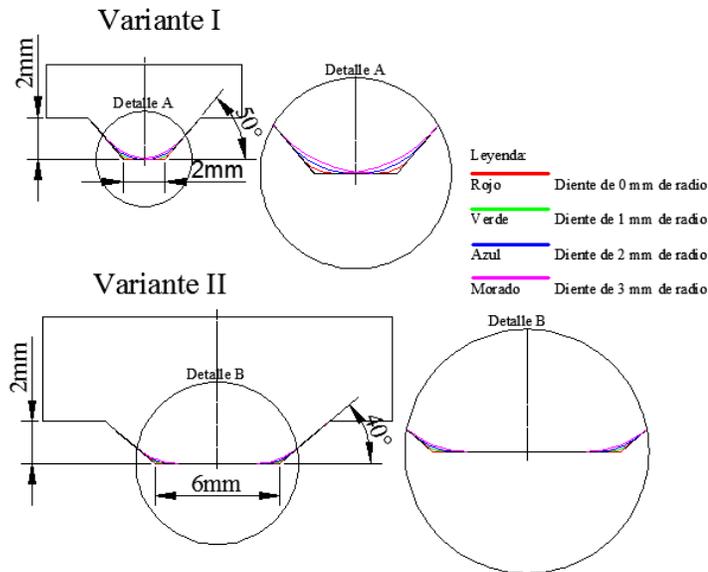


Figura 2.5 Diseño del diente para las diferentes combinaciones de variables

Para la Variante I: ancho mínimo (2 mm) y ángulo máximo (50^0), la longitud de la cresta del diente se reduce hasta convertirse en un punto para el valor de radio 3 mm, indicativo de que el área de la misma se reduce hasta una arista, dejando de tener la forma semiacanalada, por lo que este valor de radio no es factible, dejando como posibles valores a trabajar, sin que se pierda la geometría semiacanalada de la herramienta, los radio entre 0 mm y 2 mm. No se valora la posibilidad del trabajo con valores fraccionarios de radio en tanto es menos probable contar con una fresa con dichas prestaciones para la construcción de la herramienta que se proponga.

Según lo anterior se definen para la variable radio de diente del punzón los valores de 0 mm, 1 mm y 2 mm; como valores máximo, medio y mínimo; respectivamente.

Los niveles de los factores o variables que se trabajan para el diente del punzón: ángulo, radio y ancho, se sustituyen en la matriz experimental codificada del Diseño Factorial Completo y se obtiene la planificación de las simulaciones que se requieren realizar (Anexo 5).

2.2.2 Metodología para la simulación de la corrugación y estiramiento repetitivo de láminas de titanio grado 2

El objetivo de la simulación es la obtención de los parámetros geométricos de diseño del punzón de la herramienta, en tanto los de la matriz se definen por éstos y la holgura. La determinación de las variables de diseño de diente (ángulo, radio y ancho) se definen en función del análisis del comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes, tensiones efectivas y las deformaciones de Von Mises cuando se simula la corrugación y estiramiento que se efectúa sobre las láminas con una herramienta con los diferentes valores de las variables que se mencionan.

Metodología general para la simulación y análisis de los resultados de la misma:

1. Definición de las premisas y valores de los parámetros que no son objeto de estudio.
2. Elaboración del banco de información geométrica a emplear en la simulación.
3. Ejecución de la simulación de la Corrugación y Estiramiento Repetitivo de láminas de Titanio Grado 2, según las corridas previstas en el diseño experimental.
4. Análisis de la calidad superficial de las láminas al finalizar el ciclo (etapa de estiramiento) en busca de huellas, muescas y roturas.
5. Obtención en las 27 simulaciones y para un ciclo de deformación, de:
 - Los gráficos de tensiones tangenciales alternantes (σ_T), tensiones efectivas ($\Delta\sigma_{Ef}$) y deformaciones de Von Mises (ϵ_{VM}) contra tiempo, en los cinco puntos de obtención de información.
 - La tabulación de los valores que se obtienen en el paso anterior.
6. Determinación de los rangos de tensiones tangenciales alternantes ($\Delta\sigma_T = \sigma_{Tm\acute{a}x} - \sigma_{Tm\acute{i}n}$), tensiones efectivas ($\Delta\sigma_{Ef} = \sigma_{Efm\acute{a}x} - \sigma_{Efm\acute{i}n}$) y de deformaciones de Von Mises ($\Delta\epsilon_{VM} = \epsilon_{VMm\acute{a}x} - \epsilon_{VMm\acute{i}n}$); como criterios de homogeneidad del comportamiento de las tres variables dependientes y por tanto como criterios de homogeneidad del tamaño de granos en las láminas, después de la aplicación del Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo (Rodríguez, *et al.*, 2011; Huang y Langdon, 2013).

2.2.2.1 Premisas y valores de los parámetros que no son objeto de estudio en la simulación

La simulación del Procedimiento de Corrugación y Estiramiento de las láminas de Titanio Grado 2, se realiza con una herramienta de geometría plana para el estiramiento y semiacanalada para la corrugación, ambas con un valor constante de holgura e igual al espesor de la lámina, en este caso de 2 mm. Igual valor se le asigna a la altura del diente del punzón, según criterios de autores (Morattab, et al., 2011; Shantharaja, 2013; Siddesha y Shantharaja, 2014; Shaban y Vajd, 2015; Soon, et al., 2015). Se considera la traslación del punzón en función de una presión hidráulica en la dirección del eje Z con una velocidad de 1 mm/s (Siddesha y Shantharaja, 2013). Se realiza un mallado tetraédrico de la lámina que se procesa.

2.2.2.2 Procedimiento informático para la elaboración del banco de información geométrica

Para la elaboración del banco de información geométrica se hace uso del *software* SOLIDWORKS-2016 y se aplica el siguiente procedimiento:

1. Se elabora en 2D el modelo geométrico de la lámina y de las herramientas para las etapas de estiramiento y corrugación (con y sin radio) y se acotan literalmente, para que sirvan como modelo único para las 27 simulaciones.
2. Se establece una correlación entre la posición de las herramientas y las láminas en la etapa de elaboración del modelo geométrico, para lo que se emplea un sistema de coordenadas cartesianas que brinda el *software* SolidWorks-2016.
3. Se definen por medio del administrador de ecuaciones las variables independientes y se establece su relación con la geometría de la herramienta y la lámina, teniendo presente el posicionamiento de las mismas por medio de un sistema de coordenadas cartesianas. Se genera y exporta un archivo de ecuaciones con extensión (txt) que se utiliza en cada simulación.
4. Se edita el archivo para cada simulación de modo que una vez que se importa el modelo geométrico de las herramientas y la lámina, éstas adquieran los nuevo valores; con un ahorro de tiempo considerable en la elaboración de los modelos.

5. Se guarda en archivos independientes los modelos geométricos de las láminas, el punzón y la matriz; con extensión (dxf), compatible con el *software* DEFORM versión 10.2 de 2011, éstos constituyen el banco de información geométrica.

2.2.2.3 Procedimiento para la simulación de la corrugación y estiramiento repetitivo de láminas de titanio grado 2

Para la simulación de la aplicación de la Corrugación y Estiramiento Repetitivo de las láminas de Titanio Grado 2, es necesario definir los pasos a seguir para cada una de las etapas del procedimiento: corrugación y estiramiento.

2.2.2.3.1 Procedimiento para la simulación de la etapa de corrugación

1. Se importan desde la ventana de pre procesamiento los archivos correspondientes a las geometrías del punzón, la matriz y lámina, creados como parte del banco de información geométrica.
2. Se le asignan a las geometrías que se importan, una tercera dimensión, la profundidad, pasando de ser elementos de geometrías planas a elementos con volumen.
3. Se nombran las geometrías que se importan y se definen los comportamientos para el punzón, la matriz y la lámina, como CUERPO RÍGIDO para las dos primeras y ELASTOPLÁSTICO para la última.
4. Se define el tipo de traslación, dirección y velocidad del punzón.
5. Se asigna el material a la lámina.
6. Se define el tipo de mallado y el número de elementos que lo forman.
7. Se establecen las restricciones de movimiento a lámina.
8. Se calcula el volumen de lámina.
9. Se establece la relación de contacto entre la lámina y los dos elementos de la herramienta.
10. Se establece en el control de simulación:
 - Número de pasos de simulación y cada cuántos pasos se hará una salva.
 - Traslación del punzón por cada paso de simulación.
 - Criterio de remallado.

11. Se genera la base de datos con las definiciones que se establecen en los pasos anteriores.
12. Se carga la base de datos y se corre la simulación.

2.2.2.3.2 Procedimiento para la simulación de la etapa de estiramiento

1. Se carga la última corrida de la etapa de corrugación.
2. Se cambia la herramienta deformadora por los dados planos según los pasos 1 y 2 del procedimiento de corrugación.
3. Se corre la simulación de la etapa de estiramiento con los criterios que se definen en los pasos 3 al 11 de la etapa de corrugación.

2.2.2.3.3 Procedimiento para el análisis de los resultados de la simulación de la corrugación y estiramiento repetitivo de láminas de titanio grado 2

Para el procesamiento estadístico de los resultados, se aplica el siguiente procedimiento:

1. Se definen cinco puntos de obtención de información (P_1 , P_2 , P_3 , P_4 y P_5) para el análisis del comportamiento de las variables dependientes en las láminas de Titanio Grado 2, con vistas a conocer la influencia de todo el perfil del diente sobre la misma; en tanto los mismos representan la proyección sobre ésta de los cinco puntos que se ubican en el diente (P_1' , P_2' , P_3' , P_4' y P_5'). Los puntos P_2' y P_4' se ubican sobre las aristas de la cresta del diente sin curvatura y en el punto medio entre ambos se ubica P_3' . Los puntos P_1' y P_5' también son puntos medios pero de las aristas de las caras del diente (Fig. 2.4).

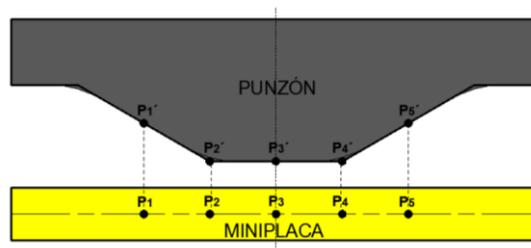


Figura 2.4 Ubicación de los puntos de observación del comportamiento de las variables para la lámina de Titanio Grado 2

2. Se definen las coordenadas de los cinco puntos que se ubican en el diente (P_1' , P_2' , P_3' , P_4' y P_5') con vistas a la ubicación de sus proyecciones (P_1 , P_2 , P_3 , P_4 y P_5) sobre el eje de simetría del espesor de la lámina (Fig. 2.4) para cada una de las 27 simulaciones.
3. Se determinan en los cinco puntos, los valores de las variables dependientes: tensiones tangenciales alternantes (σ_T), tensiones efectivas (σ_{Ef}) y deformaciones de Von Mises (ϵ_{VM}), de las que se obtienen los rangos de valores en que se mueven los resultados ($\Delta\sigma_T$, $\Delta\sigma_{Ef}$ y $\Delta\epsilon_{VM}$) así como la variación de longitud de las láminas (ΔL). Los rangos de valores se toman como criterio de la homogeneidad del tamaño de grano que se logra, siendo mayor la homogeneidad en la medida en que los mismos sean menores, indicativo de que las valores de las variables distan menos en los diferentes puntos.
4. Se crea una Escala de Calidad Superficial para evaluar la calidad superficial de las láminas después de la aplicación del Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo.
5. Se tamizan las simulaciones y se desechan aquellas en que no se considera buena la calidad superficial de las láminas (calidad 2 y 3), indicativo de que la geometría del diente no es adecuada.
6. Se determinan y analizan los resultados que se obtienen para las variables dependientes en los cinco puntos de obtención de información.
7. Se toma como resultado de las variables dependientes el mayor valor que se obtiene de los cinco puntos de obtención de información en las láminas (en las simulaciones que se escogen después de eliminar aquellas en que no se obtiene buena calidad superficial) como valor para la realización del Análisis de Regresión con el uso del *software* estadístico Statgraphics, para cada una de las variables dependientes de las simulaciones que se seleccionan según el criterio de calidad.
8. Se realiza el análisis de las tablas y gráficos que aporta el Statgraphics, con vistas a la obtención del modelo que relaciona las variables dependientes (tensión tangencial alternante, tensión efectiva y deformación de Von Mises) con las variables en estudio (ángulo, radio y ancho del diente).

9. Se determina la combinación óptima para las variables independientes ángulo, radio y ancho del diente del punzón, con el propio *software* Statgraphics, válidos para el diente de la matriz.
10. Se determina la geometría del pie del diente (ángulo, radio y ancho) por análisis geométrico a partir de la geometría y dimensiones del diente del punzón en un par dentado, teniendo en cuenta la influencia de la holgura.
11. Se tabulan las dimensiones óptimas de un par dentado para la herramienta que se propone.

2.3 Conclusiones parciales del capítulo

1. Se simula la deformación plástica severa de láminas de Titanio Grado 5 (Ti6Al4V) y Grado 2 por el Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo, con dados semiacanalados aplicando el Método de Elementos Finitos con el uso del software de simulación DEFORM.
2. La simulación de la corrugación y estiramiento repetitivo de la lámina de Titanio Grado 5, se realiza bajo las condiciones que reporta la bibliografía para una aleación de Aluminio (AA 5083): se aplica a una lámina de 2 mm de espesor con una herramienta sin holgura y con 5 dientes de radio 0 mm y 30° y 5 mm de ángulo y ancho, respectivamente. Posteriormente se prueban valores de holgura 2 mm, radios de 2 mm y 4 mm y diferentes números de dientes (uno, tres y cinco) y tres ciclos de corrugación y estiramiento; con vista a definir la factibilidad de la aplicación del procedimiento a láminas de Titanio Grado 5 y a definir el número de dientes y ciclos de corrugación para aplicar al estudio del Titanio Grado 2. Se analiza la calidad superficial de la lámina después del tratamiento y el comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes y las deformaciones de Von Mises.
3. Las simulaciones de la corrugación y estiramiento repetitivo de láminas de Titanio Grado 2, se realizan según un Diseño Factorial Completo, de tres factores (ángulo, radio y ancho) a tres niveles (3^3), donde los niveles para el ángulo y el ancho se definen según un rango a partir de los valores que reportan los autores.

4. Para los niveles de la variable radio, se toma como cero el valor mínimo, atendiendo a la bibliografía y como máximo, el valor que corresponde al diseño de diente que conserva la geometría semiacanalada del punzón, entre los diferentes diseños de dientes que se realizan para las combinaciones de los valores extremos de las variables ancho y ángulo, con el uso del *software* SolidWorks.
5. Se analiza la calidad superficial y la variación de longitud (ΔL) de las láminas de Titanio Grado 2, productos de las simulaciones de la corrugación y estiramiento repetitivo, y se le determinan y analizan los comportamientos de los valores de deformaciones de Von Mises y tensiones tangenciales alternantes y efectivas, en cinco puntos de las mismas, que se corresponden con los que se ubican sobre la superficie del diente con que contactan. Para el análisis, se desechan los resultados de las simulaciones en que las láminas se clasifican con valores de 2 y 3 en la Escala de Calidad Superficial que se define en el trabajo.
6. Con el uso del *software* estadístico Statgraphics se realiza un Análisis de Regresión a la data de los máximos valores que se obtienen para las tres variables dependientes que se definen (deformaciones de Von Mises y tensiones tangenciales alternantes y efectivas), con el consiguiente análisis de las tablas y gráficos asociados al modelo que se obtiene, al que se le determina la combinación óptima para las variables independientes ángulo, radio y ancho del diente del punzón, a partir de la cual y por análisis geométrico de un par dentado, se completan los parámetros de diseño del mismo y por ende de la herramienta que se propone.

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En el presente capítulo se presenta el análisis de los resultados de la simulación de la corrugación y estiramiento de la lámina de titanio grado 2, así como de la etapa preliminar que la argumenta con el titanio grado 5 (Ti6Al4V).

3.1 Análisis de los resultados de la simulación preliminar de la corrugación y estiramiento repetitivo de láminas de titanio grado 5

En este epígrafe se analizan los resultados de la aplicación del Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo de láminas de Titanio Grado 5 (Ti6Al4V) con el uso del DEFORM como *software* de simulación, con vistas a determinar el comportamiento del material, así como las variables con sus niveles de experimentación y premisas de trabajo; a tener en cuenta en la segunda etapa de investigación con el Titanio Grado 2.

3.1.1 Análisis de los resultados del comportamiento de láminas de titanio grado 5 ante la aplicación del procedimiento de corrugación y estiramiento repetitivo

La Figura 3.1 representa los perfiles de tensiones tangenciales alternantes que se obtienen para la lámina de Titanio Grado 5, después de tres ciclos de corrugación y estiramiento bajo las condiciones que se definen en el epígrafe 2.1.1. Para los mismos se obtienen similares perfiles con un valor máximo de aproximadamente 70 MPa.

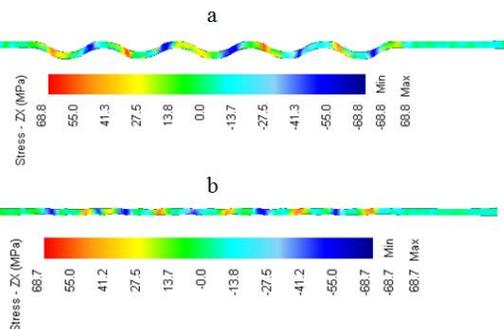


Figura 3.1 Perfil de tensiones tangenciales alternantes del Titanio Grado 5 después de tres ciclos de corrugación y estiramiento con herramienta de 5 dientes y 0 mm de holgura

Durante la simulación, se observa que la lámina no se adapta bien a la geometría de los dientes de la herramienta y cuando se realiza la inspección de la calidad de la superficie de la misma después de cada ciclo, se aprecian claras deformaciones, dadas por la presencia de zonas de roturas y huellas transversales del punzón, en contraposición a la calidad que se alcanza en la lámina de aleación de aluminio (AA 5083) (Figura 3.2), a pesar de que la simulación se realiza bajo las mismas condiciones que para ésta, según se reporta en la bibliografía (Thangapandian y Balasivanandha, 2015).

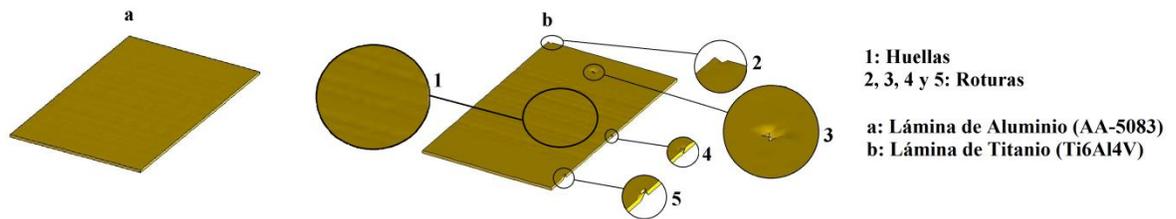


Figura 3.2 Láminas de aluminio (AA-5083) y Titanio Grado 5 (Ti6Al4V) después tres ciclos de corrugación y estiramiento

Este comportamiento se puede explicar por la menor tendencia al desplazamiento entre el punzón y la matriz, que presenta la lámina de Titanio Grado 5 (Ti6Al4V), dada sus propiedades físicas y mecánicas que están relacionadas con los Límite de Fluencia, Módulo de Young y Tangente y que según el epígrafe 1.3.9.1 se reportan muy superiores a los de la aleación de aluminio (AA 5083).

Se analiza que las afectaciones a la calidad que tienen lugar en la lámina de Titanio Grado 5 (Ti6Al4V), pudieran no presentarse si la lámina se desplazara con mayor facilidad entre el punzón y la matriz, lo que se debe favorecer si entre los mismos se establece un valor de holgura diferente de cero. De lo anterior se deriva la factibilidad de aplicar este criterio en simulaciones posteriores.

