

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE MECANIZADO
BASADOS EN EL ANÁLISIS DEL ESPECTRO DE VIBRACIONES
PARA EL PROCESO DE TORNEADO DEL ACERO ASTM-A36”**

COMPONENTE:

**EVALUACIÓN DE OPERACIONES DE CILINDRADO SIN
LUBRICACIÓN**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA MECÁNICA**

MELANIE VANESSA GUALLICHICO ÑACATA

melanie.guallichico@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. WASHINGTON SALVATORE REINA GUZMÁN PHD

salvatore.reina@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2024

CERTIFICACIONES

Yo, Melanie Vanessa Guallichico Ñacata declaro que el trabajo de integración curricular descrito aquí es de mi autoría; no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, he consultado las referencias bibliográficas que se contienen en este documento.

Melanie Guallichico

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Melanie Guallichico, bajo mi supervisión.

ING. WASHINGTON SALVATORE REINA GUZMÁN PHD
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí definido, 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.

Melanie Vanessa Guallichico Ñacata

Ing. Washington Salvatore Reina Guzmán PHD

DEDICATORIA

El proyecto a continuación lo dedico a mi madre, Rosa Ñacata, mis hermanas Alison y Yadira y mi novio Santiago, quienes han sido mi motor y fortaleza durante el desarrollo del presente proyecto.

AGRADECIMIENTO

La mayor gratitud a Dios por la sabiduría, fortaleza y oportunidad de concluir mi trabajo de grado pese a las adversidades que se han presentado durante mi proceso de formación. Gracias a Dios por mostrarme el camino cuando perdía visibilidad y por colocar en mi vida a las personas correctas en el momento adecuado.

Un especial agradecimiento a mis profesores y guías en este proyecto de titulación, al Ingeniero Salvatore Reina por facilitar su tiempo y adecuar su agenda para atender a las dudas que surgieron en el camino, al ingeniero Javier Valverde por su constante apoyo en la parte experimental y por aportar activamente en el desarrollo del presente proyecto, al ingeniero Marco Carrión, quien aportó con sugerencias positivas para el adecuado cumplimiento de los objetivos.

Gracias a mis compañeros y amigos con quienes compartí mis días en la universidad y redujeron las cargas emocionales que surgieron en las clases.

Un agradecimiento infinito a mi madre, quien se ha esforzado desde el día cero hasta hoy para ayudarme a cumplir mis metas y objetivos, por ser una mujer fuerte y ejemplar de quien he aprendido a no rendirme y esforzarme por alcanzar mis sueños. Gracias a mis hermanas por escucharme y entender el esfuerzo y concentración que requería el estudio y por aportar con consejos y acciones que disminuyeron mi carga. Gracias a mi novio Santiago por ser mi soporte y compañía en los días de universidad, por motivarme a continuar en los días de mayor cansancio.

Gracias a mis peluditos quienes me acompañaron en las noches de estudio y me brindan día a día esa paz angelical que solamente seres inocentes pueden transmitir.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XI
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	2
Estado del arte.....	3
Benchmarking.....	11
Modelos vibracionales para el cilindrado sin lubricación.....	14
Modelos experimentales para el estudio de los efectos significativos	16
2. METODOLOGÍA.....	18
2.1 Diseño del experimento.....	18
Planteamiento de los criterios de experimentación.....	18
Determinación del número de experimentos	19
2.2 Preparación de probetas para la experimentación.....	20
Características de las probetas	20
Longitud bruta de las probetas	21
Corte de las probetas.....	21
Refrentado y etiquetado de las probetas	22
2.3 Selección de la herramienta de corte.....	24
2.4 Parámetros de mecanizado	24
2.5 Medición de vibraciones.....	26

Equipo para la medición de vibraciones	26
Preparación del torno.....	26
Instalación del equipo de vibraciones	27
Procedimiento de la medición	28
Procedimiento de análisis de la información obtenida	28
2.6 Medición de rugosidades	30
Equipo para la medición de rugosidades.....	30
Preparación de probetas.....	30
Procedimiento de la medición de rugosidad	30
Procedimiento de análisis de la información obtenida	31
Rugosidad media aritmética	32
3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	33
3.1 Resultados de la medición de vibraciones	33
Resultados de vibraciones del tratamiento 1	33
Resultados de vibraciones del tratamiento 2	35
Resultados de vibraciones del tratamiento 3	38
Resultados de vibraciones del tratamiento 4	40
Comparación de las respuestas vibratoriales entre los tratamientos	43
3.2 Resultados de la medición de rugosidades.....	46
Resultados de rugosidades del tratamiento 1	46
Resultados de rugosidades del tratamiento 2.....	47
Resultados de rugosidades del tratamiento 3.....	48
Resultados de rugosidades del tratamiento 4.....	48
Comparación de las rugosidades entre los tratamientos	49
3.3 Análisis de virutas	50
Virutas en el tratamiento 1	50
Virutas en el tratamiento 2	51
Virutas en el tratamiento 3	52
Virutas en el tratamiento 4	52
3.4 Conclusiones.....	54
3.5 Recomendaciones.....	55
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
5. ANEXOS.....	59
ANEXO I. Hoja técnica del acero ASTM A36.....	59

ANEXO II. Hoja técnica del acero AISI 1018	60
ANEXO III. Ficha técnica del medidor SVAN 958	62
ANEXO IV. Especificaciones del medidor de rugosidad	63
ANEXO V. Estándar de la rugosidad según el proceso de manufactura	64
ANEXO VI. Espectros de vibración de las probetas de la experimentación ..	65
ANEXO VII. Rugosidad promedio Ra obtenida del ensayo de rugosidad	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Procesos de remoción de material	3
Figura 1.2 Movimiento de avance en el torneado.....	5
Figura 1.3 Movimiento de corte en el torneado	5
Figura 1.4 Calor generado en la herramienta de corte	6
Figura 1.5 Herramienta tradicional de corte en el torneado.....	6
Figura 1.6 Gráfica de la velocidad de un objeto que vibra.....	8
Figura 1.7 Gráfica de la aceleración de un objeto que vibra.....	8
Figura 1.8 Desviaciones de la superficie nominal.....	10
Figura 1.9 Esquema de rugosidad	11
Figura 2.1 Planteamiento de los criterios de experimentación.....	18
Figura 2.2 Corte de las probetas.....	22
Figura 2.3 Probetas después del corte.....	22
Figura 2.4 Medidor de vibraciones SVAN 958.....	26
Figura 2.5 Torneado y medición de vibraciones	27
Figura 2.6 Rugosímetro Mitutoyo	30
Figura 2.7 Ensayo de rugosidad	31
Figura 2.8 Rugosidad Ra	32
Figura 3.1 Espectro de vibración para la probeta E1T1P1	34
Figura 3.2 Espectro de vibración para la probeta E3T1P2	35
Figura 3.3 Espectro de vibración para la probeta E2T2P1	37
Figura 3.4 Espectro de vibración para la probeta E2T2P2	37
Figura 3.5 Espectro de vibración para la probeta E1T3P1	39
Figura 3.6 Espectro de vibración para la probeta E1T3P2	40
Figura 3.7 Espectro de vibración para la probeta E1T4P1	42

Figura 3.8 Espectro de vibración para la probeta E1T4P2	42
Figura 3.9 Valores eficaces promedios de las probetas 1 y 2 de los tratamientos 1, 2, 3 y 4	43
Figura 3.10 Velocidad de corte vs Promedio del valor eficaz	44
Figura 3.11 Velocidad de avance vs Promedio del valor eficaz.....	45
Figura 3.12 Profundidad vs Promedio del valor eficaz.....	45
Figura 3.13 Rugosidad en los 4 tratamientos	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Especificaciones del torno NOSOTTI.....	12
Tabla 1.2 Especificaciones del torno TORRENT 42	12
Tabla 1.3 Especificaciones del torno AMUTIO CAZENEUVE HB575	13
Tabla 1.4 Pautas generales para diseñar un experimento	16
Tabla 1.5 Signos positivos y negativos del diseño factorial.....	17
Tabla 2.1 Fracción definidora	20
Tabla 2.2 Etiquetas de las probetas de la experimentación	23
Tabla 2.3 Parámetros de corte del inserto seleccionado	24
Tabla 2.4 Parámetros de la velocidad de corte.....	24
Tabla 2.5 Parámetros de la velocidad de avance	25
Tabla 2.6 Parámetros de la profundidad de corte	25
Tabla 2.7 Parámetros de mecanizado para la experimentación	25
Tabla 2.8 Zonas de medición en las probetas	31
Tabla 3.1 Parámetros de mecanizado del tratamiento 1	33
Tabla 3.2 Resultados de las probetas del tratamiento 1	33
Tabla 3.3 Parámetros de mecanizado del tratamiento 2.....	35
Tabla 3.4 Resultados de las probetas del tratamiento 2	36
Tabla 3.5 Parámetros de mecanizado del tratamiento 3.....	38
Tabla 3.6 Resultados de las probetas del tratamiento 3	38
Tabla 3.7 Parámetros de mecanizado del tratamiento 3.....	40
Tabla 3.8 Resultados de las probetas del tratamiento 4	41
Tabla 3.9 Rugosidad de las probetas del tratamiento 1	46
Tabla 3.10 Rugosidad de las probetas del tratamiento 2	47
Tabla 3.11 Rugosidad de las probetas del tratamiento 3	48
Tabla 3.12 Rugosidad de las probetas del tratamiento 4	48

Tabla 3.13 Resultados de rugosidad de la experimentación.....	49
Tabla 3.14 Virutas en el tratamiento 1	50
Tabla 3.15 Virutas en el tratamiento 2	51
Tabla 3.16 Virutas en el tratamiento 3	52
Tabla 3.17 Virutas en el tratamiento 4	53

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.1 Ecuación de movimiento de un sistema no amortiguado	14
Ecuación 1.2 Ecuación de movimiento de un sistema amortiguado.....	14
Ecuación 1.3 Ecuación de movimiento de un sistema con fuerza externa	14
Ecuación 1.4 Ecuación de la vibración en la dirección de avance en x.....	15
Ecuación 1.5 Ecuación de la vibración en la dirección de avance en y	15
Ecuación 1.6 Ecuación de la vibración en la dirección de avance en z.....	15
Ecuación 1.7 Ecuación de la rugosidad superficial	15
Ecuación 2.1 Cantidad de experimentos.....	19
Ecuación 2.2 Velocidad de corte en rpm.....	24
Ecuación 2.3 Valor eficaz de la vibración.....	29
Ecuación 2.4 Vibración total	29
Ecuación 2.5 Vibración total en dB	29

RESUMEN

El proyecto tiene como fin evaluar el impacto de los parámetros de corte sobre las vibraciones generadas en el sistema eje-torno al mecanizar probetas de acero de bajo contenido de carbono. Para cumplir con lo propuesto, se utilizan varias técnicas, la principal es la medición y análisis del espectro de vibración generado durante el torneado de las probetas. Aunque también se realiza un análisis del ensayo de rugosidad y de las virutas generadas en el proceso.

Se inicia con la investigación bibliográfica de la importancia de las condiciones de corte sobre las vibraciones del sistema. Se plantea el diseño de experimento factorial fraccionado con el cual se reducen la cantidad de tratamientos y se planifican tres repeticiones para procesar los resultados estadísticamente. Además, debido a los tipos de sujeción posibles en el torno convencional, se propone trabajar con probetas de dos longitudes distintas para variar su sujeción en el mandril.

Se procesan los resultados obtenidos del espectro de vibraciones, después se realiza una valoración de la superficie torneada mediante el ensayo de rugosidad y se contrasta la viruta generada durante el proceso.

Se concluye que la velocidad de avance, la velocidad de corte y la profundidad son parámetros que determinan las respuestas vibratorias durante el torneado. Entonces, a medida que se elevan los parámetros mencionados, también se genera mayor perturbación en el sistema eje-torno y se visualiza en el perfil de rugosidad y en las medidas de vibraciones.

PALABRAS CLAVE: torno, vibraciones, rugosidad, espectro de vibración,

ABSTRACT

This Project aims to evaluate the cutting parameters' impact on the system's vibration while the low carbon steel specimens are being turned. To get this information, several techniques are used, the principal technique is the measurement and analysis of the vibration spectrum generated during the turning process. Also, an analysis of the roughness test and the virtues generated in the process is carried out.

It begins with a bibliographic review about the cutting conditions on the system vibration. After, the experiment's design is based on fractional factorial method which allows to reduce the treatments quantity and it's planned to repeat the procedure three times for statical analysis. Besides, because of kind of fasting in conventional lathe, it is proposed to have two specimens with two different lenghts.

The results obtained from the vibration spectrum are processed, then an evaluation of the turned surface is carried out using the roughness test and the chips generated during the process are contrasted.

Finally, feed rate, cutting speed and depth are the parameters that determine the vibrational responses during turning. So, as the parameters get raised, greater disturbance is also generated in the system, and it could be check in the roughness profile and vibration measurements.

KEYWORDS: turning, vibration, spectrum vibration, rugosity

1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

La manufactura de piezas metálicas involucra una serie de procesos de mecanizado con parámetros individuales que garantizan la calidad superficial y funcionalidad del producto final. Uno de los procesos cotidianos es el torneado, en el cual el eje a mecanizar se mantiene rotando mientras la herramienta de corte realiza movimientos lineales según el seteo de parámetros para cumplir con lo requerido inicialmente para la pieza.

Uno de los factores más importantes es la lubricación, dado que su principal beneficio en el procedimiento es la reducción del calor generado entre la herramienta de corte y el eje a mecanizar. Aunque, la lubricación está presente en los procesos de maquinado por arranque de viruta por varias razones: prevenir el desgaste temprano de la herramienta de corte, facilitar la evacuación de las virutas generadas en el corte y mejorar el acabado superficial.

Por otra parte, el método habitual para la definición de los parámetros mencionados resulta de diversificaciones en las variables con lo cual se ha logrado establecer lo más conveniente para el proceso basado en la experiencia y en calidades superficiales logradas. Sin embargo, surge la necesidad de una evaluación técnica más completa de los parámetros para garantizar un mecanizado preciso y que no afecte al sistema eje – máquina.

En este contexto, el análisis del espectro de vibraciones surge como herramienta que permite conocer la respuesta del sistema frente a las variaciones de los parámetros de mecanizado. Es decir, el estudio de las vibraciones toma importancia debido a que se obtienen respuestas gráficas en las que se puede deducir la influencia del cambio de parámetros durante el proceso del torneado y así establecer un soporte veraz y confiable del maquinado del eje basado en el análisis de sus máximos obtenidos.

Por lo general, los ejes a mecanizar suelen ser fabricados en diversos materiales según el requerimiento operacional. El material más común suele ser el acero al carbono, razón por la cual, en el presente proyecto se realizan las experimentaciones correspondientes con el acero de bajo carbono, con el cual se logrará evaluar los distintos parámetros de torneado mediante el análisis del espectro de vibración y se contrasta con la medición de rugosidad obtenida en el marco del análisis superficial tras el mecanizado en el torno.

1.1 Objetivo general

El objetivo general de este Proyecto Técnico es evaluar los diferentes parámetros de mecanizado de un torno convencional bajo la condición sin lubricación, mediante el análisis del espectro de vibraciones y el ensayo de rugosidad utilizando un analizador de señal de vibraciones y rugosímetro.

1.2 Objetivos específicos

1. Determinar los parámetros de mecanizado iniciales para la pieza de acero ASTM A36.
2. Establecer la condición de la ausencia de lubricación durante la experimentación.
3. Variar los parámetros de mecanizado definidos previamente y obtener los espectros de vibración correspondientes.
4. Comparar los espectros de vibración según la variación de los parámetros de mecanizado.
5. Sugerir parámetros de mecanizado para el proceso de torneado en base a los resultados del análisis de vibraciones.

1.3 Alcance

El proyecto inicia con la revisión bibliográfica y el estado de arte para definir los parámetros de mecanizado que conviene variar durante la experimentación y que influirán en la calidad de superficie de elementos torneados. En este caso, se mecanizarán probetas de Acero ASTM A36 que serán sometidas a distintas condiciones de mecanizado en el torno convencional, considerando la ausencia del uso de lubricantes, los cuales son un punto clave en la calidad superficial. Finalmente, mediante la obtención del espectro de vibración y el análisis de la rugosidad de las piezas torneadas, se examinan los resultados de las piezas y se establecerán los parámetros de corte óptimos.

1.4 Marco teórico

En el presente capítulo se contextualiza los términos y definiciones relevantes sobre el proceso de cilindrado y el análisis de vibraciones. Se incluye el estado de arte enfocado en

el análisis de parámetros de mecanizado, evaluación de la calidad superficial y caracterización del acero ASTM A36, con el fin de comprender la importancia del presente estudio en la industria. En el benchmarking se agrega información relevante sobre el torno a utilizar en la experimentación. Además, se añade información introductoria sobre el diseño de experimentos y las ecuaciones que describen los modelos vibracionales de la experimentación.

Estado del arte

Tipos de mecanizado por arranque de viruta

El mecanizado de materiales busca modificar las propiedades físicas y dimensionales de un elemento y puede lograrse a partir de distintos procesos que pueden o no incluir el arranque de viruta. El mecanizado por remoción de material es una operación cuyo fin es conseguir una geometría y acabado específico con la utilización de una herramienta de corte que cumple requisitos óptimos para lograr las dimensiones previstas (Delgado & López, 2020). Existen varias clasificaciones propuestas por distintos autores, a continuación, se presenta una de ellas.

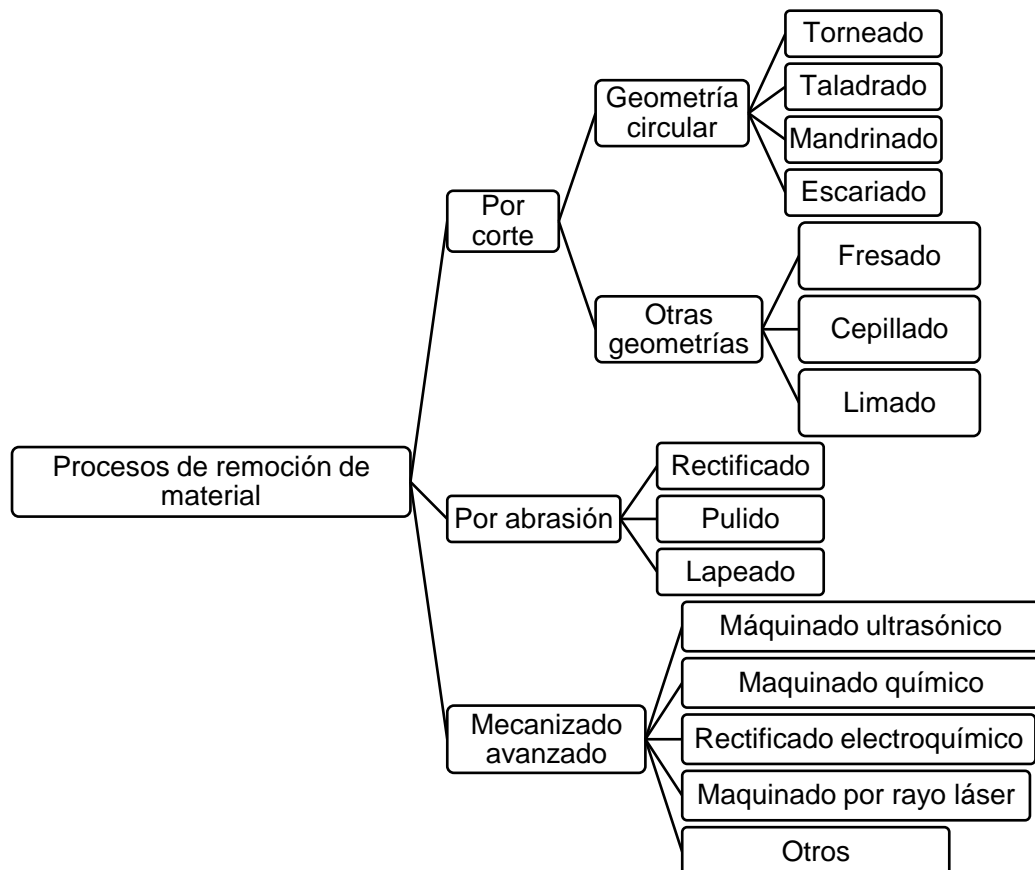


Figura 1.1 Procesos de remoción de material (Kalpakjian et al., 2021)

En la Figura 1.1, el autor (Kalpakjian et al., 2021) propone que los procesos de remoción de material se dan por corte, abrasión y mecanizado avanzado. En este caso, el torneado corresponde a un proceso por corte en que se obtiene una geometría circular.

Cilindrado

El cilindrado se define como una operación de torneado donde el elemento a mecanizar permanece en rotación mientras es maquinado. Es decir, existe eliminación de material para alcanzar dimensiones preestablecidas, particularmente, dimensiones cilíndricas. La pieza inicial es generalmente un resultado de otro proceso, como puede ser la fundición, la forja, extrusión, estirado o metalurgia de polvos (Kalpakjian et al., 2021).

Se pueden diferenciar los siguientes tipos de cilindrado según el objetivo de mecanizado.

- Cilindrado externo: se retira material de forma que se reduce el diámetro de un elemento.
- Cilindrado interno: se retira material con el objetivo de aumentar el diámetro de un agujero realizado anteriormente en un elemento. También se lo conoce como mandrinado.

Al igual que otro proceso de fabricación, es necesario establecer lineamientos para alcanzar los propósitos funcionales.

Parámetros del cilindrado

En (Al-Shayea et al., 2020) se menciona que los parámetros de corte como la velocidad de avance, la velocidad de corte y la profundidad en una acción de torneado deben ser elegidos cuidadosamente para optimizar la productividad y reducir el costo de fabricación de los componentes. Entonces, es importante conocer el significado de cada variable mencionada y su influencia en el acabado final de la pieza para monitorear los cambios que se den conforme se desarrolla el estudio.

Velocidad de avance

Velocidad a la que el instrumento de corte se desplaza a lo largo de la superficie durante el mecanizado (Kalpakjian et al., 2021). Este movimiento se considera rectilíneo. Cabe mencionar que este parámetro por lo general presenta valores recomendados según el fabricante de las herramientas de corte y se establecen en base a los materiales a mecanizar y la capacidad del torno.

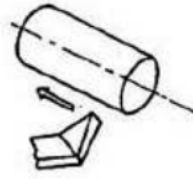


Figura 1.2 Movimiento de avance en el torneado (Núñez, 2019)

En la Figura 1.2, se presenta de forma gráfica la cuchilla que se desplaza de forma longitudinal al eje torneado, la flecha indica la dirección de corte.

Velocidad de corte

Hace referencia a la velocidad relativa entre el instrumento de corte y el elemento que se mecaniza. Esta velocidad se caracteriza porque es la encargada de desprender material durante una revolución del instrumento de corte que actúa en el mecanizado (Núñez, 2019).

