

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO DE
TALADRADO DE PLANCHAS DE ACERO ASTM A36, EN CENTRO
DE MECANIZADO CNC, CON DIFERENTES CONDICIONES DE
LUBRICACIÓN, BAJO CRITERIOS DE SOTENIBILIDAD**

COMPONENTE DE TRABAJO: SIN LUBRICACIÓN

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

RONNY BLADIMIR SAGÑAY MOYON

ronny.sagnay@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. CESAR RICARDO AYABACA SARRIA PhD

cesar.ayabaca@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2024

CERTIFICACIONES

Yo, Ronny Bladimir Sagñay Moyon declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Ronny Bladimir Sagñay Moyon

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Ronny Bladimir Sagñay Moyon, bajo mi supervisión.

ING. Cesar Ricardo Ayabaca Sarria PhD
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

RONNY BLADIMIR SAGÑAY MOYON

ING. CESAR RICARDO AYABACA SARRIA PHD

DEDICATORIA

Dedico este Trabajo de Integración Curricular a todas las personas que han sido mi fuente de inspiración, fortaleza y superación a lo largo de mi arduo camino universitario en la Facultad de Ingeniería Mecánica y en el desarrollo de este proyecto.

A los seres que me dieron la vida, Diego y Lilian por brindarme su apoyo y amor incondicional, ya que gracias al sacrificio constante que realizaron día a día, han sido mi faro y motivación. Se transformaron en el impulso que necesitaba en los días de incertidumbre. Vuestra dedicación y aliento han sido la fuerza que me ha sostenido en cada paso de este viaje.

A mis queridos hermanos menores, Junior y Britany que me brindaron todo su apoyo, amor y comprensión inquebrantablemente. Han sido mi refugio y mi inspiración para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. Gracias a ellos me motive a superarme como persona y hermano mayor. Siempre buscado ser su modelo a seguir, un ser humano respetuoso, lleno de virtudes y soñador, porque todos los sueños se hacen realidad y como muestra de ello se tiene este acontecimiento.

Por último, pero no menos importante le dedico este TIC al pequeño de la casa, a mi hermanita Cristel, que fue la personita que llegó a iluminar todos los corazones de mi hogar, siempre sacándonos una sonrisa con sus ocurrencias.

Finalmente, quiero dedicarle mi triunfo a nuestro hogar, que a pesar de ser muy pequeño y de tener demasiadas limitaciones económicas. Se goza de alegría, confianza y sobre todo de amor mutuo entre nosotros, porque lo más importante no es el poder adquisitivo sino el sentimental y nosotros contamos con un mar de emociones, donde el más pequeño detalle se transforma en un bonito recuerdo.

Los quiero mucho, Ronny Sagñay

AGRADECIMIENTO

En primera instancia quiero agradecer a mis padres Diego y Lilian por todo el apoyo brindado, por los consejos impartidos y por qué no, por los jalones de oreja que me dieron. Gracias a sus enseñanzas y el depositar su confianza y sueños en mí, han logrado forjar una persona de bien, llena de virtudes y buenos valores. Espero no haberlos defraudado.

A mis tres hermanos pequeños, Junior, Britany y Cristel, por ser ese motivo que no me permitió lanzar la toalla en incontables ocasiones, quiero agradecerles por el apoyo en todas mis ocurrencias dentro de mi hogar y quiero decirles que el día de nuestra suerte esta a punto de llegar.

A mi director de tesis, Ing. Cesar Ayabaca, por su orientación experta, su paciencia infinita y su fe en mí. Sus sabios consejos y apoyo constante fueron la luz que iluminó mi camino hacia la culminación de este proyecto.

A mi querida abuelita María, quiero agradecerle por siempre recibirme con un abrazo. Recuerdo las tardes en las que me enseñabas historias de vida, compartías tus experiencias y me inspirabas con tu sabiduría. Nunca olvidare que siempre me brindaste un techo, cobijas y un lugar al que puedo regresar. Espero tenerte muchos años a mi lado.

A mi familia materna, Angelica, Ximena, Rosa, Guaño y Gladys, mis queridas ñañas. Por los consejos brindados, el apoyo incondicional y los viajes realizados, porque sé que siempre puedo llegar a sus hogares y sentirme parte de ustedes, ya que siempre recibieron a mi familia con los brazos abiertos y una sonrisa.

De igual forma, a mi tío Edwin y mi abuelito Angel, que en paz descasen, quiero agradecerles por demostrarme que la vida puede llegar a ser tan divertida, buena y maravillosa, que los problemas tienen solución y que siempre se deben hacer las cosas de forma recta y correcta.

A todos mis primos maternos, porque siempre fueron una salida a mis problemas, gracias por estar ahí conmigo, por hacer de mis días más alegres, quiero que sepan que pueden contar conmigo para lo que sea, siempre y cuando este dentro de mi alcance.

A mis amigos, los cuales formamos el Dream Team, Las Abusivas, Team Sangre. Por todas las tardes de locura, porque una hora sentados conversando de cualquier tema, aliviaban mí estrés y preocupación, por las noches de discord y por el campeonato que jugamos, siempre supimos que merecimos pasar, por el baile de viudas que también merecimos ganar. Gracias Muchachos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	X
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Proceso de Mecanizado	3
1.4.2 Proceso de Mecanizado para realizar agujeros	3
1.4.3 Herramienta de Corte (Broca)	5
1.4.4 Material.....	7
1.4.5 Proceso de Taladrado en el Centro de Mecanizado.....	8
1.4.6 Tecnología de Viruta	8
1.4.7 Acabado o Calidad Superficial	9
1.4.7.1 Rugosidad Superficial	9
1.4.7.2 Análisis para la Rugosidad Superficial (Ra)	12
1.4.8 Tolerancia Dimensional	13
1.4.8.1 Cilindricidad o Conicidad	13
1.4.8.2 Calidad de Tolerancia (IT)	14
2 METODOLOGÍA.....	16
2.1 Procedimiento para realizar la Experimentación.....	16
2.2 Selección del Material	17
2.3 Selección de la Máquina – Herramienta CNC.....	18
2.4 Selección de la Herramienta de Corte (Broca).....	19
2.5 Diseño de la Experimentación	20

2.5.1	Diseño Experimental Latino 5x5.....	21
2.5.2	Cuantificación del Método Experimental	23
2.5.3	Número total de Experimentos (Combinaciones) a realizarse.....	23
2.6	Cuantificación numérica de los Parámetros de Mecanizado (Variables Independientes)	25
2.6.1	Cálculo del rango de aplicación para la velocidad de Corte	25
2.6.2	Cálculo del rango de aplicación para la velocidad de avance	26
2.7	Pruebas Iniciales (Taladrado)	27
2.7.1	Prueba Inicial N°1 – Valores Críticos con Lubricación.....	28
2.7.2	Prueba Inicial N°2 – Valores Moderados con Lubricación.....	29
2.7.3	Prueba Inicial N°3 – Valores Moderados sin Lubricación	30
2.7.4	Parámetros empleados en la Experimentación	31
2.8	Preparación previa de las Probetas	32
2.8.1	Corte y Limado de las Probetas para el Taladrado en el Centro de Mecanizado	32
2.8.2	Codificación de las Probetas	34
2.9	Desarrollo de las Experimentación (Taladrado)	35
2.9.1	Taladrado en el Centro de Mecanizado.....	35
2.10	Mediciones.....	36
2.10.1	Medición del Tiempo de Mecanizado.....	36
2.10.2	Medición de la Rugosidad Superficial	37
2.10.3	Medición de la Cilindricidad o Conicidad y el Diámetro Maquinado del Agujero.....	38
3	PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES....	40
3.1	Parámetros de Prueba	40
3.2	Resultados	40
3.3	Análisis de Resultados.....	42
3.3.1	Tiempo de Mecanizado	42
3.3.2	Calidad Superficial.....	43
3.3.2.1	Rugosidad Superficial (Ra).....	43
3.3.3	Tolerancia Dimensional	47
3.3.3.1	Cilindricidad o Conicidad	47
3.3.3.2	Diámetro Maquinado	50
3.3.3.3	Calidad de Tolerancia del Agujero	53
3.3.4	Análisis de Viruta.....	54

3.3.5	Análisis de las posibles Combinaciones para los Parámetros de Mecanizado	55
3.3.5.1	Combinación de los Parámetros de Mecanizado Recomendables	55
3.3.5.2	Combinación de los Parámetros de Mecanizado no Recomendables.....	57
3.4	Conclusiones	59
3.5	Recomendaciones	61
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
5	ANEXOS.....	65
	ANEXO I. Conjunto de Mediciones (Rugosidad Superficial)	65
	ANEXO II. Conjunto de Mediciones (Cilindricidad o Conicidad).....	66
	ANEXO III. Análisis de Viruta	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Proceso de Mecanizado para Agujeros.....	4
Figura 1.2: Geometría a detalle de la Herramienta de Corte (Broca).	5
Figura 1.3: Ángulos y Fuerzas de corte en la punta de Herramienta de la Corte.....	6
Figura 1.4: Rugosidad superficial en piezas maquinadas.	10
Figura 1.5: Perfil de rugosidad para la media aritmética.	11
Figura 1.6: Cilindricidad o Conicidad de un agujero.	14
Figura 1.7: Calidad de Tolerancia IT, para agujeros según la Norma ISO.....	15
Figura 2.1: Diagrama de flujo para el proceso de Taladrado.....	16
Figura 2.2: Plancha de Acero ASTM-A36.	17
Figura 2.3: Propiedades mecánicas y composición química del Acero ASTM A36.	17
Figura 2.4: Centro de Mecanizado VIWA VCM3M400.	18
Figura 2.5: Especificaciones Técnicas del Centro de Mecanizado VIWA VCM3M400. ...	19
Figura 2. 6: Caja de Herramienta de Corte de la marca DEBOR.....	20
Figura 2.7: Herramienta de corte (Broca) de ϕ 1/2 [in] marca DEBOR GERMANY.	20
Figura 2.8: Esquematación del Proceso de Taladrado.	22
Figura 2.9: Combinaciones totales para el método experimental 5x5.	23
Figura 2.10: Prueba Inicial N°1, valores críticos Velocidad Husillo (n) y Avance (fn).....	28
Figura 2.11: Resultado Prueba N°1, valores críticos Velocidad (n) y (fn).	29
Figura 2.12: Resultado Prueba N°2, reduciendo 70 [%] Velocidad (n) 30 [%] (fn).....	30
Figura 2.13: Prueba N°3, reduciendo 70 [%] Velocidad (n) 30 [%] (fn), sin lubricación. ..	31
Figura 2.14: Corte de la plancha de Acero ASTM A36, en tramos de 100 [mm].....	33
Figura 2.15: Probetas cortadas y limadas a mano, antes de ser experimentadas.....	33
Figura 2.16: Sistema de codificación aplicado en la experimentación.....	35
Figura 2.17: Código G empleado para el Taladrado en el Centro de Mecanizado.	36
Figura 2.18: Medición del Tiempo de Mecanizado para la probeta VA4 - MT.....	37
Figura 2.19: Medición Rugosidad Superficial con el Rugosímetro Mitutoyo SJ-20.	37
Figura 2.20: Manera en la cual se tomó las mediciones respectivas.....	38
Figura 2.21: Medición de la Cilindricidad o Conicidad del agujero taladrado.	39
Figura 3.1: Tiempo de Mecanizado vs Velocidad de Avance.	42
Figura 3.2: Rugosidad Promedio vs Velocidad del Husillo.	44
Figura 3.3: Rugosidad Promedio vs Velocidad de Avance.....	45
Figura 3.4: Rugosidad Superficial Promedio Vs Velocidad Husillo y Avance.	46
Figura 3.5: Conicidad vs Velocidad del Husillo.....	48
Figura 3.6: Conicidad vs Velocidad de Avance.	49
Figura 3.7: Conicidad Vs Velocidad del Husillo (n) y de Avance (fn).....	50
Figura 3.8: Error Porcentual de las probetas Vs la Velocidad de Avance.....	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Grado o Calidad de Rugosidad Superficial (Ra).	12
Tabla 1.2: Relación entre Indicadores en Diseño y Rugosidad Superficial.	13
Tabla 2.1: Parámetros de Mecanizado con niveles aplicación, para Método Latino 5x5. .21	
Tabla 2.2: Número total de Experimentos (combinaciones) a efectuarse.	24
Tabla 2.3: Rango de Velocidad de Corte (Vc), en SFM.	25
Tabla 2.4: Velocidad de Corte y Husillo recomendado por el fabricante de la Broca.	26
Tabla 2.5: Rango de Avance para la Broca de 1/2 [in].....	26
Tabla 2.6: Avance y Velocidad de Avance recomendado por fabricante de la Broca.....	27
Tabla 2.7: Valores de Velocidad del Husillo y de Avance para las pruebas iniciales.	28
Tabla 2.8: Parámetro de Experimentación.	32
Tabla 2.9: Tabla de referencia para la codificación de las probetas.	34
Tabla 3.1: Resumen de resultados obtenidos de medir los Parámetros de Prueba.	41
Tabla 3.2: Rugosidad Superficial con su grado de rugosidad, para cada probeta.	43
Tabla 3.3: Cilindricidad o Conicidad obtenidas posterior a la experimentación.....	47
Tabla 3.4: Tabla de Errores Porcentuales entre el Diámetro Obtenido y el Esperado.	51
Tabla 3.5: Calidad de Tolerancia y Zona de Tolerancia de agujero Taladrado.	53
Tabla 3.6: Combinación de Variables de cada Parámetro de Prueba Recomendable.	55
Tabla 3.7: Parámetros de Prueba de la probeta recomendada VMB2-MT.....	56
Tabla 3.8: Combinación de Variables de cada Parámetro de Prueba no Recomendado. .57	
Tabla 3.9: Parámetros de Prueba de la probeta no recomendada VA3-MT.....	58

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. 1 Velocidad de corte.....	6
Ecuación 1. 2: Velocidad de avance.....	7
Ecuación 1. 3 Rugosidad superficial.....	10
Ecuación 1. 4 Media aritmética de la Rugosidad Superficial.....	11
Ecuación 1. 5 Rugosidad media cuadrática.....	11
Ecuación 1. 6: Cilindricidad o Conicidad de un agujero.....	14

RESUMEN

El presente Trabajo de Integración Curricular tiene como propósito principal el análisis y determinación de la combinación óptima que se puede llegar a dar entre las variables de mecanizado, Velocidad del Husillo (n) y de Avance (f_n), que den como resultado los mejores parámetros de prueba que se puedan llegar a obtener del taladrado de planchas de Acero ASTM A36 de 12 [mm] de espesor, maquinados en el Centro de Mecanizado VIWA VCM3M400 con controlador CENTROID M400AC, sin utilizar lubricación.

Para ello, se emplea el método Experimental Latino 5x5 que involucra las dos variables de mecanizado en cinco niveles de aplicación diferentes, pasando desde el valor más alto (crítico) hasta llegar al más bajo (acogedor), dando como resultado un total de 25 combinaciones posibles (experimentos) a efectuarse.

En ese sentido, se toma como punto de partida los valores recomendados por el fabricante de la Herramienta de Corte para la determinación de los niveles de aplicación de las variables de mecanizado. Teniendo en cuenta que se pretende taladrar Acero ASTM A36, se emplea una broca de cobalto de ½ pulgada de la marca DEBOR GERMANY.

Para obtener los parámetros de prueba, se realiza la medición de la Rugosidad Superficial (R_a), Tiempo de mecanizado y Tolerancia Dimensional, con los equipos disponibles en el laboratorio, rugosímetro Mitutoyo SJ-210, cronometro digital y el calibrador Mitutoyo. Donde se analiza el Grado de Rugosidad, Tiempo, Conicidad y Calidad de Tolerancia.

Finalmente se determina la combinación más recomendable haciendo énfasis en obtener una Tolerancia Dimensional óptima.

PALABRAS CLAVE: Velocidad del Husillo, Velocidad de Avance, Calidad de Tolerancia, Grado de Rugosidad, Tiempo de Mecanizado, Conicidad, Variables de Mecanizado, Parámetros de Prueba.

ABSTRACT

The primary aim of this Curricular Integration Project is to analyze and determine the most suitable combination of machining variables, specifically Spindle Speed (n) and Feed Rate (f_n), to establish effective test parameters for drilling 12 [mm] thick ASTM A36 Steel plates. The machining operations are conducted on the VIWA VCM3M400 Machining Center, which is equipped with a CENTROID M400AC controller, and lubrication is omitted for this process.

To achieve this goal, the Latin Experimental Method 5x5 is implemented, which involves exploring the two machining variables across five distinct application levels. These levels span from the highest critical values to the lowest welcoming values, resulting in 25 potential combinations (experiments) for comprehensive analysis.

Starting with the recommendations provided by the Cutting Tool manufacturer, the application levels of the machining variables are established. A ½ inch cobalt drill bit from DEBOR GERMANY brand is utilized for the drilling operations on ASTM A36 Steel plates.

Test parameters, including Surface Roughness (R_a), Machining Time, and Dimensional Tolerance, are meticulously measured using laboratory equipment such as the Mitutoyo SJ-210 roughness meter, digital stopwatch, and Mitutoyo caliper. The analysis encompasses various aspects, including Roughness Grade, Time, Conicity, and Tolerance Quality.

Ultimately, the study seeks to identify the most optimal combination, with a particular emphasis on achieving the optimal Dimensional Tolerance, which is crucial for machining operations.

KEYWORDS: Spindle Speed, Feed Rate, Tolerance Quality, Roughness Grade, Machining Time, Conicity, Machining Variables, Test Parameters.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

La industria ecuatoriana ha ido evolucionando con el paso del tiempo, cada día se emplean nuevas tecnologías en el desarrollo ingenieril del Ecuador, siempre buscando la optimización de sus procesos y la reducción de costos, es ahí, donde se han implementado equipos tales como, máquinas y herramientas CNC, es decir, control numérico por computadora para la manufactura de piezas mecánicas.

Este Trabajo de Integración Curricular se centra en la operación de taladrado, realizado en el centro de mecanizado (máquina CNC), a planchas de Acero ASTM A36, ya que cuenta con gran influencia en el proceso global de fabricación y unión de perfiles metálicos en todo el mundo, por lo que esta investigación puede ayudar a obtener los parámetros óptimos de mecanizado. Además, que en este tipo de máquinas se puede controlar de forma numérica y precisa varios parámetros de importancia, tales como, la velocidad de corte (V_c), juntamente con la velocidad de avance (f_n) y la profundidad de corte (a_p).

En este sentido, se busca evaluar la calidad del proceso de mecanizado, mediante la medición y comparación de la rugosidad superficial, tiempo de maquinado, diámetro final y tolerancia dimensional, obtenidos después de realizar la perforación de las planchas metálicas, sin ningún tipo de lubricación, de esta forma, se asegura una metodología más amigable con el medio ambiente y con la salud del operador. Además, de reducir costos y alargar el tiempo de vida útil del equipo.

Para este propósito, se aplica un rango de velocidades que va desde lo más alto (crítico) pasando por el valor medio (suave) y llegando hasta lo más bajo (acogedor). Donde, el criterio de experimentación empleado es el diseño experimental latino 5x5, teniendo en cuenta de que existen dos parámetros de análisis con cinco niveles diferentes de aplicación, tendríamos un total de 25 combinaciones posibles (experimentos).

Es así, que se asegura la presencia de diferentes condiciones de mecanizado para cada experimento realizado a las 25 probetas que cuentan con un espesor de 12 [mm].

Por lo tanto, se desea determinar la combinación más recomendable que se puede dar entre los parámetros de mecanizado, velocidad de corte (V_c) y de avance (f_n). Que logre obtener las mejores condiciones de prueba (acabado superficial, tiempo de mecanizado y tolerancia dimensional) mediante la medición y comparación de cada uno de ellos, por medio de los diferentes equipos disponibles en el laboratorio de Maquinas – Herramientas, tales como el rugosímetro Mitutoyo SJ-210, cronometro digital y el calibrador Mitutoyo, el

cual, esta calibrado hasta el mes de junio del 2024, con el propósito de obtener el menor error posible en las mediciones finales del agujero.

Este experimento se realiza sin emplear ningún tipo de lubricación, y utilizando el centro de mecanizado VIWA VCM3M400 con controlador CENTROID M400AC, para perforar planchas de Acero ASTM A36, empleando el menor tiempo posible junto con un bajo costo de operación, aplicado a un total de 25 probetas de espesor 12 [mm].

1.1 Objetivo general

Determinar y evaluar los parámetros óptimos de mecanizado que se obtener mediante la aplicación del Centro de Mecanizado para realizar perforaciones en planchas de Acero ASTM A36, sin lubricación y valorarlos mediante los resultados obtenidos en la calidad del acabado superficial, el tiempo empleado durante todo el proceso de taladrado del material y la tolerancia dimensional.

1.2 Objetivos específicos

1. OE1: Establecer los parámetros óptimos (Variables de Mecanizado) del Centro de Mecanizado para realizar perforaciones en planchas de Acero ASTM A36.
2. OE2: Obtener las gráficas que describan el comportamiento de las condiciones finales del material taladrado frente a las variables de mecanizado antes determinados.
3. OE3: Establecer el tiempo óptimo de mecanizado para planchas de Acero ASTM A36, empleando el Centro de Mecanizado.
4. OE4: Analizar el acabado superficial de las panchas de Acero ASTM A36, mediante la medición de la rugosidad superficial, aplicando el rugosímetro Mitutoyo SJ-210.
5. OE5: Determinar la mejor Tolerancia Dimensional que se puede obtener después de aplicar las variables de mecanizado a cada una de las probetas experimentadas.

