



**Manufactura de alto rendimiento con estrategias de fresado trocoidal**

Orellana Jarrín, Mario Orlando

Departamento de Ciencias de la Energía Y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica”

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Ing. Culqui Culqui, Borys Hernán Msc.

13 de septiembre del 2021

9/9/21 15:19

Revisión Tesis

## Informe de originalidad

NOMBRE DEL CURSO

MIC-PI PROFESIONALIZANTE

DOCENTE TUTOR

NOMBRE DEL ALUMNO

Mario Orlando Orellana Jarrin

NOMBRE DEL ARCHIVO

Mario Orlando Orellana Jarrin - Revisión Tesis

Ing. Borys Culqui C.

9 sept 2021

SE HA CREADO EL INFORME

9 sept 2021

### Resumen

Fragmentos marcados	21	3 %
Fragmentos citados o entrecomillados	13	2 %
Coincidencias de la Web		
espe.edu.ec	16	2 %
docplayer.es	9	1 %
1library.co	3	0,6 %
unc.edu.ar	2	0,3 %
researchgate.net	2	0,2 %
weebly.com	1	0,2 %
mastercut.com.mx	1	0,1 %

1 de 34 fragmentos

Fragmento del alumno MARCADO

**fue realizado por el señor ORELLANA JARRÍN MARIO ORLANDO el mismo que ha sido realizado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple...**

Mejor coincidencia en la Web

**fue realizado por el señor OSORIO GARCIA, ROBERTO VICENTE, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple...**

vicerectorado de investigación, innovación y transferencia de ... <https://docplayer.es/147000293-Vicerectorado-de-investigacion-innovacion-y-transferencia-de-tecnologia.html>

2 de 34 fragmentos

<https://classroom.google.com/u/0/g/g/Mzg5MjE3Mzg1ODE2Mzg5NDc2OTMzNDcw#u=OTExNzgxNDY3MTNa&t=f>

1/10



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECANICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “**Manufactura de alto rendimiento con estrategias de fresado trocoidal**” fue realizado por el señor **Orellana Jarrín, Mario Orlando** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 8 de septiembre de 2021

Firma:

**Ing. Culqui Culqui, Borys Hernán. Msc**

C. C.: 171447108-1



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Yo, **Orellana Jarrín, Mario Orlando**, con cédula de ciudadanía n° 172461572- 7, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Manufactura de alto rendimiento con estrategias de fresado trocoidal** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Sangolquí, 8 de septiembre de 2021**

Firma

**Orellana Jarrín, Mario Orlando**

C.C.: 172461572- 7





**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo **Orellana Jarrín, Mario Orlando**, con cédula de ciudadanía n°172461572- 7, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Título:** Manufactura de alto rendimiento con estrategias de fresado trocoidal en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

**Sangolquí, 8 de septiembre de 2021**

Firma

**Orellana Jarrín, Mario Orlando**

C.C.: 172461572- 7

### **Dedicatoria**

A mi madre, que con su apoyo incondicional me ha enseñado a no rendirme en la vida tanto de forma personal como académica, quién ha sido testigo del esfuerzo y dedicación en todo el trayecto de la carrera, a mis hermanos que me han acompañado y brindado su ayuda en cada proyecto de la carrera.

A mi novia, que con su optimismo me ha dado esa seguridad, tranquilidad y estabilidad emocional en los momentos difíciles, para poder conseguir cada meta propuesta en mi vida.

Mario Orlando Orellana Jarrín

### **Agradecimiento**

Agradezco a Dios por la vida que tengo, a mi madre, a mis hermanos y a mi novia que estuvieron a mi lado en momentos buenos y difíciles, apoyándome durante la vida estudiantil.

Agradezco al Ing. Borys Culqui por su ayuda, consejos y experiencia compartida, por darme la oportunidad y la confianza para desarrollar un proyecto en el ámbito de la manufactura asistida por computador que siempre me ha gustado.

A mis amigos que han estado presentes en la carrera con los que he compartido muchas experiencias.

Mario Orlando Orellana Jarrín

## Índice de contenidos

<b><i>Informe de originalidad</i></b> .....	<b>2</b>
<b><i>Certificación</i></b> .....	<b>3</b>
<b><i>Responsabilidad de autoría</i></b> .....	<b>4</b>
<b><i>Autorización de publicación</i></b> .....	<b>5</b>
<b><i>Dedicatoria</i></b> .....	<b>6</b>
<b><i>Agradecimiento</i></b> .....	<b>7</b>
<b><i>Índice de contenidos</i></b> .....	<b>8</b>
<b><i>Índice de tablas</i></b> .....	<b>11</b>
<b><i>Índice de figuras</i></b> .....	<b>12</b>
<b><i>Resumen</i></b> .....	<b>14</b>
<b><i>Abstract</i></b> .....	<b>15</b>
<b><i>Capítulo 1</i></b> .....	<b>16</b>
<b><i>Generalidades</i></b> .....	<b>16</b>
<b><i>Antecedentes</i></b> .....	<b>16</b>
<b><i>Hipótesis</i></b> .....	<b>17</b>
<b><i>Objetivos</i></b> .....	<b>17</b>
Objetivo General .....	17
Objetivos específicos .....	17
<b><i>Alcance</i></b> .....	<b>17</b>
<b><i>Justificación e Importancia</i></b> .....	<b>18</b>
<b><i>Capítulo 2</i></b> .....	<b>20</b>
<b><i>Estado de conocimiento</i></b> .....	<b>20</b>
<b><i>Materiales para mecanizado</i></b> .....	<b>20</b>
Aluminio.....	20
Aleaciones de aluminio.....	20
Características del aluminio Prodax .....	21
Velocidad de corte y avance para el aluminio Prodax .....	23
Aplicaciones del aluminio Prodax .....	25
<b><i>Fresado</i></b> .....	<b>26</b>
Factores que influyen en el mecanizado .....	27
Estudio de las herramientas de corte del fresado .....	29
Material de la herramienta de corte .....	30



Tipo de fresas .....	31
Normas de seguridad para el fresado .....	31
<b>Parámetros de mecanizado en el fresado.....</b>	<b>32</b>
Avance por diente .....	32
Velocidad avance.....	33
Velocidad de corte .....	33
Taza de remoción de material .....	34
Potencia de corte .....	34
Profundidad de corte axial y radial .....	35
<b>Mecanizado de alto rendimiento .....</b>	<b>35</b>
Características del mecanizado de alto rendimiento.....	37
<b>Sustentabilidad del mecanizado de alto rendimiento .....</b>	<b>38</b>
Mecanizado en seco o Dry Machining.....	38
Mecanizado asistido con aire comprimido.....	38
<b>Mecanizado convencional .....</b>	<b>39</b>
Características del mecanizado convencional .....	40
<b>Estrategias CAM.....</b>	<b>40</b>
Estrategia de desbaste .....	40
<b>Mecanizado trocoidal.....</b>	<b>41</b>
Características de mecanizado trocoidal.....	42
Estrategia trocoidal .....	42
Trayectoria trocoidal .....	42
<b>Metodología Taguchi .....</b>	<b>43</b>
Ventajas y limitaciones del Método Taguchi.....	44
Aplicación del Método Taguchi.....	45
<b>Capítulo 3.....</b>	<b>47</b>
<b>Desarrollo del experimento.....</b>	<b>47</b>
<b>Equipo de trabajo .....</b>	<b>47</b>
Maquinaria.....	47
Equipo de medición de temperatura .....	48
<b>Herramienta de corte.....</b>	<b>49</b>
Tipo de herramienta.....	49
<b>Pieza de trabajo .....</b>	<b>50</b>
<b>Parámetros de corte .....</b>	<b>51</b>
<b>Metodología Taguchi .....</b>	<b>52</b>
<b>Ejemplo de cálculo .....</b>	<b>53</b>
<b>Modelo CAD .....</b>	<b>55</b>
<b>Ensayo con la estrategia de mecanizado convencional .....</b>	<b>56</b>
Descripción de la estrategia de mecanizado convencional.....	56
Trayectoria de mecanizado convencional .....	57
Simulación CAM .....	57
<b>Ensayo con la estrategia de mecanizado trocoidal.....</b>	<b>60</b>

Estrategias de mecanizado trocoidal .....	60
Trayectoria de mecanizado trocoidal .....	60
Simulación CAM .....	61
<b>Mecanizado de probetas .....</b>	<b>63</b>
<b>Análisis ANOVA.....</b>	<b>65</b>
Suma de cuadrados .....	66
Varianza .....	66
Error de la varianza.....	66
Prueba F .....	66
Prueba de hipótesis.....	67
Ejemplo de cálculo .....	67
<b>Capítulo 4.....</b>	<b>70</b>
<b>Análisis de resultados .....</b>	<b>70</b>
<b>Resultados del experimento .....</b>	<b>70</b>
<b>Resultado de tiempo de mecanizado por estrategia .....</b>	<b>71</b>
Estrategia de mecanizado convencional .....	71
Estrategia de mecanizado trocoidal .....	74
Comparación de tiempo de mecanizado de las estrategias.....	76
<b>Resultados de temperatura por estrategia.....</b>	<b>79</b>
Mecanizado convencional .....	79
Mecanizado trocoidal .....	80
Comparación de temperatura de las estrategias.....	81
<b>Resultados con la metodología ANOVA para el tiempo .....</b>	<b>82</b>
<b>Resultados con la metodología Anova para la temperatura.....</b>	<b>87</b>
<b>Resultados de las estrategias.....</b>	<b>92</b>
<b>Ensayos de confirmación.....</b>	<b>92</b>
<b>Consolidado de datos.....</b>	<b>94</b>
<b>Capítulo 5.....</b>	<b>99</b>
<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>99</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>99</b>
<b>Recomendaciones.....</b>	<b>100</b>
<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>102</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Propiedades físicas del aluminio Prodax .....	22
<b>Tabla 2</b> Propiedades mecánicas .....	22
<b>Tabla 3</b> Velocidades y avances en planeado en aleaciones ferrosas y no ferrosas para HSS .....	23
<b>Tabla 4</b> Velocidades y avances slab milling en aleaciones ferrosas y no ferrosas para HSS .....	24
<b>Tabla 5</b> Velocidades y avances para acabados en aleaciones ferrosas y no ferrosas para HSS ....	24
<b>Tabla 6</b> Aplicación del aluminio Prodax .....	26
<b>Tabla 7.</b> Tipo de mecanizado por su velocidad de corte .....	36
<b>Tabla 8</b> Arreglo ortogonal del método Taguchi .....	46
<b>Tabla 9</b> Características técnicas .....	47
<b>Tabla 10</b> Especificaciones técnicas del pirómetro.....	48
<b>Tabla 11</b> Características geométricas de la Fresa .....	50
<b>Tabla 12</b> Parámetros de corte recomendados por el fabricante de la herramienta de corte .....	51
<b>Tabla 13</b> Parámetros de corte del experimento .....	51
<b>Tabla 14</b> Parámetros y niveles del experimento .....	52
<b>Tabla 15</b> Arreglo ortogonal .....	53
<b>Tabla 16</b> Parámetros de corte para el mecanizado.....	64
<b>Tabla 17</b> Terminología ANOVA .....	65
<b>Tabla 18</b> Datos del experimento .....	70
<b>Tabla 19</b> Porcentaje de error en la estrategia de mecanizado convencional .....	73
<b>Tabla 20</b> Porcentaje de error en la estrategia de mecanizado trocoidal.....	75
<b>Tabla 21</b> Porcentaje de reducción de tiempo con estrategia trocoidal.....	78
<b>Tabla 22</b> Resumen del análisis de varianza para el tiempo .....	83
<b>Tabla 23</b> Influencia de los parámetros de mecanizado .....	84
<b>Tabla 24</b> Parámetros óptimos para una temperatura estable .....	85
<b>Tabla 25</b> Intervalos de confianza .....	87
<b>Tabla 26</b> Valores del modelo matemático y confirmación con los valores de la experimentación .....	87
<b>Tabla 27</b> Resumen análisis de varianza .....	88
<b>Tabla 28</b> Influencia de los parámetros de mecanizado .....	89
<b>Tabla 29</b> Intervalos de confianza .....	91
<b>Tabla 30</b> Valores del modelo matemático y confirmación con los valores de la experimentación .....	91
<b>Tabla 31</b> Parámetros óptimos de mecanizado .....	92
<b>Tabla 32</b> Ensayos de confirmación.....	93
<b>Tabla 33</b> Consolidado de datos .....	94

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Proceso de Fresado .....	26
<b>Figura 2</b> Operaciones de fresado .....	28
<b>Figura 3</b> Partes y nomenclatura de la fresa.....	29
<b>Figura 4</b> Dureza de los materiales de las herramientas de corte .....	30
<b>Figura 5</b> Parámetros Básicos .....	32
<b>Figura 6</b> Velocidad de avance y avance por diente .....	33
<b>Figura 7</b> Profundidad de corte axial y corte radial .....	35
<b>Figura 8</b> Curvas de temperatura de viruta según la velocidad de corte [m/min] y el tipo de material mecanizado.....	36
<b>Figura 9</b> Mecanizado de alto rendimiento .....	37
<b>Figura 10</b> Mecanizado convencional.....	39
<b>Figura 11</b> Estrategia fresado pocket 2D, número de pasadas por profundidad .....	41
<b>Figura 12</b> Fresado Trocoidal.....	41
<b>Figura 13</b> Trayectoria Trocoidal .....	42
<b>Figura 14</b> Método Taguchi .....	44
<b>Figura 15</b> HISION CFV 1100.....	48
<b>Figura 16</b> Infrared Thermometer .....	49
<b>Figura 17</b> Fresa Somta de HSS.....	49
<b>Figura 18</b> Pieza de aluminio Produx .....	50
<b>Figura 19</b> Modelo CAD .....	56
<b>Figura 20</b> Generación de las pasadas en el eje Z.....	57
<b>Figura 21</b> Selección de la estrategia de desbaste.....	58
<b>Figura 22</b> Profundidades y ancho de corte de la estrategia convencional .....	59
<b>Figura 23</b> Generación de la trayectoria.....	59
<b>Figura 24</b> Simulación de la estrategia .....	60
<b>Figura 25</b> Selección de las estrategias adaptative milling .....	61
<b>Figura 26</b> Profundidades de corte axial y radial .....	62
<b>Figura 27</b> Trayectoria del mecanizado .....	62
<b>Figura 28</b> Simulación de mecanizado trocoidal.....	63
<b>Figura 29</b> Programación automática del cero pieza en Z y configuración para el mecanizado ....	65
<b>Figura 30</b> Velocidad de avance Vs tiempo de mecanizado convencional con Vc 800 [m/min] ....	72
<b>Figura 31</b> Velocidad de avance Vs Tiempo de mecanizado y de simulación con estrategia convencional.....	73
<b>Figura 32</b> Velocidad de avance Vs Tiempo de mecanizado trocoidal con Vc 800 [m/min] .....	74
<b>Figura 33</b> Velocidad de avance Vs Tiempo de mecanizado y de simulación con estrategia convencional.....	76
<b>Figura 34</b> Reducción del tiempo de mecanizado de la estrategia trocoidal .....	77
<b>Figura 35</b> Reducción del tiempo de mecanizado .....	79
<b>Figura 36</b> Velocidad de corte Vs temperatura de mecanizado convencional .....	80
<b>Figura 37</b> Velocidad de corte Vs. Temperatura de mecanizado trocoidal.....	81
<b>Figura 38</b> Comparación de temperatura entre estrategias.....	82
<b>Figura 39</b> Gráfica de distribución de probabilidad F para la estrategia y para Vc y Fz respectivamente .....	84
<b>Figura 40</b> Parámetro de mayor influencia en el mecanizado .....	85
<b>Figura 41</b> Interacción del tiempo respecto a la estrategia y velocidad de corte .....	86
<b>Figura 42</b> Gráficos de distribución F crítico .....	89

<b>Figura 43</b> Tendencia de la temperatura en cada estrategia de mecanizado .....	90
<b>Figura 44</b> Interacción de la temperatura respecto a la estrategia y velocidad de corte .....	90
<b>Figura 45</b> Ensayos de confirmación con los parámetros de la tabla 32 .....	93
<b>Figura 46</b> Tiempo de ciclo .....	93
<b>Figura 47</b> Tiempo de mecanizado convencional consolidado .....	97
<b>Figura 48</b> Tiempo de mecanizado trocoidal consolidado .....	98

## Resumen

A la par con el avance tecnológico, los procesos de manufactura se han visto en constante innovación esperando reducir el tiempo de manufactura, prolongar la vida útil de las herramientas y ofertar gran calidad en los acabados del producto, sin embargo, escasea la información sobre el mecanizado en aluminio 7075 – T6 mismo que por sus propiedades mecánicas es más usado para la fabricación de moldes y matrices a diferencia de otros materiales. En el presente proyecto se estudia un mecanizado de alto rendimiento, mejorando los tiempos de ciclo mediante la comparación de estrategias de desbaste fresado trocoidal y convencional, sin el uso de refrigerantes que puedan contaminar la viruta permitiendo el reciclaje de material, dichas estrategias se encuentran en una gran parte de software CAM. La experimentación se realizó en un centro de mecanizado vertical Hision CFV 1100 con control Fanuc Oi MF, con el respaldo de la metodología Taguchi L18 para los parámetros de fresado y estrategia de desbaste. Se realizaron 9 ensayos por cada estrategia con una herramienta de corte plana de 25 mm con 4 labios de acero de alta velocidad (HSS) en base a los 3 niveles de los parámetros de fresado, en el rango de 800 m/min a 1000 m/min, con un avance por diente de 0.25 a 0.35 mm/diente. Los resultados obtenidos tanto del tiempo y de temperatura tienen un comportamiento descrito por la curva planteada por el Dr. Salomón para el mecanizado de alta velocidad (HSM), se realizó un análisis estadístico ANOVA que determinó que la estrategia de mecanizado trocoidal presenta una reducción del 93.27 % ante la estrategia de mecanizado convencional y una temperatura estable de 25°C en la herramienta de corte.

### Palabras claves:

- **MECANIZADO TROCoidal**
- **MECANIZADO CONVENCIONAL**
- **MECANIZADO DE ALTA VELOCIDAD**

### **Abstract**

Along with technological progress, manufacturing processes have been constantly innovated, hoping to reduce manufacturing time, extend the useful life of tools and offer high quality finishes of the product, however, information on the product is scarce. Machined in 7075 - T6 aluminum, which, due to its mechanical properties, is more used for the manufacture of molds and dies than other materials. In this project, a high-performance machining is studied, improving cycle times by comparing trochoidal and conventional milling roughing strategies, without the use of coolants that can contaminate the chip allowing the recycling of material, these strategies are found in a large part of CAM software. The experimentation was carried out in a Hision CFV 1100 vertical machining center with Fanuc Oi MF control, supported by the Taguchi L18 methodology for the milling parameters and roughing strategy. 9 tests were carried out for each strategy with a 25 mm flat cutting tool with 4 high speed steel (HSS) lips based on the 3 levels of the milling parameters, in the range of 800 m / min to 1000 m / min, with a feed per tooth of 0.25 to 0.35 mm / tooth. The results obtained for both time and temperature have a behavior described by Mr. Salomón for high-speed machining (HSM), an ANOVA statistical analysis was carried out that determined that the trochoidal machining strategy presents a reduction in the 93.27% compared to the conventional machining strategy and a stable temperature of 25°C in the cutting tool.

#### **Keywords:**

- **TROCHOIDAL MACHINING**
- **CONVENTIONAL MACHINING**
- **HIGH SPEED MACHINING**



## Capítulo 1

### Generalidades

#### Antecedentes

El mecanizado no es más que un conjunto de procesos industriales aplicados generalmente en metales, con la finalidad de obtener una pieza con las dimensiones y características deseadas (Sánchez Sola, Sebastián, Carrilero, González, & Marcos, 2005), sin embargo los avances tecnológicos han dado cabida al desarrollo de nuevas máquinas que con sus singulares características de fuerza de corte y lubricantes, han mejorado su precisión y acabados en tiempos considerables.

