



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

**“Estudio de maquinabilidad y propiedades mecánicas de la
resina Sika Block LAB 920 para aplicaciones de fabricación con
fresado”**

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

**MAGÍSTER EN INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN DE LA
MANUFACTURA**

Presentada por:

Julio David Saquinga Daquilema

Santiago Vinicio Rojas Meza

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2025

TRIBUNAL DE TITULACIÓN

**Delgado Plaza Emérita Alexandra,
PhD.**

Profesor de Materia

**Maldonado Galarza Fausto
Andrés, MSc.**

Tutor de proyecto

DECLARACIÓN EXPRESA

Nosotros Santiago Vinicio Rojas Meza y Julio David Saquina Daquilema acordamos y reconocemos que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autores/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se

realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la
ESPOL.

Guayaquil, 20 de agosto del 2025.

Santiago Vinicio Rojas
Meza

Julio David Saquina
Daquilema

DEDICATORIA

Este triunfo se lo dedico directamente a Dios mi padre en el cielo que me ha permitido conocer su palabra para poder ser el ser humano que siempre he querido y que ahora por su infinita gracia todos y cada uno de los sueños que tenía desde niño se me han cumplido, a mi amada y adorada esposa a mis hijas y a mi hijo que sin su apoyo nada sería posible y son el pilar fundamental de mi vida y por supuesto a mi madre y mi padre que son mi inspiración.

Y, además un profundo agradecimiento al docente tutor del presente trabajo de titulación Fausto Maldonado Galarza MSc. por su apoyo y colaboración que han sido de gran ayuda y desarrollo profesional para mi persona.

Santiago Rojas.

RESUMEN

El presente proyecto de titulación consistió en el estudio del desempeño para manufactura de la resina SIKA Block LAB 920 por medio de la obtención del índice de maquinabilidad y esfuerzo-deformación del material. El índice de maquinabilidad es una medida que nos permite determinar la predisposición de un material a ser maquinado con el uso de herramientas de corte, por otro lado, con la gráfica esfuerzo deformación se pueden obtener algunas características sobre el comportamiento del material cuando es sometido a diferentes esfuerzos.

Por lo tanto, el objetivo del proyecto es determinar el índice de maquinabilidad del producto y algunas de sus propiedades mecánicas, para que, con estas características se pueda proyectar la aplicación final más adecuada, garantizando su correcta comercialización industrial.

Para esto, se desarrolló una metodología experimental que permitió el estudio del material proporcionado por la empresa SIKA. Este proceso consistió en evaluar diferentes estrategias de corte en probetas de la resina, para luego, ensayarlas a tracción bajo la norma ASTM D638 correspondiente a plásticos. Luego de mecanizar las probetas se midió rugosidad superficial y tiempo de corte, valores que permitieron analizar las estrategias de corte aplicadas y calcular el índice de maquinabilidad. Con el ensayo de tracción de las probetas maquinadas se obtuvo la gráfica esfuerzo-deformación, con la que se proyectó el comportamiento del material y se caracterizó como frágil o dúctil. Adicionalmente, se observó la influencia de los procesos de corte en su comportamiento mecánico.

Finalmente, realizado todos las mediciones y ensayos, se procedió a un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos, llegando a la conclusión que el material es maquinable, además, se obtuvieron propiedades mecánicas con valores importantes que caracterizan este material para su aplicación final en industria.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1	1
1. GENERALIDADES	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Problema.....	1
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Específicos	2
1.4 Justificación	2
CAPÍTULO 2	4
2. METODOLOGÍA APLICADA PARA RESOLVER EL PROBLEMA PROPUESTO	4
2.1 Resina Sika Block Lab 920	6
2.2 Proceso de mecanizado de resinas y polímeros	6
2.3 Parámetros de corte para polímeros y resinas	7
2.4 Herramientas de corte para mecanizado de polímeros y resinas	9
2.5 Fresado en plásticos.....	12
2.5.1 Los fundamentos: fresado CNC para piezas de plástico	13
2.6 Curva esfuerzo-deformación	16
2.6.1 Comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales poliméricos	17
2.7 Ensayo de tracción	18
2.8 Índice de maquinabilidad.....	20
2.8.1 Métodos para determinar el índice de maquinabilidad	21
• Basado en la velocidad de corte crítica.....	21
• Basado en la fuerza de corte	22

• Basado en el acabado superficial	22
• Basado en el desgaste de la herramienta	22
• Basado en la fuerza específica de corte, rugosidad y coeficientes de ponderación	23
• Índice de maquinabilidad en polímeros y resinas	25
2.9 Relación entre el acabado superficial y los parámetros de corte en el fresado de polímeros	26
• Velocidad de avance y acabado superficial	26
• Velocidad de corte y acabado superficial	26
• Profundidad de pasada y acabado superficial	26
2.10 Rugosidad	27
2.10.1 Rugosidad en polímeros	27
CAPÍTULO 3	28
3. RESULTADOS	28
3.1 Obtención de probetas para ensayos	28
3.2 Identificación de probetas	29
3.3 Probetas para ensayo de tracción	31
3.3.1 Geometría de probetas para ensayo de tracción	32
3.4 Ensayo de maquinabilidad	34
• Equipo utilizado	35
• Herramientas de corte	36
• Estrategias de mecanizado	36
• Dimensiones de la probeta	37
• Parámetros de corte	38
• Programación trayectorias de corte	39
• Postprocesado	41
• Mecanizado CNC	42

3.5	Ensayo de rugosidad.....	42
•	Equipo para ensayo de rugosidad	43
3.5.1	Cálculo del índice de maquinabilidad según la rugosidad.	45
3.5.2	Datos obtenidos de la medición de rugosidad en probetas	60
•	Estrategia espiral.....	60
•	Estrategia unidireccional.....	62
•	Datos en función de la velocidad de 200 m/min.....	66
•	Datos en función de la velocidad de 300 m/min.....	68
•	Datos en función de la velocidad de 400 m/min.....	70
3.5.3	Tabulación de la rugosidad del material en función de la velocidad y la estrategia de mecanizado	72
•	Estrategia unidireccional.....	72
•	Estrategia espiral.....	73
3.5.4	Discusión de resultados obtenidos de rugosidad	74
3.6	Ensayo de tracción.....	75
•	Parámetros ensayo de tracción	75
3.6.1	Máquina de ensayo.....	75
3.6.2	Proceso de ensayo de tracción	77
3.6.3	Diagrama esfuerzo deformación	79
3.6.4	Discusión de resultados obtenidos del ensayo de tracción.....	89
3.7	Tiempo de mecanizado	89
3.7.1	Estrategia espiral	90
3.7.2	Estrategia unidireccional.	92
CAPÍTULO 4		96
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
4.1	Conclusiones	96

4.2	Recomendaciones	97
-----	-----------------------	----

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

Las resinas han encontrado una amplia gama de aplicaciones en la industria debido a su versatilidad, propiedades mecánicas, y facilidad de procesamiento. Estas incluyen su uso en la fabricación de piezas estructurales, componentes eléctricos, recubrimientos, adhesivos, y prototipos industriales, entre otros. Este proyecto busca analizar dos aspectos clave relacionados con el uso de resinas en la industria: su maquinabilidad y sus propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas, como resistencia a la tracción, dureza y módulo elástico determinan la utilidad de las resinas en aplicaciones que requieren cargas mecánicas o condiciones de trabajo. Estas propiedades dependen en gran medida de la composición química, los posibles aditivos utilizados en sus aplicaciones. En investigaciones previas publicadas por Fausto Maldonado ha determinado que las propiedades mecánicas de las resinas pueden ser modificadas para cumplir con requerimientos específicos, pero estas modificaciones también afectan su maquinabilidad. (Santos, 2021)

La maquinabilidad de la resina Sika Block LAB 920 tiene la facilidad que permita ser cortado, perforado o moldeado para cumplir con requerimientos de geometría y funcionalidad. En el caso de las resinas, el comportamiento durante el maquinado puede ser muy distinto al del acero u otros metales debido a su naturaleza. Factores como el calor generado durante el maquinado, el desgaste de herramientas, y la generación de rebabas no deseadas se convierten en problemas a solucionar.

1.2 Problema.

En el campo industrial, las resinas poliméricas han demostrado ser materiales muy utilizados debido a sus propiedades; físicas, mecánicas, baja densidad, y adaptabilidad a diversas aplicaciones industriales. Sin embargo, persiste un rango de desconocimiento en cuanto a la afectación y modificación de sus propiedades mecánicas y su comportamiento durante los procesos de mecanizado. Estas incertidumbres limitan la adecuada utilización en sectores donde la precisión, la eficiencia productiva y el costo son determinantes.

A partir de lo antes mencionado se procede a plantear la siguiente pregunta de hipótesis.

¿Cómo se puede determinar la relación entre las propiedades mecánicas y la maquinabilidad de una resina en su desempeño y optimización para aplicaciones industriales y procesos productivos específicos?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Determinar la maquinabilidad de una resina para aplicaciones industriales mediante la evaluación de sus propiedades mecánicas y de maquinabilidad bajo diversos procesos y estrategias de mecanizado, garantizando un alto rendimiento en condiciones de uso industrial.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Evaluar las propiedades mecánicas de la resina analizando el comportamiento ante diferentes procesos de mecanizado.
- Analizar el desempeño de la resina bajo condiciones de corte en distintos procesos de mecanizado, identificando parámetros óptimos de maquinabilidad para el mejoramiento del proceso.

1.4 Justificación

Actualmente la demanda de materiales con alto desempeño en aplicaciones industriales ha impulsado la investigación sobre nuevos compuestos y materiales que optimicen los procesos productivos. En este contexto, la resina Sika Block LAB 920 se ha convertido en una alternativa viable en la fabricación de modelos y prototipos industriales debido a sus propiedades mecánicas y su facilidad de mecanizado. Sin embargo, existe una limitada y baja cantidad de estudios que analicen su maquinabilidad y su comportamiento frente a diferentes condiciones de mecanizado.

En el presente estudio se permitirá evaluar cómo las propiedades mecánicas de la resina afectan su desempeño en procesos de manufactura, proporcionando datos relevantes para optimizar parámetros de corte, mejorar la precisión en el mecanizado y prolongar la vida útil de las herramientas utilizadas. Además, los resultados contribuirán al desarrollo de mejores estrategias de fabricación en sectores como el automotriz, la aeronáutica y la manufactura aditiva.

Desde una perspectiva académica y técnica, este trabajo aportará al conocimiento en procesos de manufactura, ofreciendo información valiosa para industrias y centros de investigación que buscan mejorar la eficiencia y calidad en la producción de piezas con este tipo de resinas. Los hallazgos podrán servir de base para futuras investigaciones sobre materiales alternativos y su comportamiento en diferentes procesos productivos.

Un aspecto muy importante en el desarrollo del proyecto es alinear esta investigación con los desafíos globales de sostenibilidad e innovación. Al identificar qué ODS se ven impactados, es factible fortalecer el enfoque del estudio hacia la mejora de procesos productivos, hacerlos más eficientes y responsables ambientalmente, así se promueve

el uso adecuado de materiales, y se reduce el impacto ambiental. Algunos de estos objetivos permiten evidenciar su contribución al desarrollo de tecnologías avanzadas y sostenibles en la manufactura. De esta forma, la investigación no solo genera conocimiento técnico sobre la maquinabilidad de la resina, sino que también fomenta prácticas industriales que minimicen residuos, optimicen recursos y reduzcan la huella ambiental, así se garantiza el crecimiento responsable de la industria ecuatoriana.

Los objetivos de desarrollo sostenible para el proyecto son:

ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura

El proyecto contribuye al desarrollo de nuevos materiales y su optimización en procesos productivos, esto fortalece la infraestructura industrial y la innovación tecnológica.

También se mejora la eficiencia de fabricación mediante el análisis de maquinabilidad, permitiendo optimizar tiempos de producción y reducir desperdicios.

ODS 12: Producción y Consumo Responsables

La evaluación de la maquinabilidad y propiedades mecánicas de la resina se puede promover procesos productivos más eficientes y sostenibles, minimizando el uso de materiales contaminantes y la generación de residuos.

Al mejorar la comprensión del comportamiento de la resina en procesos industriales, se favorece el uso responsable de los recursos y se fomenta una economía circular en el sector manufacturero.

ODS 4: Educación de Calidad (Opcional, si hay enfoque académico o formativo)

Si el proyecto está vinculado con la formación de profesionales y estudiantes en manufactura avanzada, puede contribuir a la educación técnica y científica en el ámbito de la ingeniería y materiales.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA APLICADA PARA RESOLVER EL PROBLEMA PROPUESTO

Dado que el proyecto se refiere específicamente en evaluar las propiedades mecánicas y de maquinabilidad de una resina de aplicación industrial, la metodología debe basarse en la experimentación práctica. Esto incluye:

- La identificación de la resina a experimentar, esto permite conocer las características principales de este material y sus aplicaciones industriales específicas.
- Determinar los ensayos necesarios para caracterizar las propiedades mecánicas y la maquinabilidad de la resina.
- Preparación y fabricación de muestras y probetas estándar de la resina conforme normativa de ensayos, en este punto se debe garantizar la homogeneidad en el procesamiento para no incidir en los resultados finales.
- La recolección de datos deberá procesarse utilizando herramientas estadísticas que puedan identificar tendencias y correlaciones entre propiedades mecánicas y maquinabilidad.
- Al final se deberá Validar los resultados obtenidos e identificar el índice de maquinabilidad de la resina objeto de estudio

Para mayor detalle en la figura 2.1 se presenta el flujograma de la metodología aplicada y que se va a desarrollar durante el presente proyecto.