1.3 Alcance

El objetivo de este Trabajo de Integración Curricular es la identificación de los parámetros óptimos para el proceso de perforación en planchas de Acero ASTM A36, sin lubricación y utilizando el centro de mecanizado. Es así, que el alcance del trabajo incluirá una revisión bibliográfica de las especificaciones y las características que tenga la herramienta de corte, además, de investigar los procesos de mecanizado para realizar perforaciones, la cuantificación de los condiciones de mecanizado (parámetros de prueba), el desarrollo del

código de programación en el software INVENTOR para estas máquinas y la determinación de los niveles de aplicación para las variables de mecanizado (V_c y f_n) necesarios para realizar agujeros de $\frac{1}{2}$ de pulgada, tomando como referencia los valores recomendados por el fabricante de la herramienta de corte. Posteriormente, se realizarán 25 pruebas en planchas de Acero ASTM A36 que tienen un espesor de 12 [mm]. Donde, la calidad del mecanizado será evaluado en función de los resultados que pueden obtener en los diferentes parámetros de prueba (Tiempo de Mecanizado, Calidad Superficial y Tolerancia Dimensional), frente a la velocidad de corte (V_c) y velocidad de avance (f_n), juntamente, con el tipo de herramienta empleada durante el proceso, de esta forma, se determina la combinación óptima que maximice la eficiencia del mecanizado y la calidad de las piezas perforadas.

1.4 Marco teórico

Para determinar los parámetros óptimos del taladrado de planchas de acero ASTM A36, se realiza una revisión bibliográfica exhaustiva de los principales conceptos que lo definen.

1.4.1 Proceso de Mecanizado

En el mecanizado, se lleva a cabo un proceso de manufactura mediante el cual se logra la forma deseada mediante la eliminación controlada de material. Dependiendo del método empleado, se pueden distinguir las operaciones de mecanizado por arranque de viruta o abrasión (Pérez, 2020). Este documento se centrará únicamente en las operaciones de arranque de viruta y en el taladrado de planchas de acero.

El proceso de mecanizado tiene como resultado dar la forma y dimensiones finales a las piezas mecánicas, todas las operaciones consisten en el arranque de viruta de materiales metálicos, aunque también se la pueda aplicar a materiales compuestos, tales como los polímeros (UMESAL, 2019).

1.4.2 Proceso de Mecanizado para realizar agujeros

Existen un sinnúmero de operaciones que se pueden realizar para mecanizar agujeros en planchas de acero, pero todas ellas se caracterizan por el arranque de viruta que se genera por el choque de dos movimientos, por un lado, se tiene el movimiento rotativo de la herramienta y por el otro, el de avance o penetración en la pieza, como se aprecia en la Figura 1.1.

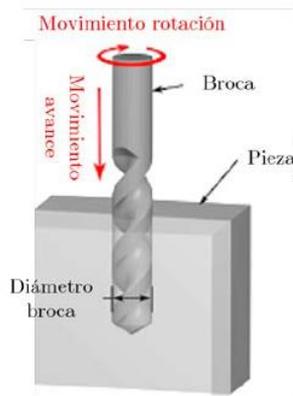


Figura 1.1: Proceso de Mecanizado para Agujeros.

Fuente: (Group, 2016)

Taladrado: Es un mecanizado que permite mecanizar agujeros ciegos o pasantes, ya que, se emplea una broca como herramienta de corte, dependiendo de las características del agujero perforado.

- En el caso, donde el agujero necesite de una segunda pasada para conseguir las dimensiones requeridas, se lo denomina taladrado previo.
- Por otro lado, el taladrado definitivo se trata de conseguir las dimensiones requeridas en una sola pasada. Este proceso se lo conoce también como One Shot Drilling (OSD).
- Finalmente, el taladrado profundo que se realiza en planchas con espesor muy grande en relación con el diámetro de la broca se aplica en geometrías y condiciones especiales.

Escariado: Consiste en agrandar un agujero existente en la superficie de la plancha hasta conseguir las dimensiones y el acabado superficial deseado. La herramienta es el escariador.

Mandrinado: Es un mecanizado muy similar al Escariado, pero con un acabado superficial más deficiente y sin alcanzar las dimensiones requeridas.

Avellanado: Se trata de realizar una superficie cónica a la entrada del taladro para crear remaches en un agujero ya existente en la superficie de la plancha de acero.

Normalmente, los agujeros son maquinados directamente sobre la superficie de la plancha de acero, este proceso se conoce como taladrado virgen. Aunque en algunos casos, ya se encuentran agujeros que, por los requisitos del ensamblaje, no alcanzan el diámetro

requerido, necesitan ser maquinados con operaciones denominadas re-taladrado o taladrado sobre un agujero previo.

1.4.3 Herramienta de Corte (Broca)

La herramienta que casi siempre se emplea en el taladrado de planchas de acero es una Broca, la cual, representa una pieza cilíndrica, que cuenta con labios afilados y un elemento puntiagudo, que gira a gran velocidad, para el arranque del material y la perforación de la plancha de acero.

Normalmente, las brocas se dividen en tres partes, mango, cuerpo y punta. Como se muestra en la Figura 1.2.

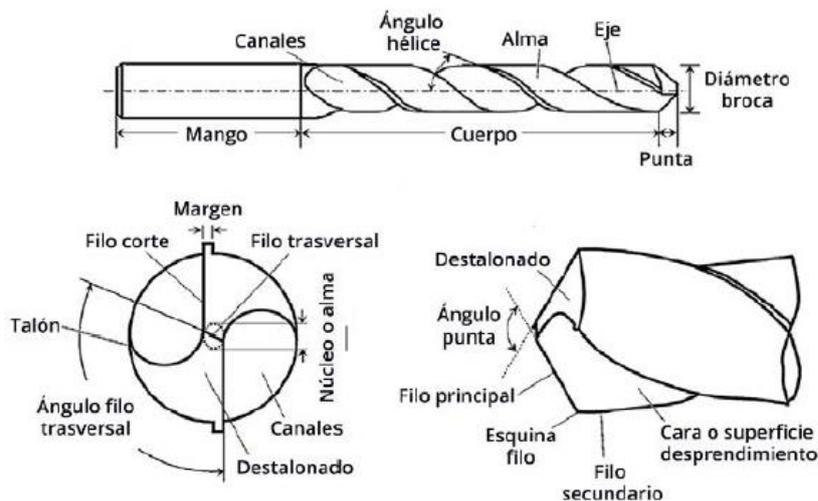


Figura 1.2: Geometría a detalle de la Herramienta de Corte (Broca).

Fuente: (Contreras, 2014)

- **El mango:** Es la parte de la broca que se ensambla con el portaherramientas de la máquina herramienta, la cual, le proporciona el movimiento rotatorio y evite las vibraciones muy fuertes.
- **El cuerpo:** Se trata de la parte más compleja de la broca, ya que, en su superficie se encuentran los labios afilados, los canales helicoidales permiten evacuar la viruta que se genera durante el proceso de mecanizado. El ángulo de hélice clasifica las brocas en espiral rápida (con un ángulo de hélice grande), regular o convencional (con ángulos alrededor de 40 grados) y lenta (con ángulos pequeños). Un incremento en el ángulo de hélice conlleva a un aumento en la tasa de eliminación de material durante el proceso de mecanizado. (Pérez, 2020).

- **La punta:** Es la parte de la herramienta que corta el material. Por lo general, está hecha de un acero mucho más duro que el de la plancha. Además, para materiales muy resistentes se emplean brocas con ángulos mayores, mientras que, para los materiales blandos, se usan ángulos menores.

El arranque de viruta por parte de la broca depende del filo de corte principal. Donde su geometría se define en función de dos ángulos, como se aprecia en la Figura 1.3.

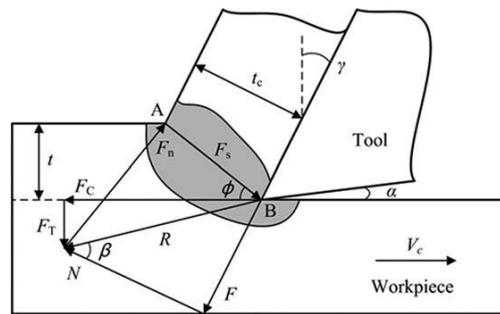


Figura 1.3: Ángulos y Fuerzas de corte en la punta de Herramienta de la Corte.

Fuente: (Contreras, 2014)

Normalmente, se definen los siguientes ángulos:

- **Incidencia (α):** Es el ángulo de apoyo del filo de corte y rozamiento entre el destalonado de la broca y el material. Mientras, mayor sea el ángulo, menor será la interacción entre la herramienta y la superficie de la plancha.
- **Desprendimiento (γ):** Es el ángulo que está formado por la cara de la herramienta y la normal de la superficie de la plancha. Puede ser positivo (más afilada y reduce las fuerzas) o negativo (filo romo, aumento de fuerzas y temperatura).

Las fuerzas primarias que inciden en el proceso son las siguientes: La fuerza de avance axial (F_A) o (F_T), que se alinea paralelamente a la fuerza de corte (F_C). La resultante (R) es la fuerza resultante que impacta sobre el material y origina la viruta (Caire, 2013). El taladrado involucra dos movimientos simultáneos de la broca: la rotación y el avance.

- **Velocidad de corte (V_c):** Es la velocidad lineal que experimenta la broca por la esquina del filo principal a causa del movimiento de rotación (n). La cual, depende del diámetro de esta. (Tecnocorte, 2021) (ver Ecuación 1.1)

$$V_c = \frac{\pi D n}{1000}$$

Ecuación 1.1 Velocidad de corte

Donde:

D = Diámetro de la broca [mm]

n = Revoluciones [rev/min]

V_c = Velocidad de corte. [m/min]

La velocidad de corte juega un papel muy importante en el tiempo de vida de la herramienta, ya que, al emplearse velocidades muy altas, permite realizar un mecanizado muy rápido y un desgaste abismal de la broca. Por otro lado, si se considera el caso contrario (velocidades bajas), el costo de producción se eleva exponencialmente al igual que el tiempo de taladrado.

- **Velocidad de avance (f_n):** Es la velocidad con la cual penetra la broca a la plancha de acero. Normalmente, nos centramos en el avance (f), el cual, indica la distancia axial recorrida por los filos de la herramienta en cada vuelta. Por lo general, este parámetro se encuentra restringido por las especificaciones de los fabricantes, los cuales, recomiendan un rango ideal de operación, de tal forma, que se resguarde la integridad física de la herramienta (Tecnocorte, 2021). Como se muestra en la Ecuación 1.2.

$$f = \frac{f_n}{n}$$

Ecuación 1.2: Velocidad de avance

Donde:

f_n = Velocidad de avance. [mm/min]

n = Revoluciones. [rev/min]

f = Avance. [mm/rev]

La velocidad de avance determina la formación de la viruta, durante el proceso de mecanizado, dependiendo de la velocidad empleada, se puede controlar la viruta y el tiempo de operación es más pequeño si se tiene una velocidad alta, mientras que, en el caso contrario la viruta se alarga dando un mejor acabado superficial en un tiempo de operación más largo.

1.4.4 Material

El material que se puede perforar va a depender del tipo de herramienta de corte que se va a emplear, las cuales, van a ser elegidas en función del lugar, posición, costo y material.

En el mercado existen brocas capaces de perforar metales blandos, tales como, el cobre y el aluminio, entre otros. Por otro lado, para el taladrado de metales duros (acero, acero inoxidable), lo recomendable sería utilizar herramientas en base de Cromo – Vanadio (Mantenimiento, 2022).

1.4.5 Proceso de Taladrado en el Centro de Mecanizado

Para realizar un taladrado en el Centro de Mecanizado, primero se debe diseñar la pieza utilizando un software CAD (Inventor), donde se especificarán las dimensiones, forma y tolerancia. Luego, empleando un software CAM (el mismo), obtener el código G, el cual, debe ser cargado en el centro de mecanizado.

Este código cuenta con todas las instrucciones que debe seguir la máquina CNC, durante el proceso de mecanizado, para realizar la perforación de la pieza.

Posterior a esto, se prepara el centro de mecanizado, para ello, se verifica que este en posición la herramienta de corte (Broca) y se carga la pieza en la mesa de trabajo para finalmente proceder a realizar los ajustes necesarios.

Una vez, hecho esto se alinea la pieza con la mesa de trabajo, es decir, se coloca el cero pieza y máquina, además de calibrarla, con el fin de garantizar que las operaciones se realizaran según lo previsto en el código G.

Ahora se procede a cargar el código G, en la memoria del Centro de Mecanizado, donde se depurará por última vez el programa, para luego dar inicio al mecanizado de la plancha de acero, donde la máquina CNC sigue las coordenadas y velocidades establecidas con el fin de obtener la forma y el acabado superficial deseado.

Es importante supervisar periódicamente el proceso de mecanizado, con el fin de corregir posibles anomalías que surjan durante la perforación de la pieza, hasta que finalicen todos los procesos programados en el código G. Finalmente, se retira la pieza maquinada y se procede a limpiar la mesa de trabajo, juntamente con la superficie de la plancha de acero ASTM A36.

1.4.6 Tecnología de Viruta

El proceso de mecanizado se caracteriza por el arranque de material a través del corte progresivo mediante la aplicación de la herramienta desbastándola en el proceso, a este residuo se lo conoce también como viruta.

En ese sentido, la viruta es el material que se produce al cortar, taladrar o mecanizar metales mediante herramientas de corte como brocas, fresas o tornos (Álvarez, 2023). Es decir, la viruta consiste en pequeñas astillas o fragmentos del material base (metal) que se logran separar de la herramienta de corte durante el proceso de mecanizado.

El tamaño, la forma y el color que puede llegar a tener la viruta son indicativos de que tan agresivo o pasivo fue el proceso de mecanizado, además, que depende mucho de la herramienta de corte que se emplee, el material base utilizado y las velocidades de aplicación.

Un ejemplo claro es que, por lo general, la viruta producto de un proceso de mecanizado, que tiene como material base el acero, presenta secciones largas y en forma de espiral cuando se emplea una herramienta de corte afilada.

Por otro lado, la viruta totalmente destruida se da cuando en el proceso de mecanizado, se aplica una herramienta de corte carente de filo, lo que destruye las fibras alargadas en forma de espiral.

1.4.7 Acabado o Calidad Superficial

El acabado superficial es el objetivo final de los procesos de mecanizado, se trata de obtener una calidad superficial exigida, en base a la rugosidad superficial y la tolerancia dimensional que presentan las piezas al final del proceso. Con un desgaste mínimo por parte de la herramienta de corte y empleando el menor tiempo posible (Ortiz, 2018).

1.4.7.1 Rugosidad Superficial

La rugosidad superficial es un factor muy importante a tomar en cuenta al momento de evaluar la calidad final de una pieza mecanizada, además, de influenciar en propiedades mecánicas, tales como: la resistencia a la fatiga, la corrosión y la fricción excesiva, juntamente con aspectos como la precisión dimensional (Ortiz, 2018).

Es por esta razón, que tratar de caracterizar el acabado superficial es muy complejo, ya que, intervienen demasiadas variables para la obtención de la rugosidad superficial, la cual, se define como, el conjunto de irregularidades que se pueden presentar en todo el relieve de la zona mecanizada. Como se aprecia en la Figura 1.4.

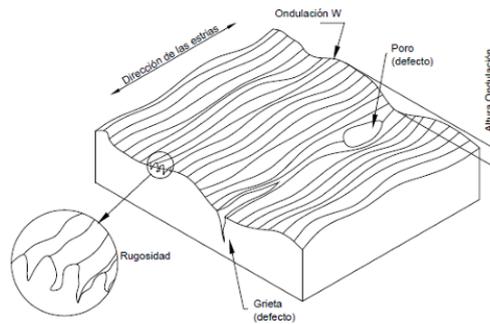


Figura 1.4: Rugosidad superficial en piezas maquinadas.

Fuentes: (Magdaleno, 2013)

A pesar de eso, se han desarrollado varios métodos que logran predecir la rugosidad superficial al final del proceso. Aunque esta puede ser cinco veces más pequeña que la que la rugosidad real. Debido a errores de movimiento, inestabilidad de la máquina, entre otros aspectos.

Para este caso, se empleará del método propuesto por Alauddin, diseñado para el acabado superficial en procesos de fresado, basado en datos experimentales (M. Alauddin, 1995). Se estimará la rugosidad R_a , tomando en cuenta la velocidad de avance, corte y profundidad, como se aprecia en la Ecuación 1.3.

$$R_a = \frac{f_z^2}{32 * \left(R \pm \frac{f}{\pi} \right)}$$

Ecuación 1.3 Rugosidad superficial.

Fuente: (M. Alauddin, 1995)

Donde:

f_z = es la velocidad de avance por diente $\left[\frac{mm}{diente} \right]$

R = es el radio de la herramienta [mm]

f = es la velocidad de avance por rotación $\left[\frac{mm}{rev} \right]$

Para obtener la rugosidad real, de las superficies maquinadas se puede emplear dos métodos: el valor medio aritmético y la raíz media cuadrática. Cabe mencionar, que estos métodos son aplicables después de realizar la medición de la rugosidad superficial, posterior al mecanizado de la pieza.

Media Aritmética (R_a): Se define como la media aritmética de los valores numéricos que representan la distancia entre las coordenadas de los puntos del perfil de rugosidad y el valor promedio (media) en toda la longitud de medición (Rugosidad Superficial , 2019). Como se observa en la Figura 1.5.

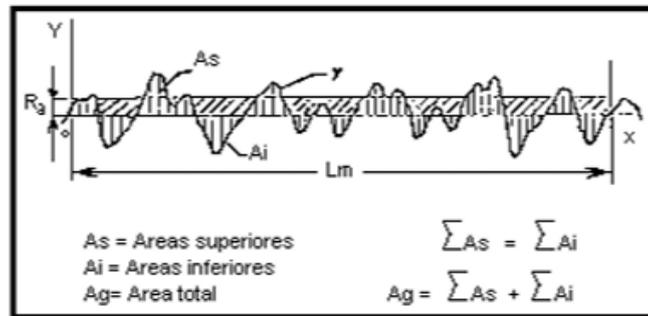


Figura 1.5: Perfil de rugosidad para la media aritmética.

Fuente: (Rugosidad Superficial , 2019)

La Ecuación 1.4 que define la media aritmética de la rugosidad (R_a), es:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y|$$

Ecuación 1.4 Media aritmética de la Rugosidad Superficial

Fuentes: (Rugosidad Superficial , 2019)

Rugosidad media cuadrática (R_q): La definición de la Raíz Cuadrada de la Media Aritmética de los Cuadrados de las Ordenadas del Perfil Efectivo de Rugosidad se basa en el promedio (media) en el módulo de medición (Rugosidad Superficial, 2019), como se indica en la Ecuación 1.5.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y^2}$$

Ecuación 1.5 Rugosidad media cuadrática.

Fuente: (Rugosidad Superficial , 2019)

Donde:

n = Número de ordenadas consideradas

y = Valor de la ordenada

Para ambos casos.

- **Medición de la Rugosidad Superficial**

El rugosímetro es el encargado de realizar la medición de la rugosidad superficial de forma rápida y precisa. Este dispositivo funciona utilizando una sonda que se mueve a lo largo de la superficie a evaluar. Esta sonda captura las diferencias altitudes en la superficie maquinada mientras se desplaza, creando el perfil de rugosidad. Este perfil brinda detalles acerca de la elevación de las crestas y los valles presentes en la superficie, además de la extensión y cantidad de estas irregularidades. Es decir, nos entrega los valores de la rugosidad media aritmética (R_a) en micras o micrómetros (μm), con una precisión de ± 15 [%] (Mexicana, 2020). En este sentido, se empleará el dispositivo Mitutoyo SurfTest SJ210, que funciona con un palpador que mide la rugosidad superficial, comparándola con un patrón de rugosidad.

1.4.7.2 Análisis para la Rugosidad Superficial (R_a)

La Rugosidad Superficial define el tipo de acabado superficial que puede llegar a tener la superficie maquinada, es así, como la norma ISO caracterizo estándares de rugosidad superficial (R_a) que está asociado con el valor R_a y varía de N1 a N12 (Deng, 2022). Como se puede apreciar en Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Grado o Calidad de Rugosidad Superficial (R_a).

Fuente: (Bhusan, 2001)

R_a Values up to a Value in μm	Roughness Grade Number
0.025	N1
0.05	N2
0.1	N3
0.2	N4
0.4	N5
0.8	N6
1.6	N7
3.2	N8
6.3	N9
12.5	N10
25.0	N11

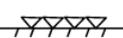
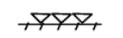
En la Tabla 1.1, se observa la Rugosidad Superficial junto al su calidad o grado de rugosidad. Por ejemplo, se el número de grado es el más bajo este representa la alta

calidad del acabado. Es decir, una superficie clasificada como N1 es más suave y fina que N2, y así sucesivamente (Deng, 2022).

La Rugosidad Superficial (Ra) también puede definir el tipo de aplicación que se le puede dar a la pieza mecanizada, es así, como se muestra la Tabla 1.2, la cual recopila el tipo de aplicación frente al acabado superficial obtenido.

Tabla 1.2: Relación entre Indicadores en Diseño y Rugosidad Superficial.