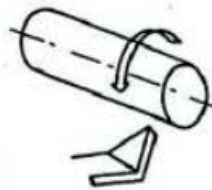


Figura 1.3 Movimiento de corte en el torneado (Núñez, 2019)

En la Figura 1.3, se indica el movimiento relativo entre la cuchilla y la probeta torneada, la flecha marca el sentido de giro de la probeta para el caso específico de la figura.

Profundidad de corte

Cantidad de material que es removido del componente en cada pasada de la herramienta. Este parámetro se mide en unidades de longitud: usualmente en milímetros o pulgadas y está definido según el diámetro de la pieza antes del cilindrado y la profundidad obtenida por el instrumento de corte.

Herramienta de corte

La herramienta de corte es un elemento especial que permite la eliminación de material de un componente a mecanizar. En el torneado y mecanizado por arranque de viruta en general, es de vital importancia el estudio y selección de la herramienta de corte, dado que interviene en las propiedades dimensionales, funcionales y estéticas finales del componente fabricado. Por tanto, existen varios estudios enfocados en el análisis de variables relacionadas con la herramienta con el fin de reducir los efectos perjudiciales que

puede ocasionar como menor exactitud dimensional, rugosidad superficial no óptima y extensión de vibraciones durante el proceso de corte (Zamora et al., 2015).

Entre los factores que pueden desgastar la herramienta, está el calor que se produce durante el contacto con la pieza, debido a la energía que se disipa.

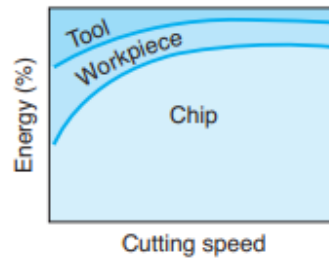


Figura 1.4 Calor generado en la herramienta de corte (Kalpakjian et al., 2021)

En la Figura 1.4, se observa la cantidad de calor que se genera durante el corte y que es transferida a la herramienta de trabajo, la pieza mecanizada y la viruta, en función de la velocidad de corte; se debe considerar que la herramienta de corte absorbe la mayor cantidad de calor (Kalpakjian et al., 2021).

En el caso del torno, la herramienta de corte puede consistir en una cuchilla o inserto fabricado en distintos materiales como el acero de alta velocidad, aleaciones de cromo, níquel, carburos cementados o cerámicos. Sus aplicaciones son amplias y se basan en el torno a utilizar y en la pieza a mecanizar.

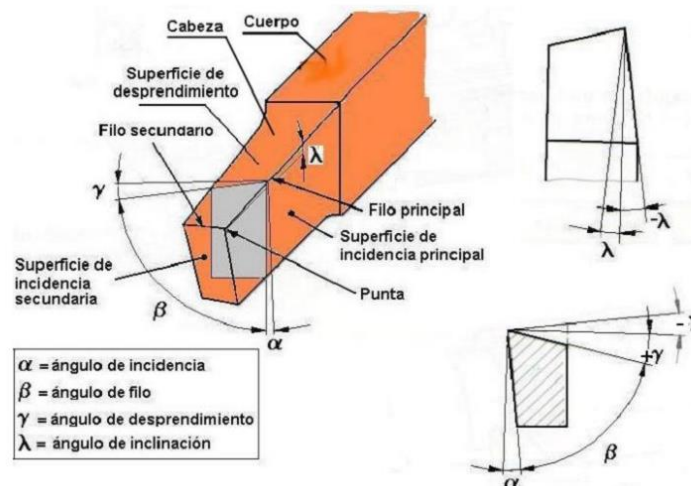


Figura 1.5 Herramienta tradicional de corte en el torneado (Lescano, 2015)

En la Figura 1.5, se presenta la herramienta de corte tradicional utilizada en el portaherramientas del torno y las diferentes partes que la componen y determinan sus rangos de trabajo.

Lubricación

La lubricación en el torneado se refiere a la utilización de fluidos para mejorar el proceso de mecanizado. Esta mejora se ve reflejada tanto en la pieza mecanizada como en la máquina y herramienta que realizan el proceso de arranque de viruta. Entre los beneficios del uso de lubricantes, se tiene la mejoría del acabado superficial, reducción del calor generado por el corte, menor desgaste de la herramienta y mayor vida útil de la máquina (Kalpakjian et al., 2021). Entonces, es la lubricación es un factor relevante que debe ser considerado en procesos de maquinado por arranque de viruta.

En (Balasuadhakar et al., 2022) se menciona que la maquinabilidad se ve mejorada por el uso de un lubricante adecuado y se ha verificado científicamente en el siglo 20. En la misma referencia, se da a conocer el método de la cantidad mínima de lubricación como la forma más sustentable y ecológica para llevar a cabo procesos de torneado. Esto implica que la lubricación es un factor determinante en los procesos de arranque de viruta y en torno al cual surgen distintos estudios que permiten mejorar los procedimientos a lo largo del tiempo.

Vibraciones en el proceso de cilindrado

Una vibración es el movimiento de oscilación de una máquina o componente en cualquier dirección del espacio desde su posición de equilibrio (Royo et al., 2018). Las vibraciones en las máquinas pueden tener distinto origen como desalineaciones, falta de lubricación, desgastes de elementos internos, entre otros. De aquí surgen varias investigaciones que buscan mejorar el rendimiento de las máquinas y disminuir los efectos negativos en las piezas mecanizadas.

Las vibraciones en máquinas han sido motivo de estudio a lo largo del tiempo y por la diversidad, las investigaciones han tenido distintos enfoques y conclusiones. En (Al-Shayea et al., 2020) se presenta un estudio sobre los efectos de los parámetros de corte en el torneado de una pieza de acero AISI 1040 usando el análisis de vibraciones y procesando los datos con metodologías netamente estadísticas. Es decir, este estudio concluye sobre la efectividad de la metodología utilizada, que básicamente se enfoca en combinar el diseño de experimentos con la respuesta a métodos superficiales como una técnica útil si se quiere analizar las respuestas vibratorias contrastado con la calidad superficial obtenida.

Por otro lado, en (Dilma & Lister, 2004) se enfoca en investigar la herramienta de corte y cómo el desgaste de esta influye en la distorsión dimensional de las piezas, el método que

utiliza se basa en análisis de fuerzas de corte y medición de vibraciones. Por tanto, la investigación abarca el monitoreo del desgaste de la herramienta en procesos de torneado mediante sensores que permiten obtener datos de las vibraciones.

En ambas referencias, se aprecia que la recolección de datos obtenidos del medidor de vibraciones es parte crucial para procesar los datos y obtener conclusiones. Las características relevantes de la vibración son: frecuencia, velocidad, desplazamiento, aceleración y energía de impulsos (Royo et al., 2018). La velocidad y la aceleración se pueden apreciar gráficamente a continuación.

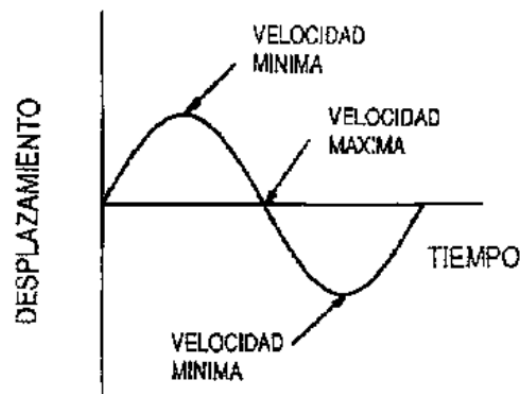


Figura 1.6 Gráfica de la velocidad de un objeto que vibra (Royo et al., 2018)

En la Figura 1.6, se observa la ubicación de los valores de velocidad relevantes según indica el comportamiento del desplazamiento respecto al tiempo.

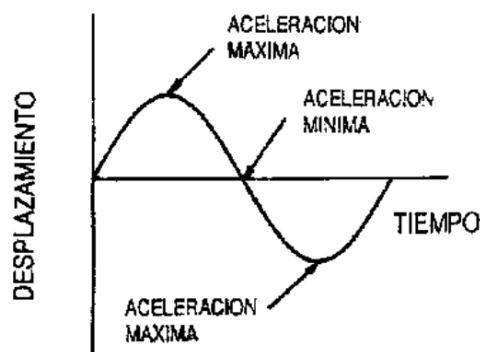


Figura 1.7 Gráfica de la aceleración de un objeto que vibra (Royo et al., 2018)

En la Figura 1.7, se observa la ubicación de los valores de aceleración relevantes según indica el comportamiento del desplazamiento respecto al tiempo.

Cada característica de la vibración indica un factor respecto a la máquina u objeto medido.

- Frecuencia: está definida como la cantidad de ciclos que se completan en un periodo de tiempo.
- Amplitud: indica la condición de máquina y es la magnitud de la vibración. Es decir, mientras mayor sea la amplitud, mayor será el movimiento del elemento.
- Vibración: tiene en cuenta la frecuencia y la velocidad.
- Aceleración: implica la fuerza que provoca la vibración.
- Energía de impulsos: mide los impulsos de energía de vibración de duración corta y alta frecuencia.

En función de lo indicado, las vibraciones están presentes en el proceso de torneado debido a los componentes mecánicos y sus sistemas de transmisión de movimiento que generan perturbaciones en todo el sistema. Además de las vibraciones por elementos internos, las vibraciones también se generan por la interacción de la herramienta durante el mecanizado y se debe a las fluctuaciones en las fuerzas corte y la presencia de fricción con la pieza de trabajo (Kishore et al., 2018). De ahí, la importancia del análisis de las vibraciones para lograr establecer parámetros de corte que disminuyan las imperfecciones en las piezas mecanizadas.

Características del acero ASTM A36

El acero ASTM A36 es uno de las materias primas más comunes a nivel industrial debido a sus propiedades mecánicas, disponibilidad y costo accesible. Tiene amplias aplicaciones en el sector civil y en la construcción de puentes. A continuación, en (SUMITEC, 2020) se detalla las principales propiedades mecánicas de este material.

- Límite elástico mínimo: 250 MPa (36300 PSI)
- Esfuerzo a la tensión: 400 – 550 MPa (58000 – 79800 PSI)
- Elongación mínima en 50 mm (2"): 23%
- Módulo de elasticidad 200 GPa (29000 KSI)

Entre las propiedades químicas, se tiene lo siguiente.

- 0.25 – 0.29 % de Carbono
- 0.60 – 1.20 % de Manganeso
- 0.15 – 0.40 % de Silicio
- 0.04 % de Fósforo (máximo)
- 0.05 % Azufre (máximo)

En el anexo I, se agrega la ficha técnica del acero ASTM A36 donde se detallan las propiedades y características.

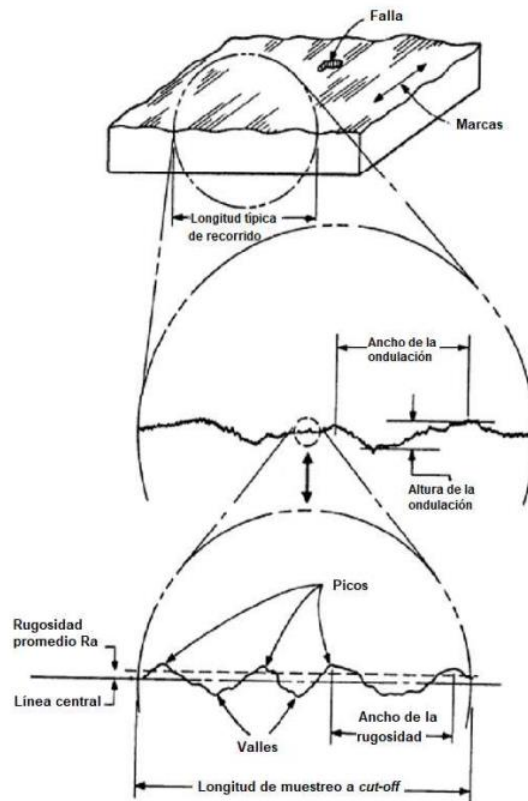


Figura 1.9 Esquema de rugosidad (ANSI/ASME B46.1, 1985)

En la Figura 1.9, se aprecian las marcas y huellas que suelen ser analizadas en el marco del proceso de medición de rugosidad de una superficie maquinada. El resultado es una topografía con marcas unidireccionales que, al ser amplificadas, se logra apreciar las ondulaciones e irregularidades; en la cual, las zonas altas se denominan picos y las bajas valles (Delgado & López, 2020).


Benchmarking

Torno convencional Nosotti

El torno Nosotti del laboratorio de Máquinas y herramientas de la Escuela Politécnica Nacional tiene las siguientes características.

- Bancada: 1.35m
- Diámetro husillo: 101.6 mm
- Agujero husillo: 60 mm
- Dimensiones: 2600x900x1300 mm

Tabla 1.1 Especificaciones del torno NOSOTTI

Nombre	TORNO			
Marca	ASEA-CES			
N°	IEL34-6	Voltaje [V]	380-220	
Tipo	MH112MA4	Amperaje [A]	3.8-10	
Rpm	1680	Frecuencia [Hz]	60	
Potencia	3HP	Fase	3	

En la Tabla 1.1, se indican las principales especificaciones del torno NOSOTTI. Tiene dos movimientos principales y son el movimiento principal de corte y movimiento principal de avance. Además, tiene cuatro movimientos secundarios: movimiento secundario de posicionamiento, movimiento secundario de reposicionamiento, movimiento secundario de ajuste y movimiento de contrapunto.

Torno convencional Torrent 42

El segundo torno convencional considerado es el Torrent 42 que forma parte de los equipos del Laboratorio de Máquinas y Herramientas de la Escuela Politécnica Nacional.

Tabla 1.2 Especificaciones del torno TORRENT 42 (Escobar, 2023)

TORNO UNIVERSAL TORRENT	
Modelo	T-72-42
Distancia entre puntos	1500 mm
Ø sobre bancada	400 mm
Anchura de bancada	300 mm
Ø sobre carro	220 mm
Velocidad	35 a 2300 rpm
Potencia del motor principal	5.5 CV
Dimensiones de la máquina	2800x900x1500 mm
Peso	1500 kg



En la Tabla 1.2, se presentan las características técnicas de torno Torrent 42 y al igual que el torno anterior, los principales movimientos son los de corte y avance.

Torno convencional Amutio - Cazeneuve HB575

El torno Amutio es un torno convencional que se utiliza principalmente en la industria metalmeccánica para la fabricación de piezas mediante el arranque de viruta.

Tabla 1.3 Especificaciones del torno AMUTIO CAZENEUVE HB575
(PILMANMAQUINARIA S.L., n.d.)

Marca	AMUTIO	
MODELO	HB 575	
DISTANCIA ENTRE PUNTOS	2.000	
DIÁMETRO AGUJERO PRINCIPAL	51	
DIÁMETRO SOBRE BANCADA	575	
DIÁMETRO SOBRE CARRO	525	
ANCHURA DE BANCADA	400	
RPM	32 - 2.500	
POTENCIA MOTOR PRINCIPAL	10	
MEDIDAS EXTERIORES	2905 x 1175 x 1345 mm	

En la Tabla 1.3, se indican las especificaciones del torno Amutio – Cazeneuve, de lo cual resalta las características físicas del torno mencionado.

Cabe indicar que tanto el torno Nosotti como el torno Torrent son máquinas que se encuentran en el laboratorio de Máquinas – Herramientas de la Escuela Politécnica

Nacional, mientras que el torno Amutio es un torno convencional disponible en el mercado que se ha adjuntado a modo de comparación. Por tanto, para el componente experimental se tiene como opciones, los dos primeros indicados; además, considerando el tiempo de servicio y las condiciones de los tornos, se ha escogido el torno Torrent 42 para obtener resultados con menores variaciones por factores externos.

Modelos vibracionales para el cilindrado sin lubricación

Las vibraciones generadas en el proceso de torneado pueden ser analizadas mediante modelos matemáticos que permitan comprender el comportamiento del sistema. En este caso, el modelo comúnmente utilizado es el de masa – resorte – amortiguador.

$$M\ddot{x} + kx = 0$$

Ecuación 1.1 Ecuación de movimiento de un sistema no amortiguado

La Ecuación 1.1, es la ecuación de movimiento correspondiente para un sistema no amortiguado, aquí se considera que el sistema vibracional se comporta como una masa M acoplada a un resorte k (Rao, 2012).

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$$

Ecuación 1.2 Ecuación de movimiento de un sistema amortiguado

La Ecuación 1.2, corresponde al caso de un sistema con amortiguamiento en el cual se posee una masa M conectada a un resorte k y un amortiguador c (Rao, 2012). Además, x es la posición de la masa en función del tiempo t .

Considerando el mismo sistema sobre el cual se tiene una fuerza periódica, la ecuación rectora es la siguiente.

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t)$$

Ecuación 1.3 Ecuación de movimiento de un sistema con fuerza externa

La Ecuación 1.3, corresponde al movimiento de un sistema en el cual se aplica una fuerza externa denominada $f(t)$. Se asume una masa M conectada a un resorte k y un amortiguador c (Rao, 2012).

Sin embargo, el análisis de vibraciones en procesos de torneado puede involucrar modelos más desarrollados, donde las ecuaciones indicadas varían según la naturaleza del sistema considerado. Por ejemplo, en (Ambhore et al., 2020) se expone la evaluación de la vibración del instrumento de corte y la rugosidad de la zona superficial en el torneado del

acero AISI 52100 y se desarrolla un modelo matemático predictivo en base al estudio de la aceleración de las vibraciones y la rugosidad de la superficie, variando los parámetros de mecanizado: velocidad de avance, profundidad de corte y velocidad de corte. Los modelos obtenidos en este estudio son los siguientes:

- Modelo para el componente de la vibración en la dirección de avance V_x

$$V_x = -0.5407 + 6.2211 \times 10^{-3}V + 0.8623f + 0.7696d - 1.009 \times 10^{-3}Vf \\ - 1.3304 \times 10^{-3}Vd + 0.1684fd - 2.2322 \times 10^{-5}V^2 - 1.4586f^2 - 1.0971d^2$$

Ecuación 1.4 Ecuación de la vibración en la dirección de avance en x

- Modelo para el componente de la vibración en la dirección de avance V_y

$$V_y = -0.2796 + 4.0086 \times 10^{-3}V - 0.1934f + 0.6913d + 5.9011 \times 10^{-3}Vf \\ - 1.4164 \times 10^{-3}Vd + 0.1625fd - 2.1708 \times 10^{-5}V^2 - 0.6944f^2 - 0.8099d^2$$

Ecuación 1.5 Ecuación de la vibración en la dirección de avance en y

- Modelo para el componente de la vibración en la dirección de avance V_z

$$V_z = -0.4357 + 4.4219 \times 10^{-3}V + 0.68063f + 1.0826d + 4.9318 \times 10^{-3}Vf \\ - 3.8247 \times 10^{-4}Vd - 0.9764fd - 2.4095V^2 - 1.7536f^2 - 1.2123d^2$$

Ecuación 1.6 Ecuación de la vibración en la dirección de avance en z

- El modelo para la rugosidad superficial R_a

$$R_a = 16.8701 - 0.1491V - 28.4432f - 15.3434d + 0.2386Vf + 0.0141Vd + 1.6475fd \\ + 0.0003V^2 + 4.9564f^2 + 21.3864d^2$$

Ecuación 1.7 Ecuación de la rugosidad superficial

En las Ecuaciones 1.4, 1.5, 1.6 y 1.7, se tienen las siguientes variables.

V_x : Vibración en la dirección de avance

V_y : Vibración en la dirección de radial

V_z : Vibración en la dirección tangencial

V : Velocidad de corte

f : Velocidad de avance

d : Profundidad de corte

Modelos experimentales para el estudio de los efectos significativos

El diseño de experimentos es fundamental para la obtención de resultados confiables y significativos, así como para conseguir una experimentación eficiente y efectiva en cuanto a la utilización de recursos. Los investigadores buscan un diseño de experimentos adecuado para lograr controlar las variables de interés de forma sistemática y así, contribuir a la calidad de resultados para poder validarlos. Entre los beneficios de un correcto diseño de experimentos se tiene:

- Control y monitoreo de las variables
- Mayor eficiencia de los recursos disponibles
- Facilidad de generalización y reproducibilidad
- Minimización de errores sistemáticos
- Validación de la información obtenida

A continuación, se resumen las pautas generales para diseñar experimentos.

Tabla 1.4 Pautas generales para diseñar un experimento (Montgomery, 2004)

1	Individualización y exhibición del problema	Planeación previa al experimento
2	Selección de los factores, niveles y los rangos	
3	Elección de la variable de respuesta	
4	Elección del diseño experimental	
5	Ejecución del experimento	
6	Estudio estadístico de los datos	
7	Conclusiones y recomendaciones	

En la Tabla 1.4, está contenido el proceso general para diseñar un experimento, cabe mencionar que los tres primeros pasos se enmarcan en el proceso de planeación previa al experimento.

Diseño factorial fraccionado

En el diseño factorial, en cada prueba o réplica del experimento se inquieren todas las composiciones posibles de los niveles de los factores que están involucrados. Este diseño se usa pródigamente en experimentos que contienen diversos factores cuando es obligatorio aprender el efecto ligado de los factores sobre una respuesta. Sin embargo, se pueden dar casos donde el número de corridas necesarias para completar el diseño agota con rapidez los recursos disponibles para la experimentación, entonces si el ensayador puede conjeturar que algunas interacciones de orden superior no son significativas, es

viable conseguir información de los eventos consecuentes primordiales corriendo únicamente una porción del experimento factorial completo (Montgomery, 2004).

El uso adecuado de los diseños factoriales fraccionados se basa en tres doctrinas clave:

- La apertura de efectos esparcidos o insolencia de defectos: cuando existen varias variables, existe la posibilidad de que el proceso esté subyugado por algunos efectos transcendentales e interacciones de categoría inferior.
- La propiedad de proyección: este diseño puede programarse en diseños más magnos en el subconjunto de los constituyentes significativos.
- Experimentación secuencial: es posible ajustar las corridas de dos o más diseños factoriales fraccionados para acoplar ordenadamente un diseño de mayor envergadura.

Por ejemplo, se considera una situación de tres factores cada uno con dos niveles, sin embargo, los investigadores no están en posición de correr $2^3 = 8$ combinaciones, entonces se llevan a cabo 4 corridas, esto suele llamarse diseño 2^{3-1} a una fracción un medio del diseño 2^3 . En la siguiente tabla se indica la congregación de signos positivos y negativos del diseño.

Tabla 1.5 Signos positivos y negativos del diseño factorial 2^3 (Montgomery, 2004)

Combinación de tratamientos	Efecto factorial							
	I	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
a	+	+	-	-	-	-	+	+
b	+	-	+	-	-	+	-	+
c	+	-	-	+	+	-	-	+
abc	+	+	+	+	+	+	+	+
ab	+	+	+	-	+	-	-	-
ac	+	+	-	+	-	+	-	-
bc	+	-	+	+	-	-	+	-
(-1)	+	-	-	-	+	+	+	-

En la Tabla 1.5, se denominan combinaciones de tratamientos a la primera columna con letras minúsculas y se observa que el diseño 2^{3-1} se forma solo escogiendo las mixturas de tratamientos que tienen signo positivo en la columna ABC. Por lo tanto, a ABC se le nombra el creador de la fracción (Montgomery, 2004).