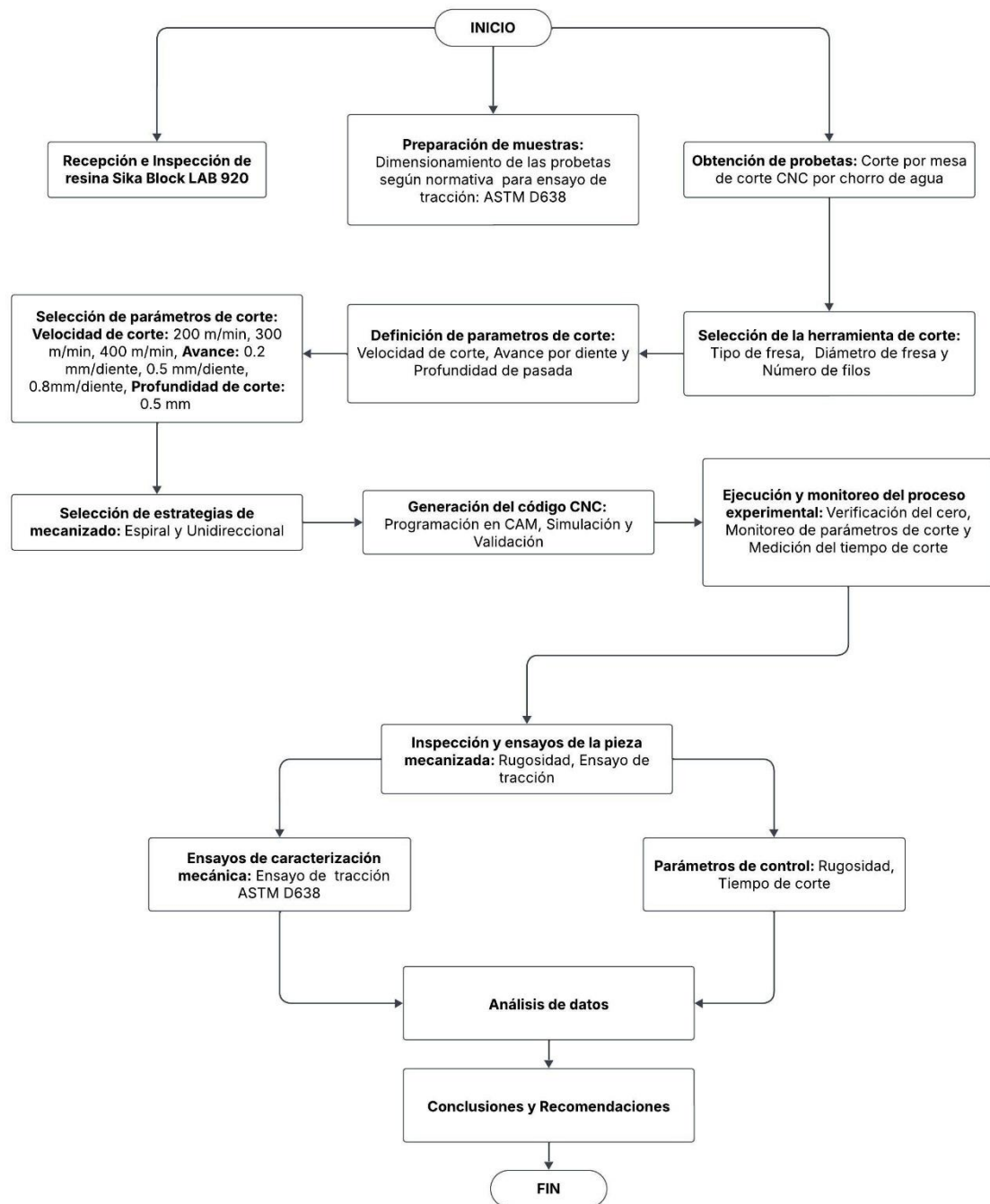


Figura 0-1 Flujograma de la metodología aplicada

Fuente: Autores.

2.1 Resina Sika Block Lab 920

La resina Sika Block LAB 920 es una resina tipo epoxi en forma de bloque, desarrollada por la multinacional Sika para aplicaciones en la fabricación de modelos y moldes. Las propiedades mecánicas de esta resina se detallan a continuación en la tabla 1.

Tabla 1
Propiedades físicas y mecánicas de la resina Sika Block Lab 920

PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA RESINA SIKABLOCK LAB 920		
PROPIEDAD	VALOR	NORMA
Dureza	1.9 g/cm ³ a 23° C	
Resistencia a la compresión	83	Escala SHORE D
Módulo de flexión	2200 MPa	ISO 178
Resistencia a la flexión	70 MPa	ISO 178
Resistencia al impacto (sin muesca)	40 KJ/m ²	ISO 179 EU
Temperatura de deflexión térmica	90° C	ISO 175 B
Temperatura de transición vítrea	92° C	ISO 11359
Coefficiente de expansión térmica lineal (cte.)	88 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹ En el rango de 10° C a 60° C	ISO 11359

Fuente: SIKABLOCK.

Una vez detallada las propiedades de la resina mencionada es importante detallar varias de las aplicaciones en las que se pretende usarla.

- Fabricación de modelos maestros.
- Producción de moldes para termoformado.
- Creación de herramientas para procesos de moldeo a baja presión.
- Desarrollo de prototipos y modelos de verificación.

Su estructura homogénea y fina permite un mecanizado preciso con bajas emisiones de polvo, siendo ideal para procesos de fresado CNC. Además, ofrece una alternativa técnica y económica frente a materiales tradicionales como la madera o el metal. (SIKABLOCK, 2023).

2.2 Proceso de mecanizado de resinas y polímeros

El mecanizado de resinas y polímeros es un proceso con mucha proyección en la manufactura de componentes utilizados en el área industrial, campos como la automotriz, aeroespacial y de moldes y prototipos, basan su desarrollo en la utilización de estos materiales.

A diferencia de los metales, los polímeros presentan desafíos particulares durante su mecanizado, como la generación de calor, la adhesión a la herramienta y la formación

de virutas irregulares. Entre los procesos más utilizados para trabajar estos materiales se encuentra el fresado CNC, que permite obtener geometrías complejas precisas con un adecuado control de la calidad superficial. La optimización de los parámetros de corte, como la velocidad de avance, la profundidad de pasada y el tipo de herramienta, es clave para mejorar la eficiencia y minimizar defectos en la pieza final.

Dado que es una resina nueva y con poca información se ha recabado datos de materiales similares y se ha llegado a obtener una metodología que se establece como la mejor para desarrollar el presente proyecto, esta metodología es presentada a continuación en la siguiente figura.

2.3 Parámetros de corte para polímeros y resinas

Los parámetros de corte para polímeros varían según el tipo de material, la máquina utilizada y la geometría de la herramienta. A continuación, (Mata & Davim, 2010) en la tabla 2 se presenta una guía general para fresado CNC de polímeros y en la tabla 3 se presenta los parámetros para fresado de resina, considerando factores clave como la velocidad de corte, el avance y la profundidad de pasada que son las variables más importantes para considerar en mecanizado de cualquier tipo de material.

Tabla 2
Parámetros de corte generales para polímeros en fresado CNC

PARÁMETROS DE CORTE GENERALES PARA POLÍMEROS EN FRESADO CNC			
MATERIAL	VELOCIDAD DE CORTE [m/min]	AVANCE POR DIENTE (FZF_Z) [mm/rev]	PROFUNDIDAD DE PASADA [mm]
Polietileno (PE)	300 - 600	0.05 - 0.2	1 - 5
Polipropileno (PP)	250 - 500	0.05 - 0.15	1 - 5
Poliamida (Nylon)	200 - 450	0.05 - 0.2	1 - 4
Polimetilmetacrilato (PMMA)	250 - 450	0.02 - 0.1	1 - 3
Policarbonato (PC)	200 - 400	0.02 - 0.1	1 - 3
Resinas Epóxicas	150 - 350	0.02 - 0.1	0.5 - 3
Resinas de Poliuretano	200 - 400	0.02 - 0.15	1 - 42

Fuente: (Mata & Davim, 2010)

Tabla 3
Parámetros de corte generales para resinas en fresado CNC

PARÁMETROS DE CORTE GENERALES PARA RESINAS EN FRESADO CNC		
PARÁMETRO	VALOR RECOMENDADO	OBSERVACIONES
Tipo de herramienta	Fresa de carburo de tungsteno	Preferible con recubrimiento para minimizar adhesión.
Diámetro de fresa (D)	3 - 12 mm	Depende del detalle del mecanizado.
Número de filos (Z)	2 - 4	Para un mejor control de la evacuación de virutas.
Velocidad de corte (Vc)	200 - 400 m/min	Ajustable según rigidez de la máquina y geometría de la pieza.
Velocidad del husillo (N)	8000 - 24000 rpm	Dependiendo del diámetro de la herramienta.
Avance por diente (fz)	0.02 - 0.08 mm/diente	Un avance bajo evita delaminación o quemado de la resina.
Avance por revolución (f)	0.04 - 0.15 mm/rev	Para un acabado superficial óptimo.
Profundidad de corte axial (ap)	0.5 - 3 mm	Ajustar según la rigidez de la pieza y la máquina.
Profundidad de corte radial (ae)	10 - 50% del diámetro de la herramienta	Para evitar sobrecarga de la herramienta.
Refrigeración	Aire comprimido o mínima cantidad de lubricante (MQL)	Evita sobrecalentamiento y acumulación de viruta.

Fuente: (Mata & Davim, 2010)

Los parámetros de mecanizado sirven como modelo para el proceso de fresado CNC y rigen cómo interactúa la máquina con los materiales plásticos. Estos parámetros garantizan que la pieza fresada refleje su diseño digital al tiempo que optimizan la eficiencia, minimizan el desperdicio y protegen las herramientas del desgaste innecesario. Básicamente, estos parámetros forman un puente que traduce las aspiraciones digitales en componentes plásticos tangibles y de alta calidad.

El campo parámetros de mecanizado en Fresado CNC para plásticos abarcan:

Velocidad de corte (Vc): Refleja el ritmo al que el filo de la herramienta se acopla con la pieza de trabajo de plástico. Generalmente expresada en metros por minuto (m/min), la velocidad adecuada varía según el tipo de plástico.

Velocidad del husillo (n): Indica la velocidad de rotación de la herramienta de fresado o cortador, a menudo medida en revoluciones por minuto (RPM). Se relaciona directamente con la velocidad de corte y el diámetro de la herramienta.

Velocidad de alimentación (f): Representa la velocidad a la que avanza el cortador a través del material plástico. Por lo general, se mide en milímetros por diente (mm/diente).

Profundidad de corte (ap): La profundidad a la que la herramienta penetra el plástico en una sola pasada.

Ancho de corte (ae): El ancho de encaje de la herramienta en la pieza de trabajo de plástico.

Tasa de flujo de refrigerante: Aunque los plásticos generan menos calor que los metales, controlar la temperatura con refrigerantes puede prolongar la vida útil de la herramienta y mejorar la calidad del acabado.

Refrigeración: Usar aire comprimido o lubricantes en polímeros con baja temperatura de fusión

Estrategia de ruta de herramienta: Esto dirige la ruta predeterminada que trazará la herramienta, influyendo tanto en el tiempo de mecanizado como en el acabado superficial final. (PRO-LEAN, 2023)

Tabla 4
Parámetros de mecanizado en fresado CNC para diversos plásticos

Tipo de plástico	Vel de corte (Vc) m/min	Vel del husillo (n) RPM	Vel de avance (f) mm/diente	Profundidad de corte (ap) mm	Ancho de Corte (ae) mm	Caudal de refrigerante ml/min	Estrategia de ruta de herramienta
ABS	200 - 500	4000 - 8000	0.02 - 0.04	02-May	01-Apr	50 - 150	Subida de fresado
Polycarbonato (PC)	100 - 300	2000 - 5000	0.01 - 0.03	01-Apr	0.5 - 2.5	100 - 200	Fresado convencional
OJEADA	80 - 250	1800 - 4800	0.02 - 0.04	02-May	01-Mar	50 - 150	Subida de fresado
Polietileno (PE)	100 - 400	2500 - 6000	0.03 - 0.05	03-Jul	01-Apr	40 - 120	Fresado convencional
PVC	50 - 250	1500 - 5000	0.02 - 0.04	02-Jun	01-Mar	60 - 160	Subida de fresado
PMMA (acrílico)	150 - 450	3500 - 7000	0.02 - 0.05	02-Jun	01-Apr	70 - 180	Fresado convencional
PTFE (teflón)	70 - 200	1600 - 4500	0.02 - 0.04	02-May	01-Mar	50 - 140	Subida de fresado
Nylon	100 - 350	2400 - 5800	0.03 - 0.05	03-Jul	01-Apr	40 - 130	Fresado convencional
HDPE	90 - 330	2200 - 5600	0.02 - 0.05	02-Jun	01-Apr	45 - 135	Subida de fresado
Polipropileno (PP)	110 - 370	2600 - 6200	0.03 - 0.05	03-Jul	01-Apr	50 - 140	Fresado convencional

Fuente: (PRO-LEAN, 2023)

2.4 Herramientas de corte para mecanizado de polímeros y resinas

El fresado CNC requiere herramientas específicas para garantizar precisión y eficiencia, y mitigar posibles daños materiales. Usar las herramientas correctas es crucial para lograr los resultados deseados. Exploreemos algunas de estas herramientas especializadas, comprendiendo sus funciones y beneficios en el proceso de fresado de plásticos. (PRO-LEAN, 2023)

Las fresas de ranura única, diseñadas específicamente para este propósito, garantizan que los plásticos no se derritan durante el proceso de fresado. El diseño único de estos molinos proporciona un equilibrio entre el fresado hacia arriba y hacia abajo, lo que promueve acabados más limpios. Por ello, son especialmente adecuados para plásticos blandos, evitando cualquier deformación del material durante el proceso. (PRO-LEAN, 2023)



Figura 0-2 Fresa de extremo de un solo canal

Fuente: (PRO-LEAN, 2023)

Los plásticos, especialmente los que lo son, presentan desafíos únicos. Las fresas de mango con corte de diamante, con sus bordes cortantes afilados, son ideales para estos materiales. Su diseño asegura cortes suaves, reduciendo la posibilidad de delaminación o deshilachado. Además, estas herramientas también pueden abordar plásticos más difíciles, que pueden ser abrasivos o duros.



Figura 0-3 Fresa de extremo con corte de diamante

Fuente: (PRO-LEAN, 2023)

Trabajar con plásticos laminados requiere una herramienta que pueda evitar que la capa superior se despegue. Las cortadoras de compresión, diseñadas con canales de corte hacia arriba y hacia abajo, son perfectas para esta función. Su diseño asegura que las fuerzas de corte se encuentren en el medio del material, preservando la integridad de la superficie en ambos lados del plástico laminado.



Figura 0-4 Cortadoras de compresor

Fuente: (PRO-LEAN, 2023)

Las fresas de punta esférica son la herramienta ideal para detalles intrincados o cuando se necesitan contornos suaves. Tienen una punta redondeada que permite realizar trabajos de precisión, especialmente en aplicaciones de fresado 3D. Esto los hace ideales para crear piezas de plástico detalladas que a menudo se requieren en industrias como la automotriz o la electrónica de consumo.



Figura 0-5 Fresas de punta esférica para fresado de plástico

Fuente: (PRO-LEAN, 2023)

A continuación, se detalla una tabla en la que nos presenta diversos tipos de fresado en diferentes materiales y además presenta el tipo de material y aplicaciones.

