



Informe académico final de investigación

Información general de proyecto

Código Interno	1605502-020	Supervisor/ Director Centro de Investigación	Elver Jofre Carvajal Bonilla
Nombre del proyecto de investigación	Implementación de operaciones tecnológicas de micro-fresado y micro-taladrado para la fabricación de componentes en la industria médica.	Fecha de inicio del proyecto.	29/02/2016
Nombre del Investigador principal	Jorge Andrés García Barbosa	Fecha de finalización del proyecto.	15/06/2017
Nombre de los co- investigadores	Oscar Rodrigo López Vaca	Fecha de presentación del informe de avance.	26/10/2016
Nombre de los auxiliares de investigación /estudiantes de semillero vinculados	Juan David Ramírez Vásquez	Fecha de presentación del informe de cierre	30/06/2017
Grupo de Investigación/Semillero	GEAMEC/SARA	Centro de costos asignado	17304109
Nombre de la línea activa de investigación	Materiales y procesos de manufactura	Facultad y programa	Ingeniería Mecánica



Implementación de operaciones tecnológicas de micro-fresado y micro-taladrado para la fabricación de componentes en la industria médica.

Resumen

Las empresas del sector médico y las universidades que investigan en el área de la biomecánica, en Colombia, no han apropiado la tecnología de manufactura para la fabricación de componentes con pequeñas dimensiones (inferiores a 1000 micras), obtenidos por medio de procesos de arranque de viruta. Si bien estas instituciones cuentan con máquinas de control numérico convencionales, los husillos de estas máquinas no son los apropiados para la manufactura de elementos pequeños. Además, el uso de máquinas de control numérico convencionales para la fabricación de estos componentes, a nivel industrial, no es eficiente por consideraciones de tamaño y consumo energético. Una alternativa para la fabricación, elaboración de prototipos y desarrollo de producto, sin incurrir en los costos de la tecnología específica de micro-maquinado, es adaptar mini-husillos de alta velocidad y bajo consumo energético al parque industrial existente.

Palabras clave: micro-maquinado, maquinado de partes pequeñas, industria médica, micro-fresado, micro-taladrado

1 Problema de investigación.

En la industria médica (ej. área ortodóntica) algunos componentes como los implantes, los dispositivos de anclaje temporal (DAT), los brackets, se caracterizan por tener rasgos geométricos de dimensiones inferiores a las mil micras. La Figura 1 muestra la imagen de un DAT comercial, donde se evidencian sus principales características geométricas; entre ellas, el agujero (500 micras de diámetro) y la ranura (500 x 1200 micras).

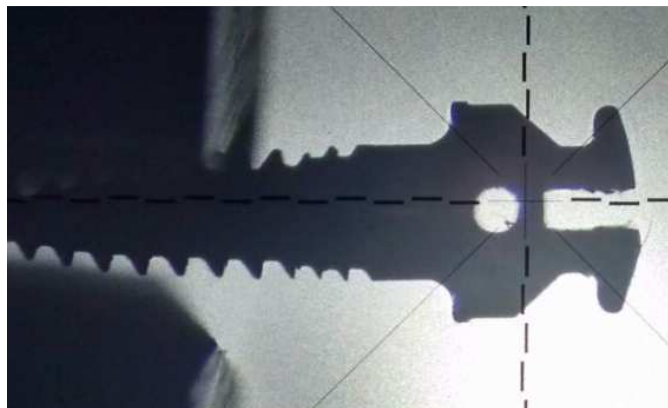


Fig. 1. DAT comercial y características geométricas de pequeñas dimensiones. (Proyector de perfiles Mitutoyo-PH350 10X). Fuente: Grupo de investigación GEAMEC, Universidad Santo Tomás.



El problema principal radica en que muchas de las empresas y universidades en Colombia, que se dedican a la fabricación y a la investigación en este campo, no disponen de la tecnología adecuada para su fabricación, debido a que para la manufactura por arranque de viruta de este tipo de componentes en procesos como torneado, fresado y taladrado, la disminución del diámetro de las herramientas, implica un aumento de las revoluciones necesarias del husillo de la máquina para realizar el proceso (10.000 a 100.000 rpm) y en su mayoría, el parque industrial colombiano, de máquinas de control numérico, cuenta con husillos en un rango de 4.000 a 10.000 rpm, con potencias que oscilan entre los 2 y los 30 kW. Sin embargo, estas máquinas cumplen los rangos de avance lineal (10 - 3000 mm/min), precisión de movimiento (0.001 mm) y repetitividad (0.005 mm) apropiados para la elaboración de dichos componentes.

La principal limitante tecnológica para el mecanizado de partes con rasgos geométricos pequeños, es la velocidad de giro de los husillos que portan la herramienta, resaltando que no se requieren potencias elevadas para las operaciones de micro-maquinado. Por otro lado, es necesario evaluar el efecto que tienen sobre los procesos de micro-maquinado, variables como vibración, paralelismo, temperatura, rigidez en el montaje de las herramientas, materias primas y estructura de la máquina.

Si bien es cierto que el proceso de manufactura de componentes pequeños en máquinas convencionales CNC, no es eficiente, por consideraciones de espacio y consumo de energía, una alternativa, para el desarrollo de producto y la fabricación de prototipos para el sector médico, sin incurrir en costos elevados de adquisición de la tecnología específica, es adaptar mini-husillos de alta velocidad, con potencias cercanas a los 150 W, al parque tecnológico existente.

2 Objetivos de investigación.

Objetivo general

Implementar operaciones tecnológicas de micro-fresado y micro-taladrado, en el centro de mecanizado vertical de la Universidad Santo Tomás, por medio de la adaptación de un mini-husillo de alta velocidad.

Objetivos específicos

- Diseñar práctica experimental para operaciones de micro-fresado y micro-taladrado.
- Realizar práctica experimental en operaciones de micro-fresado y micro-taladrado.
- Caracterizar las operaciones tecnológicas realizadas en micro-fresado y micro-taladrado.



3 Marco teórico

3.1 Caracterización de la Micro-manufactura

En el proceso de desarrollo de nuevos componentes y sistemas se ha avanzado en la reducción del espacio empleado y el consumo reducido de recursos y energía, por tanto en la industria se ha planteado la necesidad y una creciente demanda por la miniaturización o reducción del tamaño de componente (Razaly & Qin, 2013),(Qin, 2010) y del proceso de manufactura (Razaly & Qin, 2013). Desde este enfoque se plantea la micro-manufactura como el proceso de reducción de escala de procesos y tecnologías convencionales (Qin, 2010).

En la micromanufactura se centra en la capacidad de producir partes que tiene características geométricas menores a 100 μm (Chae, Park, & Freiheit, 2006), con dimensiones generales en el rango de pocos milímetros (Razaly & Qin, 2013). En la aplicación de estas micro partes dentro de un sistema se deben garantizar que en algunos casos rangos de precisión en su posicionamiento de entre 0.1 a 10 μm (Razaly & Qin, 2013), y con proceso de manufactura que permitan acabados superficiales con rugosidades Ra promedio de 0.1 μm (Kiswanto, Zariatin, & Ko, 2014).

No obstante como lo plantea (Razaly & Qin, 2013), la implementación de la micro-manufactura presenta dificultades en la manufactura con métodos tradicionales de fabricación. Desde este punto de vista, se plantean como procesos y/o métodos típicos en la micro-manufactura de acuerdo a la forma como son hechos; Procesos Sustractivos, aditivos, por deformación, por unión o híbridos. Dentro de los procesos sustractivos se resalta el corte Micro-mecánico o micro-maquinado (Fresado, torneado, rectificado, entre otros), en los procesos aditivos, la microfundición, el micromoldeo y la estereolitografía. En los procesos por deformación se destacan la micro-deformación (estampado, extrusión, forjado, doblado, embutición, etc). Según el tipo de energía empleada por el proceso de fabricación de micropiezas se pueden clasificar en: Mecánicos, químicos, electroquímicos, eléctricos y por láser.