Actualmente se puede gozar de las virtudes de varias estrategias de mecanizados, un claro ejemplo es el mecanizado convencional, el cual ofrece menores profundidades de pasadas, logra buenas texturas en el acabado y posee gran precisión, sin embargo, requiere más energía, genera desperdicios y necesita mayor tiempo de producción (Infante, 2019).

Al citar, la estrategia de mecanizado trocoidal se elevan las ventajas, puesto que esta estrategia ha sido diseñada para aprovechar la herramienta generando un desgaste uniforme, proporcionando acabados de mayor calidad y empleando menor carga térmica (Kalpakjian & Schmind, 2008).

La incógnita suscitada radica en conocer la estrategia más oportuna para aprovechar el material de la pieza, lograr buenos acabados, alargar la vida útil de la herramienta y por supuesto reducir los tiempos de mecanizado.

Por tal motivo, se pretende realizar ensayos mecanizando piezas de aluminio 7075-T6 (prodax) a elevadas velocidades empleando el mecanizado convencional y trocoidal con el fin

determinar mediante comparación la existencia de la reducción de tiempo durante el desbaste de la pieza llegando al mecanizado de alto rendimiento.

### **Hipótesis**

La estrategia de mecanizado trocoidal en alta velocidad disminuye el tiempo de desbaste, así como también la temperatura en la herramienta de corte y del aluminio AA 7075-T6, en comparación al mecanizado convencional.

### **Objetivos**

#### ***Objetivo General***

Estudiar los procesos de mecanizado de alto rendimiento, para determinar la eficiencia de los procesos de desbaste con estrategias de mecanizado trocoidales.

#### ***Objetivos específicos***

- Definir los procesos de mecanizado de alto rendimiento.
- Estudiar la geometría y dinámica de las estrategias de mecanizado trocoidal.
- Determinar parámetros de corte y trayectorias de mecanizado en operaciones con estrategias de mecanizado convencional y trocoidal.
- Realizar los ensayos de fresado a fin de obtener tiempos de mecanizado, tanto en las operaciones con estrategias convencionales como trocoidales.
- Tabular y analizar los resultados experimentales y de simulación.

### **Alcance**

El presente proyecto se pretende desarrollar empleando mecanizado de alto rendimiento con estrategias de fresado trocoidal, en el centro de mecanizado HISION CFV 1100 con control Fanuc Oi MF, de 4 ejes con un área de trabajo de 1350 mm x 550 mm, con desplazamiento de 100 mm en el eje X, 540 mm en el eje Y, 520 mm en el eje Z, con una

velocidad máxima de 15000 rpm. Para lo cual, se usará el software CAD y CAM con el fin de realizar una pieza en 3D que servirá para su posterior mecanizado, del mismo modo, se elaborará la generación de la trayectoria y generación del código G, para su ulterior comparación entre ambas estrategias de mecanizado.

En cuanto al mecanizado, velocidad, avance y parámetros de corte, se pretende ejecutar con base a la bibliografía identificada con antelación. De tal manera se elaborará para el mecanizado convencional una profundidad de corte radial ( $A_e$ ) de 64% del diámetro de la herramienta, a diferencia de la estrategia de mecanizado trocoidal que su corte será con toda la altura de la herramienta y un ancho de corte ( $A_e$ ) de 10%. De la misma manera, las mediciones a realizar denotan del tiempo de simulación y tiempo real, realizados en HISION CFV 1100 con control Fanuc Oi MF dando lugar a la comparación de las diferentes estrategias de mecanizado a velocidades de 800[m/min], 900[m/min] y 1000[mm/min], llegando a realizar mecanizados de alto rendimiento el cual es amigable con el medio ambiente al no usarse fluidos de refrigeración y disminuir el consumo de energía de mecanizado, siendo la misma una zona donde no se ha experimentado ya que solo las máquinas nuevas poseen rango de velocidad elevadas. Con los resultados obtenidos se procederá a la comparación, se determinará la viabilidad, optimización de las estrategias de mecanizados trocoidal y convencional.

### **Justificación e Importancia**

En la actualidad una gran parte de la industria se dedica a la manufactura, es por ello que se busca mejorar los procesos de producción optimizando el tiempo y los recursos de cada proceso de la planta industrial. Con la innovación tecnológica se pretende aprovechar las máquinas de control numérico con la finalidad de aumentar la competitividad elaborando piezas con un mayor grado de complejidad.

En el sector industrial ecuatoriano las máquinas herramientas de control numérico se usan con el principal objetivo de disminuir el tiempo de mecanizado en la producción de lotes moderados y por la facilidad de configuración para cada producto. Con el estudio teórico de diseño asistido por computador (CAD) y la manufactura asistida por computador (CAM), sistemas flexibles y procesos de manufactura se complementan con la aplicación en la fabricación de productos con la meta de obtener buenos resultados en las tolerancias geométricas y acabado de la pieza.

En la presente investigación se amplía el estudio optimizado del mecanizado trocoidal llegando a un mecanizado de alto rendimiento en el proceso de fresado en una comparación del mecanizado convencional, por lo que se refiere al fresado de alto rendimiento la operación de desbaste logra remover grandes cantidades de material aprovechando la altura de la herramienta de corte, logra mantener estables las fuerzas que genera el contacto de la herramienta y en el material, lo que consigue prolongar la vida útil de la herramienta, mientras disminuye el tiempo de mecanizado, la temperatura de mecanizado, la energía consumida en el proceso, automáticamente se mejora los costos de fabricación, es amigable con el medio ambiente al no usar fluidos de corte y se puede reciclar la viruta de los procesos de mecanizado.

## Capítulo 2

### Estado de conocimiento

#### Materiales para mecanizado

##### *Aluminio*

El aluminio (Al) es el metal más abundante en la corteza terrestre, por encima del hierro, es un metal que se puede mecanizar sin mayor dificultad, posee una alta conductividad térmica y en cuanto a la eléctrica es buen conductor (como todos los metales ligeros exceptuando el titanio), además tiene una estructura cristalina cúbica centrada en las caras, así pues cuenta con un comportamiento no ferromagnético y resistencia a la oxidación y corrosión (Askeland & Wright, 2016).

La resistencia mecánica del aluminio se puede lograr por dos procesos que son acritud y por aleación, en los dos procesos se disminuye la resistencia que tiene a la corrosión. Entre los principales elementos de aleación son: el cobre (Cu), magnesio (Mg), silicio (Si), manganeso (Mn) y zinc (Zn) (Callister & Rethwisch, 2009).

Expertos afirman que el aluminio posee un excelente comportamiento ante la corrosión dado que en la presencia de oxígeno que se encuentra en el ambiente formando una capa de óxido estable, compacta y bien adherida a la superficie que protege a la pieza, también posee alta absorbancia y reflectancia. (Güemes & Martín, 2012).

##### *Aleaciones de aluminio*

Las aleaciones de aluminio pueden considerarse en dos grupos las cuales son: aleaciones forjadas y fundidas. Por un lado, las aleaciones de forja, es decir, las que se obtienen mediante la deformación plástica poseen composiciones y microestructuras diferentes a comparación de las aleaciones fundidas (Askeland & Wright, 2016).

Las aleaciones de aluminio son altamente usadas en la industria concretamente alrededor del 25% del aluminio que se produce en la actualidad es usado en el transporte, 25% en la manufactura de latas de bebida y otros envases, 15% en la construcción, 15% en las aplicaciones eléctricas y 20% en otras aplicaciones (Askeland & Wright, 2016).

Las aleaciones de aluminio se pueden encontrar en diferentes productos ya sea forjados o producto en bruto, mismos que se hallan en diferentes presentaciones como lo es la extracción, embutido, laminado y trefilado. Así mismo pueden ser tratadas térmicamente y en gran parte se logra efectuar su unión mediante el proceso de soldadura, al igual que se puede obtener maquinados sin presentar dificultad (Kalpakjian & Schmind, 2008).

Una de las aleaciones de aluminio por forja más común es el aluminio 7075, según la denominación Número XXX, el cual puede ser del 1 al 7 según su elemento de aleación, en el aluminio 7075, XXX se conoce que su elemento de aleación es el zinc, este posee una resistencia moderada a muy elevada siendo tratable térmicamente (Kalpakjian & Schmind, 2008).

#### ***Características del aluminio Prodax***

El elemento de aleación en el aluminio Prodax es el zinc, que actúa dando una mayor dureza y resistencia. El tratamiento térmico T6 que posee el material, en efecto es solubilizado y posterior envejecido con el fin de elevar su resistencia. Así pues, se entregan en barras redondas y placas, tratadas térmicamente las mismas que son sometidas a una operación especial de estiramiento en frío para el máximo alivio de tensiones, obteniendo alta resistencia y buena estabilidad (Uddeholm, 2020).

El aluminio Prodax es conocido por sus prestaciones para el mecanizado y excelentes acabados, bajo peso, alta conductividad térmica, buena estabilidad, resistencia a la corrosión y apropiado para tratamientos superficiales, lo cual lo hace ampliamente ideal en la industrial de

fabricación de moldes y matrices, a continuación, en la Tabla 1 se muestran las propiedades físicas del aluminio prodax (Uddeholm, 2020).

**Tabla 1**

*Propiedades físicas del aluminio Prodax*

<b>Propiedades Físicas</b>		
<b>Propiedad</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	2830
	lbs/in <sup>3</sup>	0.102
Módulo de elasticidad	N/mm <sup>2</sup>	71500
	Psi	10.3 x 10 <sup>6</sup>
Coeficiente de expansión térmica	20°C a 100°C	23 x 10 <sup>-6</sup>
	68°F a 212°F	12.8 x 10 <sup>-6</sup>
Conductividad térmica	W/m°C	165
	Btu in/pie°F	1144
Calor específico	J/Kg°C	890
	Btu/lb°F	0.2

*Nota.* Recuperado del catálogo de materiales (Uddeholm, 2020)

En cuanto a las propiedades mecánicas del aluminio Prodax se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Propiedades mecánicas*

<b>Propiedades mecánicas</b>		
Esfuerzo último de tensión	MPa	570
Dureza	HB	78
Límite de elasticidad	MPa	505
Resistencia última a la fractura	MPa	303
Módulo de elasticidad	GPa	10.4

*Nota:* Recuperado del handbook de (ASM International, 1995)



### ***Velocidad de corte y avance para el aluminio Produx***

Uno de los parámetros del mecanizado que afecta directamente en la vida útil de la herramienta que se utiliza para mecanizar es la velocidad de corte. Por consiguiente, las altas velocidades de corte provocan desgaste en el filo de la herramienta de corte. Los parámetros de mecanizado deben analizarse detalladamente para cada proceso de mecanizado (ASM International, 1995).

Es por ello que en la Tabla 3, se indican los parámetros adecuados para los procesos de planeados para el aluminio 7075, posteriormente en las Tablas 4 y 5 se muestran los parámetros para el proceso de desbaste y acabados.

**Tabla 3**

*Velocidades y avances en planeado en aleaciones ferrosas y no ferrosas para HSS*

Material	Dureza	Profundidad [mm]	Herramienta de corte de acero rápido		
			Velocidad de corte [m/min]	Avance por diente [mm]	Material de la herramienta ISO (AISI)
Aluminio 7075	30–80 [HB]	1	365	0.25	S4, S2(M2, M7)
		4	245	0.4	S4, S2(M2, M7)
		8	200	0.5	S4, S2(M2, M7)

*Nota:* Recuperado del handbook de (ASM International, 1995)

**Tabla 4**

*Velocidades y avances slab milling en aleaciones ferrosas y no ferrosas para HSS*

Material	Dureza	Profundidad [mm]	Herramienta de corte de acero rápido		
			Velocidad de corte [m/mm]	Avance por diente [mm]	Material de la herramienta ISO (AISI)
Aluminio 7075	30–80 [HB]	1	365	0.3	S4, S2(M2, M7)
		4	320	0.36	S4, S2(M2, M7)
		8	260	0.4	S4, S2(M2, M7)

*Nota:* Recuperado del handbook de (ASM International, 1995)

**Tabla 5**

*Velocidades y avances para acabados en aleaciones ferrosas y no ferrosas para HSS*

Material	Dureza	Profundidad de corte radial [mm]	Velocidad de corte [m/mm]	Herramienta de acero rápido				Material de la herramienta ISO (AISI)
				Avance mm/diente, respecto al diámetro de la herramienta (mm/diente)				
				10 mm	12 mm	18 mm	25 – 50 mm	
Aluminio 7075	30-80 [HB]	0.5	245	0.07 5	0.10 2	0.1 3	0.18	S4, S5, S2 (M2, M3, M7)
		1.5	185	0.10 2	0.15 0	0.2 0	0.25	S4, S5, S2 (M2, M3, M7)
		Diámetro/2	150	0.07 5	0.10 2	0.1 5	0.20	S4, S5, S2 (M2, M3, M7)

Material	Dureza	Profundidad de corte radial [mm]	Herramienta de acero rápido				Material de la herramienta a ISO (AISI)	
			Velocidad de corte [m/mm]	Avance mm/diente, respecto al diámetro de la herramienta(mm/diente)				
				10 mm	12 mm	18 m	25 – 50 mm m	
		Diámetro/4	120	0.05	0.07 5	0.1 3	0.15	S4, S5, S2 (M2, M3, M7)

*Nota:* Recuperado del handbook de (ASM International, 1995)

### ***Aplicaciones del aluminio Produx***

Las características y conjunto de propiedades que muestra el aluminio Produx lo hace ideal para moldes y prototipado en serie que estén expuestos a presiones elevadas y plásticos abrasivos.

El aluminio Produx cuenta con diversos beneficios, entre ellos se encuentran la disminución de tiempo y costo de las herramientas, además genera ciclos más cortos, visto que se denota ideal para las aplicaciones que se muestran en la Tabla 6 (Uddeholm, 2020).

**Tabla 6***Aplicación del aluminio Produx*

Áreas de aplicación	Categoría del herramental			
	Prototipos	Series cortas	Series Medianas	Series Largas
Moldes de soplado	X	X	X	X
Formado al vacío	X	X	X	X
Moldeado de espuma	X	X	X	X
Moldes	X	X	X	X
Moldes de inyección de termoplásticos	X	X	X	
Moldeo de goma	X	X		

*Nota:* Recuperado del catálogo de materiales de (Uddeholm, 2020)

### Fresado

El fresado es una operación de mecanizado en el cual una herramienta multifilar que se denomina fresa, rota a una velocidad determinada en el proceso encontrándose ésta perpendicular a la dirección de avance. El material a mecanizar se encuentra en la bancada o banco de trabajo misma que puede tener de 3 a 5 grados de libertad dependiendo de la máquina herramienta o fresadora (Groover, 2007). Como se puede observar en la Figura 1.

**Figura 1***Proceso de Fresado*

*Nota:* Recuperado del manual online de (Sandvik, 2017)

El proceso de fresado ha sufrido cambios tecnológicos, por cuanto han expandido su uso y las formas que se pueden mecanizar en la superficie de las piezas de trabajo, dichas ventajas se muestran a través de un buen acabado superficial, la precisión en las tolerancias geométricas, flexibilidad de diseño y el empleo de distintos materiales según su propósito (Groover, 2007).

### ***Factores que influyen en el mecanizado***

En la operación de mecanizado se debe considerar las variables que influyen, puesto que se pueden clasificar en variables independientes y variables dependientes (Kalpakjian & Schmind, 2008).

Entre ellas, tenemos las variables independientes principales las cuales son (Kalpakjian & Schmind, 2008).

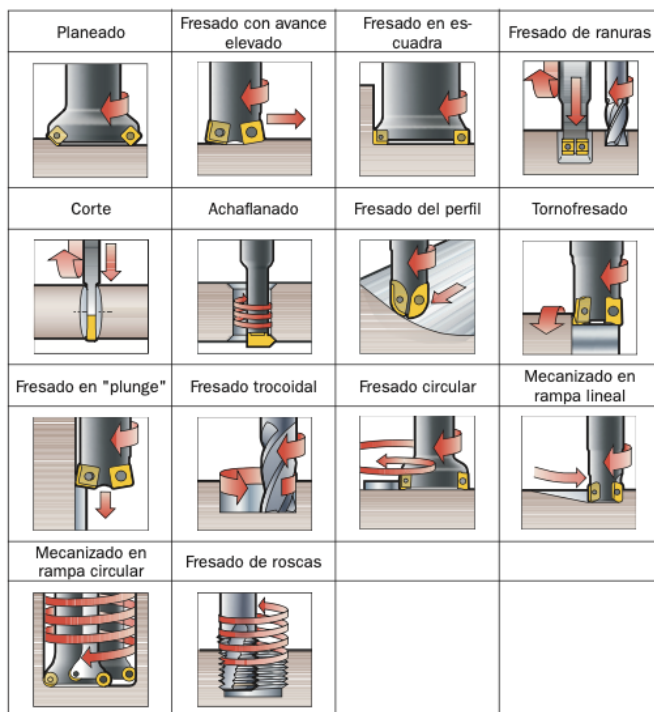
- a. Material y recubrimiento de la herramienta de corte
- b. Forma y filo de la herramienta de corte
- c. Material de la pieza de trabajo
- d. Avance, velocidad y profundidad de corte
- e. Fluidos de corte
- f. Forma de viruta
- g. Fuerza de corte y consumo de energía
- h. Temperatura de la herramienta de corte, viruta y pieza
- i. Desgaste de la herramienta de corte.
- j. Operaciones de fresado

En el proceso de fresado podemos distinguir diversas operaciones o estrategias para la fabricación de piezas unitarias hasta grades lotes de producción, en el proceso de fresado se

emplean distintos tipos de materiales, geometrías y herramientas de corte. Esto sugiere una operación de fresado para cada tipo de mecanización que pueden ser agujeros, canales, superficies, etc. Como se observa en la Figura 2.

**Figura 2**

*Operaciones de fresado*



Nota: Recuperado del manual online de (Sandvik, 2017)

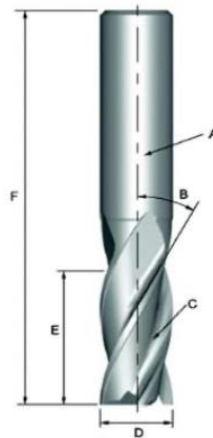
De acuerdo a cada operación de mecanizado se puede configurar la máquina herramienta para distintas operaciones y herramientas de corte que pueden ser de plaquitas intercambiables de carburo o de acero rápido (HSS), con la meta de ampliar la productividad en la fabricación de piezas complejas con buen acabado superficial y tolerancias geométricas requeridas.

### ***Estudio de las herramientas de corte del fresado***

La determinación de la herramienta de corte está relacionada por la operación de mecanizado a realizar, se pueden hallar una gran variedad de herramientas de corte en las que difieren en su geometría, estas pueden ser frontales, periféricas o de acabado; en cada una de ella puede variar el diámetro, material, forma, número de filos y sujeción que por lo general es por medio de conos morse, las partes y nomenclatura (Dormer, 2018). Como se muestran posteriormente en la Figura 3.

**Figura 3**

*Partes y nomenclatura de la fresa*



*Nota:* Recuperado de la publicación del blog online de (Eshapeoko, 2013)

Donde identificamos las siguientes partes:

- A. Mango
- B. Ángulo de la hélice
- C. Dientes o labios
- D. Diámetro
- E. Longitud de corte
- F. Longitud total



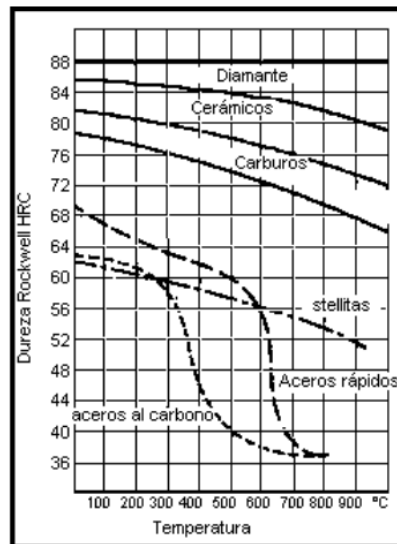
En la actualidad existen una gran variedad de herramientas de corte para el proceso de fresado. Con el avance de la tecnología también se han desarrollado herramientas de corte para infinidad de aplicaciones con el objetivo de ayudar a mejorar el proceso de producción. (Pferd, 2021).