Tabla 5
Características de la herramienta para fresado CNC de plástico

TIPO DE FRESADO	OBJETIVO	MATERIAL	APLICACION
Fresas de extremo de una sola flauta	Eliminación eficiente de virutas	Plásticos blandos como PE, LDPE	Fresado general, carcasas de productos.
Fresas de corte de diamante	Fresado de material reforzado con fibra	Plásticos reforzados, PEEK	Componentes aeroespaciales y de automoción.
Cortadores de compresión	Fresado de plástico laminado	Hojas laminadas, PCB	Electrónica, señalización.
Fresas de punta esférica	Trabajo detallado, contornos suaves.	ABS, policarbonato	Adornos de automóviles, modelado de juguetes.
Herramientas de grabado de plástico	Grabado detallado	PVC, acrílico	Branding, Display informativo, Decoraciones
Fresas de extremo de flauta O	Acabados lisos	Acrílico, ABS	Vitrinas, componentes ópticos.
Cortadores de bits en V	Grabado preciso	PVC, poliestireno	Placas de circuitos, paneles de control.
Fresas de extremo cortadas hacia arriba	Evacuación eficaz de virutas	PEAD, PEBD	Fresado general, herramientas de embalaje.
Fresas de extremo cortadas hacia abajo	Acabado de superficie superior limpia	PET, poliestireno	Cerramientos, contenedores
Fresas de desbaste	Eliminación rápida de material	Polipropileno, nailon	Eliminación de material a granel, conformación inicial de piezas

Fuente: (PRO-LEAN, 2023)

2.5 Fresado en plásticos

El Fresado CNC para piezas de plástico ha cambiado la popularidad de las aplicaciones del plástico en todas las industrias ya que antes tomaba horas tallar a mano en plástico ahora se puede hacer en un minuto con una precisión de menos de 0.01 milímetros. Antes se pensaba que alcanzar tal precisión con los plásticos era imposible debido a lo flexible que es el material. Pero con el auge del fresado CNC, hacer diseños detallados en plástico se ha vuelto tan factible como el metal.

Tabla 6
Parámetros de corte en polímeros

PARÁMETROS DE CORTE EN CIERTOS POLÍMEROS					
VARIABLE	UNIDAD	NYLON 6	ACETAL	PE/PP	PTFE
Angulo de incidencia α	°	10 – 20	5 – 15	10 – 20	10 – 20
Angulo de virutas γ	°	5 – 15	5 – 15	5 – 15	5 – 20
Avance S	mm/t	> 0.03	> 0.02	> 0.05	> 0.03
Velocidad de corte V	m/min	< 1000	< 1000	> 1000	> 800

Fuente: (Mata & Davim, 2010)

2.5.1 Los fundamentos: fresado CNC para piezas de plástico

El fresado CNC (control numérico por computadora) es una tecnología que utiliza controles computarizados para mover y operar fresadoras, que pueden tallar, cortar y dar forma a materiales en las formas y geometrías deseadas. Mientras que metales como el acero y el aluminio se procesan desde hace tiempo mediante fresado CNC, en los últimos años los plásticos se han sumado a esta tendencia, ofreciendo diversas ventajas. (PRO-LEAN, 2023)



Figura 0-6.
Fresado CNC en piezas plásticas

Fuente: (PRO-LEAN, 2023)

El plástico es un material versátil por naturaleza. Su peso ligero, su resistencia a la corrosión, su maquinabilidad y su capacidad de moldeo lo convierten en el favorito de muchas industrias. El plástico está en todas partes, desde artículos cotidianos como cepillos de dientes y recipientes hasta piezas especializadas en la industria automotriz.

o médica. Pero ¿por qué es necesario fresar plástico cuando se puede moldear? ¿Por qué es necesario mecanizar los plásticos?

El moldeado es fantástico para la producción en masa, pero tiene limitaciones. Los moldes en sí pueden resultar costosos de producir, especialmente para diseños complejos. Además, una vez fabricado un molde, modificarlo se convierte en una tarea costosa. Sin embargo, los fabricantes pueden crear piezas complejas y precisas sin necesidad de moldes con tecnología de fresado CNC. Si es necesario realizar modificaciones en el diseño, se pueden hacer rápidamente alterando el diseño digital, ahorrando tiempo y recursos.

Alta precisión: Algunas aplicaciones exigen tolerancias extremadamente estrictas y detalles complejos, por ejemplo, piezas médicas y aeroespaciales. El fresado CNC proporciona una precisión que a menudo es difícil de lograr con los métodos convencionales de conformado de plástico.

Geometrías complejas: El fresado CNC de plástico puede crear piezas con geometrías complejas, ángulos agudos y características detalladas que serían casi imposibles con solo moldear.

Plástico difícil de moldear: Si bien los plásticos son generalmente flexibles y maleables, ciertos tipos son más resistentes y rígidos. El fresado garantiza que incluso estos plásticos difíciles de moldear se elaboren con la forma deseada sin comprometer el detalle o la precisión.

Los plásticos han ganado importancia en la fabricación debido a su versatilidad, adaptabilidad y rentabilidad. Sin embargo, cuando se trata de dar forma y detalle a estos materiales, destaca el fresado de plástico especializado. Este proceso desempeña un papel insustituible, ya que garantiza que el producto final no sólo sea funcional, sino que también cumpla con las especificaciones exactas requeridas.

Para entender por qué, profundicemos en sus ventajas y los desafíos únicos que aborda para saber qué importancia tiene el fresado de plástico especializado en la fabricación.

- Precisión y complejidad

El fresado de plástico mediante máquinas CNC aporta un nivel de precisión difícil de rivalizar. Cuando comparamos esto con los métodos tradicionales de modelado de plástico, la diferencia en la precisión del producto terminado es marcada. Especialmente en industrias como la aeroespacial o la de dispositivos médicos, donde una pequeña discrepancia puede tener repercusiones importantes, la precisión del fresado CNC se vuelve crucial.

- Flexibilidad en los cambios de diseño

Uno de los beneficios más destacados del fresado de plástico es su adaptabilidad. Los métodos tradicionales, como el moldeado, restringen las modificaciones del diseño una vez que se crea el molde inicial. Por otro lado, modificar un diseño es tan simple como modificar el plano digital con fresado CNC. Esto no solo ahorra tiempo, sino que también reduce los costos relacionados con las modificaciones.

- Conservación de materiales

Si bien el plástico es relativamente más asequible que los metales, el uso eficiente del material es siempre una prioridad para los fabricantes. El fresado de plástico especializado garantiza un desperdicio mínimo gracias a sus métodos de tallado exactos. Esto contrasta con los métodos en los que se pueden descartar trozos de material después de darles forma.

- Velocidad y Eficiencia

El fresado CNC para plásticos reduce drásticamente el tiempo de producción de piezas, especialmente cuando se necesitan diseños complejos. La capacidad de estas máquinas para trabajar incansablemente también significa que el ritmo de producción es constante y rápido.

- Capacidad para manipular diversos plásticos

Los plásticos vienen en muchos tipos. Algunos son blandos como el polietileno, mientras que otros son duros como el policarbonato. El fresado de plástico especializado tiene la capacidad de manejar este amplio espectro, asegurando que, independientemente del tipo de plástico, el producto final sea impecable.

- Cumplir con los estándares de la industria

Muchas industrias tienen estándares estrictos para las piezas, especialmente aquellas utilizadas en aplicaciones críticas. El fresado CNC de plástico está bien equipado para cumplir con los exigentes criterios de las industrias aeroespacial, automotriz, médica y muchas más que requieren piezas que cumplan con tolerancias y estándares específicos.

Por ejemplo, dispositivos médicos. exige ISO 9001. ISO 9001 para la norma general y es una tarea fácil para el fresado CNC. (PRO-LEAN, 2023)

Tabla 7

Comparación del fresado de plástico especializado con métodos tradicionales

Feature	Fresado de plástico especializado	Métodos tradicionales
Precisión	Alta	Moderado a Bajo
Flexibilidad para modificaciones de diseño	Sí	Limitada
Conservación de materiales	Optima	Variable
Adecuado para geometrías complejas	Sí	A menudo no

Fuente: (PRO-LEAN, 2023)

2.6 Curva esfuerzo-deformación

Muchos materiales están sometidos a fuerzas o cargas cuando prestan servicio. Algunos ejemplos son la aleación de aluminio con la cual se construye el ala de un avión y el acero del eje de un automóvil. En tales situaciones, es necesario conocer las características del material y diseñar el componente que se fabrica con él de manera que ninguna deformación resultante sea excesiva y no se produzca la rotura. El comportamiento mecánico de un material refleja la relación entre la fuerza aplicada y la respuesta del material, o deformación.

Las principales propiedades de diseño mecánico son rigidez, resistencia, dureza, ductilidad y tenacidad. Las propiedades mecánicas de los materiales se determinan realizando experimentos de laboratorio cuidadosamente diseñados que reproducen en todo lo posible las condiciones de servicio. Entre los factores a considerar están la naturaleza de la carga aplicada y su duración, así como las condiciones ambientales. La carga puede ser a tracción, a compresión o a cizalla, y su magnitud puede ser constante con el tiempo o fluctuar continuamente. El tiempo de aplicación puede ser sólo una fracción de segundo o durar muchos años. La temperatura de servicio también puede ser un factor importante.

Las propiedades mecánicas son interesantes para una gran variedad de sectores (p. ej., productores y consumidores de materiales, organizaciones de investigación, agencias gubernamentales) que tienen diferentes intereses. En consecuencia, es necesario que haya un poco de coherencia en la forma en que se llevan a cabo los ensayos y en la interpretación de sus resultados, y esta coherencia se logra con técnicas de ensayo estandarizadas. La definición y publicación de estas normas son a menudo coordinadas por sociedades profesionales.

En los Estados Unidos la organización más solvente es la American Society for Testing and Materials (ASTM). Su Annual Book of ASTM Standards comprende numerosos volúmenes que se publican y se actualizan anualmente. Un gran número de estas normas se refieren a técnicas de ensayos mecánicos, varios de los cuales están referenciados con notas al pie en éste y en los siguientes capítulos. El papel de la ingeniería estructural es determinar las tensiones (o esfuerzos) y distribuciones de tensiones dentro de los componentes que están sometidos a cargas definidas. Esto se puede lograr mediante técnicas experimentales de ensayo o mediante análisis de tensiones teóricos y matemáticos. Estos temas se tratan en los textos tradicionales de análisis de tensión y resistencia de materiales. Sin embargo, en la ingeniería metalúrgica y de materiales la primera preocupación es la producción y fabricación de materiales para cumplir las especificaciones de servicio según lo predicho por estos análisis de tensiones. Esto implica necesariamente una comprensión de las relaciones entre la microestructura y las características internas de los materiales y sus propiedades mecánicas.

A menudo los materiales elegidos para aplicaciones estructurales tienen combinaciones deseables de características mecánicas. La discusión actual se centra principalmente en el comportamiento mecánico de los metales, mientras que polímeros y cerámicos se tratan aparte ya que son, en gran medida, mecánicamente diferentes de los metales. En este capítulo se analiza el comportamiento tensión-deformación de los metales en relación con sus propiedades mecánicas, y también se examinan otras características mecánicas importantes. Las discusiones sobre los aspectos microscópicos de mecanismos de deformación y sobre los métodos para mejorar y moderar el comportamiento mecánico de los metales, se encuentran en capítulos posteriores. (William D. Callister, 2017)

2.6.1 Comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales poliméricos

Las propiedades mecánicas de los polímeros se especifican con los mismos parámetros utilizados para los metales: módulo elástico y resistencia a la tracción, al impacto y a la fatiga. El ensayo esfuerzo deformación se emplea para caracterizar parámetros mecánicos de muchos materiales poliméricos.

La mayoría de las características mecánicas de los polímeros son muy sensibles a la velocidad de deformación a la temperatura y a la naturaleza química del medio (presencia de agua, oxígeno, disolventes orgánicos, etc.). En los materiales de alta elasticidad como las gomas conviene modificar las técnicas de ensayo o la forma de las probetas utilizadas en los metales.

Los materiales poliméricos presentan 3 tipos distintos de comportamiento esfuerzo - deformación. La curva A corresponde al comportamiento esfuerzo de formación de un polímero frágil ya que se rompe cuando se deforma elásticamente. El comportamiento del material representado por la curva B es parecido al de los metales: después de la deformación elástica e inicial el material fluye y luego se deforma plásticamente. Finalmente, el comportamiento descrito por la curva C es totalmente elástico. La elasticidad de la goma (grandes deformaciones recuperables producidas por pequeños esfuerzos) es propia de los polímeros denominados elastómeros.

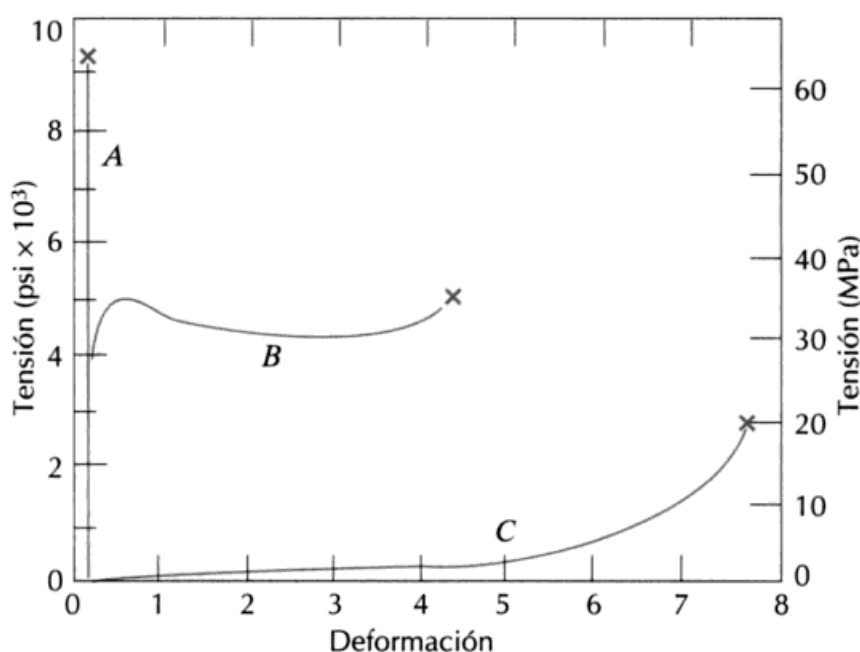


Figura 0-7
Comportamiento Esfuerzo-Deformación de los polímeros: Frágil (Curva A), plástico (Curva B) y con elevada elasticidad (elastómero) (Curva C)

Fuente: (William D. Callister, 2017)

El módulo de elasticidad, la resistencia a la tracción y la ductilidad en porcentaje (en porcentaje de alargamiento) de los polímeros se determinan como en los metales. En la figura 2.10 se presentan los valores de estas propiedades mecánicas correspondientes a varios materiales poliméricos. Los polímeros son en muchos aspectos, mecánicamente distintos de los metales. Por ejemplo, el módulo elástico de los polímeros de alta elasticidad es del orden de 7 MPa y el de los de baja elasticidad de 4×10^3 MPa, mientras que en los metales los valores del módulo elástico son mayores y el intervalo de variación es menor: va de 48×10^3 a 410×10^3 MPa. La resistencia máxima a la tracción de los polímeros es en el orden de 100 MPa, mientras que la de algunas aleaciones metálicas es de 4100 MPa. La elongación plástica de los metales raramente es superior al 100 %, mientras que algunos polímeros de alta elasticidad pueden experimentar elongaciones de 1000%.