3.1.2. Análisis de los resultados del comportamiento de láminas de titanio grado 5 ante la aplicación del procedimiento de corrugación y estiramiento repetitivo para diferentes valores de holguras

La Figura 3.3 representa los perfiles de tensiones tangenciales alternantes que se obtienen para la lámina de Titanio Grado 5. Las condiciones para las que se obtienen difieren de las del epígrafe anterior en que se trabaja con un valor de holgura de 2 mm, para la que igualmente se obtienen similares perfiles para la corrugación y el estiramiento, ahora con un valor máximo de aproximadamente 137 MPa, o sea se incrementa el valor máximo de tensión tangencial alternante en 67 MPa con el uso de una herramienta con holgura.

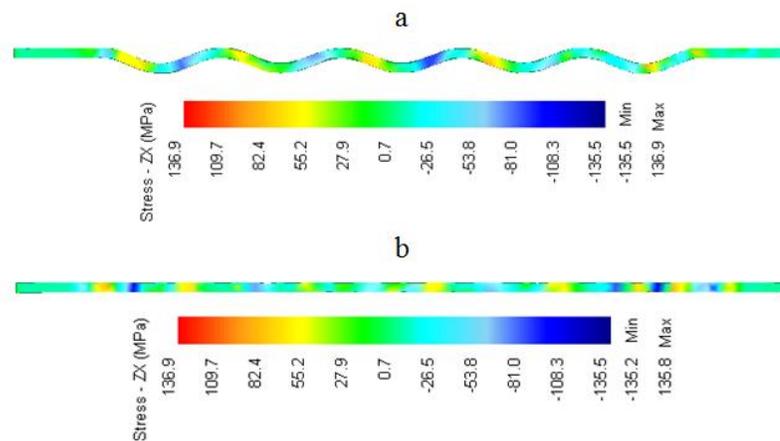


Figura 3.3 Perfil de tensiones tangenciales alternantes del Titanio Grado 5 después de tres ciclos de corrugación y estiramiento con herramienta de 5 dientes y 2 mm de holgura

La Figura 3.4 muestra la superficie de las láminas que se someten a herramientas con diferentes valores de holgura, después de tres ciclos de corrugación y estiramiento. Se aprecia que la que se procesa con la herramienta de 2 mm de holgura, no presenta roturas y son más tenues las huellas del punzón sobre la superficie, que las que aparecen en la lámina que se procesa con la herramienta de holgura cero, la que además presenta roturas. Éste es un resultado esperado dado que durante la simulación se observa que la lámina se adapta bien a la geometría de los dientes de la herramienta, lo contrario de lo que se observa para la lámina que se procesa con herramienta de holgura cero.

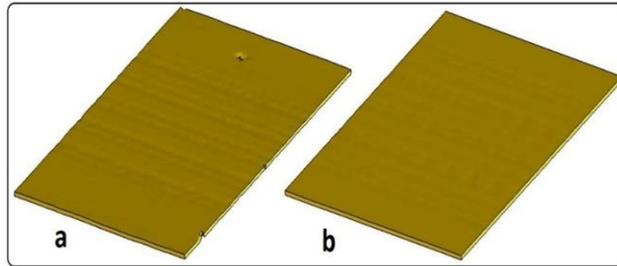


Figura 3.4 Superficie de la lámina de Ti6AL4V después de proceso de corrugación y estiramiento con dos tipos de herramienta: a) sin holgura. b) con holgura 2 mm

En este epígrafe se corrobora la conveniencia del uso en estudios posteriores de herramientas con holgura y específicamente con un valor igual al espesor de la lámina.

3.1.3. Análisis de los resultados del comportamiento de láminas de titanio grado 5 ante la aplicación del procedimiento de corrugación y estiramiento repetitivo para diferentes números de dientes del punzón de la herramienta

De la Figura 3.5 se aprecia que los perfiles de tensiones tangenciales alternantes son similares en la corrugación y estiramiento, independientemente del número de dientes y alcanzan valores máximos de tensiones de 132,2 MPa para la simulación con un diente y de 135,5 MPa y 135,7 MPa para las simulaciones con tres y cinco dientes, respectivamente. Este último valor es ligeramente inferior al de 136,9 MPa que se obtiene en el epígrafe anterior (Fig. 3.3-b) para iguales condiciones de simulación pero con valor de 0 mm de radio, por lo que se puede atribuir la disminución de la tensión tangencial alternante máxima en 1,2 MPa al hecho de pasar de radio cero a radio 4 mm, indicativo de que el radio del diente influye en los resultados, por lo que es conveniente tenerlo en cuenta en estudios posteriores.

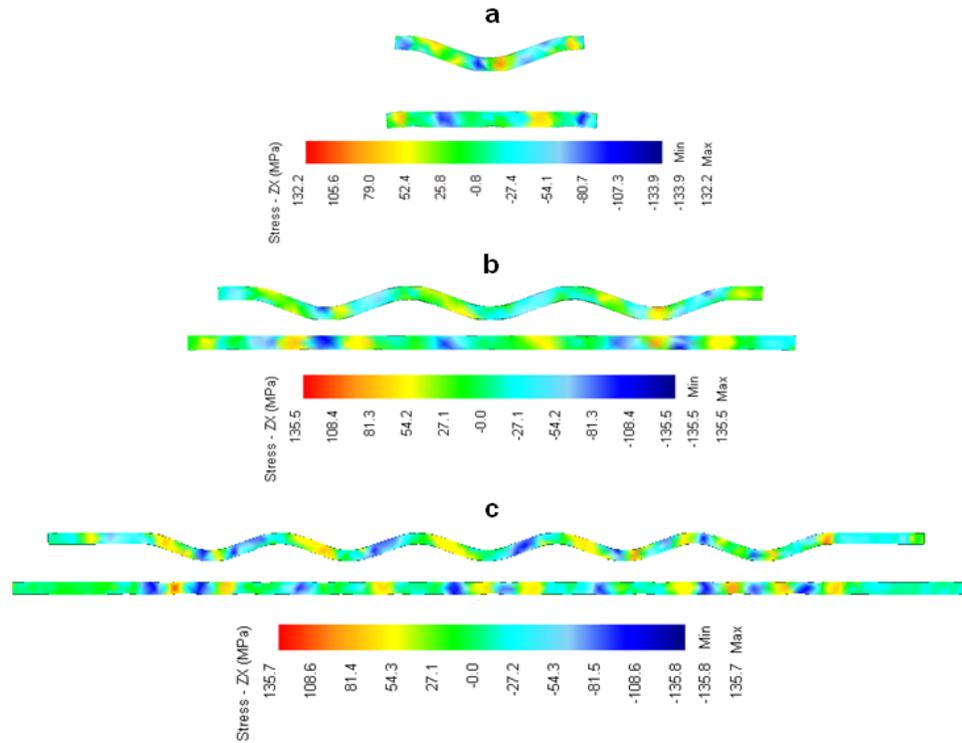


Figura 3.5 Perfil de tensiones tangenciales alternantes a lo largo de la lámina de Titanio Grado 5 después de tres ciclos de corrugación y estiramiento con holgura 2 mm y radio 4 mm para diferentes números de dientes: a: uno b: tres y c: cinco

De las observaciones anteriores se aprecia similar comportamiento de la lámina independientemente del número de dientes, según los valores de tensiones y su distribución a lo largo de la misma, así como a la no afectación de su calidad superficial, lo que conlleva al razonamiento de que es posible utilizar un solo diente en simulaciones posteriores, sin detrimento de la información que se obtiene y con el beneficio del ahorro de tiempo en las corridas y por tanto de los recursos que se requieren.

3.1.4 Análisis del comportamiento de láminas de titanio grado 5 ante la aplicación del procedimiento de corrugación y estiramiento repetitivo para diferentes valores radios de diente y ciclos de corrugación y estiramiento

Los Anexos 1 y 2 muestran los gráficos que arroja el DEFORM de tensiones tangenciales alternantes y deformaciones de Von Mises contra tiempo cuando se simulan las etapas de

estiramiento de los tres ciclos de deformación que se aplican a la lámina de Ti6Al4V con herramientas de dientes de radios 0 mm, 2 mm y 4 mm.

Los gráficos de los Anexos 1.1 al 1.3 muestran el comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes en los cuatro puntos de observación (P_1 , P_2 , P_3 y P_4) sobre la lámina de Titanio Grado 5, durante el tiempo en que transcurre la etapa de estiramiento de la misma, para cada uno de los tres ciclos de corrugación y estiramiento. De manera similar los gráficos de los Anexos 2.1 al 2.3 muestran el comportamiento de las deformaciones de Von Mises. El Anexo 3 recoge a modo de tabla los valores que se extraen de los gráficos que se mencionan, e incluye los rangos de tensiones y deformaciones de Von Mises que existen entre los tres puntos contiguos de observación (P_1 , P_2 , P_3), así como los incrementos que sufre la longitud de la lámina en cada corrida.

3.1.4.1 Análisis del comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes y las deformaciones de Von Mises para diferentes valores de radios de dientes y ciclos de corrugación y estiramiento

Del análisis de los Anexos 1.1 al 1.3 y 3, se aprecia que de los puntos 1, 2 y 3, los valores máximos y mínimos de tensiones tangenciales alternantes, corresponden a los puntos 1 y 3, en los que según la Figura 2.2 coinciden con la acción sobre la lámina del comienzo y terminación de la curvatura de la cresta del diente. La excepción de esta tendencia es la obtención del valor mínimo en el punto 2, para el tercer ciclo con radio 4 mm, el que se desprecia teniendo en cuenta que es el único entre nueve resultados.

Tanto para los valores máximos (puntos 1) como mínimo (puntos 3), se observa (Anexo 3) que las tensiones tangenciales alternantes disminuyen con el incremento del radio y para cada valor de radio, aumentan con el incremento del número de ciclo, excepto para el tercer ciclo con radio 4 mm, que constituye la excepción que se despreció anteriormente.

El punto 2 en posición intermedia entre los puntos 1 y 3, muestra precisamente valores intermedios de tensiones tangenciales alternantes (Anexo 3). El punto 4 tiene una ubicación similar a la del punto 2 pero en la cara opuesta del diente y al igual que éste presenta valores intermedios entre los que se obtienen para los puntos 1 y 3, en los tres ciclos de corrugación

y estiramiento para los tres radios de diente, también con la excepción del resultado del tercer ciclo con radio 4 mm, que puede despreciarse teniendo en cuenta que es el único entre nueve resultados.

El valor máximo y mínimo de tensiones tangenciales alternantes que se obtienen son de 101 MPa y 3.98 MPa en el tercer ciclo para los radios de diente de 0 mm y 4 mm, respectivamente (Anexo 3).

Las curvas que describen el comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes de los cuatro puntos contra el tiempo (Anexos 1.1 al 1.3) confluyen en un rango de tensiones máximo de 68,1 MPa para el primer ciclo con radio de diente 2 mm y mínimo de 5,47 MPa para el tercer ciclo con radio de diente 4 mm, lo que también puede constatararse en la Figura 3.6, en la que se aprecia de manera consolidada que el rango de tensiones que se obtiene al finalizar el tercer ciclo, disminuye con el aumento del radio.

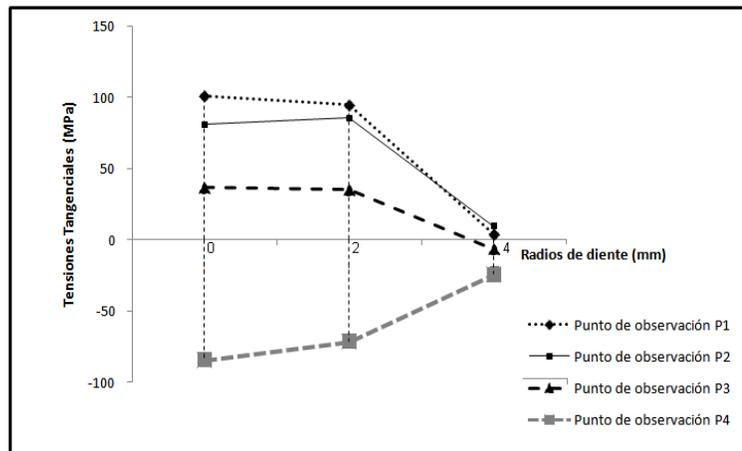


Figura 3.6 Tensiones tangenciales alternantes en los cuatro puntos de observación para un diente con radios de 0 mm, 2 mm y 4 mm después del tercer ciclo

Según las observaciones anteriores se aprecia que para mayores radios se obtiene un menor valor máximo de tensión tangencial alternante y menor diferencia entre los valores de tensiones en los diferentes puntos sobre los que acciona el diente, por ende menor rango de tensiones entre ellos, al finalizar el ciclo, lo que era esperado atendiendo a que un diente con mayor radio hace menos abrupta la corrugación de la lámina.

Del análisis de los Anexos 2.1 al 2.3 y 3 de deformaciones de Von Mises en los cuatro puntos de observación sobre la lámina, durante el tiempo en que transcurre la etapa de estiramiento de la misma en los tres ciclos de deformación y para los tres valores de radio, se aprecia que de los puntos 1, 2 y 3, los valores máximos y mínimos corresponden a los puntos 2 y 3 respectivamente, excepto para el tercer ciclo con radio 0 mm y el segundo ciclo con radio 4 mm, en los que el valor mínimo se obtiene en el punto 1 y el tercer ciclo con radio 4 mm en el que el valor mínimo se repite en los puntos 3 y 1, o sea en los que acciona los extremos de la curvatura del diente, anomalía que ocurre para el caso que precisamente se desprecia en el análisis de las tensiones.

Tanto para el valor máximo (puntos 2) como para el mínimo (puntos 3), se observa (Anexo 3) que las deformaciones de Von Mises disminuyen con el incremento del radio y para cada valor del mismo, aumentan con el incremento del número de ciclo.

En este caso el punto 4 que es el homólogo en posición al punto 2, pero en la cara contraria del diente no tiene un comportamiento similar como era esperado, en tanto sus valores son mayores que el de los puntos 1 y 3 sólo en dos casos: primero y segundo ciclos para radio de 2 mm.

El valor máximo y mínimo de deformaciones de Von Mises que se obtienen son de 0.046 mm/mm y 0.013 mm/mm para el tercer ciclo con radio 0 mm y primer ciclo con radios 2 y 4 mm, respectivamente (Anexo 3).

Según los Anexos 2.1 al 2.3, las curvas que describen el comportamiento de las deformaciones de Von Mises de los cuatro puntos contra el tiempo confluyen en un rango máximo de 0.014 mm/mm para el tercer ciclo con radio de diente 0 mm y mínimo de 0.008 mm/mm para el primer ciclo con radio de diente 4 mm, lo que también puede constatarse en la Figura 3.7. La diferencia entre ambos rangos máximo y mínimo es sólo de 0,006 mm/mm.

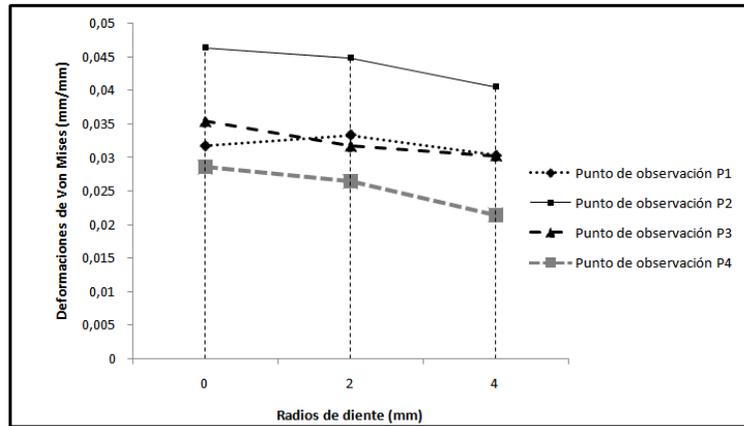


Figura 3.7 Deformaciones de Von Mises en los cuatro puntos de observación para un diente con radios de 0 mm, 2 mm y 4 mm al concluir el tercer ciclo

A partir del análisis de los puntos P₁, P₂, P₃ y P₄ del estudio preliminar se concluye que independientemente de la tendencia de los resultados que se obtienen, los mismos no son suficientes en cantidad ni presentan la mejor distribución de modo que se pueda obtener un perfil completo de los valores de las variables a lo largo de la lámina por la acción completa de la cresta del diente del punzón y así determinar el grado de homogeneidad de la misma, indicativo también del grado de homogeneidad del tamaño del grano que se logra. Por lo anteriormente expuesto se considera más factible en estudios posteriores realizar una nueva distribución de puntos de observación.

En todos los análisis anteriores, se corrobora que desde el primer ciclo de corrugación y estiramiento, se aprecia la influencia de la variable radio de diente sobre los valores de tensiones tangenciales alternantes y deformaciones de Von Mises, lo que conlleva a la idea de que en futuras simulaciones en que se estudie el comportamiento de ésta u otra variable de diseño de la herramienta, se puede ejecutar un solo ciclo de corrugación y estiramiento con el consiguiente ahorro de tiempo y recursos.

En la Figura 3.8 se integra valores que se reportan en el Anexo 3, y muestra que en todos los ciclos y para todos los valores de radios de diente, la longitud de la lámina se incrementa, como mínimo en 0,482 mm para el primer ciclo de deformación con diente de radio 4 mm y como máximo en 1,207 mm para el tercer ciclo de deformación con diente de radio 0 mm.

Este alargamiento de la lámina se hace mayor en la medida en que disminuye el radio del diente.

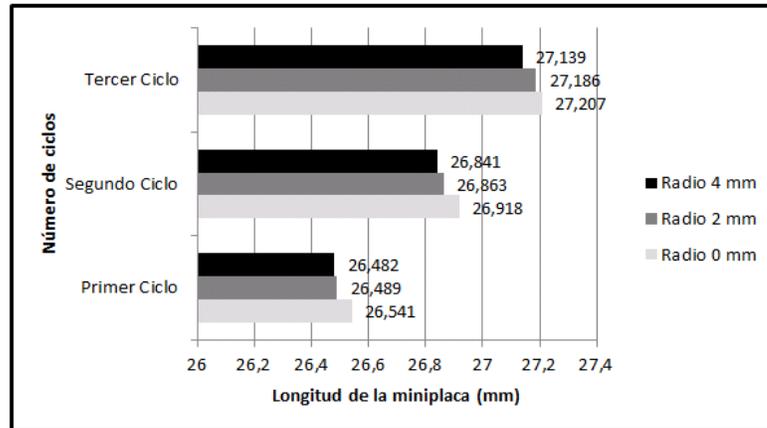


Figura 3.8 Longitud de la lámina al finalizar la etapa de estiramiento de cada ciclo de deformación para los tres valores de radios de diente de la herramienta

3.2 Análisis de los resultados de la simulación de la corrugación y estiramiento repetitivo de láminas de titanio grado 2

En este epígrafe se muestran los resultados de la simulación de la corrugación y estiramiento de láminas de Titanio Grado 2, con el uso de una herramienta de geometría semiacanalada con un valor constante de holgura que se aplica tanto para la etapa de corrugación como la de estiramiento, y con diferentes valores de las variables de diseño de diente.

En el Anexo 6 se muestran las coordenadas de los cinco puntos sobre la lámina (P₁, P₂, P₃, P₄ y P₅) en los que se determinan los valores de las variables dependientes en cada una de las 27 simulaciones en la lámina de Titanio Grado 2

El Anexo 7 (Anexo 7.1–7.27) muestra los gráficos que arroja el DEFORM del comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes (σ_T), tensiones efectivas (σ_{Ef}) y deformaciones de Von Mises (ϵ_{VM}) en los cinco puntos de observación sobre la lámina, durante el tiempo en que transcurre la etapa de estiramiento, para las 27 simulaciones del ciclo de deformación que se realiza a la lámina de Titanio Grado 2.