### ***Material de la herramienta de corte***

Las herramientas de corte que se utilizarán en un proceso de mecanizado o en una de las operaciones de fresado debe soportar altas temperaturas y esfuerzos causados por el contacto, por tanto, la elección del material de la herramienta es fundamental ya que debe mantener sus propiedades mecánicas como la dureza, tenacidad, resistencia y filo. (Kalpakjian & Schmid, 2008), como se puede ver en la Figura 4.

**Figura 4**

*Dureza de los materiales de las herramientas de corte*



*Nota:* Recuperado del handbook de (ASM International, 1998)

***Tipo de fresas***

En la actualidad existe una gran variedad de tipos de fresas, entre las cuales se puede distinguir; frontales y periféricas, mismas que tienen sus propias variaciones para cada proceso de mecanizado. Las fresas periféricas tienen su plano de corte paralelo al eje de rotación de la herramienta de corte. Estas pueden ser: cilíndricas, de mango y angulares; en las fresas frontales podemos encontrar que su eje de rotación es perpendicular a la superficie del material a mecanizar, por otro lado, se tratan de las herramientas de corte más utilizadas en la industria del mecanizado (Eshapeoko, 2013).

***Normas de seguridad para el fresado***

En el proceso de mecanizado el operador de la máquina herramienta está expuesto a riesgos en el momento de su uso, entre los riesgos más posibles destacan aquellos que son de carácter mecánico, es decir, son de contacto, atrapamiento, proyección de partículas en la ejecución de la operación de mecanizado, cortes, impactos, aplastamiento y caída de objetos (UNE Normalización Española, 2009).

Para poder usar adecuadamente las máquinas herramientas es obligatorio el portar el equipo de protección personal, el cual se compone de: mandil (ropa de trabajo con mangas ajustables), botas de seguridad (punta de acero, antideslizante y dieléctrica), gafas de protección (de alto impacto) y orejeras.

Cada zona de trabajo debe estar correctamente identificada y tener el espacio suficiente para que el operador pueda desarrollar su trabajo. Se considera que es de vital importancia la limpieza del lugar y tener los instrumentos necesarios en orden para su posterior uso, es prohibido llevar prendas o joyas adicionales al equipo de protección personal, puesto que estas pueden ocasionar un accidente (UNE Normalización Española, 2009).

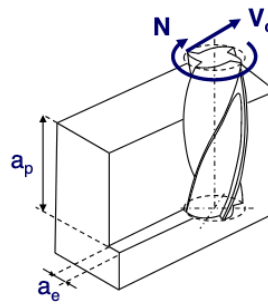
### Parámetros de mecanizado en el fresado

Los parámetros para el proceso de fresado son: velocidad de corte, avance por diente, velocidad de avance y profundidad de pasada.

En la figura 5, se identifican los parámetros básicos del proceso de fresado, siendo estos la velocidad de corte ( $V_c$ ), velocidad del husillo ( $N$ ), profundidad axial ( $a_p$ ), profundidad radial ( $a_e$ ) (Askeland & Wright, 2016).

**Figura 5**

*Parámetros Básicos*



*Nota:* Recuperado de la presentación de mecanizado de (Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoa, 2004)

### **Avance por diente**

El avance por diente ( $f_z$ ) es la distancia que recorre en la dirección y sentido de la velocidad de avance en el tiempo en el que esta ha dado una vuelta completa.

$$f_z = \frac{V_f}{Z \cdot N} \quad (\text{Ec.1}) \text{ (Sandvik, 2017)}$$

Donde:

$f_z$ : avance por diente [mm/diente]

$Z$ : número de dientes

$N$ : velocidad del husillo [rpm]

### **Velocidad avance**

La velocidad de avance ( $V_f$ ) se define como la velocidad lineal de la herramienta de mecanizado su unidad es [mm/min], Se puede observar en la figura 6.

$$V_f = f_z * Z * N \quad (\text{Ec.2}) \text{ (Sandvik, 2017)}$$

Donde:

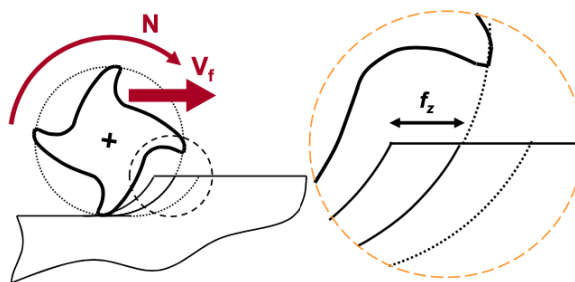
$V_f$ : velocidad de avance [mm/min]

$Z$ : número de dientes

$N$ : velocidad del husillo [rpm]

**Figura 6**

*Velocidad de avance y avance por diente*



*Nota:* Recuperado de la presentación de mecanizado de (Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoa, 2004)

### **Velocidad de corte**

La velocidad de corte ( $V_c$ ) es el parámetro principal que influye en el tiempo de mecanizado, está definido como la velocidad tangente al perímetro de la herramienta de corte (Castro, 2008).

$$V_c = \frac{\pi * D * N}{1000} \quad (\text{Ec.3}) \text{ (Sandvik, 2017)}$$

Donde:

$V_c$ : velocidad de corte [m/min]

$N$ : velocidad del husillo [rpm]

D: diámetro de la herramienta [mm]

### ***Taza de remoción de material***

Es uno de los parámetros que nos ayuda a obtener la potencia de la máquina, esta muestra la cantidad de material removido y es dependiente del ancho de corte, pasada y avance de la herramienta (Sandvik, 2017).

$$Q = \frac{a_p * a_e * V_f}{1000} \quad (\text{Ec.4}) \text{ (Sandvik, 2017)}$$

Donde:

Q: Taza de remoción de material [ $\frac{\text{m}^3}{\text{min}}$ ]

$a_p$ : profundidad de corte axial [mm]

$a_e$ : profundidad de corte radial [mm]

### ***Potencia de corte***

La potencia de corte se define como la potencia necesaria que la máquina- herramienta o centro de mecanizado debe usar para poder realizar el proceso de corte, se puede calcular en función de la profundidad de corte radial, profundidad de corte radial, velocidad de avance y la fuerza de corte del material (Sandvik, 2017).

$$PC = \frac{a_p * a_e * V_f * K_c}{60 * 10^6} \quad (\text{Ec.5}) \text{ (Sandvik, 2017)}$$

Donde:

PC: potencia de corte [kW]

$a_p$ : profundidad de corte axial [mm]

$a_e$ : profundidad de corte radial [mm]

$V_f$ : velocidad de avance [mm/min]

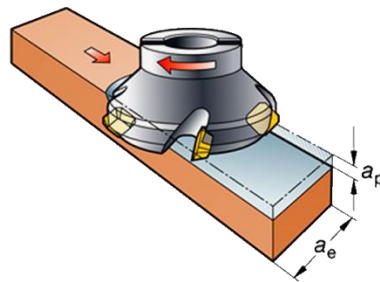
$K_c$ : la fuerza de corte del material [N/mm<sup>2</sup>]

### **Profundidad de corte *axial* y *radial***

La profundidad de corte puede ser axial y radial, la profundidad de corte axial ( $a_p$ ) es la profundidad de una pasada de la herramienta de corte, en cambio la profundidad de corte radial ( $a_e$ ) es el ancho en la que actúa el diámetro de la herramienta de corte, estos parámetros dependerán del proceso de mecanizado (Sandvik, 2017), ver en la Figura 7.

**Figura 7**

*Profundidad de corte axial y corte radial*



*Nota:* Recuperado del manual online de (Sandvik, 2017)

### **Mecanizado de alto rendimiento**

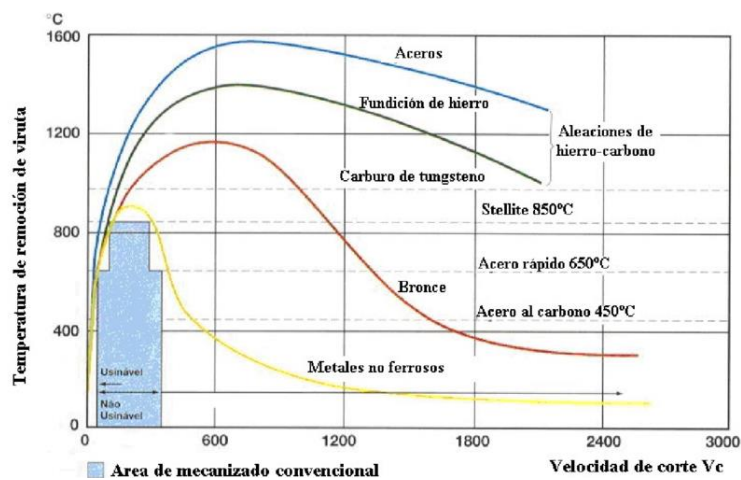
El mecanizado de alto rendimiento también llamado mecanizado de alta velocidad conocido por sus siglas en inglés HSM (High speed machining) este tipo de mecanizado hace uso de una tecnología de arranque de viruta donde se obtiene un elemento mecanizado de forma precisa al retirar el material. Este mecanizado es un proceso rentable para la fabricación de piezas de gran precisión y complejidad (Castro, 2008).

El HSM es una tecnología moderna si se compara con el mecanizado convencional, este pretende elevar la eficiencia, calidad, precisión y optimización del tiempo de mecanizado. En el año de 1931 se propuso por primera vez la definición de HSM por Carl Salomón, que propone que a una velocidad de corte de 4 a 10 veces superior a la velocidad de corte convencional, la temperatura del filo disminuye (Castro, 2008). En materiales no ferrosos como es el aluminio y

sus aleaciones la temperatura a altas velocidades de mecanizado es menor a comparación de materiales como el acero, bronce, carburos. Se presenta en la Figura 8.

**Figura 8**

*Curvas de temperatura de viruta según la velocidad de corte [m/min] y el tipo de material*



*Nota:* Recuperado del manual online de (Sandvik, 2017)

Douglas por su parte hace una diferenciación de los mecanizados en función a su velocidad de corte como se muestra en la Tabla 7.

**Tabla 7.**

*Tipo de mecanizado por su velocidad de corte*

Tipo de mecanizado	Abreviatura	Velocidad de corte [m/min]
Low speed machining	LSM	1 – 600
High speed machining	HSM	600 – 1800
Very high speed machining	VHSM	1801 - 18000
Ultra high speed machining	UHSM	18001 - 30000

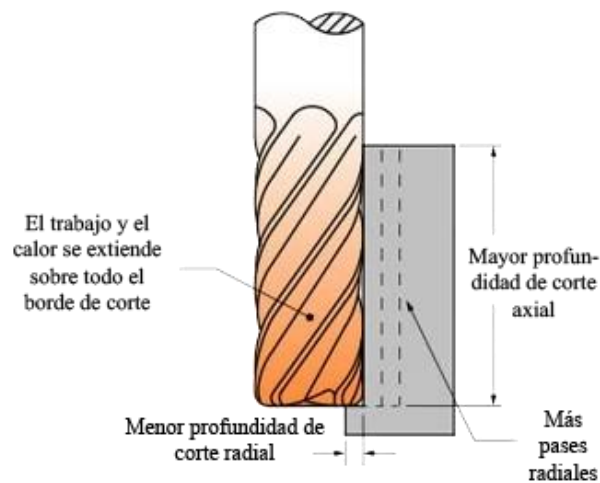
*Nota:* Recuperado del artículo científico de (Douglas & Kaldos, 1995)

### ***Características del mecanizado de alto rendimiento***

El mecanizado de alto rendimiento o HSM sustituye las pasadas de gran profundidad a bajas velocidades de corte por una mayor cantidad de pasadas rápidas de menor profundidad, aumentando la viruta en el proceso. El uso de las altas velocidades disminuye las fuerzas de corte usando espesores de desbaste pequeños (Castro, 2008), como se muestra en la Figura 9.

**Figura 9**

#### *Mecanizado de alto rendimiento*



*Nota:* Recuperado de (Harvey Performance Company, 2018)

Por su parte, las características del mecanizado de alto rendimiento se describen a continuación:

- Disminución de las fuerzas de corte en los materiales dúctiles.
- Posibilidad de mecanizar paredes finas 0.2 [mm]
- Excelente precisión de los contornos, mayor calidad superficial y tolerancias geométricas precisas.
- Reducción de tiempo de mecanizado y costo.
- Aumento de la vida útil de la herramienta.
- Evacuación de la viruta mediante la viruta.
- Posibilidad de mecanizados de aceros duros [ $>50$  HRC]



El mecanizado de alto rendimiento brinda una solución para optimizar los procesos de mecanizado en determinados campos de aplicación (Castro, 2008).

### **Sustentabilidad del mecanizado de alto rendimiento**

En los procesos de manufactura los más importante es la productividad, la vida útil de las herramientas y la calidad de la pieza mecanizada, teniendo en cuenta que en la actualidad la viruta que proviene de aleaciones de magnesio, aluminio y cobre poseen un alto valor comercial, lo que puede reciclarse y volver al circuito productivo.

Para el reciclaje de la viruta se analiza las fuentes de contaminación de la misma donde encontramos el uso de los fluidos de corte, la alta temperatura que produce la oxidación de la viruta y la adherencia del material de la herramienta de corte sobre la viruta. Lo que nos lleva a plantear posibles soluciones que son el mecanizado sin el uso de fluidos de corte, trabajando a velocidades de corte adecuadas al igual que las herramientas de corte. (Krahmer, 2016)

### ***Mecanizado en seco o Dry Machining***

Para la transformación de un proceso de mecanizado con uso de fluido de corte a un proceso sin fluido de corte, el proceso deberá ejecutarse con una herramienta de corte que se adapte al proceso como son las herramientas con un sustrato, recubrimiento y geometría que faciliten la operación de mecanizado. (Krahmer, 2016)

### ***Mecanizado asistido con aire comprimido***

Es una variación del mecanizado en seco, el caudal de aire debe ser constante ya que si este es insuficiente puede llegar a causar fatiga térmica sobre los filos lo que provoca fisuras, es más adecuado para el proceso de fresado ya que la naturaleza del corte es interrumpida, en la fabricación de matrices el aire comprimido ayuda a remover la viruta evitando el recorte de la misma. (Krahmer, 2016)

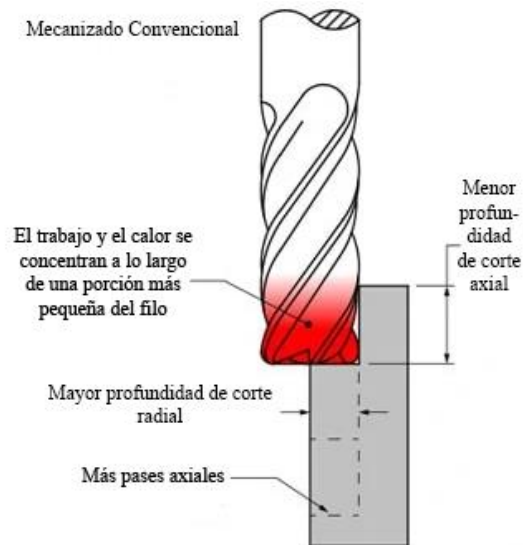
### Mecanizado convencional

El proceso de mecanizado convencional consta de dos operaciones necesarias las cuales son; desbaste y el acabado de la pieza; en la primera operación la herramienta de corte ejecuta un número de pasadas que dependerán de la profundidad de pasada, velocidad de corte y avance de la herramienta.

En el proceso convencional de mecanizado aumenta el calor de la herramienta de corte con lo que se consigue aumentar el desgaste de la herramienta debido a una profundidad axial pequeña y mayor profundidad radial, lo que representa un riesgo de fractura por el desgaste no uniforme generando que el acabado de la pieza no sea el esperado (Krahmer, 2016), en la Figura 10 se muestra mecanizado convencional.

**Figura 10**

#### *Mecanizado convencional*



*Nota:* Recuperado de (Harvey Performance Company, 2018)

### ***Características del mecanizado convencional***

El mecanizado convencional posee las siguientes características:

- Desbaste en mayor cantidad de niveles en el eje Z.
- Mayor número de pasadas en el eje axial.
- Mayor profundidad radial.
- Desgaste desequilibrado de la herramienta de corte y reducción de tiempo de vida.
- Mayor tiempo de mecanizado.
- Ancho de corte considerable.

El avance está relacionado con el radio de la herramienta para obtener la rugosidad deseada (Krahmer, 2016).

### **Estrategias CAM**

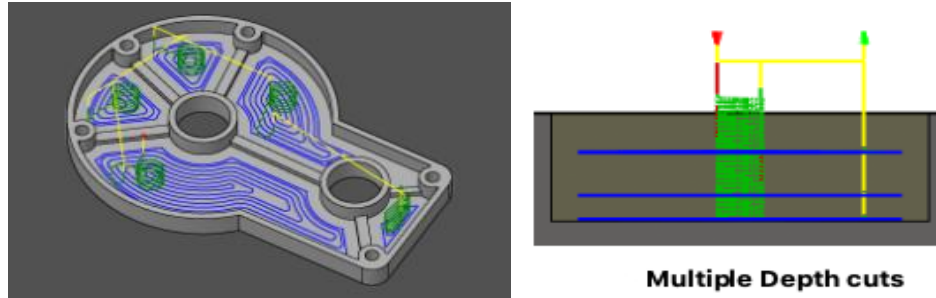
#### ***Estrategia de desbaste***

##### *Pocket 2D*

La operación de mecanizado mediante la estrategia poket 2D se usa para el desbaste o vaciado de piezas, se puede utilizar tanto para velocidades bajas como altas velocidades, configurando los parámetros de la forma que se requiera (Autodesk Fusion 360), como se puede ver la Figura 11.

**Figura 11**

*Estrategia fresado pocket 2D, número de pasadas por profundidad*



*Nota:* Recuperado del manual del software (Autodesk Fusion 360)

### **Mecanizado trocoidal**

En la actualidad el software de mecanizado posee tipos de trayectoria, ya sea bajo el nombre de mecanizado dinámico, o el uso del pase de máxima profundidad lo que brinda la opción de configurar el mecanizado con el pase de profundidad de acuerdo a la altura de la herramienta. De acuerdo a los manuales de Sandvik nos especifica que el ancho máximo de corte sea el 20% del diámetro de la herramienta (Sandvik, 2017). A continuación, se muestra en la Figura 12.

**Figura 12**

*Fresado Trocoidal*



*Nota:* Recuperado del manual online de (Sandvik Coromant, 2019)

### ***Características de mecanizado trocoidal***

El mecanizado con estrategia trocoidal es considerada una operación de alto rendimiento, por lo cual las características son las mismas del mecanizado de alto rendimiento o HSM, las cuales fueron mencionadas con antelación.

### ***Estrategia trocoidal***

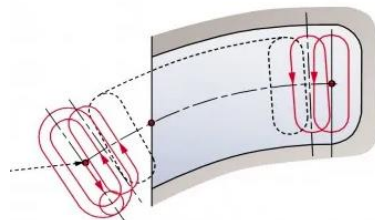
El uso de la estrategia trocoidal en el mecanizado a velocidades medias y altas nos brinda un buen acabado en la pieza a mecanizar, gracias al uso de software para máquinas herramienta de control numérico, se adapta a superficies con movimientos suaves, con la finalidad de remover material a grandes tasas de remoción y disminuyendo los tiempos de mecanizados (Sandvik, 2017).

### ***Trayectoria trocoidal***

La trayectoria del mecanizado trocoidal puede variar según el modelo 3D y como ajustemos los parámetros de mecanizado, pero siempre serán movimientos circulares hacia adelante, en el manual virtual de fresado de Sanvik Coromant que se encuentra en su página web recomienda un ancho de corte máximo del 20 % del diámetro de la herramienta (Sandvik Coromant, 2019), como se observa en la Figura 13.

**Figura 13**

*Trayectoria Trocoidal*



*Nota:* Recuperado del catálogo online de (Sandvik Coromant, 2019)

## Metodología Taguchi

La metodología empleada para la elaboración de la investigación en curso es la metodología Taguchi, llamada así por el nombre de su creador el ingeniero japonés Genichi Taguchi, quién fue un estadístico también conocido como un gurú de la calidad. Dicha filosofía se sustenta en tres conceptos fundamentales:

1. En primer lugar, considera que el diseño en la fase inicial del producto es fundamental para lograr la calidad en el resultado final.
2. Asevera que la calidad de los productos mejora minimizando la variabilidad en torno al valor nominal o del objetivo.
3. Finalmente, el costo se mide en función de la variabilidad de los procesos y las pérdidas se miden en función del sistema.