Material	Densidad	Módulo elástico [psi $\times 10^5$ (MPa $\times 10^2$)]		Resistencia a la tracción [psi $\times 10^3$ (MPa)]		Alargamiento a la rotura (%)	Resistencia al impacto ^a (ft-lb/in.)
Polietileno (baja densidad)	0,917-0,932	0,25-0,41	(1,7-2,8)	1,2-4,6	(8,3-31,7)	100-650	No se rompe
Polietileno (alta densidad)	0,952-0,965	1,55-1,58	(10,6-10,9)	3,2-4,5	(22-31)	10-1200	0,4-4,0
Cloruro de polivinilo	1,30-1,58	3,5-6,0	(24-41)	5,9-7,5	(41-52)	40-80	0,4-22
Politetrafluoretileno	2,14-2,20	0,58-0,80	(4,0-5,5)	2,0-5,0	(14-34)	200-400	3
Polipropileno	0,90-0,91	1,6-2,3	(11-16)	4,5-6,0	(31-41)	100-600	0,4-1,2
Poliestireno	1,04-1,05	3,3-4,8	(23-33)	5,2-7,5	(36-52)	1,2-2,5	0,35-0,45
Poli(metacrilato de metilo)	1,17-1,20	3,3-4,7	(22-32)	7,0-11,0	(48-76)	2-10	0,3-0,6
Fenol-formaldehído	1,24-1,32	4,0-7,0	(28-48)	5,0-9,0	(34-62)	1,5-2,0	0,24-4,0
Nilón 66	1,13-1,15	2,3-5,5	(16-38)	11,0-13,7	(76-94)	15-300	0,55-2,1
Poliéster (PET)	1,29-1,40	4,0-6,0	(28-41)	7,0-10,5	(48-72)	30-300	0,25-0,70
Policarbonato	1,20	3,5	(24,0)	9,5	(60)	110	16

Figura 0-8
Características mecánicas a temperatura ambiente de los polímeros más comunes

Fuente: (William D. Callister, 2017)

2.7 Ensayo de tracción

Si una carga es estática o varía muy lentamente con el tiempo y se aplica uniformemente sobre una sección transversal o la superficie de un componente, el comportamiento mecánico puede determinarse mediante un simple ensayo de tensión-deformación. En los metales, estos ensayos se realizan normalmente a temperatura ambiente. Existen tres maneras principales de aplicar la carga: tracción, compresión y cizalladura.

La Figura 2.11 muestra un aparato llamado Máquina Universal que mide las propiedades mecánicas de los metales a partir de fuerzas de tracción aplicadas. La Figura 2.12 se genera a partir de un ensayo de tracción realizado con un aparato como éste en una muestra (o probeta) de acero o cualquier tipo de material como plástico. Los datos representados son la tensión (eje vertical, como medida de la fuerza aplicada) frente a la deformación (eje horizontal, relacionado con el grado de alargamiento de la muestra). Las propiedades mecánicas de módulo de elasticidad (rigidez, E), límite elástico (σ_y) y resistencia a la tracción (RM, σ_m) se determinan como se indica en estos gráficos. (William D. Callister, 2017)



Figura 0-9
Maquina Universal Tinus Olsen H300KU

Fuente: (William D. Callister, 2017)

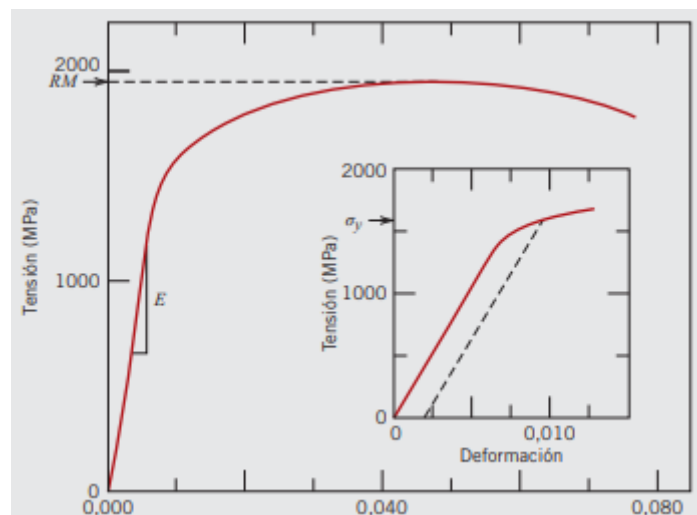


Figura 0-10
Curva obtenida en la Máquina Universal

Fuente: (William D. Callister, 2017)

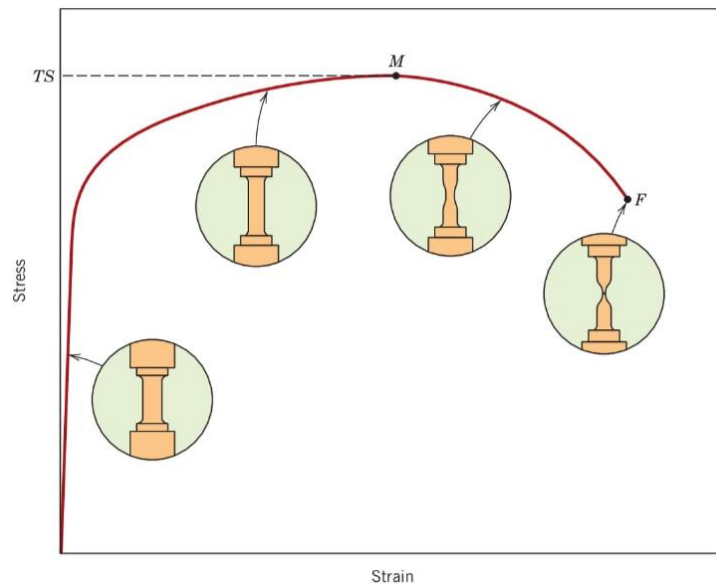


Figura 0-11
Diagrama obtenido del acero

Fuente: (William D. Callister, 2017)

Uno de los ensayos mecánicos de tensión-deformación más comunes es el de tracción. Se puede utilizar para determinar varias propiedades mecánicas de los materiales que son importantes en el diseño. Una probeta se deforma, por lo general hasta rotura, bajo una carga de tracción gradualmente creciente que se aplica de forma uniaxial a lo largo del eje de la muestra. Generalmente, la sección transversal es circular, aunque también se utilizan probetas de sección rectangular. Se elige esta configuración de probeta “hueso de perro” para que, durante el ensayo, la deformación se limite a la región estrecha de centro (que tiene una sección transversal uniforme a lo largo de su longitud) y también para reducir la probabilidad de fractura en los extremos de la muestra. El diámetro estándar es aproximadamente de 12,8 mm, mientras que la longitud de la sección reducida debe ser por lo menos cuatro veces este diámetro (usualmente, 60 mm). La longitud de referencia se utiliza en los cálculos de ductilidad, como se comenta en la sección anterior, y el valor estándar es 50 mm. La probeta se sujeta por sus extremos en las mordazas de sujeción del equipo de ensayo. La máquina de tracción está diseñada para alargar la probeta a una velocidad constante y para medir continua y simultáneamente la carga instantánea aplicada (con una célula de carga) y los alargamientos resultantes (utilizando un extensómetro). El ensayo de tensión-deformación dura varios minutos y es destructivo, es decir, la muestra de ensayo se deforma permanentemente y, por lo general, se rompe. (William D. Callister, 2017)

2.8 Índice de maquinabilidad

El índice de maquinabilidad es un porcentaje que indica la facilidad con la que se puede mecanizar un material. Una manera de calcular es en relación con el acero dulce, que tiene un índice de maquinabilidad del 100%.

Para calcular el índice de maquinabilidad se comparan los promedios ponderados de: la velocidad de corte normal, el acabado de la superficie, la vida útil de la herramienta.

Los materiales con un índice de maquinabilidad superior al 100% son más fáciles de mecanizar, mientras que los que tienen un índice inferior son más difíciles. (Mata & Davim, 2010)

A continuación, se detallan los factores que influyen en la maquinabilidad tales como:

- La dureza
- El contenido de aleación
- La resistencia
- La microestructura
- La composición química
- La conductividad térmica

La maquinabilidad es importante para lograr la productividad, calidad y rentabilidad deseadas en las operaciones de mecanizado.

Los materiales con buenas características de maquinabilidad tienen una mayor vida útil de la herramienta, un mejor acabado superficial y menores fuerzas de corte. (Mata & Davim, 2010)

2.8.1 Métodos para determinar el índice de maquinabilidad

- **Basado en la velocidad de corte crítica**

Un método para determinar el índice de maquinabilidad de materiales es comparar la velocidad de corte a la cual una herramienta tiene una vida útil estándar (por ejemplo, 60 min). Se define como: (Mata & Davim, 2010)

$$I_m = \frac{V_c(\text{material})}{V_c(\text{Material de referencia})}$$

donde:

I_m = Índice de maquinabilidad.

$V_c(\text{material})$ = Velocidad de corte del material bajo estudio.

$V_c(\text{material de referencia})$ = Velocidad de corte del material base, como el acero AISI 1112 (que se toma como referencia con un índice de 100).

- **Basado en la fuerza de corte**

En base a la fuerza de corte necesaria para mecanizar un material y se compara con la de un material de referencia. Cuanto menor es la fuerza requerida, mayor es la maquinabilidad. (Mata & Davim, 2010)

$$I_m = \frac{F_c (\text{material de referencia})}{F_c(\text{Material})}$$

donde:

I_m = Índice de maquinabilidad.

$F_c(\text{material})$ = Fuerza de corte del material bajo estudio.

$F_c(\text{material de referencia})$ = Fuerza de corte del material base o de referencia.

- **Basado en el acabado superficial**

Para esta metodología se compara la rugosidad obtenida luego del mecanizado con la de un material de referencia. Para un mejor acabado superficial indica una mayor maquinabilidad. (Mata & Davim, 2010)

$$I_M = \frac{R_a (\text{material de referencia})}{R_a(\text{Material})}$$

Donde:

R_a = Rugosidad obtenida del material

- **Basado en el desgaste de la herramienta**

Este método se basa en el desgaste que sufre la herramienta luego de un proceso de mecanizado a un material durante un tiempo determinado. (Mata & Davim, 2010)

$$I_M = \frac{T (\text{material})}{R_a(\text{Material de referencia})}$$

Donde:

T es la vida útil de la herramienta.

- **Basado en la fuerza específica de corte, rugosidad y coeficientes de ponderación**

En literatura especializada se puede establecer que no existe un índice de maquinabilidad universal o único, y esto se acrecienta más en el caso de los materiales compuestos, factores como rugosidad y la fuerza de corte evalúan adecuadamente el índice, en base a eso investigaciones proponen nuevos índices de maquinabilidad (IM) para polímeros, como se plantea en la siguiente ecuación. (Mata & Davim, 2010)

$$IM = \left\{ \frac{1}{K_s} \alpha \right\} \left\{ \frac{1}{R_a} \beta \right\} \times 10^3$$

Donde:

$$K_s = \text{Fuerza específica de corte } [N/mm^2]$$

$$R_a = \text{Rugosidad } [mm]$$

$$\alpha = \text{Coeficiente de ponderación } [N/mm^2]$$

$$\beta = \text{Coeficiente de ponderación } [mm]$$

En las siguientes figuras se muestra el índice de maquinabilidad en función de la velocidad de avance para diferentes materiales. (Mata & Davim, 2010)

En las gráficas 2-12 y 2-13 se muestra la tendencia del índice de maquinabilidad con diferentes velocidades de corte lo que nos indica su variación en cuanto a este parámetro dándonos a entender la necesidad, la complejidad y la influencia directa de dicho parámetro para la obtención del índice de maquinabilidad.

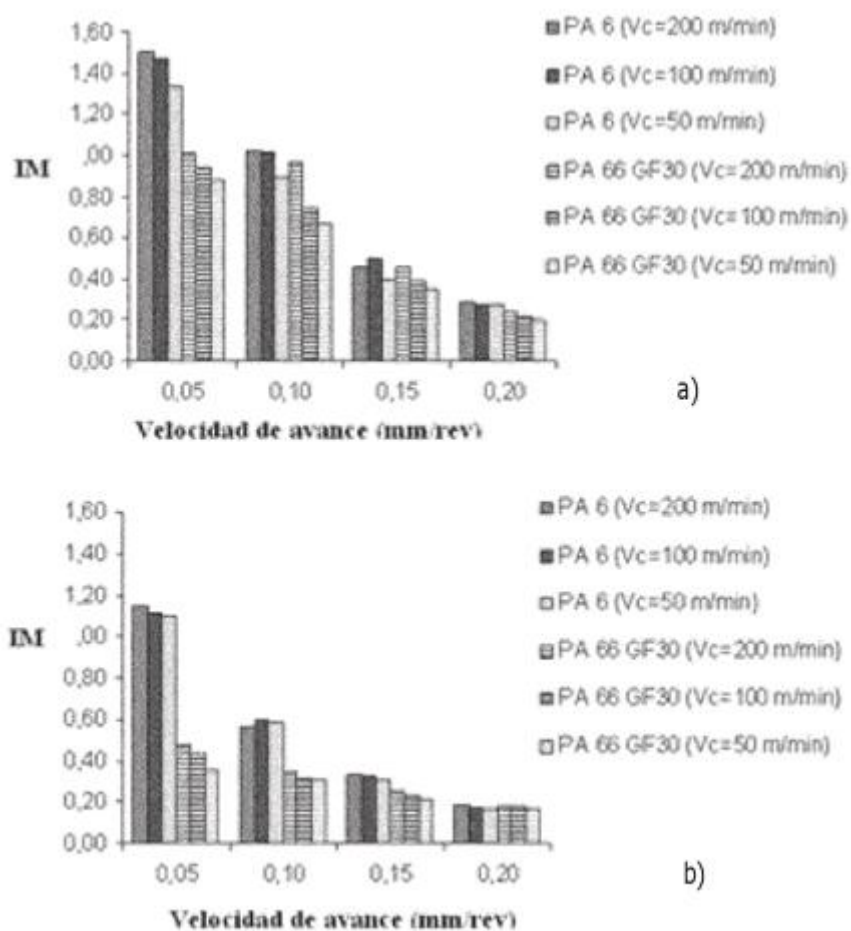


Figura 0-12 Índice de maquinabilidad en función de la velocidad de avance para diferentes velocidades de corte
 Fuente: (Mata & Davim, 2010)