2. METODOLOGÍA

2.1 Diseño del experimento

En un experimento, por lo general se busca obtener resultados válidos utilizando un mínimo de recursos que garantice la eficiencia del procedimiento. Un experimento se establece tras un análisis minucioso de los objetivos que se quieren alcanzar considerando una planificación de recursos, tiempos y demás elementos.

En este caso, el diseño de experimentos que se propone involucra un conjunto de pruebas en las que intervienen varios factores, por lo que se denomina diseño factorial. Pero el resultado en cada factor viene determinado por el nivel que se establezca dentro de la experimentación, en este caso son dos niveles. Por tanto, el modelo experimental final es nombrado diseño factorial 2^k . En (Gutiérrez & De La Vara, 2008) se indica que los factoriales 2^k completos son útiles especialmente cuando el número de factores k a examinar están entre dos y cinco, categoría en la que su tamaño se encuentra entre cuatro y 32 tratamientos; este conjunto es adaptable en muchos escenarios experimentales.

Planteamiento de los criterios de experimentación

Con el diseño factorial 2^k , se busca estudiar los efectos sobre la rugosidad de las probetas y las vibraciones durante el proceso de cilindrado sin lubricación. Con base en lo presentado en el estado de arte, se determinan tres factores: profundidad de corte, velocidad de corte y velocidad de avance, que establecen las condiciones de mecanizado y, por tanto, los resultados en las variables de respuesta. Además, cada factor se va a estudiar a dos niveles: alto (+) y bajo (-). En resumen, se tiene lo siguiente.



Figura 2.1 Planteamiento de los criterios de experimentación

En la Figura 2.1, se indica el esquema del diseño del experimento donde constan la variable de entrada, variables de salida, los diferentes factores y los efectos considerados. Es decir:

- Factor 1: velocidad de corte
- Factor 2: velocidad de avance
- Factor 3: profundidad
- Nivel 1: alto
- Nivel 2: bajo
- Variable de respuesta: rugosidad
- Variable de respuesta: espectro de vibración
- Efectos: desgaste y vibración

Determinación del número de experimentos

Considerando que se trata del diseño factorial 2^k , la cantidad de experimentos está dada por la siguiente ecuación.

$$p = n^k$$

Ecuación 2.1 Cantidad de experimentos (Gutiérrez & De La Vara, 2008)

En la Ecuación 2.1, se tiene que p es la cantidad de experimentos, n es el número de niveles y k es el número de factores. Como se indicó anteriormente, se tienen tres factores y dos niveles.

Entonces, $p = 2^3 = 8$, siendo este, el número de tratamientos en el diseño de experimentos propuesto inicialmente.

Sin embargo, considerando que se busca reducir la cantidad de tratamientos del experimento, es decir, se busca que el número de tratamientos finales sea menor a 8, entonces se propone fraccionar el diseño factorial.

En (Montgomery, 2004), se indica que cuando se tienen tres factores, la fracción se reduce a 4. Por tanto, el número de corridas finales en este caso, son 4 tratamientos en el experimento. De (Gutiérrez & De La Vara, 2008) se tiene que la fracción definidora está dada de la siguiente forma.

Tabla 2.1 Fracción definidora de 2³

A Velocidad de corte	B Velocidad de avance	C Profundidad
1	-1	-1
-1	1	-1
-1	-1	1
1	1	1

En la Tabla 2.1, se presentan las combinaciones entre los factores y niveles distribuidos en los distintos tratamientos y factores. Cada fila hace referencia a un tratamiento distinto, cada columna indica el factor y el signo hace referencia al nivel alto (signo positivo) o bajo (signo negativo).

Por otro lado, por temas estadísticos y con el fin de generar mayor confianza en los resultados de rugosidad y medición del espectro de vibración, se propone repetir tres veces el diseño de experimento. Es decir, cada tratamiento, incluye 3 probetas bajo las mismas condiciones.

2.2 Preparación de probetas para la experimentación

En esta sección se detalla el paso a paso del procedimiento de la experimentación, desde la limpieza de las probetas hasta su corte y etiquetado.

Características de las probetas

Para el desarrollo de la experimentación se consideran ejes de acero AISI 1018 de 1 pulgada de diámetro debido a la limitación en el mercado nacional del acero ASTM A36 en la forma tubular. Se considera el acero AISI 1018 dado que presenta características técnicas similares a las expuestas para el acero A36 y es el acero más común utilizado en el torneado de ejes de transmisión. Se presenta a continuación, las principales características (Serviacero, 2021).

1. Resistencia a la tensión: 440 MPa
2. Límite elástico: 370 MPa
3. Elongación 2": 15%

Entre las propiedades químicas, se tiene lo siguiente.

4. 0.15 – 0.20 % C
5. 0.60 – 0.90 % Mn
6. 0.15 – 0.30 % Si
7. 0.04 % P máx
8. 0.05 % S máx

En el anexo II, se adjunta la ficha técnica completa del acero AISI 1018.

Cabe mencionar, que en el desarrollo del proyecto se reduce el término “ejes de transmisión de la experimentación” por el término “probetas”.

Longitud bruta de las probetas

Para la experimentación, se consideran las probetas de 1 pulgada de diámetro (25,4mm). Dado que las respuestas en el espectro de vibración están sujetas a análisis según su longitud, se han establecido dos medidas de longitud efectiva de probetas, la primera medida de 30 cm y la segunda de 5 cm. De esta forma, las variables de salida pueden ser analizadas en distintos rangos de longitud y con mayor precisión.

Entonces, inicialmente se tienen 12 probetas de 30 cm y 12 probetas de 5 cm, según lo planteado en el diseño del experimento. Sin embargo, las probetas consideran centímetros extras para la sujeción en el mandril del torno y por facilidad de la manipulación de estas durante la experimentación, por lo cual las probetas a mecanizar tienen longitudes brutas de 33 cm y 13 cm.

Corte de las probetas

Se adquirió ejes de un metro de longitud, los cuales fueron cortados según las longitudes indicadas. En la siguiente imagen se observan la referencia del proceso y las probetas después del corte.

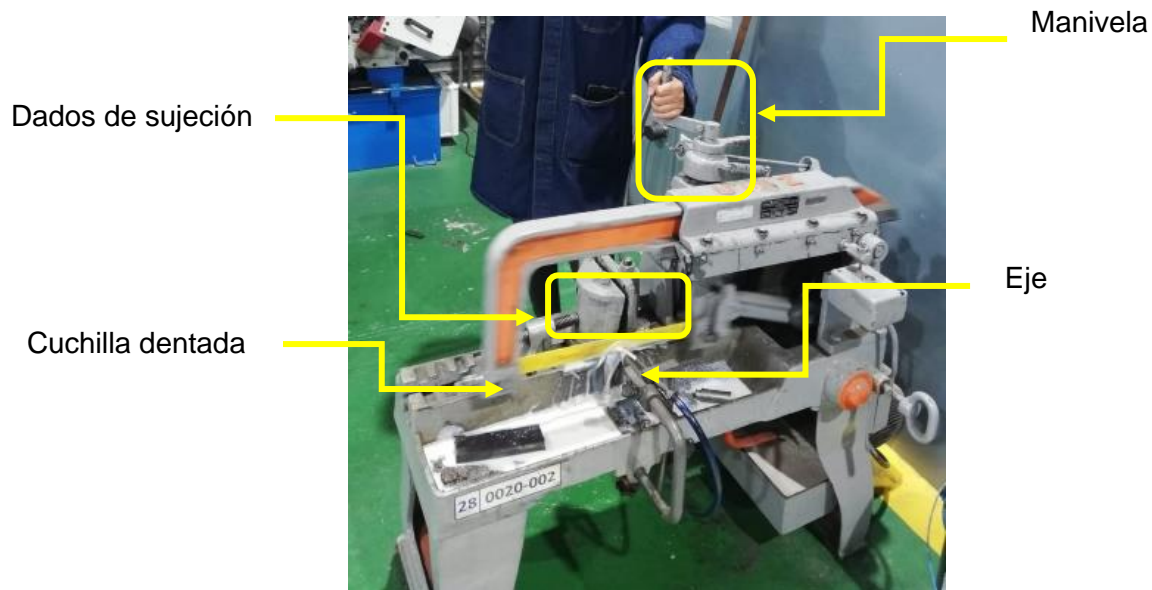


Figura 2.2 Corte de las probetas

En la Figura 2.2, se representa el proceso de corte que consiste en sujetar el eje mediante dados en la sierra mecánica y realizar el corte con una cuchilla dentada controlada con una manivela, la misma que determina la profundidad y avance de corte.

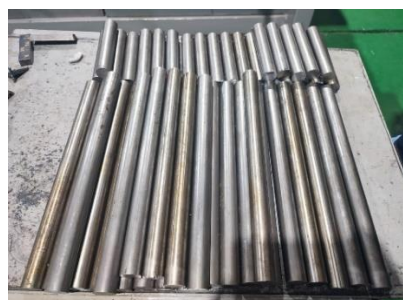


Figura 2.3 Probetas después del corte

En la Figura 2.3, se muestran las probetas cortadas de acuerdo con las longitudes planteadas en el apartado anterior. En la zona superior se muestran las probetas cortas y en la zona inferior se muestran las probetas largas.

Refrentado y etiquetado de las probetas

Después del corte, en el torno convencional, se procede al refrentado de una cara transversal de cada probeta con el fin de generar una cara totalmente plana para marcar el inicio de la medición. Además, en el caso de las probetas de mayor longitud (30cm), se realiza un agujero que permita la sujeción con el contrapunto. Posterior a este procedimiento, se realiza el etiquetado según el número de tratamiento, la longitud de la probeta y el número de experimento, como se indica a continuación.

Tabla 2.2 Etiquetas de las probetas de la experimentación

Tratamiento 1	Probeta 1 (30cm)	Experimento 1	E1T1P1
		Experimento 2	E2T1P1
		Experimento 3	E3T1P1
	Probeta 2 (5cm)	Experimento 1	E1T1P2
		Experimento 2	E2T1P2
		Experimento 3	E3T1P2
Tratamiento 2	Probeta 1 (30cm)	Experimento 1	E1T2P1
		Experimento 2	E2T2P1
		Experimento 3	E3T2P1
	Probeta 2 (5cm)	Experimento 1	E1T2P2
		Experimento 2	E2T2P2
		Experimento 3	E3T2P2
Tratamiento 3	Probeta 1 (30cm)	Experimento 1	E1T3P1
		Experimento 2	E2T3P1
		Experimento 3	E3T3P1
	Probeta 2 (5cm)	Experimento 1	E1T3P2
		Experimento 2	E2T3P2
		Experimento 3	E3T3P2
Tratamiento 4	Probeta 1 (30cm)	Experimento 1	E1T4P1
		Experimento 2	E2T4P1
		Experimento 3	E3T4P1
	Probeta 2 (5cm)	Experimento 1	E1T4P2
		Experimento 2	E2T4P2
		Experimento 3	E3T4P2

En la Tabla 2.2, cada probeta está etiquetada según el número de experimento al que corresponda, las condiciones de mecanizado de su tratamiento y la longitud de esta, como se especifica a continuación.



Mediante el etiquetado, se podrá referenciar fácilmente una probeta específica. En el recuadro amarillo y con la letra *E* está especificado el número de experimento al que corresponde, puede ser 1, 2 o 3; en rojo y con la letra *T*, se especifica el tratamiento, el mismo que puede ser 1, 2, 3 o 4; finalmente en azul y con la letra *P*, se indica el tamaño de la probeta, la cual es 1 en el caso de las probetas de longitud de 30 cm y es 2 para las probetas de 5 cm.

2.3 Selección de la herramienta de corte

El inserto que se ha seleccionado como herramienta de corte es el denominado DNMG 15 06 08 - MP MC 6025 del fabricante MITSUBISHI MATERIALS. El inserto es recomendado para el material seleccionado y presenta las siguientes características técnicas.

Tabla 2.3 Parámetros de corte del inserto seleccionado

DNMG 15 06 08 – MP MC 6025	
Velocidad de corte (V_c)	195 - 315 [m/min]
Velocidad de avance (f_n)	0.16 – 0.5 [mm/r]
Profundidad de corte (a_p)	0.3 - 4 [mm]

En la Tabla 2.3, se establecen los rangos permisibles de trabajo en velocidad de avance, velocidad de corte y profundidad. Es decir, el inserto seleccionado debe maquinarse dentro de lo indicado.

2.4 Parámetros de mecanizado

Primero, se determina las revoluciones de la velocidad de corte mediante la siguiente ecuación.

$$n = \frac{V_c * 1000}{\pi * \phi}$$

Ecuación 2.2 Velocidad de corte en rpm

En la Ecuación 2.2, n la celeridad de corte [rpm], V_c la velocidad de corte dada por el inserto, ϕ es el diámetro del material a mecanizar. El valor calculado se incluye a continuación.

Tabla 2.4 Parámetros de la velocidad de corte

Velocidad de corte	
Valor calculado	3947.54 rpm
Nivel alto	2000 rpm
Nivel bajo	1200 rpm

En la Tabla 2.4, se establecen las velocidades de corte para el experimento y dado que el torno convencional propuesto tiene preestablecidas sus revoluciones de trabajo, los niveles del experimento se ajustan a lo presentado.

Tabla 2.5 Parámetros de la velocidad de avance

Velocidad de avance	
Nivel alto	0.4 [mm/r]
Nivel bajo	0.2 [mm/r]

En la Tabla 2.5, la velocidad de avance se establece en su nivel alto y bajo según lo recomendado por el fabricante del inserto.

Tabla 2.6 Parámetros de la profundidad de corte

Profundidad de corte	
Nivel alto	2.5 [mm]
Nivel bajo	1 [mm]

En la Tabla 2.6, se indica la profundidad de corte establecida según lo recomendado para el inserto en la Tabla 2.3. Además, se consideran los valores permisibles del torno Torrent que se utiliza en la experimentación.

Finalmente, se indican los parámetros de mecanizado combinados en los distintos tratamientos, según el diseño de experimento factorial fraccionado propuesto.

Tabla 2.7 Parámetros de mecanizado para la experimentación

No. De tratamiento	Velocidad de corte	Velocidad de avance	Profundidad
1	2000 rpm	0.2 [mm/r]	1 [mm]
2	1200 rpm	0.4 [mm/r]	1 [mm]
3	1200 rpm	0.2 [mm/r]	2.5 [mm]
4	2000 rpm	0.4 [mm/r]	2.5 [mm]

En la Tabla 2.7, se definen las condiciones de mecanizado para el desarrollo del experimento, se observan los valores de velocidad de corte, velocidad de avance y profundidad en los cuatro tratamientos propuestos.

2.5 Medición de vibraciones

Equipo para la medición de vibraciones

El equipo utilizado para la medición de vibraciones es el analizador SVAN 958, el cual es un instrumento que incluye transductores, filtros de ponderación y adaptadores para la medición triaxial de vibraciones que permite obtener datos de forma fácil y comfortable (ALAVA INGENIEROS, 2007).



Figura 2.4 Medidor de vibraciones SVAN 958 (ALAVA INGENIEROS, 2007)

En la Figura 2.4, se presenta el medidor de vibraciones SVAN 958 que posee características técnicas como su memoria interna y el procesador de señal integrado que le permiten medir las vibraciones en una jornada laboral extendida a condiciones severas. Cabe mencionar que SVAN 958 es la solución para las medidas vibratorias según las normas ISO 5349 1 & 2 (ALAVA INGENIEROS, 2007). En el Anexo III, se adjunta la ficha técnica del medidor SVAN 958.

Preparación del torno

El procedimiento inicia con el encendido, limpieza y revisión del torno para que no exista interferencia de factores externos durante la medición de vibraciones. El encendido es manual, la limpieza se consigue mediante el uso de franelas y brochas que retiran las virutas de procesos o trabajos anteriores. Finalmente, la revisión conlleva la lubricación de

las piezas internas del torno y la verificación de que se tengan los elementos necesarios para la experimentación.

Parte de la preparación del torno incluye la colocación del nuevo inserto en el portaherramientas, de forma que la experimentación inicie en condiciones óptimas. Cabe recalcar que se planifica el cambio de inserto en cada tratamiento, es decir, se cambia 4 veces en la totalidad del procedimiento.

Instalación del equipo de vibraciones

La ubicación del medidor de vibraciones en el sistema a cuantificar es de vital importancia dado que índice directamente en las resultados obtenidos. En (Ambhore et al., 2020) indica que el acelerómetro se ubica en el portaherramientas debido a la cercanía del contacto de la herramienta de corte con el eje a mecanizar, considerando que se busca conocer la vibración entre el eje mecanizado y la herramienta de corte.

De forma similar, la instalación del SVAN 958 consiste en ubicar correctamente el transductor en una zona cercana del portaherramientas pero que no corra riesgo el cableado de este

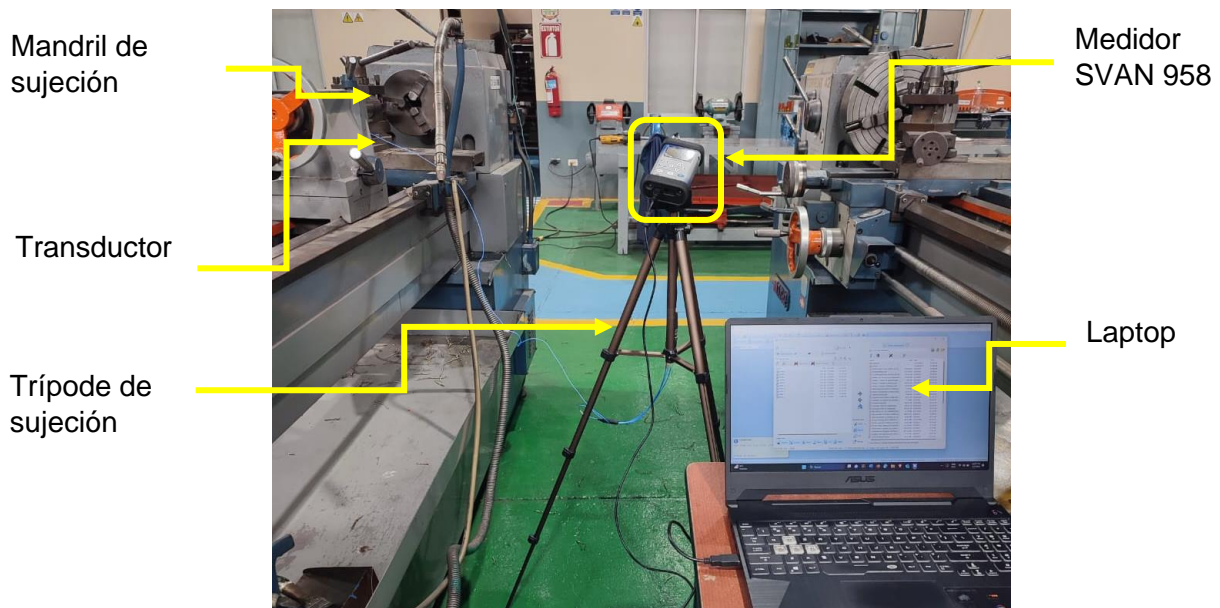


Figura 2.5 Torneado y medición de vibraciones

En la Figura 2.5, se observa que se decide colocar el transductor en la mesa portaherramientas del torno con el fin de que esté situado lo más lejano posible a las virutas que salpican del proceso y que se tenga el espacio disponible para no correr riesgos con el equipo. Por tanto, el transductor se adhiere a la bancada mediante un pegamento especial que forma parte del kit del SVAN 958.

Por su parte, se instala el trípode que corresponde a la sujeción del medidor de vibraciones al final del torno de forma que se tenga una holgura suficiente para el movimiento del cableado del transductor. Además, se conecta el medidor de vibraciones a la laptop ASUS que tiene previamente instalado el programa SVANTEK para verificar las mediciones de vibraciones y su correcta grabación en la memoria.

Procedimiento de la medición

La medición se ejecuta en la marcha del experimento. Inicia con la colocación de las probetas en el mandril y el respectivo ajuste, después se realiza el seteo de parámetros según la Tabla 2.7, se configura la velocidad de corte y velocidad de avance con ayuda del técnico del laboratorio, se realiza un primer contacto con la probeta y se indica la profundidad de corte. Un instante antes de que inicie el torneado, se inicia la medición de las vibraciones y mientras se maquina la longitud correspondiente, se verifica que el equipo funcione correctamente.

Al concluir el maquinado, se concluye también la medición de vibraciones, se recoge la viruta para el análisis posterior y se retira la probeta del mandril. Cabe mencionar que el procedimiento descrito se aplica a probetas 1 y 2 con la única diferencia que, en las probetas 1, la sujeción incluye la colocación del contrapunto. Además, en cada experimento, se verifica que se haya guardado adecuadamente el espectro de vibración en el programa SVANTEK.

Procedimiento de análisis de la información obtenida

El análisis de la información obtenida abarca el detalle de la gráfica que resulta de SVANPC++, la cual contiene respuestas en el espectro de vibración a distintas frecuencias iniciando desde 0.8 Hz hasta 1000Hz. Se escoge este rango de frecuencias dado que en ese rango los valores alcanzan la convergencia. Además, se busca conocer el máximo valor de vibración y su ubicación aproximada en la longitud de la probeta para poder determinar la ubicación de la medición de rugosidad, por lo cual se extraen los datos de evolución vibracional en forma de tabla para lograr un análisis detallado del comportamiento de las señales.

Se analiza el espectro de vibración obtenido para cada probeta en los distintos tratamientos y experimentos, verificando el valor máximo de vibración transitoria para cada probeta y el valor eficaz de la vibración en las distintas frecuencias. Con esto se logra comparar las distintas perturbaciones en el sistema ante los cambios en los parámetros de mecanizado.

Valor máximo de vibración transitoria MTVV

En el catálogo del SVAN (ALAVA INGENIEROS, 2007), se menciona que MTVV es el valor máximo de vibración transitoria y corresponde al valor máximo del valor eficaz de aceleración.

Valor eficaz de la vibración

Según (UNE-ISO 2631-1, 2008), el valor eficaz de la vibración o valor r.m.s. de la aceleración se expresa en metros por segundo al cuadrado $\left(\frac{m}{s^2}\right)$ para vibración traslacional y en radianes por segundo al cuadrado $\left(\frac{rad}{s^2}\right)$ para vibración rotacional. Este valor puede calcularse con la siguiente ecuación.

$$a_w = \left(\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right)^{1/2}$$

Ecuación 2.3 Valor eficaz de la vibración

En la Ecuación 2.3, se tiene que $a_w(t)$ es la aceleración ponderada en según la variación del tiempo y T es la permanencia de la medida en segundos. Sin embargo, el valor eficaz tiene respuestas en los ejes x, y, z en los que se mide la vibración. Por tanto, se define un valor de vibración total calculado mediante la siguiente ecuación.

$$a_{wv} = \sqrt{k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2}$$

Ecuación 2.4 Vibración total

En la Ecuación 2.4, se tiene que k_x , k_y y k_z son constantes multiplicadoras y a_{wx} , a_{wy} y a_{wz} son los valores de aceleración ponderada en cada eje.