Una de las contribuciones del Dr. Genichi Taguchi ha sido la aplicación de la estadística en la ingeniería, en razón que ayudó con la reducción de costos y mejora notable de la calidad, diseño de los productos y sus procesos de fabricación.

En su método se hace uso de la experimentación a pequeña escala con la finalidad de minimizar la variación descubriendo diseños más robustos y de fabricación en serie económica (Hernández, De la Paz, & García, 2015).

Esta metodología permite desarrollar tecnología adecuada para el diseño y fabricación de productos de alta calidad consiguiendo una reducción en el tiempo de investigación, desarrollo y obtención del diseño final al cual llamo diseño robusto, el mismo que consiste en que cada vez que se diseña un producto, se lo hace pensando en que se va a satisfacer todas las necesidades del cliente, es decir enfocarse en las necesidades del comprador, ahorrando el dinero en las necesidades que no sean de interés (Castillo, 2017). En la Figura 14, se indica el funcionamiento del método antes mencionado.

Figura 14

## Método Taguchi



*Nota:* Recuperado del trabajo de investigación precedente de (Infante, 2019)

En el método Taguchi se alude a dos tipos de factores, los cuáles son los controlables y no controlables, mismos factores que provocan que la calidad se desvíe del objetivo, dando como consecuencia una pérdida parcial de la calidad.

El arreglo ortogonal es una herramienta que nos permite eliminar gran parte de los esfuerzos de diseño estadístico para posteriormente mediante el análisis de los datos obtenidos de la experimentación se pueda evaluar los factores controlables (Gutiérrez, 2009).

#### ***Ventajas y limitaciones del Método Taguchi***

Las ventajas que brinda el método taguchi son:

- Reducción de tiempo y costos de experimentos.
- Diseño robusto del producto.
- Reducción del costo de producción.

En cuanto a las limitaciones de este método, la más destacada es el trabajo colaborativo o en equipo, para poder abordar los problemas generados en la mejora de la calidad (Cintas, Bartes, & Fernández, 2004).

### ***Aplicación del Método Taguchi***

El método Taguchi brinda un enfoque para la optimización empleando tablas o conjuntos de arreglos ortogonales que permite realizar un estudio equilibrado de los factores de diseño que tiene como objetivo mejorar el proceso de producción. Un estudio de los distintos factores en el diseño en una manera paralela permite estimar los factores independientes.

El método Taguchi mediante el correcto diseño experimental facilita el proceso de experimentación. (Dharam, Murty, Raheem, Nageshwar, & Hasham, 2016)

1. Seleccionar la o las características que influyen en la calidad a ser optimizada.
2. Determinar los parámetros que afectan el proceso de diseño y sus niveles.
3. Escoger la matriz ortogonal que mejor facilite la experimentación.
4. Ejecución de la experimentación del total de ensayos de la matriz.
5. Realizar el análisis estadístico de los datos obtenidos.
6. Determinar el nivel de la experimentación con resultados óptimos, realizar un experimento con la finalidad de confirmar el resultado obtenido.

El arreglo ortogonal más adecuado del método para la experimentación se puede seleccionar según la Tabla 8.



**Tabla 8***Arreglo ortogonal del método Taguchi*

Diseño	Niveles				Diseño	Niveles			
	2	3	4	5		2	3	4	5
<b>L4(2<sup>3</sup>)</b>	2-3				L16(4 <sup>5</sup> )			2-5	
<b>L8(2<sup>7</sup>)</b>	2-7				L25(5 <sup>6</sup> )				2-6
<b>L9(3<sup>4</sup>)</b>		2-4			L27(3 <sup>13</sup> )		2-13		
<b>L12(2<sup>11</sup>)</b>	2-11				L32(2 <sup>31</sup> )	2-31			
<b>L16(2<sup>15</sup>)</b>	2-15								

*Nota:* Recuperado del artículo científico de (Ranjit , 2010)

Donde se puede observar lo siguiente; para la primera expresión  $L4(2^3)$ , donde L4 es el número de corridas, 2 el número de niveles y 3 es el número de factores.

### Capítulo 3

#### Desarrollo del experimento

##### Equipo de trabajo

##### **Maquinaria**

Para efecto de la experimentación, el equipo a usar es el centro de mecanizado vertical HISION CFV 1100 con control Fanuc Oi -MF, a continuación, se observa en la Figura 15, por el contrario, en la Tabla 9 se muestran las características técnicas del equipo mencionado.

**Tabla 9**

*Características técnicas*

<b>HISION CFV 1100 Especificaciones</b>		
<b>Table</b>	1300 x 550	mm
<b>X travel</b>	1100	mm
<b>Y travel</b>	540	mm
<b>Z travel</b>	520	mm
<b>Power</b>	10/22	kw
<b>Torque</b>	63.7- 118	Nm
<b>Speed</b>	15000	rpm
<b>Max. Tool diameter</b>	80- 125	mm
<b>Max. Tool Length</b>	300	mm
<b>Max. Tool Weight</b>	7	kg/T
<b>Tool capacity</b>	24	T
<b>Controller</b>	FANUN Oi MF	-

*Nota:* Recuperado del (Manual del centro de mecanizado Hision CFV 1100, 2021)

**Figura 15***HISION CFV 1100.****Equipo de medición de temperatura***

El equipo de medición a usar para la obtención de datos en relación a la temperatura es el Infrared Temperature Meter S- Gun, como se muestra en la Figura 16, las características del equipo de medición se indica en la Tabla 10.

**Tabla 10***Especificaciones técnicas del pirómetro*

Infrared Thermometer Especificaciones técnicas	
<b>Rango de temperatura infrarrojo</b>	-30 °C to 200 °C
<b>Repetibilidad IR</b>	± 0.5 % 0 ± 0.5 °C (±1 °F)
<b>Resolución de pantalla</b>	0.1 °C/0.1 °F
<b>Respuesta espectral</b>	10mm to 14mm
<b>Temperatura de funcionamiento</b>	0 °C to 50 °C (32 °F to 122°F)
<b>Humedad relativa</b>	10% to 90% RH
<b>Poder</b>	2 AA
<b>Tamaño mínimo de punto</b>	2 mm

*Nota:* Recuperado del manual de usuario de (Hunan Tuogao, 2021)

**Figura 16**

*Infrared Thermometer*



**Herramienta de corte**

***Tipo de herramienta***

La herramienta de corte a usar en la experimentación es una fresa de 25 mm de diámetro de 4 dientes, como se muestra en la Figura 17.

**Figura 17**

*Fresa Somta de HSS*



Dicha fresa de HSS marca Somta, fue adquirida en el mercado nacional por la Ferretería Castillo Hermanos, a continuación en la Tabla 11 se proveen las características geométricas de la herramienta.

**Tabla 11**

*Características geométricas de la Fresa*

Especificaciones	
<b>Marca</b>	Somta
<b>Tipo de herramienta</b>	Punta recta
<b>Material</b>	HSS
<b>Ap</b>	45 mm
<b>L1</b>	125 mm
<b>D1</b>	25 mm
<b>Filos</b>	4
<b>D4</b>	25

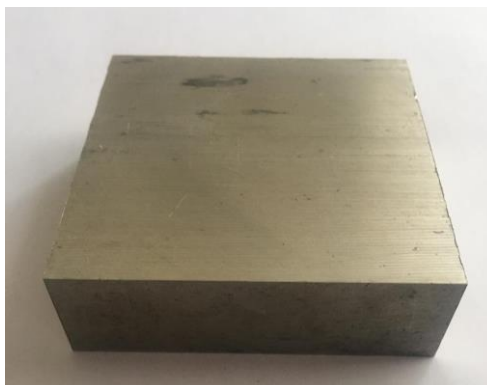
*Nota:* Recuperado del (Catalogo Somta, 2018)

### **Pieza de trabajo**

La pieza de trabajo para realizar los ensayos en aluminio Prodax es de 70 x 70 x 20 mm, como se puede observar en la Figura 18.

**Figura 18**

*Pieza de aluminio Prodax*



### Parámetros de corte

El fabricante de la herramienta de corte recomienda algunos parámetros para el mecanizado, en función del material a mecanizar como se puede apreciar en la Tabla 12.

**Tabla 12**

*Parámetros de corte recomendados por el fabricante de la herramienta de corte*

Parámetros de corte recomendados por el fabricante de la herramienta de corte	
Revoluciones [ $mm^{-1}$ ]	6000
Profundidad de corte axial perfilado $a_p$ [mm]	0.1 – 37.5
Profundidad de corte radial $a_e$ [mm]	1.25
Velocidad de avance [mm/min]	4800

*Nota:* Recuperado de (Catalogo Somta, 2018)

La correcta selección de las variables de mecanizado es de suma importancia, puesto que se tratan de factores que influyen directamente en el proceso, tiempo de mecanizado y la vida útil de la herramienta.

Siguiendo la línea de investigación del proyecto “Experimentación de las estrategias de mecanizado adaptativas en el fresado a alta velocidad en aluminio prodax” del Ing. Francisco Infante, donde emplea un diferencial de 0.05 mm/ diente entre cada velocidad de corte, por lo cual se han seleccionado los parámetros de mecanizado como se muestran en la Tabla 13, las cuales se usarán tanto en la estrategia convencional como trocoidal.

**Tabla 13**

*Parámetros de corte del experimento*

Parámetros de mecanizado			
Velocidad de Corte [m/min]	800	900	1000
Avance por diente[mm/diente]	0.25	0.30	0.35

### Metodología Taguchi

La metodología Taguchi utilizada como estrategia para el diseño de experimentos determina los parámetros que rigen en el mismo, se muestra en la Tabla 14. Esta metodología garantiza la combinación de todos los parámetros con los respectivos niveles, los factores que rigen esta experimentación son: el tipo de estrategia (profundidad de corte), velocidad de corte y el avance por diente de la herramienta de corte.

El material que se utilizará es el aluminio 7075- T6 (Prodax) con una fresa plana de 25 mm de diámetro HSS.

**Tabla 14**

*Parámetros y niveles del experimento*

Símbolo	Parámetros	Niveles		
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
A	Estrategia 1) Convencional 2) Trocoidal	1	2	-
B	Velocidad de corte [m/min]	800	900	1000
C	Avance por diente [mm/ diente]	0.25	0.30	0.35

Previo a la selección del arreglo o matriz para el experimento, es necesario conocer los grados totales de libertad (DOF), de acuerdo con la metodología Taguchi el número de experimentos debe ser mayor o igual a los grados de libertad. (Panshetty & Bute, 2016)

- Número de parámetros (ni)= 3
- Número de niveles (nf)= 3

Grados totales de libertad (DOF) =  $(ni - 1) * nf$

Grados totales de libertad (DOF)=  $(3-1) * 3 = 6$

Número mínimo de experimentos=  $DOF + 1 = 6+1 = 7$

Con lo que se obtiene el número de experimentos mínimos, el cual son 7

Al emplear la metodología Taguchi se debe implementar un arreglo ortogonal para poder efectuar la experimentación con las distintas combinaciones propias del método, este arreglo se aprecia en la Tabla 15.

**Tabla 15**

*Arreglo ortogonal*

Arreglo ortogonal							
Ensayo	Experimento			Ensayo	Experimento		
No	A	B	C	No	A	B	C
<b>1</b>	1	1	1	<b>10</b>	2	1	1
<b>2</b>	1	1	2	<b>11</b>	2	1	2
<b>3</b>	1	1	3	<b>12</b>	2	1	3
<b>4</b>	1	2	1	<b>13</b>	2	2	1
<b>5</b>	1	2	2	<b>14</b>	2	2	2
<b>6</b>	1	2	3	<b>15</b>	2	2	3
<b>7</b>	1	3	1	<b>16</b>	2	3	1
<b>8</b>	1	3	2	<b>17</b>	2	3	2
<b>9</b>	1	3	3	<b>18</b>	2	3	3

### Ejemplo de cálculo

Se realiza el cálculo de los valores necesarios para el desarrollo del mecanizado con las fórmulas antes mencionadas y descritas en el capítulo dos. En base a estos cálculos se realizará



la programación para obtener el código G con la finalidad de dar lugar a la experimentación en el centro de mecanizado.

Para efecto de los mismos, se calcula con una herramienta de corte HSS con diámetro 25 mm de cuatro filos, con un avance por diente de 0.25 mm/diente, con velocidad de corte de 800 m/min y con energía específica de 700 N/mm<sup>2</sup>. El ancho de corte para la estrategia trocoidal será del 10% del diámetro de la herramienta y para el mecanizado convencional será un ancho de corte del 64% del diámetro de la herramienta.

a) Cálculo de las revoluciones

$$V_c = \frac{\pi * D * N}{1000} \quad (Ec.3) \text{ (Sandvik, 2017)}$$

$$N = \frac{V_c * 1000}{\pi * D} \quad (Ec.3.1) \text{ (Sandvik, 2017)}$$

$$N = \frac{800 \frac{m}{min} * 1000}{\pi * 25 \text{ mm}} = 10185.9 \frac{rev}{min}$$

b) Cálculo de la velocidad de avance

$$V_f = f_z * Z * n \left[ \frac{mm}{min} \right] \quad (Ec.2) \text{ (Sandvik, 2017)}$$

$$V_f = 0.25 * 4 * 10185.9 = 10185.9 \left[ \frac{mm}{min} \right]$$

c) Cálculo de la tasa de remoción del material

$$Q = \frac{a_p * a_e * V_f}{1000} \left[ \frac{cm^3}{min} \right]$$

La tasa de remoción de material para el mecanizado convencional tiene un ancho de corte de 64% del diámetro de la herramienta de corte y un paso axial de 2.18 mm.

$$Q = \frac{2.18 * 16 * 10185.9}{1000} = 355.284 \left[ \frac{cm^3}{min} \right] \quad (Ec.4) \text{ (Sandvik, 2017)}$$

La tasa de remoción de material para el mecanizado convencional tiene un ancho de corte de 10% del diámetro de la herramienta de corte y un paso axial de 14 mm.

$$Q = \frac{14 * 2.5 * 10185.9}{1000} = 356.507 \left[ \frac{cm^3}{min} \right]$$

d) Cálculo de la potencia de corte

$$PC = \frac{a_p * a_e * V_f * K_c}{60 * 10^6} [kW] \quad (Ec.5) \text{ (Sandvik, 2017)}$$

La potencia de corte para el mecanizado convencional la obtenemos con la siguiente expresión.

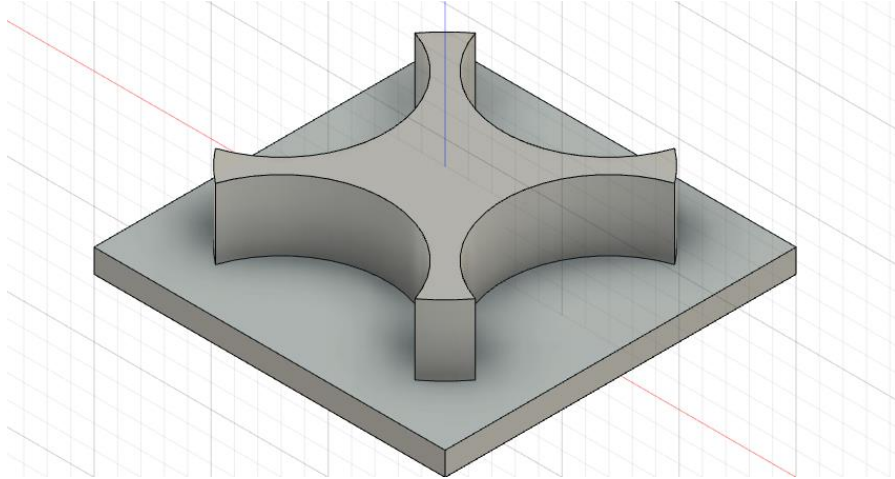
$$PC = \frac{2.18 * 16 * 10185.9 * 700}{60 * 10^6} = 4.145 [kW]$$

De forma similar obtenemos la potencia de corte para el mecanizado trocoidal.

$$PC = \frac{14 * 2.5 * 10185.9 * 700}{60 * 10^6} = 4.159 [kW]$$

### Modelo CAD

Para mantener la línea de investigación con la “Experimentación de las estrategias de mecanizado adaptativas en el fresado a alta velocidad en aluminio prodax” del Ing. Francisco Infante, conserva el modelo CAD como se indica en la Figura 19, la cual mantiene la misma cantidad de material removido.

**Figura 19***Modelo CAD*

*Nota:* Recuperado del trabajo de investigación precedente de (Infante, 2019)

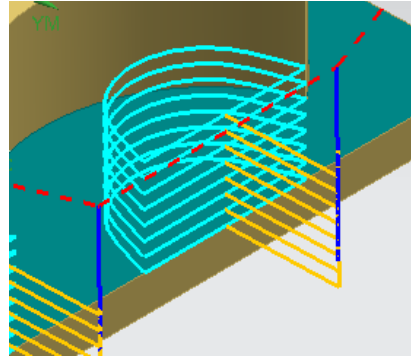
### **Ensayo con la estrategia de mecanizado convencional**

#### ***Descripción de la estrategia de mecanizado convencional***

El mecanizado convencional en la operación de desbaste además de usar parámetros propios, se caracteriza por realizar un número determinado de pasadas en el eje Z como se puede observar en la Figura 20 para lograr su objetivo, para este caso de estudio los parámetros son la velocidad de corte, avance por filo y profundidad de corte que se llevará a cabo con la herramienta de acero rápido (HSS) de 25 mm de cuatro filos.

**Figura 20**

*Generación de las pasadas en el eje Z*



*Nota:* Recuperado del software (Siemens NX, 2017)

### ***Trayectoria de mecanizado convencional***

Las trayectorias de mecanizado convencional o patrón de corte que encontramos en el software NX son: follow part, follow periphery, profile, trocoidal, zig, zigzag, zig with contour show shortcuts. Al igual que los estudios antes realizados por el Ing. Francisco Infante, en este caso se seleccionará el patrón de corte Follow periphery, puesto que como se demuestra en su estudio es el patrón de corte con el que se requiere menor tiempo para completar el mecanizado.

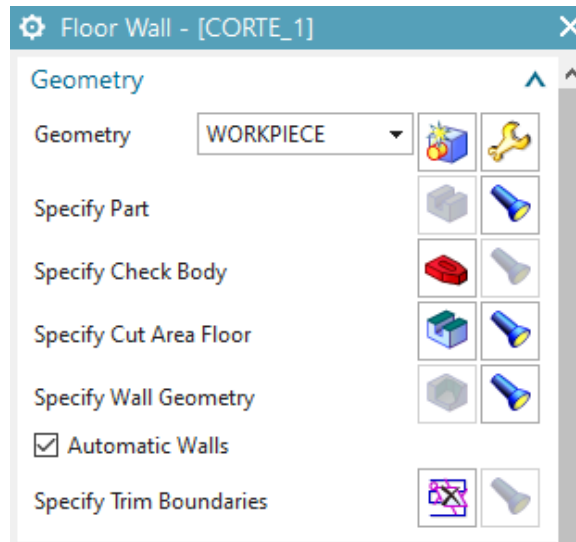
### ***Simulación CAM***

Para obtener la simulación de la fabricación (CAM) de la pieza se debe seguir una secuencia de pasos en orden para poder realizar el post procesado y obtener el código G para la máquina de control numérico.

