



DECIMOQUINTA CONVOCATORIA PARA EL FOMENTO DE LA INVESTIGACIÓN Y LA INNOVACIÓN 2020

Título del proyecto

Efecto de las condiciones de proceso en micro-fresado con herramienta de punta esférica, sobre el estado de esfuerzos residuales, en la aleación Ti-6AL-4V.

Campo de acción

Transdisciplinariedad - Aporte al PIM

Sociedad

Transdisciplinariedad: El proyecto combina los campos de la manufactura avanzada de control numérico a nivel micro y la caracterización de materiales por medio de técnicas de difracción de rayos X; con el objeto de comprender el efecto del proceso de producción sobre la calidad del producto.

Aporte al PIM: Línea 3 - Proyección social e investigación pertinentes (Focalizar y articular la investigación y la proyección social USTA Colombia con visibilidad e impacto nacional y global).

Articulación con funciones sustantivas y el sector social y productivo

Los desarrollos en el campo del micro-maquinado y de la caracterización de materiales por medio de difracción de rayos X (técnica utilizada en la medición de esfuerzos residuales), servirán para complementar las temáticas impartidas en las asignaturas del núcleo de Materiales y Procesos de Manufactura del programa de Ingeniería Mecánica. Además, los avances realizados pueden ser extrapolados al sector industrial manufacturero, con el objeto de implementar técnicas avanzadas de producción para la generación de nuevos productos.

Grupo de investigación

Línea de investigación en la que se inscribe el proyecto

GEAMEC – Materiales y Procesos de Manufactura

Nombre del Investigador principal	Enlace CvLAC	Enlace ORCID	Enlace Google Académico
Jorge Andrés García Barbosa	http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlab/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000473600	http://orcid.org/0000-0002-7020-4688	https://scholar.google.com.co/citations?user=km7wEwIAAAAJ&hl=en
División	Facultad	Programa	Grupo de investigación
Ingenierías	Mecánica	Mecánica	GEAMEC
Nombre del Co-investigador	Enlace CvLAC	Enlace ORCID	Enlace Google Académico



Johanny Franchesco Niño Fonseca	https://scienti.colciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000779660	https://orcid.org/0000-0003-1073-7500	https://scholar.google.es/citations?hl=es&user=5xIMI6EAAAAJ
División	Facultad	Programa	Grupo de investigación
Ingenierías	Mecánica	Mecánica	GEAMEC
Nombre del Co-investigador	Enlace CvLAC	Enlace ORCID	Enlace Google Académico
Ernesto Córdoba Nieto	http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000164267	http://orcid.org/0000-0002-6527-1069	No reporta
División	Facultad	Programa	Grupo de investigación
Universidad Nacional de Colombia	Ingeniería	Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica	DIMA-UN

Resumen de la propuesta	Palabras clave
Los grupos de investigación GEAMEC (Universidad Santo Tomás) y DIMA-UN (Universidad Nacional de Colombia) vienen trabajando desde hace varios años en el estudio del efecto del proceso de fresado con herramienta de punta esférica, sobre la integridad superficial, en la aleación de titanio Ti-6Al-4V. En el último trabajo desarrollado se compararon los procesos de meso-maquinado y micro-maquinado, con el objeto de determinar la influencia de cada uno de estos sobre el estado de esfuerzos residuales. Uno de los aportes más importantes, en el trabajo adelantado, fue el desarrollo de un procedimiento para la evaluación de esfuerzos residuales mediante el uso de la técnica de difracción de rayos X. El estudio de la calidad superficial en micro-maquinado se determinó considerando unas condiciones fijas de los factores; 60 m/min de velocidad de corte, 25 μm de paso lateral, 15 μm de profundidad de corte, 5 μm de avance por filo, con una herramienta de punta esférica de 500 μm de diámetro. Para continuar con el proceso de investigación en este campo, el presente trabajo pretende establecer la influencia o sensibilidad de las condiciones de proceso, sobre la integridad de la superficie, desde el punto de vista de los esfuerzos residuales. Para alcanzar el objetivo se realizará la selección de los factores más relevantes, se seleccionará el diseño experimental más adecuado y se definirán los niveles de cada factor; con el fin de garantizar el estudio más económico. El análisis de los resultados busca establecer la relación entre los factores y la calidad superficial.	esfuerzos residuales; micro-fresado; herramienta de punta esférica; aleación Ti-6Al-4V; difracción de rayos X