Ahora, el valor eficaz total puede ser expresando en decibeles mediante la ecuación siguiente.

$$L_w = 20 \log \frac{a_{wv}}{a_o}$$

Ecuación 2.5 Vibración total en dB

En la Ecuación 2.5, se tiene que a_{wv} es el módulo de la aceleración ponderada y a_o es $10^{-6} \frac{m}{s^2}$ según ISO 1683.

2.6 Medición de rugosidades

Equipo para la medición de rugosidades

El equipo de medición de rugosidad se denomina SURFTEST SJ-210 y es de la marca Mitutoyo. Según (Mitutoyo, 2013), el Surfrest SJ-210 es un instrumento de medida de rugosidades para su uso a pie de máquina, trastea las zonas superficiales de distintos componentes de máquina, computariza la rugosidad de la superficie fundada en estándares de rugosidad y modela los resultados.



Figura 2.6 Rugosímetro Mitutoyo (Mitutoyo, 2013)

En la Figura 2.6, se observa que el rugosímetro básicamente consta de un palpador que permite el movimiento longitudinal sobre la superficie mientras detecta irregularidades, en este caso el equipo recorre una longitud de 5mm en los puntos señalados de las probetas. En el Anexo IV, se adjunta la ficha técnica del medidor de rugosidades Mitutoyo.

Preparación de probetas

La preparación de las probetas para el ensayo de rugosidad consiste en la limpieza, clasificación y señalización de las zonas en las que se medirá la rugosidad. Para la limpieza, se utiliza una franela que permite retirar los restos de contaminantes como polvos u otros; la clasificación se realiza según el etiquetado de las probetas indicada en la Tabla 2.2 y la señalización consiste en marcar con un marcador negro los puntos en los cuales se medirá la rugosidad. En los tratamientos 1, 3 y 4 se marca al inicio y al final y en el tratamiento 2 se toman tres puntos de medición: al inicio, en la mitad y al final de la probeta.

Procedimiento de la medición de rugosidad

Para la medición se busca una superficie plana donde se pueda fijar a las probetas con dados de sujeción a una altura acorde al rugosímetro, de forma que se tenga el menor

movimiento externo posible. Después de la sujeción y estabilización, se procede a calibrar el equipo y se realiza una prueba inicial para verificar el correcto desplazamiento del palpador por la superficie marcada en la probeta.

Se inicia con las probetas 2 (de menor longitud) y el mismo procedimiento se repite para cada probeta 1. En cada toma de datos, se anota el valor de rugosidad promedio para ese punto y se procede con el giro de la probeta a 90° de forma circunferencial, es decir, en cada punto se obtienen 4 datos de rugosidad para su posterior análisis.



Figura 2.7 Ensayo de rugosidad

En la Figura 2.7, se muestra la ubicación de la probeta y el montaje del equipo para la toma de datos de rugosidad posterior al torneado de las probetas.

Procedimiento de análisis de la información obtenida

Se extraen los resultados de la medición de rugosidad en los puntos de interés según el análisis que se realiza en los espectros de vibraciones. Es decir, se toma en cuenta las zonas dónde se obtuvo los máximos valores eficaces y sus alrededores, con el fin de contrastar la variación de la rugosidad con las señales de respuesta de la vibración.

En la siguiente tabla se indica los puntos específicos en que se tomó la medición.

Tabla 2.8 Zonas de medición en las probetas

Probeta 1	Inicio	3 cm
	Centro	15 cm
	Final	28 cm
Probeta 2	Inicio	1 cm

	Centro	2.5 cm
	Final	4 cm

En la Tabla 2.8, se indica que, según el tamaño de las probetas, la zona del inicio, centro o final donde se cuantifica la rugosidad varía. Es decir, el inicio, centro y final no son en las mismas ubicaciones para las diferentes longitudes de probetas.

Rugosidad media aritmética

Los datos recopilados y que se van a analizar son rugosidades Ra, es decir, es un valor de rugosidad que representa la media aritmética del perfil obtenido dentro de la longitud de medición (Universidad del País Vasco, 2022).

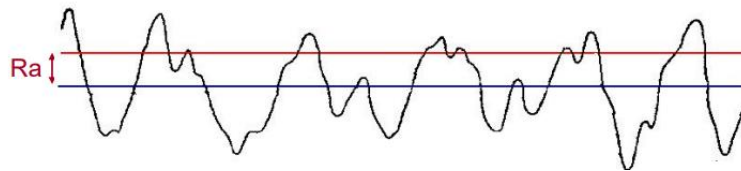


Figura 2.8 Rugosidad Ra (Universidad del País Vasco, 2022)

En la Figura 2.8, se presenta un ejemplo de un perfil de rugosidad y se indica la ubicación gráfica de rugosidad promedio Ra.

Por otro lado, los valores de rugosidad se obtienen dentro de un rango establecido según el proceso de manufactura del cual provenga la pieza o elemento medido, en este caso, el proceso es el torneado.

En el Anexo V, se establecen rangos según el proceso de manufactura, en este caso, se indica que se esperan valores entre 0.4 y 6.3 [μm] debido al torneado.

3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados de la medición de vibraciones

A continuación, se presentan los resultados de los valores máximos de aceleración ponderada obtenidos de los espectros de vibraciones bajo las distintas combinaciones de parámetros de corte para cada una de las probetas pertenecientes a los distintos tratamientos.

Resultados de vibraciones del tratamiento 1

Los resultados de espectros de vibraciones obtenidas para el tratamiento 1, agrupan las condiciones de mecanizado expuestas en la Tabla 2.7 y extraídas a continuación.

Tabla 3.1 Parámetros de mecanizado del tratamiento 1

No. De tratamiento	Velocidad de corte	Velocidad de avance	Profundidad
1	2000 rpm	0.2 [mm/r]	1 [mm]

En la Tabla 3.1, se presentan las condiciones de mecanizado para el tratamiento 1, donde se combinan la velocidad de corte alta, velocidad de avance baja y profundidad baja.

Según el diseño de experimentos propuesto, la cantidad de probetas totales mecanizadas bajo estas condiciones son 6, de las cuales 3 tienen longitud efectiva de 30cm y se denominan probeta 1, y 3 de 5cm de longitud efectiva que se denominan probeta 2. De forma resumida, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 3.2 Resultados de las probetas del tratamiento 1

Probeta	awx [dB]	awy [dB]	awz [dB]	awv máximo [dB]	MTTVx [dB]	MTTVy [dB]	MTTVz [dB]	Tiempo awv [s]
E1T1P1	95.8	102.8	96.8	104.4	95.7	102.2	97.4	18 de 70
E2T1P1	100	94.7	98.9	103.2	99.8	95.7	99	75 de 76
E3T1P1	96.1	98.9	98	102.6	95.4	97.3	96.7	2 de 73
E1T1P2	98.8	98.2	97.9	103.1	98.6	98.2	97.8	12 de 14
E2T1P2	98.4	98.7	97.1	102.9	98.1	98.3	97.1	7 de 15
E3T1P2	98.4	96.9	98.7	102.8	98.4	97.6	98.5	12 de 13

En la Tabla 3.2, se indican los valores eficaces correspondientes a cada eje y se resalta el módulo del valor eficaz total, dando como resultado valores en un rango de 102.6 a 104.4 [dB] con una desviación media es de 0.42, lo cual muestra una dispersión baja entre probetas 1 y 2. Esto indica que la sujeción con el contrapunto de las probetas 1 no alteran el contacto de la herramienta con el eje a mecanizar, no influye en las vibraciones y estabiliza el sistema para que el torneado se desarrolle adecuadamente.

Además, se presentan los valores de vibración transitoria en cada eje, acorde al valor eficaz total. Es importante destacar que el valor MTVV tiene un comportamiento individual en los distintos ejes, es decir, en cada instante de tiempo presenta valores diferentes en cada eje sin relación explícita entre estos.

Por otro lado, 3 de 6 probetas presentaron el valor eficaz máximo en el tiempo final del torneado, mientras que, en el resto de las probetas, el valor eficaz se encuentra disperso encontrándose el valor máximo en el inicio, mitad o cuarta parte de la probeta en cuestión, por tanto, el inicio y el final son puntos de interés para la medición de rugosidad.

Se analiza a continuación, los espectros de vibración de dos probetas representativas del tratamiento 1.

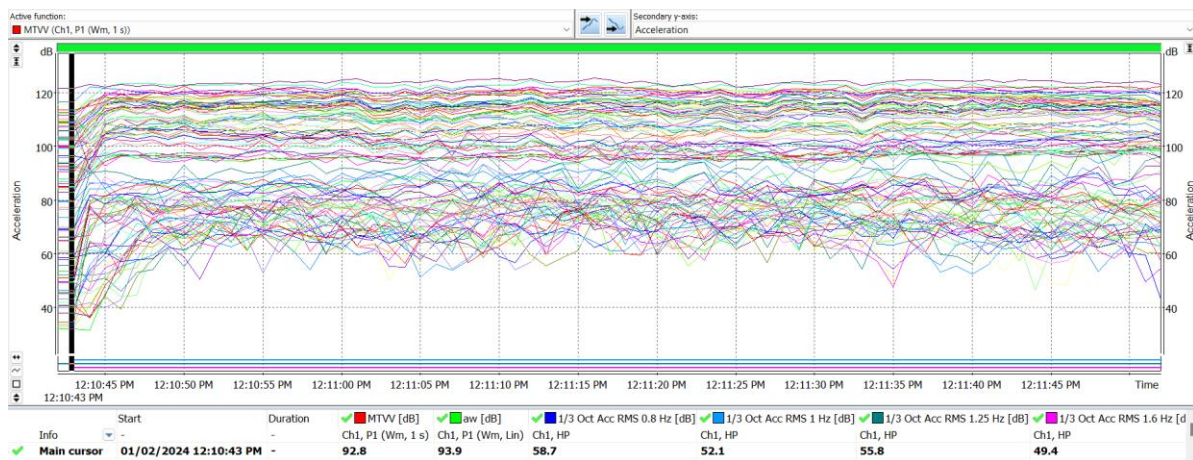


Figura 3.1 Espectro de vibración para la probeta E1T1P1 (SVANPC++)

En la Figura 3.1, se observa el gráfico correspondiente al espectro de vibración para la probeta E1T1P1. Las medidas que aparecen en la parte inferior, en la fila de *Main cursor* están relacionadas con el segundo exacto en el que se encuentra situada la barra negra vertical, en este caso es el segundo uno. Por ende, conforme avanza el cursor sobre la gráfica, permite observar la variación de los datos con el paso del tiempo. Los datos incluyen el valor de aceleración en cada nivel de frecuencia y en cada segundo del tiempo total. En este caso, se tienen datos para 70 segundos con respuestas en distintos niveles

de frecuencia; sin embargo, de este conjunto, se han plasmado en la Tabla 3.2 los valores MTVV y el valor awv máximo.

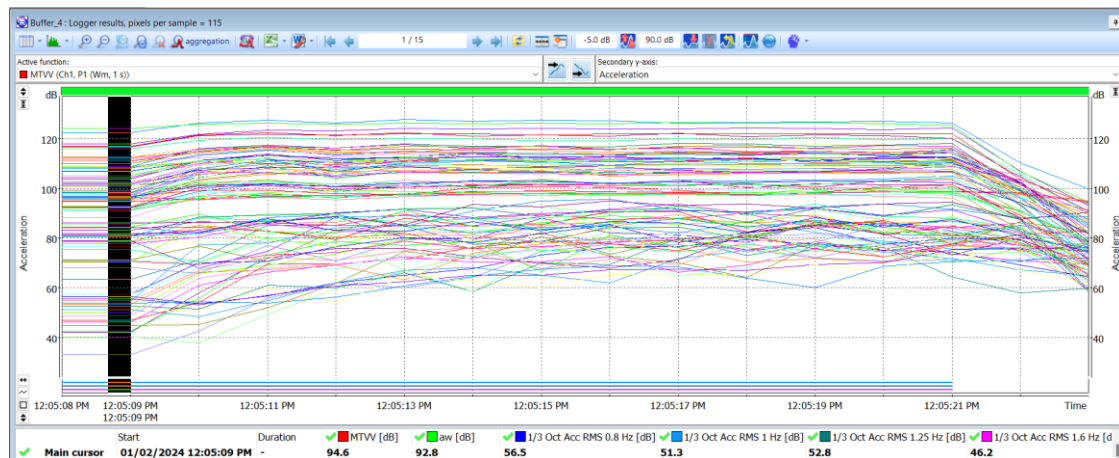


Figura 3.2 Espectro de vibración para la probeta E3T1P2 (SVANPC++)

En la Figura 3.2, se muestra el espectro de vibración para la probeta E3T1P2. Se observa un crecimiento inicial y una declinación al final del espectro, lo cual indica el arranque y el amortiguamiento del torno al iniciar y finalizar el mecanizado de la probeta, esta diferencia con el espectro anterior donde no se observa el arranque y el amortiguamiento se da por el instante en que se empieza a medir la vibración, es decir, depende netamente del experimentador.

En este caso, el torneado dura 13 segundos y el comportamiento de la vibración se desarrolla ascendentemente, indicando que conforme avanza en longitud, el mecanizado produce mayor alteración sobre el sistema.

Resultados de vibraciones del tratamiento 2

Los resultados presentados a continuación agrupan a las probetas mecanizadas bajo las condiciones establecidas en la Tabla 2.7 para el tratamiento 2 y expuestas a continuación.

Tabla 3.3 Parámetros de mecanizado del tratamiento 2

No. De tratamiento	Velocidad de corte	Velocidad de avance	Profundidad
2	1200 rpm	0,4 [mm/r]	1 [mm]

La Tabla 3.3, del tratamiento 2 en comparación con la Tabla 3.1 del tratamiento 1, revela una disminución de velocidad de corte, aumento en la velocidad de avance y se mantiene con la misma profundidad.

Tabla 3.4 Resultados de las probetas del tratamiento 2

Probeta	awx [dB]	awy [dB]	awz [dB]	awv [dB]	MTTVx [dB]	MTTVy [dB]	MTTVz [dB]	Tiempo awv [s]
E1T2P1	96.4	101.9	99.7	104.7	96.2	101.4	99.8	15 de 47
E2T2P1	94.7	92.3	100.3	101.9	94.6	92.9	100.2	34 de 41
E3T2P1	92.8	92.7	97.7	99.8	92.8	92.2	97.2	35 de 41
E1T2P2	96.9	101.1	100.3	104.5	97.3	100.7	100.3	6 de 12
E2T2P2	97.2	98.3	100.9	103.9	97.1	98.4	100.8	5 de 9
E3T2P2	97	91.6	101.1	102.8	97	92.2	101.2	9 de 10

Al igual que en el tratamiento 1, la Tabla 3.4 engloba los valores de aceleración en decibeles en cada eje y se encuentra resaltada la magnitud total correspondiente, arrojando valores dentro del rango de 99.8 a 104.7 [dB] con una desviación media de 1.433 en todo el conjunto de probetas. El promedio del valor eficaz en las probetas 1 es de 102.13 [dB] y el promedio del valor eficaz en las probetas 2 es de 103.73 [dB], es decir, la diferencia es de 1.6 [dB], lo cual no representa mayor diferencia en vibración y no hay perturbación significativa por la utilización del contrapunto.

En referencia al valor MTVV correspondiente al valor eficaz, al igual que el caso anterior, no se tiene más información, solamente se presenta cada valor en los diferentes ejes de forma individual sin presentar un comportamiento grupal de relevancia.

Particularmente, la dispersión de los datos reflejada en la desviación media, también se observa en el tiempo en que se exterioriza la mayor vibración del sistema. En 3 de 6 probetas, el máximo valor eficaz se da aproximadamente en la mitad, mientras que, en el resto de las probetas, se tiene el máximo valor en el final y en la última quinta parte de su longitud. En consecuencia, los puntos de interés para la medición de rugosidad son en el inicio, mitad y final de las probetas.

Se analizan a continuación, los espectros de vibración de dos probetas características del tratamiento 2.

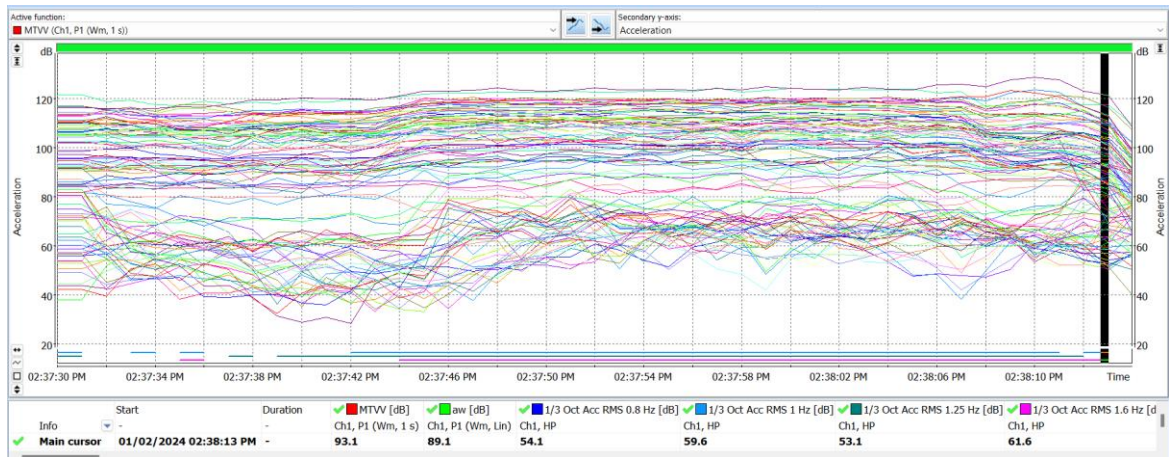


Figura 3.3 Espectro de vibración para la probeta E2T2P1 (SVANPC++)

En la Figura 3.3, se tiene el espectro de vibración para la probeta E2T2P1 cuya duración del torneado es de 41 segundos. En este caso, en la fila de *Main cursor* se encuentran los valores correspondientes al último segundo de medición según la ubicación de la barra vertical. Si bien en la gráfica se diferencia un leve crecimiento en los últimos segundos, en el valor eficaz tabulado se verifica que la razón entre valores está en décimas de decibeles, por tanto, no existe mayor incidencia en la aceleración ponderada.

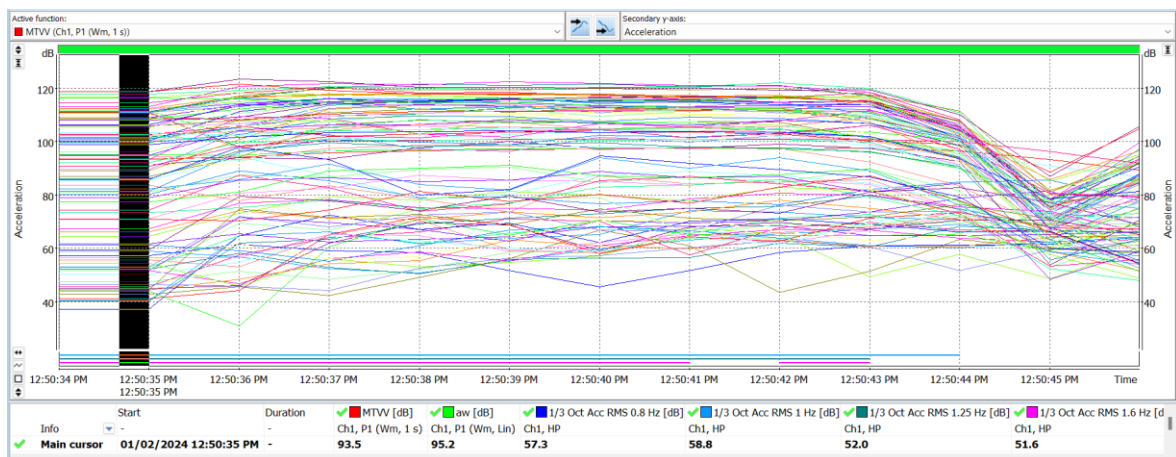


Figura 3.4 Espectro de vibración para la probeta E2T2P2 (SVANPC++)

En la Figura 3.4, se indica el espectro de vibración para E2T2P2 cuya duración de torneado es de 9 segundos. En esta figura se resalta el amortiguamiento en la finalización del mecanizado y se aprecia que las respuestas vibracionales en las distintas frecuencias tienden a disminuir. Sin embargo, durante el mecanizado, los valores eficaces tienden a crecer hasta llegar a su máximo en la mitad de la longitud, y después disminuyen paulatinamente.

Resultados de vibraciones del tratamiento 3

Los resultados a continuación corresponden a las probetas mecanizadas bajo las condiciones establecidas en la Tabla 2.7 para el tratamiento 3 y expuestas a continuación.

Tabla 3.5 Parámetros de mecanizado del tratamiento 3

No. De tratamiento	Velocidad de corte	Velocidad de avance	Profundidad
2	1200 rpm	0,2 [mm/r]	2.5 [mm]

En la Tabla 3.5, se agrupan las condiciones de mecanizado del tratamiento 3 y se tiene la combinación de la velocidad de corte baja, la velocidad de avance baja y la profundidad alta. Al igual que los tratamientos anteriores, se mecanizan seis probetas bajo estas condiciones y sus resultados se muestran a continuación,

Tabla 3.6 Resultados de las probetas del tratamiento 3

Probeta	awx [dB]	awy [dB]	awz [dB]	awv [dB]	MTTVx [dB]	MTTVy [dB]	MTTVz [dB]	Tiempo awv [s]
E1T3P1	95.4	88.3	98.6	100.6	95.3	88.1	98.5	78 de 80
E2T3P1	84.8	75.9	104.1	104.2	86.4	80.9	102.4	81 de 81
E3T3P1	109.2	108.8	113.2	115.6	107.8	108.8	111.8	55 de 58
E1T3P2	95.2	86.7	96.4	99.1	95.1	86.6	96.4	14 de 16
E2T3P2	95.4	86.5	97	99.5	95.1	86.1	96.5	13 de 18
E3T3P2	97.2	103.8	101.9	106.5	97	102.6	101.1	16 de 17

La Tabla 3.6, contiene los valores eficaces máximos para cada probeta del tratamiento 3 con sus componentes respectivos en cada eje. Los datos de la aceleración se encuentran dentro del rango de 99.1 a 115.6 [dB] con una desviación media de 4.53 en todo el conjunto de las probetas. En este caso, el promedio del valor eficaz de las probetas 1 es de 106.8 [dB] y el promedio de las probetas 2 es de 101.7 [dB], es decir, la diferencia es de 5.1 [dB]. Es importante recalcar que durante la experimentación del tratamiento 3, la generación de virutas se dio de manera descontrolada, de tal forma que en la probeta E3TEP1 la viruta interfirió en el maquinado a tal punto de quedarse trabada entre la herramienta y el eje, por tanto, no se logró completar el torneado de la longitud propuesta inicialmente, es por tal motivo que en esta probeta el valor eficaz es de 115.6 [db] siendo este el valor más alto de todo el conjunto y resultando en una desviación media alta en comparación con los anteriores tratamientos.