1. Selección de la estrategia de desbaste, para este caso Floor Wall, como se muestra en la Figura 21.

**Figura 21**

*Selección de la estrategia de desbaste*

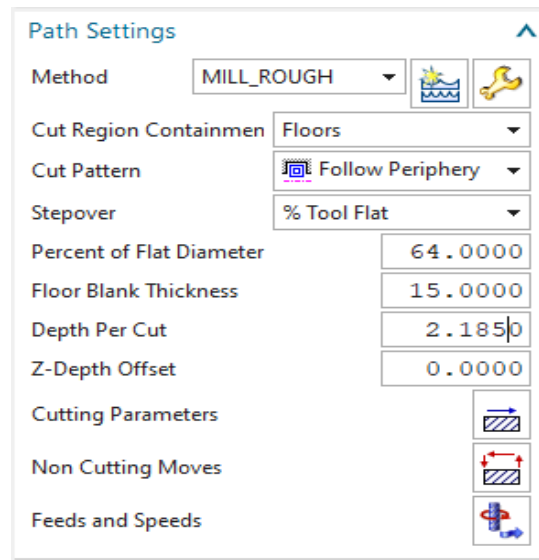


*Nota:* Recuperado del software (Siemens NX, 2017)

2. Se ingresan las propiedades geométricas de la herramienta corte y los parámetros de mecanizado.
3. Se selecciona el o los planos donde se ejecutará el desbaste.
4. Ingresar parámetros de profundidades de pasadas, ancho de corte en función del diámetro de la herramienta, como se muestra en la Figura 22.

**Figura 22**

*Profundidades y ancho de corte de la estrategia convencional*

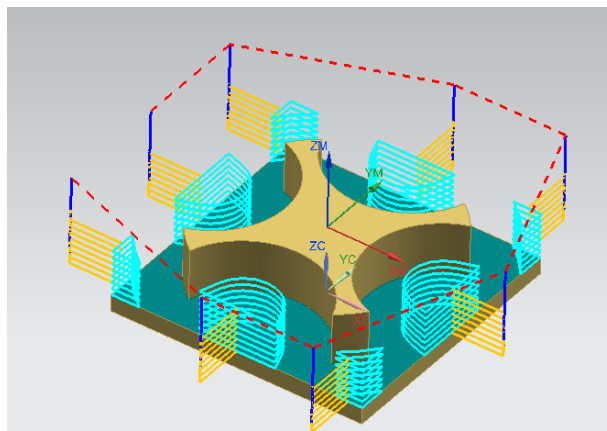


*Nota: Recuperado del software (Siemens NX, 2017)*

5. Se genera la trayectoria del mecanizado, como se indica en la Figura 23.

**Figura 23**

*Generación de la trayectoria*

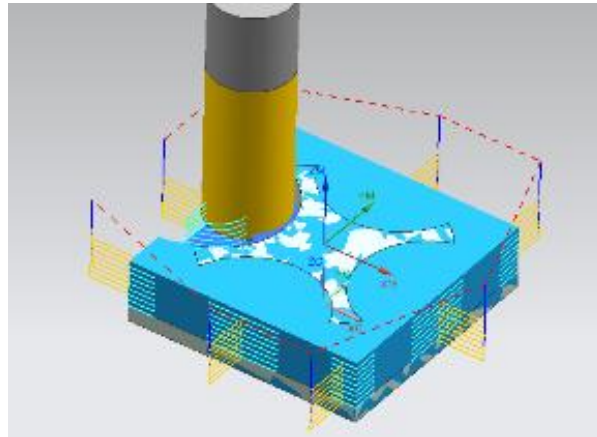


*Nota: Recuperado del software (Siemens NX, 2017)*

6. Simulación del mecanizado, a continuación, se muestra en la Figura 24.

**Figura 24**

*Simulación de la estrategia*



*Nota:* Recuperado de software (Siemens NX, 2017)

7. Post procesado

### **Ensayo con la estrategia de mecanizado trocoidal**

#### ***Estrategias de mecanizado trocoidal***

Para efectuar la estrategia de mecanizado trocoidal se emplea el mecanizado adaptativo que utiliza toda la altura de la herramienta, pero realizando varias pasadas radiales, para esta estrategia se manejará los mismos parámetros que en la estrategia de mecanizado convencional a diferencia de las profundidades axial y radial.

#### ***Trayectoria de mecanizado trocoidal***

La trayectoria trocoidal se caracteriza por adaptarse a la pieza a mecanizar realizando movimientos suaves, detectando automáticamente la geometría de la pieza, lo cual da como resultado la trayectoria trocoidal en función del ancho de corte escogido.

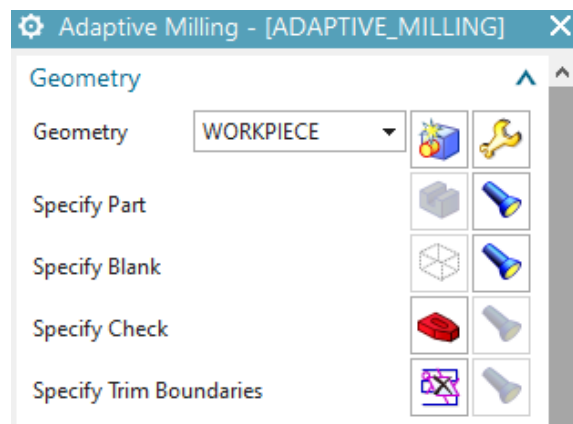
### **Simulación CAM**

De igual manera como en la simulación convencional, se debe seguir una serie de pasos secuenciales para llegar al post procesado y poder generar el código G, estos son:

1. Selección de la estrategia de desbaste para este caso adaptative milling, se muestra en la Figura 25.

**Figura 25**

*Selección de las estrategias adaptative milling*



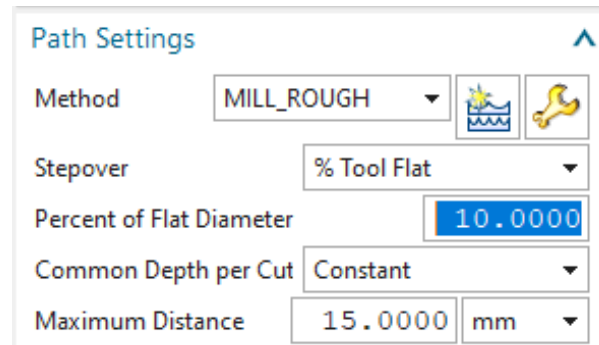
*Nota: Recuperado del software (Siemens NX, 2017)*

2. Ingresar las propiedades geométricas de la herramienta de corte y los parámetros de mecanizado.
3. Seleccionar el plano en el cual se ejecutará la estrategia de desbaste trocoidal.
4. Ingresar las profundidades de corte axial y radial, como se indica en la Figura 26.



**Figura 26**

*Profundidades de corte axial y radial*

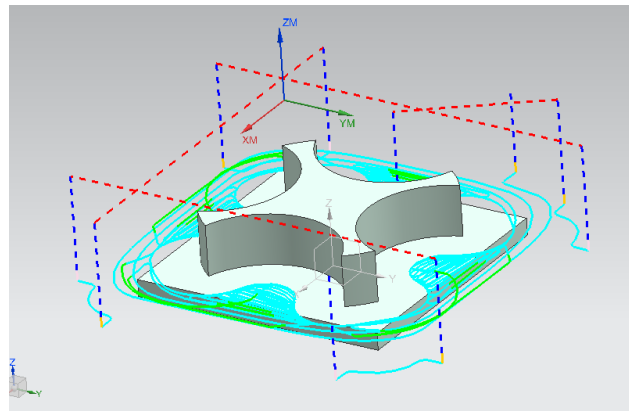


*Nota:* Recuperado del software (Siemens NX, 2017)

5. Generar la trayectoria del mecanizado, como se indica a continuación en la Figura 27.

**Figura 27**

*Trayectoria del mecanizado*

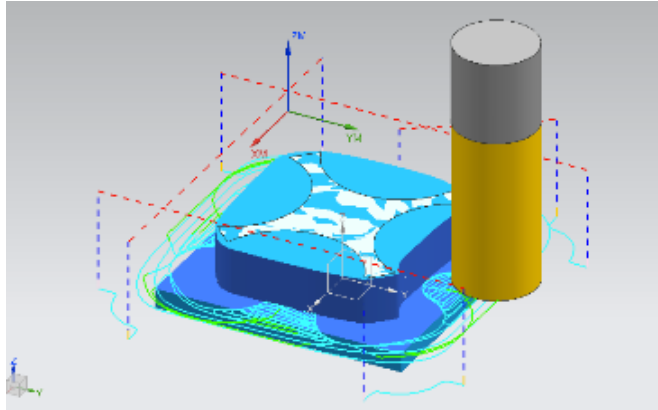


*Nota:* Recuperado del software (Siemens NX, 2017)

6. Simulación de la estrategia de mecanizado trocoidal, se muestra en la Figura 28.

**Figura 28**

*Simulación de mecanizado trocoidal*



*Nota: Recuperado del software (Siemens NX, 2017)*

### **Mecanizado de probetas**

Como se expuso en el desarrollo del arreglo de la metodología Taguchi, se prosiguió a realizar las 18 probetas, con las medidas antes especificadas (70 mm largo, 70 mm ancho y 20 mm de espesor). En la Tabla 16 se especifica los parámetros de mecanizado. Posteriormente en la Figura 29 se muestra la configuración del centro de mecanizado.

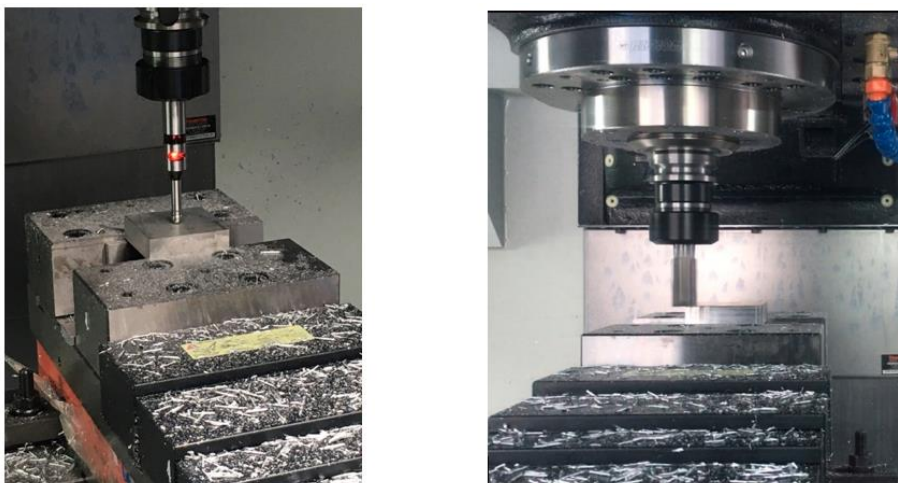
Tabla 16

*Parámetros de corte para el mecanizado*

<b>Código</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Estrategia</b>	<b>Velocidad de corte Vc[m/min]</b>	<b>Avance por diente Fz [mm/diente]</b>	<b>Velocidad de husillo N [rev/min]</b>	<b>Velocidad de avance Vf [mm/min]</b>
<b>C1</b>	A1B1C1	1	800	0.25	10185.9	10185.9
<b>C2</b>	A1B1C2	1	800	0.30	10185.9	12223.1
<b>C3</b>	A1B1C3	1	800	0.35	10185.9	14260.3
<b>C4</b>	A1B2C1	1	900	0.25	11459.2	11459.2
<b>C5</b>	A1B2C2	1	900	0.30	11459.2	13751.0
<b>C6</b>	A1B2C3	1	900	0.35	11459.2	16042.9
<b>C7</b>	A1B3C1	1	1000	0.25	12732.4	12732.4
<b>C8</b>	A1B3C1	1	1000	0.30	12732.4	15278.9
<b>C9</b>	A1B3C1	1	1000	0.35	12732.4	17825.4
<b>T1</b>	A2B1C1	1	800	0.25	10185.9	10185.9
<b>T2</b>	A2B1C2	1	800	0.30	10185.9	12223.1
<b>T3</b>	A2B1C3	1	800	0.35	10185.9	14260.3
<b>T4</b>	A2B2C1	1	900	0.25	11459.2	11459.2
<b>T5</b>	A2B2C2	1	900	0.30	11459.2	13751.0
<b>T6</b>	A2B2C3	1	900	0.35	11459.2	16042.9
<b>T7</b>	A2B3C1	1	1000	0.25	12732.4	12732.4
<b>T8</b>	A2B3C1	1	1000	0.30	12732.4	15278.9
<b>T9</b>	A2B3C1	1	1000	0.35	12732.4	17825.4

**Figura 29**

*Programación automática del cero pieza en Z y configuración para el mecanizado*



### **Análisis ANOVA**

El análisis ANOVA, es un análisis estadístico también conocido como el análisis de varianza, el cual determina la variabilidad de los datos permitiendo establecer el nivel de confianza de los datos experimentales. El análisis estadístico ANOVA permite calcular la varianza, los grados de libertad, suma de cuadrados, prueba F, en la Tabla 17 se indica la terminología. (Ranjit , 2010)

**Tabla 17**

*Terminología ANOVA*

<b>Terminología ANOVA</b>			
<b>Símbolo</b>	<b>Denominación</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Denominación</b>
S	Suma de Cuadrados	T	Total de resultados
DOF	Grados de libertad	CF	Factor de corrección
E	Error (experimental)	V	Varianza
P	Porcentaje de influencia	F	Relación de varianza

Símbolo	Denominación	Símbolo	Denominación
N	Número de experimentos	S'	Suma pura de cuadrados
fT	Total grados de libertad		

Nota: Recuperado de artículo científico de (Ranjit , 2010)

### **Suma de cuadrados**

La suma de cuadrados representa la desviación experimental de la media de los datos. (Ranjit , 2010)

$$S_T = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\frac{1}{n}\right) [\sum_{i=1}^n y_i]^2 \quad (Ec.6) \text{ (Ranjit , 2010)}$$

$$ST = S - CF$$

### **Varianza**

La varianza es la media de dispersión en función de la variabilidad de los datos respecto a la media poblacional.

$$V_a = \frac{S_a}{DF} \quad (Ec.7) \text{ (Ranjit , 2010)}$$

### **Error de la varianza**

El error de la varianza se expresa en función de la suma de cuadrados del error para los grados de libertad del mismo.

$$V_e = \frac{Se}{DOF_{error}} \quad (Ec.8) \text{ (Ranjit , 2010)}$$

### **Prueba F**

También conocida como prueba Fisher en la que sigue la distribución F, se la calcula con la relación entre la varianza y el error. La prueba F se la realiza mediante la comprobación del valor calculado en las tablas F con un nivel de significancia del 5 %, si es mayor al de las tablas se considera significativo caso contrario se considera agrupado.

$$F = \frac{V_a}{V_e} \quad (\text{Ec.9}) \text{ (Ranjit , 2010)}$$

### **Prueba de hipótesis**

Se examina dos hipótesis respecto a la población, esta se puede aceptar o rechazar dependiendo del experimento a demostrar, con ayuda de las tablas F se verificará se si cumple o se rechaza la hipótesis.

- **Hipótesis nula.** - Es en la que el investigador trata de rechazar la hipótesis, se determina que los parámetros de una muestra cumplen con el rango de la investigación de muestra.
- **Hipótesis alternativa.** – En este caso el investigador trata de aceptar o espera probar que se cumple y es cierta.

### **Ejemplo de cálculo**

Los ejemplos de cálculo se realizarán con los datos obtenidos del mecanizado real mostrados en la Tabla 16.

### **Cálculos de los grados de libertad**

- Grados de libertad totales

$$DOF_{Total} = n - 1 = 18 - 1 = 17$$

- Grados de libertad de factores (Vc,Fz, estrategia)

$$DOF_1 = n_{niveles} - 1 = 3 - 1 = 2 \text{ (para Vc, fz)}$$

$$DOF_2 = n_{niveles} - 1 = 2 - 1 = 1 \text{ (para estrategia)}$$

- Grados de libertad del error

$$DOF_e = DOF_{total} - (DOF_1 + DOF_2) = 17 - ((2 * 1) - 1) = 16$$

### Suma de Cuadrados

$$S_T = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\frac{1}{n}\right) \left[\sum_{i=1}^n y_i\right]^2$$

$$\sum_{i=1}^n y_i^2 = (217^2 + 231^2 + 212^2 + 213^2 + 210^2 + 208^2 + \dots + 15^2 + 14^2 = 405346$$

$$CF = \left(\frac{1}{n}\right) \left[\sum_{i=1}^n y_i\right]^2 = \frac{(217 + 213 + 212 + 213 + 210 + 208 + \dots + 15 + 14)^2}{18} = 238510.22$$

$$S_T = 405346 - 238510.22 = 166835,78$$

### Cálculo de la varianza

L= número de niveles, n= número de ensayos para ese factor del nivel

$$SA = \sum_{K=1}^L \left(\frac{1}{n}\right) \left[\sum_{i=1}^n (Ak_i)\right]^2 - CF$$

Para el nivel estrategia 1 Convencional

$$\sum_{K=1}^L \left(\frac{1}{n}\right) \left[\sum_{i=1}^n (Ak_i)\right]^2$$

$$\frac{(217 + 213 + 212 + 213 + 210 + 208 + 212 + 209 + 208)^2}{9} = 401956$$

Para el nivel estrategia 2 Trocoidal

$$\sum_{K=1}^L \left(\frac{1}{n}\right) \left[\sum_{i=1}^n (Ak_i)\right]^2$$

$$\frac{(25 + 22 + 19 + 23 + 18 + 17 + 17 + 15 + 14)^2}{9} = 3211.11$$

$$SA_{estrategia} = (401956 + 3211.11) - 238510.22 = 166656.89$$

$$SA_{Vc} = 166757.11$$

$$SA_{fz} = 166730.44$$

$$VA_{estrategia} = \frac{SA}{DOF} = \frac{166656.89}{1} = 166656.89$$

$$VA_{Vc} = 119346.56$$

$$VA_{fz} = 199328.56$$



## Capítulo 4

### Análisis de resultados

#### Resultados del experimento

Una vez que se aplicó la experimentación mediante la metodología Taguchi con un arreglo ortogonal L18 dada por la combinación de los parámetros y niveles que influyen en el fresado, se obtuvieron los datos de maquinado y temperatura mostrados en la Tabla 18.