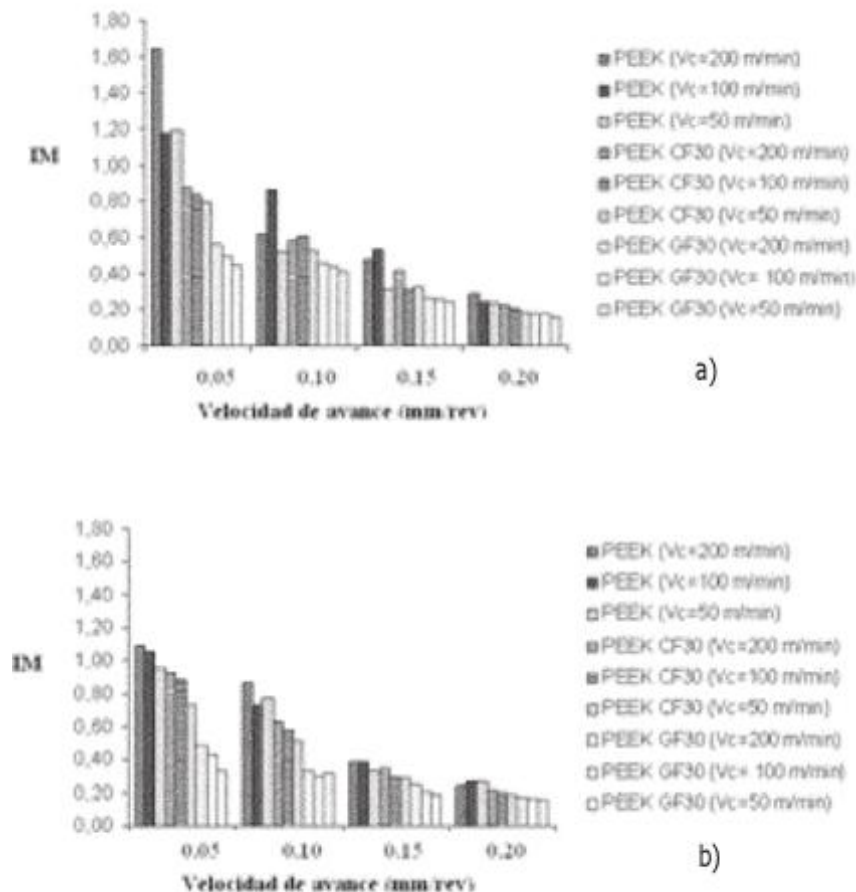


Figura 0-13 Índice de maquinabilidad en función de la velocidad de avance para diferentes velocidades de corte

Fuente: (Mata & Davim, 2010)

- **Índice de maquinabilidad en polímeros y resinas**

Para polímeros y resinas, el índice de maquinabilidad se puede evaluar considerando:

Generación de viruta: Si el material produce virutas largas y continuas, su maquinabilidad es menor.

Fuerza de corte: Polímeros de alta densidad pueden requerir más fuerza, lo que disminuye su índice de maquinabilidad.

Acabado superficial: Materiales con tendencia a derretirse o astillarse pueden presentar menor maquinabilidad.

Se puede decir que los polímeros y resinas suelen compararse con materiales de referencia como el nylon o el PTFE, utilizando criterios similares a los de metales, pero con ajustes para su naturaleza viscoelástica. (Mata & Davim, 2010)

2.9 Relación entre el acabado superficial y los parámetros de corte en el fresado de polímeros.

El acabado superficial en el fresado de polímeros depende directamente de los parámetros de corte como la velocidad de avance, la velocidad de corte y la profundidad de pasada. A continuación, se explica su influencia:

- **Velocidad de avance y acabado superficial**

Efecto en la rugosidad: Un mayor avance por diente genera crestas más pronunciadas en la superficie, lo que aumenta la rugosidad. Un menor avance mejora la calidad superficial, pero puede generar sobrecalentamiento o adhesión del material a la herramienta.

Recomendación: Se debe optimizar el avance para evitar la formación de rebabas y marcas excesivas en la pieza.

Relación: A menor avance, mejor acabado, pero un avance excesivamente bajo puede causar fricción y deterioro de la superficie. (Mata & Davim, 2010)

- **Velocidad de corte y acabado superficial**

Efecto en la calidad superficial: Una mayor velocidad de corte generalmente mejora el acabado, ya que reduce las fuerzas de corte y el desgarro del material.

Límite superior: Si la velocidad es demasiado alta, puede generar sobrecalentamiento, reblandecimiento del material y acumulación de virutas en la herramienta.

Límite inferior: Velocidades bajas pueden generar cortes más irregulares y aumentar las fuerzas de mecanizado, afectando el acabado.

Relación: A mayor velocidad de corte, generalmente mejor acabado, pero con riesgo de sobrecalentamiento en polímeros sensibles al calor. (Mata & Davim, 2010)

- **Profundidad de pasada y acabado superficial**

Profundidad axial: Si es demasiado grande, puede causar vibraciones y un acabado deficiente.

Profundidad radial: Un alto valor genera fuerzas laterales elevadas, lo que puede provocar delaminación o deformaciones en polímeros con baja rigidez.

Optimización: Se recomienda trabajar con profundidades moderadas y realizar pasadas finales de acabado con menores profundidades.

Relación: Pasadas más profundas pueden deteriorar la superficie debido a vibraciones y deflexiones. (Mata & Davim, 2010)

2.10 Rugosidad

La rugosidad superficial es una medida de las irregularidades o asperezas que presenta una superficie a nivel microscópico. Se cuantifica normalmente con parámetros como Ra (Roughness average), que representa la media de las desviaciones absolutas del perfil respecto a una línea media.

La rugosidad superficial es una característica crítica en piezas fabricadas por manufactura aditiva, tanto en polímeros como en metales. Aunque en ambos casos puede representar una desventaja funcional o estética, también puede aprovecharse en ciertas aplicaciones dentro de la ingeniería por ejemplo en intercambiadores de calor en metales. La selección del proceso y el postprocesamiento adecuado son claves para controlar este parámetro. (Fajardo, 2022)

2.10.1 Rugosidad en polímeros

En tecnologías como FDM (Fused Deposition Modeling), la rugosidad proviene principalmente del efecto escalonado debido a la deposición por capas. La altura de capa y el diámetro del extrusor influyen directamente. En SLA (estereolitografía), la resolución es más alta y las capas son más finas, pero pueden presentarse artefactos como líneas de capa o irregularidades por curado no homogéneo. (Fajardo, 2022)

En los procesos de manufactura aditiva con polímeros, como el modelado por deposición fundida (FDM) y la estereolitografía (SLA), la rugosidad superficial varía significativamente según la tecnología empleada y los parámetros de impresión (Flores et. al, 2024). En el caso de FDM, los valores típicos de rugosidad Ra se sitúan entre 10 y 50 μm , influidos principalmente por la altura de capa, la velocidad de impresión y el tipo de material utilizado (Canales, 2023). Por otro lado, la SLA ofrece una mayor calidad superficial, con rugosidades que pueden variar entre 1 y 10 μm o incluso menos si se aplican procesos de acabado. (Fajardo, 2022)

Esta rugosidad puede representar una desventaja en aplicaciones donde se requiere un buen acoplamiento entre piezas o donde el flujo de fluidos es crítico (Fajardo, 2022).

No obstante, existen diversas técnicas de postprocesamiento, como el lijado, la aplicación de vapor de acetona (en el caso del ABS), los recubrimientos o tratamientos térmicos, que permiten mejorar significativamente el acabado superficial y ampliar el rango de aplicaciones funcionales o estéticas de las piezas impresas. (Flores, Garibay, Viveros, Gonzalez, & Lopez, 2024)

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

En el presente estudio se utilizará el enfoque experimental para determinar y evaluar la maquinabilidad, así como de la resina Sika Block LAB 920 en aplicaciones industriales y para procesos productivos por medio de manufactura extractiva.

3.1 Obtención de probetas para ensayos

Las probetas se obtendrán del bloque genérico de la resina cuyas dimensiones se indica en las figuras 3.1 y 3.2 mostradas a continuación:



Figura 0-1 Disposición de bloque de resina Sikablock.

Fuente: SIKA.

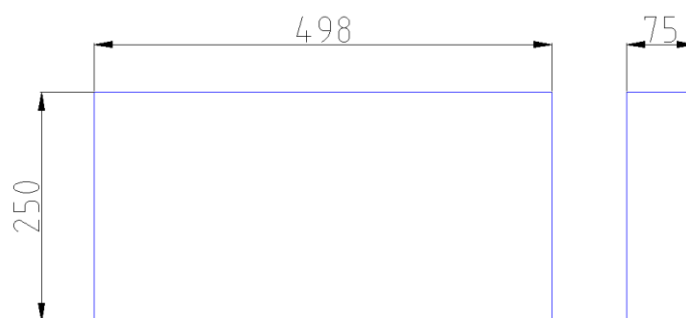


Figura 0-2 Dimensiones de bloque de resina Sikablock.

Fuente: SIKA.

Los cortes de las probetas deben realizarse mediante corte mecánico estableciendo como mejor opción en base a la experiencia y dimensiones del bloque primario utilizar una sierra de cinta (ver figura 3-3). Este método permite obtener las probetas con la geometría requerida, se debe seguir la distribución indicada que sería la adecuada para el corte de las planchas primarias.

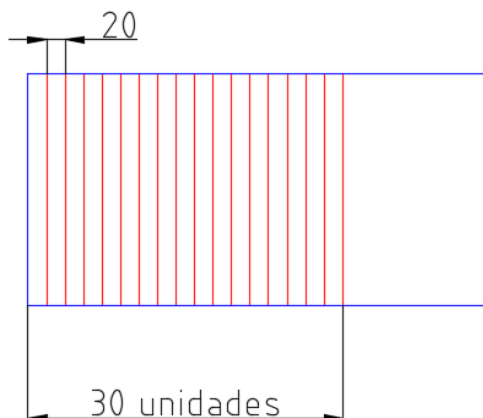


Figura 0-3 Disposición de planchas primarias para corte de resina.

Fuente: Autores.

3.2 Identificación de probetas

Para garantizar la trazabilidad y control de las probetas de la resina Sika Block LAB 920 con las cuales se realizarán los ensayos de tracción y para evaluar la estrategia de mecanizado, se implementa un sistema de identificación y codificación estructurado.

Cada probeta se marca con un código alfanumérico que incluye los parámetros de corte para el fresado como lo es la velocidad de corte (200, 300, 400), y la estrategia utilizada para el fresado, que para el caso es unidireccional y espiral (E, UN). Por ejemplo, una probeta para mecanizado con velocidad de corte de 300 [m/min] con fresado tipo espiral puede codificarse como **P300E1**, mientras que una probeta para mecanizado con velocidad de corte de 400 [m/min] con fresado tipo unidireccional puede codificarse como **P400UN1**.

Este sistema permite un seguimiento preciso de cada muestra desde la preparación hasta la obtención de resultados, con esto se asegura la confiabilidad de los datos y la posibilidad de correlacionar los parámetros de mecanizado con el comportamiento mecánico del material.

Tabla 8
Disposición e identificación de probetas

IDENTIFICACIÓN Y CODIFICACIÓN DE PROBETAS				
Orden	Identificación de Probeta	Velocidad de Corte [m/min]	Estrategia de mecanizado	Avance [mm/diente]
1	P200E1	200	Espiral	0.2
2	P200E2			0.5
3	P200E3			0.8
4	P200UN1		Unidireccional	0.2
5	P200UN2			0.5
6	P200UN3			0.8
7	P300E1	300	Espiral	0.2
8	P300E2			0.5
9	P300E3			0.8
10	P300UN1		Unidireccional	0.2
11	P300UN2			0.5
12	P300UN3			0.8
13	P400E1	400	Espiral	0.2
14	P400E2			0.5
15	P400E3			0.8
16	P400UN1		Unidireccional	0.2
17	P400UN2			0.5
18	P400UN3			0.8

Fuente: Autores.

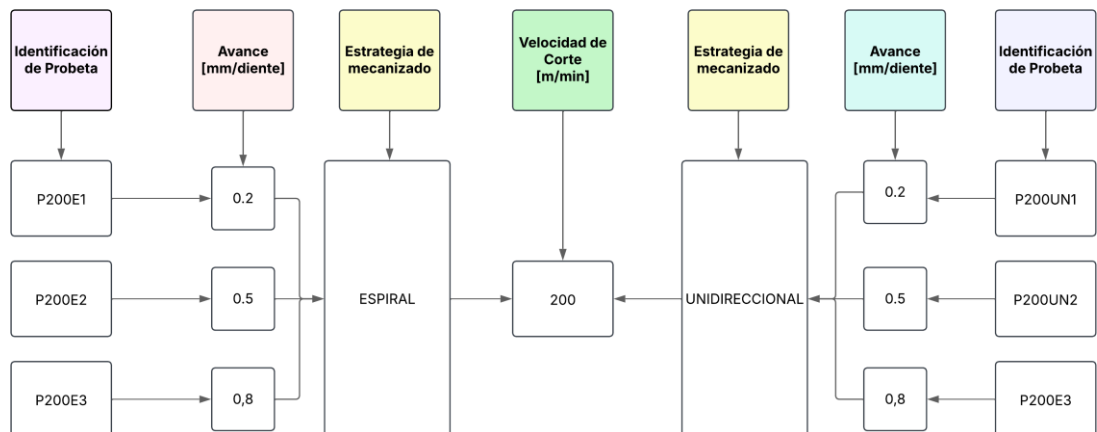


Figura 0-4 Especificación de probeta con velocidad de 200 m/min

Fuente: Autores.

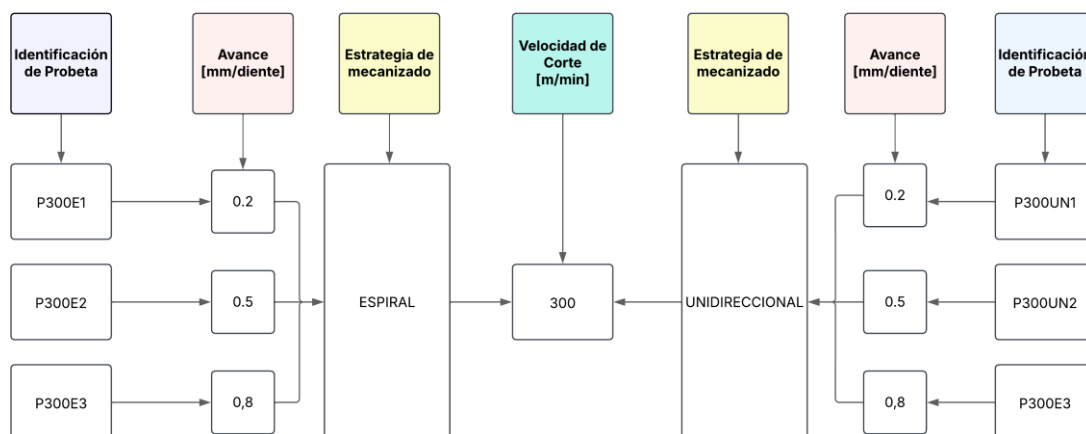


Figura 0-5 Especificación de probeta con velocidad de 300 m/min

Fuente: Autores.