Fuente: (Deng, 2022)

RELACION ENTRE INDICACIONES EN DISEÑO Y RUGOSIDAD SUPERFICIAL			
Indicación en Diseño	Ra (CLA) [μm]	Exigencias de calidad superficial	Ejemplos de aplicación
	0,1	Fines especiales	Superficies de medición de calibres. Ajustes de presión no desmontables, superficies de presión alta, fatigadas.
	0,10-0,25-0,4	Exigencia máxima	
	0,6-1-1,6	Alta exigencia	Superficies de deslizamiento muy fatigadas, ajustes de presión desmontables
	2,5 – 4 – 6	Exigencia media	Piezas fatigadas por flexión o torsión, ajustes normales de deslizamiento y presión.
	10 – 16 - 20	Poca exigencia	Ajustes fijos sin transmisión de fuerza, ajustes leves, superficies sin mecanizado, prensados con precisión.
	40 – 60 – 100	Sin exigencia particular	Superficies desbastadas, fundidas a presión
	160 – 250 – 400 800 - 1000	Superficies en bruto	Piezas fundidas, estampadas o forjadas.

1.4.8 Tolerancia Dimensional

La Tolerancia Dimensional es un factor importante para tener en cuenta al momento de evaluar cualquier pieza mecánica, ya que, este concepto se ha introducido para clasificar y valorar su calidad. Mediante este concepto se establece un límite superior y otro inferior, dentro de los cuales tienen que estar las piezas buenas o aceptables (Onaciu, 2008). Es así como, se profundiza más en la Cilindricidad o Conicidad que puede llegar a tener el agujero juntamente con su respectiva calidad.

1.4.8.1 Cilindricidad o Conicidad

La Cilindricidad o Conicidad de los agujeros es el parámetro que define el aumento o disminución del diámetro del agujero por cada medida de altura (Cg, 2017). Es decir, se refiere a la característica geométrica que presenta el agujero en forma cónica en lugar de ser perfectamente cilíndrica.

La conicidad del agujero se puede expresar, bien por unidad de longitud de altura, en porcentaje o en forma de fracción (Cg, 2017). La cual, está dada en función de la Ecuación 1.6.

$$\text{Conicidad} = \left| \frac{D_{\text{superior}} - D_{\text{inferior}}}{\text{Altura}} \right|$$

Ecuación 1.6: Cilindricidad o Conicidad de un agujero.

Fuente: (Cg, 2017)

Donde:

D_{superior} = Diámetro Superior [mm]

D_{inferior} = Diámetro Inferior [mm]

Altura = Espesor de la Plancha [mm]

La Ecuación 1.6, se la obtiene partir de la Figura 1.6, la cual relaciona las variables antes descritas, es decir.

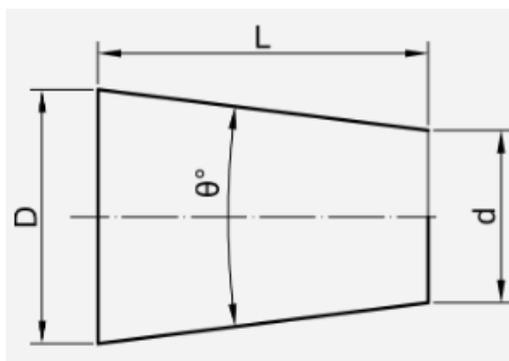


Figura 1.6: Cilindricidad o Conicidad de un agujero.

Fuente: (Cg, 2017)

La Figura 1.6 muestra de mejor forma la Cilindricidad o Conicidad de un agujero, el cual, va cambiando conforme aumenta la longitud (espesor) de la plancha de Acero ASTM A36. Este fenómeno puede ser muy útil en algunos casos, en especial en uniones roscadas, se puede emplear una ligera conicidad en el agujero para permitir una fácil alineación de las roscas durante el ensamblaje, mejorando la eficiencia y la precisión del montaje.

1.4.8.2 Calidad de Tolerancia (IT)

Retomando el concepto de Tolerancia Dimensional, la cual, introduce un límite superior e inferior formando una zona aceptable donde la pieza es buena o utilizable. La calidad de tolerancia (IT), define varios conceptos, de entre los cuales, los más relevantes son:

- **Cota Nominal:** Es la medida real o deseable que se indica en los planos.
- **Medida Máxima:** Se trata de la medida máxima admisible.

- **Medida Mínima:** Se trata de la medida mínima admisible.
- **Tolerancia:** Se define como la diferencia entre la medida máxima y mínima.

Es así como, la Norma ISO normalizo un sistema de calidad de tolerancia (IT) que va desde la más exacta (IT01), hasta la alejada de la cota nominal (IT16). Como se muestra en la Figura 1.7 (Pacheco, 2019).

Medidas Nominales (en mm)	CALIDADES IT MICRONES = 0,001 MM.																	
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
De 0 a 3	0.3	0.5	0.8	1.2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600
De 3 a 6	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750
De 6 a 10	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900
De 10 a 18	0.5	0.8	1.2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1100
De 18 a 30	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1300
De 30 a 50	0.6	1	0.8	2.5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000	1600
De 50 a 80	0.8	1.2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200	1900
De 80 a 120	1	1.5	2.4	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400	2200
De 120 a 180	1.2	2	3.5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	1600	2500
De 180 a 250	2	3	4.5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1150	1850	2900
De 250 a 315	2.5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1300	2100	3200
De 315 a 400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	150	230	360	570	890	1400	2300	3600
De 400 a 500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1550	2500	4000

Figura 1.7: Calidad de Tolerancia IT, para agujeros según la Norma ISO.

Fuente: (Pacheco, 2019)

Como se observa en la Figura 1.7, la calidad de tolerancia IT, va a depender del diámetro del agujero, además que mientras más grande sea este parámetro, la zona de aceptación de la pieza, crece de igual forma, teniendo tolerancias más grandes.

La norma ISO define varias zonas de aplicación de la tolerancia, tanto para el límite superior como inferior, utilizando letras mayúsculas. Las posiciones A, B, C, CD, D, E, EF, F y G son fijas, ya que el límite inferior es positivo. Por otro lado, la posición H proporciona un límite inferior de cero, aplicando toda la tolerancia al superior.

Las posiciones J y Js son atravesadas por la línea de referencia, es decir, Js tiene la misma cantidad en el límite superior e inferior. Finalmente, las posiciones K, M y N pueden coincidir por encima o por debajo de la línea de referencia dependiendo de la calidad. Las posiciones P, R, S, T, U, V, X, Y, Z, ZA, ZB y ZC se fijan por la diferencia superior, que es siempre negativa. Estas letras representan agujeros con ajustes fijos y a presión.(Pacheco, 2019).

2 METODOLOGÍA

En esta sección se detalla el proceso que se lleva a cabo para la obtención de los parámetros óptimos de mecanizado, mediante la perforación de planchas de Acero ASTM A36, en el centro de mecanizado.

2.1 Procedimiento para realizar la Experimentación

Para el desarrollo del presente proyecto, en la Figura 2.1 se presenta el diagrama de flujo que resume de manera completa el trabajo realizado para la obtención de la combinación de los parámetros óptimos de mecanizado.

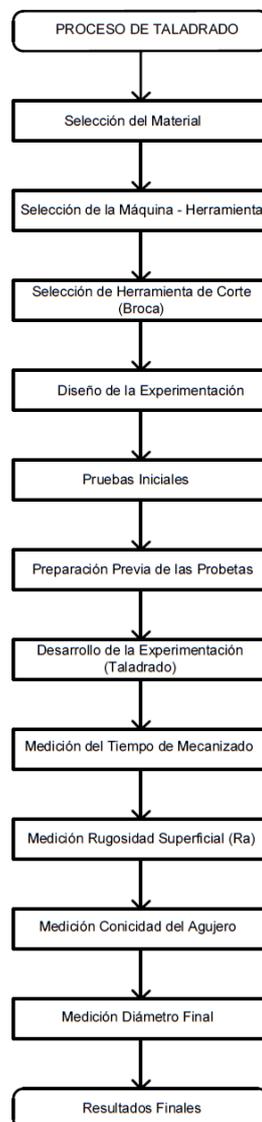


Figura 2.1: Diagrama de flujo para el proceso de Taladrado.

Fuente: [Propia]

2.2 Selección del Material

El material seleccionado para el desarrollo del presente proyecto es una plancha de Acero ASTM A36 (lamado en caliente), que cuenta con un espesor de 12 [mm], el cual, fue anteriormente cortado en la cierra de cinta modelo BS-1018B. Como se aprecia en la Figura 2.2.



Figura 2.2: Plancha de Acero ASTM-A36.

Fuente: [Propia]

Este tipo de material es el más empleado en la industria y construcción ecuatoriana, ya que, cuenta con unas excelentes propiedades mecánicas y presenta un costo muy accesible. Es así, que en la Figura 2.3 se presenta sus propiedades mecánicas y la composición química del Acero ASTM A36.

ACERO ASTM A36					
Composición Química					
Elemento	C	Si	P	S	Cu
[%]	0,26	0,4	0,04	0,05	0,2
Propiedades Mecánicas					
Propiedad	Valor		Unidad		
Resistencia a la Tracción	400 - 550		MPa		
Módulo de Elasticidad	200		GPa		
Dureza Brinell	119 - 162		HBW		
Límite Elástico	250		MPa		
Módulo de Corte	79,3		GPa		
Límite de Fluencia	250		MPa		
Propiedades Físicas					
Propiedad	Valor		Unidad		
Densidad	0,24 [lb/in ³] - 7,85 [g/cm ³]				
Peso teórico [kg/m ²]	96		kg/m ²		
Punto de Fusión [°C]	1425 - 1538		°C		

Figura 2.3: Propiedades mecánicas y composición química del Acero ASTM A36.

Fuente: (Mundial, 2022)

2.3 Selección de la Máquina – Herramienta CNC

En este trabajo se busca determinar la combinación óptima de parámetros que permitan obtener un excelente acabado superficial al momento de taladrar planchas de Acero ASTM A36, en este sentido, se toma el centro de mecanizado VIWA VCM3M400 con controlador CENTROID M400AC, ubicado en el laboratorio de máquinas herramientas. Ya que, al ser una máquina CNC, se puede controlar de forma numérica las variables consideradas para el desarrollo de la experimentación. Como se observa en la Figura 2.4.



Figura 2.4: Centro de Mecanizado VIWA VCM3M400.

Fuente: [Propia]

Es así como en la Figura 2.5 se presentan las especificaciones técnicas del centro de mecanizado VIWA VCM3M400 con controlador CENTROID M400AC.

CARRERAS:			Unidades
Máxima en eje	X	(400) 16"	mm
	Y	(300)12"	
	Z	(250)10"	
MÁQUINA			
Motor principal		5/7.5	HP
Cabezal de velocidad variable		100-8000	rpm
Nariz del husillo a la mesa		10 – 350	mm
Diámetro del cañón		4.5	pulg.
Cono del husillo		BT-30	
Carrusel de herramientas (ATC)		12	
Centro del husillo-columna		350 (14")	mm
Tamaño de la mesa		770X300 (30" x 12")	mm
Ranuras T de la mesa		16" X 3" X 80mm	
Capacidad de carga		120	kg
Husillos de bolas de alta precisión		X, Y, Z	
EQUIPAMIENTO			
Bomba de lubricación		1/4	HP
Bomba de refrigerante		100	W
Cabina competa con puertas dobles		1	
Guardas para guías		2 por eje	
GENERALES DEL CUERPO:			
Fundición de hierro bajo patente americana			
Guías lineales embaladas		X, Y, Z	
Peso neto de máquina		2550	kg
Espacio sobre el piso (L x A x A)		1570 x 2135 x 2175	mm
ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA:			
Alimentación de la máquina		220 V x 3 Fases	
Alimentación del control		220	V
Consumo de corriente		30	A

Figura 2.5: Especificaciones Técnicas del Centro de Mecanizado VIWA VCM3M400.

Fuente: (INDUSTRIAS VIWA, S.A. DE C.V., s. f)

2.4 Selección de la Herramienta de Corte (Broca)

Para poder seleccionar la Herramienta de Corte adecuada (Broca), hay que conocer el diámetro del perno que se desea pasar a través de la plancha de Acero. Según los talleres de mecanizado, los diámetros más empleados en la industria ecuatoriana son los de 1/4, 5/16, 3/8 y 1/2 de pulgada. Es así, que se debe respetar una tolerancia de 1/8 de pulgada entre el diámetro del agujero y de la broca, según lo recomendado por la Norma AISC. En definitiva, para los pernos mencionados las brocas apropiadas serian de: 3/8, 7/16, 1/2 y 5/8 de pulgada. Cabe recalcar que es un valor estándar común utilizado en la construcción para asegurar la integridad y seguridad de las estructuras.

En la Figura 2.6 se aprecia la caja de Herramientas de Corte (Brocas) disponibles en el laboratorio de Máquinas – Herramientas.



Figura 2. 6: Caja de Herramienta de Corte de la marca DEBOR.

Fuente: [Propia]

Dado que el laboratorio de Máquinas – Herramientas, se cuenta con la broca de $\frac{1}{2}$ de pulgada de la marca DEBOR GERMANY, se escoge esa herramienta de corte, para el taladrado de planchas de Acero ASTM A36 (Figura 2.7), donde se debe introducir un perno de $\frac{3}{8}$ pulgada.



Figura 2.7: Herramienta de corte (Broca) de ϕ $\frac{1}{2}$ [in] marca DEBOR GERMANY.

Fuente: [Propia]

2.5 Diseño de la Experimentación

El objetivo de este TIC es la determinación de los parámetros óptimos de mecanizado sin ningún tipo de lubricación, que logren taladrar una plancha de Acero ASTM A36, de espesor 12 [mm], con un excelente acabado superficial, tolerancia dimensional, en el

menor tiempo posible. Para lo cual, se medirá la rugosidad superficial, diámetro maquinado, conicidad del agujero y el tiempo de mecanizado.

Este experimento toma como base dos parámetros de mecanizado, la velocidad del husillo (RPM) y la velocidad de avance o avance (f_n), donde cada uno de ellos cuenta con cinco niveles diferentes, los cuales van aumentando en 25 [%], con respecto al anterior valor (Pérez, 2020). De esta forma, se afina el experimento en sí, ya que, existen más combinaciones que van a actuar sobre la probeta (Plancha de Acero ASTM A36).

Por lo que, el método de análisis que más se ajusta con este criterio, es el diseño experimental latino 5x5, donde la variación en cualquier de los parámetros de mecanizado da como resultado una respuesta diferente sobre el taladrado de la plancha de Acero ASTM A36.

2.5.1 Diseño Experimental Latino 5x5

El diseño experimental latino 5x5, es una forma de analizar el resultado que puede generar dos variables independientes que cuentan con el mismo número de niveles diferentes de aplicación, cinco en este caso sobre un espécimen o probeta. (Mejía, 2007)

Este tipo de diseño posee la capacidad de disminuir el error residual de un experimento al permitir la eliminación de la variabilidad causada por una variable perturbadora conocida y controlable (Montgomery, 2004).

Los cinco niveles de aplicación de cada uno de los parámetros de mecanizado (variables independientes) van desde lo más alto, pasando por el nivel medio – alto, medio, medio bajo, hasta el nivel más bajo. Afinando el experimento, ya que, al tomar más criterios de velocidades, la variabilidad entre las combinaciones va a ser más pequeño, haciendo que se analice con más profundidad todas las combinaciones posibles, sin descartar ninguna posibilidad alguna. Como se logra apreciar en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Parámetros de Mecanizado con niveles aplicación, para Método Latino 5x5.

Fuente: [Propia]

Parámetros de Mecanizado (Variables)	Niveles de Experimentación				
	Alto (Critico)	Medio - Alto (Moderado)	Medio (Suave)	Medio - Bajo (Gentil)	Bajo (Acogedor)
Velocidad de Corte (V_c)	Alto (Critico)	Medio - Alto (Moderado)	Medio (Suave)	Medio - Bajo (Gentil)	Bajo (Acogedor)
Velocidad de Avance (f_n)	Alto (Critico)	Medio - Alto (Moderado)	Medio (Suave)	Medio - Bajo (Gentil)	Bajo (Acogedor)

Es así, que los criterios bajo los cuales van a ser evaluados los parámetros de mecanizado (variables independientes) en cada uno de sus niveles de aplicación son: la rugosidad superficial, diámetro maquinado, conicidad del agujero y el tiempo total de mecanizado.

Cada uno de ellos, va a determinar la combinación óptima para realizar el mecanizado de agujeros en planchas de Acero ASTM A36, con un espesor de 12 [mm]. De esta forma, se logra esquematizar la manera en la cual se va a llevar a cabo la experimentación, en el laboratorio, como se observa en la Figura 2.8.

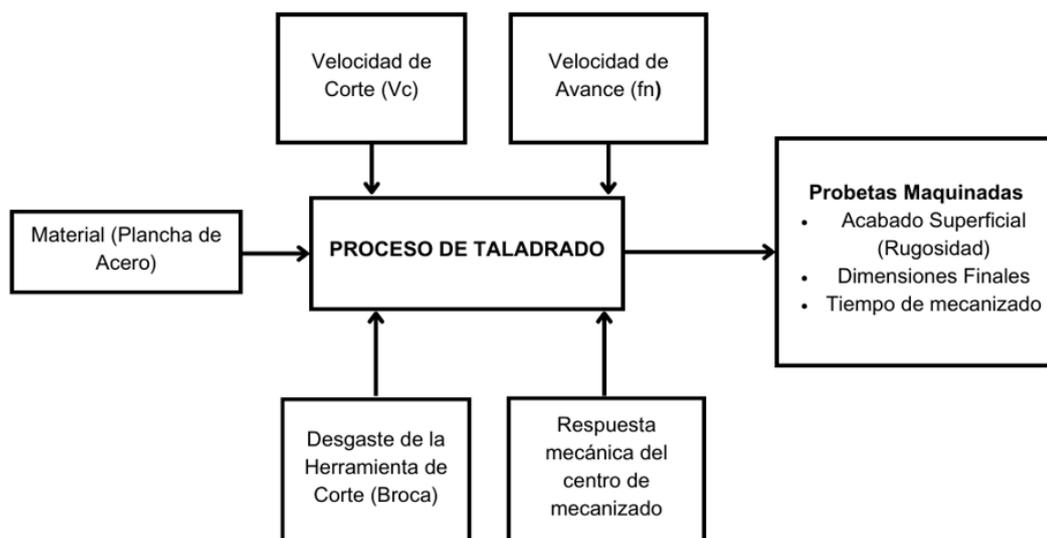


Figura 2.8: Esquematización del Proceso de Taladrado.

Fuente: [Propia].

La esquematización del proceso de taladrado, el cual, combina varias variables de entrada (la plancha de Acero (Material)), juntamente con las variables controlables (velocidad de corte (V_c), velocidad de avance (f_n)) y las variables que no podemos controlar como el desgaste progresivo de la herramienta mientras perfora el material y la respuesta mecánica del centro de mecanizado, la cual comprende, el efecto de vibración que sufre durante el proceso.

Para obtener como resultado, un agujero en la superficie de la plancha de acero ASTM A36, donde su calidad va a depender del acabado superficial (rugosidad superficial) obtenida, las dimensiones finales (diámetro maquinado, conicidad del agujero) y el tiempo empleado durante todo el proceso. Estos componentes permiten evaluar si el proceso en sí fue efectivo y eficiente, mediante la combinación de los parámetros de mecanizado.

2.5.2 Cuantificación del Método Experimental

Según el diseño experimental latino 5x5, empleado en el desarrollo de este TIC, el número total de experimentos es de 25.

En la Figura 2.9, se aprecia las 25 combinaciones (experimentos), que pueden generarse sin repetir alguna de las variables independientes, es decir, en el eje de las abscisas se localiza una de las variables independientes (V_c), mientras que en el eje de las ordenadas la siguiente (f_n), con sus respectivos niveles. Donde cada intersección representa un experimento a efectuarse.

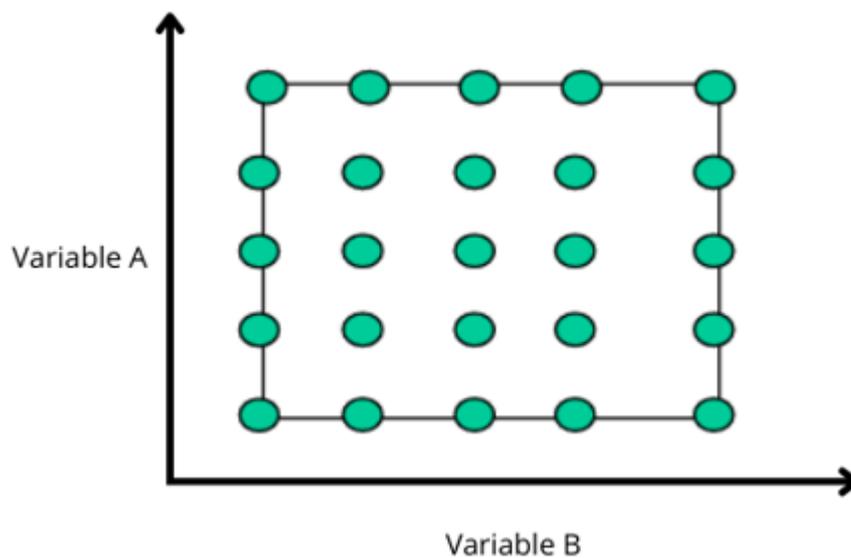


Figura 2.9: Combinaciones totales para el método experimental 5x5.

Fuente: (Mejía, 2007)

La importancia del diseño de experimentación latino 5x5, es el análisis por separado de cada variable y la acción conjunta sobre el mecanizado de la plancha de acero ASTM A36. Además, que en las combinaciones mostradas no hay repetición alguna, caso contrario, serían 75 combinaciones o experimentos a realizarse.