Los procesos de micromaquinado presenta recientes avances en desarrollo de sensores y microactuadores para el sector automotriz, aeronáutico, en especial para el sector la biomecánica (tornillos de sujeción,) (Qin, 2010), moldes y troqueles para microproductos, siendo de acuerdo a su complejidad, las operación de fresado 2.5 ejes y taladrado las más sencillas de implementar. Para aplicaciones de 3 o más ejes, se requiere del uso intensivo de los procesos de control y posicionamiento con retroalimentación para garantizar la precisión en la forma.

En los proceso de maquinado micromecánico (Fig No 2), el rango de aplicación permite su implementación con máquinas herramientas garanticen entre buena y alta precisión, en una escala del proceso dentro entre micro y meso manufactura. Este tipo de proceso, a diferencia del método de maquinado tradicional, se verá fuertemente influenciado por (Razaly & Qin, 2013):



- Efectos despreciables convencionalmente: Vibración, paralelismo en la herramienta, temperatura, rigidez de la herramienta y la estructura de la máquina, y tipo de remoción del material.
- El tamaño del espesor de la viruta.
- Automatización y volumen de la producción: El desarrollo de este tipo de proceso para altos volúmenes de producción requieren de altos costos debido a la necesidad de altas niveles de repetibilidad y precisión.
- Empleo de materiales endurecidos y no tradicionales (titanio, aleaciones de níquel, entre otros) debido a requerimientos altas prestaciones mecánicas.
- Limitaciones en la configuración geométrica y adquisición de las herramientas.
- Fuerzas no deseadas debidas a la fricción, fuerzas electrostáticas, adhesión entre otras.
- Precisión en los montajes y de la sensórica de las máquinas.

Es importante resaltar que el proceso de maquinado a esta escala, se diferencia del método tradicional ya que el proceso de remoción de material no está definido como un proceso de corte sino que está dominado por efectos de arrastre, deslizamiento, deformación elástica y plástica (Kiswanto, Zariatin, & Ko, 2014). Estos efectos generan problemas en la calidad superficial del producto fabricado y la creación significativa de rebabas. Por lo anterior se hace muy importante controlar las condiciones y variables del proceso para garantizar los requerimientos funcionales de producto final. No obstante, es común nombrar las herramientas empleadas en este proceso como herramientas de corte.

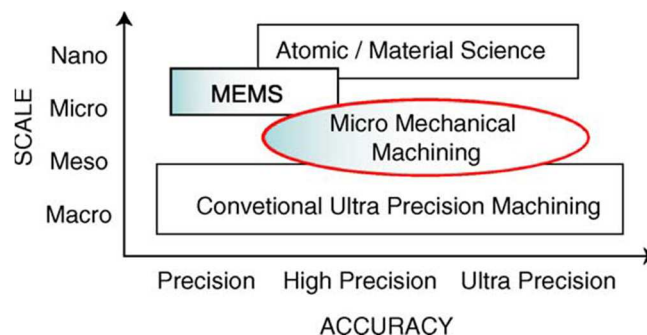


Fig. 2. Tamaño dimensional para el maquinado micromecánico (Chae, Park, & Freiheit, 2006)

3.2 Herramientas de corte y máquinas herramienta en el proceso de micromaquinado

Tanto las herramientas como las máquinas empleadas son fundamentales para proceso de micromaquinado, debido a que afecta la calidad superficial y el tamaño de los rasgos geométricos. Las herramientas de corte de carburo de tungsteno son generalmente las empleadas para este proceso, debido a su dureza elevada y alta resistencia para una amplio rango de temperaturas (Chae, Park, & Freiheit, 2006). Comercialmente estas herramientas



están disponibles para fresas de diámetro por debajo de $50\ \mu\text{m}$ con cero grados en la hélice para mejorar la rigidez y favorecer su proceso de fabricación. Desde $50\ \mu\text{m}$ de diámetro se tienen herramientas con ángulos en sus hélices (Fig 3) (Liow, 2009). Aunque existen herramienta de diamante, estas se limitan al mecanizado de materiales no-ferrosos (Sun & Cheng, 2010).

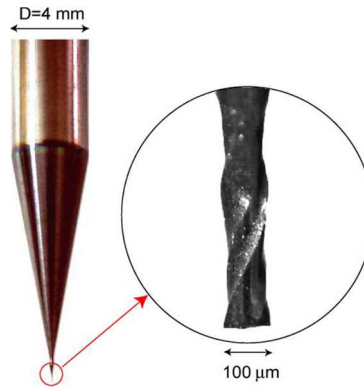


Fig. 3. Fresa de Carburo de tungsteno con dos filos de corte (Chae, Park, & Freiheit, 2006)

En cuanto a las máquinas herramientas, sus características de precisión total y comportamiento dinámico influyen en la capacidad de producción de piezas con características por debajo de un milímetro y buscan condiciones específicas de precisión, rugosidad y repetitividad en la producción. En aplicaciones de micromaquinado, la velocidad rotacional del husillo debe ser muy alta para garantizar una aceptable productividad, ya que el tamaño de las herramientas disminuye la tasa de remoción de material. Para altos torques, se emplean husillos con motores eléctricos y cojinetes de contacto angular, que llegan hasta 60000 rpm. Cuando se necesitan velocidades superiores se emplean husillos con cojinetes neumáticos y turbinas de aire, los cuales requieren bajos torques y pueden llegar a velocidades angulares que exceden los 200.000 rpm. Otro aspecto importante es la precisión de los desplazamiento, las cuales en máquinas comerciales dedicadas al micromaquinado pueden garantizar tolerancias geométricas de $\pm 1\ \mu\text{m}$. Este nivel de precisión se obtiene debido a la incorporación de motores lineales y sistemas de control con retroalimentación en la posición (Sun & Cheng, 2010).



4 Desarrollo metodológico del proyecto

4.1 Herramientas adquiridas para prácticas experimentales de micro fresado

La figura 4 ilustra las micro-herramientas adquiridas con rubros del proyecto. Son fresas de carburo sólido, de punta plana y punta redonda de 0.2 mm de diámetro (200 micras) y 0.5 mm de diámetro (500 micras), del fabricante alemán Franken-Emuge.

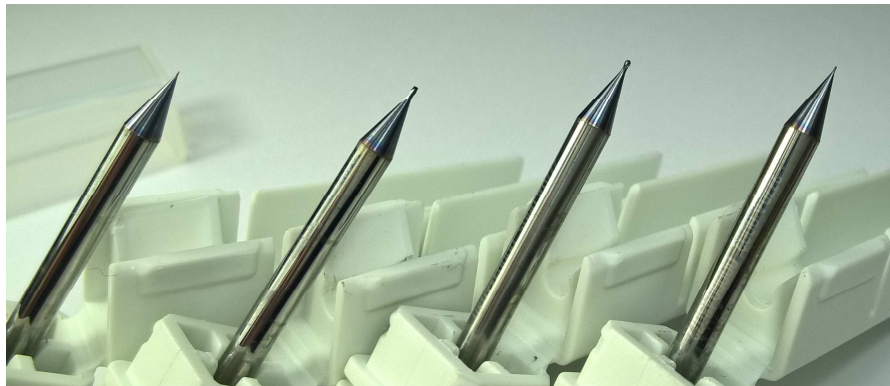


Fig. 4. Herramientas adquiridas con los rubros del proyecto

4.2 Condiciones de proceso para las herramientas adquiridas

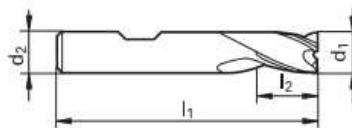
A continuación se muestran las condiciones de corte requeridas para cada una de las herramientas adquiridas. Es de notar que la velocidad de giro mínima, sobrepasa las 20000 rpm y que tanto el avance por diente, la profundidad de corte axial y la profundidad de corte lateral, están en valores inferiores a las 10 micras.