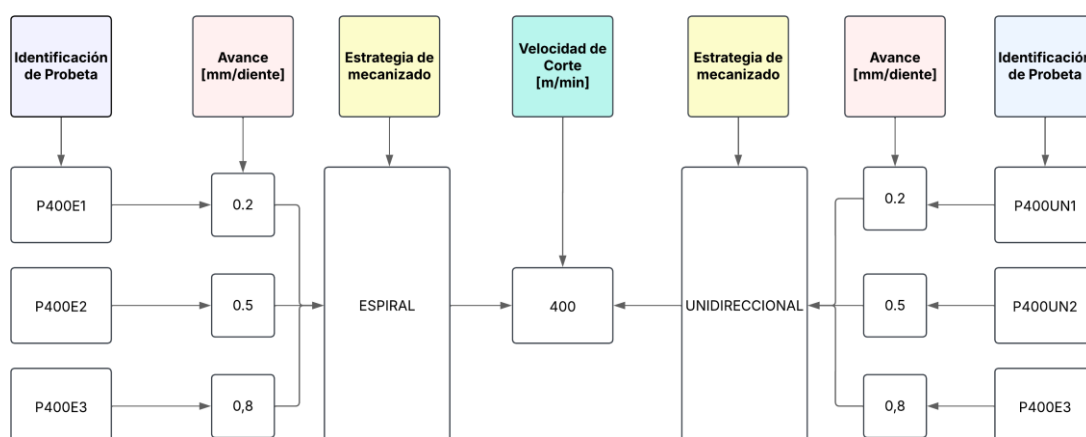


Figura 0-6 Especificación de probeta con velocidad de 400 m/min

Fuente: Autores.

3.3 Probetas para ensayo de tracción

La obtención de las probetas de la resina SIKA Block para el ensayo de tracción bajo la normativa ASTM D638 se requiere de un proceso de corte que sea preciso y que garantice el cumplimiento de las dimensiones normalizadas y la integridad del material. Una de las opciones más adecuadas y por la que el grupo ha decidido inclinarse es corte en máquina CNC, ver figura 3-8 ya que permite fabricar las probetas con cortes limpios y con una velocidad adecuada para garantizar que la probeta cumpla con las dimensiones establecidas en la norma y además salvaguardar su integridad mecánica.

Este método minimiza el riesgo de daños en los bordes de la probeta, asegurando una mejor reproducibilidad en los resultados del ensayo. Una vez obtenidas, las probetas deben ser inspeccionadas para verificar el cumplimiento de las especificaciones de la norma, asegurando su adecuada identificación y trazabilidad dentro del proceso de ensayo.

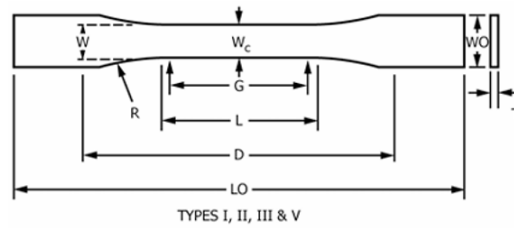


Figura 0-7 Corte de probetas en máquina CNC

Fuente: Autores.

3.3.1 Geometría de probetas para ensayo de tracción

El desarrollo del ensayo de tracción se llevará a cabo bajo las directrices y cumpliendo cada uno de los lineamientos establecidos en la norma ASTM D638-14 de ensayo en plásticos.



Dimensions (see drawings)	Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.) ^a					Tolerances
	7 (0.28) or under	Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under			
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^b	Type V ^{c,d}	
W —Width of narrow section ^{e,f}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	± 0.5 (± 0.02) ^{g,h}
L —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	± 0.5 (± 0.02) ^c
WO —Width overall, min ^g	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
LO —Length overall, min ^h	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
G —Gage length ⁱ	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	63.5 (2.5)	no max (no max)
D —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^j	25.4 (1.0)	± 5 (± 0.2)
R —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	± 1 (± 0.04) ^c
RO —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	± 1 (± 0.04)

Figura 0-8 Dimensiones de probeta según Norma D638-14

Fuente: Norma D638-14.

De acuerdo con la tabla provista por la norma y por la disposición de las muestras se obtiene la probeta con las dimensiones como se indica en la figura 3-9.

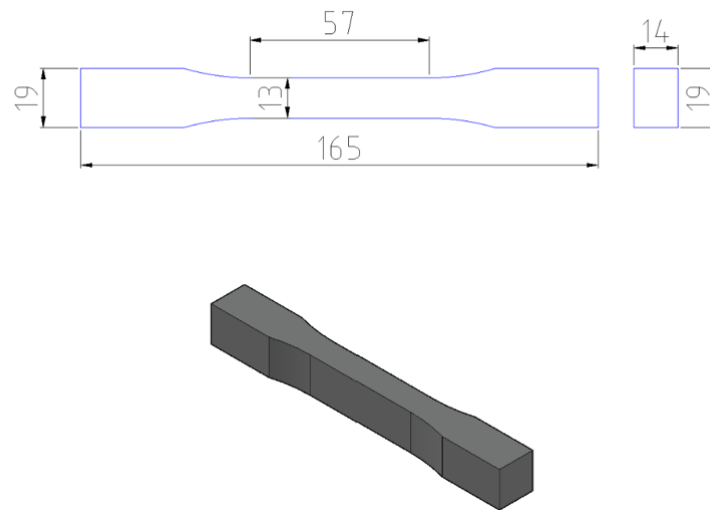


Figura 0-9 Dimensiones seleccionadas para probeta

Fuente: Autores.

Para el corte de las probetas en el cuerpo del bloque de la resina se procederá a realizar los cortes de acuerdo con la disposición de la figura 3-11, de las cuales se obtendrán 19 probetas que son las que se han visto necesarias para el correcto desarrollo del presente trabajo.

Cabe recalcar que es importante obtener la probeta justamente desde el centro de la placa base de resina para que de esta manera las propiedades del material no se vean afectados y de esta manera garantizar su correcto análisis y desarrollo del ensayo de tracción.

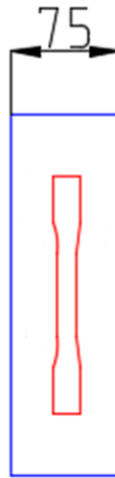


Figura 0-10 Muestra de extracción de probeta en máquina CNC

Fuente: Autores.

3.4 Ensayo de maquinabilidad

El ensayo de maquinabilidad de la resina en bloque Sika Block LAB920 en una fresadora CNC permitirá evaluar el comportamiento de esta durante el proceso de mecanizado, esto para optimizar los parámetros de corte. Mediante pruebas experimentales, se analizan factores como la rugosidad superficial determinando así la eficiencia del proceso. Se emplean tres distintas combinaciones de velocidad de corte, avance y profundidad de pasada con esto se puede identificar las condiciones óptimas que garanticen un acabado de calidad y eficiencia en el proceso de mecanizado.

Los resultados obtenidos proporcionarán información importante para mejorar la productividad en aplicaciones industriales de la resina.

- **Equipo utilizado**



Figura 0-11 Centro de mecanizado CNC

Fuente: Instituto Tecnológico Sucre.

En la siguiente tabla se puede establecer los principales parámetros de corte del equipo que se va a utilizar para los ensayos de las probetas.

Tabla 9
Parámetros de Máquina CNC

Parámetros de corte de Centro de Mecanizado Roland MDX-40A	
Parámetros de corte	Unidad
Velocidad de rotación del husillo	7500 RPM
Velocidad de avance	60-3000 mm/min
Consumo energético	1.5 KW
N° Ejes	3
Dimensiones de bancada	863.60 mm x 241.30 mm
Desplazamiento vertical	431.80 mm
Motor del husillo	Motor de CC 2 HP

Fuente: Instituto Tecnológico Sucre.

- **Herramientas de corte**

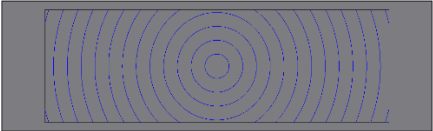
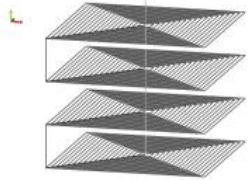
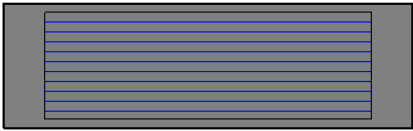
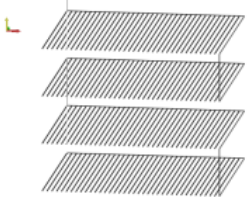
Para mecanizar las probetas de la resina Sika Block 920 con dimensiones de 250 mm x 75 mm, utilizando las estrategias de mecanizado seleccionadas (unidireccional y en espiral), se debe tomar en consideración parámetros que estarán de acuerdo con el material y a las características del centro de mecanizado.

Las herramientas de corte seleccionadas para el mecanizado de materiales plásticos y resinas debido a su alta resistencia al desgaste son Fresas de Acero Rápido. La herramienta por utilizar es una fresa de botón de cuatro puntas HSS, por las dimensiones de la probeta se debe utilizar una fresa de diámetro 10 mm.

- **Estrategias de mecanizado**

La estrategia de mecanizado espiral y unidireccional en la fresadora CNC Roland MDX-40A aplicada a la resina Sika Block LAB 920 consistirá en realizar pasadas lineales en zigzag y una única dirección, minimizando esfuerzos de corte y mejorando la calidad del acabado superficial. Con estos métodos, la herramienta de corte avanza en una dirección a lo largo de la pieza, dando el acabado a las probetas en una sola pasada.

Tabla 10
Estrategias de Mecanizado a utilizar en el ensayo de probetas

Estrategias de Mecanizado para probetas SIKa block		
Esquema	Trayectoria de corte	Estrategia
		ESPIRAL
		UNIDIRECCIONAL

Fuente: Autores.

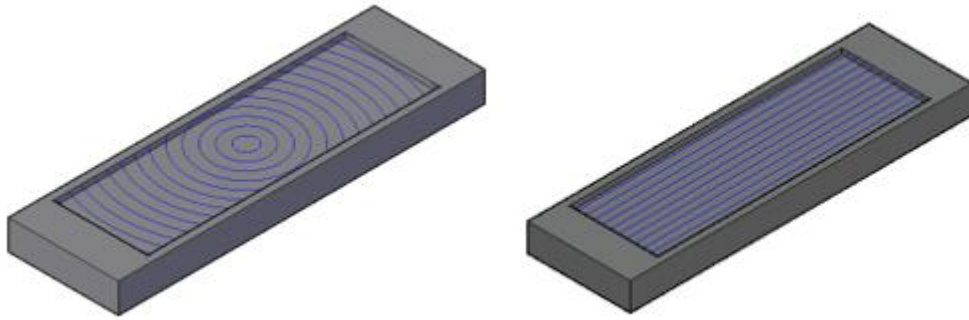


Figura 0-12 Representación de estrategias de mecanizado

Fuente: Autores.

- **Dimensiones de la probeta**

Las dimensiones de la probeta ver figura se toman en consideración respecto a las dimensiones sugeridas por la norma de las probetas para el ensayo de tracción, así como las dimensiones del área de trabajo de la máquina.

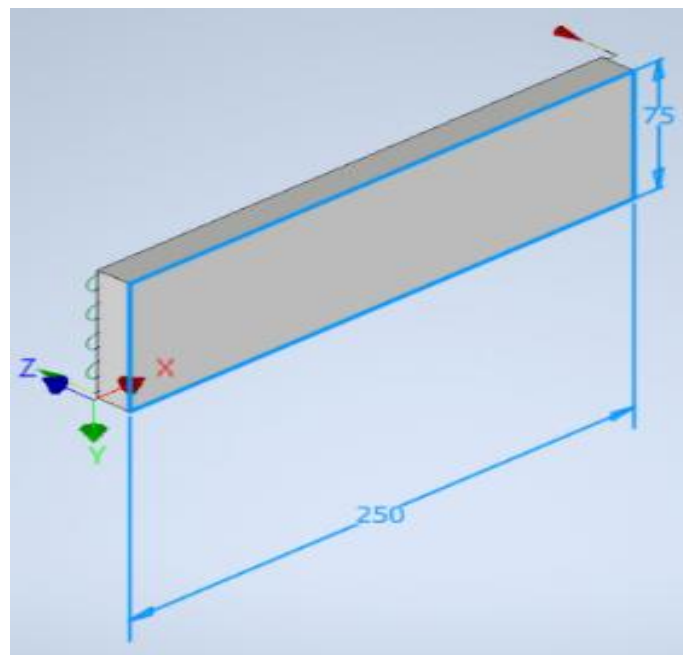


Figura 0-13 Dimensiones de la probeta

Fuente: Autores.

- **Parámetros de corte**

En el ensayo de maquinabilidad de la resina SIKA Block lab 920, se debe considerar los parámetros de corte durante el proceso de mecanizado en la fresadora CNC, esto con el objetivo de determinar las condiciones óptimas de mecanizado. Por lo cual, se analizarán variables importantes como la velocidad de corte, la velocidad de avance y la profundidad de pasada, datos que se obtuvieron del sustento teórico (ver tabla 10), considerando la incidencia en el acabado final, en la calidad del acabado superficial, y la eficiencia del proceso. Estos parámetros serán ajustados en el equipo para establecer las condiciones de corte adecuadas para el ensayo de maquinabilidad de la resina en estudio.

Tabla 11
Parámetros de corte general para resinas

PARÁMETROS DE CORTE GENERALES PARA RESINAS EN FRESADO CNC		
PARÁMETRO	VALOR RECOMENDADO	OBSERVACIONES
Tipo de herramienta	Fresa de carburo de tungsteno	Preferible con recubrimiento para minimizar adhesión.
Diámetro de fresa (D)	3 - 12 mm	Depende del detalle del mecanizado.
Número de filos (Z)	2 - 4	Para un mejor control de la evacuación de virutas.
Velocidad de corte (Vc)	200 - 400 m/min	Ajustable según rigidez de la máquina y geometría de la pieza.
Velocidad del husillo (N)	8000 - 24000 rpm	Dependiendo del diámetro de la herramienta.
Avance por diente (fz)	0.02 - 0.08 mm/diente	Un avance bajo evita delaminación o quemado de la resina.
Avance por revolución (f)	0.04 - 0.15 mm/rev	Para un acabado superficial óptimo.
Profundidad de corte axial (ap)	0.5 - 3 mm	Ajustar según la rigidez de la pieza y la máquina.
Profundidad de corte radial (ae)	10 - 50% del diámetro de la herramienta	Para evitar sobrecarga de la herramienta.
Refrigeración	Aire comprimido o mínima cantidad de lubricante (MQL)	Evita sobrecalentamiento y acumulación de viruta.

Fuente: Autores.