2.5.3 Número total de Experimentos (Combinaciones) a realizarse

Es así como, en la Tabla 2.2 se presentan los 25 experimentos a realizarse, debido a todas las combinaciones posibles que se pueden dar entre los niveles de los parámetros de mecanizado (variables independientes) sin repetirse.

Tabla 2.2: Número total de Experimentos (combinaciones) a efectuarse.

Fuente: [Propia].

N°	Velocidad de Corte (Vc)	Velocidad de Avance (fn)
1	Alto (Critico)	Alto (Critico)
2	Medio - Alto (Moderado)	Alto (Critico)
3	Medio (Suave)	Alto (Critico)
4	Medio - Bajo (Gentil)	Alto (Critico)
5	Bajo (Acogedor)	Alto (Critico)
6	Alto (Critico)	Medio - Alto (Moderado)
7	Medio - Alto (Moderado)	Medio - Alto (Moderado)
8	Medio (Suave)	Medio - Alto (Moderado)
9	Medio - Bajo (Gentil)	Medio - Alto (Moderado)
10	Bajo (Acogedor)	Medio - Alto (Moderado)
11	Alto (Critico)	Medio (Suave)
12	Medio - Alto (Moderado)	Medio (Suave)
13	Medio (Suave)	Medio (Suave)
14	Medio - Bajo (Gentil)	Medio (Suave)
15	Bajo (Acogedor)	Medio (Suave)
16	Alto (Critico)	Medio - Bajo (Gentil)
17	Medio - Alto (Moderado)	Medio - Bajo (Gentil)
18	Medio (Suave)	Medio - Bajo (Gentil)
19	Medio - Bajo (Gentil)	Medio - Bajo (Gentil)
20	Bajo (Acogedor)	Medio - Bajo (Gentil)
21	Alto (Critico)	Bajo (Acogedor)
22	Medio - Alto (Moderado)	Bajo (Acogedor)
23	Medio (Suave)	Bajo (Acogedor)
24	Medio - Bajo (Gentil)	Bajo (Acogedor)
25	Bajo (Acogedor)	Bajo (Acogedor)

2.6 Cuantificación numérica de los Parámetros de Mecanizado (Variables Independientes)

Para el desarrollo del Experimento Latino 5x5, se debe cuantificar los valores que van a tomar los parámetros de mecanizados en el taladrado de la plancha de Acero, para cada uno de los niveles propuestos.

2.6.1 Cálculo del rango de aplicación para la velocidad de Corte

En la variable de velocidad de corte de la herramienta (Broca), se toma como referencia los valores propuestos por el fabricante, que en este caso es la empresa DEBOERTOOL.

Según el catálogo del fabricante DEBOERTOOL, la velocidad de corte (V_c), recomendada esta entre el rango de 600 hasta 500 SFM (pies x minuto). En ese sentido, en la Tabla 2.3, se encuentran los niveles propuestos para la Velocidad de Corte (V_c), en SFM

Tabla 2.3: Rango de Velocidad de Corte (V_c), en SFM.

Fuente: [Propia].

	Niveles	[SFM]
Velocidad de Corte (V_c)	Alto (Crítico)	600
	Medio - Alto (Moderado)	575
	Medio (Suave)	550
	Medio - Bajo (Gentil)	525
	Bajo (Acogedor)	500

Es así como, a partir de la Ecuación 1.1 se obtiene la velocidad del husillo en [RPM], pero antes, se convierte los SFM (pies x minuto) a [m/min], conociendo que 1 [SFM] equivale a 0.3048 [m/min]. Es decir:

$$V_c = 600 [SFM] * 0,3048 \frac{[m]}{[min]} = 182,88 \frac{[m]}{[min]}$$

Entonces, la velocidad del husillo en RPM es:

$$RPM = \frac{183 \frac{[m]}{[min]} * 1000}{\pi * 12,7 [mm]} = 4583,66 [RPM]$$

Reemplazando los valores recomendados por el fabricante se obtiene el rango de velocidad de corte para la herramienta de corte (Broca) de ½ [in], tabulados en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Velocidad de Corte y Husillo recomendado por el fabricante de la Broca.

Fuente: [Propia]

Velocidad de Corte (V_c)	Niveles	[SFM]	[m/min]	Velocidad Husillo (n)	[RPM]
	Alto (Crítico)	600	182,88		4583,66
	Medio - Alto (Moderado)	575	175,26		4392,68
	Medio (Suave)	550	167,64		4201,69
	Medio - Bajo (Gentil)	525	160,02		4010,70
	Bajo (Acogedor)	500	152,40		3819,72

Es así como, se presenta la velocidad de corte que puede tomar la herramienta a lo largo del proceso de experimentación, además se observa que son valores muy altos en comparación con los recomendados por el laboratorio.

2.6.2 Cálculo del rango de aplicación para la velocidad de avance

Al igual que la velocidad de corte, para el avance (f), se toman los valores recomendados por el fabricante (DEBOROOL). Los cuales, varían desde 0.003 hasta los 0.0024 IPT (pulgadas por revolución), en ese sentido, se construye la Tabla 2.5, que recopila los niveles propuestos para el avance (f), que puede adoptar la herramienta de corte durante el desarrollo del proyecto.

Tabla 2.5: Rango de Avance para la Broca de 1/2 [in].

Fuente: [Propia]

Avance (f)	Niveles	[IPT]
	Alto (Crítico)	0,003
	Medio - Alto (Moderado)	0,0029
	Medio (Suave)	0,0027
	Medio - Bajo (Gentil)	0,0026
	Bajo (Acogedor)	0,0024

La conversión sería de unidades lineales, donde una pulgada es equivalente a 25,4 [mm], en base a eso, se obtiene la siguiente tabla con los respectivos valores de cada nivel operacional para la velocidad de avance (f_n).

$$f = 0.003 [IPT] * \frac{25,4 \left[\frac{mm}{rev} \right]}{1 [IPT]} = 0,076 \left[\frac{mm}{rev} \right]$$

En conclusión, la velocidad de avance (f_n), tiene un valor de:

$$f_n = 0,076 \left[\frac{mm}{rev} \right] * 4583,66 \left[\frac{rev}{min} \right] = 349,28 \left[\frac{mm}{min} \right]$$

Reemplazando los demás niveles que tiene la velocidad de avance, se tiene la Tabla 2.6, es decir:

Tabla 2.6: Avance y Velocidad de Avance recomendado por fabricante de la Broca

Fuente: [Propia]

Avance (f)	Niveles	[IPT]	[mm/rev]	Velocidad de Avance (f_n)	[mm/min]
	Alto (Crítico)	0,003	0,076		349,28
Medio - Alto (Moderado)	0,0029	0,074	323,56		
Medio (Suave)	0,0027	0,069	288,15		
Medio - Bajo (Gentil)	0,0026	0,066	264,87		
Bajo (Acogedor)	0,0024	0,061	232,85		

La Tabla 2.6, muestra valores muy altos para la velocidad de avance que debe soportar la herramienta de corte durante el proceso de mecanizado. Al igual que la velocidad del husillo.

2.7 Pruebas Iniciales (Taladrado)

Para corroborar con los valores obtenidos en las Tablas 2.4 y 2.6, para la velocidad del husillo [RPM] y la velocidad de avance [mm/min], respectivamente. Se procede a realizar varias pruebas iniciales en el laboratorio de la facultad de Ingeniería Mecánica.

En este sentido, se realizaron tres pruebas iniciales, dos de ellas con lubricación y una sin lubricación, donde los valores tomados en cuenta para la velocidad del husillo y de avance

se encuentran tabulados en la Tabla 2.7. Los cuales, son muy cercanos a los obtenidos en el apartado anterior.

Tabla 2.7: Valores de Velocidad del Husillo y de Avance para las pruebas iniciales.

Fuente: [Propia]

N° Prueba	Velocidad del Husillo [RPM]	Velocidad de Avance [mm/min]	Lubricación
1	4800	150	S/A
2	1500	100	S/A
3	1500	100	N/A

2.7.1 Prueba Inicial N°1 – Valores Críticos con Lubricación

Por recomendación de los técnicos docentes del laboratorio, se tomaron los valores plasmados en la Tabla 2.7 que se acercan a los recomendados por el fabricante. Ya que, según su criterio y experiencia taladrando planchas de acero en el centro de mecanizado, emplear los datos máximos de las Tablas 2.4 y 2.6, representa un riesgo tanto para la máquina CNC, como para la herramienta de corte. En la Figura 2.10 se muestra el desarrollo de la Prueba Inicial N°1



Figura 2.10: Prueba Inicial N°1, valores críticos Velocidad Husillo (n) y Avance (f_n).

Fuente: [Propia]

No se pudo llevar a cabo la Prueba N°1, ya que la herramienta de corte (Broca) no logro penetrar completamente la probeta quedando varada a la mitad del proceso de mecanizado. Es así, como se presenta la Figura 2.11, que muestra el resultado obtenido.



Figura 2.11: Resultado Prueba N°1, valores críticos Velocidad (n) y (f_n).

Fuente: [Propia].

Se presume que el propósito del fallo de la prueba está en la velocidad del husillo, ya que, es demasiado grande para maquinar una plancha de acero de 12 [mm], a pesar de que la herramienta está diseñada para soportar dicha velocidad, la máquina CNC es la limitante de este procedimiento, a pesar de que se aplicó lubricante durante el mecanizado.

2.7.2 Prueba Inicial N°2 – Valores Moderados con Lubricación

Para este procedimiento, se reduce en un 70 [%], la velocidad del husillo y en un 30 [%] la velocidad de avance, manteniendo la lubricación durante el proceso. Se observa que esta prueba se pudo llevar a cabo, ya que, la herramienta de corte logro perforar completamente la plancha de acero ASTM A36, como se observa en la Figura 2.12.



Figura 2.12: Resultado Prueba N°2, reduciendo 70 [%] Velocidad (n) 30 [%] (f_n)

Fuente: [Propia]

El proceso se puede catalogar como satisfactorio, ya que, logro perforar completamente la plancha de acero aplicando el sistema de lubricación del centro de mecanizado.

La herramienta de corte (Broca) no sufrió contratiempos durante el desarrollo de la prueba, aunque la máquina CNC sufrió de vibraciones moderadas, en la perforación de la plancha de acero ASTM A36.

2.7.3 Prueba Inicial N°3 – Valores Moderados sin Lubricación

Debido a que, el componente de este TIC es sin ningún tipo de lubricación, se toman los valores de la anterior prueba y se procede a maquinar la plancha de acero ASTM A36, con el fin de corroborar si el nivel de los parámetros de mecanizado es óptimo para el desarrollo del experimento.

En la Figura 2.13, se observa el proceso de taladrado de la Prueba Inicial N°3, esta vez sin aplicar el sistema de lubricación del Centro de Mecanizado.



Figura 2.13: Prueba N°3, reduciendo 70 [%] Velocidad (n) 30 [%] (f_n), sin lubricación.

Fuente: [Propia]

La Prueba Inicial N° 3 se pudo llevar a cabo, ya que, la herramienta de Corte (Broca) logro maquinar la plancha de acero en su totalidad, pero lo hizo encarando numerosos contratiempos en el proceso, en ese sentido, no es tan recomendable emplear estos niveles en los parámetros de mecanizado.

Las consecuencias de realizar esta prueba recaen en la herramienta de corte. Al no emplear ningún tipo de lubricación, la broca perdió su filo y hasta llego a quemarse en la punta. Debido a la fricción que sufre durante el taladrado, hay que tener cuidado al momento de realizar las prueba con estos parámetros.

Por otro lado, la vibración que debe soportar el centro de mecanizado es moderado y controlable.

2.7.4 Parámetros empleados en la Experimentación

Una vez analizadas las consecuencias que con lleva experimentar con los valores propuestos por el fabricante y tomando en cuenta que este experimento no se va a emplear ningún tipo de lubricación, se llega al conceso de emplear los siguientes niveles para la velocidad del husillo y la velocidad avance, tabulados en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8: Parámetro de Experimentación.

Fuente: [Propia]

Niveles	Velocidad del Husillo [RPM]	Velocidad de Avance [mm/min]
Alto (Critico)	1500	150
Medio - Alto (Moderado)	1313	125
Medio (Suave)	1125	100
Medio - Bajo (Gentil)	934	75
Bajo (Acogedor)	750	50

Es así como, se presentan los parámetros de experimentación que se van a emplear en el desarrollo de este TIC. Para la selección de estos valores, se tomó en cuenta la integridad de la herramienta, ya que en la Prueba Inicial N°3, la broca sufrió varios contratiempos que, a pesar de poder trabajar a velocidades mucho más grandes, al no emplear ningún tipo de lubricación, delimita su rango de aplicación.

Además, que al utilizar los insumos del laboratorio siempre se garantiza su integridad física durante el desarrollo de los experimentos con ellos. Por lo que, al definir parámetros bajos se opta por la postura conservativa de mantener en las mejores condiciones de trabajo a la herramienta de corte y al centro de mecanizado.

2.8 Preparación previa de las Probetas

Para este TIC, se cuenta con probetas de dimensiones 300x40x12 [mm]. Las cuales son muy largas y al perforar un agujero de ½ de pulgada en su superficie, se desperdiciaría demasiado material. Por lo que, se procede a dividir la probeta en tres partes iguales.

2.8.1 Corte y Limado de las Probetas para el Taladrado en el Centro de Mecanizado

Las probetas cuentan con una longitud de 300 [mm], por lo que se decide en cortar la plancha de acero en tramos de 100 [mm], obteniendo de esta forma tres partes iguales.

En la Figura 2.14, se muestra el proceso que se lleva a cabo para el corte de las probetas que van a ser sometidas al Taladrado en el Centro de Mecanizado.



Figura 2.14: Corte de la plancha de Acero ASTM A36, en tramos de 100 [mm].

Fuente: [Propia]

Para realizar el corte de las probetas en tramos de 100 [mm], se emplea la cierra automática de la marca UNIZ disponible en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Mecánica. Para este proceso se emplea la taladrina como lubricante, con el fin de obtener un mejor acabado.

Como resultado del proceso de corte, se generan aristas vivas y rebabas. Por lo que, se procede a limpiar las probetas mediante el limado de todo su contorno a mano, con el fin de obtener un acabado amigable con la manipulación manual de las planchas de acero y mejor acople con la entenalla del centro de mecanizado. Es así como, en la Figura 2.15 se presentan los 25 especímenes que van a ser expuestos a la experimentación.



Figura 2.15: Probetas cortadas y limadas a mano, antes de ser experimentadas.

Fuente: [Propia]

2.8.2 Codificación de las Probetas

Con el fin de no repetir ningún experimento y de no generar confusiones, se propone el siguiente sistema de codificación, para cada probeta experimentada. La cual, engloba características únicas e importantes que permitan identificar rápidamente que parámetros se emplearon en el mecanizado del espécimen en el Centro de Mecanizado.

Para ello, se parte de la premisa que existen dos parámetros de mecanizado, la velocidad del husillo (n) y de avance (f_n). Donde cada uno de ellos cuenta con cinco niveles de aplicación.

Es así, que para la velocidad del husillo (n), se opta por la abreviación del nivel, es decir, si se considera la velocidad más alta, se coloca las iniciales de la misma (VA), mientras que para la velocidad de avance (f_n), se enumera cada nivel, empezando desde el más bajo con el 1, llegando hasta el más alto (5). Como se muestra en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9: Tabla de referencia para la codificación de las probetas.

Fuente: [Propia]

	Niveles	Abreviación		Niveles	Numeración
Velocidad del husillo (n)	Alto (Crítico)	VA	Velocidad de Avance (f_n)	Alto (Crítico)	5
	Medio - Alto (Moderado)	VMA		Medio - Alto (Moderado)	4
	Medio (Suave)	VM		Medio (Suave)	3
	Medio - Bajo (Gentil)	VMB		Medio - Bajo (Gentil)	2
	Bajo (Acogedor)	VB		Bajo (Acogedor)	1

Finalmente, para diferenciar que tipo de proceso de maquinado se realizó sobre las probetas, se coloca las iniciales MT, que hace referencia a Mecanizado Taladrado.

Es así, que si alguna probeta muestra el código VMA3-MT, hace referencia a que se realizó un proceso de Mecanizado Taladrado, empleando una velocidad del husillo de 934 [RPM] con una velocidad de avance de 100 [mm/min].

El sistema empleado, asegura que no existan confusión alguna, ya que es muy fácil de interpretarlo, de igual manera que no existan códigos repetidos. Este método se aplicó a

las 25 probetas existentes, para el desarrollo del experimento. En la Figura 2.16, se muestra una de las probetas codificadas para la realización del experimento.



Figura 2.16: Sistema de codificación aplicado en la experimentación.

Fuente: [Propia]

2.9 Desarrollo de las Experimentación (Taladrado)

Inmediatamente después de haber terminado de preparar las probetas para el taladrado, se procede a instalarlas en la entenalla del centro de mecanizado para realizar la experimentación correspondiente.

2.9.1 Taladrado en el Centro de Mecanizado

Para realizar el taladrado en el centro de mecanizado, se debe diseñar y cargar el programa (código G) en la máquina CNC, el cual define los parámetros de velocidad del husillo (n) y de avance (f_n), para cada caso de experimentación de forma precisa y eficiente, como se muestra en la Figura 2.17.

```
TALADRAR.CG.NC * x
1 %
2 O01001
3 (Maquina)
4 ( proveedor: Autodesk)
5 ( description: Generic 3-axis)
6 (T1 D=12.7 CR=0. TAPER=118deg - ZMIN=-18. - taladrar)
7 N10 G90 G94 G17
8 N15 G21
9 N20 G28 G91 Z0
10 N25 G90
11 (Taladrar1)
12 N30 T1 M6
13 N35 S750 M3
14 N40 G54
15 N55 G0 X50. Y20.
16 N60 G43 Z15. H1
17 N70 Z5.
18 N75 G98 G81 X50. Y20. Z-18. R5. F50.
19 N80 G80
20 N85 Z15.
21 N95 M9
22 N100 G28 G91 Z0.
23 N105 G90
24 N110 G28 G91 X0. Y0.
25 N115 G90
26 N120 M30
27 %
```

Figura 2.17: Programa empleado para el Taladrado en el Centro de Mecanizado.

Fuente: [Propia]

Es así como, se muestra el código G empleado durante el desarrollo de la experimentación en el centro de mecanizado, sin ningún tipo de lubricación. Además, al tratarse de una máquina CNC, no se necesita retirar la herramienta de corte (Broca), después de taladrar la plancha de acero, ya que lo hace de forma automática.

2.10 Mediciones

Para analizar la calidad de taladrado que se obtuvo al aplicar cada uno de los 25 casos propuestos, se realiza la medición del tiempo de mecanizado, juntamente con la rugosidad superficial, la condición de cilindricidad o conicidad que tenga el agujero y el diámetro maquinado, con el fin de evaluar y encontrar los parámetros óptimos de mecanizado, para perforar planchas de acero en el centro de mecanizado.

2.10.1 Medición del Tiempo de Mecanizado

El tiempo de mecanizado es el único factor que se debe medir a la par con el proceso de mecanizado, es decir, desde el inicio del taladrado hasta el final del mismo.

El procedimiento para medir el tiempo de mecanizado es muy simple ya que se debe emplear el cronómetro digital disponible en los smartphones actuales. El cual inicia cuando la herramienta de corte (Broca), entra en contacto con la probeta y termina cuando haya

perforado por completo la plancha de acero. En la Figura 2.18, se presenta un ejemplo de la toma de este dato, para el experimento VA4 – MT.



Figura 2.18: Medición del Tiempo de Mecanizado para la probeta VA4 - MT.

Fuente: [Propia]

No está de más mencionar que durante la toma del tiempo de mecanizado, se comenten demasiados errores sistemáticos, tales como la fatiga del operador, debido a que, no se tiene la certeza que el experimentador tenga el pulso necesario para presionar el botón de inicio y final al mismo tiempo que comienza y termina el taladrado. Lo que genera una incertidumbre muy alta en este factor.

2.10.2 Medición de la Rugosidad Superficial

Para efectuar la medición de la rugosidad superficial de las probetas, se debe retirar el espécimen del Centro de Mecanizado y colocar en una superficie plana, ya que, para emplear el rugosímetro Mitutoyo SJ-20 disponible en el laboratorio, se necesita cumplir con dicha condición. Como se presenta en la Figura 2.19.



Figura 2.19: Medición Rugosidad Superficial con el Rugosímetro Mitutoyo SJ-20.

Fuente: [Propia]

El rugosímetro Mitutoyo SJ-20, realizo cuatro mediciones a lo largo de la superficie maquinada separados en 90° (en forma de Cruz), barriendo un recorrido de 12 [mm]. El instrumento arroja valores en Ra, Rq y Rz. Para este caso, se toma en cuenta los valores Ra, ya que, van a ser comparados con la Tabla 1.1, la cual proporciona grados de rugosidad según la norma DIN 4786, Además de tratarse de un equipo calibrado y digital, la incertidumbre generada se la puede despreciar, es tolerable.

2.10.3 Medición de la Cilindricidad o Conicidad y el Diámetro Maquinado del Agujero

Para determinar la cilindricidad o conicidad del agujero, se debe medir tanto en la parte superior (cara codificada), como en la inferior el diámetro obtenido después de taladrar la plancha de acero. Para ello, mediante el calibrador pie de rey se realiza cuatro mediciones, separadas en 45 grados formando una estrella en el agujero, como se observa en la Figura 2.20.