En este caso, los mayores valores MTVV del conjunto de datos del tratamiento 3 se dan en la probeta E3T3P1, la misma que presentó dificultad en el maquinado. El resto de los valores MTVV no presentan características particulares respecto a todo el conjunto.

Por otro lado, en 5 de 6 probetas la mayor vibración se presenta en los últimos segundos de maquinado. En general, en este tratamiento la vibración temporal se dio de forma ascendente y los máximos valores eficaces se dieron en el final de la probeta, siendo este el punto de interés para la medición de rugosidad.

A continuación, se presentan dos espectros de vibración de representativos del tratamiento analizado.

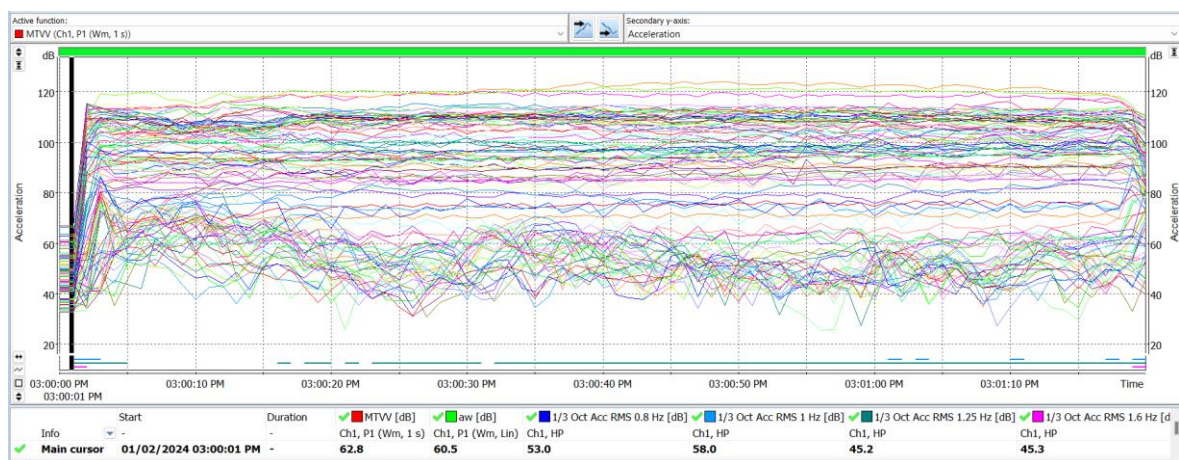


Figura 3.5 Espectro de vibración para la probeta E1T3P1 (SVANPC++)

La Figura 3.5, indica el espectro vibracional para la probeta E1T3P1, la cual se mecaniza en un tiempo de 80 segundos y en el segundo 78, se presenta el máximo valor eficaz de todo el espectro. En la imagen se puede apreciar el arranque del torno y el inicio del amortiguamiento, con lo cual se estima que los valores de aceleración en las distintas frecuencias tienden a aumentar y disminuir correspondientemente. En la etapa central de la medición no se va claramente la tendencia de los datos, sin embargo, en su forma tabular, los datos tienen una predisposición a aumentar.

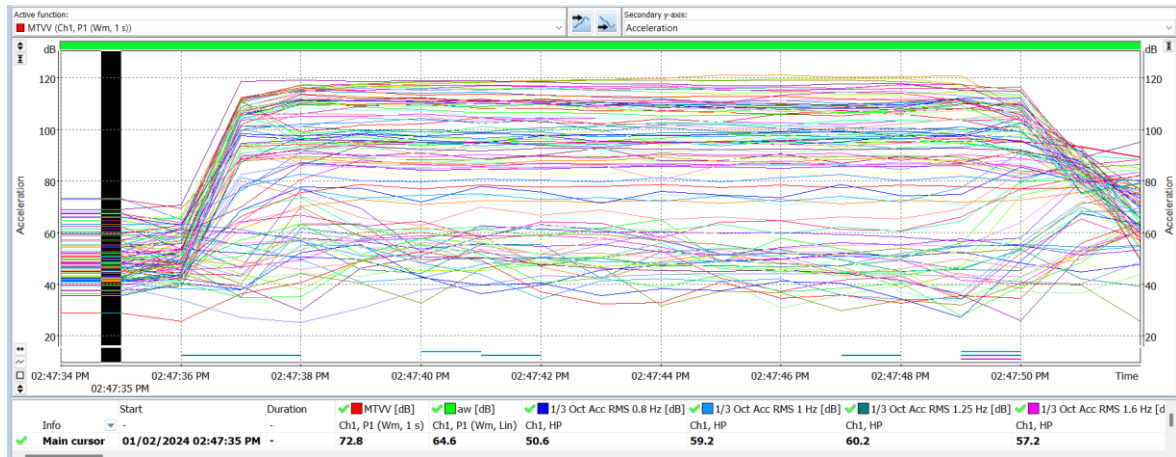


Figura 3.6 Espectro de vibración para la probeta E1T3P2 (SVANPC++)

En la Figura 3.6, se puede apreciar el espectro vibracional para la probeta E1T3P2, cuya duración del torneado es de 16 segundos y su valor máximo se dio en el segundo 14, es decir, en la longitud final de la probeta. Al igual que el espectro anterior, se observa claramente el arranque y el amortiguamiento del sistema al iniciar y concluir el torneado, mientras que, en la parte central, los valores no presentan alguna perturbación significativa.

Resultados de vibraciones del tratamiento 4

Los resultados siguientes corresponden a las probetas mecanizadas bajo las condiciones establecidas en la Tabla 2.7 para el tratamiento 4, las mismas que se exponen a continuación.

Tabla 3.7 Parámetros de mecanizado del tratamiento 3

No. De tratamiento	Velocidad de corte	Velocidad de avance	Profundidad
2	2000 [rpm]	0,4 [mm/r]	2.5 [mm]

En la Tabla 3.7, se observa que el tratamiento 4 agrupa las condiciones más agresivas de la experimentación, dado que tanto en la velocidad de corte, la velocidad de avance y la profundidad se establecen los máximos valores. Los resultados de las seis probetas maquinadas se indican a continuación.

Tabla 3.8 Resultados de las probetas del tratamiento 4

Probeta	awx [dB]	awy [dB]	awz [dB]	awv [dB]	MTTVx [dB]	MTTVy [dB]	MTTVz [dB]	Tiempo awv [s]
E1T4P1	100.9	101.6	100.1	105.7	100.5	101	99.9	23 de 28
E2T4P1	130.6	97.3	130.2	133.4	129.8	98.8	129.5	31 de 33
E3T4P1	92.1	87.5	110.7	110.8	95.7	92.2	110.2	30 de 31
E1T4P2	98	95.7	102.4	104.4	98.6	95.2	102.2	4 de 7
E2T4P2	96.6	94.7	98.1	101.5	96.1	94	98.2	7 de 8
E3T4P2	97.6	102.3	99.2	104.9	97.5	101.4	99.5	6 de 7

En la Tabla 3.8, se plasman los valores eficaces correspondientes a las probetas maquinadas bajo las condiciones del tratamiento 4 y sus respectivos componentes en cada eje, dando como resultado valores eficaces dentro del rango de 101.5 a 133.4 [dB] con una desviación media de 7.98. El promedio del valor eficaz de las probetas 1 es de 116.6 [dB] y el promedio del valor eficaz de las probetas 2 es de 103.6 [dB], es decir, que la diferencia entre ambos es de 13 [dB], lo cual indica que en las probetas sujetadas con contrapunto se presentan mayores valores vibracionales respecto a las probetas sujetadas solamente con el mandril. En este caso, no se presentó mayor interferencia de las virutas entre la herramienta de corte y la probeta, pero debido a que las probetas 1 se maquinan en mayor tiempo debido a su longitud, si se presenta una perturbación significativa en el sistema por los parámetros de mecanizado.

Con respecto a los valores MTVV equivalentes a valor eficaz máximo de todo el conjunto, en este caso 133.4 [dB], cabe señalar que sus valores transitorios son máximos en el eje x y z, lo cual indica que la aceleración máxima transitoria se comporta distinto en cada eje.

En cuanto a la ubicación del valor eficaz máximo, en 4 de 6 probetas se presentaron en la longitud final de la probeta y las restantes, si bien el valor máximo no se encuentra exactamente al final, los valores tienden a crecer y los máximos se agrupan en la parte final. Entonces los puntos de interés para la medición de rugosidad se encuentran en el final del mecanizado.

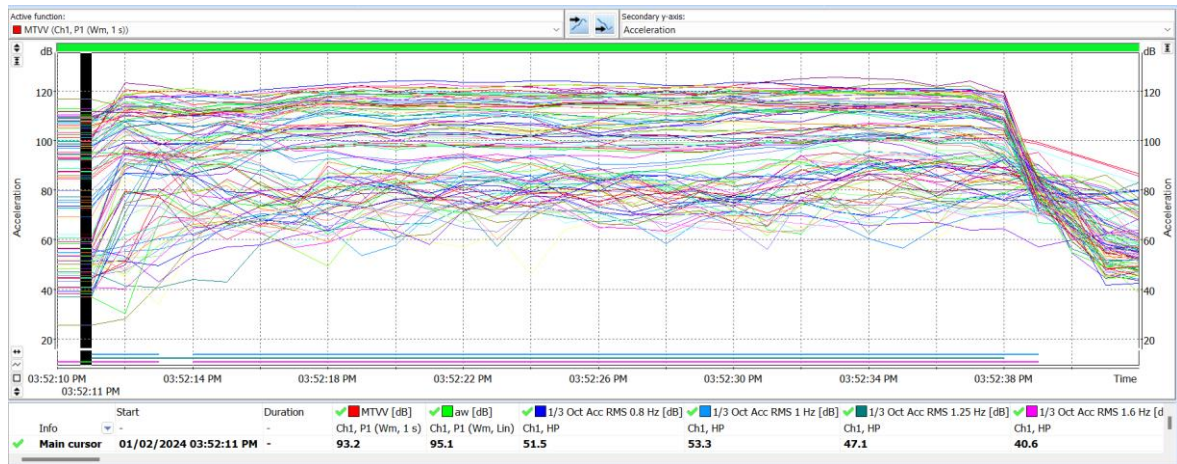


Figura 3.7 Espectro de vibración para la probeta E1T4P1 (SVANPC++)

En la Figura 3.7, se presenta el espectro para la probeta E1T4P1, cuyo tiempo de torneado es de 28 segundos y el valor eficaz máximo se presenta en el segundo 23. En esta figura, similar a las anteriores analizadas, no se observa a simple vista dónde se ubica el máximo valor eficaz dado que las respuestas vibratorias en las distintas frecuencias arrojan señales sin tendencias definidas. Por tal motivo es necesario extraer los datos de forma tabular.

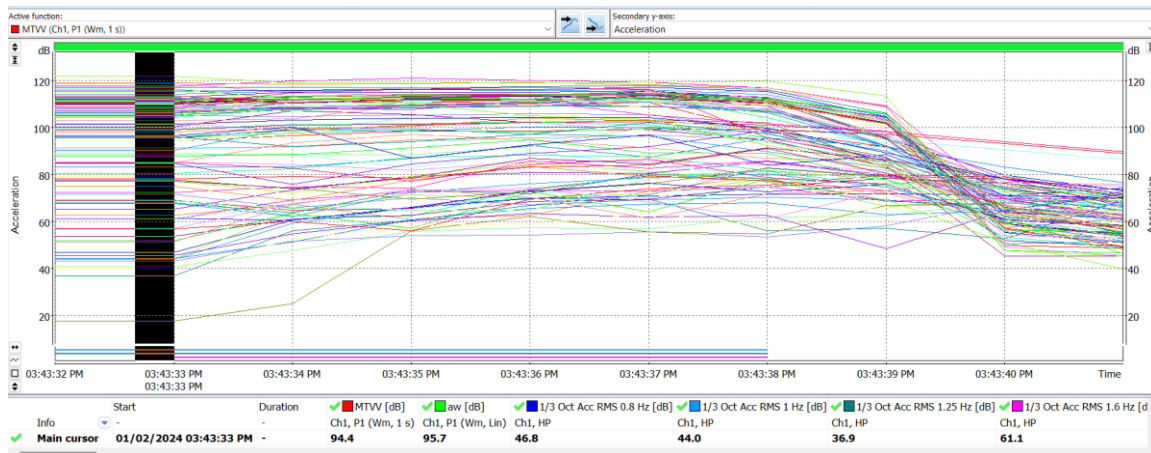


Figura 3.8 Espectro de vibración para la probeta E1T4P2 (SVANPC++)

En la Figura 3.8, se tiene la respuesta vibracional para la probeta E1T4P2, en la que el tiempo de torneado es de 7 segundos y el máximo valor eficaz se encuentra en el segundo 4. En la figura no se puede apreciar este valor, sin embargo, se observa claramente el amortiguamiento al finalizar el mecanizado.

En el Anexo VI se adjuntan los espectros vibratoriales para cada probeta incluida en los cuatros tratamientos analizados.

Comparación de las respuestas vibratorias entre los tratamientos

Con el fin de comparar los resultados de forma agrupada según el tratamiento y las probetas. Se presenta lo siguiente.

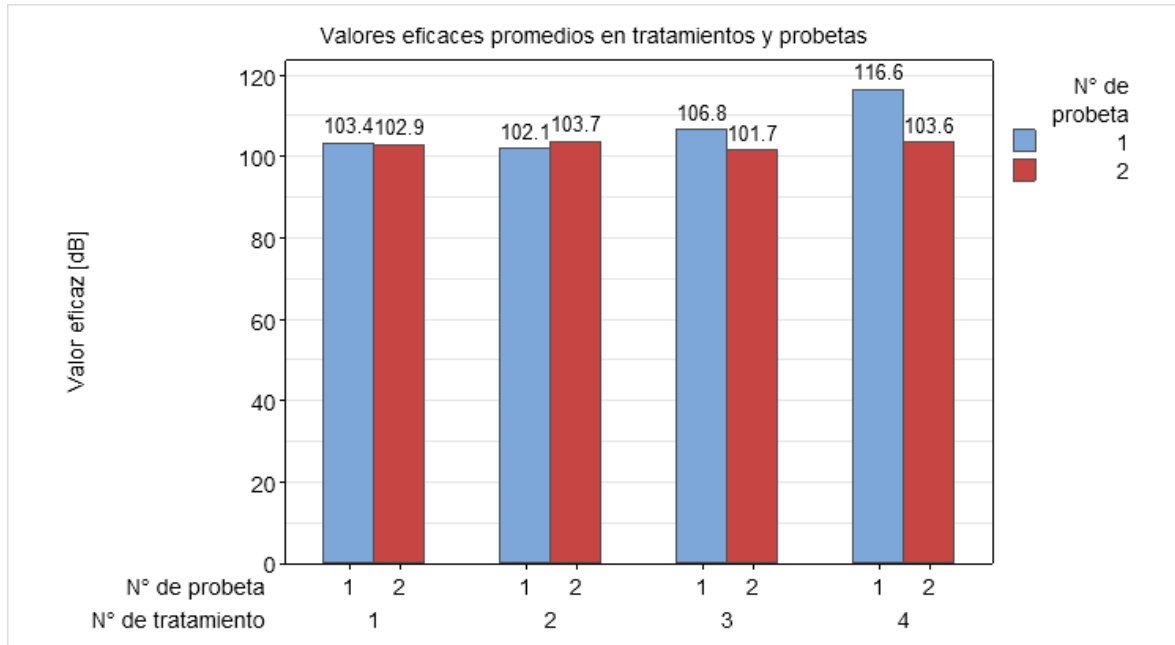


Figura 3.9 Valores eficaces promedio de las probetas 1 y 2 de los tratamientos 1, 2, 3 y 4 (Fuente: propia)

En la Figura 3.9, se resume los promedios del valor eficaz de las probetas 1 y 2 distribuidas en los distintos tratamientos. Se aprecia que para la probeta 1, la máxima vibración se da en el tratamiento 4 y para la probeta 2, en el tratamiento 2 aunque apenas se diferencia de una décima de la probeta 2 del tratamiento 4. También se resalta que en los tratamientos 1 y 2 los valores promedios de aceleración no presentan mayor diferencia entre probetas 1 y 2, indicando que el comportamiento de la vibración no es diferente con la ausencia o utilización del contrapunto; mientras que en los tratamientos 3 y 4, los valores si difieren significativamente entre las probetas 1 y 2, es decir, la utilización y ausencia del contrapunto influye en la vibración. Cabe mencionar que entre los dos primeros tratamientos y los dos últimos, la característica común es la profundidad de corte, dado que según lo establecido en la Tabla 2.7, la profundidad de corte en los primeros es de 1 mm mientras que en los dos últimos tratamientos es de 2.5 mm. A continuación, se presenta la relación entre parámetros de mecanizado y valores eficaces.

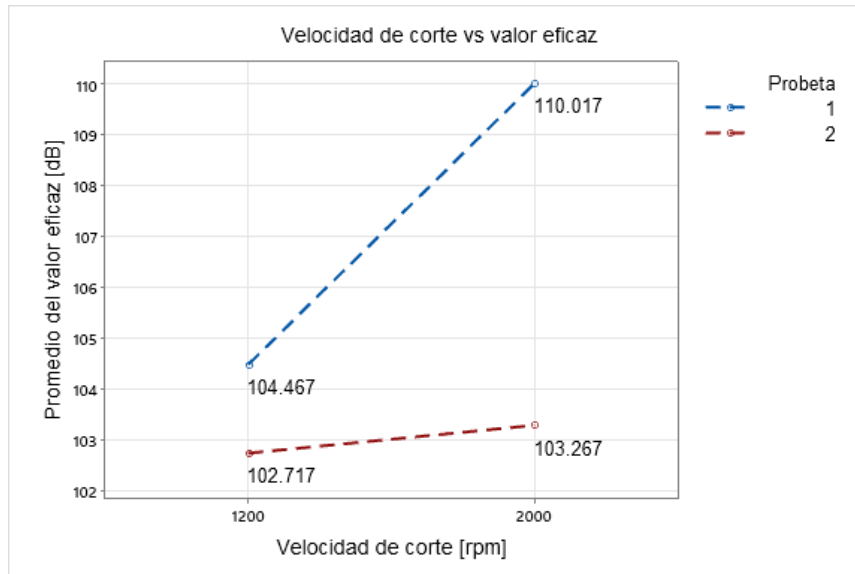


Figura 3.10 Velocidad de corte vs Promedio del valor eficaz (Fuente: propia)

En la Figura 3.10, se observa el promedio del valor eficaz de las probetas 1 y 2 maquinadas con las velocidades de corte establecidas como alta y baja. Ante el cambio de velocidad de 1200 a 2000 [rpm], la probeta 2 aumenta de 102.717 [dB] a 103.267 [dB], es decir, la diferencia es de 0.55 [dB], entonces se verifica que el cambio de velocidad de corte no influye significativamente en probetas de 5cm de longitud efectiva. En el caso de las probetas 1, el valor eficaz aumenta de 104.467 a 110.017 [dB], lo cual se refleja en una diferencia de 5.55 [dB], esto quiere decir, que conforme aumenta la velocidad de corte, las respuestas vibracionales serán mayores en probetas sujetadas con contrapunto y, por tanto, con longitudes mayores.

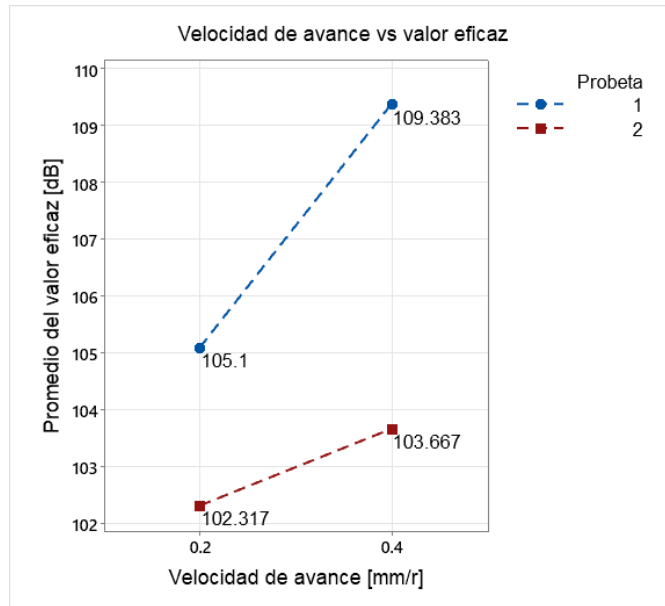


Figura 3.11 Velocidad de avance vs Promedio del valor eficaz (Fuente: propia)

En la Figura 3.11, se presenta el valor promedio eficaz para las probetas 1 y 2 mecanizadas a la velocidad de avance establecida según la Tabla 2.7 como alta y baja. Ante el cambio de velocidad de avance, se observa que conforme esta aumenta, el valor eficaz de vibración también aumenta. Sin embargo, similar al caso anterior, en la probeta 2 existe menor perturbación respecto a la probeta 1, ante el cambio de velocidad de avance; siendo así que en la probeta 1, la diferencia es de 4.283 [dB] y en la probeta 2 es de 1.35 [dB]. Se comprueba que la sujeción con contrapunto incide en los valores de respuesta vibracional para el parámetro analizado.

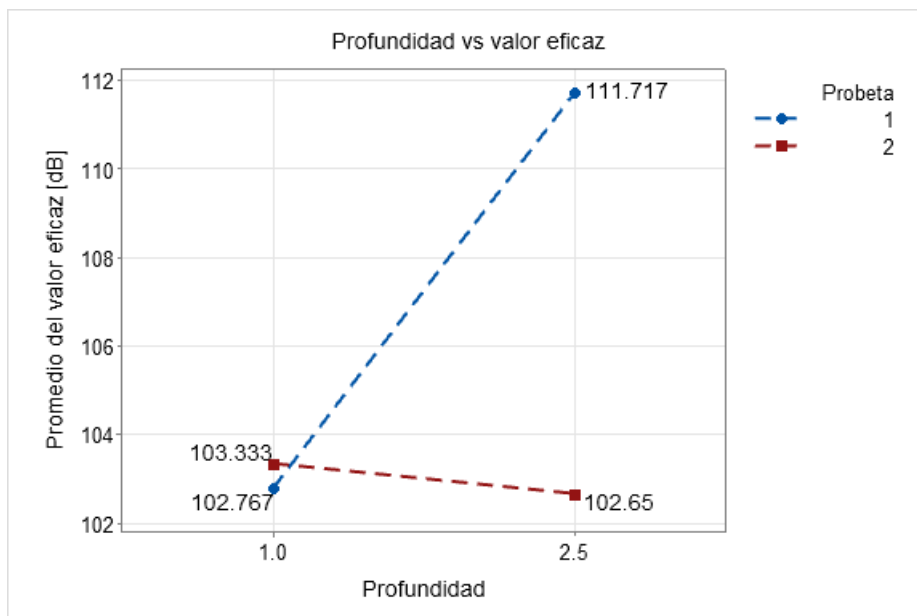


Figura 3.12 Profundidad vs Promedio del valor eficaz (Fuente: propia)

En la Figura 3.12, se muestran los valores promedios eficaces de las probetas maquinadas a la profundidad planteada en la Tabla 2.7 como alta y baja. En este sentido, se comprueba que el comportamiento ante el cambio de condiciones para las probetas en cuestión es diferente respecto al comportamiento ante los parámetros analizados anteriormente. En este caso, los valores eficaces de la probeta 1 aumentan conforme aumenta la profundidad; sin embargo, en la probeta 2 se presenta una disminución en la respuesta vibracional conforme aumenta la profundidad. Cabe mencionar que, en el primer caso, la diferencia es de 8.95 [dB] y en el segundo caso es de 0.683 [dB]. Entonces se afirma que, para probetas sujetadas con contrapunto, se genera mayores vibraciones si se aumenta la profundidad de mecanizado. Pero para probetas de longitud efectiva que no requieran contrapunto, la vibración disminuye de forma no significativa conforme aumenta la profundidad.