El Anexo 8 recoge a modo de tabla los valores que se extraen de los gráficos que se mencionan, e incluye el diferencial entre los valores máximo y mínimo de tensiones tangenciales alternantes ($\Delta\sigma_T = \sigma_{Tm\acute{a}x} - \sigma_{Tm\acute{i}n}$), tensiones efectivas ($\Delta\sigma_{Ef} = \sigma_{Ef\acute{m}a\acute{x}} - \sigma_{Ef\acute{m}i\acute{n}}$) y de deformaciones de Von Mises ($\Delta\varepsilon_{VM} = \varepsilon_{VM\acute{m}a\acute{x}} - \varepsilon_{VM\acute{m}i\acute{n}}$); así como los incrementos de la longitud de la lámina (ΔL), para las 27 simulaciones.

La Escala de Calidad Superficial que se genera para evaluar la calidad de las láminas se muestra en el Anexo 9. De la aplicación de la misma a las láminas de las 27 simulaciones, se define que en 13 de ellas, no se obtiene buena calidad (calidad 2 y 3). Estas son las láminas de las simulaciones 1, 3, 5, 7, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 21 y 27; que se clasifican según el criterio de calidad, en el Anexo 8 y se identifican (sombreadas) en el Anexo 7.

Según esta selección quedan con buena calidad 14 láminas, las correspondientes a las simulaciones 2, 4, 6, 8, 9, 10, 17, 19, 20, 22, 23, 24, 25 y 26, a las que se les determinan los valores de las tensiones tangenciales alternantes, tensiones efectivas, y deformaciones de Von Mises en los cinco puntos de observación. Los resultados que reporta el DEFORM se muestran en el Anexo 7 (Anexos 7.2, 7.4, 7.6, 7.8, 7.9, 7.10, 7.17, 1.19, 7.20, 7.22, 7.23, 7.24, 7.25 y 7.26) en los que se observan las tendencias de las curvas que describen las trayectoria de los cinco puntos de observación para las tres variables dependientes (tensiones tangenciales alternantes, tensiones efectivas y deformaciones de Von Mises) contra tiempo durante la etapa final del ciclo de corrugación y estiramiento.

Comportamiento de los cinco puntos para las tensiones tangenciales alternantes

En todas las curvas se aprecia una zona en que la trayectoria que describen los cinco puntos se corresponden con valores constantes de tensión tangencial alternante, previa a la dispersión de las mismas, que se corresponde con el momento en que comienza a accionar el punzón sobre la lámina. Posteriormente hacia finales del estiramiento, dichas trayectorias tienden a confluír hacia un rango de tensiones, indicativo de que se acercan los valores finales de las tensiones en los cinco puntos. Dichos valores se resumen en el Anexo 8 en el que además se destacan los valores máximo y mínimo que se obtienen, así como los rangos entre ellos, para cada una de las 14 simulaciones.

Del análisis en el Anexo 7 y 8, para las tensiones tangenciales alternantes en las 14 simulaciones que se analizan, se aprecia que de los cinco puntos, los valores máximos de tensiones, corresponden a los puntos 1 y 5, en los que según la Figura 2.4 coinciden con la acción sobre la lámina de los puntos medios de las dos caras del diente. Los valores mínimos se obtienen en los puntos 2, 3 y 4 que se corresponden con la acción de la cresta del diente del punzón.

El valor máximo y mínimo de tensiones tangenciales alternantes que se obtienen son de 473,4003 MPa y 1,0882 MPa para las simulaciones 8 y 6, respectivamente. El mayor valor se obtiene para ángulo 45° , radio 2 mm y ancho 2 mm. El menor valor se obtiene para ángulo 50° , radio 1 mm y ancho 2 mm (Anexo 8).

El rango máximo y mínimo de tensiones tangenciales alternantes para los que confluyen las trayectorias de los cinco puntos son 442,1205 MPa y 153,2480 MPa para las simulaciones 9 y 19, respectivamente. El mayor valor se obtiene para ángulo 50° , radio 2 mm y ancho 2 mm. El menor valor se obtiene para ángulo 40° , radio 0 mm y ancho 6 mm (Anexo 8). Estos valores máximo y mínimo se asocian a la máxima y mínima homogeneidad en el tamaño de granos en la lámina.

Comportamiento de los cinco puntos para las tensiones efectivas

De manera similar a los gráficos que anteriormente se analiza, las curvas de tensión efectiva contra tiempo, se aprecia una zona en que la trayectoria que describen los cinco puntos se corresponden con valores constantes de tensión, previa a dos tipos de tendencias:

1. A disminuir y aumentar bruscamente los valores, describiendo generalmente una “V” para después continuar trayectorias similares tendientes a confluir hacia un mismo rango de tensiones (Anexos 7.2, 7.6, 7.8, 7.9, 7.10 y 7.17).
2. A aumentar bruscamente para posteriormente continuar un aumento menos brusco con el avance del tiempo y tendiente a confluir hacia un mismo rango de tensiones (Anexos 7.4, 7.19, 7.20, 7.22, 7.23, 7.24, y 7.25).

En la simulación 26 (ángulo 45° , radio 2 mm y ancho 6 mm) se obtiene una tendencia similar a la primera, con la diferencia de la trayectoria en forma de “V”, se repite dos veces.

Dichos valores se resumen en el Anexo 8 en el que además se destacan los valores máximo y mínimo que se obtienen, así como los rangos entre ellos, para cada una de las 14 simulaciones.

Del análisis en el Anexo 7 y 8, para las tensiones efectivas en las 14 simulaciones que se analizan, se aprecia que de los cinco puntos, los valores máximos de tensiones, se encuentran indistintamente en los puntos 1, 4 y 5, estando la mayoría concentrados en los puntos medios de las dos caras del diente. Los valores mínimos se obtienen en los puntos 2 y 3, que son dos de los tres puntos que se ubican en la cresta del diente.

El valor máximo y mínimo de tensiones efectivas que se obtienen son de 1 106,5749 MPa y 643,0616 MPa y coinciden para las mismas condiciones de simulación: ángulo 45° , radio 2 mm y ancho 6 mm, que se da en la simulación 26 (Anexo 8).

El rango máximo y mínimo de tensiones efectivas para los que confluyen las trayectorias de los cinco puntos son 463,5133 MPa y 24,9256 MPa para las simulaciones 26 y 19, respectivamente. El mayor valor se obtiene como es de esperar en la simulación 26 en tanto en ella coincide el máximo y mínimo valor. El menor valor se obtiene para ángulo 40° , radio 0 mm y ancho 6 mm, la misma condición para la que se obtiene el rango mínimo de tensión tangencial alternante (Anexo 8).

Comportamiento de los cinco puntos para las deformaciones de Von Mises

De manera similar a los gráficos que anteriormente se analiza, las curvas de deformaciones de Von Mises contra tiempo, se aprecian dos tipos de tendencias:

1. Las trayectorias comienzan prácticamente paralelas al eje del tiempo, indicativo de poca o ninguna variación de la variable dependiente, con un segundo momento en que ocurre para la mayoría de las curvas un descenso brusco para en un tercer momento retomar la tendencia inicial de manera menos evidente y posteriormente confluir hacia un rango para el que se acercan los valores finales de las de deformaciones para los cinco puntos (Anexos 7.2, 7.6, 7.8, 7.9, 7.10 y 7.17).
2. Las trayectorias comienzan con un descenso brusco indicativo de una disminución brusca del valor de la variable, que posteriormente durante un mayor período de tiempo que el

que dura la trayectoria anterior, se mantienen con tendencia paralela al eje del tiempo, o sea con poco o ninguna variación de la variable dependiente. En un tercer momento las trayectorias tienden a confluir hacia un rango para el que se acercan los valores finales de las de deformaciones para los cinco puntos (Anexos 7.4, 7.19, 7.20, 7.22, 7.23, 7.24 y 7.25).

En la simulación 26 (ángulo 45^0 , radio 2 mm y ancho 6 mm) se obtiene una tendencia similar a la primera, con la diferencia de que la trayectoria que tiene lugar en el tercer momento, no ocurre para la mayoría de los puntos.

Del análisis en el Anexo 7 y 8, para las deformaciones de Von Mises en las 14 simulaciones que se analizan, se aprecia que de los cinco puntos, los valores máximos de tensiones, se encuentran indistintamente en los puntos 1, 4 y 5, estando la mayoría concentrados en los puntos medios de las dos caras del diente. Los valores mínimos se obtienen en los puntos 2 y 3, que son dos de los tres puntos que se ubican en la cresta del diente. Los resultados de este análisis es el mismo que se obtuvo para las tensiones efectivas.

El valor máximo y mínimo de deformaciones de Von Mises que se obtienen son de 0,4250 mm/mm y 0,0099 mm/mm y tienen lugar en las simulaciones 22 y 24, respectivamente. El mayor valor se obtiene para ángulo 40^0 , radio 1 mm y ancho 6 mm. El menor valor se obtiene para ángulo 50^0 , radio 1 mm y ancho 6 mm (Anexo 8).

El rango máximo y mínimo de deformaciones de Von Mises para los que confluyen las trayectorias de los cinco puntos son 0,4122 mm/mm y 0,0050 mm/mm para las simulaciones 22 y 8, respectivamente. El mayor valor se obtiene para ángulo 40^0 , radio 1 mm y ancho 6 mm. El menor valor se obtiene para ángulo 45^0 , radio 2 mm y ancho 2 mm (Anexo 8).

En el Anexo 8 se aprecia que la lámina aumenta su longitud en cada uno de las 14 simulaciones que se analizan. El valor máximo y mínimo de este incremento es de 0,0455 mm/mm y de 0,0098 mm/mm y tienen lugar en la simulaciones 6 y 26, respectivamente. El mayor valor se obtiene para la simulación con ángulo 50^0 , radio 1 mm y

ancho 2 mm y el menor valor cuando se simula con ángulo 45° , radio 2 mm y ancho 6 mm (Anexo 8).

Según los valores que se obtienen se aprecia que realmente la lámina sufre un alargamiento aunque se pueda considerar relativamente pequeño, en tanto puede alargarse hasta cinco centésimas por milímetro de longitud de la misma. Este resultado es diferente a lo que plantea la bibliografía consultada, donde según la cual en los Métodos de Deformación Plástica Severa para la obtención de un material nano-estructurado, no varían las dimensiones de la muestra (Otea Aimme, 2009).

Los Anexos 10, 11, 12 y 13 muestran los resultados estadísticos para las tres variables dependientes en estudio: tensiones tangenciales alternantes, tensiones efectivas y deformaciones de Von Mises; que se obtienen a partir del Análisis de Regresión que se le realiza con el software estadístico Statgraphics, a los resultados de las simulaciones que se seleccionan con buena calidad superficial de la lámina.

Análisis de los resultados estadísticos de las tensiones tangenciales alternantes

Del análisis de regresión, se analizan los efectos estimados, el análisis de varianza (Tabla ANOVA) y la Carta de Pareto (Anexos 10, 11 y 12), para definir las variables significativas y ajustar el modelo.

Según el Anexo 10, los efectos estimados más significativos para las tensiones tangenciales alternantes son en orden decreciente: ancho (C), radio (B), ángulo-radio (AB), ancho al cuadrado (CC), radio-ancho (BC), ángulo al cuadrado (AA), radio al cuadrado (BB), ángulo-ancho (AC) y el ángulo (A); en función del orden decreciente del valor absoluto de los respectivos estimadores B_j y por tanto de su posible efecto sobre la variable respuesta. De ellas se identifican como variables significativas: ancho (C), radio (B) y ángulo-radio (AB) para las que el valor del estimador rebasa el valor del error estándar, o sea que el intervalo de confianza que se genera al afectar el estimador por el error estándar (+/-), no incluye el cero. Las variables significativas se reducen a ancho (C) y radio (B) a partir del análisis de varianza (Anexo 11), en tanto son las únicas cuyos valores de Fisher calculado (86,66 y 8,23), son superiores a los tabulados (para ambas igual a 7,71 para un 95 % de

confianza) (Batanero y Díaz, 2008; De Veaux, 2001). Analizando por el P-value se llega a las mismas conclusiones que en el análisis anterior, ya que solo para ambas variables resulta menor que 0,05. Resultados que se corroboran por la Carta de Pareto (Anexo 12) según los cuales son significativos solo las variables ancho (C) y radio (B), en tanto son las que superan el valor de la *t-student*.

La factibilidad del modelo se evalúa a partir del análisis de varianza (Anexo 12), según el cual la suma de los cuadrados totales (117567,0) es mucho mayor que la suma de los cuadrados del error (3472,82), lo que es indicativo de que el modelo es aceptable al estar la mayor parte de la variabilidad explicado por la regresión, cuestión que se corrobora al calcular el Fisher de la regresión: $F_c = \frac{SCy^{\wedge}}{Sce} = 33.8534$, que resulta mayor que el Fisher tabulado para la misma, $F_{tab} = 5.89$ (Batanero y Díaz, 2008; De Veaux, 2001), lo que es indicativo de que el modelo es adecuado. A igual conclusión se llega según el coeficiente de determinación múltiple ($R^2 = 97,85\%$), indicativo de que el 97,85% de la variabilidad se controla por la regresión, siendo este resultado adecuado incluso atendiendo al coeficiente de determinación ajustado ($R^2 = 90,4\%$).

No obstante los resultados anteriores con el uso del software se eliminan las variables no significativas y se ajusta el modelo. El Anexo 13.1 resume las tablas y figuras que arroja el software estadístico Statgraphics de los resultados del Análisis de Regresión del modelo ajustado.

El nuevo modelo de tensiones tangenciales alternantes (σ_T) ajustado para las variables significativas radio (B) y ancho (C), responde a un valor de coeficiente de determinación $R^2 = 91,2\%$ y $R^2 = 89,6\%$ (ajustado) (Anexo 13.1, Tabla 2) y se representa por la siguiente expresión:

$$\sigma_T = 37.9B - 43.1C + 464.2 \quad (3.1)$$

Del análisis de la Superficie de Respuesta para el modelo ajustado (Anexo 13.1, Fig. 2) se aprecia un incremento lineal de los valores de tensiones tangenciales alternantes a medida que aumenta el valor de radio y disminuye el valor del ancho.

La gráfica de observados contra valores predichos (Anexo 13.1, Fig. 3) muestra una dispersión de los puntos cercana a la línea, lo que corrobora la factibilidad del modelo y da criterio de que no se viola el supuesto de varianza constante.

En la gráfica de residuos contra valores predichos (Anexo 13.1, Fig. 4) se aprecia que se forma una barra horizontal alrededor de la línea, lo que confirma la no negación del supuesto de normalidad en los errores. Igual conclusión se obtiene por el comportamiento de la gráfica de porcentaje contra residuos (Anexo 13.1, Fig. 6), con la aparición de una dispersión de puntos aledaña a la línea.

El comportamiento de la gráfica de residuos contra número de corridas (Anexo 13.1, Fig. 5) con una dispersión de los puntos también en forma de barra horizontal alrededor de la línea, criterio de varianza constante y que no influye ninguna otra variable que no se haya incluido en el estudio. Todos estos resultados del análisis de los residuos confirman que el modelo ajustado es adecuado para el comportamiento experimental que se obtiene.

Análisis de los resultados estadísticos de las tensiones efectivas y deformaciones de Von

Mises

Los Anexo 13.2 y 13.3 reportan los resultados del Análisis de Regresión que se aplica a los valores máximos de tensiones efectivas (σ_{Ef}) y deformaciones de Von Mises (ϵ_{VM}) que se obtienen en las simulaciones que se seleccionan con buena calidad superficial de la lámina.

En ellos se analizan los efectos estimados, el análisis de varianza y la Carta de Pareto; para definir las variables significativas según los criterios expuestos en similar análisis realizado anteriormente para las tensiones tangenciales (σ_T). Dicho análisis indica que ninguna de las variables independientes y sus combinaciones son significativas, de hecho el coeficiente de determinación (R^2) para los modelos que las correlaciona es bajo (61,8 para las tensiones efectivas y 50,5 para las deformaciones de Von Mises) indicativo de que no son representativos de la correlación entre las mismas y las variables dependientes. Los mismos se exponen según las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{Ef} = -0.1A^2 - 3.4B^2 + 9.8C^2 + 7.6AB + 0.5AC + 15.2BC - 1.4A - 379.6B - 116.3C + 1370.4 \quad (3.2)$$

$$\epsilon_{VM} = 1,3 \cdot 10^{-3}A^2 - 1,3 \cdot 10^{-1}B^2 - 2,7 \cdot 10^{-3}C^2 + 1,9 \cdot 10^{-3}AB - 6,9 \cdot 10^{-3}AC - 2,9 \cdot 10^{-3}BC + 1,3 \cdot 10^{-1}A + 1,9 \cdot 10^{-1}B + 3,4 \cdot 10^{-1}C - 3.4 \quad (3.3)$$

Las superficies de respuestas de ambos modelos se muestran en las Figuras 2 de los Anexos 13.2 y 13.3 y las Figuras 3 de ambos, muestran las gráficas de observados contra predichos, en las que se observa una tendencia diferente a la apreciada para las tensiones tangenciales alternantes en el que el modelo si era adecuado, estando más pronunciada la desviación de los puntos para el caso de la deformaciones de Von Mises (Anexo 13.3, Fig. 3). Las gráficas de análisis de residuos se reportan en las Figuras 4, 5 y 6 en las que se aprecia un comportamiento acorde a la conclusión a la que ya se ha arribado de que el modelo no resulta representativo para ninguna de las dos variables dependientes que se analizan.

Teniendo en cuenta el análisis estadístico anterior para las tres variables dependientes, se define que las tensiones tangenciales alternantes son las que muestran una respuesta significativa ante la influencia de las variables independientes en estudio, por lo que es al modelo que la identifica (Ecuación 3.1) al que se le determina el óptimo según el propio *software* Statgraphics y por el que se obtiene el resultado que se reporta en la (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Respuesta óptima para las tensiones tangenciales alternantes

Optimize Response			
Goal: maximize Tensiones Tangenciales			
Optimum value = 453,764			
Factor	Low	High	Optimum
Ángulo	40,0	50,0	45,0
Radio	0,0	2,0	2,0
Ancho	2,0	6,0	2,0

Se aprecia que el valor óptimo que se obtiene de tensiones tangenciales alternantes es de 453,764 MPa, cuando las variables independientes en estudio (variables de diseño del diente del punzón) toman los valores óptimos de 45° de ángulo y 2 mm de radio y ancho.

3.3 Determinación de la geométrica de la herramienta a emplear en el procedimiento de corrugación y estiramiento repetitivo de láminas de titanio grado 2

En la Figura 3.10 se representan todas las variables de diseño de un par dentado. Los valores óptimos de las variables ángulo, radio y ancho del diente del punzón se reportan en la (Tabla 3.2) del epígrafe anterior. La Altura del diente es una variable de diseño prefijada, así como la holgura de la herramienta, ambas iguales a 2 mm. Las dimensiones del diente son válidas tanto para el punzón como para la matriz.

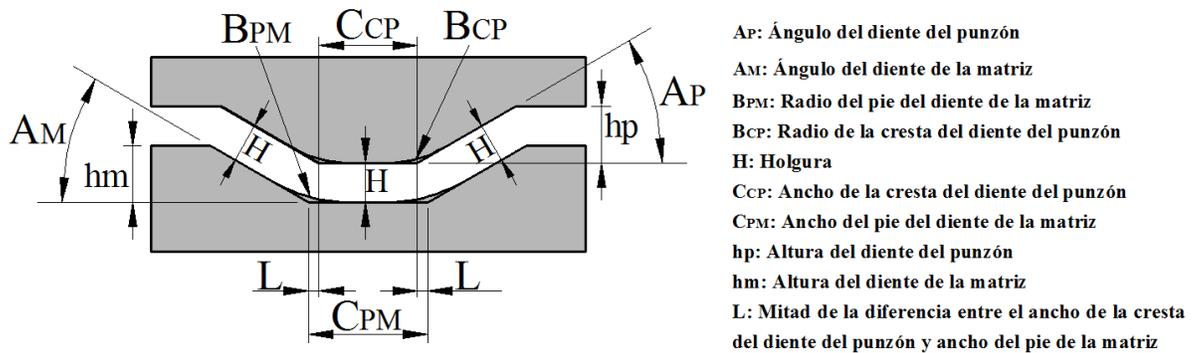


Figura 3.10 Representación de un par dentado de la herramienta

Las dimensiones del pie del diente (ángulo, radio y ancho) se obtienen a partir del análisis de la geometría y dimensiones del diente del punzón en el par dentado, teniendo en cuenta la influencia de la holgura ($H = 2 \text{ mm}$) y según lo cual se cumple que:

- El ángulo del pie del diente hacia el interior (A_M) es igual al ángulo del punzón (A_P).

$$A_M = A_P \quad (3.4)$$

- El radio del pie del diente

$$B_{PM} = B_{CP} + H \quad (3.5)$$

- El ancho del pie (C_{PM}) rebasa el ancho de la cresta (C_{CP}), precisamente para mantener constante la holgura o distancia entre las superficies que se corresponden entre el punzón y la matriz en el par dentado. En dicho caso se cumple que:

$$C_{PM} = C_{CP} + 2L \quad (3.6)$$

Donde L es la mitad de la diferencia entre el ancho del pie del diente de la matriz (C_{PM}) y el ancho de la cresta del diente del punzón (C_{CP}).