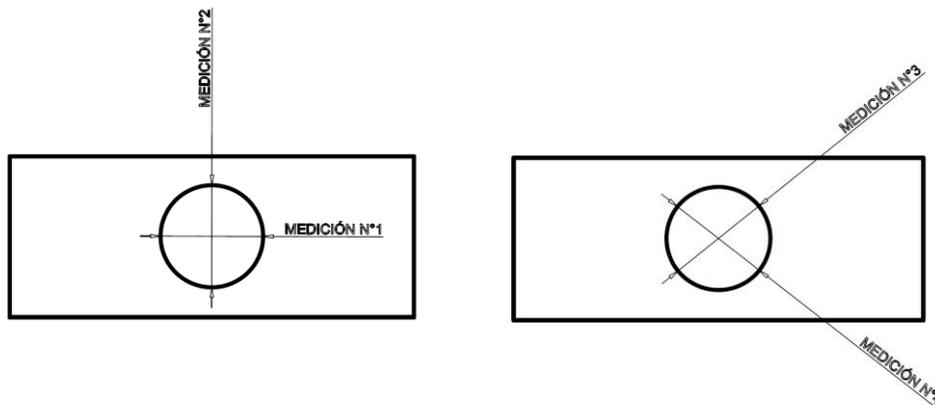


Figura 2.20: Manera en la cual se tomó las mediciones respectivas.

Fuente: [Propia]

Para realizar la medición de la cilindricidad o conicidad del agujero, se emplea el calibrador pie de rey de la marca Mitutoyo calibrado hasta el mes de junio del 2024. El procedimiento a seguir comienza con la colocación de la probeta sobre una superficie plana (mesa) y mediante la manipulación del instrumento se mide el diámetro superior (cara codificada) en las direcciones propuestas en la Figura 2.20. Este proceso se repite en la siguiente cara (cara inferior), como se observa en la Figura 2.21.



Figura 2.21: Medición de la Cilindricidad o Conicidad del agujero taladrado.

Fuente: [Propia]

Es así como, se muestra el procedimiento que se llevó a cabo para realizar la medición de Cilindricidad o conicidad del agujero obtenido y el diámetro mecanizado. Como se observa, es un método que genera una incertidumbre muy alta en los datos obtenidos, ya que, al ser manipulado completamente por el experimentador, se producen errores sistemáticos, tales como la fatiga del operador.

3 PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Esta sección está dedicada al análisis estadístico y gráfico de los datos obtenidos mediante la medición de los parámetros de prueba que van a determinar qué tan eficiente puede ser el mecanizado (Taladrar) de planchas de Acero ASTM A36 de 12 [mm] de espesor, en el centro de mecanizado VIWA VCM3M400 con controlador CENTROID M400AC. Sin aplicar ningún tipo de lubricación.

3.1 Parámetros de Prueba

El objetivo de este TIC es determinar la combinación óptima de los parámetros de mecanizado (Velocidad del husillo y Velocidad de avance) que permitan taladrar planchas de Acero ASTM A36 que tienen como espesor 12 [mm], sin aplicar ningún tipo de lubricación. Es así, que los parámetros de prueba que se van a considerar para el análisis estadístico y gráfico de los resultados obtenidos son:

- **Tiempo de Mecanizado:** Es importante determinar el tiempo óptimo de mecanizado, ya que este parámetro está ligado con el costo de la operación y el desgaste de la herramienta de corte (Broca).
- **Rugosidad Superficial (Ra):** Este parámetro es uno de los más importantes, debido a que, define la calidad de acabado superficial que presenta el agujero. Lo cual repercute en el costo de mecanizado y su aplicación en la industria.
- **Cilindricidad o Conicidad:** Representa que tan cónico puede llegar a ser el agujero, lo cual, define la posible aplicación que se le puede dar al proceso.
- **Calidad de Tolerancia:** La calidad de tolerancia representa la desviación máxima que puede llegar a tener el diámetro maquinado del agujero, es decir, es la máxima tolerancia superior admisible.

Estos son los parámetros de prueba considerados en la determinación de la combinación óptima de los parámetros de mecanizado en el taladrado de planchas de Acero ASTM A36 con 12 [mm] de espesor, sin aplicar ningún tipo de lubricación.

3.2 Resultados

Es así, como se presentan los resultados obtenidos después de medir los parámetros de prueba en cada una de las 25 probetas experimentadas en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Mecánica, resumidos en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Resumen de resultados obtenidos de medir los Parámetros de Prueba.

Fuente: [Propia]

N°	Código	Parámetros Mecanizado		Resultados Obtenidos					
		n [RPM]	fn [mm/min]	Tiempo Mecanizado [s]	Rugosidad [μm]	Diámetro Esperado [mm]	Diámetro Maquinado [mm]	Cilindricidad o Conicidad Promedio [mm]	Pasa Perno [3/8 in]
1	VA5-MT	1500	150	8,21	4,010	12,7	12,95	0,041	SI
2	VMA5-MT	1313	150	8,09	4,847	12,7	12,85	0,040	SI
3	VM5-MT	1125	150	7,74	3,870	12,7	12,80	0,045	SI
4	VMB5-MT	934	150	8,26	5,904	12,7	12,84	0,021	SI
5	VB5-MT	750	150	7,54	7,970	12,7	12,84	0,041	SI
6	VA4-MT	1500	125	10,1	4,343	12,7	12,93	0,027	SI
7	VMA4-MT	1313	125	9,45	4,785	12,7	12,93	0,046	SI
8	VM4-MT	1125	125	9,25	4,727	12,7	12,87	0,032	SI
9	VMB4-MT	934	125	9,18	5,962	12,7	12,80	0,028	SI
10	VB4-MT	750	125	9,04	6,395	12,7	12,75	0,036	SI
11	VA3-MT	1500	100	12,57	6,122	12,7	13,03	0,031	SI
12	VMA3-MT	1313	100	12,32	3,621	12,7	12,80	0,027	SI
13	VM3-MT	1125	100	13,36	4,935	12,7	12,99	0,041	SI
14	VMB3-MT	934	100	11,39	5,093	12,7	13,07	0,036	SI
15	VB3-MT	750	100	10,55	5,349	12,7	13,05	0,040	SI
16	VA2-MT	1500	75	15,52	5,825	12,7	12,87	0,053	SI
17	VMA2-MT	1313	75	16,6	5,500	12,7	12,75	0,023	SI
18	VM2-MT	1125	75	14,34	5,544	12,7	12,93	0,027	SI
19	VMB2-MT	934	75	16,83	6,342	12,7	12,72	0,025	SI
20	VB2-MT	750	75	16,91	3,668	12,7	12,70	0,020	SI
21	VA1-MT	1500	50	24,23	6,092	12,7	12,74	0,011	SI
22	VMA1-MT	1313	50	24,17	6,501	12,7	12,73	0,026	SI
23	VM1-MT	1125	50	23,31	5,178	12,7	12,92	0,011	SI
24	VMB1-MT	934	50	24,29	6,056	12,7	12,76	0,016	SI
25	VB1-MT	750	50	22,22	5,650	12,7	12,74	0,023	SI

En la Tabla 3.1, se encuentra de forma resumida los resultados obtenidos del mecanizado de planchas de Acero ASTM A36 de 12 [mm] de espesor, sin ningún tipo de lubricación en el centro de mecanizado.

Cabe recalcar que dichos datos se encuentran mejor detallados en las tablas ubicadas en los anexos I y II de este documento.

Una vez realizado el procesamiento previo de los datos obtenidos después de realizar la experimentación respectiva, se procede al análisis estadístico y gráfico.

3.3 Análisis de Resultados

Entonces, se procede a realizar el análisis gráfico y estadístico de los resultados obtenidos después de haber realizado el mecanizado respectivo a cada una de las probetas experimentadas de los parámetros de prueba.

3.3.1 Tiempo de Mecanizado

El tiempo de mecanizado es el parámetro de prueba más influyente en el costo de producción, ya que, determina el lapso que se va a utilizar el centro de mecanizado para taladrar la plancha de Acero ASTM A36.

Este parámetro de prueba esta netamente ligado con la velocidad de avance de la herramienta de corte (Broca), en por esta razón, que se procede a realizar la Figura 3.1 que relacione estas dos variables.

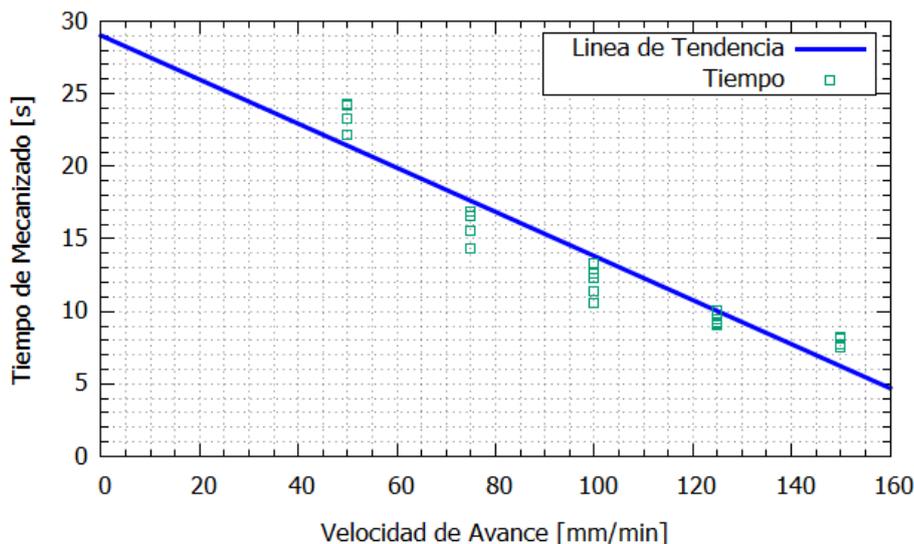


Figura 3.1: Tiempo de Mecanizado vs Velocidad de Avance.

Fuente: [Propia]

En la Figura 3.1 se aprecia que el tiempo de mecanizado es inversamente proporcional con la velocidad de avance.

Este suceso es lo que se esperaba en este análisis, lo cual, es corroborado con los resultados obtenidos, es decir, cuando la velocidad de avance sea de 50 [mm/min], el tiempo de maquinado se encuentra entre 20 y 25 segundos, siendo los valores máximos. Mientras que, en el polo opuesto, cuando la velocidad de avance es igual a 150 [mm/min], el rango es de 6 y 9 segundos, para el tiempo de mecanizado, tomando los valores mínimos obtenidos.

3.3.2 Calidad Superficial

Para determinar el tipo de Calidad Superficial de las probetas, se realiza un análisis estadístico y gráfico de la Rugosidad Superficial (Ra).

3.3.2.1 Rugosidad Superficial (Ra)

La rugosidad superficial (Ra), es la variable que define la calidad superficial que se obtiene del agujero maquinado. Es así como, en la Tabla 3.2, se encuentra tabulado este parámetro de prueba, junto con su Calidad Superficial.

Tabla 3.2: Rugosidad Superficial con su grado de rugosidad, para cada probeta.

Fuente: [Propia]

N°	Código	Parámetros Mecanizado		Resultados Obtenidos	
		n [RPM]	fn [mm/min]	Rugosidad Superficial Promedio [μm]	Grado de Rugosidad
1	VA5-MT	1500	150	4,010	N9
2	VMA5-MT	1313	150	4,847	N9
3	VM5-MT	1125	150	3,870	N9
4	VMB5-MT	934	150	5,904	N9
5	VB5-MT	750	150	7,970	N10
6	VA4-MT	1500	125	4,343	N9
7	VMA4-MT	1313	125	4,785	N9
8	VM4-MT	1125	125	4,727	N9
9	VMB4-MT	934	125	5,962	N9
10	VB4-MT	750	125	6,395	N10
11	VA3-MT	1500	100	6,122	N9
12	VMA3-MT	1313	100	3,621	N9
13	VM3-MT	1125	100	4,935	N9
14	VMB3-MT	934	100	5,093	N9
15	VB3-MT	750	100	5,349	N9
16	VA2-MT	1500	75	5,825	N9
17	VMA2-MT	1313	75	5,500	N9
18	VM2-MT	1125	75	5,544	N9
19	VMB2-MT	934	75	6,342	N10
20	VB2-MT	750	75	3,668	N9
21	VA1-MT	1500	50	6,092	N9
22	VMA1-MT	1313	50	6,501	N10
23	VM1-MT	1125	50	5,178	N9
24	VMB1-MT	934	50	6,056	N9
25	VB1-MT	750	50	5,650	N9

En la Tabla 3.2, se observa que la mayoría de las probetas maquinas (Taladradas), presentan un grado de rugosidad de N9, mientras que, unas cuantas tienen un N10. Lo cual, representa una “Exigencia Media” de la Calidad Superficial, lo que nos da como resultado un campo de aplicación para piezas fatigadas por flexión o torsión, ajustes normales de deslizamiento y presión, que es lo que esperaba de este proceso de maquinado, ya que, se trata para colocar pernos de 3/8 de pulgada en estructuras de acero.

Pero de esta forma, no se puede determinar cuál combinación de las variables de maquinado óptimas, por lo que se procede a realizar un análisis más exhaustivo de la rugosidad superficial.

La rugosidad superficial es el parámetro de prueba que depende de las variables de mecanizado, es decir, de la velocidad del husillo y del avance de la herramienta de corte, es así como se realiza el análisis gráfico por separado para cada una de ellas. Donde la Figura 3.2, presenta la rugosidad superficial versus la velocidad del husillo.

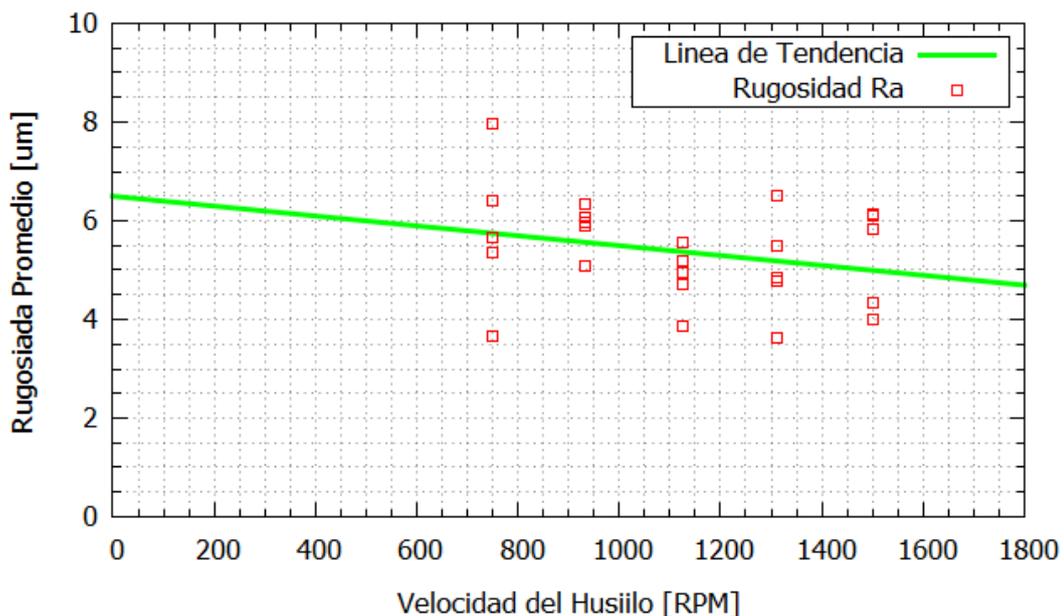


Figura 3.2: Rugosidad Promedio vs Velocidad del Husillo.

Fuente: [Propia]

En la Figura 3.2 se observa la gráfica que relaciona la Rugosidad Superficial Promedio versus la Velocidad del Husillo, la cual, presenta una relación inversamente proporcional entre ellas.

La línea de tendencia presenta una pendiente negativa, de aproximadamente $-0,001$, es por esta razón, que mientras se aumente la velocidad del husillo, la rugosidad superficial decrece, se hace más lisa.

Dando como resultado, que la rugosidad superficial mínima es igual a 3,621 [μm] se da con una velocidad del husillo de 1313 [RPM], en el caso contrario se tiene la rugosidad superficial máxima de 7,970 [μm] con 750 [RPM] para el husillo.

En la Figura 3.3, se presentan los datos de la rugosidad superficial versus la velocidad de avance de la herramienta de corte (Broca).

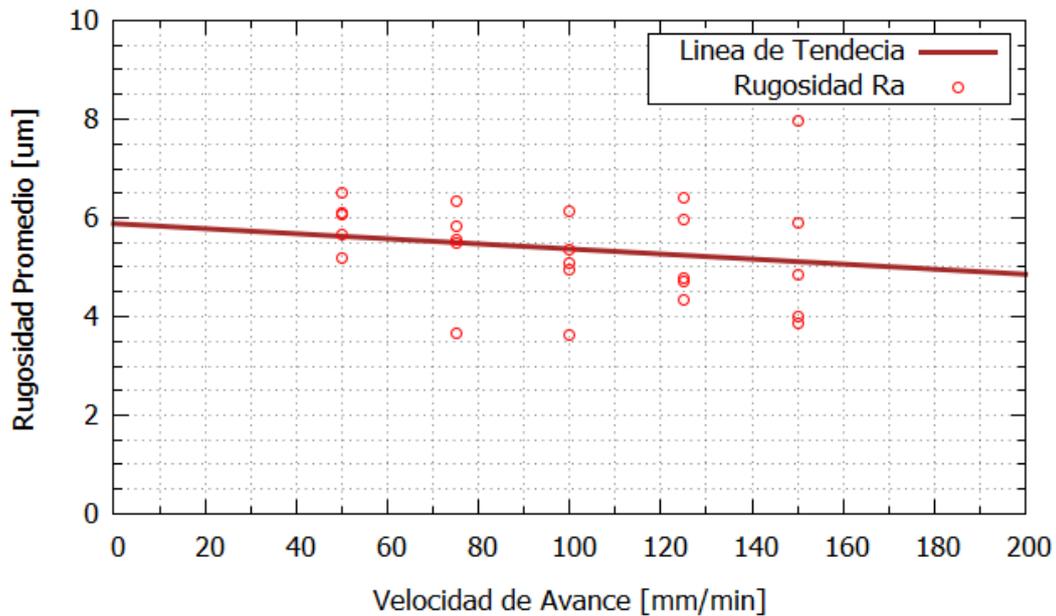


Figura 3.3: Rugosidad Promedio vs Velocidad de Avance.

Fuente: [Propia]

En la Figura 3.3 se observa la gráfica que relaciona la variable de la Rugosidad Superficial Promedio versus la Velocidad de Avance de la herramienta de corte (Broca), la cual, presenta una relación inversamente proporcional entre ellas.

La línea de tendencia presenta una pendiente negativa de aproximadamente -0,005, en conclusión, mientras se aumenta la Velocidad de Avance de la herramienta de corte (Broca), la Rugosidad Superficial disminuye, haciendo más lisa.

Al igual que el caso anterior, la Rugosidad Superficial mínima es de 3,621 [μm], se la obtiene con una Velocidad de Avance de 100 [mm/min], mientras que al inyectar 150 [mm/min] a la herramienta de corte (Broca), la rugosidad es igual a 7,970 [μm], siendo la máxima de entre todas.

Para este punto, las dos variables de mecanizado cumplen con la tendencia y relación la cual es inversamente proporcional a la Rugosidad Superficial. Por consiguiente, se realiza la Figura 3.4 que englobe toda la información recopilada.

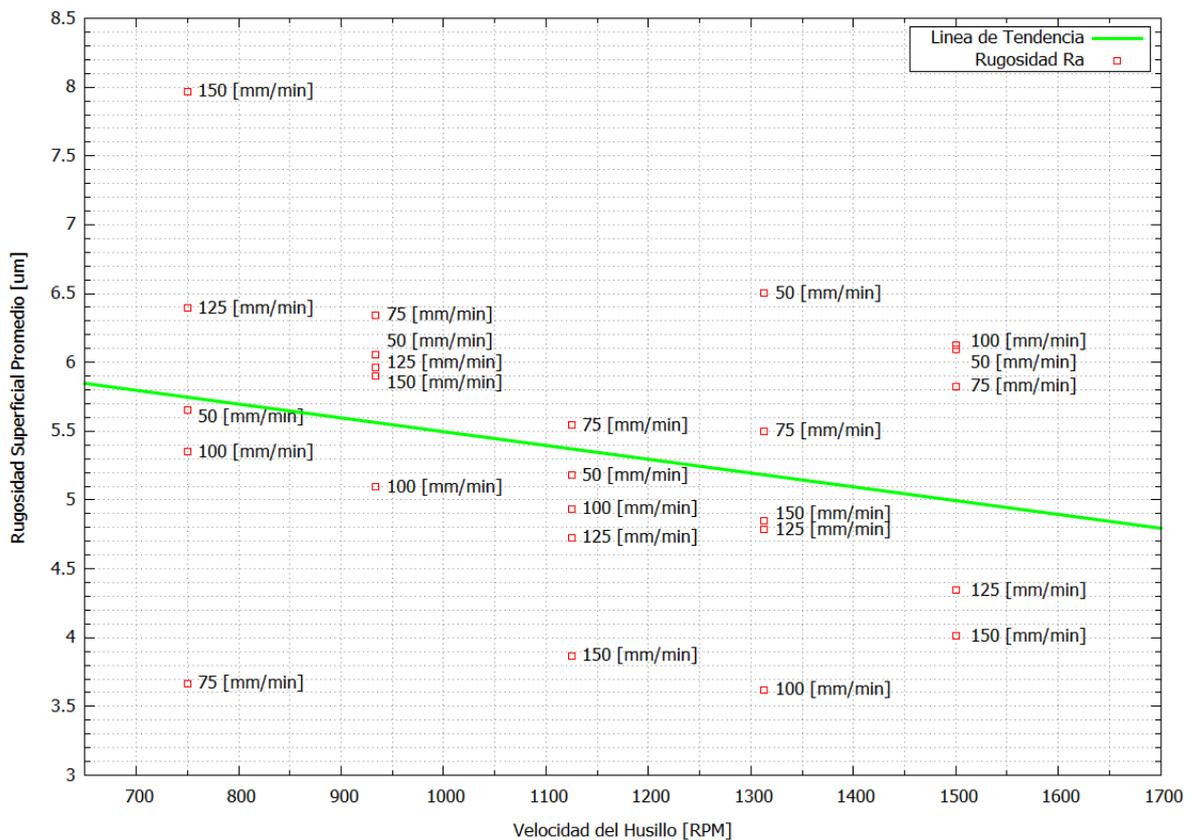


Figura 3.4: Rugosidad Superficial Promedio Vs Velocidad Husillo y Avance.