**Tabla 18**

*Datos del experimento*

Ensayo	Parámetros	Tiempo de simulación [s]	Tiempo real [s]	Temperatura de la herramienta [°C]	Rebaba	Longitud de rebaba [mm]
<b>C1</b>	A1B1C1	215	217	32.7	No	-
<b>C2</b>	A1B1C2	211	213	30.5	No	-
<b>C3</b>	A1B1C3	209	212	30.2	No	-
<b>C4</b>	A1B2C1	212	213	31.6	No	-
<b>C5</b>	A1B2C2	209	210	30.4	No	-
<b>C6</b>	A1B2C3	206	208	30.1	No	-
<b>C7</b>	A1B3C1	210	212	29.4	No	-
<b>C8</b>	A1B3C2	207	209	29.2	No	-
<b>C9</b>	A1B3C3	205	208	28.9	No	-
<b>T1</b>	A2B1C1	19	25	28.0	No	-

Ensayo	Parámetros	Tiempo de simulación [s]	Tiempo real [s]	Temperatura de la herramienta [°C]	Rebaba	Longitud de rebaba [mm]
T2	A2B1C2	16	22	27.8	No	-
T3	A2B1C3	13	19	27.7	No	-
T4	A2B2C1	17	23	27.5	No	-
T5	A2B2C2	14	18	27.2	No	-
T6	A2B2C3	12	17	26.4	No	-
T7	A2B3C1	15	17	25.7	No	-
T8	A2B3C2	12	15	25.7	No	-
T9	A2B3C3	11	14	25.3	No	-

### Resultado de tiempo de mecanizado por estrategia

#### *Estrategia de mecanizado convencional*

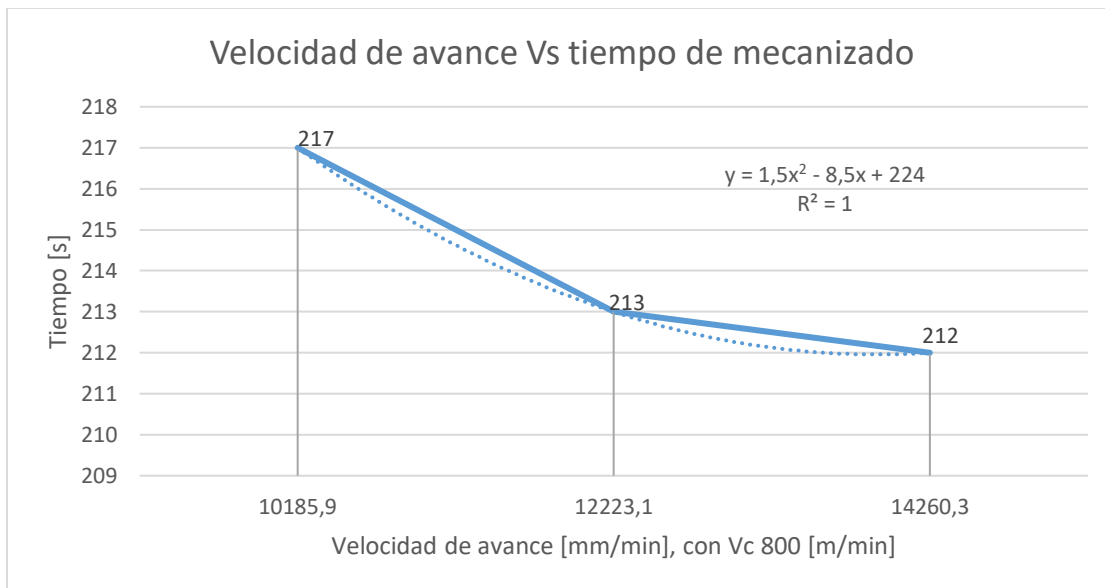
En la operación de fresado con la estrategia convencional utilizaremos una gráfica de línea para interpretar los resultados obtenidos de la experimentación, en la Figura 30 se indica el comportamiento del tiempo de mecanizado respecto a la velocidad de avance con velocidad de corte de 800 [m/min], es una curva decreciente con un  $R^2$  igual a 1 lo que nos da un ajuste perfecto a un polinomio de segundo grado.

$$y = 1.5x^2 - 8.5x + 224$$

$$R^2 = 1$$

Figura 30

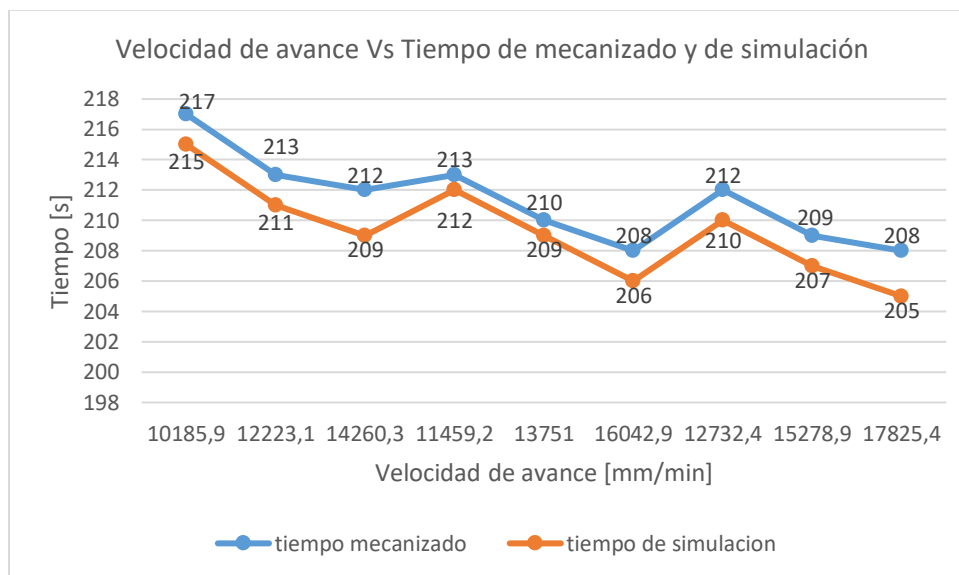
Velocidad de avance Vs tiempo de mecanizado convencional con Vc 800 [m/min]



El comportamiento del tiempo real del mecanizado con la estrategia convencional y del tiempo de simulación, como es de esperar es de forma de dientes de sierra decreciente, ya que al aumentar el avance por diente la velocidad de avance aumenta y el tiempo de mecanizado disminuye, en la Tabla 19 se muestra el error en el tiempo de mecanizado, es decir, el tiempo real a diferencia del tiempo de simulación en el software NX, este tiempo se debe a tiempo de no operación de la herramienta en el mecanizado real, podemos observar que el porcentaje de error se mantiene por debajo del 2% lo que nos indica que el error es pequeño y se puede asumir como aceptable.

**Figura 31**

*Velocidad de avance Vs Tiempo de mecanizado y de simulación con estrategia convencional*

**Tabla 19**

*Porcentaje de error en la estrategia de mecanizado convencional*

Ensayo	Parámetros	Tiempo de mecanizado [s]	Tiempo de simulación [s]	% Error
<b>C1</b>	A1B1C1	217	215	0.93
<b>C2</b>	A1B1C2	213	211	0.95
<b>C3</b>	A1B1C3	212	209	1.44
<b>C4</b>	A1B2C1	213	212	0.47
<b>C5</b>	A1B2C2	210	209	0.48
<b>C6</b>	A1B2C3	208	206	0.97
<b>C7</b>	A1B3C1	212	210	0.95

Ensayo	Parámetros	Tiempo de mecanizado [s]	Tiempo de simulación [s]	% Error
C8	A1B3C2	209	207	0.97
C9	A1B3C3	208	205	1.46

### ***Estrategia de mecanizado trocoidal***

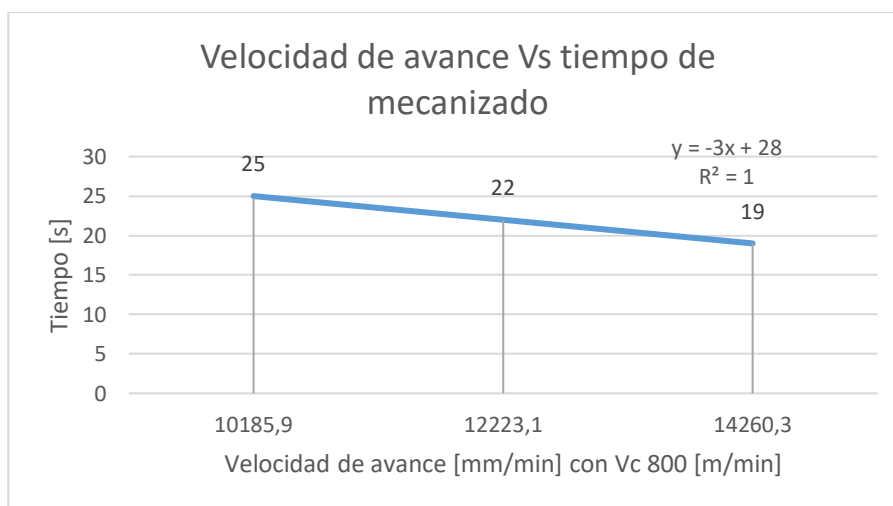
Al igual que en el mecanizado con estrategia convencional utilizamos gráficas de línea para interpretar los datos obtenidos de la experimentación del mecanizado con estrategia trocoidal, en la cual se observa en la Figura 32 el comportamiento del tiempo de mecanizado real en la velocidad de corte de 800 [m/min], en la que se tiene un ajuste perfecto con  $R^2$  de 1 con una curva de primer grado decreciente, ya que por el aumento del avance por diente también aumenta la velocidad de avance y el tiempo disminuye.

$$y = -3x + 28$$

$$R^2 = 1$$

**Figura 32**

*Velocidad de avance Vs Tiempo de mecanizado trocoidal con Vc 800 [m/min]*



En la Tabla 20 se analiza el error del tiempo en el mecanizado con la estrategia trocoidal con el tiempo obtenido en la simulación con el software NX, se observa que el error es considerable en valor porcentual, este error se debe al tiempo de no operación de la máquina, de ir al cero máquina al cero de la pieza, por lo que se puede inferir que es un calor casi constante en cada uno de los mecanizados, el valor de error es alto ya que en las altas velocidades la diferencia de segundos es muy significativa.

**Tabla 20**

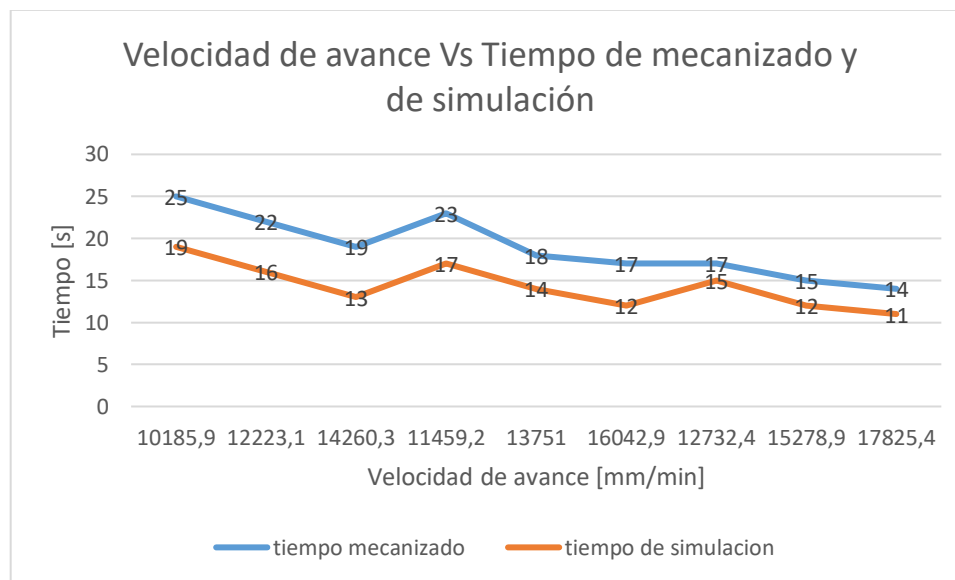
*Porcentaje de error en la estrategia de mecanizado trocoidal*

Ensayo	Parámetros	Tiempo de mecanizado [s]	Tiempo de simulación [s]	% Error
T1	A2B1C1	25	19	31.58
T2	A2B1C2	22	16	37.50
T3	A2B1C3	19	13	46.15
T4	A2B2C1	23	17	35.29
T5	A2B2C2	18	14	28.57
T6	A2B2C3	17	12	41.67
T7	A2B3C1	17	15	13.33
T8	A2B3C2	15	12	25.00
T9	A2B3C3	14	11	27.27

En la Figura 33 se indica el comportamiento del tiempo de mecanizado y del tiempo de simulación con la estrategia trocoidal. En la que se puede observar una función de dientes de sierra más suavizada, es decir, con crestas y valles menos pronunciados con tendencia decreciente.

**Figura 33**

*Velocidad de avance Vs Tiempo de mecanizado y de simulación con estrategia convencional*

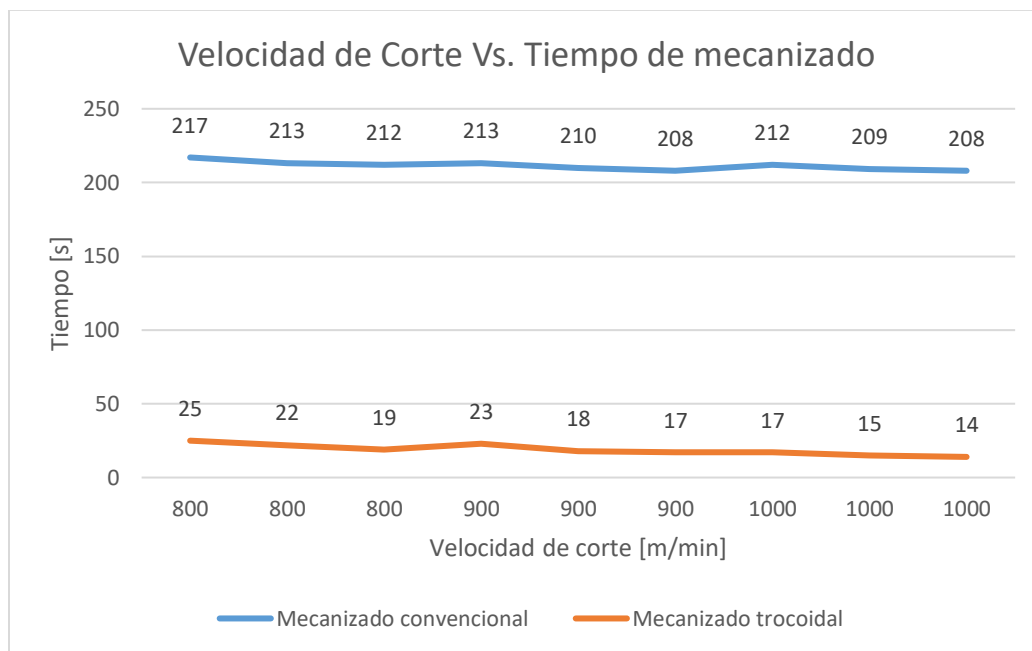


### ***Comparación de tiempo de mecanizado de las estrategias***

Al realizar una comparación de las gráficas correspondientes a la estrategia trocoidal con la estrategia convencional como se puede ver en la Figura 34, se puede apreciar de mejor forma la reducción del tiempo de mecanizado de la estrategia trocoidal, como es de esperar las dos estrategias presentan una forma similar de dientes de sierra muy suave con tendencia decreciente. De igual forma en la Tabla 21 se muestra el porcentaje de reducción del tiempo de mecanizado de la estrategia trocoidal.

**Figura 34**

*Reducción del tiempo de mecanizado de la estrategia trocoidal*

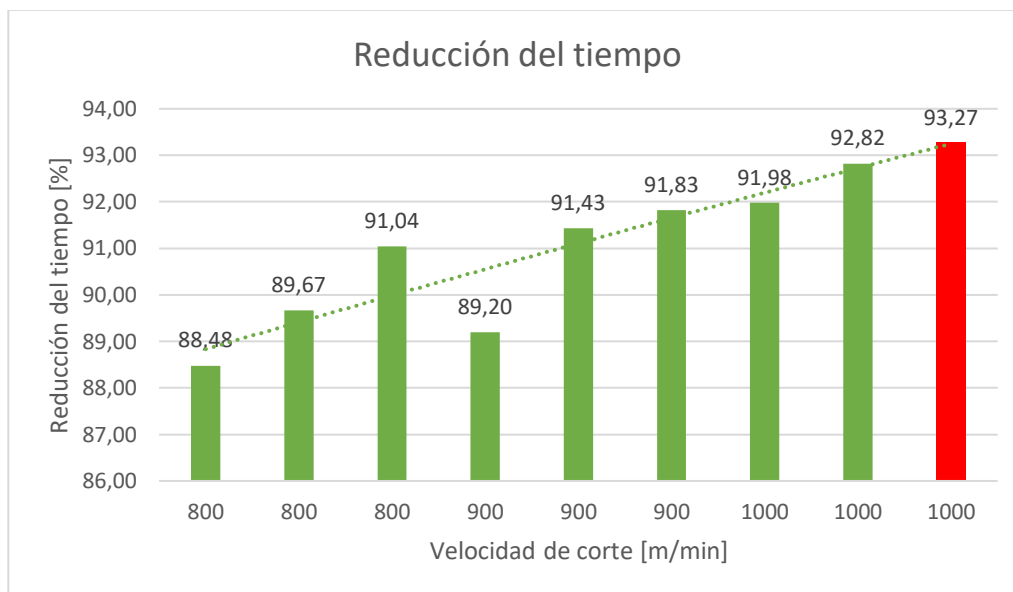


Al realizar la comparación del mecanizado de las estrategias convencional y trocoidal esta última presenta un menor tiempo de operación frente a la estrategia convencional, se puede observar en la Tabla 21 que el porcentaje de reducción del tiempo aumenta mientras incrementa la velocidad de corte y el avance por diente. Para una mayor apreciación del porcentaje de reducción de tiempo se usa un gráfico de barras mostrando su línea de tendencia creciente como se muestra en la Figura 35 con la barra de color rojo siendo sus parámetros 1000 [m/min] y 0.35 avance por diente.



**Tabla 21***Porcentaje de reducción de tiempo con estrategia trocoidal*

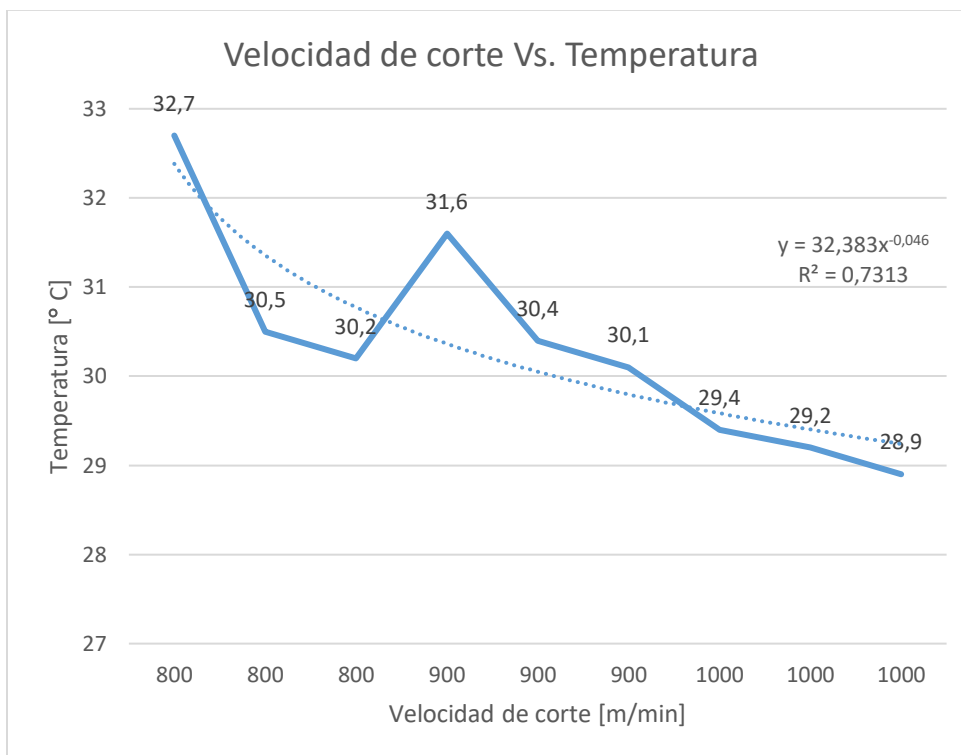
<b>Comparación de ensayo</b>	<b>E. Convencional [s]</b>	<b>E. Trocoidal [s]</b>	<b>Reducción de tiempo [s]</b>	<b>% de reducción</b>
A1B1C1- A2B1C1	217	25	192	88,48
A1B1C2- A2B1C2	213	22	191	89,67
A1B1C3- A2B1C3	212	19	193	91,04
A1B2C1- A2B2C1	213	23	190	89,20
A1B2C2- A2B2C2	210	18	192	91,43
A1B2C3- A2B2C3	208	17	191	91,83
A1B3C1- A2B3C1	212	17	195	91,98
A1B3C2- A2B3C1	209	15	194	92,82
A1B3C3- A2B3C1	208	14	194	93,27

**Figura 35***Reducción del tiempo de mecanizado***Resultados de temperatura por estrategia*****Mecanizado convencional***

Con los datos obtenidos de la experimentación mediante la metodología Taguchi, se utiliza la gráfica de línea para facilitar la interpretación visual, como se indica en la Figura 36, donde se encuentra una tendencia decreciente teniendo una velocidad de corte de 800 [m/min] y un avance por diente de 0.25 una temperatura de 32.7<sup>o</sup> C y para la misma velocidad de corte con un avance por diente de 0.35 una temperatura de 30.2<sup>o</sup> C. La línea de tendencia de todos los datos de la experimentación se ajusta a una curva exponencial con un  $R^2 = 0.7321$  con una ecuación  $y = 32.383x^{-0.046}$ .