4.2.1 Condiciones de corte para la micro fresa de Guhring

Minifresa para chavetero (3 filos de corte). Marca: Guhring. Ref. 3684 0.400. Pág 1151

Material de corte: MD (Metal duro)

Calidad de metal duro: K/P ; Tipo: N ; Ángulo de espiral: 30°



d1	d2	l1	l2	Z
mm	mm	mm	mm	
0,300	3,000	38,00	1,00	3
0,400	3,000	38,00	1,00	3
0,500	3,000	38,00	1,50	3

Fig. 5. Dimensiones principales de la micro fresa Guhring 3684 0.400



Tabla. 1. Ancho de corte (ae) y profundidad de corte para micro fresa Guhring 3684 0.400. Factores de corrección del avance por diente en función de la profundidad de corte.

aplicación	ancho de aproximación (ae)	prof. de aproximación (ap)
ranurar*	1 x d	0,5 hasta 1,0 x d
desbastar*	0,5 hasta 0,9 x d	0,5 hasta 1,0 x d
acabar	0,05 hasta 0,1 x d	1,0 hasta 2,0 x d
desbastar HPC**	0,25 hasta 0,5 x d	1,0 hasta 2,0 x d
desbastar HSC***	0,1 hasta 0,25 x d	1,0 hasta 2,0 x d

$$fz - \text{correcciones}$$

$$ap = 2 x d ; fz - 30\%$$

$$ap = 1 - 2 x d ; fz + 25\%$$

$$ap = 1 - 2 x d ; fz + 60\%$$

Tabla. 2. Velocidad de corte y avance por diente para micro fresa Guhring 3684 0.400, en función del tipo de material de la pieza de trabajo.

Material	Dureza	Tipo recomendado	Tipo de aplicación	corte Vc	fz (mm/z)								
					3	6	8	10	12	16	20	25	
Aceros de bonificación aleados, aceros para htas. y rápidos 1.5131 50MnSi4, 1.7003 38Cr2, 1.7030 28Cr4 1.5710 36NiCr6, 1.7035 41Cr4, 1.7225 42CrMo4 1.2080 X210Cr12, 1.2083 X42Cr13, 1.2419 105WCr6, 1.2379 X155CrVMo12-1 1.3243 S 6-5-2-5, 1.3343 S 6-5-2, 1.3344 S 6-5-3 Spring steel = 1.5026 55Si7, 1.7176 55Cr3, 1.8159 51CrV4	850-1.400 N/mm ²	2-schneidig	ranurar	95	0,011	0,021	0,028	0,039	0,046	0,056	0,067	0,098	
		2-/3-schneid.	desbastar	115	0,014	0,028	0,035	0,046	0,056	0,067	0,077	0,112	
		4-schneidig	acabar	140	0,011	0,021	0,028	0,035	0,042	0,049	0,063	0,091	
Aceros inoxidables 1.4104 X14CrMoS17, 1.4105 X6CrMoS17, 1.4305 X10CrNiS18-9 USA = 303, 410, 420F, 430, 430F	hasta 750 N/mm ²	2-schneidig	ranurar	85	0,009	0,018	0,024	0,030	0,036	0,042	0,054	0,078	
		2-/3-schneid.	desbastar	100	0,011	0,021	0,027	0,036	0,042	0,054	0,060	0,090	
		4-schneidig	acabar	125	0,010	0,018	0,024	0,033	0,039	0,048	0,057	0,084	
Aceros templados Aceros para htas., aceros de bonificación, aceros de muelles, aceros rápidos, aceros cementación, etc. Z.B.: 1.2344 X40CrMoV5-1; 1.2767 X45NiCrMo4; 1.2379 X155CrVMo12-1; 1.2080 X210Cr12 1.3343 S 6-5-2	hasta 54 HRC	2-schneidig	ranurar	50	0,007	0,015	0,018	0,024	0,027	0,036	0,042	0,060	
		2-/3-schneid.	desbastar	75	0,009	0,015	0,021	0,027	0,030	0,039	0,048	0,072	
		4-schneidig	acabar	105	0,009	0,018	0,024	0,030	0,036	0,042	0,054	0,078	
	54-60 HRC	2-schneidig	ranurar										
		2-/3-schneid.	desbastar										
		4-schneidig	acabar										
Aleaciones de titanio ("Ti") 3.7024 Ti99,5, 3.7114 TiAl5Sn2,5, 3.7124 TiCu2 3.7154 TiAl6Zr5, 3.7164 TiAl6V4, 3.7184 TiAl4Mo4Sn2,5	hasta 1.300 N/mm ²	2-schneidig	ranurar	40	0,009	0,015	0,021	0,027	0,030	0,039	0,048	0,072	
		2-/3-schneid.	desbastar	60	0,010	0,018	0,024	0,033	0,039	0,048	0,057	0,084	
		4-schneidig	acabar	90	0,010	0,018	0,024	0,033	0,039	0,048	0,057	0,084	
Aleaciones fundición de Al 3.2131 G-AlSi5Cu1, 3.2153 G-AlSi7Cu3, 3.2573 G-AlSi9 3.2581 G-AlSi12, 3.2583 G-AlSi12Cu, - G-AlSi12CuNiMg	sobre 3% Si	2-schneidig	ranurar	160	0,011	0,021	0,028	0,039	0,046	0,056	0,067	0,098	
		2-/3-schneid.	desbastar	200	0,014	0,028	0,035	0,046	0,056	0,067	0,077	0,112	
		4-schneidig	acabar	245	0,013	0,025	0,032	0,042	0,049	0,063	0,070	0,105	

Con fresas no recubiertas reducir Vc en 40% y fz en 25%

4.2.2 Condiciones de corte para las Herramientas Franken – Emuge

Las micro y mini-fresas están desarrolladas, por esta marca, a partir de diámetros de 0.2 mm. A pesar de su pequeña medida están construidas para resistir a cargas fuertes. Son apropiadas para aceros con dureza hasta 66 HRC. Las aplicaciones típicas para estas fresas micro y mini son por ejemplo la producción de herramientas de moldeo, moldes de inyección, punzones de acuñar y moldeo para la producción en masa, electrodos de grafito y cobre, así como la



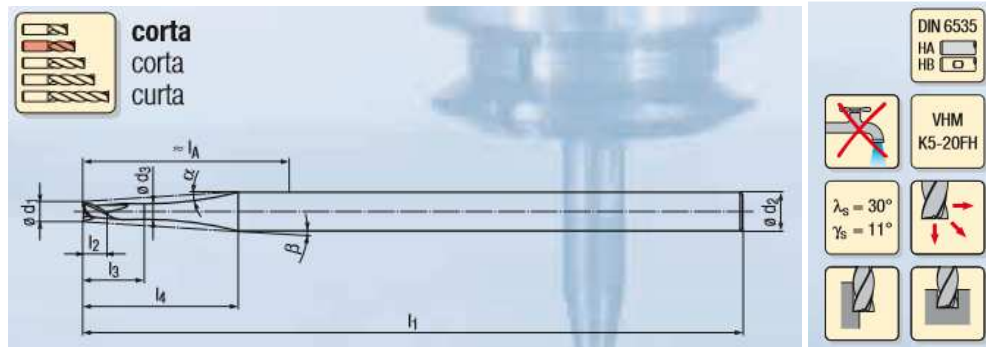
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

estructuración superficial de alta precisión de componentes macroscópicos y producción directa de componentes micromecánicos en series pequeñas y medianas.