Fuente: [Propia]

En la Figura 3.4 se engloba toda la información obtenida de a Rugosidad Superficial Promedio versus las dos variables de mecanizado, para mayor entendimiento, se coloca como etiqueta la Velocidad de Avance en cada punto de la gráfica, de tal forma que, solo observando esta imagen, se logre determinar la combinación para cada acabado superficial.

En resumen, se puede mencionar que a velocidades del husillo constantes medias altas y altas, junto a velocidades de avance relativamente altas (media, media alta y alta), se obtiene un mejor acabado.

Frente a velocidades de avance bajas (baja y media baja), juntamente con velocidades del husillo constantes y relativamente bajas, las cuales dan como resultado rugosidades relativamente altas.

Es así como el mejor acabado superficial se da cuando la Velocidad del Husillo es media alta y una la Velocidad de Avance media, en ese sentido, la probeta VMA3-MT, cumple con los requisitos propuestos.

3.3.3 Tolerancia Dimensional

La Tolerancia Dimensional es el parámetro de prueba que define aspectos importantes como el tamaño del agujero maquinado, es así como, se realiza un análisis estadístico y gráfico de cada variable.

3.3.3.1 Cilindricidad o Conicidad

La Cilindricidad o Conicidad es el parámetro de prueba que define el aumento o disminución del diámetro final del agujero por cada mm de longitud (espesor) o altura. Es decir, define el acoplamiento que va a existir entre el eje (perno) y el agujero en un cierto espacio radial. Como se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Cilindricidad o Conicidad obtenidas posterior a la experimentación.

Fuente: [Propia]

N°	Código	Parámetros Mecanizado		Resultados Obtenidos		
		n [RPM]	fn [mm/min]	Diámetro Promedio Cara Codificada [mm]	Diámetro Promedio Cara Trasera [mm]	Cilindricidad o Conicidad
1	VA5-MT	1500	150	13,20	12,71	0,041
2	VMA5-MT	1313	150	13,10	12,61	0,040
3	VM5-MT	1125	150	13,07	12,53	0,045
4	VMB5-MT	934	150	12,96	12,71	0,021
5	VB5-MT	750	150	13,08	12,59	0,041
6	VA4-MT	1500	125	13,10	12,77	0,027
7	VMA4-MT	1313	125	13,20	12,65	0,046
8	VM4-MT	1125	125	13,06	12,68	0,032
9	VMB4-MT	934	125	12,96	12,63	0,028
10	VB4-MT	750	125	12,97	12,54	0,036
11	VA3-MT	1500	100	13,22	12,84	0,031
12	VMA3-MT	1313	100	12,97	12,64	0,027
13	VM3-MT	1125	100	13,24	12,75	0,041
14	VMB3-MT	934	100	13,29	12,86	0,036
15	VB3-MT	750	100	13,29	12,81	0,040
16	VA2-MT	1500	75	13,19	12,55	0,053
17	VMA2-MT	1313	75	12,89	12,61	0,023
18	VM2-MT	1125	75	13,09	12,76	0,027
19	VMB2-MT	934	75	12,87	12,57	0,025
20	VB2-MT	750	75	12,82	12,58	0,020
21	VA1-MT	1500	50	12,81	12,67	0,011
22	VMA1-MT	1313	50	12,89	12,58	0,026
23	VM1-MT	1125	50	12,99	12,86	0,011
24	VMB1-MT	934	50	12,86	12,66	0,016
25	VB1-MT	750	50	12,88	12,60	0,023

La Tabla 3.3 se presenta el diámetro maquinado superior (Cara Codificada) en comparación con el inferior (Cara Trasera), juntamente con la Cilindricidad o Conicidad que tiene cada una de las probetas ensayadas en el proceso de maquinado. Donde, el valor máximo de conicidad es igual a 0,05 obtenido en las probetas VM5-MT, VMA4-MT y VA2-MT.

Mientras que las probetas VA1-MT y VM1-MT tiene la cilindruidad o conicidad mínima, la cual tiene un valor de 0,01, siendo las mejores de entre las demás. En ese sentido, se puede mencionar que a velocidad de avance baja y velocidad del husillo alta y media, se obtienen valores bajos y mejores de esta variable.

Para seleccionar la mejor combinación de las variables de mecanizado, que den como resultado una cilindruidad mínima y mejor, se procede a realizar un análisis gráfico de este parámetro de prueba versus la velocidad del husillo y de avance por separado.

En ese sentido, se muestra la Figura 3.5, que gráfica los valores obtenidos de conicidad versus la velocidad del husillo, como se muestra a continuación.

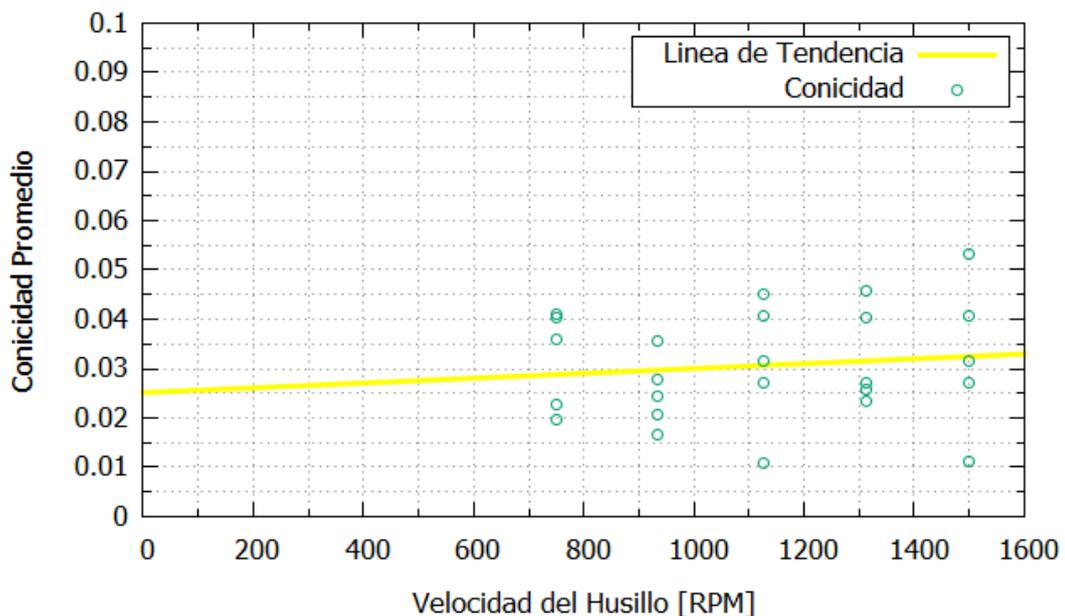


Figura 3.5: Conicidad vs Velocidad del Husillo.

Fuente: [Propia]

En la Figura 3.5 se presenta la gráfica de la Conicidad versus la Velocidad del husillo, donde se puede apreciar claramente que existe una relación directamente proporcional entre ellas con una pendiente de aproximadamente $4,90 \times 10^{-6}$, es decir, a mayores [RPM] aumenta considerablemente la cilindruidad de las probetas maquinadas.

Por otro lado, en la Figura 3.6, se muestra la gráfica de los valores obtenidos de Conicidad versus la velocidad de avance de la herramienta de corte (Broca).

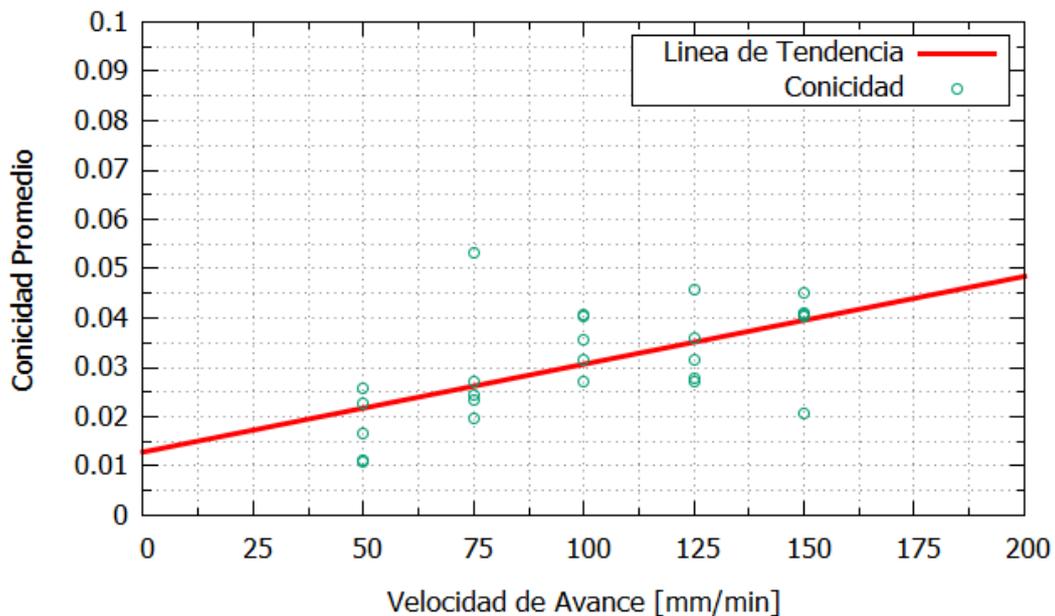


Figura 3.6: Conicidad vs Velocidad de Avance.

Fuente: [Propia]

En la Figura 3.6 se muestra la gráfica que relaciona la Conicidad Promedio con la Velocidad de Avance, al igual que la anterior, pero de forma aún más pronunciada con una pendiente igual a 0,0128 se concluye que tienen una relación directamente proporcional entre ellos.

Es decir, a medida que se aumenta la Velocidad de Avance de la herramienta de Corte (Broca) la Conicidad del agujero sufre la misma tendencia, haciendo que los diámetros superior e inferior discrepen más entre sí.

Se observa que esta variable de mecanizado tiene más influencia en la Conicidad del agujero, ya que, los valores no están tan dispersos en comparación con la Figura 3.5. Los cuales, presentan una desviación estándar más alta, haciendo que la pendiente de la línea de tendencia sea menos prominente que este caso.

Es así que, para determinar la mejor combinación de las variables de mecanizado, se construye la Figura 3.7, la cual engloba toda la información recopilada para el análisis de este parámetro de prueba, es decir, involucra de igual forma, la velocidad del husillo y la de avance.

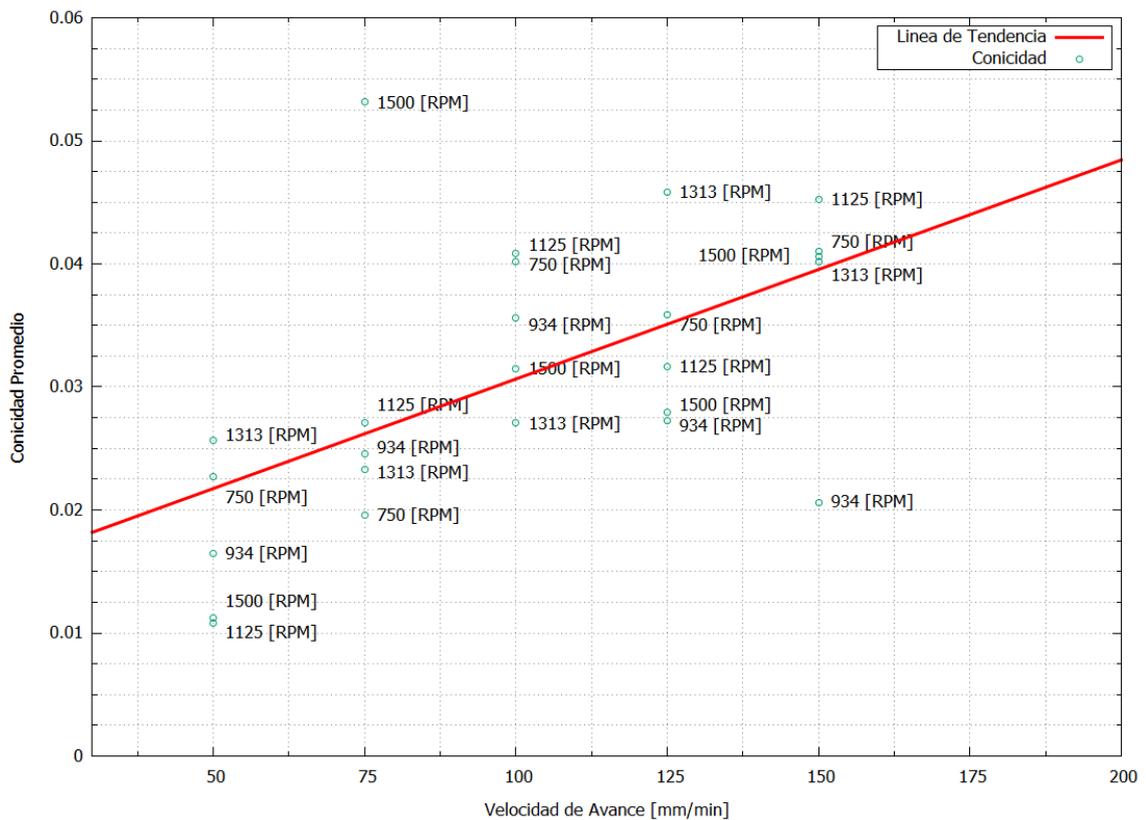


Figura 3.7: Conicidad Vs Velocidad del Husillo (n) y de Avance (f_n)

Fuente: [Propia]

En la Figura 3.7 se observa que, a velocidades constantes de avance bajas y velocidades altas, media y media baja del husillo, se obtienen los valores más bajos de conicidad, haciendo que la discrepancia entre los diámetros superior (Cara Codificada) e inferior (Cara Trasera), sean casi nulos, de tal forma, que se obtienen cilindros casi perfectos.

En conclusión, la probeta VM1-MT, presenta la mejor Cilindricidad o Conicidad de todas, teniendo un valor aproximadamente de 0.011, es decir, la mejor combinación de variables de mecanizado es: Velocidad del Husillo media y Velocidad de Avance baja.

3.3.3.2 Diámetro Maquinado

El diámetro maquinado obtenido, después de realizar el mecanizado de las planchas de Acero ASTM A36, en el centro de mecanizado, es uno de los parámetros de prueba más importantes y sencillos de analizar, ya que, solamente se analiza el error porcentual que se obtiene entre el valor esperado (real) y el obtenido (experimental). Es así como, en la Tabla 3.4, se encuentran tabulados los errores porcentuales obtenidos.

Tabla 3.4: Tabla de Errores Porcentuales entre el Diámetro Obtenido y el Esperado.

Fuente: [Propia]

N°	Código	Parámetros Mecanizado		Resultados Obtenidos		
		n [RPM]	fn [mm/min]	Diámetro Final [mm]	Diámetro Esperado [mm]	Error Porcentual [%]
1	VA5-MT	1500	150	12,95	12,70	1,98
2	VMA5-MT	1313	150	12,85	12,70	1,21
3	VM5-MT	1125	150	12,80	12,70	0,80
4	VMB5-MT	934	150	12,84	12,70	1,07
5	VB5-MT	750	150	12,84	12,70	1,07
6	VA4-MT	1500	125	12,93	12,70	1,84
7	VMA4-MT	1313	125	12,93	12,70	1,77
8	VM4-MT	1125	125	12,87	12,70	1,30
9	VMB4-MT	934	125	12,80	12,70	0,75
10	VB4-MT	750	125	12,75	12,70	0,41
11	VA3-MT	1500	100	13,03	12,70	2,59
12	VMA3-MT	1313	100	12,80	12,70	0,81
13	VM3-MT	1125	100	12,99	12,70	2,28
14	VMB3-MT	934	100	13,07	12,70	2,94
15	VB3-MT	750	100	13,05	12,70	2,73
16	VA2-MT	1500	75	12,87	12,70	1,35
17	VMA2-MT	1313	75	12,75	12,70	0,35
18	VM2-MT	1125	75	12,93	12,70	1,77
19	VMB2-MT	934	75	12,72	12,70	0,14
20	VB2-MT	750	75	12,70	12,70	0,00
21	VA1-MT	1500	50	12,74	12,70	0,30
22	VMA1-MT	1313	50	12,73	12,70	0,25
23	VM1-MT	1125	50	12,92	12,70	1,73
24	VMB1-MT	934	50	12,76	12,70	0,46
25	VB1-MT	750	50	12,74	12,70	0,31

Como se aprecia en la Tabla 3.4, el error máximo de todos se da en la probeta VMB3-MT, siendo igual a 2.94 [%], mientras que el espécimen VB2-MT, presenta un error porcentual mínimo de 0.00 [%], teniendo un diámetro maquinado igual al esperado.

Estos resultados eran los esperados, ya que, al tratarse de un mecanizado en una Máquina CNC, donde no interviene directamente la mano humana, la incertidumbre del proceso de reduce considerablemente.

En definitiva, el proceso es aceptable y confiable de aplicar, ya que, al no superar la incertidumbre máxima del 5 [%] e incluso llegando a tener como mínimo el 0.00 [%], es

aplicable. Por otro lado, la variable de mecanizado que más afecta a este parámetro de prueba es la velocidad de avance, es así como, se presenta la Figura 3.8, la cual recopila la información necesaria para su análisis.

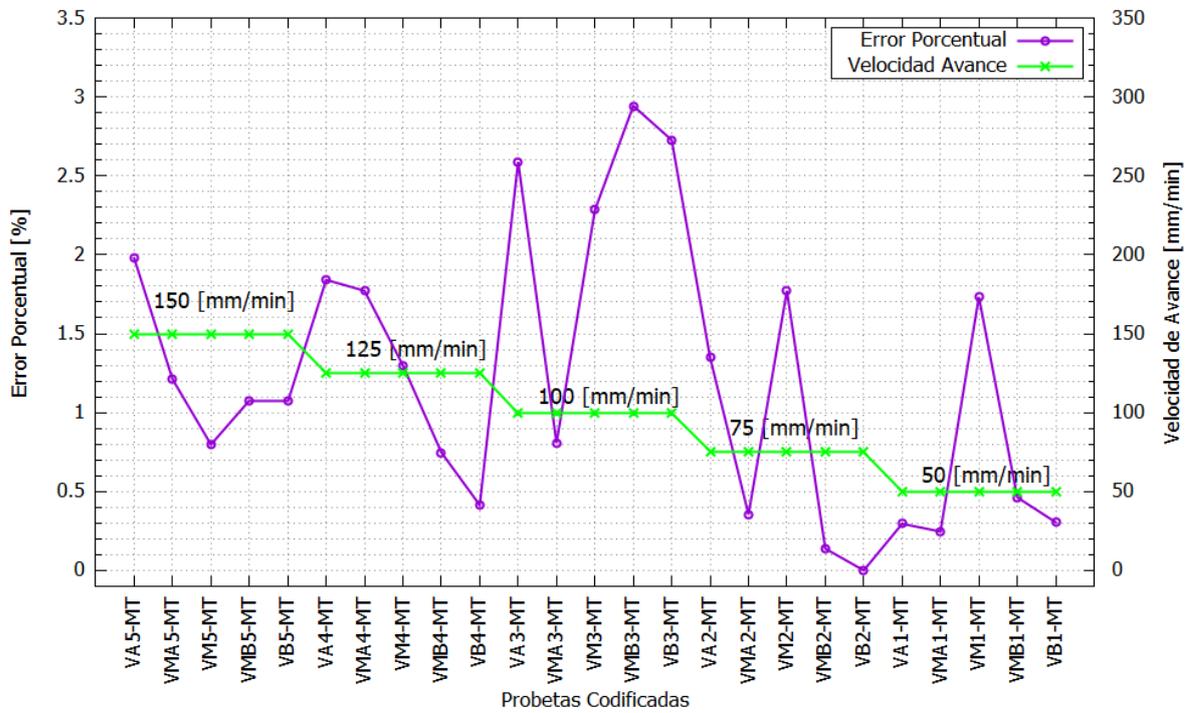


Figura 3.8: Error Porcentual de las probetas Vs la Velocidad de Avance.

Fuente: [Propia]

Como se observa, en la Figura 3.8 los errores máximos se dan con la velocidad de avance constante media y velocidad del husillo alta, media baja y baja, teniendo valores que oscilan entre 2,28 [%] hasta 2,94 [%].

Mientras que, a velocidades de avance constantes media baja y baja, juntamente con velocidades del husillo media baja, baja, alta y media alta, se tienen los errores porcentuales más bajos de todos, presentando valores que van desde el 0,00 [%] hasta llegar a un error del 0,46 [%].