Figura 36

*Velocidad de corte Vs temperatura de mecanizado convencional*

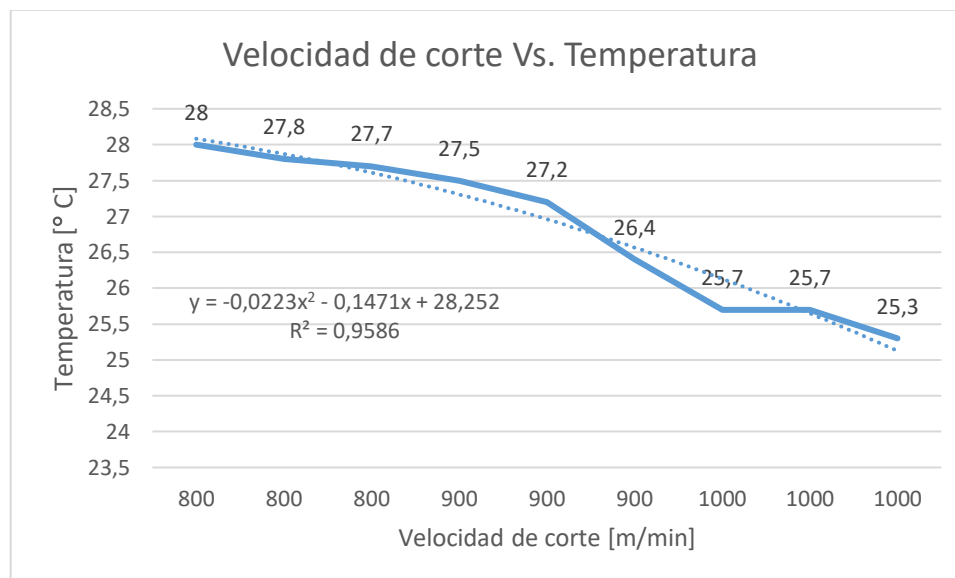


### ***Mecanizado trocoidal***

De forma similar al análisis de la temperatura con la estrategia convencional se realiza con la estrategia trocoidal, en la cual se aprecia de igual manera una tendencia decreciente, como se observa en la Figura 37, con un  $R^2 = 0.9586$  y una ecuación polinómica de segundo grado  $y = -0.0223x^2 - 0.1471x + 28.252$

**Figura 37**

*Velocidad de corte Vs. Temperatura de mecanizado trocoidal*



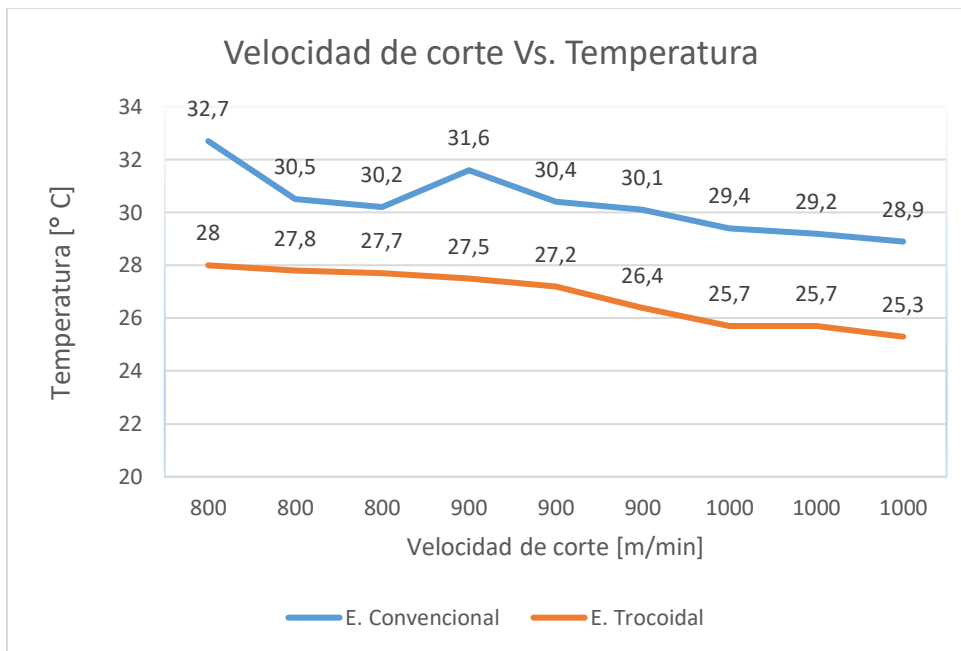
De acuerdo a la teoría propuesta y a las curvas del Dr. Salomón, el valor de la temperatura disminuye al aumentar la velocidad de corte hasta que esta se vuelva constante, en la Figura 37 se observa que para el valor de la velocidad de corte 1000 [m/min] se consigue que la temperatura se mantenga en 25°C siendo sus valores decimales quienes varían, a su vez el desgaste en la herramienta es menor y el medio de enfriamiento de la herramienta de corte es el aire en una transferencia de calor por convección.

#### ***Comparación de temperatura de las estrategias***

Al realizar la comparación de la temperatura entre estrategias de mecanizado, en la estrategia trocoidal presenta valores de temperatura menores como se puede ver en la Figura 38, lo que indica una mejor distribución de calor en la herramienta de corte por ende prolonga su vida útil.

**Figura 38**

*Comparación de temperatura entre estrategias*



### Resultados con la metodología ANOVA para el tiempo

Para realizar el análisis Anova o análisis de varianza se utilizó el software Minitab, basándose en los parámetros más influyentes de esta experimentación, con la ayuda del valor F se podrá aceptar o rechazar la hipótesis nula, en la Tabla 22 se muestra el resumen de los valores del análisis de varianza para el tiempo

**Tabla 22**

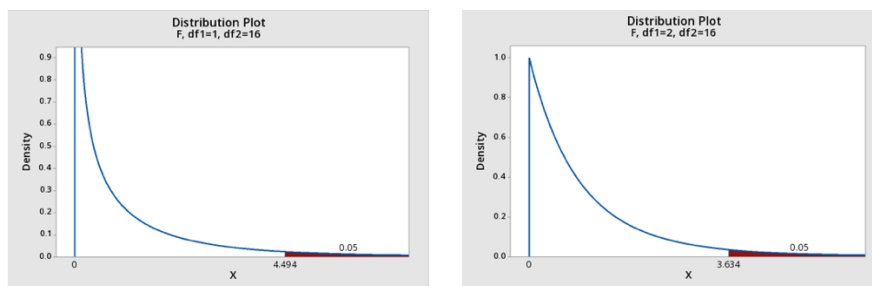
*Resumen del análisis de varianza para el tiempo*

<b>Análisis de varianza</b>						
		DOF	S	V	F	P
<b>A</b>	Estrategia	1	1666657	1666657	14905.96	0.00
<b>B</b>	Vc	2	477203.33	119346.55	4,00	0.00
<b>C</b>	Fz	2	238657.11	119328.56	4.00	0.00
	<b>Error</b>	16	179			
	<b>Total</b>	17	166836			

En la Tabla 22 se definen los resultados del análisis de varianza con un F estadístico del 95 % de confianza, el parámetro principal que define esta experimentación, es decir,  $FA(0.05:1:16)=14905.96$ , para la velocidad de corte que se tiene  $FA(0.05:2:24)=-4$  y para el avance por diente  $FA(0.05:2:24)=-4$ , al tener un valor mayor en la estrategia se rechaza la hipótesis que menciona que las medias de los datos son iguales y se acepta la hipótesis alterna que indica que la media de los datos son distintas, obteniendo un error menor que el permitido  $P < 0.05$ . como se puede ver en la Figura 39.

Figura 39

Gráfica de distribución de probabilidad F para la estrategia y para Vc y Fz respectivamente



En la Tabla 23 se puede identificar los factores de mayor influencia de la experimentación, siendo la de mayor influencia la estrategia trocoidal en la comparación del mecanizado, como se puede observar en la Figura 40 seguido de la velocidad de corte y por último el avance por diente.

Tabla 23

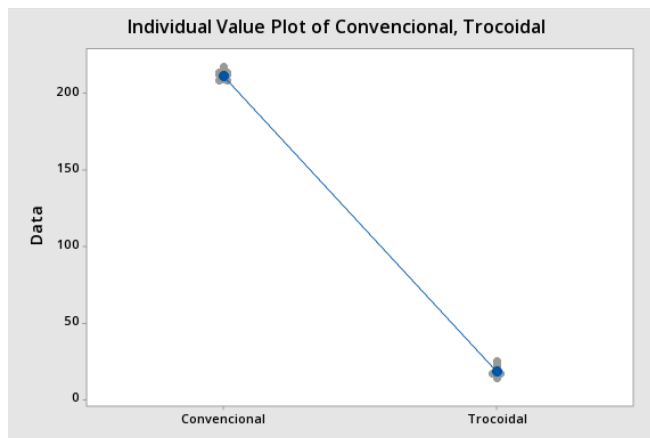
*Influencia de los parámetros de mecanizado*

Nivel	Estrategia	Vc[m/min]	Fz[mm/diente]
1	211.33	118	117,83
2	18.89	114.83	114,5
3		112.5	113
Delta	192.44	5.5	4.83
Clasificación de influencia	1	2	3

$$\text{Delta} = \text{Valor promedio máx} - \text{valor promedio mín} = 211.33 - 18.89 = 192.44$$

**Figura 40**

*Parámetro de mayor influencia en el mecanizado*



Por tanto, podemos definir que los parámetros de mecanizado para obtener un valor de temperatura estables en el mecanizado se presentan en la Tabla 24.

**Tabla 24**

*Parámetros óptimos para una temperatura estable*

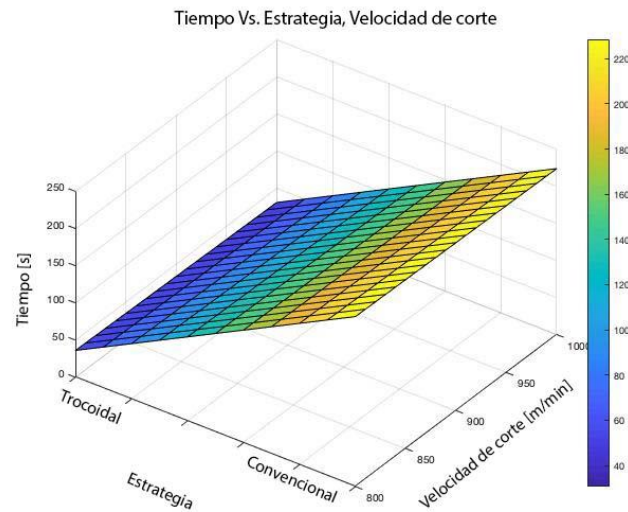
Parámetros de mecanizado	
Estrategia	Trocoidal
Velocidad de corte [m/min]	1000
Avance por diente [mm/diente]	0.35
Ancho de corte 10% [mm]	2.5
Profundidad de corte [mm]	15



En la Figura 41, se muestra la interacción del tiempo, como se observa la tendencia decreciente de la función que se refleja de la misma forma en la superficie de la estrategia de mecanizado y la velocidad de corte respecto al tiempo

**Figura 41**

*Interacción del tiempo respecto a la estrategia y velocidad de corte*



La ecuación de regresión del tiempo que relaciona los parámetros de velocidad de corte, avance por diente y estrategia del experimento, responden al modelo matemático

$$Tiempo[s] = 443.03 - 192.444 * estrategia - 0.02750 * Vc - 48.33 * fz$$

$$Tiempo[s] = 443.03 - 192.444 * 2 - 0.02750 * 1000 - 48.33 * 0.35 = 13.73 [s]$$

#### **Intervalo de Confianza**

De igual forma mediante el software Minitab se obtiene el intervalo de confianza para cada una de las estrategias con una confiabilidad del 95% como se muestra en la Tabla 25.

**Tabla 25***Intervalos de confianza*

<b>Estrategia</b>	<b>No. Ensayos</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Intervalo de confianza al 95%</b>
Convencional	9	211.33	2.915	208.971 a 213.696
Trocoidal	9	18.89	3.72	16.53 a 21.25

En la Tabla 26 se muestran los valores predictivos del análisis de datos y su confirmación con los datos experimentales de la metodología Taguchi, para comprobar la fidelidad del modelo matemático.

**Tabla 26***Valores del modelo matemático y confirmación con los valores de la experimentación*

<b>Parámetros</b>	<b>Tiempo experimental [s]</b>	<b>Tiempo del modelo matemático [s]</b>	<b>Error [%]</b>
A2B3C3	14	13.73	1.92
A1B1C1	217	216.50	0.23
A2B2C2	18	18.89	4.94

**Resultados con la metodología Anova para la temperatura**

De manera similar al análisis por tiempo, se realizó el análisis de varianza con el software Minitab, tomando como base los parámetros más influyentes de esta experimentación, con la ayuda del valor F se podrá aceptar o rechazar la hipótesis nula, en la Tabla 27 se muestra el resumen de los valores del análisis de varianza para la temperatura.

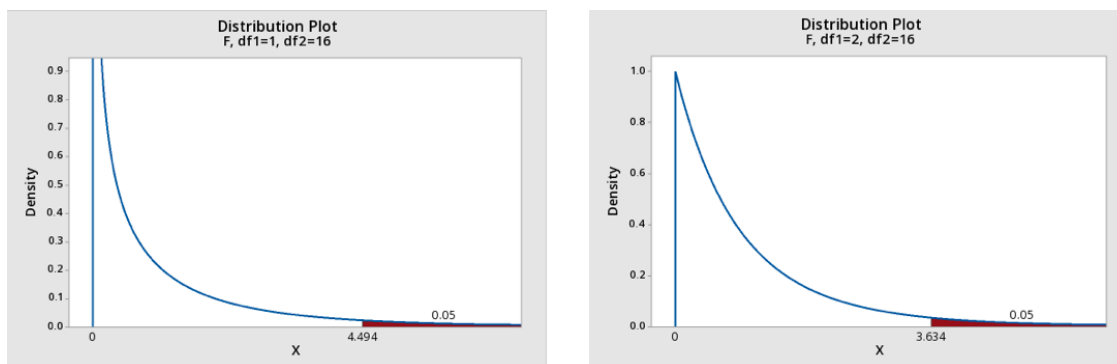
**Tabla 27***Resumen análisis de varianza*

<b>Análisis de varianza</b>						
		DOF	S	V	F	P
<b>A</b>	Estrategia	1	54.43	54.427	45.40	0.0
<b>B</b>	Vc[m/min]	2	14723.14	7361.56	4.00	0.0
<b>C</b>	Fz [mm/diente]	2	14701.51	7350.75	3.99	0.0
	<b>Error</b>	16				
	<b>Total</b>	17				

En la Tabla 27 se muestra el resumen del análisis de varianza con un F con una confiabilidad del 95% para la estrategia tenemos  $F(0.05:1:16) = 45.40$ , para la velocidad de corte y avance por diente un F correspondiente a 4, al ser estos valores mayores a los tabulados en la tablas Fisher lo que significa que se rechaza la hipótesis nula que indica que los datos son iguales y se acepta la hipótesis alterna donde las medias de los datos son distintas, por lo tanto el error permitido es menor  $P < 0.05$  siendo valores confiables que cumplen estadísticamente como se indica en la Figura 42.

Figura 42

Gráficos de distribución F crítico



En la Tabla 28 se muestra los factores más influyentes de la experimentación siendo el factor más influyente la estrategia seguido de la velocidad de corte y por último el avance por diente.

Tabla 28

Influencia de los parámetros de mecanizado

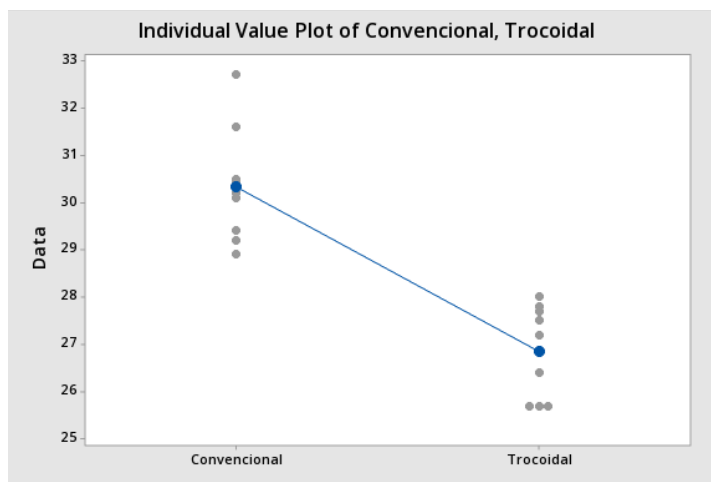
Nivel	Estrategia	Vc[m/min]	Fz[mm/diente]
1	30.33	29.48	29.15
2	26.81	28.86	28.46
3		27.36	28.1
Delta	3.52	2.12	1.05
Clasificación	1	2	3

Los parámetros óptimos para la obtención de una temperatura estable son los mismos del análisis anterior mostrados en la Tabla 28.

En la Figura 43 se muestra la tendencia de la temperatura en base a la estrategia de mecanizado utilizado.

Figura 43

*Tendencia de la temperatura en cada estrategia de mecanizado*



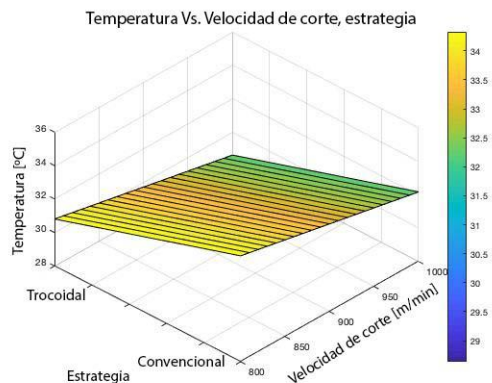
En la Figura 44, se indica la gráfica de la superficie respecto a la estrategia de mecanizado y las velocidades de corte, la ecuación de regresión lineal nos permite ajustar un modelo matemático, respecto a los datos obtenidos en la experimentación.

$$Temperatura [^{\circ}C] = 46.53 - 3.522 * estrategia - 0.01085 * Vc - 10.50 * fz$$

$$Temperatura [^{\circ}C] = 46.53 - 3.522 * 2 - 0.01085 * 1000 - 10.50 * 0.35 = 24.96^{\circ}C$$

Figura 44

*Interacción de la temperatura respecto a la estrategia y velocidad de corte*



### Intervalo de confianza

Mediante el software Minitab se obtiene el intervalo de confianza para cada una de las estrategias, con una confiabilidad del 95% como se muestra en la Tabla 29.

**Tabla 29**

*Intervalos de confianza*

<b>Estrategia</b>	<b>No. Ensayos</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Intervalo de confianza al 95%</b>
Convencional	9	30.333	1.200	29.560 a 31.107
Trocoidal	9	26.856	0.979	26.082 a 27.629

En la Tabla 30, se muestran los valores predictivos del análisis de datos y su confirmación con los datos experimentales de la metodología Taguchi, para comprobar la fidelidad del modelo matemático.

**Tabla 30**

*Valores del modelo matemático y confirmación con los valores de la experimentación*

<b>Parámetros</b>	<b>Temperatura experimental [°C]</b>	<b>Tiempo del modelo matemático [°C]</b>	<b>Error [%]</b>
A2B3C3	25.3	24.96	1.34
A1B1C1	32.7	31.70	3.05
A2B2C2	27.5	26.57	3.38

### Resultados de las estrategias

Con los resultados de la experimentación con la metodología Taguchi y Anova se muestran los parámetros en la Tabla 31, con un tiempo de reducción de mecanizado, una temperatura estable y adecuada para la herramienta de corte, con estrategia trocoidal.

**Tabla 31**

*Parámetros óptimos de mecanizado*

	Parámetros	Estrategia		% tiempo de reducción
		Convencional	Adaptativa	
Tiempo [s]	A2B3C3	208	14	93.27
Temperatura [°C]	A2B3C3	28.9	25.3	12.46

### Ensayos de confirmación

Con los parámetros óptimos para el mecanizado resultado de la experimentación con el método Taguchi detallados en la Tabla 31 se realizaron 3 ensayos de confirmación como se indica en la Tabla 32 los cuales se hallan en el intervalo de confianza realizado en el análisis Anova mediante el software Minitab, lo que corrobora la validez del estudio respecto al tiempo de mecanizado y temperatura de corte, en la Figura 45 se muestran los ensayos realizados y en la Figura 46 se muestra el tiempo de ciclo de mecanizado.