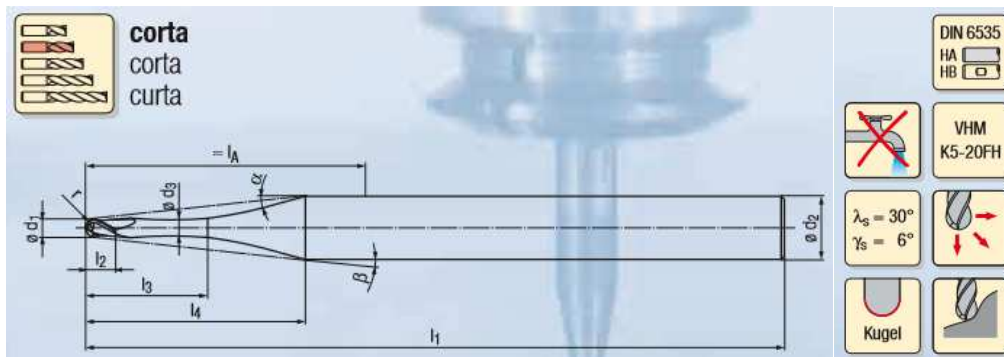
Tabla. 3. Características dimensionales principales micro fresa Emuge 2760A de punta plana



$$l_3 : d_1 = 2,2 : 1$$

Ident. utensile · Ident. herramienta · Ident. ferramenta													2760	2760A
ød ₁		l ₂	l ₃	l ₁	ød ₃	l ₄	ød ₂ h5	l _A	α	β	Z	Ident. dim.		
0,2	-0,016	0,12	0,44	38	0,16	5,6	3	10	15°	15°	2	0002	•	•
0,5	-0,025	0,3	1,1	38	0,4	5,7	3	10	15°	13°	2	0005	•	•

Tabla. 4. Características dimensionales principales micro fresa Emuge 2770A de punta redonda



$$l_3 : d_1 = 2,2 : 1$$

Ident. utensile · Ident. herramienta · Ident. ferramenta													2770	2770A
ød ₁	r	l ₂	l ₃	l ₁	ød ₃	l ₄	ød ₂ h5	l _A	α	β	Z	Ident. dim.		
0,2	±0,01 ±0,005	0,12	0,44	38	0,16	5,7	3	10	15°	14°	2	0002	•	•
0,5	0,25	0,3	1,1	38	0,4	5,8	3	10	15°	13°	2	0005	•	•

Recomendaciones:

- Utilizar máquinas con la más alta precisión y estabilidad
- Los valores de corte son una recomendación y hay que utilizarlos a las condiciones de mecanizado particulares



- Para el fresado de material macizo, reducir la profundidad de corte y la velocidad de avance a la mitad
- Proveer una buena evacuación de viruta por medio de aire comprimido o mejor aire frío.

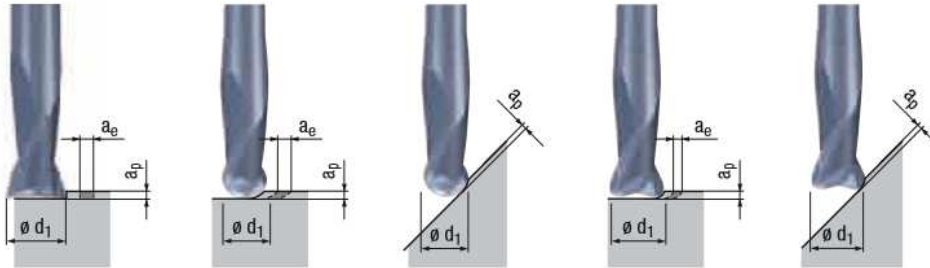


Fig. 6. Profundidad de corte (a_p) y ancho de corte (a_e) en herramientas de punta plana y punta redonda.

Tabla. 5. Datos de corte para fresado con herramientas 2760A y 2770A. Diámetros de D0.2 mm y de D0.5 mm. Punta plana y punta redonda.

	z	Vc	fz		rpm		ap	ae		Vf	
	(teeth)	(m/min)	(mm)				(mm)	(mm)		(mm/min)	
			D 0.2	D 0.5	D 0.2	D 0.5		D 0.2	D 0.5	D 0.2	D 0.5
Ti6Al4V	2	80	0.002	0.005	80000	50930	0.01	0.01	0.025	320	509
Acero templado (56-57 HRC)	2	70	0.002	0.004	80000	44563	0.009	0.008	0.02	320	357
Acero templado (63-66 HRC)	2	55	0.002	0.004	80000	35014	0.008	0.008	0.02	320	280

Tabla. 6. Datos de corte para fresado de ranuras con herramientas 2760A y 2770A. Diámetros de D0.2 mm y de D0.5 mm. Punta plana y punta redonda.

	z	Vc	fz		rpm		ap	ae		Vf	
	(teeth)	(m/min)	(mm)				(mm)	(mm)		(mm/min)	
			D 0.2	D 0.5	D 0.2	D 0.5		D 0.2	D 0.5	D 0.2	D 0.5
Ti6Al4V	2	80	0.001	0.0025	80000	50930	0.005	0.01	0.025	160	255
Acero templado (56-57 HRC)	2	70	0.001	0.002	80000	44563	0.0045	0.008	0.02	160	178
Acero templado (63-66 HRC)	2	55	0.001	0.002	80000	35014	0.004	0.008	0.02	160	140



4.3 Estrategias de maquinado

En los procesos de fresado se utilizan diferentes estrategias de maquinado, como las mostradas en la figura 7. Al utilizar las estrategias mostradas, con fresas tangenciales o frontales, el proceso de formación de la viruta se clasifica como; concordante (*climb, down milling*), cuando la viruta se forma del mayor al menor espesor; o como discordante (*conventional, down milling*), cuando la viruta se forma de un espesor cero a un mayor espesor como lo ilustra la figura 8.

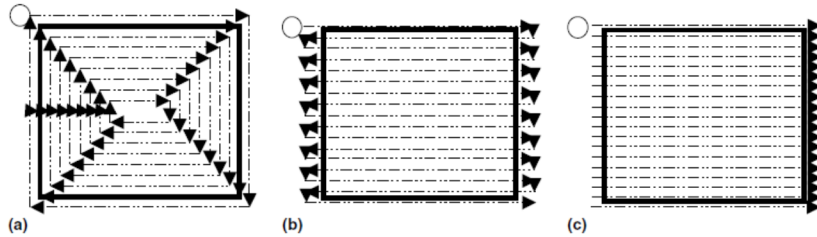


Fig. 7. Principales estrategias de maquinado. (a) Offset, (b) Zig-Zag y (c) una sola dirección.