Para la realización del proceso de fresado con las trayectorias establecidas en el estudio se debe considerar la velocidad de corte del equipo, con este valor se procede a encontrar la velocidad de giro del husillo. Según la tabla 10 el valor de la velocidad de corte para una resina va desde 200-400 m/min, para fines del estudio se selecciona la velocidad de corte de 300 m/min

Para el cálculo de la velocidad de rotación del husillo se considera la siguiente ecuación:

$$V_c = \frac{N \cdot \pi \cdot \phi}{1000} \left[\frac{m}{min} \right].$$

$$N = \frac{V_c * 100}{\pi * \phi} [RPM]$$

$$N = \frac{\left(300 \frac{m}{min}\right) * 1000}{\pi * (8mm)} = 11936 [RPM]$$

El avance lineal de la herramienta de corte está establecido por los parámetros de la tabla 10, en esta se establece el valor del avance en función del número de dientes y por las revoluciones del husillo. La velocidad de avance en los ejes x /y para el ensayo se describe con la siguiente ecuación:

$$f_{xy} = \frac{V_f}{n * Z_c}$$

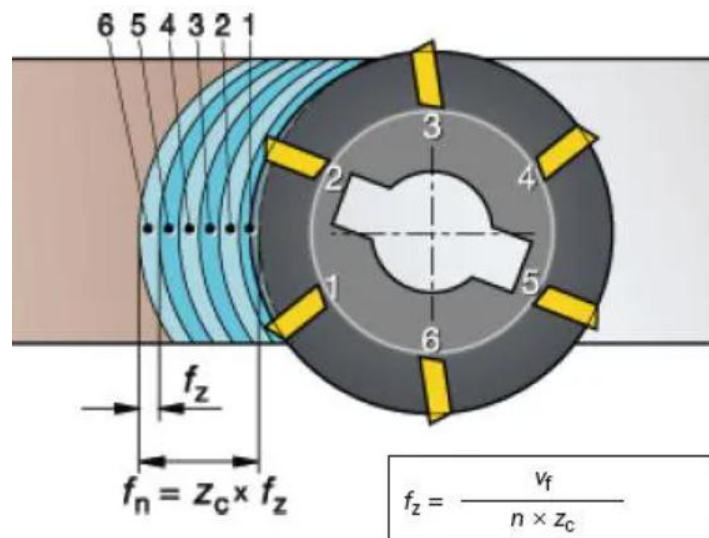


Figura 0-14 Ecuación de cálculo de avance lineal.

Fuente: Autores.

- **Programación trayectorias de corte**

Para el maquinado de las probetas y la generación de las trayectorias de corte, se debe realizar la programación en el centro de mecanizado CNC ROLAND MDX 40A, para esto se utilizó el software Autodesk Inventor para diseñar el modelo CAD de las probetas de resina SIKA Block Lab. 920, se define sus dimensiones y geometría según los requerimientos del ensayo de maquinabilidad.

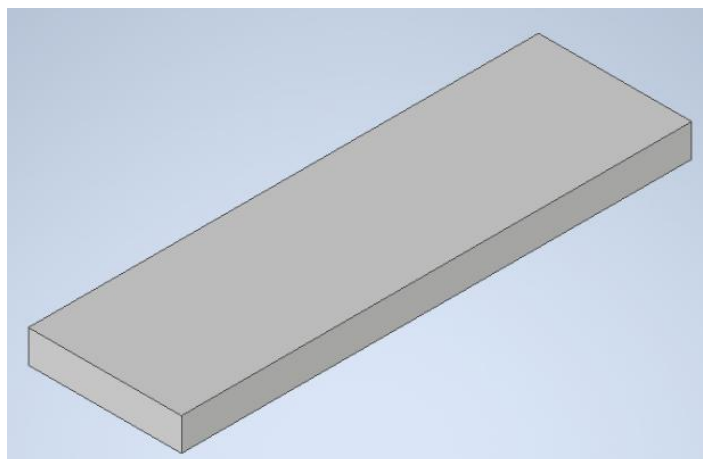


Figura 0-15 Probeta modelada en software 3D

Fuente: Autores.

Luego, se configuro el módulo CAM Inventor para obtener las estrategias de mecanizado unidireccional (para un acabado superficial uniforme) y espiral (optimizando el tiempo y reduciendo cargas en la herramienta) ver figura 3.15, se procede a ajustar los parámetros de mecanizado como velocidad de corte, avance y profundidad, los cuales deben estar en función de las propiedades del material. Mediante el módulo CAM de Inventor, se simuló el proceso para validar las trayectorias de la herramienta, evitar colisiones y garantizar la precisión en el mecanizado.

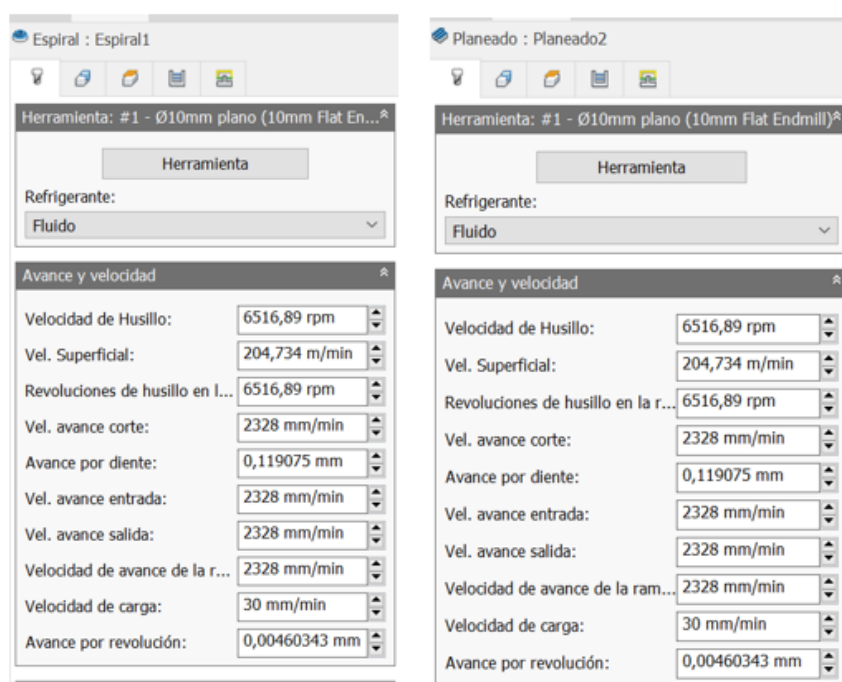


Figura 0-16 Parámetros de operación en las diferentes técnicas de mecanizado

Fuente Autores.

Mediante el módulo CAM de Inventor, se simuló el proceso para validar las trayectorias de la herramienta, evitar colisiones y garantizar la precisión en el mecanizado, lo que nos permite salvaguardar la integridad tanto de la maquina como del material a mecanizar.

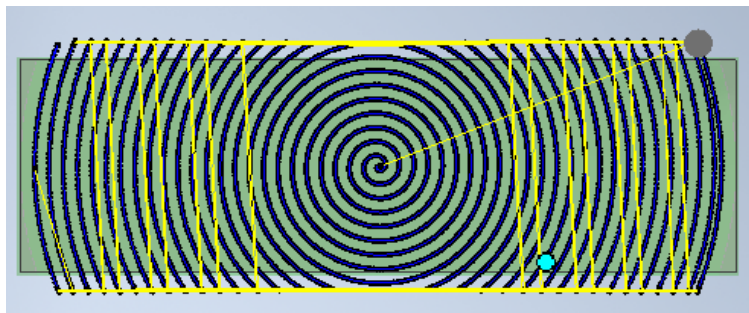


Figura 0-17 Simulación de estrategia en espiral

Fuente: Autores.

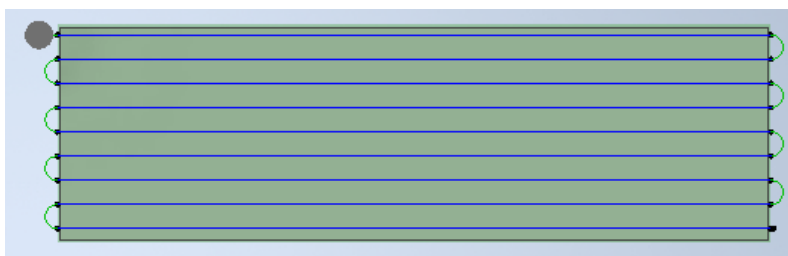


Figura 0-18 Simulación de estrategia unidireccional

Fuente: Autores.

- **Postprocesado**

La etapa de postprocesado de las probetas incluye la inspección dimensional, la revisión de cierto grado de rugosidad superficial y la verificación de la integridad estructural de las piezas. Con las 2 técnicas seleccionadas es posible se pueda observar diferencias en la calidad del acabado, la precisión geométrica y la presencia de defectos, como desprendimiento de viruta o quemaduras. Estos resultados permiten determinar qué estrategia de mecanizado ofrece un mejor balance entre velocidad, calidad y eficiencia en la fabricación de componentes de resina.

Finalmente, se generó el código G para las 2 estrategias, quedando listo para ser cargado en la máquina CNC y ejecutar el planeado de la probeta.

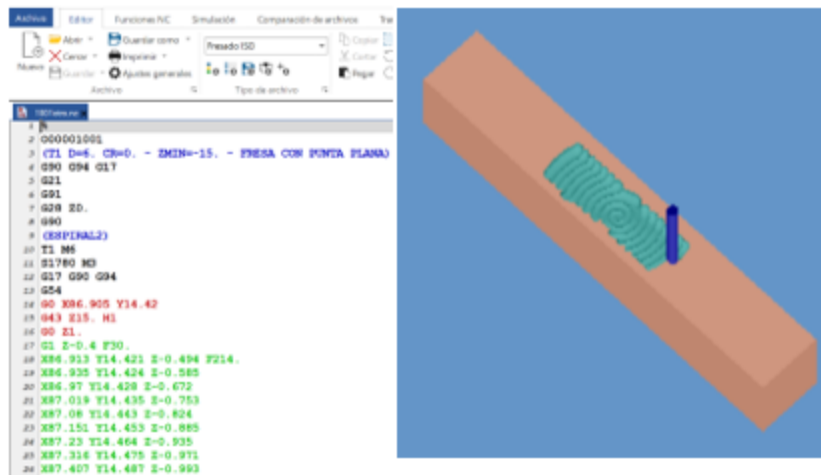


Figura 0-19 Ejecución y simulación de código G

Fuente: Autores.

- **Mecanizado CNC**

Para el proceso de mecanizado CNC de las probetas de resina Sika Block LAB 920, se estableció varios parámetros iniciales como la ubicación de los puntos de referencia, configurando el cero máquina como punto base del sistema y determinando el cero pieza en una esquina superior frontal de cada bloque de resina para garantizar precisión en la ejecución del mecanizado. Las probetas fueron sujetadas firmemente a la mesa de trabajo mediante bridas de sujeción, lo que permitió mantener la estabilidad durante todo el proceso de corte. Se utilizó un control numérico computarizado (CNC) para la ejecución de las trayectorias de fresado, lo que aseguró una operación automatizada y repetible. El código G, previamente generado mediante software de CAM, fue cargado al equipo CNC a través de una interfaz USB, permitiendo ejecutar el programa de maquinado conforme a los parámetros definidos anteriormente para evaluar la maquinabilidad de la resina con alta precisión dimensional y control en el acabado superficial.

3.5 Ensayo de rugosidad

Como parte del proyecto se realizará un ensayo de rugosidad superficial a cada probeta con el objetivo de analizar la calidad del acabado obtenido tras el proceso de fresado CNC con las distintas estrategias de mecanizado seleccionadas anteriormente. Para esto, se utilizará un rugosímetro portátil, que permitirá medir las irregularidades microscópicas de la superficie de las probetas mecanizadas, determinando parámetros como el Ra (rugosidad media aritmética). Este ensayo es útil para evaluar cual es el comportamiento de la resina al mecanizado, ya que una menor rugosidad implica una mayor calidad superficial y precisión dimensional. Los resultados obtenidos permitirán relacionar los parámetros de corte utilizados con el comportamiento del material, con esta información se podrá optimizar el uso de esta resina en procesos productivos que demanden acabados finos y controlados.

- **Equipo para ensayo de rugosidad**

En el proyecto se utilizará el medidor de perfil de superficie Elcometer 224 para realizar las mediciones de rugosidad superficial de las probetas de resina mecanizadas. Este equipo portátil de alta precisión permite obtener valores confiables de parámetros como el perfil medio aritmético (R_a), altura máxima del perfil (R_z), y otros, esto de forma rápida y sin destruir las muestras. El equipo Elcometer 224 emplea un sensor de contacto con punta de carburo de tungsteno con una precisión de medición que garantiza lecturas consistentes en la resina que se encuentra en estudio.



Figura 0-20 Rugosímetro ELCOMETER 224

Fuente: Autores.

Con los datos obtenidos con este equipo se podrá evaluar el acabado superficial de las muestras posterior al fresado CNC, permitiendo así relacionar los resultados con los parámetros de corte empleados y haciendo posible analizar la maquinabilidad de la resina bajo las estrategias de mecanizado.



Figura 0-21 Proceso de medición de rugosidad a probetas

Fuente: Autores.

Como se puede apreciar en la imagen 3.24 el proceso de medición se realiza para cada una de las 19 probetas propuestas para el ensayo, y se lo lleva a cabo tomando medidas de rugosidad en 10 puntos equidistantes y distribuidos de manera uniforme tanto en la parte superior e inferior y en la parte media de la probeta, garantizando un nivel de confiabilidad de los datos y de cada una de las probetas, cabe recalcar que el proceso es repetitivo para cada probeta.

Para la medición y tabulación de los resultados de rugosidad superficial en las probetas, se utilizó el software de medición ElcoMaster, el cual pertenece al sistema de medición Elcometer. Este software permitió la recopilación de los datos obtenidos mediante el medidor de perfil de superficie, con esto se facilita la transferencia directa a un entorno digital para el respectivo análisis de las muestras.

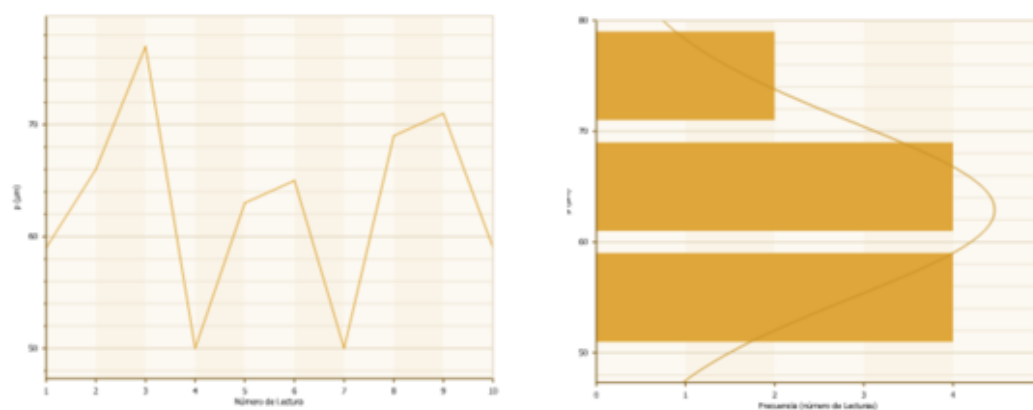


Figura 0-22 Grafica de valores de rugosidad para cada probeta

Fuente: Autores.