Problema de investigación



El trabajo de investigación desarrollado en los últimos años entre los grupos de investigación GEAMEC (Universidad Santo Tomás) y DIMA-UN (Universidad Nacional de Colombia), en la temática de los procesos de fresado de acabado con herramienta de punta esférica, ha arrojado los siguientes resultados: 1. En el proceso de fresado de acabado (meso-maquinado), sobre la aleación de titanio Ti-6Al-4V, se presenta el defecto de material adherido sobre la superficie (*smeared/adhered material*) [1]. 2. El defecto ocurre cuando la combinación de la dirección del avance, el valor del ángulo *lead* y el valor del ángulo *tilt*, generan un maquinado discordante [2]. 3. El maquinado discordante, unido a las propiedades mecánicas de la aleación Ti-6Al-4V, específicamente la resistencia mecánica y el módulo de elasticidad, ocasionan la generación del defecto; el cuál no puede ser admitido en la fabricación de componentes para la industria médica o la industria aeroespacial [3]. 4. El maquinado concordante genera esfuerzos residuales compresivos sobre la superficie, los cuáles son benéficos para la calidad del producto [4] (en proceso de publicación). 5. El trabajo que se está desarrollando actualmente, busca establecer si el proceso de micro-maquinado genera mayores esfuerzos residuales que el proceso de meso-maquinado, con base en que la fuerza específica de corte es de 4500 N/mm^2 y 1900 N/mm^2 respectivamente.

Una vez es determinado el efecto del proceso de micro-maquinado con herramienta de punta esférica, sobre la aleación Ti-6Al-4V, es necesario evaluar la influencia o sensibilidad de las principales variables de proceso (velocidad de corte, profundidad de corte, paso lateral y avance por filo) sobre el estado de esfuerzos residuales en la superficie procesada.

A nivel de meso-maquinado, Masmiati et al. [5] estudiaron el proceso de fresado con herramienta de punta esférica de superficies inclinadas, con el objeto de obtener la mejor integridad superficial. Consideraron como principales factores, el ángulo de inclinación de la superficie, la profundidad de corte, la velocidad de giro del husillo y el avance. Las condiciones obtenidas, que mostraron mejoras en los esfuerzos residuales y la microdureza, fueron determinadas utilizando el método de optimización de Taguchi, unido a un análisis de varianza (ANOVA). En un siguiente trabajo, los mismos autores [6], estudiaron los efectos del proceso de fresado, sobre la aleación de acero al carbono S50C. Utilizaron un diseño d-óptimo y consideraron como factores numéricos la velocidad del husillo, el avance y la profundidad de corte; y como factores categóricos como la lubricación y la estrategia de corte. Definieron un modelo matemático para la predicción de los esfuerzos residuales, fuerza de corte y rugosidad, basados en la metodología de superficies de respuesta. Los resultados mostraron que los mínimos valores de los esfuerzos residuales fueron alcanzados al utilizar la estrategia *up-milling* y sistemas de nanolubricación. Por otro lado, Tian et al. [7], con el objeto de mejorar la integridad superficial, en el proceso de fresado de la aleación de titanio TC11, implementaron un modelo matemático de esfuerzos residuales en la dirección del avance y en la dirección del paso lateral, por medio de un diseño experimental ortogonal de tres factores y tres niveles. Los experimentos y el análisis de resultados mostraron que los esfuerzos residuales aumentaron con el incremento del nivel de los factores, pero el aumento es diferente en las direcciones analizadas.

Con base en la revisión de la literatura, se concluye que es necesario adelantar estudios con respecto a la influencia de los parámetros de proceso sobre la superficie procesada, en micro-maquinado con herramienta esférica, en dónde las fuerzas específicas de corte son superiores a las de los procesos de meso-maquinado.