Finalmente, la mejor combinación de variables de mecanizado que den como resultado el error porcentual mínimo es cuándo se aplica una: Velocidad del Husillo baja y Velocidad de Avance media baja, tal es el caso de la probeta VB2-MT.

Teniendo un error del 0,00 [%], es decir, presenta el diámetro maquinado igual al esperado.

3.3.3.3 Calidad de Tolerancia del Agujero

La Calidad de Tolerancia del agujero es el parámetro de prueba que define la variación permisible (Tolerancia) que puede existir entre el diámetro esperado (Real) y el obtenido después de realizar el mecanizado (Experimental), juntamente con la zona de aplicación. Es ese sentido, se construye la Tabla 3.5, la cual tabula esta variable de prueba para cada probeta taladrada.

Tabla 3.5: Calidad de Tolerancia y Zona de Tolerancia de agujero Taladrado.

Fuente: [Propia]

N°	Código	Parámetros Mecanizado		Resultados Obtenidos			
		n [RPM]	fn [mm/min]	Tolerancia [mm]	Tolerancia [μm]	Calidad de Agujero	Zona de Tolerancia
1	VA5-MT	1500	150	0,25	251	IT13	H13
2	VMA5-MT	1313	150	0,15	154	IT12	H12
3	VM5-MT	1125	150	0,10	101	IT11	H11
4	VMB5-MT	934	150	0,14	136	IT12	H12
5	VB5-MT	750	150	0,14	136	IT12	H12
6	VA4-MT	1500	125	0,23	234	IT13	H13
7	VMA4-MT	1313	125	0,23	225	IT13	H13
8	VM4-MT	1125	125	0,17	165	IT12	H12
9	VMB4-MT	934	125	0,10	95	IT11	H11
10	VB4-MT	750	125	0,05	53	IT10	H10
11	VA3-MT	1500	100	0,33	329	IT14	H14
12	VMA3-MT	1313	100	0,10	103	IT11	H11
13	VM3-MT	1125	100	0,29	290	IT13	H13
14	VMB3-MT	934	100	0,37	374	IT14	H14
15	VB3-MT	750	100	0,35	346	IT14	H14
16	VA2-MT	1500	75	0,17	171	IT12	H12
17	VMA2-MT	1313	75	0,05	45	IT9	H9
18	VM2-MT	1125	75	0,23	225	IT13	H13
19	VMB2-MT	934	75	0,02	18	IT7	H7
20	VB2-MT	750	75	0,00	0	*	*
21	VA1-MT	1500	50	0,04	38	IT9	H9
22	VMA1-MT	1313	50	0,03	31	IT9	H9
23	VM1-MT	1125	50	0,22	220	IT13	H13
24	VMB1-MT	934	50	0,06	59	IT9	H9
25	VB1-MT	750	50	0,04	39	IT9	H9

Nota: *La probeta VB2-MT no presenta Calidad de Agujero y Zona de Tolerancia, ya que, al obtener el diámetro final igual al esperado, es la mejor probeta de todas, en términos de exactitud, pero al ser un caso muy puntual, se toma el siguiente nivel como el más apropiado para las conclusiones de este Trabajo de Integración Curricular.

En la Tabla 3.5, se puede apreciar la Calidad de Agujero y Zona de Tolerancia para cada probeta Taladrada en el Centro de Mecanizado. En ese sentido, se observa que generalmente, los especímenes presentan calidad de tolerancia IT9, IT11, IT12, IT13 y IT14.

Por otro lado, existen dos probetas que presentan una calidad de tolerancia IT10 y IT7, respectivamente, siendo el último de estos la mejor de entre todas, presentando una tolerancia de aproximadamente 18 [μm] o equivalente a 0,018 [mm], mientras que la más alta de todas presenta una variación máxima de 430 [μm] lo cual es igual a 0,43 [mm].

Todas las probetas presentan una Zona de Tolerancia H, ya que, la variación máxima se da en el límite superior, es decir, en el diámetro máximo aceptable, ya que ninguna de ellas, presenta un diámetro por debajo del esperado.

No hay necesidad de analizar el tipo de ajuste que existe entre el agujero y el eje (perno), ya que, al tomar la recomendación de la norma AISC, la cual menciona que el diámetro del agujero debe ser 1/8 de pulgada más grande que el diámetro del eje (perno), nos asegura que siempre va a existir un ajuste en juego, entre estos elementos.

3.3.4 Análisis de Viruta

La viruta es el material que se obtiene después de realizar cualquier proceso de mecanizado. La forma, tamaño y el color, que pueden llegar a tener son indicativos de que tan agresivo fue el proceso. Es así, como en el apartado de ANEXOS (ANEXO III. Análisis de Viruta), se encuentran tabulados los resultados obtenidos, de este experimento.

En ese sentido, la mayoría de las probetas presentan viruta quemada (color azul), en algunos casos totalmente destruida en la mayor parte del material, siendo las probetas VA2-MT, VMA2-MT, VA1-MT y VM1-MT, las que presentan este fenómeno. Esto se puede dar por el hecho de que al inyectar una velocidad relativamente alta y un avance bajo y constante la herramienta de corte (Broca) tiene la facilidad de romper completamente la viruta.

Otra tendencia notable en la viruta es la formación de material alargado helicoidal duro y en algún caso también frágil, este fenómeno se presenta en todas las probetas, siendo las VB3-MT, VMA4-MT, VM5-MT y VM4-MT, los especímenes que tiene secciones más largas, finas y duras, además de estar quemadas. Esta tendencia se da cuando se inyectan velocidades relativamente grandes en los parámetros de mecanizado, ya que, al no tener mucho tiempo para triturar el material, esta toma la forma de las hélices de la broca y tiende a salir lo más rápido del proceso, haciendo más largo que otros.

Por otro lado, las probetas VMA3-MT, VB4-MT, VB1-MT y VMA1-MT, presentan secciones más cortas pero abundantes, las cuales presentan una velocidad del husillo relativamente alta, pero bajas en la velocidad de avance, este fenómeno provoca que el material adopte la forma de la herramienta de corte, pero al tener más tiempo para tritarlo, se forman secciones más pequeñas, cortándolas en el proceso.

Las probetas VA1-MT, VMA1-MT, VM1-MT, VMB1-MT y VB1-MT, no presentan viruta quemada, ya que, al tener velocidades de avance bajas, no se sobre esfuerza la herramienta de corte en el proceso, lo cual no ocurre en las otras, debido a que, estos especímenes tienen velocidad de avance alta, forzando a la broca en cada Taladrado.

3.3.5 Análisis de las posibles Combinaciones para los Parámetros de Mecanizado

El objetivo principal de este TIC es la determinación de la combinación óptima que se puede dar entre los parámetros de mecanizado (Velocidad del Husillo y la Velocidad de Avance de la herramienta de corte) para perforar planchas de acero ASTM A36 con los mejores parámetros de prueba, es así como, se realiza el siguiente análisis con el fin de determinar la combinación recomendable y no recomendable.

3.3.5.1 Combinación de los Parámetros de Mecanizado Recomendables

Para determinar la combinación recomendable y por consiguiente la probeta con los mejores parámetros de prueba que se pueden dar en este caso en específico, se realiza la Tabla 3.6, la cual, recopila de forma general, todas las posibles combinaciones que se pueden dar como resultado los mejores parámetros de prueba analizados.

Tabla 3.6: Combinación de Variables de cada Parámetro de Prueba Recomendable.

Fuente: [Propia].

Variables de Mecanizado	Parámetros de Prueba				
	Tiempo de Mecanizado	Calidad Superficial	Tolerancia Dimensional		
		Rugosidad Superficial (Ra)	Cilindricidad o Conicidad	Diámetro Final	Calidad de Tolerancia
Velocidad del Husillo [RPM]	*	MEDIA ALTA	MEDIA	BAJA	MEDIA BAJA
Velocidad de Avance [mm/min]	ALTA	MEDIA	BAJA	MEDIA BAJA	MEDIA BAJA

Como se aprecia en la Tabla 3.6, se puede apreciar todas las combinaciones posibles que dan como resultado las mejores condiciones para cada parámetro de prueba.

Para seleccionar la mejor combinación entre las variables de mecanizado, primero se menciona que los parámetros de prueba que corresponden a la Tolerancia Dimensional son los más influyentes, ya que, al tratarse de un agujero destinado a la unión de juntas mediante pernos, la Calidad Superficial y por ende la rugosidad superficial (Ra) no son tan relevantes en este caso, lo que realmente importa es que el perno pueda ingresar libremente en el agujero, sin presentar ningún contratamiento en su ensamble.

Con esta idea, se procede a seleccionar la mejor combinación que, para este caso en específico, recae en aplicar una Velocidad del Husillo Media Baja juntamente con una Velocidad de Avance Media Baja.

Con la combinación propuesta, se prescinde en cierta medida la Calidad Superficial y el Tiempo de Mecanizado, pero está perdida se ve recompensada, en la obtención de los mejores acabados dimensionales, tales como, el error porcentual mínimo, junto con la conicidad y la calidad de tolerancia.

Siendo la probeta VMB2-MT la mejor de todas, como lo muestra la Tabla 3.7, la cual tabula toda la información de este espécimen frente a cada uno de los parámetros de prueba.

Tabla 3.7: Parámetros de Prueba de la probeta recomendada VMB2-MT.

Fuente: [Propia]

Probeta	Parámetros Mecanizado	
	Velocidad del Husillo [RPM]	Velocidad de Avance [mm/min]
VMB2-MT	934	75
Parámetros de Prueba		
Tiempo de Mecanizado [s]	16,83	
Rugosidad Superficial (Ra) [μm]	6,342	
Calidad Superficial	N10	
Cilindricidad o Conicidad	0,025	
Error Porcentual [%]	0,14	
Calidad de Agujero	IT7	
Zona de Tolerancia	H7	

En la Tabla 3.7, se puede observar los resultados que obtuvo la probeta VMB2-MT, en cada uno de los parámetros de prueba, siendo la más recomendable de todas. Como se aprecia, los datos obtenidos son muy cercanos entre ellos, además, que están en un rango muy aceptable. En ese sentido, a pesar de tener un tiempo de mecanizado relativamente alto, al igual que, la rugosidad superficial y el grado de rugosidad, lo recompensa la tolerancia dimensional, siendo los valores mínimos encontrados de entre todos los especímenes.

3.3.5.2 Combinación de los Parámetros de Mecanizado no Recomendables

Al igual que el caso anterior, conocer la combinación no recomendada puede definir el alcance del proceso de taladrado propuesto en este Trabajo de Integración Curricular, es así como se presenta la Tabla 3.8, la cual, recopila todas las combinaciones que dieron como resultado los parámetros de prueba máximos de entres todos.

Tabla 3.8: Combinación de Variables de cada Parámetro de Prueba no Recomendado.

Fuente: [Propia]

Variables de Mecanizado	Parámetros de Prueba				
	Tiempo de Mecanizado	Calidad Superficial	Tolerancia Dimensional		
		Rugosidad Superficial (Ra)	Cilindricidad o Conicidad	Diámetro Final	Calidad de Tolerancia
Velocidad del Husillo [RPM]	*	BAJA	ALTA	MEDIA BAJA	MEDIA BAJA
Velocidad de Avance [mm/min]	BAJA	ALTA	MEDIA BAJA	MEDIA	MEDIA

En la Tabla 3.8, se puede observar todas las combinaciones entre las variables de mecanizado que dieron como resultado los parámetros máximos de todos. Siguiendo con el criterio anterior, se puede mencionar que la combinación no recomendada de todas es cuando se aplica una Velocidad del Husillo Alta junto con una Velocidad de Avance Media.

Con esta combinación al contrario que la anterior, se prescinde notablemente la Tolerancia Dimensional, pero se recompensa de alguna manera en el Acabado Superficial y el Tiempo de Mecanizado que la probeta llega a tener. En este sentido, la probeta VA3-MT, como se muestra en la Tabla 3.9, presenta la combinación no recomendada.

Tabla 3.9: Parámetros de Prueba de la probeta no recomendada VA3-MT.

Fuente: [Propia]

Probeta	Parámetros Mecanizado	
	Velocidad del Husillo [RPM]	Velocidad de Avance [mm/min]
VA3-MT	1500	100
Parámetros de Prueba		
Tiempo de Mecanizado [s]	12,57	
Rugosidad Superficial (Ra) [μm]	6,122	
Calidad Superficial	N9	
Cilindricidad o Conicidad	0,031	
Error Porcentual [%]	2,59	
Calidad de Agujero	IT14	
Zona de Tolerancia	H14	

En la Tabla 3.9, se observan los resultados que obtuvo la probeta VA3-MT en los diferentes parámetros de prueba, como se aprecia, la tolerancia dimensional se eleva considerablemente, llegando a tomar uno de los valores máximos de entre todos, por otro lado, este déficit se compensa en el tiempo de maquinado, el cual, es relativamente menor juntamente con la calidad superficial.

Pero estos estos valores aún siguen dentro de una ranga bastante aceptable de producción y maquinado, es decir, el experimento propuesto presenta un alcance bastante amplio donde hasta los valores máximos son opciones viables para la manufactura de este tipo de agujeros en planchas de Acero ASTM A36, empleando el centro de mecanizado sin aplicar ningún tipo de lubricación.

3.4 Conclusiones

En el transcurso del estudio realizado en este Trabajo de Integración Curricular, hemos logrado determinar y analizar de manera exhaustiva las variables de mecanizado para el taladrado de planchas de Acero ASTM A36 de 12 [mm] de espesor, empleando el centro de mecanizado VIWA VCM3M400 con controlador CENTROID M400AC, sin emplear ningún tipo de lubricación. Los resultados obtenidos revelan que la combinación más recomendable entre la Velocidad del Husillo (n) y la Velocidad de Avance (f_n) es cuando se aplica 934 [RPM] y 75 [mm/min], respectivamente. Obteniendo como logro una excepcional Tolerancia Dimensional entre los valores obtenidos y los esperados, en ese sentido, se menciona que el error máximo fue del 2,94 [%] mientras que el mínimo oscila entre el 0,00 [%] y el 0,14 [%] para el diámetro maquinado, adicional a esto, se obtuvo una calidad de tolerancia IT7 y una conicidad del 0,025 por unidad de longitud, obteniendo así un agujero casi perfecto para el propósito planteado. Claro está que esta combinación prescinde en cierta medida el tiempo de mecanizado y la calidad superficial pero no en un nivel crítico.

Este TIC ha demostrado tener un impacto significativo en el desarrollo industrial de nuestro país, abordando no solo aspectos académicos sino, también fortaleciendo el proceso de manufactura empleado en la industria ecuatoriana, promoviendo un rango óptimo de uso para los parámetros de mecanizado, donde cada una de ellos puede adoptar cinco niveles diferentes de aplicación, pasando desde el más alto (crítico) hasta llegar al más bajo (acogedor), dando como resultado valores aceptables en cada uno de los parámetros de prueba, es decir, este proceso atribuye un intervalo de tiempo de mecanizado de 7 segundos a 25 segundos, juntamente con una calidad o grado de rugosidad superficial de N9 y N10, una calidad de tolerancia IT7, IT9, IT10, IT11, IT12, IT13 y IT14 y una conicidad máxima del 0,045 por unidad de longitud.

Al realizar el análisis exhaustivo del comportamiento de las condiciones finales del material versus cada una de las variables de mecanizado, para los casos de Rugosidad Superficial, se logró determinar que presenta una relación inversamente proporcional con la Velocidad del Husillo (n) con una pendiente de -0,001 y de -0,005 con la Velocidad de Avance (f_n), demostrando que a mayor nivel de aplicación, mejor acabado superficial se obtendrá, esto lo demuestra la combinación no recomendable, la cual adopta valores relativamente altos, prescindiendo en este caso la Tolerancia Dimensional. Por otro lado, la conicidad del agujero tiene una relación directamente proporcional con las variables de mecanizado, tomando valores de $4,90 \times 10^{-6}$ y 0,0128, respectivamente, haciendo que a menores valores

de aplicación mejores condiciones dimensionales, tal cual, lo demuestra la combinación más recomendable.

La propuesta de este proyecto afirma que el Tiempo de Mecanizado presenta una relación inversamente proporcional con la Velocidad de Avance (f_n) de la herramienta de corte, con esa idea, se concluye que el tiempo más corto de mecanizado, el cual tiene un valor de 7,74 segundos se da con el avance de 150 [mm/min], mientras que el tiempo más largo y poco recomendable que es igual a 24,29 segundos, se lo obtiene con un avance de 50 [mm/min]. Cabe recalcar que estos valores se encuentran en un rango aceptable de aplicación, haciendo que el alcance de este TIC sea extenso y seguro de aplicar, obteniendo así buenos resultados.

Los hallazgos obtenidos durante el análisis de la Calidad Superficial adjudican valores máximos cuando las variables de mecanizado son relativamente bajas, utilizando valores de 7,970 [μm] y 6,501 [μm], dando como resultado un grado de rugosidad N10, por otro lado, los valores mínimos y por ende los mejores se dan cuando los parámetros son relativamente altos, teniendo valores del 3,621 [μm] y del 3,668 [μm] empleando un grado N9. Todos los datos obtenidos fueron medidos por el rugosímetro Mitutoyo SJ-210. En conclusión, el proceso de mecanizado llevado a cabo en el desarrollo de este TIC concede Rugosidades Superficiales (Ra) que van desde los 3,621 [μm] hasta los 7,970 [μm], adicional a esto el grado esperado será N9 y N10, respectivamente.

Al concluir este proyecto, es crucial destacar los resultados obtenidos en la Tolerancia Dimensional de las piezas maquinadas, ya que se las dio cierta distinción sobre las demás, en ese sentido, al aplicar el proceso de taladrado propuesto, se esperarían obtener Calidades de Tolerancia IT7, IT9, IT10, IT11, IT12, IT13 y IT14, si se requiere una precisión adicional, tendríamos H7, H9, H10, H11, H12, H13 y H14, cuando toda la tolerancia sea aplicada en el límite superior, en ese sentido, se puede asegurar que el ajuste que existe entre el agujero y el eje (perno de 3/8 [in]), será en juego y el error máximo esperado será de 2,94 [%] para el diámetro con una conicidad máxima del 0,045 por unidad de longitud, haciendo un agujero casi perfecto para la aplicación propuesta. Finalmente, el alcance de este proceso es amplio porque los valores no recomendados y recomendados siguen estando dentro del rango aceptable de aplicación.

3.5 Recomendaciones

En vista de los resultados obtenidos con respecto al Acabado Superficial, se sugiere afilar la herramienta de corte (Broca), antes de realizar el taladrado de las planchas de acero ASTM A36 en el centro de mecanizado VIWA VCM3M400 con controlador CENTROID M400AC, sin emplear ningún tipo de lubricación. De esta forma, la vida útil del filo de la herramienta se alargará considerablemente y no existirán valores atípicos en la medición de la Rugosidad Superficial (R_a), por parte del rugosímetro Mitutoyo SJ-210.

Es crucial determinar un sistema que determine las variables de mecanizado óptimas para el taladrado de planchas de acero ASTM A36, que tome en cuenta el espesor que se va a maquinar, debido a que, los valores obtenidos para el desarrollo de este Trabajo de Integración Curricular son muy generales (proporcionados por el fabricante), por lo que no toman en cuenta este parámetro que puede influenciar de cierto modo en el tiempo de vida útil de la herramienta de corte (Broca).

Para maximizar los beneficios que puede otorgar este Trabajo de Integración Curricular, es recomendable reducir los errores sistemáticos generados durante la medición de los parámetros de prueba que son susceptibles a ello, tales como el Tiempo de Mecanizado (cronometro digital) y el error porcentual del Diámetro Maquinado obtenido (Calibrador), para ello se sugiere la obtención de más datos, de modo que el error sistemático generado por la intervención del ser humano se reduzca considerablemente haciendo más confiables los resultados obtenidos.

Con el fin de facilitar la medición de la Rugosidad Superficial (R_a), con el rugosímetro Mitutoyo JS-210, es factible mantener la herramienta de corte (Broca) en funcionamiento estático para la Velocidad de Avance (f_n) y solamente mantener la Velocidad del Husillo (n), en ese estado, haciendo un proceso de rectificado a lo largo de la superficie maquinada, de esta forma, se elimina la aparición de zonas más rugosas que otra, desapareciendo totalmente los valores atípicos que puedan existir y reduciendo el tiempo de aplicación del instrumento de medida, haciendo este procedimiento más rápido y fácil.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, S. M. (4 de Mayo de 2023). *METALMECÁNICA: Recomendaciones para el reciclaje y reutilización de viruta de metal*. (METALMECÁNICA) Recuperado el 21 de Enero de 2024, de <https://www.metalmecanica.com/es/noticias/recomendaciones-para-el-reciclaje-y-reutilizacion-de-viruta>
- Bhusan, B. (2001). *Técnicas de Medida y Análisis de Rugosidad Superficial*. ACADÉMICO SEMÁNTICO.
- Caire, M. A. (2013). *ESTUDIO DE LAS FUERZAS DE AVANCE EN UN PROCESO DE TALADRADO UTILIZANDO BROCAS CON GEOMETRÍA MEJORADA*. Chile.
- Carvajal, L. (2006). *Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado* (28 ed.). Santiago de Cali: U.S.C.
- Cg, V. (9 de Mayo de 2017). *SCRIBD: Conicidad y Rosacado Torno*. Obtenido de SCRIBD: <https://es.scribd.com/document/347788584/Conicidad-y-Rosacado-torno>
- Contreras, R. (2014). *La mecha para taladrar: La geometría de la punta de la broca helicoidal*.
- Deng, Y. (23 de Diciembre de 2022). *PRO-LEAN: Rugosidad de la superficie: todo lo que necesita saber*. Obtenido de PRO-LEAN: <https://proleantech.com/es/surface-roughness-everything-you-need-to-know/>
- Group, K. G. (2016). *Drill Nomenclature and Geometry*.
- M. Alauddin, M. E. (1995). *Computer-aided analysis of a surface-roughness model for end milling*. Journal of Materials Processing Technology 55, 1995.
- Magdaleno, D. T. (2013). *ESTUDIO DE LA ADHESIÓN EN LA RUGOSIDAD DEL ALUMINIO*. Madrid.
- Mantenimiento. (14 de Septiembre de 2022). *Mantenimiento: tipos de brocas para metal*. (SKIL) Recuperado el 30 de Junio de 2023, de Mantenimiento: <https://www.mantenimientoelectrico.com/mantenimiento/mantenimiento-tipos-brocas-metal-n2192#:~:text=%C3%89stas%20han%20de%20ser%20elegidas,y%20el%20aluminio%2C%20entre%20otros>.