Análisis trigonométrico para el cálculo de L

El análisis trigonométrico se basa en la Figura 3.11, según la cual se cumple que:

$$L = \overline{BE}$$

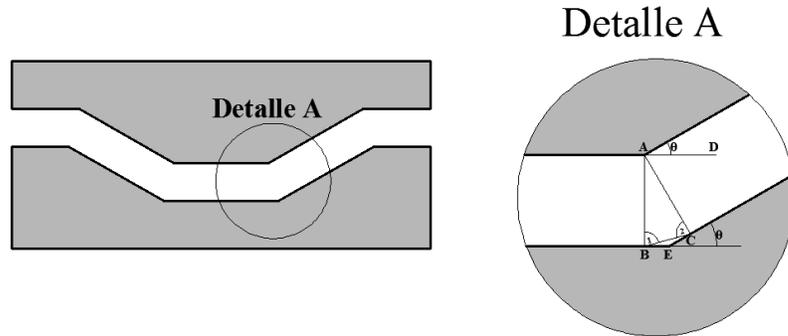


Figura 3.11 Representación trigonométrica que relaciona la dimensión L (\overline{BE}) con la Holgura (\overline{AB} y \overline{AC}) y el ángulo del diente (θ)

$$\frac{\overline{BE}}{\text{sen } \angle BCE} = \frac{\overline{BC}}{\text{sen } \angle BEC} \quad (\text{Teorema del Seno})$$

$$L = \overline{BE} = \left(\frac{\overline{BC}}{\text{sen } \angle BEC} \right) \times \text{sen } \angle BCE \quad (3.7)$$

Determinación de los términos de la ecuación 3.7:

• Determinación del \overline{BC}

$$\frac{\overline{BC}}{\text{sen } \angle BAC} = \frac{\overline{AB}}{\text{sen } \angle 2} \quad (\text{Teorema del Seno})$$

$$\overline{BC} = \left(\frac{\overline{AB}}{\text{sen } \angle 2} \right) \times \text{sen } \angle BAC \quad \overline{AB} \text{ es el valor de Holgura} \quad (3.8)$$

Determinación del $\angle BAC$

$$\angle BAC + \angle CAD = 90^\circ \quad (\text{Ángulos complementarios que conforman el } \angle BAD \text{ de } 90^\circ)$$

$$\sphericalangle BAC = 90^{\circ} - \sphericalangle CAD \quad (3.9)$$

$\sphericalangle CAD + \theta = 90^{\circ}$ (Ángulos complementarios que conforman un ángulo de 90°)

$$\sphericalangle CAD = 90^{\circ} - \theta \quad (3.10)$$

Sustituyendo la ecuación 3.10 en la 3.9, se obtiene que:

$$\sphericalangle BAC = \theta$$

Determinación del $\sphericalangle 2$

$$\sphericalangle BAC + \sphericalangle 1 + \sphericalangle 2 = 180^{\circ} \text{ (suma de los ángulos internos de un triángulo)} \quad (3.11)$$

Como $\overline{AB} = \overline{AC}$ (segmentos que representan la holgura)

El triángulo BAC es isósceles y por tanto los ángulos de su base son iguales, $\sphericalangle 2 = \sphericalangle 1$

Sustituyendo en la ecuación 3.11, se obtiene:

$$\sphericalangle BAC + 2(\sphericalangle 2) = 180^{\circ}$$

$$\sphericalangle 2 = \left(\frac{180^{\circ} - \sphericalangle BAC}{2} \right)$$

$$\sphericalangle 2 = \left(\frac{180^{\circ} - \theta}{2} \right) \quad (3.12)$$

Sustituyendo en la ecuación 3.8, se obtiene que:

$$\overline{BC} = \left(\frac{\overline{AB}}{\text{sen}\left(\frac{180^{\circ} - \theta}{2}\right)} \right) \times \text{sen } \theta \text{ (}\overline{AB} \text{ es el valor de Holgura)} \quad (3.13)$$

- **Determinación del $\sphericalangle BCE$**

$\sphericalangle BCE + \sphericalangle 2 = 90^{\circ}$ (ángulo complementarios que conforman el $\sphericalangle ACE$ de 90°)

$$\sphericalangle BCE = 90^{\circ} - \sphericalangle 2$$

$$\sphericalangle BCE = 90^{\circ} - \left(\frac{180^{\circ} - \theta}{2} \right) \quad (3.14)$$

• **Determinación del \sphericalangle BEC**

$$\sphericalangle BEC + \sphericalangle BCE + \sphericalangle CBE = 180^{\circ} \text{ (suma de los ángulos internos de un triángulo)} \quad (3.15)$$

Como:

1. El \sphericalangle BCE es complementario del \sphericalangle 2, que conforman el \sphericalangle ACE de 90° .
2. El \sphericalangle CBE es complementario del \sphericalangle 1, que conforman el \sphericalangle ABE de 90° .
3. \sphericalangle 1 = \sphericalangle 2.

Entonces el \sphericalangle BCE = \sphericalangle CBE

Sustituyendo en la ecuación 3.15, se obtiene que:

$$\sphericalangle BEC = 180^{\circ} - 2(\sphericalangle BCE)$$

$$\sphericalangle BEC = 180^{\circ} - 2 \left(90^{\circ} - \left(\frac{180^{\circ} - \theta}{2} \right) \right) \quad (3.16)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.13, 3.14 y 3.16 en la ecuación 3.7, se obtiene que:

$$L = \overline{BE} = \left(\frac{\left(\frac{\overline{AB}}{\text{sen} \left(\frac{180^{\circ} - \theta}{2} \right)} \right) \times \text{sen } \theta}{\text{sen} \left(180^{\circ} - 2 \left(90^{\circ} - \left(\frac{180^{\circ} - \theta}{2} \right) \right) \right)} \right) \times \text{sen} \left(90^{\circ} - \left(\frac{180^{\circ} - \theta}{2} \right) \right) \quad (3.17)$$

Según los resultados de las ecuaciones 3.4 a la 3.17 en las que se sustituyen los valores óptimos que se reportan en la (Tabla 3.2), se completan los valores de las variables de diseño (Fig. 3.10) del par dentado de la herramienta. Dichos valores se resumen en la (Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Valores de las variables de diseño de la herramienta que se propone

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
hp	Altura del diente del punzón	2	milímetros	mm
hm	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

Los valores anteriores se sustituyen en el esquema del par dentado (Fig. 3.10) y se obtiene el esquema del par dentado de la herramienta que se propone, unidad básica que es posible multiplicar tantas veces como dientes se les desee incluir a la herramienta (Fig. 3.12).

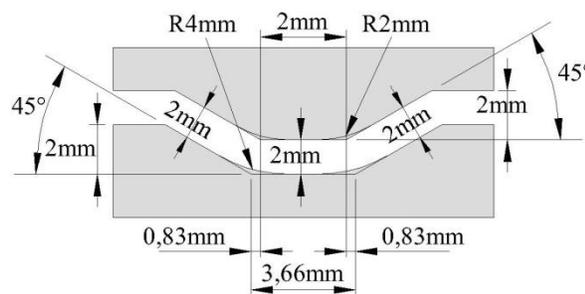


Figura 3.12 Representación de un par dentado de la herramienta propuesta

3.4 Conclusiones parciales del capítulo

1. Es factible la simulación con el *software* DEFORM de la Corrugación y Estiramiento Repetitivo de láminas de Titanio con un límite de fluencia hasta 795 MPa, valor del límite de fluencia del titanio Grado 5 (Ti6Al4V), siempre que se trabaje con dados deformadores con holgura diferente de cero, para que se favorezca el desplazamiento y ajuste de la lámina al dado corrugado y no se afecte la calidad de la superficie de la misma.
2. Con la simulación de la Corrugación y Estiramiento Repetitivo de la lámina de Titanio Grado 5 (Ti6Al4V), se comprueba que:
 - Para la evaluación del comportamiento de diferentes variables, es posible la utilización de un solo ciclo en tanto desde el primero se aprecian valores de las tensiones tangenciales alternantes muy similares a los que se obtienen con uno o dos ciclos más. De igual manera que son similares los valores de las tensiones que se obtienen con el uso de uno, tres o cinco dientes de la herramienta, con lo que se concluye que es posible en otros estudios de comportamiento de variables, realizar simulaciones para un diente y un solo ciclo de corrugación y estiramiento de láminas, en tanto se obtienen criterios del comportamiento de la misma ante la acción de la herramienta con un mínimo de tiempo y recursos para la simulación.
 - Se obtienen menores valores de tensiones tangenciales alternantes y deformaciones de Von Mises así como del incremento de la longitud de la lámina, a medida que aumenta el valor de radio de diente, indicativo de que es una variable cuya influencia debe ser estudiada y teniendo en cuenta que es una variable de diseño del diente, deja la probabilidad de que otras de diseño también influyan e incluso modifiquen la propia influencia del radio; razones por las que es conveniente incluir en los estudios, el ancho y el ángulo.
 - Las zonas donde comienza y termina la curvatura de la cresta del diente son las que mayor y menor influencia respectivamente, ejercen sobre los valores de tensiones tangenciales que se obtienen. La zona media en la curvatura propicia los valores medios que resultan similares en las dos caras del diente. No obstante estos resultados preliminares se consideran para cuatro puntos, los que no son suficientes en cantidad ni

presentan la mejor distribución como para obtener el perfil completo de la influencia de la cresta del diente del punzón sobre la lámina.

3. Se realizan 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 (50^0), medio (45^0) y mínimo (40^0), Ancho: máximo (6 mm), medio (4 mm) y mínimo (2 mm) y Radio: máximo (2 mm), medio (1 mm) y mínimo (0 mm).
4. De las 27 simulaciones que se realizan con el Titanio Grado 2, se desechan los resultados de las simulaciones cuyas láminas se clasifican con valores de 2 y 3 en la Escala de Calidad Superficial que se define en el trabajo, por lo que quedan 14 simulaciones para el análisis de los resultados, cuyas láminas se clasifican con valor uno de Calidad Superficial. En las mismas que constata que la lámina incrementa su longitud, obteniéndose valores máximo y mínimo de incremento de 0,0455 mm/mm y de 0,0098 mm/mm, respectivamente.
5. Con la simulación de la Corrugación y Estiramiento Repetitivo de la lámina de Titanio Grado 2, se comprueba que:
 - A partir de los 5 puntos de observación que se definen, se obtiene la influencia de todo el perfil del diente sobre la lámina, a lo largo de la cual, se puede determinar el comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes, tensiones efectivas y deformaciones de Von Mises, y establecer un criterio de homogeneidad que se asocia a su vez a la homogeneidad del tamaño del grano que se logra.
 - Las curvas que describen para los cinco puntos de observación, los valores de tensiones tangenciales alternantes, tensiones efectivas y deformaciones de Von Mises contra tiempo, son similares entre sí para cada caso y todas tienen en común que al finalizar el estiramiento, las trayectorias confluyen hacia un rango de valores de las respectivas variables; independientemente de las formas de las curvas (una forma única para las tensiones tangenciales alternantes y dos patrones de curvas para las tensiones efectivas y deformaciones de Von Mises).

6. Del Análisis de Regresión que se realiza con el *software* estadístico Statgraphics a los máximos valores que se obtienen para las tres variables dependientes (tensiones tangenciales alternantes, tensiones efectivas y deformaciones de Von Mises), se obtienen los modelos correspondientes, de los que se constata estadísticamente que sólo el modelo para las tensiones tangenciales alternantes ($\sigma_T = 37.9B - 43.1C + 464.2$), resulta representativo del comportamiento de la variable, con un coeficiente de determinación múltiple (R^2) de 97,85 % y un coeficiente de determinación ajustado de 90,4 %, para un valor de 473 MPa).
7. Las tensiones tangenciales alternantes son de las tres variables, las que muestran una respuesta significativa ante la influencia de las variables independientes, por lo que es al modelo que la identifica, al que se le determina el óptimo, con el propio *software* Statgraphics, el cual se obtiene para los valores de 45^0 de ángulo y 2 mm de radio y ancho, a partir del cual y por análisis geométrico de un par dentado, se completan los parámetros de diseño del mismo y por ende de la herramienta que se propone.
8. La geometría de la herramienta que se 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 45^0 , ancho y radio de cresta de 2 mm y ancho y radio de pie de diente de 3.66 mm y 4 mm; respectivamente.

CONCLUSIONES

1. Se cumple el objetivo general de la investigación que es: obtener la variante óptima de parámetros geométricos de la herramienta que se requiere para aplicar la Deformación Plástica Severa 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, 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.
2. Se logró simular con el *software* DEFORM la Corrugación y Estiramiento Repetitivo de láminas de titanio, corroborándose que: es factible la aplicación de dicho procedimiento, con dados deformadores con holgura diferente de cero, así como que es factible realizar la simulación para un solo ciclo y con un solo diente, sin que varíen considerablemente los resultados.
3. Se obtiene el comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes contra tiempo, durante la aplicación del Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo en láminas de Titanio Grado 2, lo que facilita por medio del análisis estadístico de los valores de las mismas la determinación de los parámetros óptimos de la geometría de la herramienta.

RECOMENDACIONES

1. Aplicar la geometría propuesta en la construcción de la herramienta a utilizar a nivel experimental real para la Corrugación y Estiramiento Repetitivo de láminas de Titanio Grado 2.
2. Utilizar el procedimiento informático propuesto para la elaboración del banco de información con parámetros de la geometría semiacanalada de la herramienta en otras simulaciones en DEFORM del Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo a láminas de otros materiales.
3. Hacer análisis de resistencia por elementos finitos de la herramienta con los parámetros geométricos definidos en el presente trabajo y profundizar en los daños que se producen en la lámina producto de la interacción con la herramienta.

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, 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.
- 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.
- Dassault Systemes SolidWorks Corporation, 2016. *Introduction to Simulation: SOLIDWORKS Simulation*, United States.
- 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, 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.
- 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.mppma
- 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.

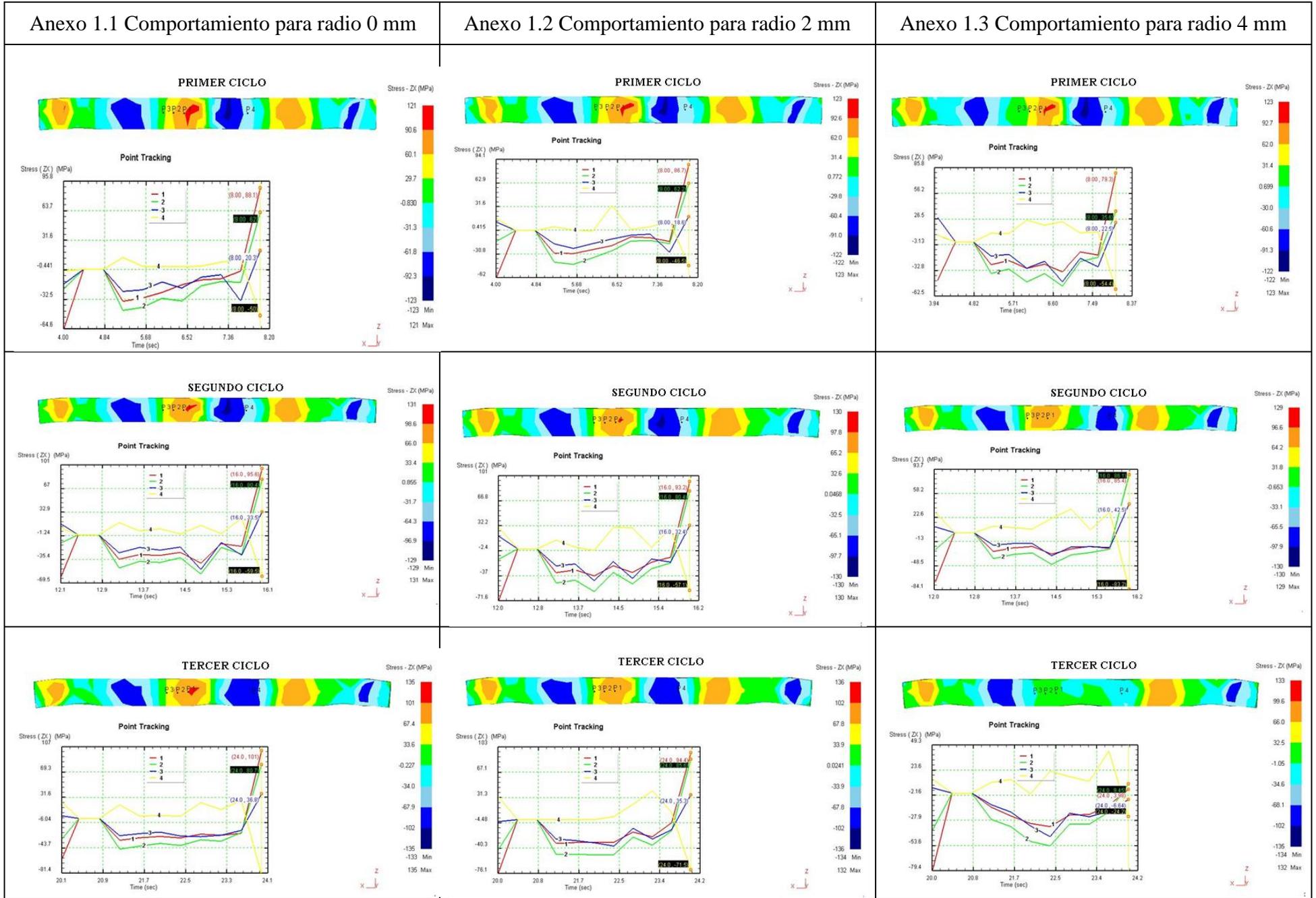
- Nakamura, K., et al., 2004 “Development of Severe Torsion Straining Process for Rapid Continuous Grain Refinement”. *Materials Transactions*, Vol. 45, pp. 3338-3342.
- Ono, N., et al., 2003 “Effect of deformation temperature on Hall–Petch relationship registered for polycrystalline magnesium”. *Materials 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.
- Scientific Forming 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.
- 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