Pregunta de investigación:



¿Cómo afecta el valor de las condiciones de proceso (velocidad de corte, profundidad de corte, paso lateral y avance por filo), en el proceso de micro-maquinado con herramienta de punta esférica, el estado de esfuerzos residuales de una superficie de la aleación Ti-6Al-4V?

Justificación

En los procesos de arranque de viruta, como en el caso particular del proceso de fresado con herramienta de punta esférica, se generan esfuerzos residuales sobre la superficie elaborada. Los esfuerzos residuales de compresión son benéficos para el producto y aumentan la resistencia a la fatiga y la resistencia a la corrosión, mientras que los de tensión disminuyen estas mismas propiedades. Es necesario conocer el comportamiento de los esfuerzos residuales, con respecto a las condiciones de proceso de maquinado, para garantizar la calidad de los productos elaborados, principalmente en las industrias médicas, de alimentos y aeroespacial.

Objetivo general

Determinar el efecto de las condiciones de proceso en micro-fresado con herramienta de punta esférica, sobre el estado de esfuerzos residuales, en la aleación de titanio Ti-6Al-4V.

Objetivos específicos

- Seleccionar el diseño experimental adecuado con respecto a los factores de estudio más relevantes en el proceso de micro-maquinado con herramienta de punta esférica.
- Relacionar el estado de esfuerzos residuales, sobre la superficie procesada en la aleación Ti-6Al-4V, con respecto a las condiciones de proceso.

ESTADO DEL ARTE Y MARCO CONCEPTUAL

MICRO-MAQUINADO

Cinemática del maquinado multieje

La Figura 1(a) ilustra la estrategia discordante, *Oblique-reverse pull-down milling*, con ángulos de inclinación $\text{tilt}=30^\circ$ y $\text{lead}=8^\circ$. La Figura 1(b) ilustra la estrategia concordante, *Oblique-reverse push-up milling*, con ángulos de inclinación $\text{tilt}=30^\circ$ y $\text{lead}=-7^\circ$. Para lograr los ángulos lead (β) y tilt (φ) seleccionados usualmente se utiliza una máquina con cinco ejes de movimiento, que permite inclinar el eje de la herramienta con respecto al vector normal a la superficie. Sin embargo, es posible emular la cinemática multieje, en un centro de mecanizado vertical de tres ejes de movimiento, por medio de: una superficie inclinada un ángulo θ (Figura 1(d)); y la dirección del vector del avance (F) orientado un ángulo α (Figura 1(c)), con respecto al eje coordenado $X+$ [8]. En donde α y θ es determinado con (1); considerando H como un vector unitario en la dirección del eje de la herramienta y H_N la componente del mismo vector, en la dirección del vector normal a la superficie.

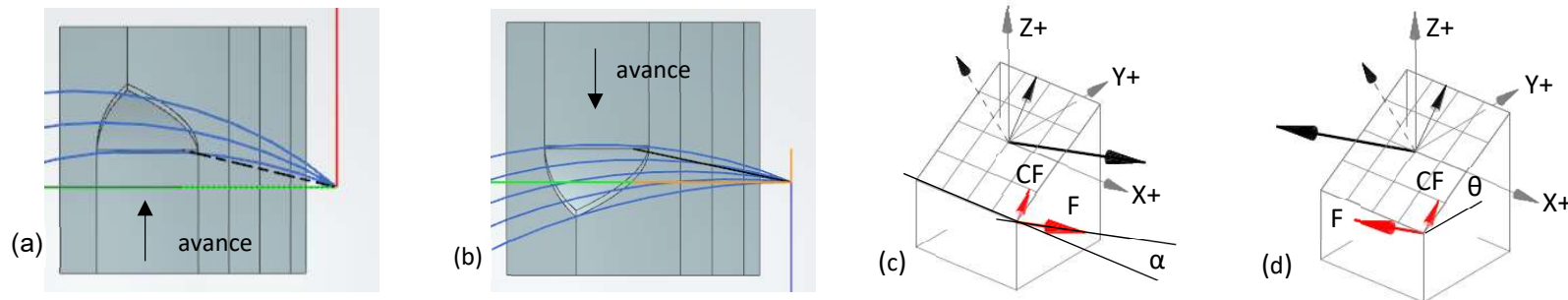


Figura 1. (a) Maquinado discordante. (b) Maquinado concordante. (c) Cinemática del maquinado discordante. (d) Cinemática del maquinado concordante. Fuente: Autores.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \beta}{\tan \varphi} \right) ; \quad \theta = \cos^{-1} \left(\frac{H_N}{H} \right) \quad (1)$$