Tabla 32

*Ensayos de confirmación*

Ensayos	Parámetros de mecanizado			Resultados	
	Estrategia	Vc[m/min]	Fz[mm/diente]	Tiempo[s]	Temperatura[°C]
1	Trocoidal	1000	0.35	14	25.3
2	Trocoidal	1000	0.35	14	25.5
3	Trocoidal	1000	0.35	15	25.3

Figura 45

*Ensayos de confirmación con los parámetros de la tabla 32*

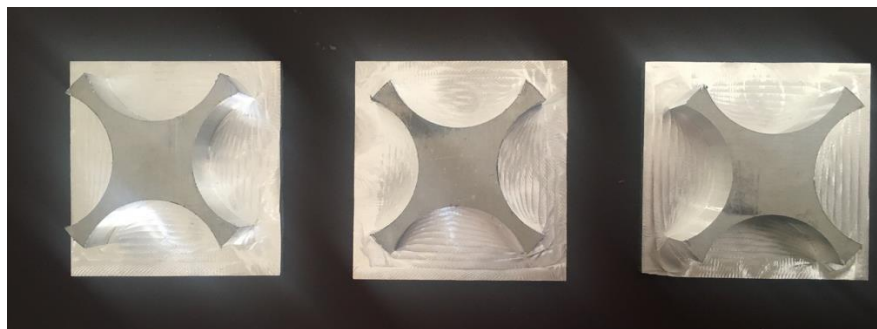
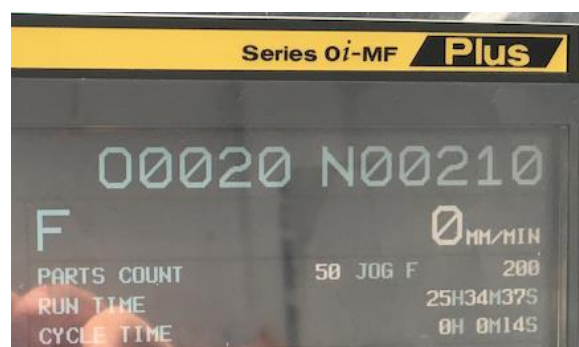


Figura 46

*Tiempo de ciclo*





### Consolidado de datos

En la Tabla 33 se muestra el consolidado de datos tanto los obtenidos en el proyecto “Experimentación de las estrategias de mecanizado adaptativas en el fresado a alta velocidad en aluminio Prodax” realizado por el Ing. Francisco Infante como los datos obtenidos del presente proyecto “Manufactura de alto rendimiento con estrategias de fresado trocoidal” que se encuentran renombrados en paréntesis.

**Tabla 33**

*Consolidado de datos*

Ensayo	Parámetros	Tiempo Simulación [s]	Tiempo de mecanizado [s]	Temperatura herramienta [°C]	Rebaba	Longitud de rebaba [mm]
<b>C1</b>	A2B1C1	318	390	72	Si	13.4
<b>C2</b>	A2B1C2	275	285	68	Si	10.1
<b>C3</b>	A2B1C3	237	240	47	Si	7.3
<b>C4</b>	A2B1C4	218	224	44	Si	5.1
<b>C5</b>	A2B2C1	343	258	57	Si	13.1
<b>C6</b>	A2B2C2	252	282	55	Si	8.2
<b>C7</b>	A2B2C3	222	227	49	Si	4.3
<b>C8</b>	A2B2C4	207	211	51	Si	7.6
<b>C9</b>	A2B3C1	313	325	48	Si	7.2
<b>C10</b>	A2B3C2	237	245	54	Si	4.2

<b>Ensayo</b>	<b>Parámetros</b>	<b>Tiempo Simulación [s]</b>	<b>Tiempo de mecanizado [s]</b>	<b>Temperatura herramienta [°C]</b>	<b>Rebaba</b>	<b>Longitud de rebaba [mm]</b>
<b>C11</b>	A2B3C3	212	213	44	Si	3.2
<b>C12</b>	A2B3C4	200	199	47	Si	2.6
<b>C13</b>	A2B4C1	291	305	43	Si	8.4
<b>C14</b>	A2B4C2	227	234	45	Si	5.1
<b>C15</b>	A2B4C3	205	210	39	Si	4.5
<b>C16</b>	A2B4C4	194	198	42	Si	3.7
<b>C17(C1)</b>	A1B1C1	215	217	32.7	No	-
<b>C18(C2)</b>	A1B1C2	211	213	30.5	No	-
<b>C19(C3)</b>	A1B1C3	209	212	30.2	No	-
<b>C20(C4)</b>	A1B2C1	212	213	31.6	No	-
<b>C21(C5)</b>	A1B2C2	209	210	30.4	No	-
<b>C22(C6)</b>	A1B2C3	206	208	30.1	No	-
<b>C23(C7)</b>	A1B3C1	210	212	29.4	No	-
<b>C24(C8)</b>	A1B3C2	207	209	29.2	No	-
<b>C25(C9)</b>	A1B3C3	205	208	28.9	No	-
<b>AD1</b>	A1B1C1	198	223	43	No	-
<b>AD2</b>	A1B1C2	99	104	44	No	-
<b>AD3</b>	A1B1C3	66	70	43	No	-
<b>AD4</b>	A1B1C4	50	53	45	No	-

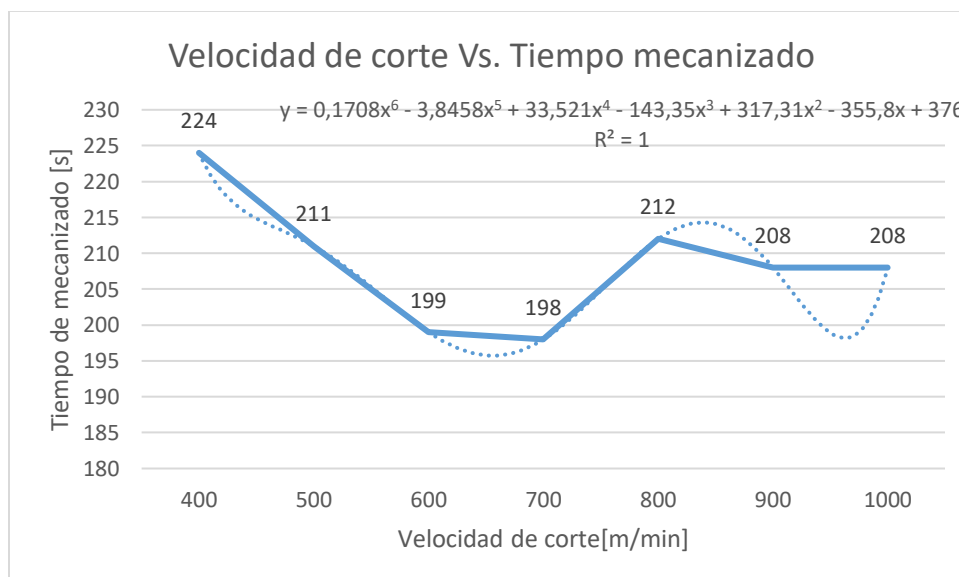
<b>Ensayo</b>	<b>Parámetros</b>	<b>Tiempo Simulación [s]</b>	<b>Tiempo de mecanizado [s]</b>	<b>Temperatura herramienta [°C]</b>	<b>Rebaba</b>	<b>Longitud de rebaba [mm]</b>
<b>AD5</b>	A1B2C1	158	165	48	No	-
<b>AD6</b>	A1B2C2	79	85	50	No	-
<b>AD7</b>	A1B2C3	53	57	51	No	-
<b>AD8</b>	A1B2C4	40	45	48	No	-
<b>AD9</b>	A1B3C1	132	135	47	No	-
<b>AD10</b>	A1B3C2	66	71	51	No	-
<b>AD11</b>	A1B3C3	44	49	48	No	-
<b>AD12</b>	A1B3C4	33	39	45	No	-
<b>AD13</b>	A1B4C1	113	117	41	Si	6.1
<b>AD14</b>	A1B4C2	57	62	39	Si	4.3
<b>AD15</b>	A1B4C3	38	44	40	Si	3.6
<b>AD16</b>	A1B4C4	28	35	36	Si	2.4
<b>T1</b>	A2B1C1	19	25	28.0	No	-
<b>T2</b>	A2B1C2	16	22	27.8	No	-
<b>T3</b>	A2B1C3	13	19	27.7	No	-
<b>T4</b>	A2B2C1	17	23	27.5	No	-
<b>T5</b>	A2B2C2	14	18	27.2	No	-
<b>T6</b>	A2B2C3	12	17	26.4	No	-
<b>T7</b>	A2B3C1	15	17	25.7	No	-

Ensayo	Parámetros	Tiempo Simulación [s]	Tiempo de mecanizado [s]	Temperatura herramienta [°C]	Rebaba	Longitud de rebaba [mm]
T8	A2B3C2	12	15	25.7	No	-
T9	A2B3C3	11	14	25.3	No	-

Utilizando un gráfico de línea para la estrategia convencional consolidada en la Figura 47, se obtiene  $R = 1$  con una ecuación polinómica de sexto grado  $y = 0,1708x^6 - 3,8458x^5 + 33,521x^4 - 143,35x^3 + 317,31x^2 - 355,8x + 376$

**Figura 47**

*Tiempo de mecanizado convencional consolidado*

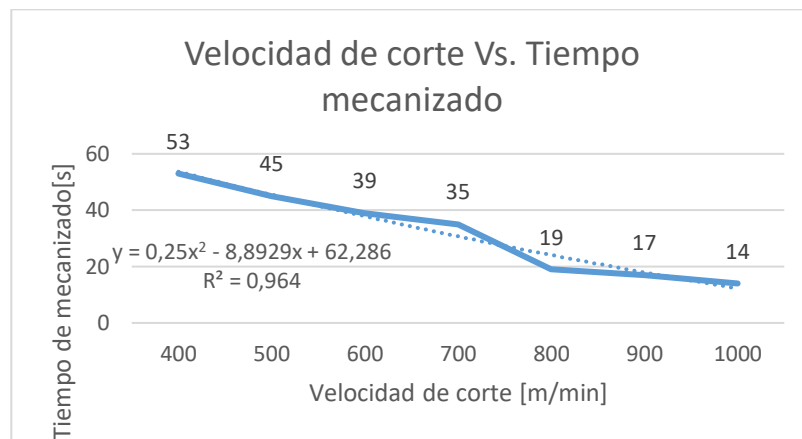


De la misma manera empleando el gráfico de línea para la estrategia trocoidal de la Tabla 33 se tiene una tendencia decreciente, como se muestra en la figura 48 con  $R = 0.964$  y con una ecuación polinómica de segundo grado  $y = 0,25x^2 - 8,8929x + 62,286$ .

Se puede observar una gran disminución del tiempo inversamente proporcional al aumento de la velocidad de corte.

**Figura 48**

*Tiempo de mecanizado trocoidal consolidado*



## Capítulo 5

### Conclusiones y recomendaciones

#### Conclusiones

- Se determinó que la trayectoria de menor tiempo es follow the periphery siendo un parámetro que influye en el tiempo de mecanizado, en la cual se establece un tiempo de operación de la estrategia de mecanizado trocoidal de 19 segundos con los parámetros A2B1C1, presenta una optimización del tiempo frente al tiempo de mecanizado de la estrategia convencional que presenta 212 segundos con parámetros A1B1C1, para una velocidad de corte de 800 [m/min] y un avance de tiempo de 0.25 [mm/diente] se obtiene un reducción del 88.48 % del tiempo, para una velocidad de corte de 1000 [m/min] y un avance por diente de 0.35 [mm/diente] se establece un tiempo de operación de la estrategia de mecanizado trocoidal de 14 segundos con los parámetros A2B3C3, presenta una optimización del tiempo frente al tiempo de mecanizado de la estrategia convencional que presenta 208 segundos con parámetros A1B3C3 una reducción del 93.27 %.
- Con el diseño de parámetros mediante la metodología Taguchi se observa que para la temperatura el parámetro de mayor influencia de la velocidad de corte, determinándose una temperatura mínima para el mecanizado convencional de 28.9 °C y una temperatura mínima para el mecanizado trocoidal de 25.3 °C siendo esta una reducción del 12.46% entre estrategias.
- En el proceso de los ensayos mediante la estrategia de mecanizado trocoidal y convencional sin uso de refrigerantes que contaminen la viruta presentan buen acabado, sin embotar la herramienta de corte en ambos casos, sin dejar rebaba en ninguna de las probetas del experimento, hubo una correcta evacuación de la viruta logrando estabilizar la temperatura de la herramienta de corte a 25 °C
- Se obtuvo una optimización de los parámetros de mecanizado de la herramienta de corte de 25 mm HSS de cuatro labios de marca Somta que se obtiene en el mercado ecuatoriano, el fabricante nos recomienda una profundidad radial de 1.25 mm y aun avance de 4800 mm/min, usándose en este estudio una profundidad radial de 2.5 mm que es un incremento del 100%, además de usar una velocidad de avance de 17825.4 [mm/min] lo que nos da un aumento de 13025 [mm/min] siendo un incremento del 271.36 %, no se presentó

picaduras ni quemaduras en la herramienta de corte durante los ensayos, lo que prolonga la vida útil de la herramienta.

- Con el análisis estadístico Anova presentado en la Tabla 22 y 27 se establecen valores de  $P < 0.05$  lo que muestra que es improbable que los datos se deban al azar, dando como resultado un estudio fiable, es decir, es probable obtener los mismo valores o semejantes al realizar el experimento bajo los mismos parámetros del estudio.
- Por medio de la ecuación de regresión correspondiente al gráfico de la Figura 41 con la combinación de parámetros A2B2C2 para el tiempo se obtuvo un error 4.94% y con la ecuación de regresión correspondiente para la temperatura de la Figura 44 un 3.38%, siendo las dos ecuaciones una buena aproximación matemática del diseño de mecanizados tanto para el tiempo y la temperatura.
- Mediante la experimentación con la metodología Taguchi se obtuvieron los parámetros óptimos de mecanizado disminuyendo el tiempo y llegando a una estabilidad de la temperatura en 25° C en la herramienta de corte con la combinación de los parámetros A2B3C3: estrategia de mecanizado trocoidal con velocidad de corte de 1000 m/min, con un avance por diente de 0.35 mm/diente. Con esta configuración de mecanizado el comportamiento del tiempo y de la temperatura es de carácter decreciente como se muestra en las Figuras 37 y 38, tal como las curvas del Dr. Salomón lo describen, que a mayor velocidad de corte la temperatura desciende hasta estabilizarse.

### **Recomendaciones**

- Tomar en consideración la importancia del uso de normas de seguridad y de laboratorio al entrar en contacto con el mismo, para disminuir el riesgo de accidentes operarios y asegurar el correcto funcionamiento de los equipos.
- Valorar el desgaste que experimenta la herramienta durante cada una de las piezas y procesos de corte realizados, para precisar su utilidad.
- Realizar correctamente la simulación CAM evitando que se generen choques tentativos que podrían generar daños en la fresa o desperfecto en la pieza a realizar.
- Realizar un estudio sobre el desgaste de las herramientas de diversas calidades siendo sometidas las mismas velocidades realizadas en el presente trabajo y conocer el nivel

de desgaste en los filos de cada herramienta, de tal forma permita determinar su utilidad y productividad.

- Efectuar un estudio experimental sobre la utilidad de emplear un mecanizado convencional y trocoidal a altas velocidades con una fresa de seis labios de carburo de tungsteno y determinar su viabilidad en comparación a una de cuatro labios HSS, comparando la rugosidad del mecanizado.



### Referencias bibliográficas

- Askeland, D., & Wright, W. (2016). *Ciencia e ingeniería de materiales*. México: Cengage Learning Editores S.A.
- ASM International. (1995). *ASM Handbook, properties and selection: Irons Steels and High Performance Alloys*. América: ASM International.
- ASM International. (1998). *Metals Handbook Desk Edición*. ASM International.
- Autodesk Fusion 360. (s.f.). Fusión 360.
- Callister, W., & Rethwisch, D. (2009). *Materials science and engineering an introduction*. Estados Unidos: John Wiley and Sons, Inc.
- Castro, G. (2008). *Mecanizado de alta velocidad*. Argentina: FIUBA.
- Catalogo Somta. (2018). Somta Catalogue. Germany.
- Cintas, G., Bartes, P., & Fernández, P. (2004). *Métodos estadísticos. Control y mejora de la calidad*. México: Alfaomega.
- Dharam, V., Murty, H., Raheem, M., Nageshwar, P., & Hasham, M. (2016). Experimental investigación of surface roughness on Al alloy by HSM using Taguchi method. *International Conference on Technological Innovations in Mechanical Engineering*.
- Dormer, P. (2018). *Dormer Pramet blog*. Obtenido de Dormer Pramet: <https://www.dormerpramet.com/es-es/pages/default.aspx>
- Douglas, S., & Kaldos, A. (1995). High - speed machining: An approach to process analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 82-87.
- Eshapeoko, O. (10 de Noviembre de 2013). *Obradoiro Eshapeoko wordpress*. Obtenido de Montaje de una fresadora cnc: <https://obradoiroeshapeoko.wordpress.com/2013/11/10/tipos-de-fresas/>
- Fluke Corporation. (2006). Infrared Thermometer data sheet.
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de Manufactura Moderna*. México: McGrawHill.
- Güemes, A., & Martín, N. (2012). *Ciencia de Materiales para Ingenieros*. Madrid: Pearson.
- Gutiérrez, H. (2009). *Control Estadístico de la Calidad y Seis Sigma*. Mexico: McGrawHill.
- Harvey Performance Company. (7 de Febrero de 2018). *8 Ways You're Killing Your End Mill*. Obtenido de harvey performance: <https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/8-ways-youre-killing-your-end-mill/>
- Hernández, A., De la Paz, M., & García, L. (2015). La metodología de Taguchi en el control estadístico de la calidad. *Investigación Operativa*, 65-83.

- Hunan Tuogao. (2021). Company Overview of China Manufacturer.
- Infante, F. (2019). *Experimentación de las estrategias de mecanizado adaptativas en el fresado a alta velocidad en aluminio prodax*. Obtenido de Repositorio Universidad de las Fuerzas Armadas Espe.
- Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoa. (2004). Mecanizado por arranque de viruta. País Vasco.
- Kalpakjian, S., & Schmind, S. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. México: Pearson.
- Krahmer, D. M. (2016). Desde el mecanizado tradicional hacia el mecanizado sustentable. *Jornada de Tecnología de la Fundición de Rafaela, Argentina*.
- Manual del centro de mecanizado Hision CFV 1100. (2021). Hision CFV. Haití: Hision CFV.
- Panshetty, S., & Bute, P. (2016). Optimization of Process Parameters in Milling Operation by Taguchi's Technique Using Regression Analysis. *International Journal For Science Technology and Engineering*.
- Pferd. (2021). Herramientas de fresado. *Herramientas de fresado*. Álaba, España.
- Ranjit, K. (2010). *A Primer On The Taguchi Method*. Michigan: Society of Manufacturing Engineers.
- Sánchez Sola, J., Sebastián, M., Carrilero, M., González, J., & Marcos, M. (2005). Caracterización de la capa y el filo adherido en el mecanizado de la aleación AA7050. *Rev. Metalurgia*, 365-368. Obtenido de <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/1057/1069>
- Sandvik. (2017). Formación manual tecnología de mecanizado de metal. *Fresado*. España.
- Sandvik Coromant. (2019). *Sandvik Coromant*. Obtenido de Recorte y fresado trocoidal: <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/pages/slicing-trochoidal-milling.aspx>
- Siemens NX. (2017). *Siemens Digital Industries Software*. Obtenido de <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/products/nx/nx-for-design.html>
- Uddeholm. (2020). Ficha técnica Prodax. Suecia: Uddeholm.
- UNE Normalización Española. (27 de mayo de 2009). Máquinas herramienta. Seguridad. Centros de mecanizado. *UNE- EN 12417:2002+A2*. Genova, Madrid, España: AENOR.
- Víctor Torcuato Castillo. (2017). *Herramientas de análisis para la mejora de la calidad*. Obtenido de Instituto tecnológico de apizaco: <https://mejoradelacalidad-victortorcuato.weebly.com/125-genichi-taguchi.html>