3.2 Resultados de la medición de rugosidades

En esta sección se presentan los resultados de la medición de rugosidades de forma promediada. Los valores de cada medición y punto considerado se presentan en el Anexo VII.

Resultados de rugosidades del tratamiento 1

Del procedimiento planteado en la metodología, se obtienen cuatro valores de rugosidad en cada punto de medición, las mismas que se promedian y se presentan a continuación.

Tabla 3.9 Rugosidad de las probetas del tratamiento 1

Probeta	Zona de medición	Rugosidad promedio en la zona de medición [μm]	Rugosidad promedio de la probeta [μm]
E1T1P1	Inicio	1.611	1.757
	Final	1.903	
E2T1P1	Inicio	1.797	1.937
	Final	2.078	
E3T1P1	Inicio	1.731	1.820
	Final	1.910	
E1T1P2	Inicio	1.967	2.014
	Final	2.062	
E2T1P2	Inicio	2.009	2.025
	Final	2.041	
E3T1P2	Inicio	1.778	1.933
	Final	2.087	

En la Tabla 3.9, se plasman los resultados del tratamiento 1 donde las zonas de medición son el inicio y final de las probetas, según lo planteado en la Tabla 2.8. El promedio de la

rugosidad inicial en las probetas 1 y 2 es de 1.815 [μm] y el promedio de rugosidad en la zona final es de 2.0133 [μm], es decir, la diferencia es de 0.1983 [μm], considerando que la mayor rugosidad se presenta en la zona final. Además, la rugosidad promedio para el tratamiento 1 es de 1.914 [μm].

Resultados de rugosidades del tratamiento 2

A continuación, se presentan los resultados de medición de rugosidad correspondientes al tratamiento 2.

Tabla 3.10 Rugosidad de las probetas del tratamiento 2

Probeta	Zona de medición	Rugosidad promedio en la zona de medición [μm]	Rugosidad promedio de la probeta [μm]
E1T2P1	Inicio	6.207	5.111
	Centro	4.264	
	Final	4.862	
E2T2P1	Inicio	5.927	5.371
	Centro	4.758	
	Final	5.428	
E3T2P1	Inicio	5.686	5.478
	Centro	5.229	
	Final	5.520	
E1T2P2	Inicio	5.750	4.588
	Centro	3.769	
	Final	4.247	
E2T2P2	Inicio	5.030	4.852
	Centro	4.570	
	Final	4.955	
E3T2P2	Inicio	5.427	4.904
	Centro	4.451	
	Final	4.834	

En la Tabla 3.10, se presentan los resultados del tratamiento 2 donde se tienen 3 zonas de medición y son inicio, centro y final, según lo especificado en la Tabla 2.8. El promedio de la rugosidad inicial de las probetas 1 y 2 es de 5.671 [μm], el promedio en la zona central es de 4.507 [μm] y en la zona final es de 4.974 [μm], es decir, la mayor rugosidad se presenta en la zona inicial seguida de la zona final y la menor rugosidad se da en la zona central. Además, la rugosidad promedio para el tratamiento 2 es de 5.051 [μm].

Resultados de rugosidades del tratamiento 3

A continuación, se presentan los resultados de medición de rugosidad correspondientes al tratamiento 3.

Tabla 3.11 Rugosidad de las probetas del tratamiento 3

Probeta	Zona de medición	Rugosidad promedio en la zona de medición [μm]	Rugosidad promedio de la probeta [μm]
E1T3P1	Inicio	2.013	2.218
	Final	2.422	
E2T3P1	Inicio	2.189	2.192
	Final	2.196	
E3T3P1	Inicio	2.159	2.629
	Final	3.100	
E1T3P2	Inicio	2.048	2.107
	Final	2.166	
E2T3P2	Inicio	2.561	2.302
	Final	2.043	
E3T3P2	Inicio	1.848	2.058
	Final	2.268	

En la Tabla 3.11, se presentan los resultados del tratamiento 3, las zonas de medición de rugosidad son el inicio y el final de las probetas, considerando las ubicaciones exactas especificadas en la Tabla 2.8. El promedio de la rugosidad en el inicio de las probetas 1 y 2 es de 2.136 [μm] y el promedio en la parte final es de 2.366 [μm], es decir, la diferencia es de 0.23 [μm] considerando que la mayor rugosidad se presenta en la zona final. Además, la rugosidad promedio es de 2.251 [μm] para las probetas del tratamiento 3.

Resultados de rugosidades del tratamiento 4

Tabla 3.12 Rugosidad de las probetas del tratamiento 4

Probeta	Zona de medición	Rugosidad promedio en la zona de medición [μm]	Rugosidad promedio de la probeta [μm]
E1T4P1	Inicio	5.866	5.393
	Final	4.921	
E2T4P1	Inicio	5.861	5.662
	Final	5.464	
E3T4P1	Inicio	5.823	5.622
	Final	5.422	
E1T4P2	Inicio	4.216	4.318
	Final	4.421	
E2T4P2	Inicio	4.835	4.860

	Final	4.885	
E3T4P2	Inicio	5.376	5.395
	Final	5.415	

En la Tabla 3.12, se presentan los resultados del tratamiento 4, las zonas de rugosidad analizadas son el inicio y el final de las probetas conforme lo indicado en la Tabla 2.8. La rugosidad en el inicio es de 5.329 [μm] y la rugosidad en la parte final es de 5.088 [μm], por tanto, la diferencia es de 0.241 [μm] considerando que la mayor rugosidad se encuentra en la zona inicial de las probetas. En este caso, la rugosidad promedio es de 5.209 [μm].

Comparación de las rugosidades entre los tratamientos

De forma resumida, se tienen los siguientes resultados para todo el conjunto de probetas mecanizadas.

Tabla 3.13 Resultados de rugosidad de la experimentación

Tratamiento	Zona de medición	Rugosidad promedio en la zona [μm]	Rugosidad del tratamiento [μm]	Desviación media
1	Inicio	1.815	1.914	0.084
	Final	2.0133		
2	Inicio	5.671	5.051	0.269
	Centro	4.507		
	Final	4.974		
3	Inicio	2.136	2.251	0.143
	Final	2.366		
4	Inicio	5.329	5.209	0.413
	Final	5.088		

En la Tabla 3.13, se observa que no existe alguna relación entre la zona de medición y la rugosidad dentro del análisis individual de las probetas, es decir, los valores de rugosidad a lo largo de las probetas son dispersos y no guardan relación con los puntos de interés analizados en los resultados de las vibraciones. Además, los datos de rugosidad promedio del conjunto de probetas de cada tratamiento, no presenta una dispersión significativa en los datos, según se observa en la Tabla 3.13, sino que existe uniformidad en la rugosidad obtenida en el conjunto de probetas pertenecientes a cada tratamiento.

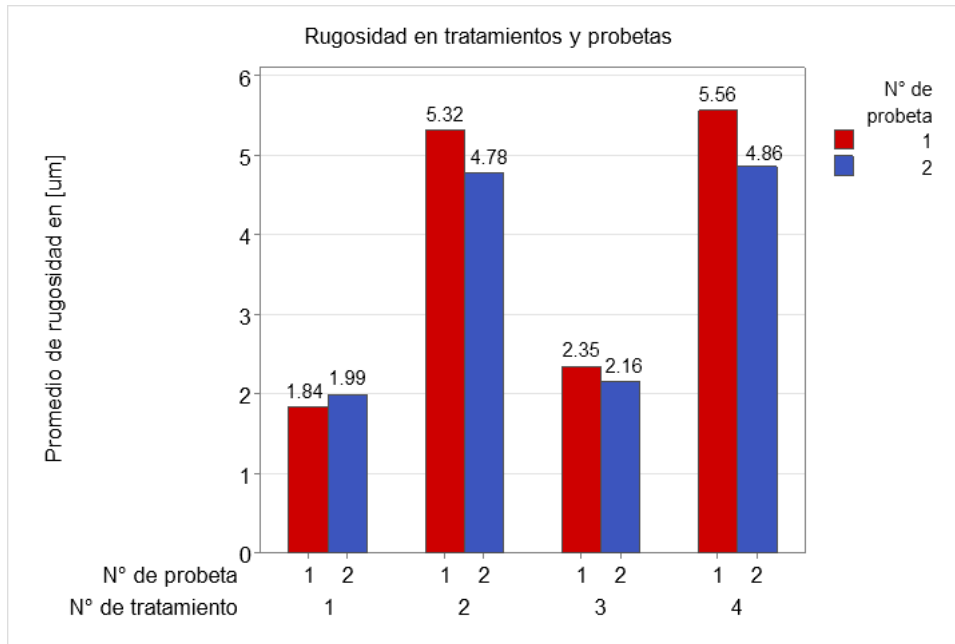


Figura 3.13 Rugosidad en los 4 tratamientos (Fuente: propia)

En la Figura 3.13, se observa que las mayores rugosidades se presentan en el tratamiento 2 y 4, mientras que las menores rugosidades se dan en el tratamiento 1 y 2.




3.3 Análisis de virutas

En esta sección se presenta el registro fotográfico de las virutas generadas durante el proceso de mecanizado.

Virutas en el tratamiento 1

A continuación, se presentan las fotografías de las virutas obtenidas en el mecanizado de las probetas correspondientes al tratamiento 1.

Tabla 3.14 Virutas en el tratamiento 1

E1T1P1	E2T1P1	E3T1P1
		
E1T1P2	E2T1P2	E3T1P2



En la Tabla 3.14, se observa uniformidad en las virutas generadas, es decir, las distintas probetas generan virutas con características similares. En este caso son virutas continuas y longitud considerable.

Virutas en el tratamiento 2

A continuación, se presentan las fotografías de las virutas obtenidas en el mecanizado de las probetas correspondientes al tratamiento 2.

Tabla 3.15 Virutas en el tratamiento 2






E1T2P1	E2T2P1	E3T2P1
		
E1T2P2	E2T2P2	E3T2P2
		

En la Tabla 3.15, se aprecia que las virutas generadas en el tratamiento 2 no son totalmente uniformes, solamente entre algunas se comparten características similares. En las probetas 1, las virutas son mayormente continuas.

Virutas en el tratamiento 3

A continuación, se presentan las fotografías de las virutas obtenidas en el mecanizado de las probetas correspondientes al tratamiento 3.

Tabla 3.16 Virutas en el tratamiento 3







E1T3P1	E2T3P1	E3T3P1
		
E1T3P2	E2T3P2	E3T3P2
		

En la Tabla 3.16, se observa que las virutas del tratamiento 3 presentan coloraciones diversas entre tonalidades doradas y azuladas. Además, no son uniformes respecto a su tamaño, más bien varían entre cortas y continuas.

Virutas en el tratamiento 4

A continuación, se presentan las fotografías de las virutas obtenidas en el mecanizado de las probetas correspondientes al tratamiento 4, donde las condiciones de mecanizado son las más altas de todos los tratamientos estudiados.

Tabla 3.17 Virutas en el tratamiento 4

E1T4P1	E2T4P1	E3T4P1
		
E1T4P2	E2T4P2	E3T4P2
		

En la Tabla 3.17, se muestra que las virutas en su mayoría presentan una coloración azulada y los tamaños son variados sin presentar uniformidad.

De lo expuesto en las Tablas 3.14, 3.15, 3.16 y 3.17, se verifica que las diferentes condiciones de mecanizado y la ausencia de lubricación influyen en la forma de la viruta generada. En el tratamiento 1 y 2 la viruta se genera y dispersa de forma controlada en todas sus probetas, aunque existen salpicaduras mínimas, pero no interfieren en el mecanizado. En (Picho, 2019) se indica que las virutas con formas continuas dan un resultado óptimo en cuanto a acabado superficial. En este caso se tienen virutas continuas de longitud corta.

Mientras que en el tratamiento 3 y 4, las virutas en las probetas 1 se generan de forma continua y tienden a enredarse e interferir en el torneado. Las probetas E3T3P1 y E1T4P1 son las que generaron las virutas continuas más largas de todo el experimento y que generaron mayores perturbaciones en el sistema.

Si bien en los registros fotográficos, las virutas no se generan exactamente iguales dentro del mismo tratamiento y longitud, existe cierta tendencia a no evacuarse de forma controlada dificultando el mecanizado y acabado final de las probetas 1 del tratamiento 3 y 4.

3.4 Conclusiones

La ausencia de lubricación establecida para la experimentación hizo visible la agresividad del mecanizado durante el tratamiento 3 y 4, en el análisis de vibraciones en la Figura 3.9, se observa que las vibraciones mayores se generan en los tratamientos mencionados, al igual que en el análisis de virutas de las Tablas 3.16 y 3.17 donde el mecanizado de sus probetas genera salpicaduras bruscas de virutas y algunas virutas continuas interfieren en el mecanizado de los ejes, lo cual dificulta el desarrollo normal del experimento y se generan riesgos operativos por la temperatura a la cual se desprende la viruta.

La variación de los parámetros de corte influye en las vibraciones generadas. Según las Figuras 3.10 y 3.11, se afirma que conforme aumenta la velocidad de corte y velocidad de avance, la vibración tiende a aumentar en probetas sujetadas con mandril y sujetadas con mandril y contrapunto; mientras que según la Figura 3.12, conforme aumenta la profundidad de corte, la vibración aumenta para probetas sujetadas con mandril y contrapunto, mientras que en probetas sujetas solamente con mandril, la vibración disminuye de forma no significativa dado que los valores se dan en décimas de decibeles.

La longitud de la probeta influye en los resultados de los valores de vibración obtenidos de la experimentación. En las Figuras 3.10, 3.11 y 3.12, se verifica que la variación de la respuesta vibracional ante los cambios en los parámetros de mecanizado es más visible en las probetas 1, es decir, en las probetas de mayor longitud y que tienen dos puntos de contacto con el torno debido a su sujeción con el mandril y el contrapunto. Por tanto, el sistema presenta mayor perturbación cuando se mecanizan eje con mayor longitud. Por otro lado, al mecanizar ejes de longitud corta donde no es necesaria la sujeción con el contrapunto, el sistema no presenta variaciones altas en las respuestas vibratorias ante la modificación de los parámetros de mecanizado.

Las distintas condiciones de mecanizado producen distintas calidades superficiales, en este caso, se utilizó en ensayo de rugosidad para conocer el perfil superficial obtenido tras el mecanizado. En la Figura 3.13, se verifica que en el tratamiento 2 y 4 se obtienen los perfiles más rugosos, el factor común entre tratamientos es la velocidad de avance alta, mientras que en el tratamiento 1 y 3 la rugosidad es baja y el factor común es la velocidad de avance baja.

En el tratamiento 1 se presentan los valores de rugosidad mínimos del experimento y en referencia a la vibración, también presenta valores bajos parecidos a los del experimento 2. En relación con los resultados de vibración, en el tratamiento 4 se presentan las mayores vibraciones y las rugosidades más altas según lo indicado en las Figuras 3.9 y 3.13.

En búsqueda del tratamiento con menores perturbaciones y con un perfil con menores rugosidades, se plantean las condiciones del tratamiento 1 como óptimas para el mecanizado de un eje de transmisión, es decir, la velocidad de corte alta (2000 rpm), velocidad de avance baja (0.2 mm/r) y profundidad baja (1 mm). En las Figuras 3.9 y 3.13, se observa que tanto la vibración como el promedio de rugosidad es mínimo respecto a los demás tratamientos.

En el análisis del experimento, no se consideran solamente los datos cuantitativos, es decir, los datos numéricos del análisis de vibraciones y del ensayo de rugosidad, sino que es importante considerar las variables cualitativas que influyen también en los resultados obtenidos. Por ejemplo, el análisis de viruta contemplado en las Tablas 3.14, 3.15, 3.16 y 3.17 contempla la realidad de las virutas que se dispersan en el proceso y que a su vez salpican hacia el eje mecanizado. Es por tal motivo que se descarta el tratamiento 3 aunque también se obtienen rugosidades similares a las obtenidas en el tratamiento 1.

3.5 Recomendaciones

Para extender la vida útil del inserto de corte no se debe trabajar al límite máximo permisible establecido para el mismo, dado que las vibraciones aumentan y puede ocasionar un desgaste temprano de la herramienta.

Las probetas con mayor longitud son más susceptibles a combinaciones de parámetros de corte altos, es así como, en estas probetas se debe tener mayor cuidado al maquinar en el torno y en lo posible evitar trabajar en los límites máximos establecidos para la herramienta.

El análisis contempla probetas de acero para ejes de transmisión similares en propiedades químicas al acero ASTM A36. Sin embargo, se puede amplificar la investigación para conocer el comportamiento de los distintos materiales con diferentes contenidos de carbono ante la variación de los parámetros de corte. Se puede utilizar los mismos parámetros de mecanizado utilizados en la presente investigación para contrastar las diferentes respuestas obtenidas.

Se puede medir la rugosidad de la herramienta antes del mecanizado y posterior a este para comparar con las vibraciones generadas en el proceso y contrastar si existe una influencia directa con el desgaste de esta. También se puede agregar un amortiguamiento al sistema analizado para conocer la diferencia en los espectros de vibraciones obtenidos.

En el desarrollo del experimento, es recomendable tener claro los procedimientos a seguir y las variables a considerar para que no surjan resultados no deseados. En el caso específico de la medición de vibraciones, se busca tener un ambiente donde no exista ruido causado por factores externos y se evita la utilización de máquinas pesadas como la rectificadora o taladro que, en caso del laboratorio de Máquinas y herramientas, se encuentran cercanos. En resumen, se busca tener un escenario libre de distracciones o movimientos bruscos que ofusquen el progreso de la parte experimental.

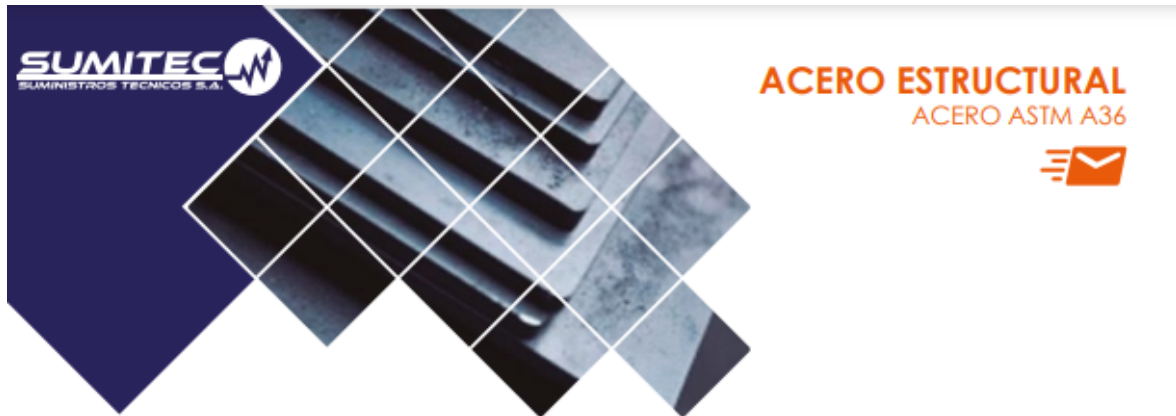
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAVA INGENIEROS. (2007). SVAN 958.
<https://www.grupoalava.com/ingenieros/productos/instrumentacion-y-ensayos/acustica-y-vibraciones/analizadores-de-acustica-y-vibraciones/analizadores-para-acustica-ambiental-y-arquitectonica/analizador-multicanal-svantek-svan958/>
- Al-Shayea, A., Abdullah, F. M., Noman, M. A., Kaid, H., & Abouel Nasr, E. (2020). Studying and Optimizing the Effect of Process Parameters on Machining Vibration in Turning Process of AISI 1040 Steel. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/5480614>
- Ambhore, N., Kamble, D., & Chinchankar, S. (2020). Evaluation of Cutting Tool Vibration and Surface Roughness in Hard Turning of AISI 52100 Steel: An Experimental and ANN Approach. *Journal of Vibration Engineering and Technologies*, 8(3), 455–462. <https://doi.org/10.1007/s42417-019-00136-x>
- Balasuadhakar, A., Kumaran, S. T., Kurniawan, R., & Ahmed, F. (2022). A COMPREHENSIVE REVIEW ON MINIMUM QUANTITY LUBRICATION IN TURNING PROCESS. In *Surface Review and Letters* (Vol. 29, Issue 8). World Scientific. <https://doi.org/10.1142/S0218625X22300088>
- Delgado, J. J., & López, A. M. (2020). *Estudio de la integridad superficial del acero AISI 420 maquinado mediante proceso de rectificado*. Escuela Politécnica Nacional.
- Dilma, D. E., & Lister, P. M. (2004). *On-line metal cutting tool condition monitoring-I: Force and vibration analyses*. <https://doi.org/10.1016>
- Escobar, E. (2023). *VERIFICACIÓN Y COMPROBACIÓN DE OPERACIONES Y PARÁMETROS DE CORTE ENTRE EL TORNEADO CONVENCIONAL Y EL TORNEADO CNC* [Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/24944>
- Gutiérrez, H., & De La Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos* (Segunda). McGraw-Hill Interamericana.
- Kalpakjian, S., Schmid, S. R., & Sekar, K. S. V. (2021). *Manufacturing engineering and technology*. Pearson Education Limited.
- Kishore, R., Choudhury, S. K., & Orta, K. (2018). On-line control of machine tool vibration in turning operation using electro-magneto rheological damper. *Journal of Manufacturing Processes*, 31, 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.11.015>
- Lescano, F. (2015). *Influencia de los parámetros de torneado sobre la microdureza superficial, rugosidad y fatiga por flexión rotativa del acero AISI/ASTM 4340*. Universidad Nacional de Trujillo.
- Mitutoyo. (2013). *Sistema de medición de rugosidad de superficies SURFTEST SJ-210* (Mitutoyo Corporation, Ed.).
- Montgomery, D. (2004). *Libro de Diseño y Análisis de Experimentos* (Segunda). GRUPO NORIEGA EDITORES.