Defecto superficial producido por el maquinado discordante:

La Figura 2(a) ilustra el montaje realizado en el Laboratorio de Manufactura Multieje de la Universidad Santo Tomás, para el proyecto de la convocatoria FODEIN 2019. Se muestra también el proceso de micro-maquinado concordante con micro-herramienta de punta esférica (Figura 2(b)) sobre la aleación de titanio Ti-6Al-4V. El proceso de micro-maquinado concordante, produce una superficie homogénea, libre de defectos superficiales observables con instrumentos ópticos. Por su parte, el maquinado discordante produce el defecto de material adherido sobre la superficie (smeared/adhered material), como lo evidencia la imagen de microscopía electrónica de barrido mostrada en la Figura 2(d) [2] y que concuerda con lo reportado por Hood et al. [9]. La cuantificación del estado de esfuerzos residuales, objetivo de la convocatoria FODEIN 2019, se encuentra en desarrollo.

Condiciones de proceso en micro-maquinado

Los diámetros de las herramientas utilizadas en los procesos de micro-maquinado, en el orden de micrómetros, hace necesario disponer de husillos de alta velocidad de giro; debido a que a medida que el diámetro de la herramienta tiende a cero, las rpm tienden a infinito (2). Otra consideración a tener en cuenta, es que cuando el eje de giro de una herramienta de punta esférica, tiene un grado de inclinación lead o tilt , con respecto al vector normal a la superficie, el diámetro efectivo de corte D_{eff} varía



en función del ángulo de inclinación de la superficie θ y la profundidad de corte ap (2). La Tabla 1 muestra las condiciones típicas para el proceso de micro-fresado con herramienta de punta esférica, sobre la aleación Ti-6Al-4V. Para una velocidad de corte de 60 m/min , la herramienta debe girar a 49900 rpm , si el diámetro de la herramienta es de $500 \mu\text{m}$, y la profundidad de corte ap es de $15 \mu\text{m}$. El paso lateral, la profundidad de corte y el avance por filo están estimados como un porcentaje del diámetro de la herramienta.