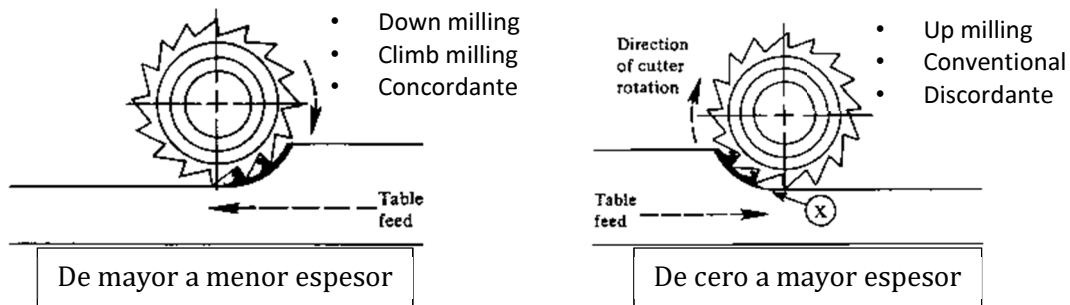


Fig. 8. Formación de la viruta en fresas tangenciales. Corte concordante y corte discordante

Por otro lado, al emplear herramientas de punta esférica, principalmente utilizadas en el acabado de superficies complejas, la geometría esférica de la herramienta y la variación del radio de curvatura de la superficie a obtener, generan una variación del ángulo comprendido entre el vector normal a la superficie y el vector que representa al eje de la herramienta. El eje de la herramienta puede inclinarse, con respecto al vector normal a la superficie, en la dirección del avance (ángulo lead) o en la dirección del paso lateral (ángulo tilt), como se ilustra en la figura 9. Dichas inclinaciones generan ocho tipos de posiciones de la herramienta con respecto a la superficie maquinada, como las mostradas en la figura 10, propuestas por (Bouzakis et al, 2003).

Con base en lo anterior, se produce un maquinado tipo *pull* (halar), si la herramienta se inclina en la dirección del avance de la herramienta (ángulo *lead positivo*), y tipo *push* (empujar) si el ángulo de inclinación es contrario a la dirección del avance de la herramienta (ángulo *lead negativo*). Adicionalmente, el eje de la herramienta también se puede inclinar en la dirección del paso lateral, produciendo un maquinado *oblique-plunge*, si la herramienta se inclina en la



dirección opuesta al paso lateral (ángulo *tilt* negativo); y *oblique-reverse*, si la herramienta se inclina en la dirección del paso lateral (ángulo *tilt* positivo).

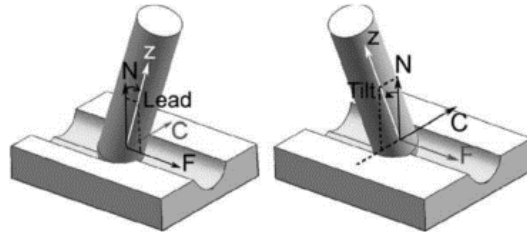


Fig. 9. Ángulos de inclinación Lead y Tilt del eje de la herramienta (z) con respecto al vector normal a la superficie (N). Dirección de avance (F). Dirección del paso lateral (C).

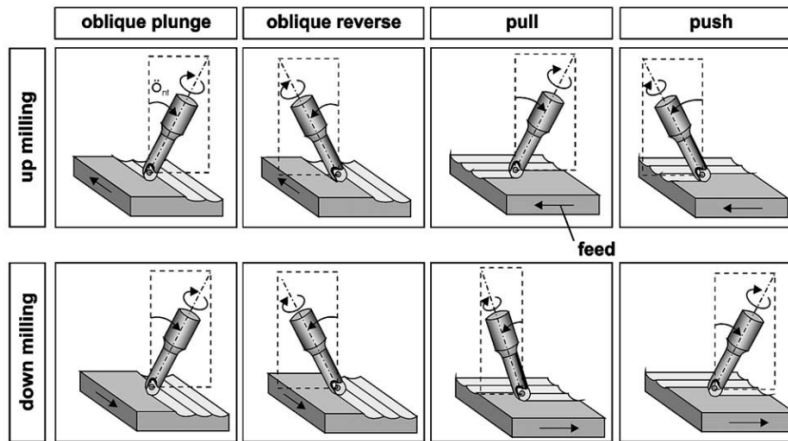


Fig. 10. Posiciones de la herramienta en maquinado de superficies complejas propuestas por Bouzakis.

4.4 Caracterización e integridad superficial

En el proceso de fresado de acabado sobre superficies cóncavas y convexas, con herramienta de punta esférica, en la aleación de titanio Ti-6Al-4V, se encontró material adherido en algunas zonas de la superficie maquinada (García, Osorio, Córdoba, 2017), como se observa en la figura 11. Las imágenes del defecto fueron captadas por medio de microscopía electrónica de barrido en los laboratorios de la Universidad Nacional.

El defecto mencionado se presenta cuándo el ángulo *tilt* de inclinación de la herramienta es menor a cero y el ángulo *lead* de -25° , es decir, cuando se presenta un maquinado *oblique-plunge-push-up milling*, siguiendo la convención mostrada en la figura 10. En dicho caso la viruta se forma del menor al mayor espesor, como se observa en la figura 12.

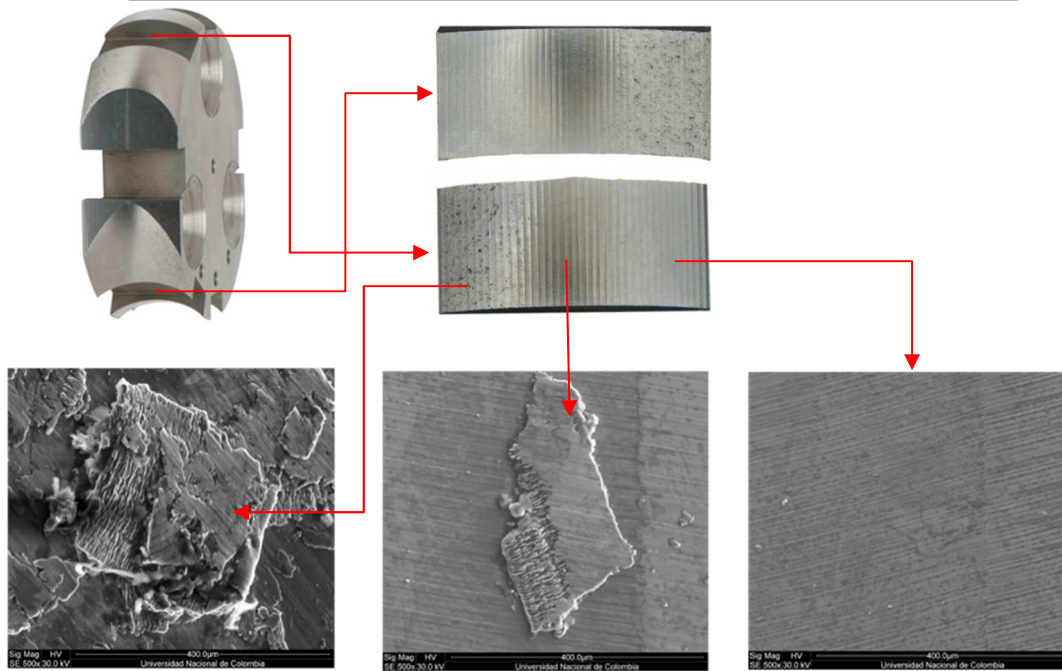


Fig. 11. Defecto superficial (material adherido sobre la superficie) en algunas zonas de las superficies cóncava y convexa. Imágenes del defecto obtenidas por SEM (Microscopía Electrónica de Barrido)

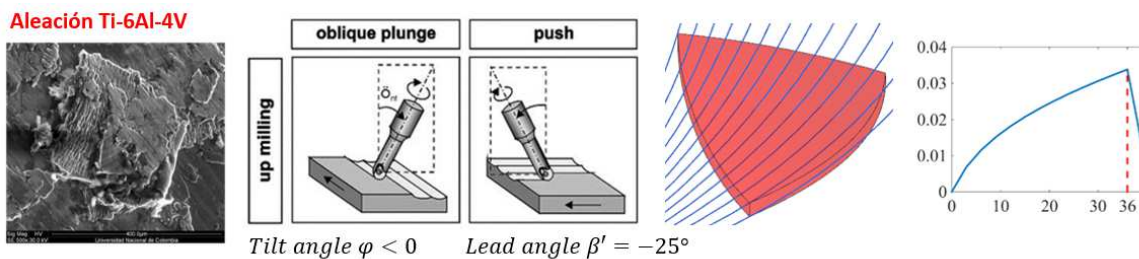


Fig. 12. El defecto se presenta con ángulos tilt inferiores a cero y con un ángulo lead de -25°

El defecto sobre las superficies mecanizadas de la aleación de titanio puede ser explicado por la interacción de varios factores como: la alta fricción y dificultades para la formación inicial de la viruta en el maquinado tipo *oblique-plunge-push-up milling*, la alta resistencia a la tracción de esta aleación de titanio junto con su bajo módulo de elasticidad y sus características de endurecimiento e inestabilidad termo-plástica durante el proceso de maquinado.