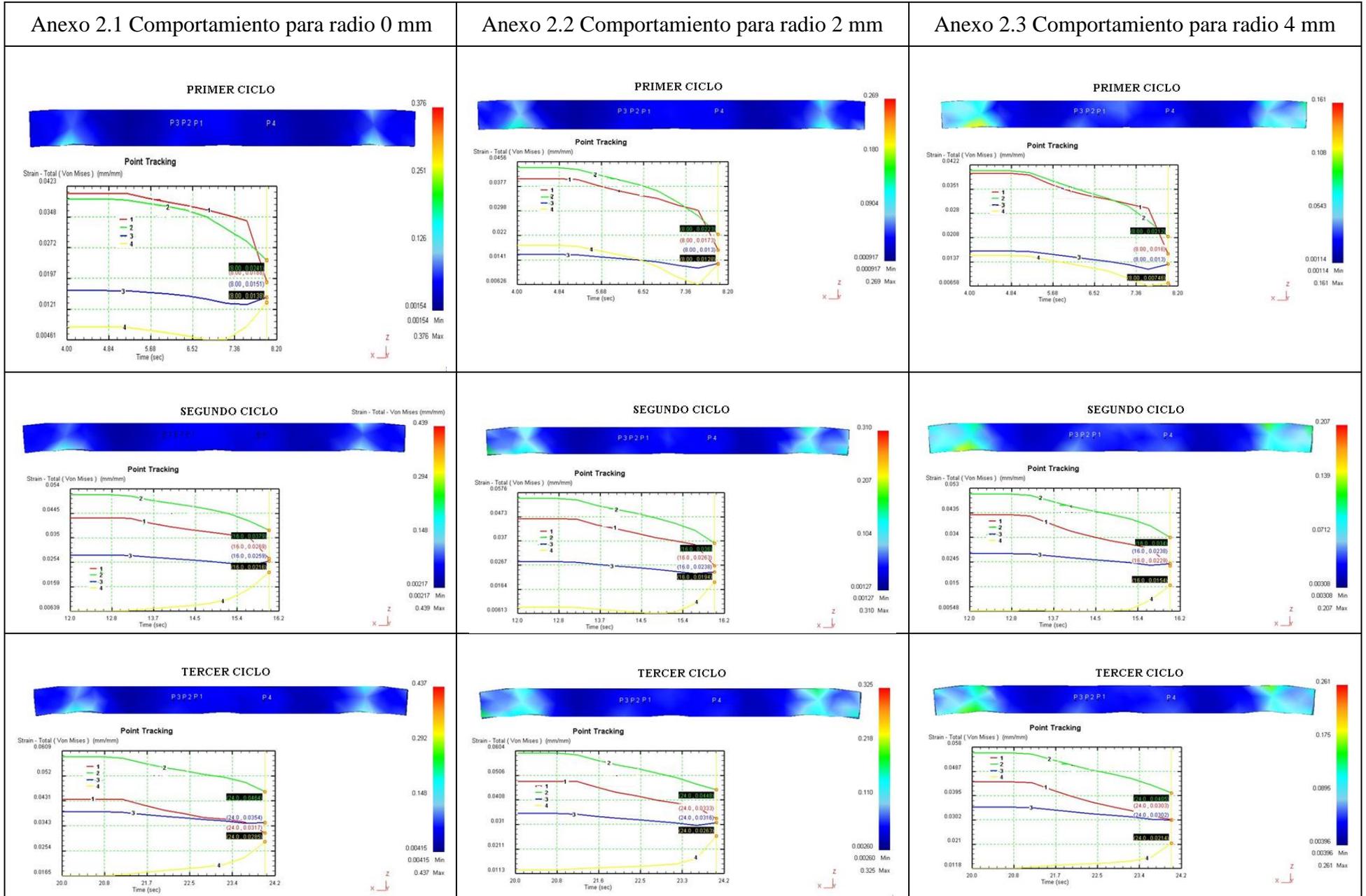
- Taguchi Analysis”. *JOM: the Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 65, No. 2, pp. 294-298, DOI: 10.1007/s11837-012-0503-1.
- Siddesha, H., Shantharaja, M., 2014. “Thermal Stability Of Ultra-Fine Grained Al6061 Alloy Processed Through Cyclic Constrained Groove Pressing”. *Advanced 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.

ANEXOS

Anexo 1 Comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes al finalizar cada uno de los tres ciclos de corrugación y estiramiento de la lámina de Titanio Grado 5 (Ti6Al4V) en los cuatro puntos de observación para diferentes radios de dientes



Anexo 2 Comportamiento de las deformaciones de Von Mises al finalizar cada uno de los tres ciclos de corrugación y estiramiento de la lámina de Titanio Grado 5 (Ti6Al4V) en los cuatro puntos de observación para diferentes radios de dientes



Anexo 3 Valores y rangos de las variables en cuatro puntos de la lámina de Titanio Grado 5 (Ti6Al4V) para tres ciclos de corrugación y estiramiento con tres valores de radio de diente

No. de ciclos	Radio de diente (mm)	Puntos de observación	Tensiones Tangenciales Alternantes (MPa)	Rango de Tensiones (MPa)	Deformaciones de Von Mises (mm/mm)	Rango de Deformaciones (mm/mm)	Variación de longitud de la miniplaca ΔL (mm/mm)
1	0	P1	88,1	67,8	0,019	0,009	0,0208
		P2	62		0,024		
		P3	20,3		0,015		
		P4	50		0,014		
	2	P1	86,7	68,1	0,017	0,009	0,0188
		P2	62,2		0,022		
		P3	18,6		0,013		
		P4	46,5		0,128		
	4	P1	79,3	56,8	0,016	0,008	0,0185
		P2	35,6		0,021		
		P3	22,5		0,013		
		P4	54,4		0,007		
2	0	P1	95,6	62,1	0,027	0,012	0,0353
		P2	80,4		0,038		
		P3	33,5		0,026		
		P4	59,5		0,022		
	2	P1	93,2	60,8	0,026	0,012	0,0332
		P2	80,4		0,036		
		P3	32,4		0,024		
		P4	57,1		0,194		
	4	P1	86,1	43,6	0,023	0,011	0,0323
		P2	85,4		0,034		
		P3	42,5		0,024		
		P4	83,2		0,015		
3	0	P1	101	64,2	0,032	0,014	0,0464
		P2	80,7		0,046		
		P3	36,8		0,035		
		P4	81,4		0,029		
	2	P1	94,4	59,1	0,033	0,013	0,0456
		P2	85,6		0,045		
		P3	35,3		0,032		
		P4	71,5		0,026		
	4	P1	9,45	5,47	0,03	0,011	0,0438
		P2	3,98		0,041		
		P3	6,64		0,03		
		P4	24,2		0,021		

Leyenda: Valor máximo Valor mínimo

Anexo 4 Matriz experimental del Diseño Factorial Completo (3^3)

Número de experimentos	A: Ángulo (°)	B: Radio (mm)	C: Ancho (mm)
1	-1	-1	-1
2	0	-1	-1
0	1	-1	-1
1	-1	0	-1
5	0	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	1	-1
8	0	1	-1
9	1	1	-1
10	-1	-1	0
11	0	-1	0
12	1	-1	0
10	-1	0	0
11	0	0	0
15	1	0	0
16	-1	1	0
17	0	1	0
18	1	1	0
19	-1	-1	1
20	0	-1	1
21	1	-1	1
22	-1	0	1
20	0	0	1
21	1	0	1
25	-1	1	1
26	0	1	1
27	1	1	1

Anexo 5 Planificación de la experimentación

Número de experimentos	A: Ángulo (°)	B: Radio (mm)	C: Ancho (mm)
1	40	0	2
2	45	0	2
3	50	0	2
4	40	1	2
5	45	1	2
6	50	1	2
7	40	2	2
8	45	2	2
9	50	2	2
10	40	0	4
11	45	0	4
12	50	0	4
13	40	1	4
14	45	1	4
15	50	1	4
16	40	2	4
17	45	2	4
18	50	2	4
19	40	0	6
20	45	0	6
21	50	0	6
22	40	1	6
23	45	1	6
24	50	1	6
25	40	2	6
26	45	2	6
27	50	2	6

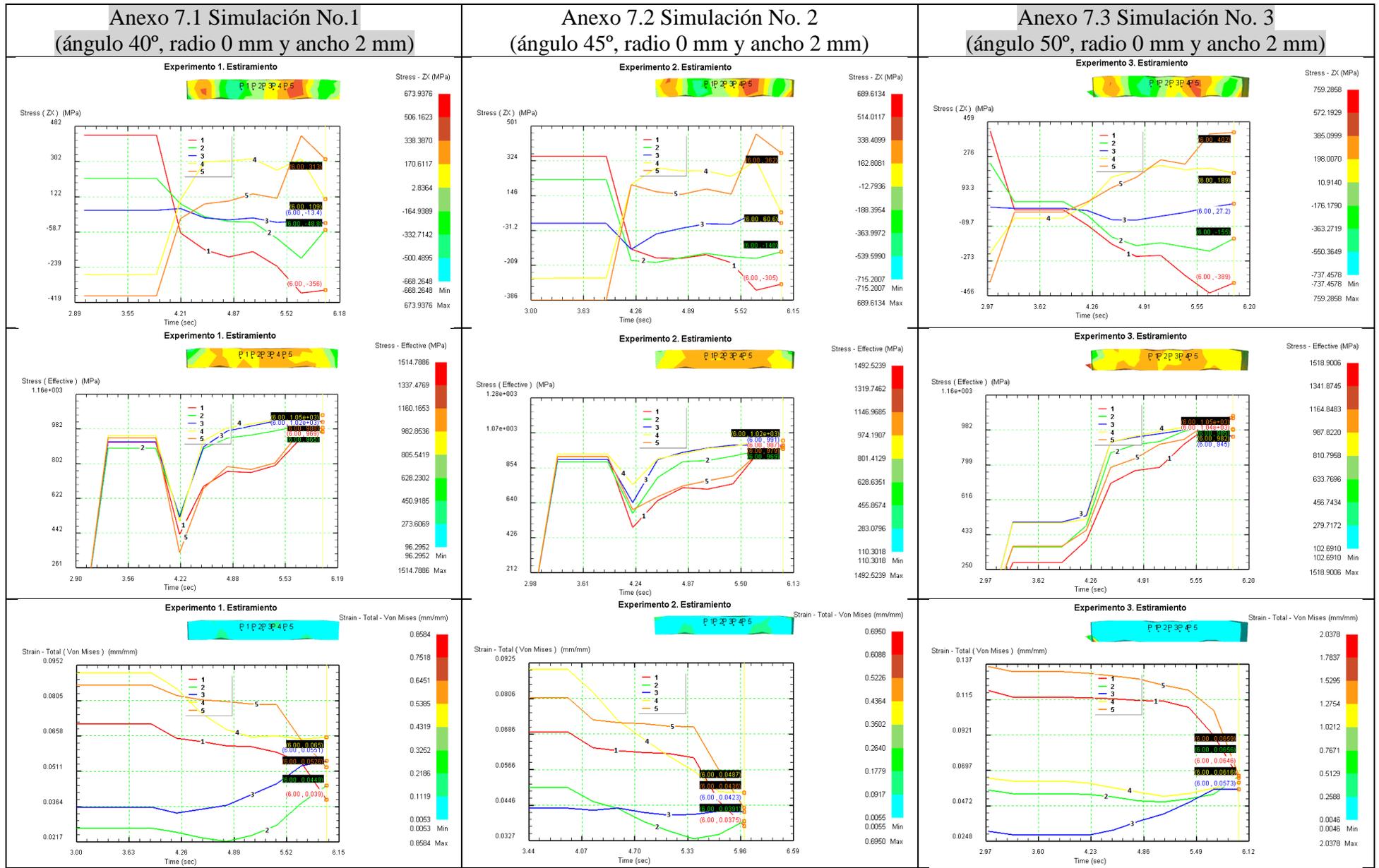
Anexo 6 Coordenadas de ubicación de los puntos de observación del comportamiento de las variables para la lámina de Titanio Grado 2

Exp	Puntos	X	Y	Z	Exp	Puntos	X	Y	Z	Exp	Puntos	X	Y	Z
1	P1	2,1918	0,0000	-2,0000	2	P1	2,0000	0,0000	-2,0000	3	P1	1,8391	0,0000	-2,0000
	P2	1,0000	0,0000	-2,0000		P2	1,0000	0,0000	-2,0000		P2	1,0000	0,0000	-2,0000
	P3	0,0000	0,0000	-2,0000		P3	0,0000	0,0000	-2,0000		P3	0,0000	0,0000	-2,0000
	P4	-1,0000	0,0000	-2,0000		P4	-1,0000	0,0000	-2,0000		P4	-1,0000	0,0000	-2,0000
	P5	-2,1918	0,0000	-2,0000		P5	-2,0000	0,0000	-2,0000		P5	-1,8391	0,0000	-2,0000
4	P1	2,1918	0,0000	-2,0000	5	P1	2,0000	0,0000	-2,0000	6	P1	1,8391	0,0000	-2,0000
	P2	1,0000	0,0000	-2,0000		P2	1,0000	0,0000	-2,0000		P2	1,0000	0,0000	-2,0000
	P3	0,0000	0,0000	-2,0000		P3	0,0000	0,0000	-2,0000		P3	0,0000	0,0000	-2,0000
	P4	-1,0000	0,0000	-2,0000		P4	-1,0000	0,0000	-2,0000		P4	-1,0000	0,0000	-2,0000
	P5	-2,1918	0,0000	-2,0000		P5	-2,0000	0,0000	-2,0000		P5	-1,8391	0,0000	-2,0000
7	P1	2,1918	0,0000	-2,0000	8	P1	2,0000	0,0000	-2,0000	9	P1	1,8391	0,0000	-2,0000
	P2	1,0000	0,0000	-2,0000		P2	1,0000	0,0000	-2,0000		P2	1,0000	0,0000	-2,0000
	P3	0,0000	0,0000	-2,0000		P3	0,0000	0,0000	-2,0000		P3	0,0000	0,0000	-2,0000
	P4	-1,0000	0,0000	-2,0000		P4	-1,0000	0,0000	-2,0000		P4	-1,0000	0,0000	-2,0000
	P5	-2,1918	0,0000	-2,0000		P5	-2,0000	0,0000	-2,0000		P5	-1,8391	0,0000	-2,0000
10	P1	3,1918	0,0000	-2,0000	11	P1	3,0000	0,0000	-2,0000	12	P1	2,8391	0,0000	-2,0000
	P2	2,0000	0,0000	-2,0000		P2	2,0000	0,0000	-2,0000		P2	2,0000	0,0000	-2,0000
	P3	0,0000	0,0000	-2,0000		P3	0,0000	0,0000	-2,0000		P3	0,0000	0,0000	-2,0000
	P4	-2,0000	0,0000	-2,0000		P4	-2,0000	0,0000	-2,0000		P4	-2,0000	0,0000	-2,0000
	P5	-3,1918	0,0000	-2,0000		P5	-3,0000	0,0000	-2,0000		P5	-2,8391	0,0000	-2,0000
13	P1	3,1918	0,0000	-2,0000	14	P1	3,0000	0,0000	-2,0000	15	P1	2,8391	0,0000	-2,0000
	P2	2,0000	0,0000	-2,0000		P2	2,0000	0,0000	-2,0000		P2	2,0000	0,0000	-2,0000
	P3	0,0000	0,0000	-2,0000		P3	0,0000	0,0000	-2,0000		P3	0,0000	0,0000	-2,0000
	P4	-2,0000	0,0000	-2,0000		P4	-2,0000	0,0000	-2,0000		P4	-2,0000	0,0000	-2,0000
	P5	-3,1918	0,0000	-2,0000		P5	-3,0000	0,0000	-2,0000		P5	-2,8391	0,0000	-2,0000

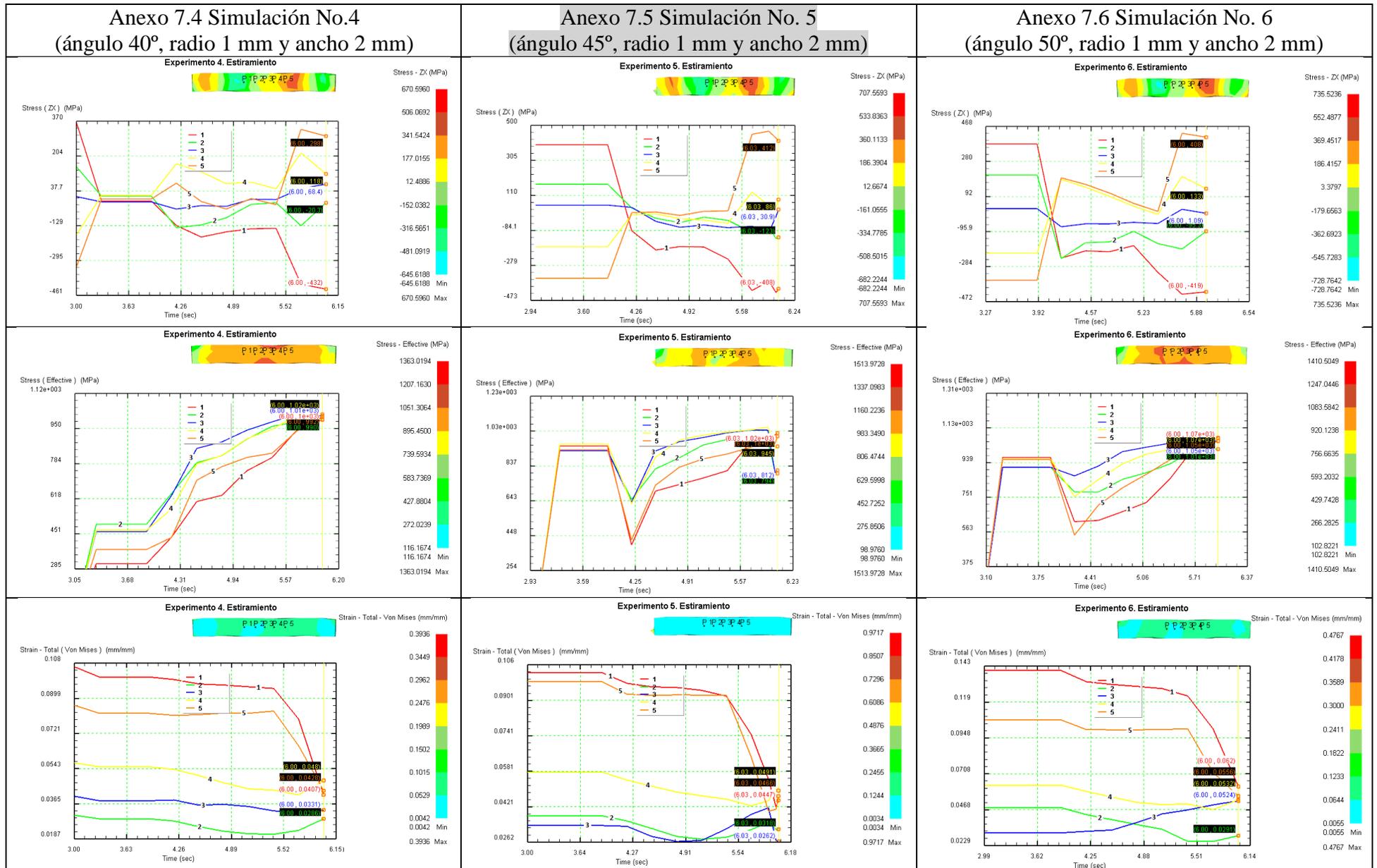
Anexo 6 Coordenadas de ubicación de los puntos de observación del comportamiento de las variables para la lámina de Titanio Grado 2.
(Continuación)