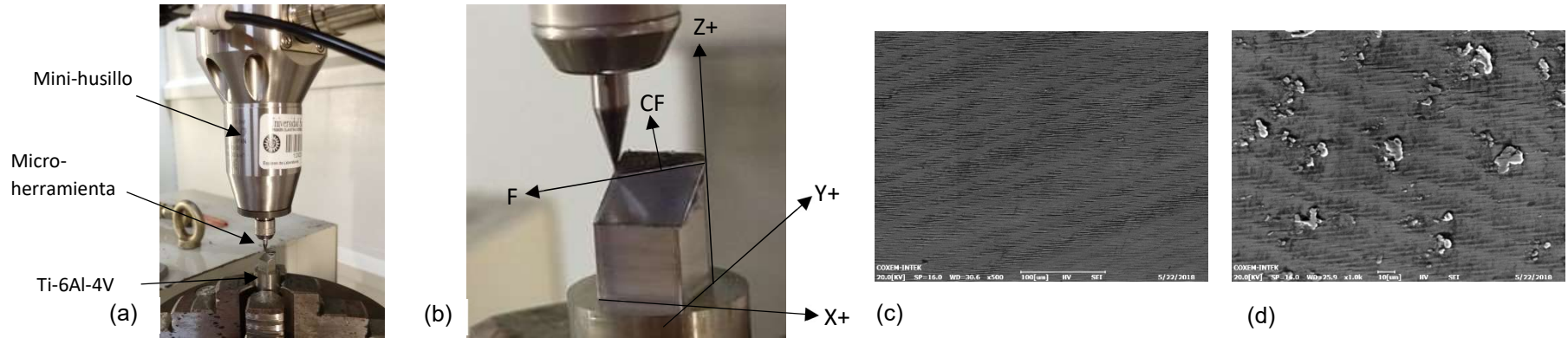


Figura 2. (a). Montaje de micromaquinado en centro de mecanizado vertical. (b) Prueba experimental de micro-maquinado concordante (c) Defecto *smeared/adhered material* ocasionado por el maquinado discordante. (d) Maquinado concordante; no se presenta el defecto. Fuente: Autores

$$rpm = \frac{V_c * 1000}{\pi * D} \quad ; \quad D_{eff} = D \sin \left[\theta + \cos^{-1} \left(\frac{D-2ap}{D} \right) \right] \quad (2)$$

Tabla 1. Condiciones de proceso en micro-fresado con herramienta de punta esférica.

Diámetro	Número de filos	Paso lateral	Profundidad de corte	Avance por filo	Ángulo de superficie	Velocidad de corte	rpm	Deff	rpm (Deff)	Velocidad de avance
μm		μm	μm	μm	$^\circ$	m/min		μm		mm/min
	z	ae	ap	fz	θ	Vc				Vf
		5.00%	3.00%	1.00%						
500	2	25	15	5	30	60	38197	383	49901	499



CARACTERIZACION DE SUPERFICIES POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X (ESFUERZOS RESIDUALES)

Superficie de referencia libre de esfuerzos residuales

El proceso de medición de esfuerzos residuales, sobre una superficie, requiere de un patrón de referencia libre de esfuerzos [10]. Es válido utilizar como referencia el material en el estado de suministro por parte del proveedor. Para el proyecto de la convocatoria FODEIN 2019 se utilizó el proceso de electropulido. La Figura 3 ilustra el patrón de difracción obtenido para la superficie electropulida de la aleación Ti-6Al-4V. Para comprobar que se encontrara en un estado libre de esfuerzos residuales, se tomaron las distancias interplanares de las familias de planos cristalográficos {1012} y {1013}, y se estimaron los parámetros de red para la estructura cristalina hexagonal compacta (HCP) de la fase alfa del material ($a = 2.2925 \text{ \AA}$ y $c = 4.6714 \text{ \AA}$), que concuerdan con lo reportado por Swarnakar et al. [11], Safdar et al. [12] y Yang et al. [13].

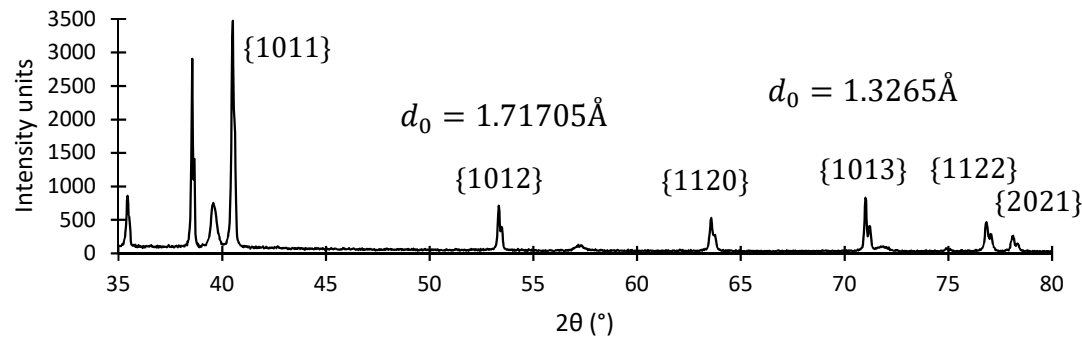


Figura 3. Patrón de difracción para una superficie electropulida de la aleación Ti-6Al-4V. Fuente: Autores.