La figura 13 muestra el defecto superficial (*smearred/adhered material*), presentado sobre la superficie, en el proceso de fresado de acabado con herramienta de punta esférica, en la obtención de prótesis maxilofacial (García, Osorio, Córdoba, 2016).

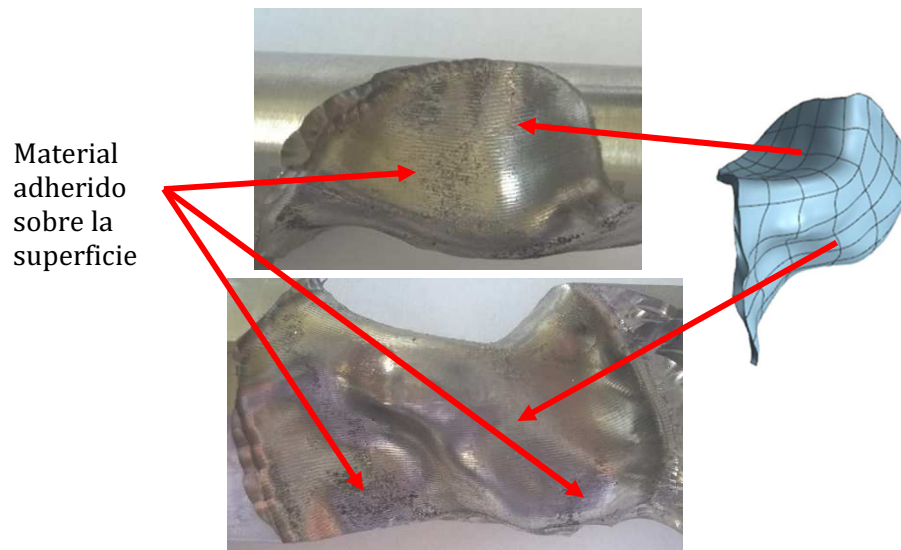


Fig. 13. Prótesis maxilofacial fabricada en la aleación de titanio Ti-6Al-4V. Defecto superficial en diferentes zonas de la superficie.

El defecto ilustrado anteriormente se presentó en el proceso de fresado de acabado, con herramientas de punta esférica de ocho milímetros de diámetro, sobre superficies con una curvatura diferente de cero. Las preguntas de investigación que surgen en el presente proyecto son:

¿El defecto de material adherido a la superficie maquinada también se presenta a escalas micro, cuando las herramientas tienen un diámetro inferior a las 1000 micras, la velocidad de rotación de las herramientas superan las 20.000 rpm y los avances por filo de corte está en el orden de una a cinco micras?

¿Cómo implementar estrategias de maquinado y posiciones de la herramienta, que favorezcan la calidad superficial del producto fabricado, en máquinas industriales de control numérico, para la obtención de piezas con geometrías complejas?

4.5 Montaje experimental

Con el objeto de determinar si el defecto superficial (*smearred/adhered material*) se presenta en procesos de micromaquinado, se propone realizar un ensayo experimental como el ilustrado en la figura 14. Dónde variando únicamente el ángulo *lead* y la dirección del paso lateral, con el propósito de obtener un proceso de formación de viruta concordante en un caso y un proceso de formación de viruta discordante en el otro, se pueda observar por medio de instrumental óptico las variaciones en el acabado superficial de la pieza y si se presenta el defecto mencionado en la presente investigación.

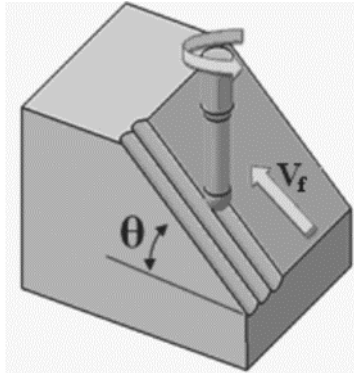


Fig. 14. Propuesta de montaje experimental para micromaquinado (Daymi et al, 2009)

Lo anterior, es factible lograrlo, montando las micro-herramientas mostradas en la figura 4, en el mini-husillo de alta velocidad, adquirido con los rubros del presente proyecto e ilustrado a la izquierda de la figura 15. Tanto mini-husillo, como micro-herramientas, se montarán en el centro de mecanizado Finetech GTX-210, del laboratorio de manufactura multieje de la universidad Santo Tomás.



Fig. 15. Equipos adquiridos con los rubros del proyecto. Izquierda, Mini-husillo de alta precisión. Derecha, Controlador y cables.



5 PRODUCTOS DERIVADOS DEL PROYECTO.

La siguiente tabla muestra los productos derivados del trabajo conjunto de los proyectos: “Desarrollo de un dispositivo de anclaje temporal (DAT), para ortodoncia, en función de sus características geométricas y la densidad ósea del maxilar” e “Implementación de operaciones tecnológicas de micro-fresado y micro-taladrado para la fabricación de componentes en la industria médica” dirigido por los profesores Oscar Rodrigo López Vaca y Jorge Andrés García Barbosa.

Tipo de producto	Nombre de producto	Fecha de revisión, publicación o presentación.	Nombre de la revista/libro o evento en que se presenta el producto.	Modo de verificación	Número de anexo
Artículo	The manufacture of a maxillofacial prosthesis from an axial tomography using simulation technologies with a virtual machine tool and four-axis machining	04/2016	Revista DYNA	ISSN 2346-2183 http://dyna.unalmed.edu.co/en/ediciones/196/articulos/v83n196a14/v83n196a14.pdf	Anexo 1
Ponencia	Effect of mini-implants geometry and bone density on the primary stability of temporally orthodontic anchorage. A 3D finite element analysis	05/2016	2016 convergence ESSS conference & ANSYS users meeting	http://www.esss.com.br/events/ansys2016/colombia/index.php#section-3	Anexo 2
Trabajo de grado	Comparación de traba mecánica y deformación ósea en nichos para mini-implantes en costilla de cerdo con dos tipos de fresa	08/2016	Trabajo de tesis para optar al título de especialista en ortodoncia y ortopedia maxilar – trabajo que recibió mención de honor (En convenio con UNICOC)	Actas comité de investigación	Anexo 3
Artículo	Influence of tool inclination on chip formation process and roughness response in ball-end milling of free-form surfaces on Ti6Al4V alloy	01/2017	Machining Science and Technology	ISSN 1532-2483 http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10910344.2016.1260434	Anexo 4
Ponencia	Determinación de la estabilidad primaria en mini-implantes en función de su geometría y la calidad del hueso maxilar	04/2017	CIMM 2017 Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica (Medellin – Colombia)	Memorias del evento	Anexo 5
Ponencia	Implementación del proceso de manufactura flexible en la fabricación de un mini-implante para ortodoncia	04/2017	CIMM 2017 Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica	Memorias del evento	Anexo 6
Reconocimiento especial	Determinación de la estabilidad primaria en mini-implantes en función de su geometría y la calidad del hueso del maxilar	04/2017	CIMM 2017 Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica	Capítulo de libro	Anexo 7