Exp	Puntos	X	Y	Z	Exp	Puntos	X	Y	Z	Exp	Puntos	X	Y	Z
16	P1	3,1918	0,0000	-2,0000	17	P1	3,0000	0,0000	-2,0000	18	P1	2,8391	0,0000	-2,0000
	P2	2,0000	0,0000	-2,0000		P2	2,0000	0,0000	-2,0000		P2	2,0000	0,0000	-2,0000
	P3	0,0000	0,0000	-2,0000		P3	0,0000	0,0000	-2,0000		P3	0,0000	0,0000	-2,0000
	P4	-2,0000	0,0000	-2,0000		P4	-2,0000	0,0000	-2,0000		P4	-2,0000	0,0000	-2,0000
	P5	-3,1918	0,0000	-2,0000		P5	-3,0000	0,0000	-2,0000		P5	-2,8391	0,0000	-2,0000
19	P1	4,1918	0,0000	-2,0000	20	P1	4,0000	0,0000	-2,0000	21	P1	3,8391	0,0000	-2,0000
	P2	3,0000	0,0000	-2,0000		P2	3,0000	0,0000	-2,0000		P2	3,0000	0,0000	-2,0000
	P3	0,0000	0,0000	-2,0000		P3	0,0000	0,0000	-2,0000		P3	0,0000	0,0000	-2,0000
	P4	-3,0000	0,0000	-2,0000		P4	-3,0000	0,0000	-2,0000		P4	-3,0000	0,0000	-2,0000
	P5	-4,1918	0,0000	-2,0000		P5	-4,0000	0,0000	-2,0000		P5	-3,8391	0,0000	-2,0000
22	P1	4,1918	0,0000	-2,0000	23	P1	4,0000	0,0000	-2,0000	24	P1	3,8391	0,0000	-2,0000
	P2	3,0000	0,0000	-2,0000		P2	3,0000	0,0000	-2,0000		P2	3,0000	0,0000	-2,0000
	P3	0,0000	0,0000	-2,0000		P3	0,0000	0,0000	-2,0000		P3	0,0000	0,0000	-2,0000
	P4	-3,0000	0,0000	-2,0000		P4	-3,0000	0,0000	-2,0000		P4	-3,0000	0,0000	-2,0000
	P5	-4,1918	0,0000	-2,0000		P5	-4,0000	0,0000	-2,0000		P5	-3,8391	0,0000	-2,0000
25	P1	4,1918	0,0000	-2,0000	26	P1	4,0000	0,0000	-2,0000	27	P1	3,8391	0,0000	-2,0000
	P2	3,0000	0,0000	-2,0000		P2	3,0000	0,0000	-2,0000		P2	3,0000	0,0000	-2,0000
	P3	0,0000	0,0000	-2,0000		P3	0,0000	0,0000	-2,0000		P3	0,0000	0,0000	-2,0000
	P4	-3,0000	0,0000	-2,0000		P4	-3,0000	0,0000	-2,0000		P4	-3,0000	0,0000	-2,0000
	P5	-4,1918	0,0000	-2,0000		P5	-4,0000	0,0000	-2,0000		P5	-3,8391	0,0000	-2,0000

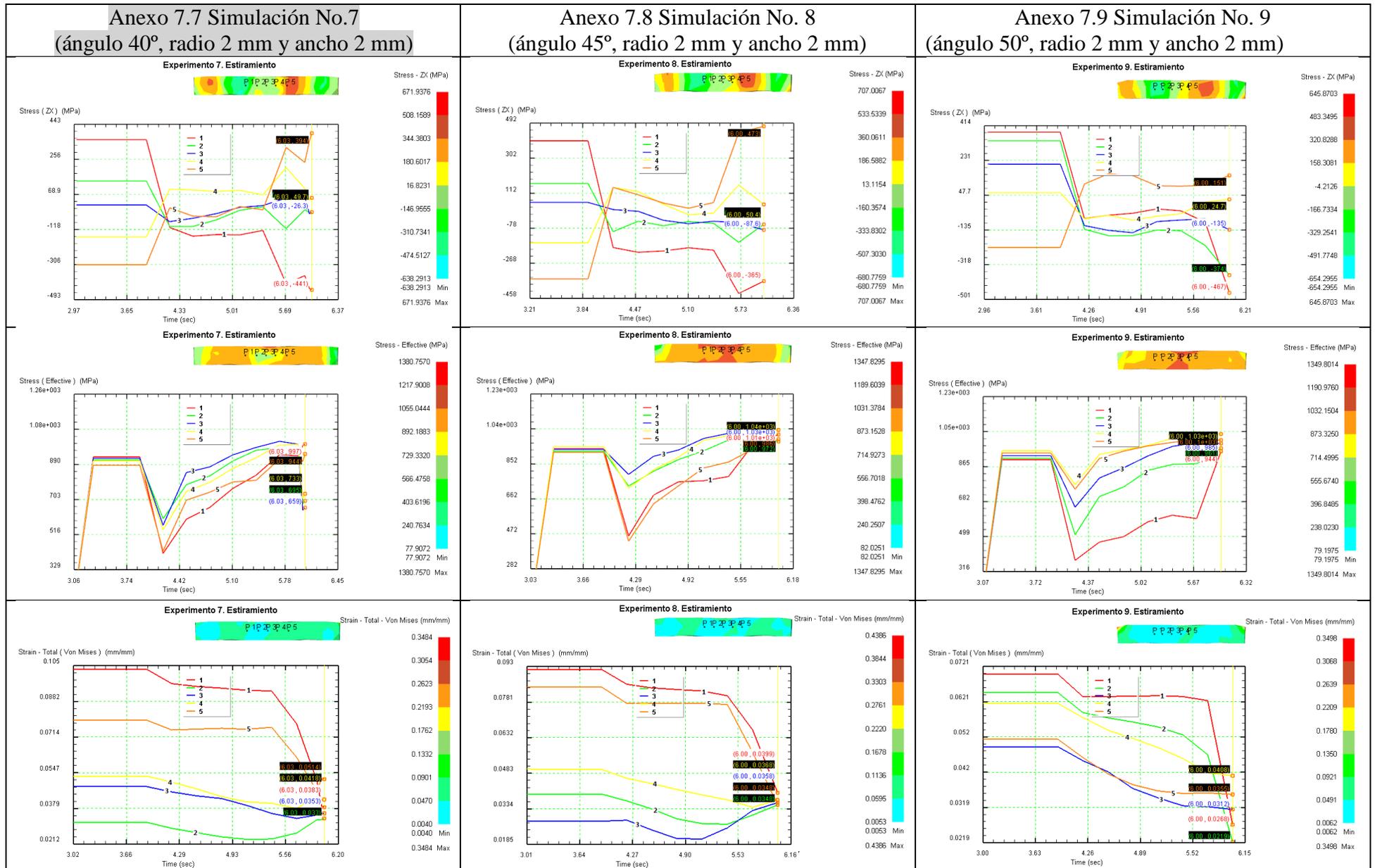
Anexo 7 Comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes, tensiones efectivas y deformaciones de Von Mises para la etapa final de un ciclo de corrugación y estiramiento de la lámina de Titanio Grado 2 en los cinco puntos de observación para las 27 simulaciones



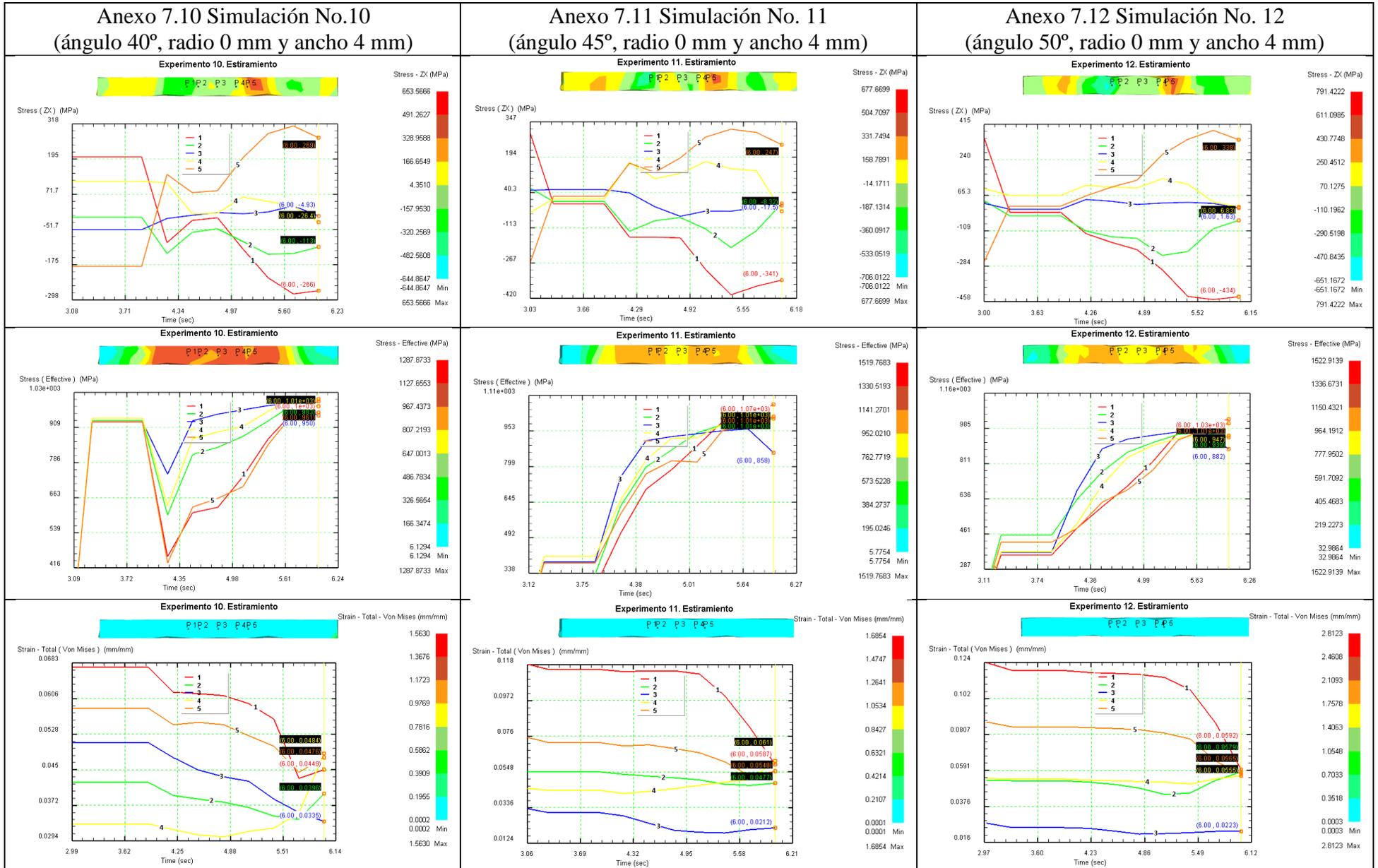
Anexo 7 Comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes, tensiones efectivas y deformaciones de Von Mises para la etapa final de un ciclo de corrugación y estiramiento de la lámina de Titanio Grado 2 en los cinco puntos de observación para las 27 simulaciones. (Continuación)



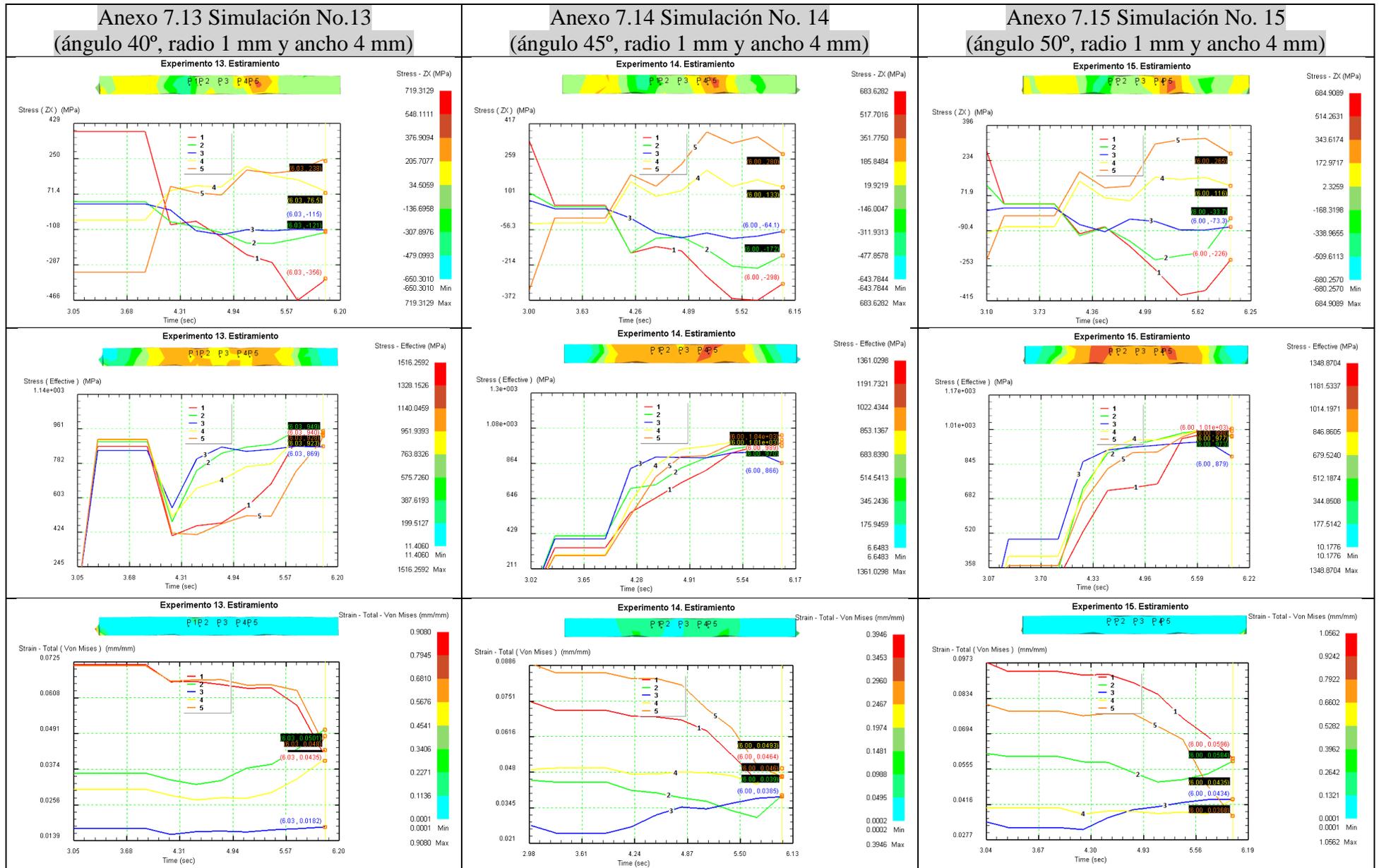
Anexo 7 Comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes, tensiones efectivas y deformaciones de Von Mises para la etapa final de un ciclo de corrugación y estiramiento de la lámina de Titanio Grado 2 en los cinco puntos de observación para las 27 simulaciones. (Continuación)



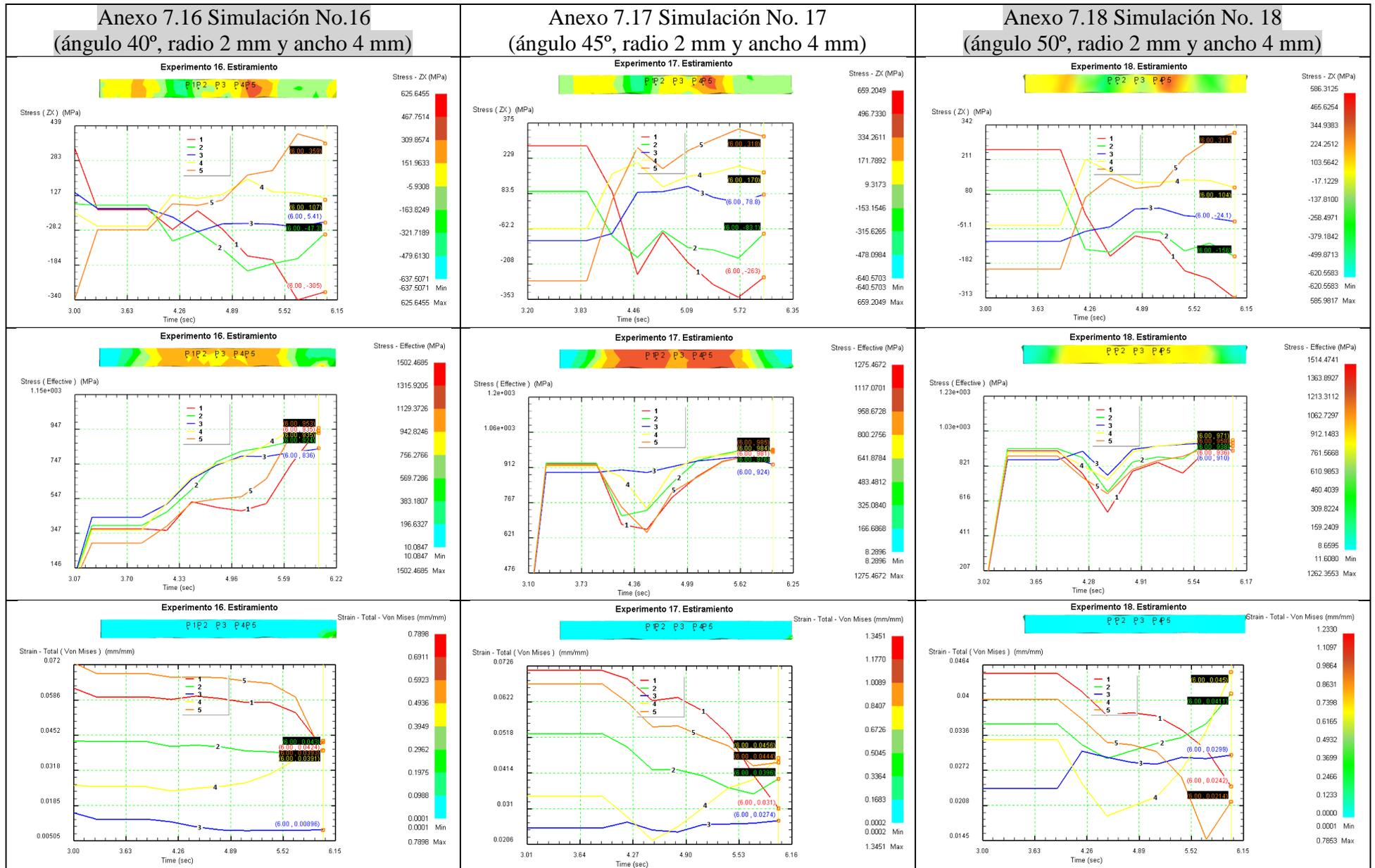
Anexo 7 Comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes, tensiones efectivas y deformaciones de Von Mises para la etapa final de un ciclo de corrugación y estiramiento de la lámina de Titanio Grado 2 en los cinco puntos de observación para las 27 simulaciones. (Continuación)



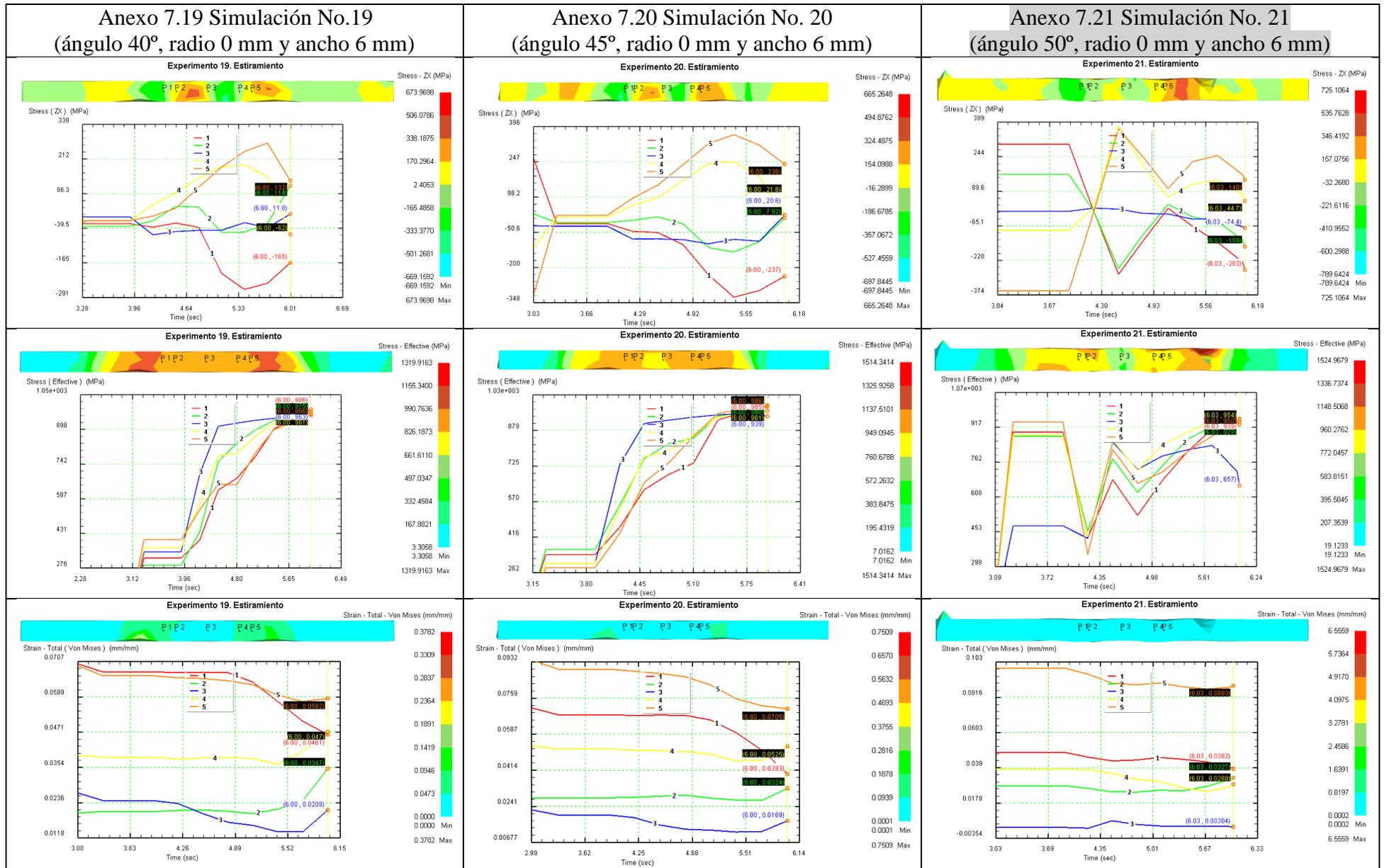
Anexo 7 Comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes, tensiones efectivas y deformaciones de Von Mises para la etapa final de un ciclo de corrugación y estiramiento de la lámina de Titanio Grado 2 en los cinco puntos de observación para las 27 simulaciones. (Continuación)