Ángulo 2θ apropiado para la medición de esfuerzos residuales

También del proyecto FODEIN 2019 en desarrollo, se concluyó que para pequeñas variaciones del espacio interplanar (Δd), se obtienen mayores variaciones del ángulo 2θ ($\Delta 2\theta$) en valores altos de 2θ (Figura 4). Dado que las variaciones de la distancia interplanar d , causadas por la deformación de la red cristalina, se encuentran en el tercer lugar decimal (para distancias en $\text{\AA}$), no se recomienda realizar el análisis de esfuerzos residuales en valores bajos del ángulo 2θ ($2\theta < 120^\circ$) [14]. Considerando que el equipo de difracción de rayos X de la Universidad Nacional de Colombia puede obtener patrones de difracción hasta ángulos 2θ de 150° , el pico en el valor de 2θ más alto, para la aleación Ti-6Al-4V, fue el presentado en el ángulo $2\theta = 141.63^\circ$, correspondiente a la familia de planos cristalográficos {2133}, como se observa en la Figura 5.

Tensor de esfuerzos residuales en la superficie de referencia

La estimación del tensor de esfuerzos principales en la superficie electropulida de la aleación Ti-6Al-4V, se realizó con el software X'Pert Stress del equipo de difracción de rayos X PANalytical®. La medición se realizó en el ángulo $2\theta = 141.63^\circ$, considerando el módulo de elasticidad $E = 114.76 \text{ GPa}$, la relación de Poisson $\nu = 0.3217$ y las constantes elásticas de rayos X $S_1 = 0$ y $1/(2S_2) = 11.89$. El tensor obtenido (3) muestra un esfuerzo σ_{11} de -1.6 Mpa , con una desviación estándar $\Delta\sigma_{11}$ de $\pm 3.5 \text{ Mpa}$, lo que confirma que la superficie electropulida puede ser utilizada como un patrón de referencia para la medición de esfuerzos residuales. El procedimiento desarrollado es fundamental para una correcta evaluación del estado de esfuerzos residuales sobre una superficie.

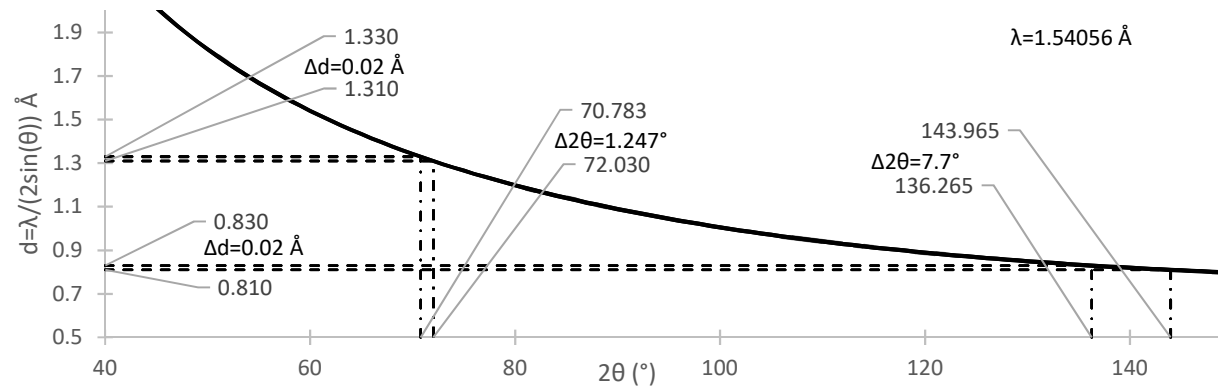


Figura 4. Comportamiento del ángulo 2θ en función de la distancia interplanar Δd . Fuente: Autores