- Núñez, J. C. (2019). *Caracterización de la calidad superficial de mecanizado en el proceso de cilindrado del torno ROMI C420*. Escuela Politécnica Nacional.
- Picho, L. (2019). *ESTUDIO DEL DESGASTE DE LA PLAQUITA CNMG 120408-PM 4325 EN FUNCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE MECANIZADO EN TORNEADO CNC* [Escuela Politécnica Nacional].
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20237?locale=de>
- PILMAN MAQUINARIA S.L. (n.d.). Torno AMUTIO HB 575. *PILMAN MAQUINARIA S.L.* Retrieved November 9, 2023, from www.pilmanmaquinaria.com
- Rao, S. S. (2012). *VIBRACIONES MECÁNICAS* (Quinta). PEARSON EDUCATION.
- Royo, J. A., Rabanaque, G., & Torres, F. (2018). *Análisis de vibraciones e interpretación de datos*. www.guemisa.com
- Serviacero. (2021). *HOJA TÉCNICA DEL ACERO AISI 1018*.
www.serviacero.com/especiales
- SUMITEC. (2020). *ACERO ESTRUCTURAL ASTM A36*. <https://www.sumiteccr.com>
- ANSI/ASME B46.1, Surface Texture (Surface Roughness, waviness and lay) (1985).
- UNE-ISO 2631-1. (2008). *Vibraciones y choques mecánicos*.
- Universidad del País Vasco. (2022). *Metrología del acabado superficial*.
https://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/745_ca.pdf
- Zamora, Y., Morales, Y., & Lastre, A. (2015). Predicción del desgaste del flanco de la herramienta de corte durante el torneado en seco de alta velocidad para piezas de acero AISI 316L en la industria minera. *Minería y Geología*, 31, 113–128.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223539558008>

5. ANEXOS

ANEXO I. Hoja técnica del acero ASTM A36



1. Descripción: Acero al carbono estructural conocido como hierro negro, de calidad estructural para el uso en puentes y edificaciones remachadas, atornilladas o soldadas.

2. Normas involucradas: ASTM A 36/A 36M - 04

3. Propiedades mecánicas: Esfuerzo a la fluencia mínimo: 250 MPa (36300 PSI)
Esfuerzo a la tensión: 400 – 550 MPa (58000 – 79800 PSI)
Elongación mínima en 50 mm (2"): 23%
Módulo de elasticidad 200 GPa (29000 KSI)

4. Propiedades físicas: Densidad 7.85 g/cm³ (0.284 lb/in³)

5. Propiedades químicas: 0.25 – 0.29 % C
0.60 – 1.20 % Mn
0.15 – 0.40 % Si
0.04 % P máx
0.05 % S máx

6. Usos: Para componentes estructurales en general.

7. Tratamientos térmicos: Usualmente a este material no se le da tratamiento térmico debido a que son parte estructural. Puede ser cementado para aumentar la dureza superficial mientras mantiene su núcleo tenaz.

NOTA:

Los valores expresados en las propiedades mecánicas y físicas corresponden a los valores promedio que se espera cumpla el material. Tales valores son para orientar a aquella persona que debe diseñar o construir algún componente o estructura pero en ningún momento se deben considerar como valores estrictamente exactos para su uso en el diseño.

(506) 2591-7514 ☎

(506) 2551-4169 📄

info.clientes@sumiteccr.com ✉



www.sumiteccr.com

SUMITEC
SUMINISTROS TÉCNICOS S.A.

ANEXO II. Hoja técnica del acero AISI 1018



HOJA TÉCNICA



→ AISI 1018

Equivalencia:	ASTM A 29/A29M - 16: 1018	DIN 1.1141		JIS S18C		
Composición Química:	%C	%Mn	%P	%S	----	----
	0.15 - 0.20	0.60 - 0.90	0.040 máx.	0.050 máx.	----	----
Condición de Suministro:	Recocido con una dureza estimada 126 HBN (~ 70 HRB) como estirado en frío (SAE J414a).					
Propiedades mecánicas (aprox. a temperatura ambiente):	Resistencia a la tensión MPa (Lb/in ²)	Límite elástico MPa (Lb/in ²)	% Elongación en 2.0"	Reducción de área %		
	440 (64,000)	370 (54,000)	15	40		

* Los valores señalados son estimados mínimos y en acabado de estirado en frío, no son mandatorios, y deben tomarse solo como referencia en las características generales de estos aceros (SAE J414a).

* Valores especiales deben ser consultados y acordados con el fabricante.

CARACTERÍSTICAS

- Acero de bajo carbono de excelente forjabilidad en caliente, buena formabilidad en frío y excelente soldabilidad.
- Su maquinabilidad es menor en comparación con los aceros de la serie 11 y 12; de acuerdo a SAE J414a, presenta una capacidad de maquinado del 70 % con respecto al acero 1212 AISI (referido como 100 %).
- Como acabado de laminado en caliente, sus propiedades mecánicas y dureza, están por debajo de las anteriormente señaladas.
- Como acabado de laminado en caliente, puede presentar defectos inherentes de laminación (proceso de conformado en caliente), tales como, grietas, traslapes, ovalamiento, picaduras, oxidación, etc.; mismos que de no eliminarse, pueden afectar el uso final del producto.
- Como acabado de estirado en frío (directo de la laminación en caliente), puede presentar los mismos defectos que como laminado en caliente, salvo en una menor profundidad; referirse la norma ASTM A108-13.
- Como pelado y enderezado, los defectos inherentes al proceso de laminación en caliente, pueden haberse eliminado, sin que esto sea una garantía, salvo que, de esta manera haya sido expresado y acordado.
- El proceso de estirado en frío, confiere un nivel de endurecimiento superficial, además de mejorar ligeramente su maquinabilidad.
- Acero no sujeto a endurecimiento por temple convencional por su bajo contenido de carbono (ver tratamiento térmico).

APLICACIONES

- Es empleado en la fabricación de partes mecánicas para las industrias metalmecánica, automotriz, construcción, entre otras, como tornillería, bujes, coples, elementos de sujeción (tensores para estructuras), flechas y partes donde se requiera desarrollar una dureza superficial vía tratamiento termoquímico de cementación o carbonitruración, contando con un núcleo suave y tenaz.
- Al ser empleado como anclaje de sujeción en la industria de la construcción u horquilla de sujeción en la industria de autotransportes, debe tomarse en consideración que el proceso de doblado en frío se haga de forma lenta, uniforme y en un solo evento, colocando como mandril guía de doblado una barra que tenga al menos dos veces el diámetro de la barra a ser doblada, de lo contrario, se corre el riesgo de generar fisuras o fracturas en la parte exterior del doblado.
- Puede sustituir al acero 12L14 AISI, siempre y cuando no se requiera la producción de altos volúmenes de fabricación, debido a su menor maquinabilidad.
- Puede sustituir al acero 1045 AISI en aplicaciones de menor esfuerzo mecánico, y donde no sea requerido endurecimiento total.

especiales@serviacero.com
www.serviacero.com/especiales

León: Tel. (477) 800 27 00
Guadalajara: Tel. (33) 3811 42 48
San Luis Potosí: Tel. (444) 821 17 00

Querétaro: Tel. (442) 210 22 90
Monterrey: Tel. (81) 4738 54 00
México: Tel. (55) 6379 05 11

1 de 2

TRATAMIENTO TÉRMICO (Recomendaciones generales)

RECOCIDO COMPLETO:

- Calentar a 885 °C y enfriar lento, preferentemente en horno a una velocidad no mayor de 25°C / h., hasta 650°C, y posteriormente al aire.

ENDURECIMIENTO

CEMENTACIÓN:

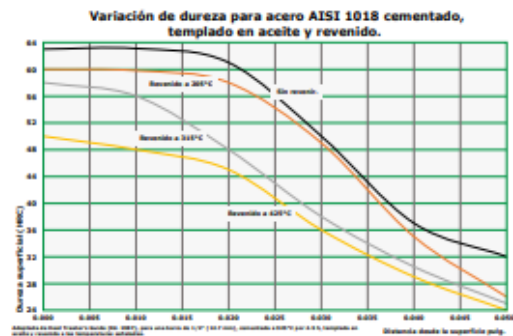
- Para el caso de la cementación, el acero deberá someterse a una atmósfera carburante (líquida, sólida o gaseosa) a una temperatura que varía entre 870 - 955 °C; el tiempo de permanencia, estará en función de la profundidad de capa deseada.

TEMPLE:

- Disminuya la temperatura a 845 °C (proceso de difusión) una vez terminado el tiempo de cementación, y enfrie directamente, preferentemente en aceite.

REVENIDO:

- El proceso de revenido es una práctica conveniente aun cuando se tenga una pérdida de dureza. Use la gráfica siguiente como una guía de la dureza resultante en función de la temperatura de revenido.



Los datos aquí proporcionados están basados en conocimientos actuales y tienen por objetivo dar una información y guía general, así como sus campos de aplicación; por lo que no se debe considerar sea una garantía de la funcionalidad en cualquier tipo de aplicación.

especiales@serviacero.com
www.serviacero.com/especiales

León: Tel. (477) 800 27 00
 Guadalajara: Tel. (33) 3811 42 48
 San Luis Potosí: Tel. (444) 821 17 00

Querétaro: Tel. (442) 210 22 90
 Monterrey: Tel. (81) 4738 54 00
 México: Tel. (55) 6379 05 11

ANEXO III. Ficha técnica del medidor SVAN 958

Especificaciones Técnicas:

Normativa	ISO 8041:2005, ISO 2631-1 y 2 e ISO 5349-1 y 2), ISO 10816 Conforme con el Real Decreto 1311:2005
Parámetros	RMS, VDV, MTVV, Pico, Pico-Pico, Max, Min, Historia temporal
Analizador (opcional)	Análisis en tiempo real en 4 canales en 1/1, 1/3 (resolución temporal de 10ms) o análisis FFT
Ponderaciones / Filtros	Wk, Wc, Wd, Wi, Wh, Wm, HPI, HP3, HPI0, Vel3, Vel10, VelMF, Dil1, Dil3, Dil10, KB Incluye todos los filtros necesarios para la medida de vibraciones mecánicas en el cuerpo humano (mano-brazo y cuerpo entero) de acuerdo con la ISO 2631-1 y 2 e ISO 5349-1 y 2
Detectores RMS y RMQ	Detectores RMS & RMQ digitales con detección de pico, resolución 0.1dB, Constante de tiempo: de 100 ms a 10 s
Acelerómetros (opcional)	SV 39/L acelerómetro para medidas de cuerpo completo SV 50 set para medidas de mano-brazo (incluido acelerómetro triaxial SV3023M2)
Rango de medida	0.003 m/s ² RMS= 1000 m/s ² Pico (con el acelerómetro para cuerpo entero SV 39A/L)
Nivel de ruido	Inferior a 0.1 mms ⁻² RMS con ponderación Wm

Información General:

Entrada	14 canales (1-3: conector Lemo 4 pines; 4: conector TNC) con alimentación IEPE para acelerómetros o preamplificadores de micrófono
Rango dinámico	100 dB, 4 conversor A/D de 20 bits
Rango de frecuencia	0.5 Hz a 20 kHz (dependiendo de los transductores de entrada), frecuencia de muestreo: 51.2 kHz
Pantalla	LCD 97 x 32 píxels e iconos retroiluminados
Interfaz	32MB ó 64MB (opcional) no volátil (flash)
Memoria	USB I.I, salida analógica AC I Vpico
Alimentación	Interna: 4 pilas AA , duración > 8h (pilas alcalinas) Externa: pack de batería SA17A, duración >16h (opcional) Alimentación externa: 6-24V DC (1.5W)
Condiciones Ambientales	Temperatura: -10°C hasta 50°C Humedad: hasta 90% HR, sin condensación
Dimensiones	140 x 82 x 42 mm (sin transductores)
Peso	Aproximadamente 500 gramos con pilas

ANEXO IV. Especificaciones del medidor de rugosidad

Type of detector	Standard drive unit type		Retractable drive unit type	Transverse tracing drive unit type
Model No.	SJ-210 (0.75mN type)		SJ-210 (4mN type)	SJ-210 (4mN type)
Order No.	178-561-01A		178-561-02A	178-563-02A
Measuring range	X axis	69" (17.5mm)		22" (5.6mm)
	Z axis (Detector)	14200 μm (-7900μm~+6300μm) / 360μm (-200μm ~ +160μm)		
Measuring speed	Measuring: 0.01, 0.02, 0.03 in/s (0.25mm/s, 0.5mm/s, 0.75mm/s) Returning: 1mm/s			
Measuring force / Stylus tip	0.75mN type: 0.75mN / 2μmR 60°, 4mN type: 4mN / 5μmR 90°			
Skid force	Less than 400mN			
Applicable standards	JIS '82 / JIS '94 / JIS '01 / ISO '97 / ANSI / VDA			
Assessed profiles	Primary profile / Roughness profile / DF profile / Roughness profile-Motif			
Evaluation parameters	Ra, Rc, Ry, Rz, Rq, Rt, Rmax, Rp, Rv, R3z, Rsk, Rku, Rq, Rpm, Rsm, Rmax, Rz1max, S, HSC, RzJIS, Rppl, RDa, RΔq, Rlr, Rmr, Rm(c), R Δ c, Rk, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2, A1, A2, Vo, Rpm, tp, Htp, R, Rx, AR, Possible Customize			
Analysis graphs	Bearing area curve / Amplitude distribution curve			
Filters	Gaussian, 2CR75, PC75			
Cut off length	λ c	0.003, 0.01, 0.03, 0.1 * (0.08, 0.25, 0.8, 2.5mm)		
	λ s	100, 300μm (2.5, 8μm) or none		
Sampling length	0.003, 0.01, 0.03, .1 * (0.08, 0.25, 0.8, 2.5mm)			
Number of Sampling lengths (xn)	x1, x2, x3, x4, x5, x6, x7, x8, x9, x10, Arbitrary 0.01~.63* (.0001* interval) [(0.3~16.0mm: 0.01mm interval)]			x1, x2, x3, x4, x5, x6, x7, x8, x9, x10, Arbitrary .0118 ~ .22* (.0001* Interval) [(0.3 ~ 5.6mm: 0.01mm Interval)]
LCD dimensions	1.45 x 1.93" (36.7x48.9 mm)			
Display languages	Japanese, English, German, French, Italian, Spanish, Portuguese, Korean, Traditional Chinese, Simplified Chinese, Czech, Polish, Hungarian, Turkish, Swedish, Dutch			
Calculation result display	Vertical display: 1 parameter / 3 parameter / trace to measurements Horizontal display: 1 parameter / 4 parameter / trace to measurements (Horizontal display is invertable)			
Printing function ^{*1} (Dedicated printer is required separately.)	Measurement conditions / Calculation results / Calculation results for each sampling length / Assessed profile / Bearing area curve / Amplitude distribution curve / Environment setting information			
External I/O	USB I/F, Digimatic Output, Printer Output, RS-232C I/F, Foot SW I/F			
Customization	Desired parameters can be selected for calculation and display			
GO/NG judgment ^{*2}	By max value / 16% / Standard deviation			
Storage of measurement condition	Save the conditions at power OFF			
Functions	Internal memory: Measurement condition (10sets), Measured profile (1set) Memory card (Option): 500 measurement conditions, 10000 measured profiles, 500 display images Text file (Measurement conditions / Measured profile / Assessed profile / Bearing area curve / Amplitude distribution curve)			
Storage				
Calibration	Saves last inputted nominal value of specimen / Average calibration with multiple measurement (Max.5 times) is available			
Power-saving function	Auto-sleep off function (10-600sec) ^{*3}			
Power supply	Two-way power supply: battery (rechargeable Ni-MH battery) and AC adapter *Charging time: about 4 hours (may vary due to ambient temperature) *Endurance: about 1000 measurements (differs slightly due to use conditions / environment)			
Size (WxDxH)	Display unit	2.05 x 2.6" x 6.3" (52.1x65.8x160mm)		
	Drive unit	4.5 x .9 x 1.02" (115x23x26mm)		
Mass	About 1.1lbs (500g) (Display unit + Drive unit + Standard detector)			
Standard accessories	12BAA303 Connecting cable ^{*4} 178-602 Roughness specimen (Ra 3.00μm) 12BAK699 Carrying case 12BAK700 Calibration stage 12BAK820 Protective sheets for display AC Adapter Operation manual Quick reference manual Warranty			12BAA303 Connecting cable ^{*4} 178-606 Roughness specimen (Ra 1.00μm) 12AAE643 Point-contact adapter 12AAE644 V-type adapter 12BAK699 Carrying case 12BAK700 Calibration stage 12BAK820 Protective sheets for display AC Adapter, Operation manual Quick reference manual, Warranty

*1: Order the SJ-210 printer (No.178-421A, optional accessory) separately.

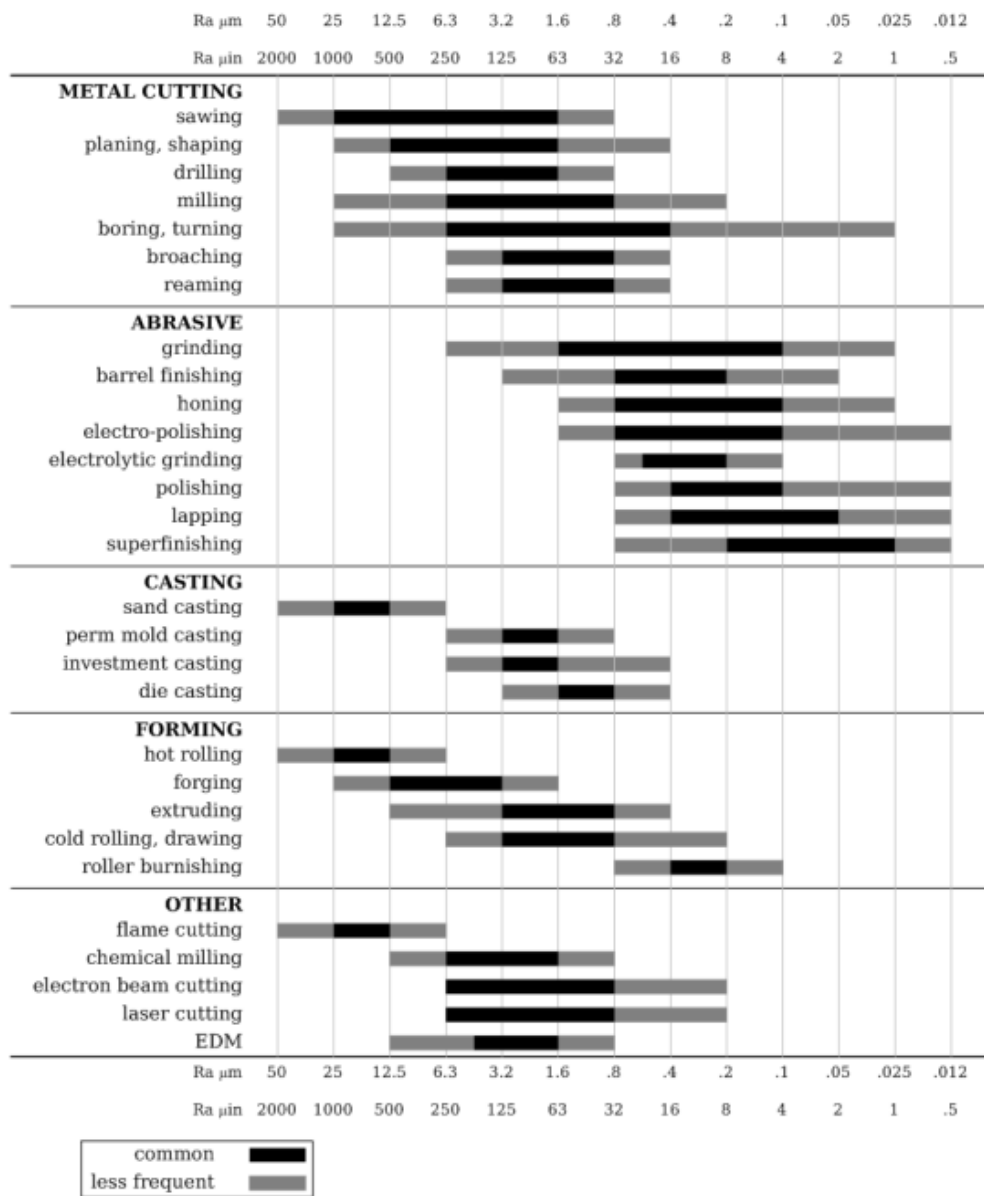
See page 10 for details about the SJ-210 printer.

*2: Standard deviation only can be selected in ANSI. 16% rule cannot be selected in VDA.

*3: Auto-sleep function is invalid when AC adaptor is used.

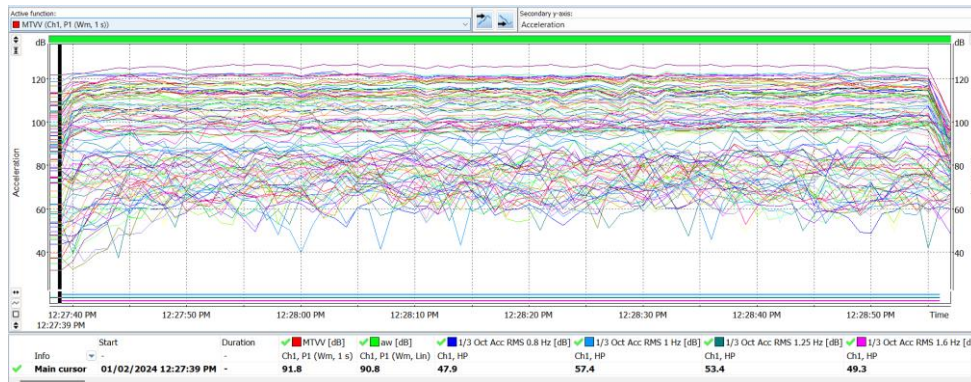
*4: For connecting the calculation display unit and drive unit.