6 DIFICULTADES ENFRENTADAS EN LA REALIZACIÓN DEL PROYECTO.

- No existe un procedimiento definido y claro para la elaboración de un contrato para compra de equipos. El proceso de compra de un equipo llevó cerca de cuatro meses y realizar seguimiento al mismo consumió mucho tiempo. El oficio de seguimiento fue realizado por los investigadores del proyecto.
- No existe un procedimiento para compra de consumibles en el exterior. Se perdieron varios meses en la compra de la aleación de titanio Ti-6Al-4V, puesto que no se cuenta con mecanismos para la importación y el pago a empresas en el exterior. Se abortó la iniciar operación. Las pruebas experimentales se realizaron sobre acero inoxidable 304.
- No existe un procedimiento de laboratorio, ni espacio físico, para almacenar los equipos adquiridos por medio de los proyectos de investigación.
- Se requieren equipos de alta capacidad de cómputo en la universidad y de fácil acceso para los docentes y estudiantes para realizar procesos de diseño y manufactura avanzada.
- Se requiere una licencia para investigación del software ANSYS, puesto que actualmente solo se cuenta con licencias de uso académico, que limitan la capacidad de los procesos de diseño.

7 Proyección de productos.

Tipo de producto	Nombre de producto	Fecha de revisión, publicación o presentación.	Nombre de la revista/libro o evento en que se presenta el producto.	Modo de verificación	Número de anexo
Trabajo de grado de pregrado	Implementación del proceso de manufactura flexible de un dispositivo de anclaje temporal (DAT) en la aleación de titanio Ti-6Al-4V	07/2017	Trabajo de grado de pregrado para optar al título de Ingeniero Mecánico	Comité de trabajos de grado de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la USTA	
Trabajo de grado	Efecto de la geometría de los mini-implantes y la densidad del hueso mandibular en la estabilidad primaria de los dispositivos ortodónticos de anclaje temporal	07/2017	Trabajo de grado de pregrado para optar al título de Ingeniero Mecánico	Comité de trabajos de grado de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la USTA	
Ponencia	Análisis por elementos finitos del efecto de las propiedades geométricas y las condiciones biológicas de hueso maxilar en la estabilidad primaria de MI ortodónticos.	07/2017	CMN 2017 Congreso de métodos numéricos en ingeniería (Valencia-España)		



8 INFORME ADMINISTRATIVO

Se ejecutaron \$31,906,384 pesos de \$32,900,000 pesos aprobados en la convocatoria, discriminados de la siguiente manera:

RUBROS FINANCIABLES	Monto aprobado FODEIN	Valor ejecutado	Fecha de solicitud	Fecha de recepción del recurso solicitado
Auxilio a investigadores	\$ 2,000,000	\$ 2,000,000	09/06/2016	06/03/2017
Equipos	\$ 26,390,800	\$ 26,390,800	06/07/2016	24/10/2016
Software				
Materiales	\$ 1,109,200	\$1,059,544	15/11/2017	05/12/2016
Papelería				
Fotocopias				
Salidas de campo				
Material bibliográfico				
Servicios técnicos				
Movilidad académica	\$ 2,000,000	\$2,056,140	06/11/2017	26/04/2017
Imprevistos				
Publicaciones y patentes	\$ 1,000,000			
Pares Académicos	\$ 400,000	\$ 400,000	2015	2015
TOTAL	\$ 32,900,000	\$ 31,906,384		

- \$400.000 ejecutados en 2015. Que corresponden al valor asignado por la USTA para los pares evaluadores del proyecto.
- Se realizó contrato al auxiliar de investigación Juan David Ramírez Vásquez. Estudiante de la facultad de Ingeniería Mecánica e identificado con C.C. 1018481279 por valor de \$2.000.000.
- Se realizó contrato para compra de husillo de alta precisión con acople de cono BT-40 del fabricante japonés NSK, referencia HES810-BT40 con la empresa Movitec Avanzada SAS, por valor de \$26.390.800. El cual fue entregado el 24 de octubre de 2016.
- Se solicitó congelación de los rubros de movilidad académica (\$2.000.000), destinados a la participación en congreso internacional de ingeniería mecánica en abril de 2017. Se ejecutaron (\$2.056.140)
- No se ejecutó el rubro Publicaciones y patentes (\$1.000.000)
- Se dejaron de ejecutar \$49,656 pesos del rubro de materiales.
- El 19 de agosto de 2016 se solicitó cambio de rubro, según oficio dirigido a la oficina de presupuesto. La siguiente tabla muestra el presupuesto aprobado inicialmente:



Rubros	FODEIN	Contrapartida Programa	Total
Personal		\$ 20,800,000	\$ 20,800,000
Equipos	\$ 26,500,000		\$ 26,500,000
Materiales	\$ 1,000,000		\$ 1,000,000
Auxilio a investigadores	\$ 3,000,000		\$ 3,000,000
Publicaciones y patentes	\$ 1,000,000		\$ 1,000,000
Movilidad académica	\$ 1,000,000		\$ 1,000,000
Pares Académicos	\$ 400,000		\$ 400,000
TOTAL	\$ 32,900,000	\$ 20,800,000	\$ 53,700,000

9 CONCLUSIONES

Se potencializan las capacidades de investigación en el área de Procesos de Manufactura de la facultad de Ingeniería Mecánica. La adquisición del mini-husillo de alta velocidad permitirá ofrecer nuevas temáticas de formación en el área de micro-maquinado y micro-taladrado, que son de suma importancia para el desarrollo de productos de dimensiones en la escala de micras.

Se destaca el trabajo conjunto de dos proyectos FODEIN, que conllevan a la integración de las áreas de diseño y manufactura de la ingeniería mecánica, aplicada al desarrollo de producto y proceso de componentes para el sector médico. Se realizó un trabajo importante con el Colegio Odontológico Colombiano y se ejecutó la codirección de trabajo de grado de especialidad médica (equivalente a trabajo de maestría). Se fortalece así la línea de diseño mecánico en el área biomecánica y se complementa con el área de procesos de manufactura, que como resultado genera productos de alto valor agregado. Se hace énfasis en que los equipos adquiridos, fortalecen la infraestructura de investigación de la Facultad.

Como principales resultados se resaltan la publicación de un artículo de investigación en la revista DYNA (ISSN 2346-2183) (Cuartil 2) denominado "The manufacture of a maxillofacial prosthesis from an axial tomography using simulation technologies with a virtual machine tool and four-axis machining" y el artículo publicado en la revista Machining Science and Technology (ISSN 1532-2483) (Cuartil 1) denominado "Influence of tool inclination on chip formation process and roughness response in ball-end milling of free-form surfaces on Ti6Al4V alloy". Además, se formuló trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico del auxiliar de investigación Juan David Ramírez Vásquez. Se participó en el Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica CIMM-2017, en modalidad de poster, con el trabajo titulado "Implementación del proceso de manufactura flexible en la fabricación de un mini-implante para ortodoncia".