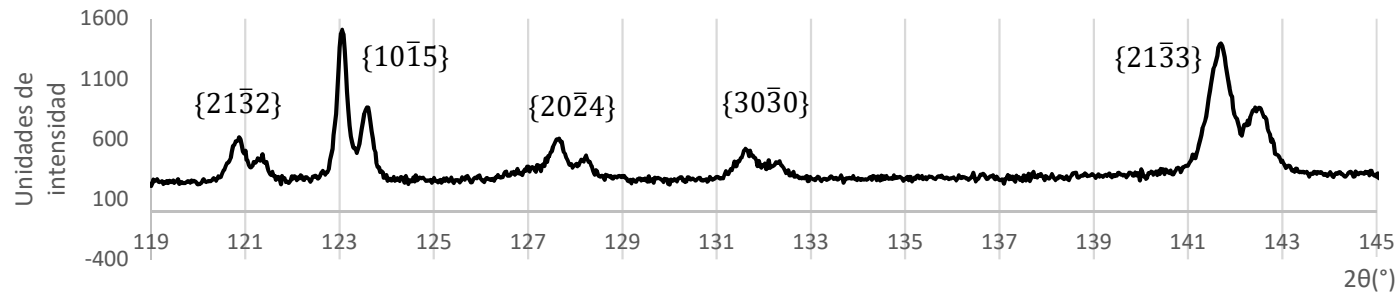


Figura 5. Familias de planos cristalográficos para ángulos mayores a 120° en la aleación Ti-6AL-4V. Fuente: Autores.

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} -1.6 & 0 & 0 \\ 0 & 1.2 & 0 \\ 0 & 0 & 1.6 \end{bmatrix} ; \Delta\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} 3.5 & 0 & 0 \\ 0 & 3.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1.07 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Metodología

Para el objetivo específico 1:

- 1.1 Selección de los factores de estudio
- 1.2 Formulación de hipótesis, desarrollo del diseño estadístico y determinación de los niveles de los factores
- 1.3 Montaje tecnológico para operaciones de micro maquinado
- 1.4 Fabricación de probetas de acuerdo a parámetros definidos en el diseño estadístico experimental



Para el objetivo específico 2:

2.1 Extracción de muestras de las superficies procesadas por medio de electroerosión de hilo

2.2 Estimación de deformaciones interplanares por medio de difracción de rayos X

2.3 Generación del tensor de esfuerzos para cada una de las muestras

2.4 Análisis de resultados utilizando métodos estadísticos

2.5 Determinación de la relación de las condiciones de proceso con el estado de esfuerzos residuales sobre la superficie

2.6 Interpretación y presentación de resultados

Resultados esperados

1. Un (1) artículo en revista indexada internacional cuartil 3 (Q3)

2. Un (1) trabajo de grado de pregrado

3. Un (1) informe final de investigación

Cronograma

ACTIVIDADES	RESPONSABLE	FECHA		FEBRERO				MARZO				ABRIL				MAYO				JUNIO				JULIO				AGOSTO				SEPTIEMBRE				OCTUBRE				NOVIEMBRE			
		Inicio	Fin.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
1.1	Ernesto - Jorge	02/20	03/20																																								
1.2	Johanny	02/20	03/20																																								
1.3	Ernesto - Jorge	03/20	06/20																																								
1.4	Ernesto - Jorge	06/20	06/20																																								
2.1	Jorge	07/20	07/20																																								
2.2	Jorge	07/20	09/20																																								
2.3	Jorge	09/20	09/20																																								
2.4	Johanny	08/20	10/20																																								
2.5	Ernesto-Johanny-Jorge	10/20	10/20																																								
2.6	Ernesto-Johanny-Jorge	10/20	11/20																																								



Presupuesto					
Horas nómina					
Concepto	Nombre	Escalafón	Horas mes	Sede / Seccional o Externo	Total (\$)
Horas Nomina (Investigador Principal)	Jorge Andrés García Barbosa	5	40	Principal	\$1.600.000/mes
Horas Nomina (Co-Investigadores)	Johanny Franchesco Niño Fonseca	2	20	Principal	\$740.000/mes
	Ernesto Córdoba Nieto (UNAL)	Profesor titular	8	Universidad Nacional de Colombia	\$1.200.000/mes