ANEXO V. Estándar de la rugosidad según el proceso de manufactura (Universidad del País Vasco, 2022)

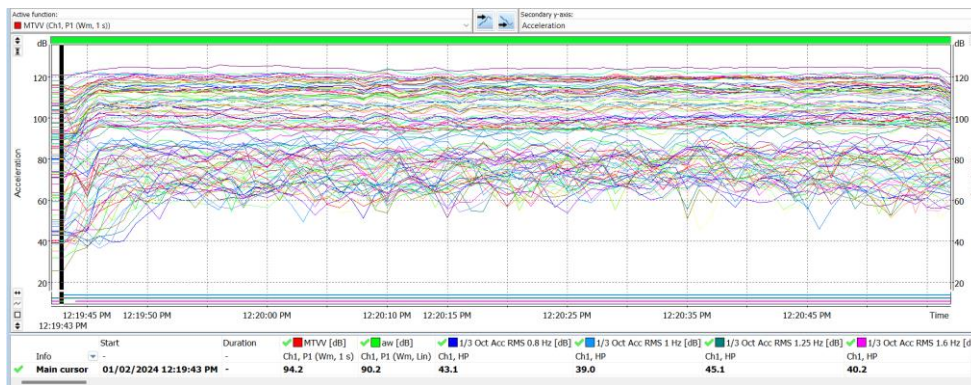


ANEXO VI. Espectros de vibración de las probetas de la experimentación

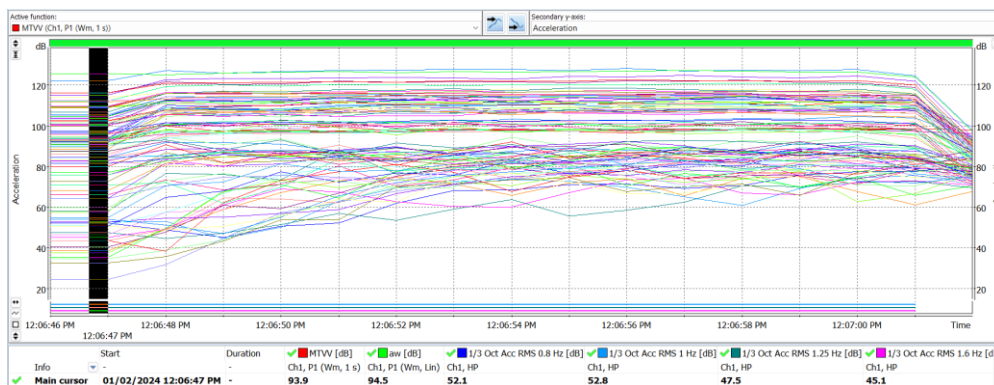
Espectro de vibración para E2T1P1



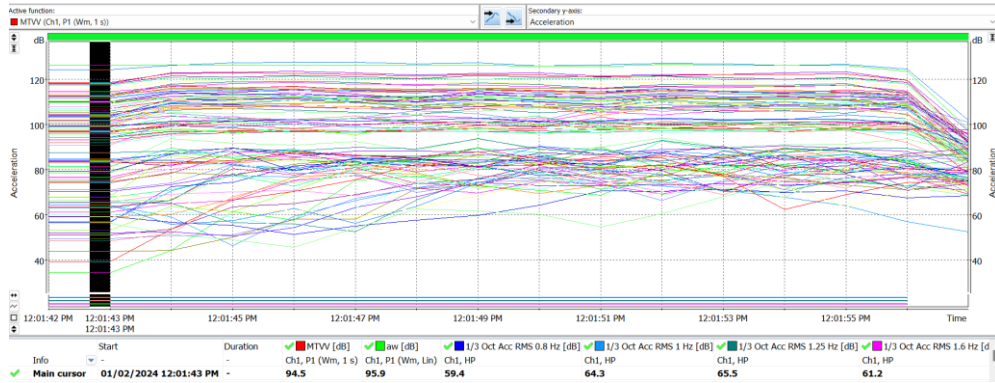
Espectro de vibración para E3T1P1



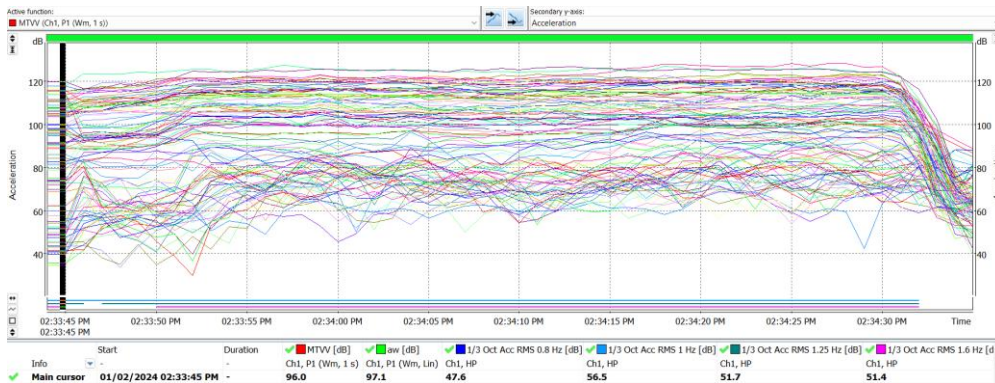
Espectro de vibración para E1T1P2



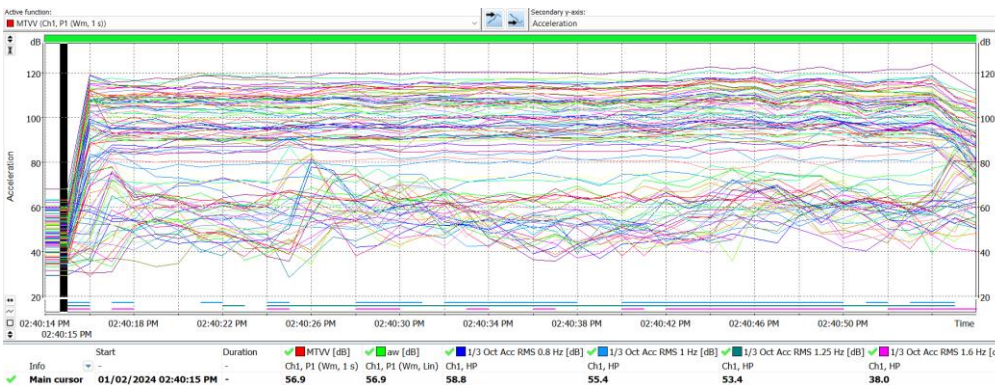
Espectro de vibración para E2T1P2



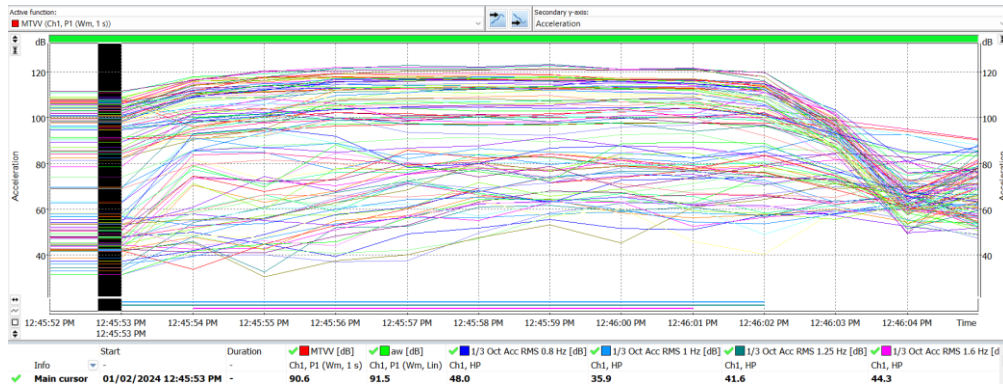
Espectro de vibración para E1T2P1



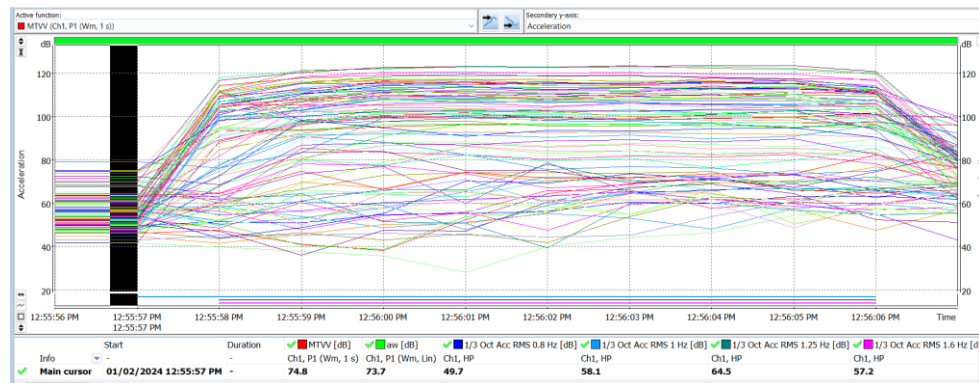
Espectro de vibración para E3T2P1



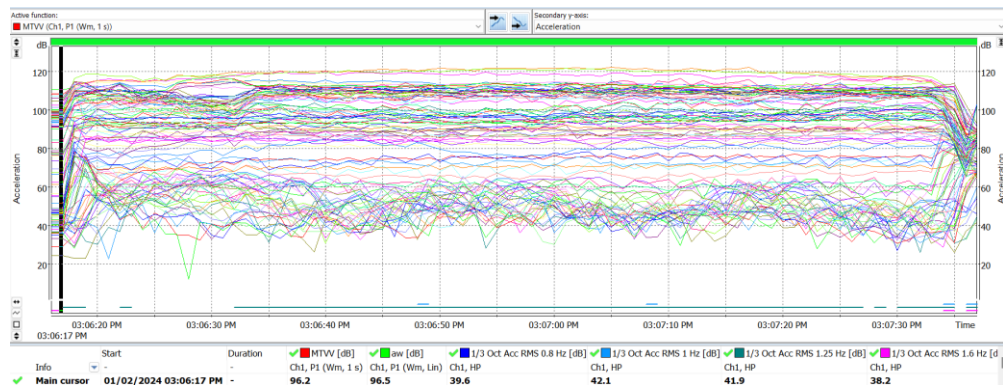
Espectro de vibración para E1T2P2



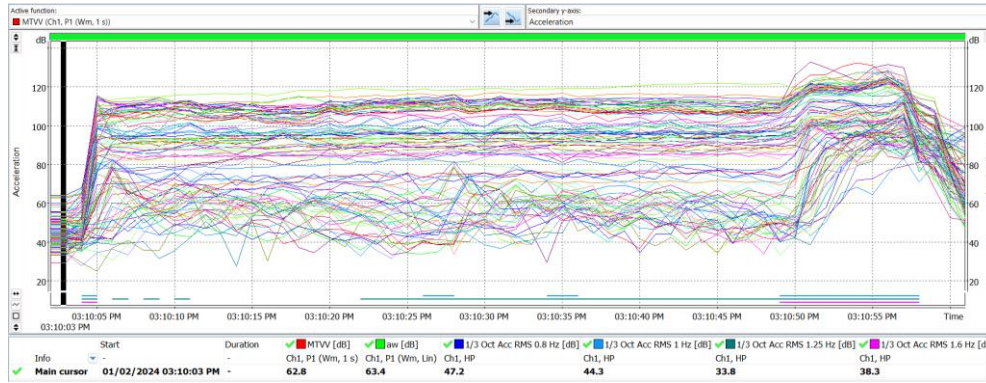
Espectro de vibración para E3T2P2



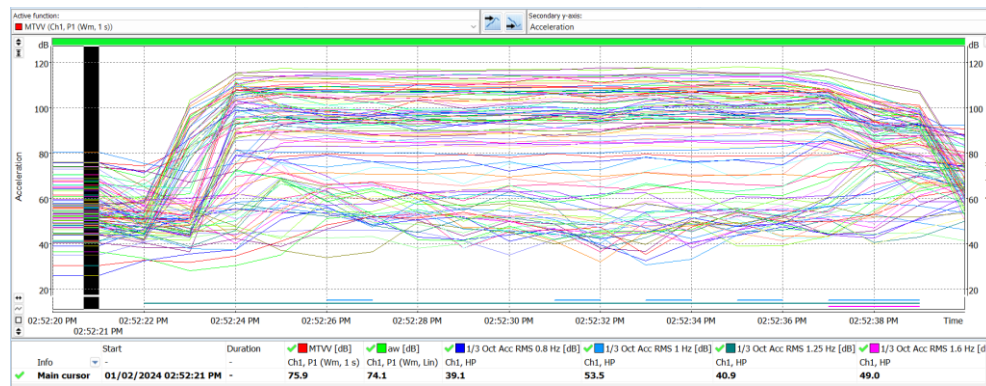
Espectro de vibración para E2T3P1



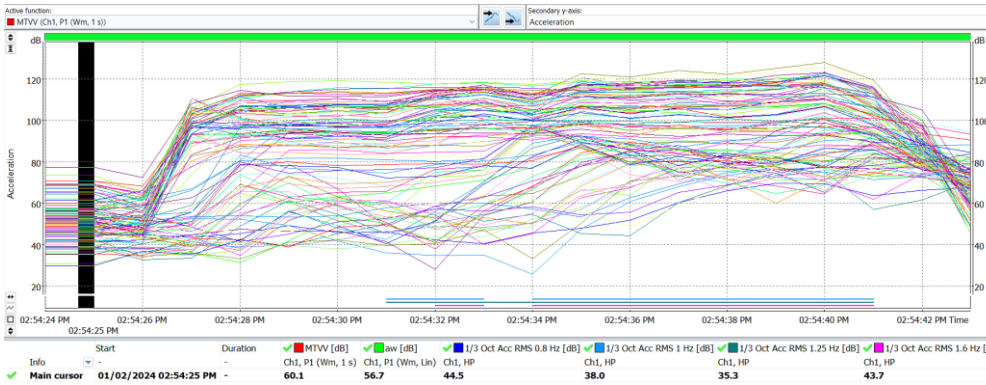
Espectro de vibración para E3T3P1



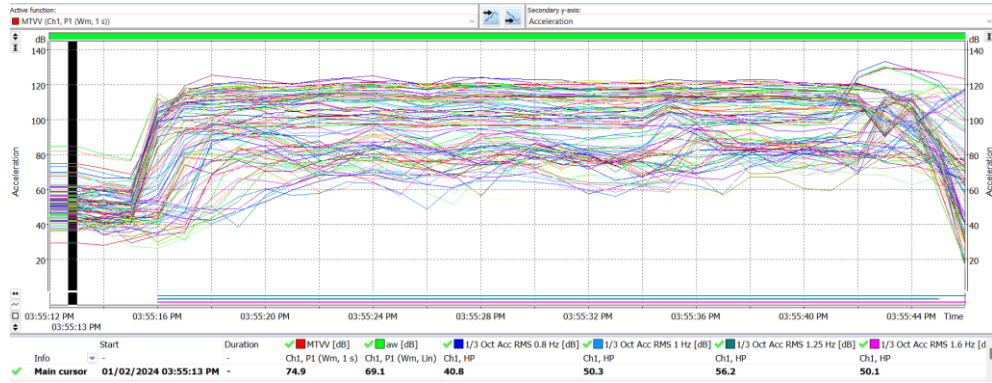
Espectro de vibración para E2T3P2



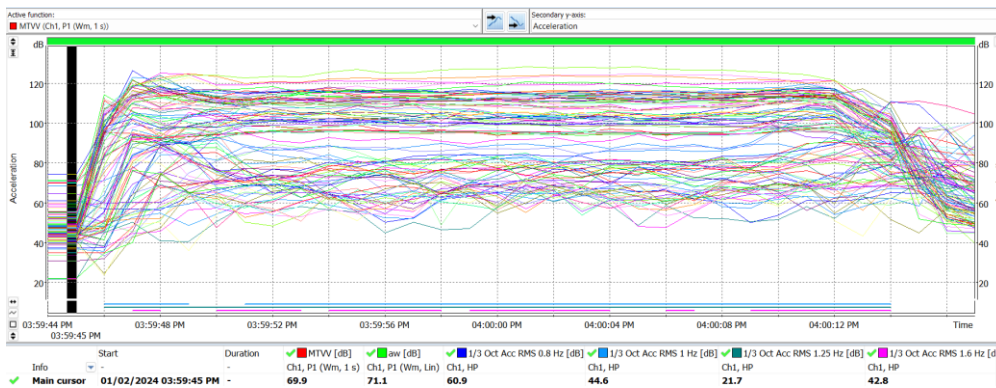
Espectro de vibración para E3T3P2



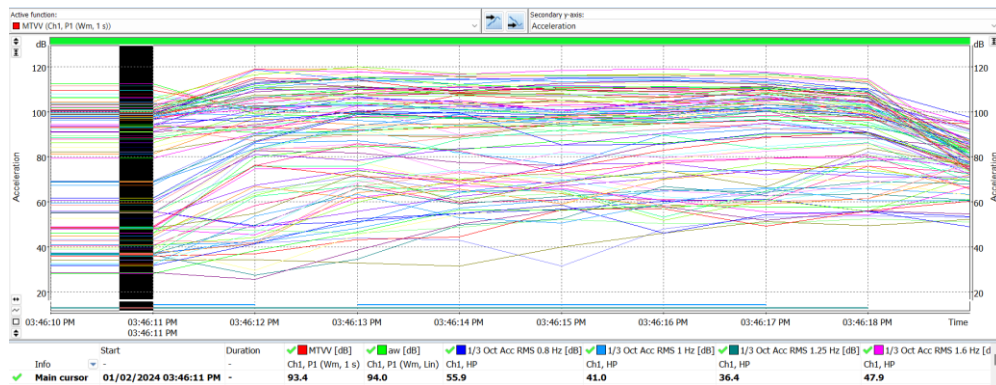
Espectro de vibración para E2T4P1



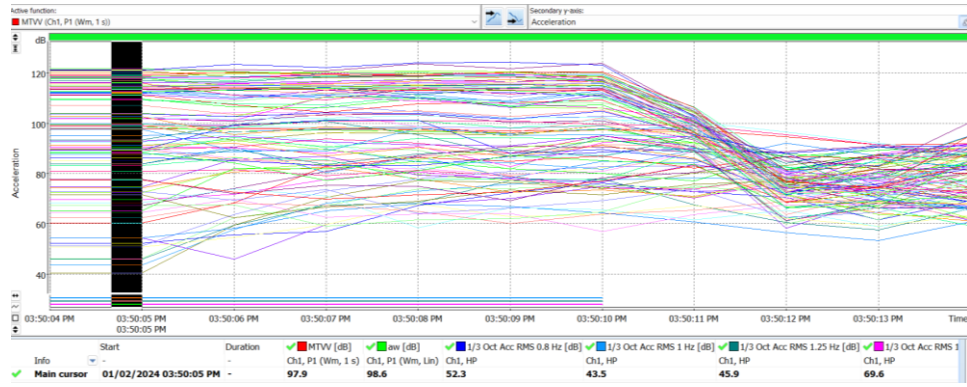
Espectro de vibración para E3T4P1



Espectro de vibración para E2T4P2



Espectro de vibración para E3T4P2



ANEXO VII. Rugosidad promedio Ra obtenida del ensayo de rugosidad

Probeta	Posición de medición	Zona de medición	R1 [μm]	R2 [μm]	R3 [μm]	R4 [μm]	Ra promedio [μm]
E1T1P1	3cm	Inicio	1.564	1.464	1.726	1.688	1.611
E1T1P1	28cm	Final	2.265	1.818	1.655	1.875	1.903
E2T1P1	3cm	Inicio	1.956	1.762	1.676	1.792	1.797
E2T1P1	28cm	Final	1.881	2.127	2.21	2.092	2.078
E3T1P1	3cm	Inicio	1.656	1.773	1.64	1.854	1.731
E3T1P1	28cm	Final	1.84	1.861	2.006	1.931	1.910
E1T1P2	1cm	Inicio	2.315	1.94	2.025	1.589	1.967
E1T1P2	4cm	Final	2.125	1.956	2.139	2.026	2.062
E2T1P2	1cm	Inicio	2.187	1.921	2.036	1.89	2.009
E2T1P2	4cm	Final	2.146	1.964	2.312	1.742	2.041
E3T1P2	1cm	Inicio	1.754	2.049	1.682	1.626	1.778
E3T1P2	4cm	Final	1.863	2.373	2.139	1.974	2.087
E1T2P1	3cm	Inicio	6.046	6.281	6.29	6.212	6.207
E1T2P1	15cm	Centro	4.386	4.224	4.144	4.3	4.264
E1T2P1	28cm	Final	4.85	4.78	5.007	4.811	4.862
E2T2P1	3cm	Inicio	5.679	5.943	6.155	5.929	5.927
E2T2P1	15cm	Centro	4.452	5	4.972	4.607	4.758
E2T2P1	28cm	Final	5.385	5.249	5.439	5.638	5.428
E3T2P1	3cm	Inicio	5.422	5.803	5.841	5.677	5.686
E3T2P1	15cm	Centro	5.264	5.289	5.284	5.08	5.229
E3T2P1	28cm	Final	5.307	5.725	5.53	5.519	5.520
E1T2P2	1cm	Inicio	5.724	5.569	5.881	5.824	5.750
E1T2P2	2.5cm	Centro	4.032	3.821	3.934	3.289	3.769
E1T2P2	4cm	Final	3.943	3.884	4.56	4.599	4.247
E2T2P2	1cm	Inicio	5.003	4.604	5.367	5.146	5.030
E2T2P2	2.5cm	Centro	4.414	4.354	4.6	4.913	4.570
E2T2P2	4cm	Final	5.093	4.916	5.182	4.627	4.955
E3T2P2	1cm	Inicio	5.389	5.603	5.307	5.408	5.427
E3T2P2	2.5cm	Centro	4.271	4.557	4.555	4.421	4.451
E3T2P2	4cm	Final	4.768	4.871	4.92	4.777	4.834
E1T3P1	3cm	Inicio	2.089	1.996	1.985	1.982	2.013
E1T3P1	28cm	Final	2.328	2.458	2.369	2.534	2.422
E2T3P1	3cm	Inicio	2.168	2.205	2.161	2.22	2.189
E2T3P1	28cm	Final	2.133	2.078	2.421	2.152	2.196
E3T3P1	3cm	Inicio	2.1	2.291	2.149	2.095	2.159
E3T3P1	28cm	Final	4.602	3.136	2.354	2.306	3.100
E1T3P2	1cm	Inicio	2.242	2.02	1.91	2.02	2.048
E1T3P2	4cm	Final	2.296	2.048	2.248	2.07	2.166
E2T3P2	1cm	Inicio	2.376	2.496	2.769	2.604	2.561
E2T3P2	4cm	Final	2.281	1.936	1.943	2.013	2.043
E3T3P2	1cm	Inicio	2.039	1.855	1.695	1.803	1.848
E3T3P2	4cm	Final	2.012	2.436	2.209	2.415	2.268

E1T4P1	3cm	Inicio	5.913	5.833	5.856	5.862	5.866
E1T4P1	28cm	Final	4.853	4.844	5.088	4.898	4.921
E2T4P1	3cm	Inicio	5.638	6.123	5.688	5.993	5.861
E2T4P1	28cm	Final	5.648	5.625	5.674	4.907	5.464
E3T4P1	3cm	Inicio	5.695	5.862	5.875	5.859	5.823
E3T4P1	28cm	Final	5.464	5.422	5.381	5.42	5.422
E1T4P2	1cm	Inicio	4.078	3.91	4.481	4.393	4.216
E1T4P2	4cm	Final	4.856	4.506	4.345	3.976	4.421
E2T4P2	1cm	Inicio	4.665	4.365	5.18	5.13	4.835
E2T4P2	4cm	Final	4.87	4.895	4.948	4.827	4.885
E3T4P2	1cm	Inicio	4.858	5.361	5.189	6.097	5.376
E3T4P2	4cm	Final	5.432	5.436	5.343	5.447	5.415