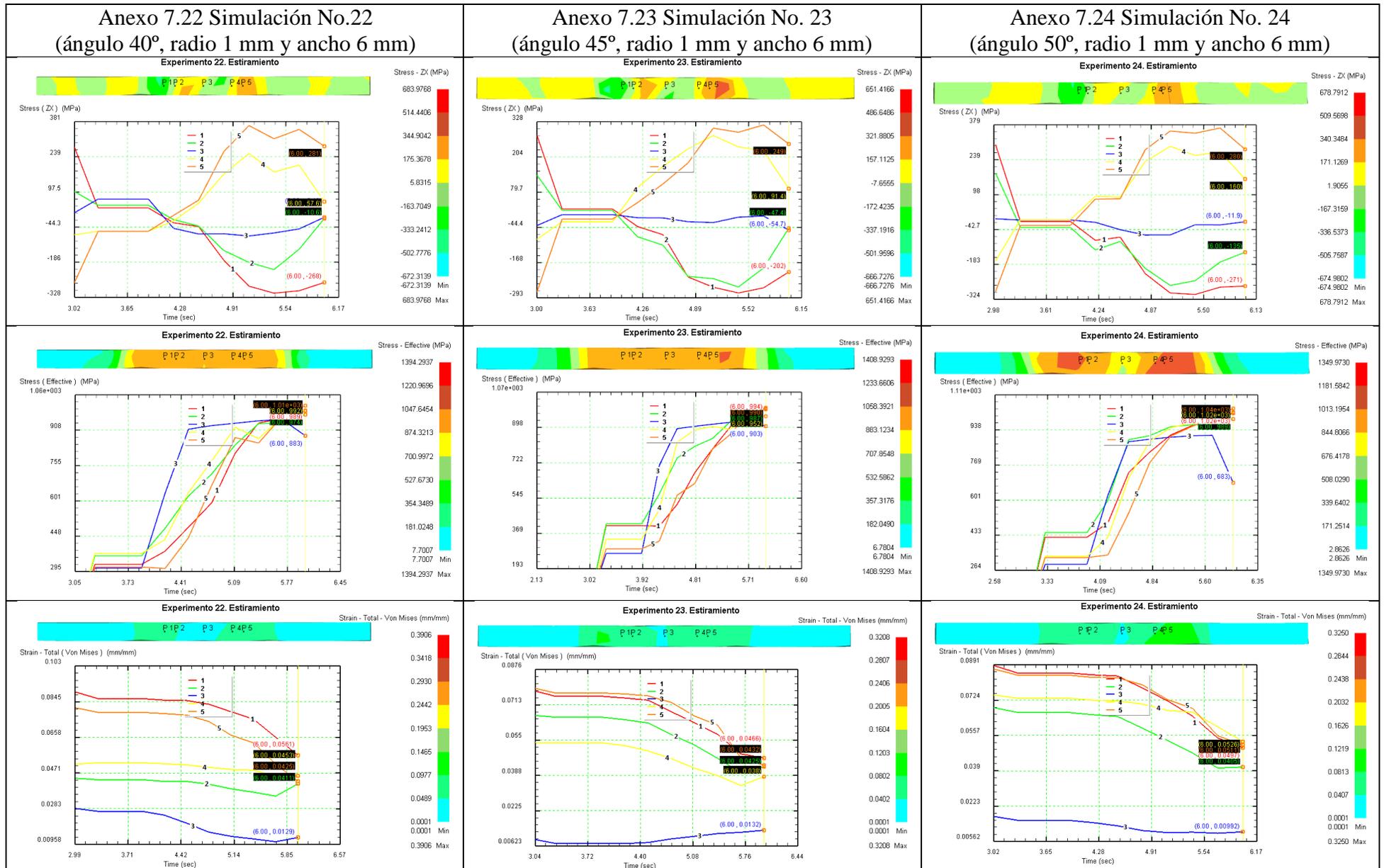
Anexo 7 Comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes, tensiones efectivas y deformaciones de Von Mises para la etapa final de un ciclo de corrugación y estiramiento de la lámina de Titanio Grado 2 en los cinco puntos de observación para las 27 simulaciones. (Continuación)



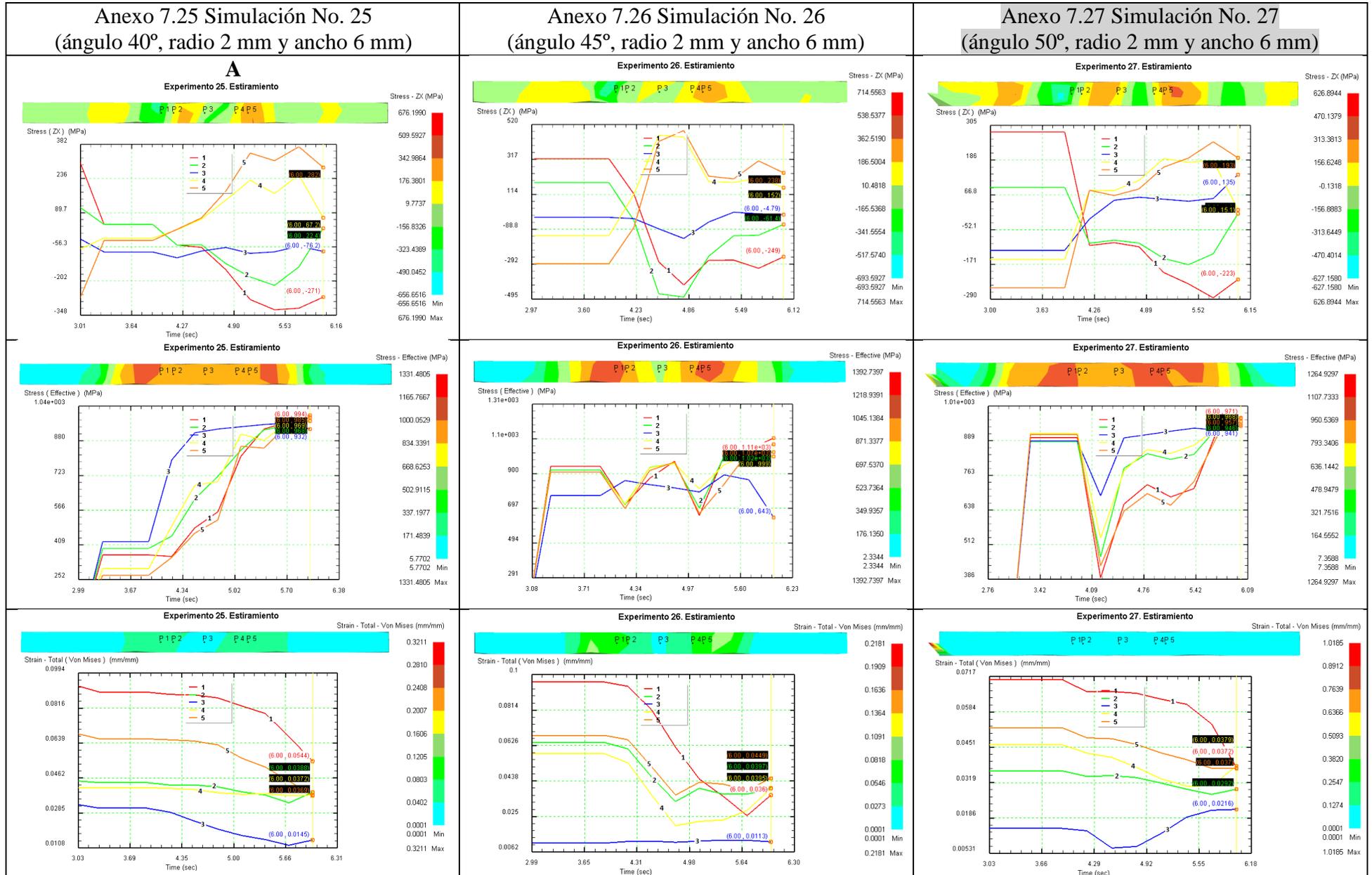
Anexo 7 Comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes, tensiones efectivas y deformaciones de Von Mises para la etapa final de un ciclo de corrugación y estiramiento de la lámina de Titanio Grado 2 en los cinco puntos de observación para las 27 simulaciones. (Continuación)



Anexo 7 Comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes, tensiones efectivas y deformaciones de Von Mises para la etapa final de un ciclo de corrugación y estiramiento de la lámina de Titanio Grado 2 en los cinco puntos de observación para las 27 simulaciones. (Continuación)



Anexo 7 Comportamiento de las tensiones tangenciales alternantes, tensiones efectivas y deformaciones de Von Mises para la etapa final de un ciclo de corrugación y estiramiento de la lámina de Titanio Grado 2 en los cinco puntos de observación para las 27 simulaciones. (Continuación)



Anexo 8 Valores y rangos de las variables para la etapa final de un ciclo de corrugación y estiramiento de la lámina de Titanio Grado 2 en los cinco puntos de observación para las 27 simulaciones.

No. de Exp.	A: Ángulo (°)	B: Radio (mm)	C: Ancho (mm)	Puntos de observación	Tensiones Tangenciales Alternantes σ_T (MPa)	Tensiones Efectivas σ_{EF} (MPa)	Deformaciones de Von Mises ϵ_{VM} (mm/mm)	Rango de Tensiones Tangenciales Alternantes $\Delta\sigma_T$ (MPa)	Rango de Tensiones Efectivas $\Delta\sigma_{EF}$ (MPa)	Rango de Deformaciones $\Delta\epsilon_{VM}$ (mm/mm)	Longitud Inicial de la lámina (mm)	Variación de longitud de la lámina ΔL (mm/mm)	Valor en la Escala de Calidad Superficial
1	40	0	2	P1	356,2129	969,0096	0,039	342,8218	87,6117	0,0259	14,7670	0,0364	2
				P2	48,8419	965,4752	0,0448						
				P3	13,3911	1017,0844	0,0551						
				P4	108,5709	1053,0869	0,0649						
				P5	312,8147	987,6279	0,0525						
2	45	0	2	P1	305,0517	987,4309	0,0374	356,0886	51,2088	0,0112	14,0000	0,0409	1
				P2	140,2846	968,8167	0,039						
				P3	6,3438	990,7642	0,0422						
				P4	60,5796	1020,0255	0,0486						
				P5	362,4324	979,0647	0,0435						
3	50	0	2	P1	388,5159	1042,4338	0,0646	374,9129	108,9369	0,0086	13,3564	0,0431	3
				P2	155,4932	984,8958	0,0656						
				P3	27,1629	945,0798	0,0573						
				P4	188,9042	982,1743	0,0616						
				P5	402,0758	1054,0167	0,0659						
4	40	1	2	P1	431,7507	1004,3314	0,0407	411,4825	25,9555	0,0194	14,7670	0,0321	1
				P2	20,2682	989,7891	0,0285						
				P3	68,4162	1008,6354	0,0330						
				P4	117,6718	1015,7446	0,0479						
				P5	297,8949	991,6738	0,0427						
5	45	1	2	P1	408,2413	1019,0596	0,0447	380,9654	225,0259	0,023	14,0000	0,0383	3
				P2	123,3068	794,0337	0,0317						
				P3	30,8506	812,1386	0,0261						
				P4	85,9763	945,0641	0,0491						
				P5	411,816	1000,2725	0,0466						
6	50	1	2	P1	419,3759	1071,9855	0,062	418,2877	61,2595	0,0329	13,3564	0,0455	1
				P2	95,2624	1010,726	0,0291						
				P3	1,0882	1053,5276	0,0524						
				P4	132,7684	1069,3804	0,0531						
				P5	408,4525	1054,4146	0,0555						

Leyenda: **Valor máximo**

Valor mínimo

Simulaciones que se desechan

Anexo 8 Valores y rangos de las variables para la etapa final de un ciclo de corrugación y estiramiento de la lámina de Titanio Grado 2 en los cinco puntos de observación para las 27 simulaciones. (Continuación)

No. de Exp.	A: Ángulo (°)	B: Radio (mm)	C: Ancho (mm)	Puntos de observación	Tensiones Tangenciales Alternantes σ_T (MPa)	Tensiones Efectivas σ_{EF} (MPa)	Deformaciones de Von Mises ϵ_{VM} (mm/mm)	Rango de Tensiones Tangenciales Alternantes $\Delta\sigma_T$ (MPa)	Rango de Tensiones Efectivas $\Delta\sigma_{EF}$ (MPa)	Rango de Deformaciones $\Delta\epsilon_{VM}$ (mm/mm)	Longitud Inicial de la lámina (mm)	Variación de longitud de la lámina ΔL (mm/mm)	Valor en la Escala de Calidad Superficial
7	40	2	2	P1	440,5960	997,1727	0,0382	414,7403	338,5386	0,0185	14,7670	0,0323	3
				P2	25,8557	694,8110	0,0329						
				P3	26,2579	658,6341	0,0353						
				P4	49,6602	732,5503	0,0418						
				P5	393,7856	944,4211	0,0514						
8	45	2	2	P1	365,4349	1010,8518	0,0398	422,9949	63,57	0,0050	14,0000	0,0346	1
				P2	57,7463	972,3722	0,0348						
				P3	87,6115	1034,6838	0,0357						
				P4	50,4054	1035,9422	0,0368						
				P5	473,4003	985,8453	0,0348						
9	50	2	2	P1	466,8104	943,9223	0,0268	442,1205	90,5836	0,0190	13,2890	0,0314	1
				P2	373,8288	960,5624	0,0218						
				P3	134,7046	985,1558	0,0311						
				P4	24,6899	1034,5059	0,0408						
				P5	151,2011	1002,5184	0,0354						
10	40	0	4	P1	266,08445	1000,4511	0,0448	263,6476	58,1952	0,0149	24,7670	0,0195	1
				P2	113,1602	982,9233	0,0396						
				P3	4,9287	949,907	0,0335						
				P4	26,4378	1008,1022	0,0484						
				P5	268,5763	961,4526	0,0475						
11	45	0	4	P1	341,4109	1066,2192	0,0587	333,0885	208,3198	0,0398	24,0000	0,0222	2
				P2	8,3224	1005,0906	0,0477						
				P3	17,512	857,8994	0,0212						
				P4	42,4561	1013,8518	0,061						
				P5	246,968	1013,0255	0,0548						
12	50	0	4	P1	433,9994	1029,8855	0,0591	432,3740	147,8807	0,0369	23,3564	0,0219	2
				P2	58,8775	939,4134	0,0578						
				P3	1,6254	882,0048	0,0222						
				P4	6,8265	947,4518	0,0554						
				P5	333,6539	1009,5195	0,0565						

Leyenda: **Valor máximo**

Valor mínimo

Simulaciones que se desechan

Anexo 8 Valores y rangos de las variables para la etapa final de un ciclo de corrugación y estiramiento de la lámina de Titanio Grado 2 en los cinco puntos de observación para las 27 simulaciones. (Continuación)

No. de Exp.	A: Ángulo (°)	B: Radio (mm)	C: Ancho (mm)	Puntos de observación	Tensiones Tangenciales Alternantes σ_T (MPa)	Tensiones Efectivas σ_{EF} (MPa)	Deformaciones de Von Mises ϵ_{VM} (mm/mm)	Rango de Tensiones Tangenciales Alternantes $\Delta\sigma_T$ (MPa)	Rango de Tensiones Efectivas $\Delta\sigma_{EF}$ (MPa)	Rango de Deformaciones $\Delta\epsilon_{VM}$ (mm/mm)	Longitud Inicial de la lámina (mm)	Variación de longitud de la lámina ΔL (mm/mm)	Valor en la Escala de Calidad Superficial
13	40	1	4	P1	355,8442	940,2221	0,0434	279,3005	79,7548	0,0318	24,7670	0,0219	2
				P2	120,5901	949,154	0,05						
				P3	114,8057	869,3992	0,0182						
				P4	76,5437	923,0734	0,0399						
				P5	238,0648	927,9166	0,048						
14	45	1	4	P1	298,3611	989,1622	0,0464	234,2150	171,5713	0,0108	24,0000	0,0213	2
				P2	171,9622	970,0476	0,039						
				P3	64,1461	865,5227	0,0385						
				P4	132,5221	1010,1076	0,0493						
				P5	280,2547	1037,094	0,046						
15	50	1	4	P1	225,8658	1010,7043	0,0595	231,502	131,4432	0,0227	23,3564	0,0225	2
				P2	33,6876	972,6021	0,0583						
				P3	73,3279	879,2611	0,0433						
				P4	116,1625	977,0651	0,0434						
				P5	265,1896	998,1276	0,0368						
16	40	2	4	P1	304,6677	935,2735	0,0423	353,4197	116,8688	0,0340	24,7670	0,0195	2
				P2	47,3468	924,4387	0,0429						
				P3	5,4063	836,4095	0,0089						
				P4	107,3486	935,0651	0,0391						
				P5	358,826	953,2783	0,0392						
17	45	2	4	P1	263,1005	980,8407	0,0309	239,4424	61,3663	0,0183	24,0000	0,0197	1
				P2	83,127	976,1104	0,0395						
				P3	78,7895	923,8175	0,0273						
				P4	170,0585	984,0506	0,0456						
				P5	318,2319	985,1838	0,0443						

Leyenda: Valor máximo

Valor mínimo

Simulaciones que se desechan

Anexo 8 Valores y rangos de las variables para la etapa final de un ciclo de corrugación y estiramiento de la lámina de Titanio Grado 2 en los cinco puntos de observación para las 27 simulaciones. (Continuación)