	RECURSO	DESCRIPCIÓN	Valor partida	Valor contrapartida (Externa)	Total (\$)
RUBROS	Servicios Técnicos	Difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido	\$7.000.000		\$ 7.000.000
	Equipos	Centro de mecanizado vertical y turbina de alta velocidad		\$1.200.000	\$ 1.200.000
	Materiales, insumos y software	Aleación de titanio Ti-6Al-4V, herramientas y micro-herramientas	\$5.000.000	\$1.000.000	\$ 6.000.000
	Material bibliográfico				\$ 0
	Movilidad				\$ 0
	Publicaciones (Artículos, proceso editorial y traducción)				\$ 0
TOTAL DEL PROYECTO:					\$14.200.000



Referencia bibliográficas

- [1] R. Hood, C. M. Johnson, S. L. Soo, D. K. Aspinwall, and C. Sage, "High-speed ball nose end milling of burn-resistant titanium (BuRTi) alloy," *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 27, no. 2, pp. 139–147, 2014.
- [2] J. A. García-barbosa, J. M. Arroyo-osorio, and E. Córdoba-nieto, "Influence of tool inclination on chip formation process and roughness response in ball-end milling of freeform surfaces on Ti-6Al-4V alloy," *Mach. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 1, pp. 121–135, 2017.
- [3] J. A. García-barbosa, J. M. Arroyo-osorio, and E. Córdoba-nieto, "The manufacture of a maxillofacial prosthesis from an axial tomography using simulation technologies with a virtual machine tool and four-axis machining," *DYNA*, vol. 83, no. 196, pp. 100–105, 2016.
- [4] J. A. García-Barbosa and E. Córdoba-Nieto, "An approach to residual stress measurement in ball-end milling process on Ti-6Al-4V ELI titanium alloy," *Int. J. Mach. Mach. Mater.*, vol. X, no. X, pp. xx–xx, 2019.
- [5] N. Masmiaati and A. Sarhan, "Optimizing cutting parameters in inclined end milling for minimum surface residual stress - Taguchi approach," *Measurement*, vol. 60, pp. 267–275, 2015.
- [6] N. Masmiaati, A. A. D. Sarhan, N. Mohsen A, and M. Hamdi, "Optimization of cutting conditions for minimum residual stress, cutting force and surface roughness in end milling of S50C medium carbon steel," *Measurement*, vol. 86, pp. 253–265, 2016.
- [7] W. Tian, Y. Li, J. Ren, and C. Yao, "Sensitivity Analysis of The Influence of Milling Parameters on The Surface Residual Stress of Titanium Alloy TC11," in *Procedia CIRP*, 2016, vol. 56, pp. 149–154.
- [8] C. F. Reyes-Martinez and J. A. García-barbosa, "Influencia del proceso de microfresado, con herramienta de punta esférica, sobre la rugosidad superficial de la aleación de titanio Ti-6Al-4V.," Universidad Santo Tomás, Bogotá, 2018.
- [9] R. Hood, C. M. Johnson, S. L. Soo, D. K. Aspinwall, and C. Sage, "High-speed ball nose end milling of burn-resistant titanium (BuRTi) alloy," *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 27, no. 2, pp. 139–147, 2014.
- [10] V. Hauk, *Structural and residual stress analysis by nondestructive methods Evaluation-Application-Assesment*. Aschen, Germany: Elsevier Science B.V., 1997.
- [11] A. K. Swarnakar, O. Van der Biest, and B. Baufeld, "Thermal expansion and lattice parameters of shaped metal deposited Ti-6Al-4V," *J. Alloys Compd.*, vol. 509, no. 6, pp. 2723–2728, 2011.
- [12] A. Safdar, L. Wei, A. Snis, and Z. Lai, "Evaluation of microstructural development in electron beam melted Ti-6Al-4V," *Mater. Charact.*, vol. 65, no. 9, pp. 8–15, 2012.
- [13] Y. Yang *et al.*, "Crystallographic features of α variants and β phase for Ti-6Al-4V alloy fabricated by selective laser melting," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 707, no. September, pp. 548–558, 2017.
- [14] M. E. Fitzpatrick, A. T. Fry, P. Hodway, F. A. Kandil, J. Shackleton, and L. Souminen, "Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction," vol. 52, no. 2. National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, United Kingdom, p. 68, 2005.