- Mejía, A. C. (2007). *Diseño de Experimentos. Curso Práctico*. Delegación Iztapalapa: © 2007 UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO .
- Mexicana, Y. (17 de Abril de 2020). *Yamazen Mexicana: El rugosímetro, parte de los instrumentos de medición metrología*. (Yamazen Mexicana) Recuperado el 25 de Agosto de 2023, de Yamazen Mexicana: [https://yamazen.com.mx/blog/metrology-gdt-and-lab-test/el-rugosimetro-parte-de-los-instrumentos-de-medicion-metrologia.html#:~:text=Se%20utiliza%20un%20rugos%C3%ADmetro%20para,mi cr%C3%B3metros%20o%20micras%20\(%C2%B5m\)](https://yamazen.com.mx/blog/metrology-gdt-and-lab-test/el-rugosimetro-parte-de-los-instrumentos-de-medicion-metrologia.html#:~:text=Se%20utiliza%20un%20rugos%C3%ADmetro%20para,mi cr%C3%B3metros%20o%20micras%20(%C2%B5m).).
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos*. México: LIMUSA, S.A. .
- Mundial, G. M. (14 de Diciembre de 2022). *Grados Material Mundial: ASTM A36 Acero Propiedades & Ficha Técnica: Fy, Dureza, Densidad*. Obtenido de Grados Material Mundial: <https://www.materialmundial.com/acero-astm-a36-propiedades-ficha-tecnica-estructural/>
- Onaciu, T. (15 de Noviembre de 2008). *Medición y Control: Tolerancias dimensionales y geométricas*. Obtenido de Medición y Control: <https://www.interempresas.net/Medicion/Articulos/26029-Tolerancias-dimensionales-y-geometricas.html>
- Ortiz, J. A. (2018). *Contribución al estudio de la rugosidad superficial, obtenida mediante el proceso de fresado en alta velocidad, en la fase de acabado, de aceros templados, de moldes y matrices*. Barcelona: Departament d'Enginyera Mecánica.
- Pacheco, A. (21 de Julio de 2019). *EDUCCANDO: Tolerancias y Ajustes*. Obtenido de EDUCCANDO: <https://educcando.com/tolerancias-dibujo-tecnico/>
- Pérez, J. F. (2020). *Estudio de los Procesos de Taladrado en Estructuras Aeronáuticas: Desgaste de herramientas, calidad y control del daño en el componente*. Madrid. (2019). *Rugosidad Superficial*. GTM.
- Tecnocorte. (12 de Abril de 2021). *TECNOCORTE: Velocidad de corte y de avance en fresadora CNC: como calcularlas fácilmente*. (TECNOCORTE) Recuperado el 4 de Octubre de 2023, de TECNOCORTE: [https://tecnocorte.com/blog/fresadora-cnc-calculiar-velocidad-de-corte-y-de-avance/#:~:text=Lo%20habitual%20en%20m%C3%A1quinas%20CNC,entre%206.000%20y%2024.000%20RPM](https://tecnocorte.com/blog/fresadora-cnc-calculiar-velocidad-de-corte-y-de-avance/#:~:text=Lo%20habitual%20en%20m%C3%A1quinas%20CNC,entre%206.000%20y%2024.000%20RPM.).

UMESAL. (25 de Julio de 2019). *UMESAL: Cómo funciona el proceso de mecanizado*. (UMESAL) Recuperado el 4 de Octubre de 2023, de <https://umesal.com/como-funciona-el-proceso-de-mecanizado/>

INDUSTRIAS VIWA, S.A. DE C.V (s. F) VCM3M400 AC Centro de Maquinado Vertical CNC, marca VIWA, Control CENTROID M400 ATC AC. Jalisco. Recuperado de <http://www.sellusedmachinery.com/listingbrochures/12113144883973269.pdf>

5 ANEXOS

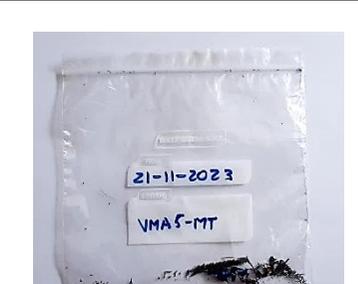
ANEXO I. Conjunto de Mediciones (Rugosidad Superficial)

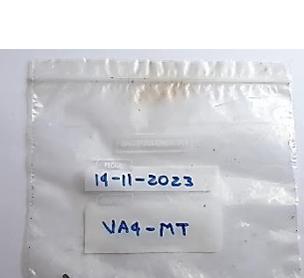
N°	Código	Parámetros Mecanizado		Mediciones				Resultados Obtenidos	
		n [RPM]	fn [mm/min]	Rugosidad N°1 [μm]	Rugosidad N°2 [μm]	Rugosidad N°3 [μm]	Rugosidad N°4 [μm]	Rugosidad Promedio [μm]	Calidad Superficial
1	VA5-MT	1500	150	4,594	4,619	3,278	3,548	4,010	N9
2	VMA5-MT	1313	150	2,518	6,217	4,496	3,828	4,847	N9
3	VM5-MT	1125	150	6,613	3,956	3,146	4,507	3,870	N9
4	VMB5-MT	934	150	6,253	3,736	7,722	2,943	5,904	N9
5	VB5-MT	750	150	7,537	10,214	6,159	2,422	7,970	N10
6	VA4-MT	1500	125	3,035	5,26	4,733	2,665	4,343	N9
7	VMA4-MT	1313	125	3,846	5,992	5,25	4,053	4,785	N9
8	VM4-MT	1125	125	6,058	3,803	5,653	3,395	4,727	N9
9	VMB4-MT	934	125	6,653	3,416	6,204	7,574	5,962	N9
10	VB4-MT	750	125	2,944	6,479	5,358	7,349	6,395	N10
11	VA3-MT	1500	100	6,694	5,265	5,748	6,782	6,122	N9
12	VMA3-MT	1313	100	3,503	4,049	7,325	3,311	3,621	N9
13	VM3-MT	1125	100	5,048	6,732	4,158	3,801	4,935	N9
14	VMB3-MT	934	100	6,784	4,097	4,949	4,54	5,093	N9
15	VB3-MT	750	100	5,899	5,961	4,028	5,508	5,349	N9
16	VA2-MT	1500	75	6,291	4,877	7,08	5,051	5,825	N9
17	VMA2-MT	1313	75	4,428	7,419	4,893	5,258	5,500	N9
18	VM2-MT	1125	75	5,496	3,551	6,859	6,27	5,544	N9
19	VMB2-MT	934	75	7,31	7,603	4,514	5,94	6,342	N10
20	VB2-MT	750	75	3,068	2,389	3,568	5,646	3,668	N9
21	VA1-MT	1500	50	7,637	4,403	4,597	7,73	6,092	N9
22	VMA1-MT	1313	50	5,476	7,087	5,936	7,503	6,501	N10
23	VM1-MT	1125	50	4,785	4,893	6,859	4,173	5,178	N9
24	VMB1-MT	934	50	6,697	6,134	6,816	4,575	6,056	N9
25	VB1-MT	750	50	5,641	6,727	4,291	5,941	5,650	N9

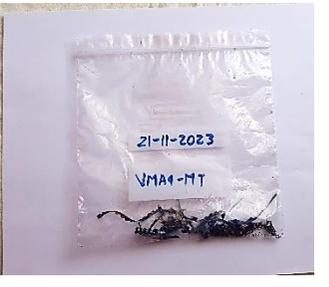
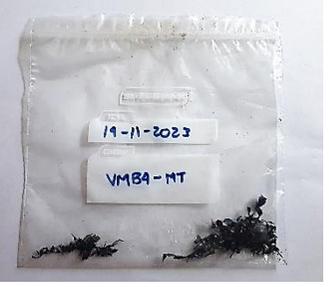
ANEXO II. Conjunto de Mediciones (Cilindricidad o Conicidad)

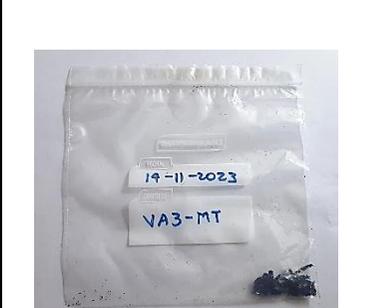
N°	Código	Parámetros Mecanizado		Mediciones Cara Codificada					Mediciones Cara Trasera					Resultados Obtenidos	
		n [RPM]	fn [mm/min]	Diámetro N°1 [mm]	Diámetro N°2 [mm]	Diámetro N°3 [mm]	Diámetro N°4 [mm]	Diámetro Promedio [mm]	Diámetro N°1 [mm]	Diámetro N°2 [mm]	Diámetro N°3 [mm]	Diámetro N°4 [mm]	Diámetro Promedio [mm]	Diámetro Final [mm]	Cilindricidad o Conicidad
1	VA5-MT	1500	150	13,18	13,2	13,19	13,21	13,20	12,66	12,74	12,73	12,7	12,71	12,95	0,041
2	VMA5-MT	1313	150	13,26	13,04	13,1	12,98	13,10	12,68	12,63	12,58	12,56	12,61	12,85	0,040
3	VM5-MT	1125	150	13,07	13,03	13,16	13,03	13,07	12,58	12,67	12,37	12,5	12,53	12,80	0,045
4	VMB5-MT	934	150	12,91	13,03	12,89	13,01	12,96	12,61	12,77	12,78	12,69	12,71	12,84	0,021
5	VB5-MT	750	150	13,15	12,98	13,03	13,17	13,08	12,7	12,51	12,68	12,47	12,59	12,84	0,041
6	VA4-MT	1500	125	13,12	13,1	13,15	13,02	13,10	12,76	12,72	12,84	12,76	12,77	12,93	0,027
7	VMA4-MT	1313	125	13,18	13,19	13,21	13,22	13,20	12,66	12,51	12,81	12,62	12,65	12,93	0,046
8	VM4-MT	1125	125	13,12	12,94	13,16	13	13,06	12,51	12,72	12,81	12,66	12,68	12,87	0,032
9	VMB4-MT	934	125	12,96	13,05	12,91	12,93	12,96	12,71	12,57	12,58	12,65	12,63	12,80	0,028
10	VB4-MT	750	125	12,8	12,97	13	13,1	12,97	12,63	12,59	12,62	12,31	12,54	12,75	0,036
11	VA3-MT	1500	100	13,21	13,27	13,15	13,24	13,22	12,97	12,74	12,88	12,77	12,84	13,03	0,031
12	VMA3-MT	1313	100	12,97	12,96	12,97	12,96	12,97	12,71	12,72	12,4	12,73	12,64	12,80	0,027
13	VM3-MT	1125	100	13,31	13,29	13,11	13,23	13,24	12,66	12,86	12,7	12,76	12,75	12,99	0,041
14	VMB3-MT	934	100	13,37	13,24	13,35	13,19	13,29	12,9	12,81	12,82	12,91	12,86	13,07	0,036
15	VB3-MT	750	100	13,32	13,21	13,33	13,29	13,29	12,96	12,65	12,89	12,72	12,81	13,05	0,040
16	VA2-MT	1500	75	13,07	13,1	13,15	13,44	13,19	12,67	12,64	12,41	12,49	12,55	12,87	0,053
17	VMA2-MT	1313	75	12,71	12,98	12,9	12,95	12,89	12,63	12,54	12,6	12,65	12,61	12,75	0,023
18	VM2-MT	1125	75	12,92	13,12	13,2	13,11	13,09	12,77	12,76	12,81	12,71	12,76	12,93	0,027
19	VMB2-MT	934	75	12,93	12,77	12,84	12,92	12,87	12,63	12,51	12,53	12,61	12,57	12,72	0,025
20	VB2-MT	750	75	12,84	12,81	12,76	12,86	12,82	12,65	12,5	12,66	12,52	12,58	12,70	0,020
21	VA1-MT	1500	50	12,76	12,94	12,74	12,78	12,81	12,7	12,69	12,67	12,62	12,67	12,74	0,011
22	VMA1-MT	1313	50	12,84	12,93	12,92	12,85	12,89	12,59	12,64	12,49	12,59	12,58	12,73	0,026
23	VM1-MT	1125	50	12,97	12,91	12,96	13,1	12,99	12,8	12,83	12,84	12,95	12,86	12,92	0,011
24	VMB1-MT	934	50	12,87	12,82	12,91	12,83	12,86	12,65	12,67	12,65	12,67	12,66	12,95	0,041
25	VB1-MT	750	50	12,81	12,91	12,83	12,95	12,88	12,61	12,62	12,67	12,51	12,60	12,85	0,040

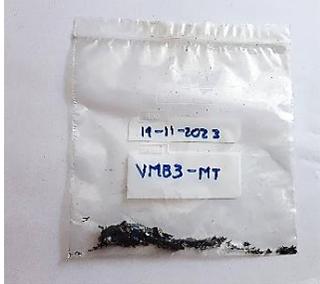
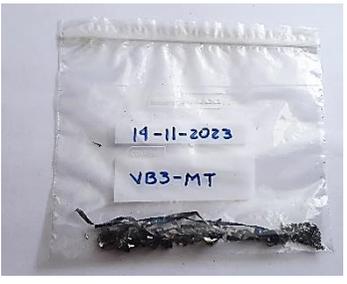
ANEXO III. Análisis de Viruta

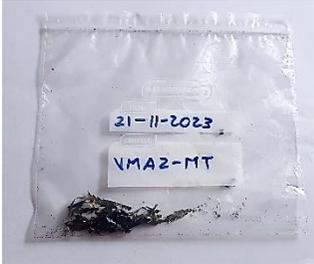
N°	Probeta	Parámetro Mecanizado		ANÁLISIS DE VIRUTA			Análisis Resultados
		n [RPM]	fn [mm/min]	PROBETA CODIFICADA	VIRUTA		
1	VA5-MT	1500	150				<p>Viruta totalmente destruida, se forman secciones largas y helicoidales frágiles.</p> <p>Viruta quemada (color azul)</p>
2	VMA5-MT	1313	150				<p>Viruta totalmente destruida.</p> <p>Secciones alargadas y helicoidales más duras y unidas.</p> <p>Viruta quemada y secciones largas, rectas y frágiles</p>
3	VM5-MT	1125	150				<p>Abundante secciones largas y helicoidales finas y gruesas.</p> <p>Viruta quemada (color azul).</p> <p>Secciones alargadas y frágiles.</p>

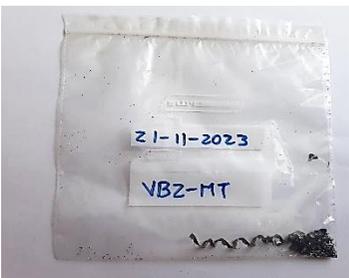
N°	Probeta	Parámetros Mecanizado		ANÁLISIS DE VIRUTA - CONTINUACIÓN			Análisis Resultados
		n [RPM]	fn [mm/min]	PROBETAS CODIFICADAS	VIRUTA		
4	VMB5-MT	934	150				Viruta totalmente destruida. Presenta pocas secciones alargadas y helicoidales. Material quemado (color azul), al igual que el resto.
5	VB5-MT	750	150				Viruta totalmente destruida. Se forman secciones cortas y helicoidales. Viruta quemada (color azul)
6	VA4-MT	1500	125				Viruta totalmente destruida y quemada (color azul). Se forman secciones cortas restas quemadas.

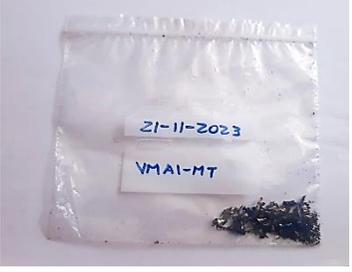
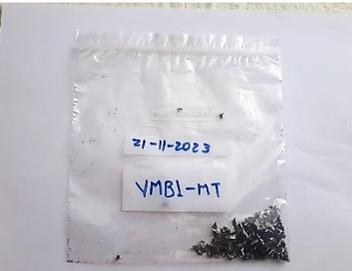
N°	Probeta	Parámetros Mecanizado		ANÁLISIS DE VIRUTA - CONTINUACIÓN			Análisis Resultados
		n [RPM]	fn [mm/min]	PROBETA CODIFICADA	VIRUTA		
7	VMA4-MT	1313	125				Viruta larga y helicoidal. Se forman secciones cortas y helicoidales. Viruta quemada (color azul), abundante material.
8	VM4-MT	1125	125				Abundante viruta alargada y helicoidal quemada (color azul) y frágil. Poco material totalmente destruido y quemado.
9	VMB4-MT	934	125				Viruta alargada recta y helicoidal, dura y quemada a lo largo de su superficie. Material alargado y delgado frágil y quemado. Poco material totalmente destruido y quemado (color azul)

N°	Probeta	Parámetros Mecanizado		ANÁLISIS DE VIRUTA – CONTINUACIÓN			Análisis Resultados
		n [RPM]	fn [mm/min]	PROBETA CODIFICADA	VIRUTA		
10	VB4-MT	750	125				Viruta poco alargada recta y helicoidal quemada (color azul), frágil y dura en ciertas áreas. Poco material totalmente destruido.
11	VA3-MT	1500	100				Viruta en su mayoría totalmente destruida, material poco alargado recto y helicoidal. Material en su mayoría quemado (color azul)
12	VMA3-MT	1313	100				Viruta en su mayoría alargada helicoidal frágil y dura. Una sección de material totalmente quemada, alargada, dura y helicoidal. Poco material totalmente destruido y quemada (color azul)

N°	Probeta	Parámetros Mecanizado		ANÁLISIS DE VIRUTA – CONTINUACIÓN			Análisis Resultados
		n [RPM]	fn [mm/min]	PROBETA CODIFICADA	VIRUTA		
13	VM3-MT	1125	100				<p>Viruta en su mayoría poco alargada, helicoidal, frágil y quemada (color azul).</p> <p>Poco material totalmente destruido, quemado y delgado.</p>
14	VMB3-MT	934	100				<p>Poco material alargado, frágil y recto.</p> <p>Viruta quemada (color azul) delgada y frágil.</p>
15	VB3-MT	750	100				<p>Viruta muy alargada, dura, recta y helicoidal, presenta quemaduras a lo largo de su superficie.</p> <p>Mayoría de material totalmente destruido y quemado.</p>

N°	Probeta	Parámetros Mecanizado		ANÁLISIS DE VIRUTA – CONTINUACIÓN			Análisis Resultados
		n [RPM]	fn [mm/min]	PROBETA CODIFICADA	VIRUTA		
16	VA2-MT	1500	75				Viruta totalmente destruida y quemada (color azul). Se forman pocas secciones cortas rectas y quemadas.
17	VMA2-MT	1313	75				Material alargado recto y frágil. El resto de la viruta está totalmente destruida.
18	VM2-MT	1125	75				Poco material alargado, frágil y recto. Viruta quemada (color azul) delgada y frágil.

N°	Probeta	Parámetros Mecanizado		ANÁLISIS DE VIRUTA – CONTINUACIÓN			Análisis Resultados
		n [RPM]	fn [mm/min]	PROBETA CODIFICADA	VIRUTA		
19	VMB2-MT	934	75				Poco material totalmente destruido. Viruta alargada, helicoidal, frágil y dura.
20	VB2-MT	750	75				Viruta totalmente destruida. Poco material alargado, helicoidal y duro.
21	VA1-MT	1500	50				Viruta en su mayoría totalmente destruida y quemada. Poco material alargado, delgado y frágil.

N°	Probeta	Parámetros Mecanizado		ANÁLISIS DE VIRUTA – CONTINUACIÓN			Análisis Resultados
		n [RPM]	fn [mm/min]	PROBETA CODIFICADA	VIRUTA		
22	VMA1-MT	1313	50				Material en su mayoría alargado, helicoidal, frágil y duro. Viruta totalmente destruida y quemada (color azul).
23	VM1-MT	1125	50				Viruta en su mayoría totalmente destruida y quemada. Poco material alargado, delgado y frágil.
24	VMB1-MT	934	50				Todo el material es corto alargado, dura y helicoidal.

N°	Probeta	Parámetros Mecanizado		ANÁLISIS DE VIRUTA – CONTINUACIÓN			Análisis Resultados
		n [RPM]	fn [mm/min]	PROBETA CODIFICADA	VIRUTA		
25	VB1-MT	750	50				<p>Poco material totalmente destruido.</p> <p>Viruta alargada fina, helicoidal, recta, frágil y dura.</p>