10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bouzakis, K., Aichouh, P., Efstathiou, K., Determination of the chip geometry , cutting force and roughness in free form surfaces finishing milling , with ball end tools, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43 pp. 499–514, 2003. [http://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00265-1](http://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00265-1)
- Chae, J., Park, S. S., & Freiheit, T. (2006). Investigation of micro-cutting operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(3-4), 313–332. <http://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.015>
- García-barbosa, J.A., Arroyo-osorio, J.M., Córdoba-nieto, E., The manufacture of a maxillofacial prosthesis from an axial tomography using simulation technologies with a virtual machine tool and four-axis machining, *DYNA*, 83 (196), pp. 100–105, 2016. <http://doi.org/10.15446/dyna.v83n196.49662>.
- García-barbosa, J.A., Arroyo-osorio, J.M., Córdoba-nieto, E., Influence of tool inclination on chip formation process and roughness response in ball-end milling of freeform surfaces on Ti-6Al-4V alloy on Ti-6Al-4V alloy, *Machining Science and Technology*, 0344 (January), pp. 121–135, 2017. <http://doi.org/10.1080/10910344.2016.1260434>.
- Daymi, A., Boujelbene, M., Linares, J.M., Bayraktar, E., Ben Amara, A., Influence of workpiece inclination angle on the surface roughness in ball end milling of the titanium alloy Ti-6Al-4V, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 35 (1), pp. 79–86, 2009
- Kiswanto, G., Zariatin, D. L., & Ko, T. J. (2014). The effect of spindle speed, feed-rate and machining time to the surface roughness and burr formation of Aluminum Alloy 1100 in micro-milling operation. *Journal of Manufacturing Processes*, 16, 435–450. <http://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.05.003>
- Liow, J. L. (2009). Mechanical micromachining: a sustainable micro-device manufacturing approach? *Journal of Cleaner Production*, 17(7), 662–667. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.11.012>
- Qin, Y. (2010). Overview of micro-manufacturing. *Micro-Manufacturing Engineering and Technology* (First Edit). Elsevier Ltd. <http://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1545-6.00001-6>
- Razali, A. R., & Qin, Y. (2013). A review on micro-manufacturing, micro-forming and their key issues. *Procedia Engineering*, 53, 665–672. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.086>
- Sun, X., & Cheng, K. (2010). Micro-/nano-machining through mechanical cutting. *Micro-Manufacturing Engineering and Technology* (First Edit). Elsevier Ltd. <http://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1545-6.00002-8>



ANEXOS

ANEXO 1



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



The manufacture of a maxillofacial prosthesis from an axial tomography using simulation technologies with a virtual machine tool and four-axis machining

Jorge Andrés García-Barbosa ^a José Manuel Arroyo-Osorio ^b & Ernesto Córdoba-Nieto ^c

^a *Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia. jorgegarcia@usantotomas.edu.co*

^b *Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. jmarroyoo@unal.edu.co*

^c *Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. ecorcoban@unal.edu.co*

Received: March 16th, 2015. Received in revised form: November 19th, 2015. Accepted: February 10th, 2016.



ANEXO 2

2016 CONVERGENCE
 ESSS Conference & ANSYS Users Meeting

Universidad Santo Tomás
 Bogotá - Colombia
 18 y 19 de Mayo de 2016

CERTIFICADO DE PARTICIPACIÓN

Certificamos que
JOHN ALEXANDER ZAMBRANO
 participó del
2016 ESSS CONFERENCE & ANSYS USERS MEETING
 evento realizado los días 18 y 19 de mayo de 2016 .

Bogotá, 19 de Mayo de 2016

Clovis Maliska Jr.
 Presidente, ESSS

BRASIL
 São Paulo
 10 a 12 de Mayo

ANDINO
 Lima
 16 y 17 de Mayo

CHILE
 Santiago
 16 y 17 de Mayo

ARGENTINA
 Buenos Aires
 18 y 19 de Mayo

COLOMBIA
 Bogotá
 18 y 19 de Mayo

2016 CONVERGENCE
 ESSS Conference & ANSYS Users Meeting

Universidad Santo Tomás
 Bogotá - Colombia
 18 y 19 de Mayo de 2016

CERTIFICADO DE PARTICIPACIÓN

Certificamos que
RODRIGO LÓPEZ VACA
 participó del
2016 ESSS CONFERENCE & ANSYS USERS MEETING
 evento realizado los días 18 y 19 de mayo de 2016 .

Bogotá, 19 de Mayo de 2016

Clovis Maliska Jr.
 Presidente, ESSS

BRASIL
 São Paulo
 10 a 12 de Mayo

ANDINO
 Lima
 16 y 17 de Mayo

CHILE
 Santiago
 16 y 17 de Mayo

ARGENTINA
 Buenos Aires
 18 y 19 de Mayo

COLOMBIA
 Bogotá
 18 y 19 de Mayo



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

ANEXO 3



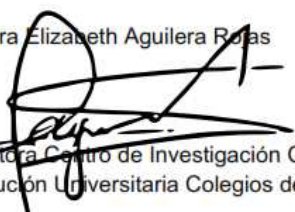
Bogotá, 21 de marzo de 2017

LA DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN DEL COLEGIO ODONTOLÓGICO
UNICOC

CERTIFICA

Que el Ingeniero **OSCAR RODRIGO LÓPEZ VACA**, identificado con CC. 3203232 de Bogotá, se desempeñó como Asesor Científico del siguiente trabajo de investigación: "Comparación de traba mecánica y deformación ósea en nichos para mini-implantes en costilla de cerdo con dos tipos de fresa." Este fue realizado con las doctoras Natalia Giovana Cabrera Betancourt, Kriss Alejandra Cortés Mosquera residentes del Postgrado de Ortodoncia y la Dra. Liliana directora del Postgrado; en el año 2016.

Sandra Elizabeth Aguilera Rojas


Directora Centro de Investigación Colegio Odontológico
Institución Universitaria Colegios de Colombia



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



ANEXO 4

MACHINING SCIENCE AND TECHNOLOGY
2017, VOL. 21, NO. 1, 121–135
<http://dx.doi.org/10.1080/10910344.2016.1260434>



Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

Influence of tool inclination on chip formation process and roughness response in ball-end milling of freeform surfaces on Ti-6Al-4V alloy

Jorge Andrés García-Barbosa ^a, José Manuel Arroyo-Osorio ^b,
and Ernesto Córdoba-Nieto ^b

^aFacultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Santo Tomás (Colombia), Bogotá, Colombia;

^bDepartamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia



ANEXO 5



DETERMINACIÓN DE LA ESTABILIDAD PRIMARIA EN MINI-IMPLANTES EN FUNCIÓN DE SU GEOMETRÍA Y LA CALIDAD DEL HUESO MAXILAR.

John Zambrano (1), Rodrigo López (2), Juan Ramírez (3), Jorge García (4) Liliana Jara (5)

1-4. Universidad Santo Tomás, Colombia

5- Institución universitaria colegios de Colombia - UNICOC

Área Temática: Biomecánica

ANEXO 6



IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE MANUFACTURA FLEXIBLE EN LA FABRICACIÓN DE UN MINI-IMPLANTE PARA ORTODONCIA

Juan David Ramírez Vásquez (1), John Alexander Zambrano Pulido (1),
Oscar Rodrigo López Vaca (1), Jorge Andrés García Barbosa (1)

1. Universidad Santo Tomás, Colombia

Núcleo Temático: Materiales y Procesos.



ANEXO 7



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Unidad de Educación Continua y Permanente
Facultad de Ingeniería
Sede Bogotá

CERTIFICA QUE

El trabajo titulado “*Determinación de la Estabilidad Primaria en Mini-Implantes en Función de su Geometría y la Calidad del Hueso Maxilar*”

Obtuvo el reconocimiento especial como el Artículo Extenso con la MEJOR CALIFICACIÓN del:

VIII Congreso Internacional de Ingenierías Mecánica y Mecatrónica y VI de Materiales, Energía y Medio Ambiente.

Realizado del 26 al 28 de Abril de 2017 en la ciudad de Medellín con una intensidad de 24 horas

Dado en Medellín, el día 28 abril de 2017

Luis Eduardo Benítez
Presidente Comité Organizador