No. de Exp.	A: Ángulo (°)	B: Radio (mm)	C: Ancho (mm)	Puntos de observación	Tensiones Tangenciales Alternantes σ_T (MPa)	Tensiones Efectivas σ_{EF} (MPa)	Deformaciones de Von Mises ϵ_{VM} (mm/mm)	Rango de Tensiones Tangenciales Alternantes $\Delta\sigma_T$ (MPa)	Rango de Tensiones Efectivas $\Delta\sigma_{EF}$ (MPa)	Rango de Deformaciones $\Delta\epsilon_{VM}$ (mm/mm)	Longitud Inicial de la lámina (mm)	Variación de longitud de la lámina ΔL (mm/mm)	Valor en la Escala de Calidad Superficial
18	50	2	4	P1	313,2297	936,4418	0,0242	289,0928	60,5804	0,0235	23,3564	0,0137	2
				P2	156,0767	938,2079	0,041						
				P3	24,1369	910,4377	0,0299						
				P4	104,4762	971,0181	0,0449						
				P5	310,9137	957,5571	0,0214						
19	40	0	6	P1	165,0558	986,2541	0,0461	153,2480	24,9256	0,0372	34,7670	0,0161	1
				P2	114,4249	975,0916	0,0347						
				P3	11,8078	962,8698	0,0209						
				P4	62,0247	961,3285	0,0470						
				P5	132,2716	965,8596	0,0581						
20	45	0	6	P1	236,8186	984,5328	0,0392	228,9013	46,8667	0,0537	34,0000	0,0175	1
				P2	7,9173	980,0043	0,0324						
				P3	20,6291	939,3749	0,0168						
				P4	21,585	961,4638	0,0525						
				P5	236,2701	986,2416	0,0705						
21	50	0	6	P1	262,6222	938,7458	0,0382	217,9303	296,8098	0,0853	33,3564	0,0121	3
				P2	158,6285	928,5233	0,0327						
				P3	74,4199	657,0077	0,0030						
				P4	44,6919	953,8175	0,0288						
				P5	139,7279	949,8516	0,0883						
22	40	1	6	P1	267,9817	989,1629	0,0560	275,1828	129,9988	0,4122	34,7670	0,0152	1
				P2	10,6262	973,6194	0,0410						
				P3	5,4609	882,5811	0,0128						
				P4	57,5826	991,5769	0,0452						
				P5	280,6437	1012,5799	0,4250						

Leyenda: Valor máximo

Valor mínimo

Simulaciones que se desechan

Anexo 8 Valores y rangos de las variables para la etapa final de un ciclo de corrugación y estiramiento de la lámina de Titanio Grado 2 en los cinco puntos de observación para las 27 simulaciones. (Continuación)

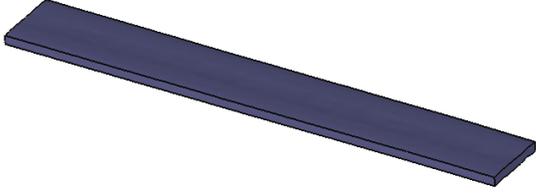
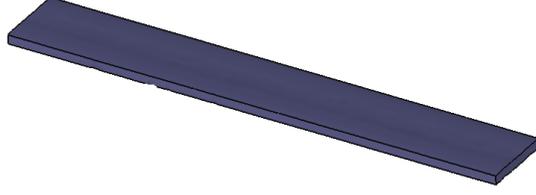
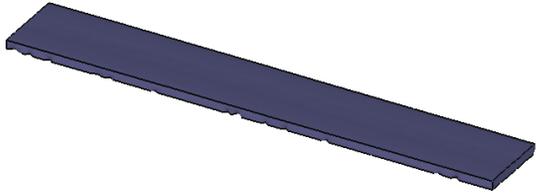
No. de Exp.	A: Ángulo (°)	B: Radio (mm)	C: Ancho (mm)	Puntos de observación	Tensiones Tangenciales Alternantes σ_T (MPa)	Tensiones Efectivas σ_{EF} (MPa)	Deformaciones de Von Mises ϵ_{VM} (mm/mm)	Rango de Tensiones Tangenciales Alternantes $\Delta\sigma_T$ (MPa)	Rango de Tensiones Efectivas $\Delta\sigma_{EF}$ (MPa)	Rango de Deformaciones $\Delta\epsilon_{VM}$ (mm/mm)	Longitud Inicial de la lámina (mm)	Variación de longitud de la lámina ΔL (mm/mm)	Valor en la Escala de Calidad Superficial
23	45	1	6	P1	201,5864	994,3884	0,0465	201,1444	91,3150	0,0333	34,0000	0,0159	1
				P2	47,407	986,8767	0,0424						
				P3	54,6683	903,0734	0,0132						
				P4	91,3941	952,2405	0,0379						
				P5	248,5514	990,06	0,0431						
24	50	1	6	P1	270,6652	1016,6341	0,0496	267,6239	356,0321	0,0427	33,3564	0,0167	1
				P2	134,6042	988,6577	0,0405						
				P3	11,9408	683,3123	0,0099						
				P4	160,1861	1021,4652	0,0526						
				P5	279,5647	1039,3444	0,0511						
25	40	2	6	P1	270,9365	994,103	0,0544	259,2264	62,1558	0,0400	34,7670	0,0143	1
				P2	22,3674	968,0895	0,0387						
				P3	76,165	931,9472	0,0144						
				P4	67,1696	969,235	0,0372						
				P5	281,5938	984,8201	0,0368						
26	45	2	6	P1	249,4344	1106,5749	0,0359	244,6425	463,5133	0,0336	34,0000	0,0098	1
				P2	61,4315	1024,7621	0,0396						
				P3	4,7919	643,0616	0,0112						
				P4	152,0415	999,0509	0,0394						
				P5	238,2616	1069,9924	0,0448						
27	50	2	6	P1	222,9434	971,3114	0,0371	221,046	30,2225	0,0162	29,3564	0,0125	2
				P2	1,8974	945,825	0,0291						
				P3	134,961	941,0889	0,0216						
				P4	15,0814	968,3042	0,0378						
				P5	192,7955	957,1207	0,037						

Leyenda: **Valor máximo**

Valor mínimo

Simulaciones que se desechan

Anexo 9 Escala de Calidad Superficial de láminas de Titanio Grado 2 después de la aplicación del Procedimiento de Corrugación y Estiramiento Repetitivo

Valor de calidad	Criterios de evaluación de la calidad superficial de la lámina de Titanio Grado 2	
1	No se aprecian roturas en la lámina ni muescas en sus bordes.	
2	No se aprecian roturas en la lámina, pero aparecen de 1 a 3 pequeñas muescas en sus bordes.	
3	No se aprecian roturas en la lámina, pero aparecen más de 3 pequeñas muescas en sus bordes.	

Anexo 10 Efectos estimados de las tensiones tangenciales alternantes en la lámina de Titanio Grado 2 para el modelo sin ajuste

```

average = 313,8 +/- 33,7468
A:Ángulo = 9,84802 +/- 25,544
B:Radio = 68,3619 +/- 23,8345
C:Ancho = -173,414 +/- 18,6283
AA = 30,1016 +/- 41,3961
AB = -54,8017 +/- 48,3389
AC = 15,6527 +/- 27,5623
BB = -23,5182 +/- 43,4335
BC = -40,181 +/- 28,4238
CC = 46,9558 +/- 53,2831
    
```

Standard errors are based on total error with 4 d.f.

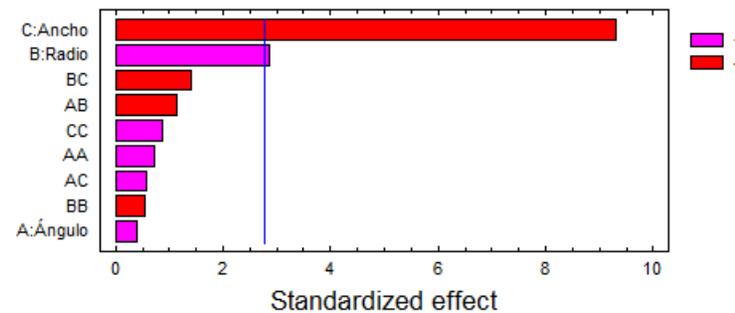
Anexo 11 Análisis de varianza para las tensiones tangenciales alternantes en la lámina de Titanio Grado 2 para el modelo sin ajuste

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Ángulo	129,046	1	129,046	0,15	0,7195
B:Radio	7142,29	1	7142,29	8,23	0,0456
C:Ancho	75239,4	1	75239,4	86,66	0,0007
AA	459,075	1	459,075	0,53	0,5074
AB	1115,88	1	1115,88	1,29	0,3203
AC	280,01	1	280,01	0,32	0,6005
BB	254,553	1	254,553	0,29	0,6169
BC	1734,99	1	1734,99	2,00	0,2304
CC	674,251	1	674,251	0,78	0,4280
Total error	3472,82	4	868,205		

Total (corr.) 117567,0 13

R-squared = 97,0461 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 90,3998 percent

Anexo 12 Carta de Pareto para las tensiones tangenciales alternantes en la lámina de Titanio Grado 2 para el modelo sin ajuste



Anexo 13 Resultados del Análisis Estadístico para las tensiones tangenciales alternantes, tensiones efectivas y deformaciones de Von Mises en la lámina de Titanio Grado 2

Anexo 13.1 Tensiones Tangenciales Alternantes	Anexo 13.2 Tensiones Efectivas	Anexo 13.3 Deformaciones de Von Mises																																																																																																																																																																																																
<p style="text-align: center;">Tabla 1. Efectos estimados</p> <p style="text-align: center;">-----</p> <p style="text-align: center;">average = 329,763 +/- 8,35689 B:Radio = 75,7058 +/- 20,6921 C:Ancho = -172,297 +/- 18,065</p> <p style="text-align: center;">-----</p> <p style="text-align: center;">Standard errors are based on total error with 11 d.f.</p>	<p style="text-align: center;">Tabla 1. Efectos estimados</p> <p style="text-align: center;">-----</p> <p style="text-align: center;">average = 989,292 +/- 44,8638 A:Ángulo = 30,2493 +/- 33,9587 B:Radio = 32,7808 +/- 31,6861 C:Ancho = -6,15798 +/- 24,7649 AA = -2,79304 +/- 55,0328 AB = 76,011 +/- 64,2628 AC = 9,35262 +/- 36,6419 BB = -6,78187 +/- 57,7414 BC = 60,762 +/- 37,7872 CC = 78,4996 +/- 70,8356</p> <p style="text-align: center;">-----</p> <p style="text-align: center;">Standard errors are based on total error with 4 d.f.</p>	<p style="text-align: center;">Tabla 1. Efectos estimados</p> <p style="text-align: center;">-----</p> <p style="text-align: center;">average = 0,16011 +/- 0,145821 A:Ángulo = -0,096715 +/- 0,110376 B:Radio = 0,00972531 +/- 0,10299 C:Ancho = 0,0297026 +/- 0,0804937 AA = -0,0635427 +/- 0,178874 AB = 0,0185932 +/- 0,208874 AC = -0,13779 +/- 0,119098 BB = -0,252103 +/- 0,187678 BC = -0,0117894 +/- 0,12282 CC = -0,021727 +/- 0,230238</p> <p style="text-align: center;">-----</p> <p style="text-align: center;">Standard errors are based on total error with 4 d.f.</p>																																																																																																																																																																																																
<p style="text-align: center;">Tabla 2. Análisis de varianza</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Source</th> <th>Sum of Squares</th> <th>DF</th> <th>Mean Square</th> <th>F-Ratio</th> <th>P-Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>B:Radio</td> <td>12633,5</td> <td>1</td> <td>12633,5</td> <td>13,39</td> <td>0,0038</td> </tr> <tr> <td>C:Ancho</td> <td>85852,4</td> <td>1</td> <td>85852,4</td> <td>90,97</td> <td>0,0000</td> </tr> <tr> <td>Total error</td> <td>18361,7</td> <td>11</td> <td>943,787</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="6">-----</td> </tr> <tr> <td>Total (corr.)</td> <td>117567,0</td> <td>13</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>R-squared = 91,1696 percent R-squared (adjusted for d.f.) = 89,564 percent</p>	Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-Ratio	P-Value	B:Radio	12633,5	1	12633,5	13,39	0,0038	C:Ancho	85852,4	1	85852,4	90,97	0,0000	Total error	18361,7	11	943,787			-----						Total (corr.)	117567,0	13				<p style="text-align: center;">Tabla 2. Análisis de varianza</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Source</th> <th>Sum of Squares</th> <th>DF</th> <th>Mean Square</th> <th>F-Ratio</th> <th>P-Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A:Ángulo</td> <td>1217,53</td> <td>1</td> <td>1217,53</td> <td>0,79</td> <td>0,4234</td> </tr> <tr> <td>B:Radio</td> <td>1642,29</td> <td>1</td> <td>1642,29</td> <td>1,07</td> <td>0,3593</td> </tr> <tr> <td>C:Ancho</td> <td>94,8751</td> <td>1</td> <td>94,8751</td> <td>0,06</td> <td>0,8159</td> </tr> <tr> <td>AA</td> <td>3,95237</td> <td>1</td> <td>3,95237</td> <td>0,00</td> <td>0,9620</td> </tr> <tr> <td>AB</td> <td>2146,75</td> <td>1</td> <td>2146,75</td> <td>1,40</td> <td>0,3024</td> </tr> <tr> <td>AC</td> <td>99,9675</td> <td>1</td> <td>99,9675</td> <td>0,07</td> <td>0,8111</td> </tr> <tr> <td>BB</td> <td>21,1676</td> <td>1</td> <td>21,1676</td> <td>0,01</td> <td>0,9122</td> </tr> <tr> <td>BC</td> <td>3967,55</td> <td>1</td> <td>3967,55</td> <td>2,59</td> <td>0,1831</td> </tr> <tr> <td>CC</td> <td>1884,42</td> <td>1</td> <td>1884,42</td> <td>1,23</td> <td>0,3299</td> </tr> <tr> <td>Total error</td> <td>6137,72</td> <td>4</td> <td>1534,43</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="6">-----</td> </tr> <tr> <td>Total (corr.)</td> <td>16059,8</td> <td>13</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>R-squared = 61,7821 percent R-squared (adjusted for d.f.) = 0,0 percent</p>	Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-Ratio	P-Value	A:Ángulo	1217,53	1	1217,53	0,79	0,4234	B:Radio	1642,29	1	1642,29	1,07	0,3593	C:Ancho	94,8751	1	94,8751	0,06	0,8159	AA	3,95237	1	3,95237	0,00	0,9620	AB	2146,75	1	2146,75	1,40	0,3024	AC	99,9675	1	99,9675	0,07	0,8111	BB	21,1676	1	21,1676	0,01	0,9122	BC	3967,55	1	3967,55	2,59	0,1831	CC	1884,42	1	1884,42	1,23	0,3299	Total error	6137,72	4	1534,43			-----						Total (corr.)	16059,8	13				<p style="text-align: center;">Tabla 2. Análisis de varianza</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Source</th> <th>Sum of Squares</th> <th>DF</th> <th>Mean Square</th> <th>F-Ratio</th> <th>P-Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A:Ángulo</td> <td>0,0124461</td> <td>1</td> <td>0,0124461</td> <td>0,77</td> <td>0,4304</td> </tr> <tr> <td>B:Radio</td> <td>0,00014549</td> <td>1</td> <td>0,00014549</td> <td>0,01</td> <td>0,9293</td> </tr> <tr> <td>C:Ancho</td> <td>0,00220732</td> <td>1</td> <td>0,00220732</td> <td>0,14</td> <td>0,7308</td> </tr> <tr> <td>AA</td> <td>0,00204567</td> <td>1</td> <td>0,00204567</td> <td>0,13</td> <td>0,7404</td> </tr> <tr> <td>AB</td> <td>0,000128451</td> <td>1</td> <td>0,000128451</td> <td>0,01</td> <td>0,9333</td> </tr> <tr> <td>AC</td> <td>0,0216985</td> <td>1</td> <td>0,0216985</td> <td>1,34</td> <td>0,3117</td> </tr> <tr> <td>BB</td> <td>0,0292503</td> <td>1</td> <td>0,0292503</td> <td>1,80</td> <td>0,2503</td> </tr> <tr> <td>BC</td> <td>0,000149361</td> <td>1</td> <td>0,000149361</td> <td>0,01</td> <td>0,9281</td> </tr> <tr> <td>CC</td> <td>0,000144359</td> <td>1</td> <td>0,000144359</td> <td>0,01</td> <td>0,9294</td> </tr> <tr> <td>Total error</td> <td>0,0648424</td> <td>4</td> <td>0,0162106</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="6">-----</td> </tr> <tr> <td>Total (corr.)</td> <td>0,13095</td> <td>13</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>R-squared = 50,483 percent R-squared (adjusted for d.f.) = 0,0 percent</p>	Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-Ratio	P-Value	A:Ángulo	0,0124461	1	0,0124461	0,77	0,4304	B:Radio	0,00014549	1	0,00014549	0,01	0,9293	C:Ancho	0,00220732	1	0,00220732	0,14	0,7308	AA	0,00204567	1	0,00204567	0,13	0,7404	AB	0,000128451	1	0,000128451	0,01	0,9333	AC	0,0216985	1	0,0216985	1,34	0,3117	BB	0,0292503	1	0,0292503	1,80	0,2503	BC	0,000149361	1	0,000149361	0,01	0,9281	CC	0,000144359	1	0,000144359	0,01	0,9294	Total error	0,0648424	4	0,0162106			-----						Total (corr.)	0,13095	13			
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-Ratio	P-Value																																																																																																																																																																																													
B:Radio	12633,5	1	12633,5	13,39	0,0038																																																																																																																																																																																													
C:Ancho	85852,4	1	85852,4	90,97	0,0000																																																																																																																																																																																													
Total error	18361,7	11	943,787																																																																																																																																																																																															

Total (corr.)	117567,0	13																																																																																																																																																																																																
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-Ratio	P-Value																																																																																																																																																																																													
A:Ángulo	1217,53	1	1217,53	0,79	0,4234																																																																																																																																																																																													
B:Radio	1642,29	1	1642,29	1,07	0,3593																																																																																																																																																																																													
C:Ancho	94,8751	1	94,8751	0,06	0,8159																																																																																																																																																																																													
AA	3,95237	1	3,95237	0,00	0,9620																																																																																																																																																																																													
AB	2146,75	1	2146,75	1,40	0,3024																																																																																																																																																																																													
AC	99,9675	1	99,9675	0,07	0,8111																																																																																																																																																																																													
BB	21,1676	1	21,1676	0,01	0,9122																																																																																																																																																																																													
BC	3967,55	1	3967,55	2,59	0,1831																																																																																																																																																																																													
CC	1884,42	1	1884,42	1,23	0,3299																																																																																																																																																																																													
Total error	6137,72	4	1534,43																																																																																																																																																																																															

Total (corr.)	16059,8	13																																																																																																																																																																																																
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-Ratio	P-Value																																																																																																																																																																																													
A:Ángulo	0,0124461	1	0,0124461	0,77	0,4304																																																																																																																																																																																													
B:Radio	0,00014549	1	0,00014549	0,01	0,9293																																																																																																																																																																																													
C:Ancho	0,00220732	1	0,00220732	0,14	0,7308																																																																																																																																																																																													
AA	0,00204567	1	0,00204567	0,13	0,7404																																																																																																																																																																																													
AB	0,000128451	1	0,000128451	0,01	0,9333																																																																																																																																																																																													
AC	0,0216985	1	0,0216985	1,34	0,3117																																																																																																																																																																																													
BB	0,0292503	1	0,0292503	1,80	0,2503																																																																																																																																																																																													
BC	0,000149361	1	0,000149361	0,01	0,9281																																																																																																																																																																																													
CC	0,000144359	1	0,000144359	0,01	0,9294																																																																																																																																																																																													
Total error	0,0648424	4	0,0162106																																																																																																																																																																																															

Total (corr.)	0,13095	13																																																																																																																																																																																																
<p style="text-align: center;">Figura 1. Carta de Pareto</p>	<p style="text-align: center;">Figura 1. Carta de Pareto</p>	<p style="text-align: center;">Figura 1. Carta de Pareto</p>																																																																																																																																																																																																
<p style="text-align: center;">Figura 2. Superficie de respuesta</p> <p style="text-align: center;">Estimated Response Surface Ángulo=45,0</p>	<p style="text-align: center;">Figura 2. Superficie de respuesta</p> <p style="text-align: center;">Estimated Response Surface Ángulo=45,0</p>	<p style="text-align: center;">Figura 2. Superficie de respuesta</p> <p style="text-align: center;">Estimated Response Surface Ángulo=45,0</p>																																																																																																																																																																																																

Anexo 13 Resultados del Análisis Estadístico para las tensiones tangenciales alternantes, tensiones efectivas y deformaciones de Von Mises en la lámina de Titanio Grado 2. (Continuación)