Este software (ElcoMaster) ofrece herramientas avanzadas para la, visualización gráfica y generación de informes de los datos recolectados, asegurando la identificación, trazabilidad y confiabilidad de los resultados. Con esta plataforma, fue posible tabular las mediciones de parámetros como R_a y R_z , optimizando el procesamiento de datos de la información obtenida durante el ensayo de rugosidad.

Lote	
Tipo	p
Standard	Immediate
Nombre en Medidor	P200E1
Nombre de Usuario	P200E1
Fecha de Creacion	20/4/2025 18:58:02
Actualizar Fecha	20/4/2025 18:58:02
Fecha de primera lectura	20/4/2025 18:58:39
Fecha de Ultima Lectura	20/4/2025 18:59:12
Estadísticas	
# Lecturas	10
Media	62,90 μm
Maximo	77,0 μm
Minimo	50,0 μm
Desviación Estandar	8,69 μm
Media + 3 σ	88,96 μm
Media - 3 σ	36,84 μm
Coefficiente de Variacion	13,8%

Figura 0-23 Tabulación de valores brindados por software ELCOMASTER

Fuente: Autores.

Entonces con los resultados obtenidos, a continuación, se desarrolla la tabulación de datos y cálculos de índice de maquinabilidad en base a la rugosidad del material.

3.5.1 Cálculo del índice de maquinabilidad según la rugosidad.

Este cálculo se basa en la siguiente ecuación, expuesta en el capítulo anterior:

$$I_M = \frac{R_a (\text{material de referencia})}{R_a (\text{Material})}$$

Donde:

$R_a (\text{Material})$ = Rugosidad obtenida del material

Material de referencia: PVC

$R_a (\text{material de referencia}) = 1.5 \mu\text{m}$

Material	k_s (mm)	C_{mw}
PVC	0.0015	150
Hierro dúctil	0.25	140
Acero bridado	0.45	120

Figura 0-24 Valor de rugosidad de material referencia

Fuente: (Saldarriaga, 2021)

Los datos de rugosidad se obtienen a partir de las mediciones tomadas en el apartado anterior 3.2.9.1

- Probeta P200E1

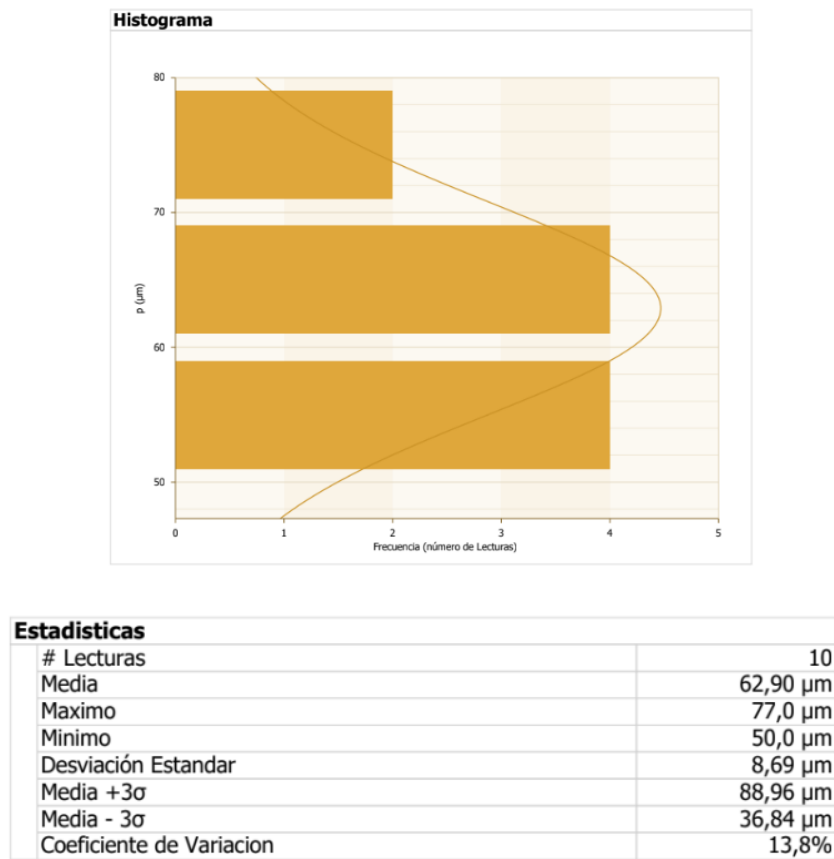


Figura 0-25. Histograma de ensayo y tabla de informe de Inspección – Perfil P200E1

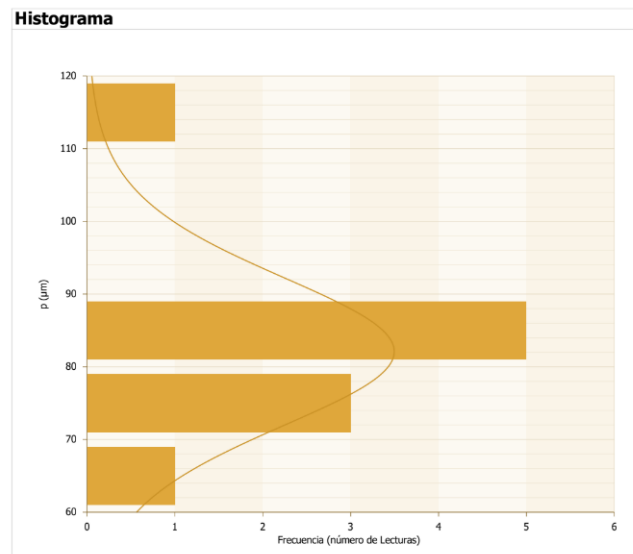
Fuente: Autores.

$$I_M = \frac{R_a(\text{material de ferencia})}{R_a(\text{Material})}$$

$$I_M = \frac{1.5 \mu\text{m}}{62.90 \mu\text{m}}$$

$$I_M = 0.02384$$

- Probeta P200UN1



Estadísticas	
# Lecturas	10
Media	82,10 μm
Maximo	110,0 μm
Minimo	68,0 μm
Desviación Estandar	11,10 μm
Media +3σ	115,40 μm
Media - 3σ	48,80 μm
Coefficiente de Variacion	13,5%

Figura 0-26. Histograma de ensayo y tabla de informe de Inspección – Perfil P200UN1

Fuente: Autores.

$$I_M = \frac{R_a(\text{material de ferencia})}{R_a(\text{Material})}$$

$$I_M = \frac{1.5 \mu\text{m}}{82.10 \mu\text{m}}$$

$$I_M = 0.0183$$

- Probeta P200UN2

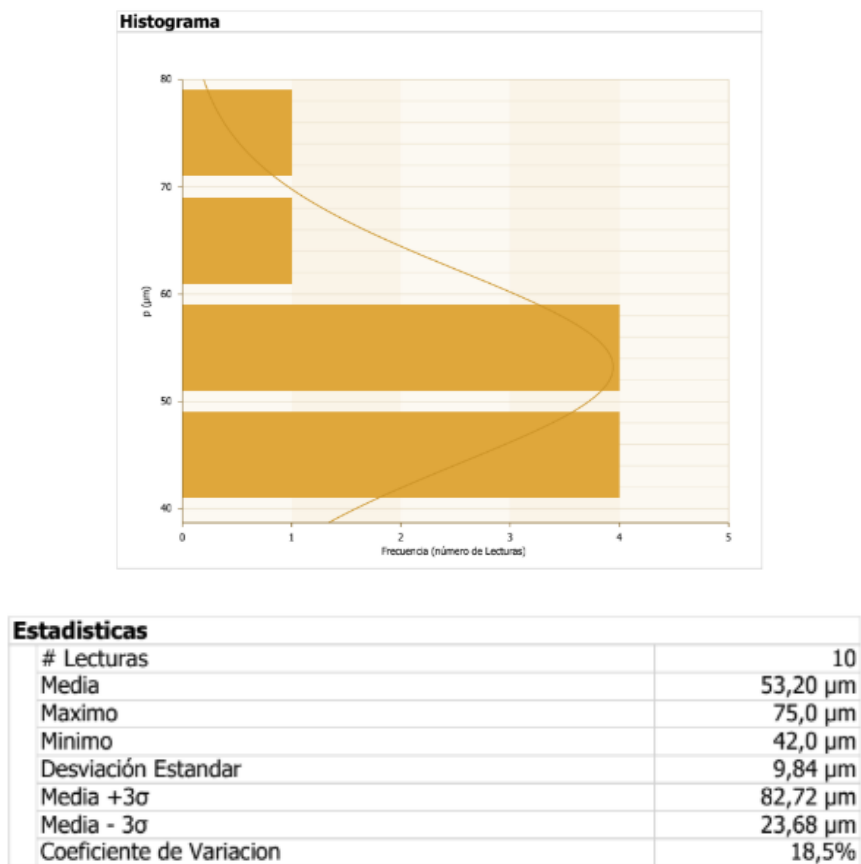


Figura 0-27. Histograma de ensayo y tabla de informe de Inspección – Perfil P200UN2

Fuente: Autores.

$$I_M = \frac{R_a(\text{material de ferencia})}{R_a(\text{Material})}$$

$$I_M = \frac{1.5 \mu\text{m}}{53.20 \mu\text{m}}$$

$$I_M = 0.0282$$

- Probeta P200UN3

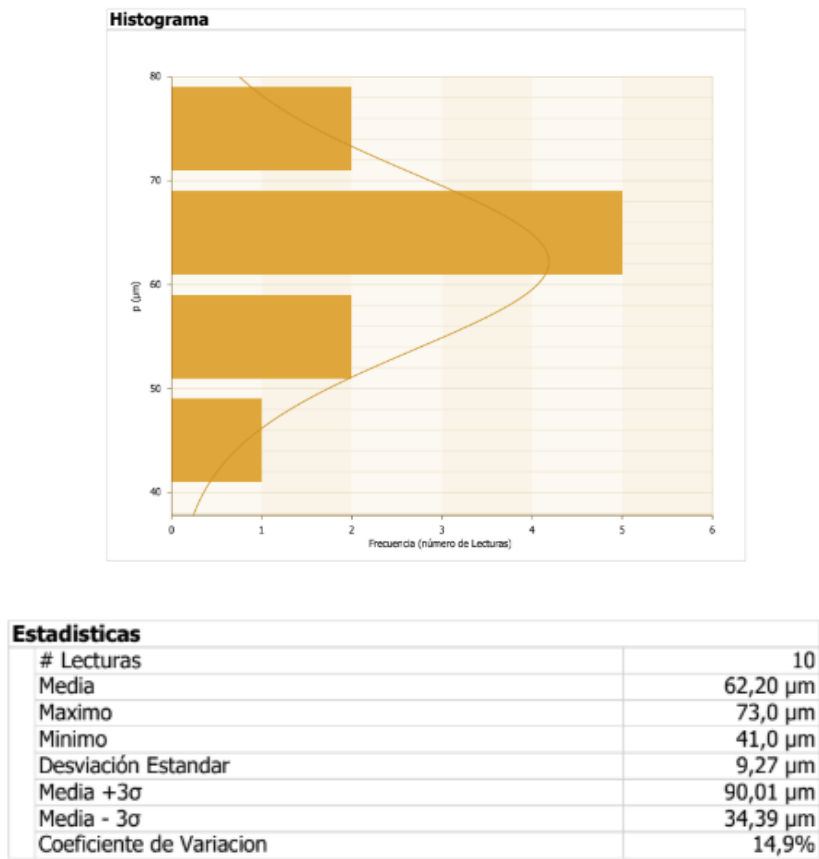


Figura 0-28. Histograma de ensayo y tabla de informe de Inspección – Perfil P200UN3

Fuente: Autores.

$$I_M = \frac{R_a(\text{material de ferencia})}{R_a(\text{Material})}$$

$$I_M = \frac{1.5 \mu\text{m}}{62.20 \mu\text{m}}$$

$$I_M = 0.0241$$

- Probeta P300E1

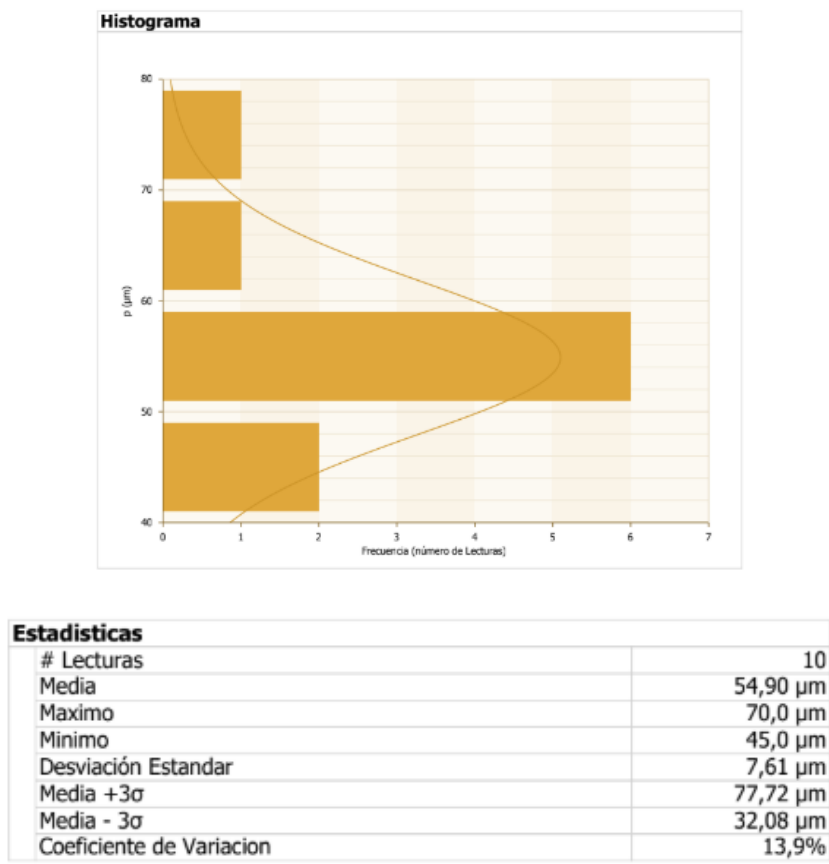


Figura 0-29. Histograma de ensayo y tabla de informe de Inspección – Perfil P300E1

Fuente: Autores.

$$I_M = \frac{R_a(\text{material de ferencia})}{R_a(\text{Material})}$$

$$I_M = \frac{1.5 \mu\text{m}}{54.90 \mu\text{m}}$$

$$I_M = 0.0273$$

- Probeta P300E2

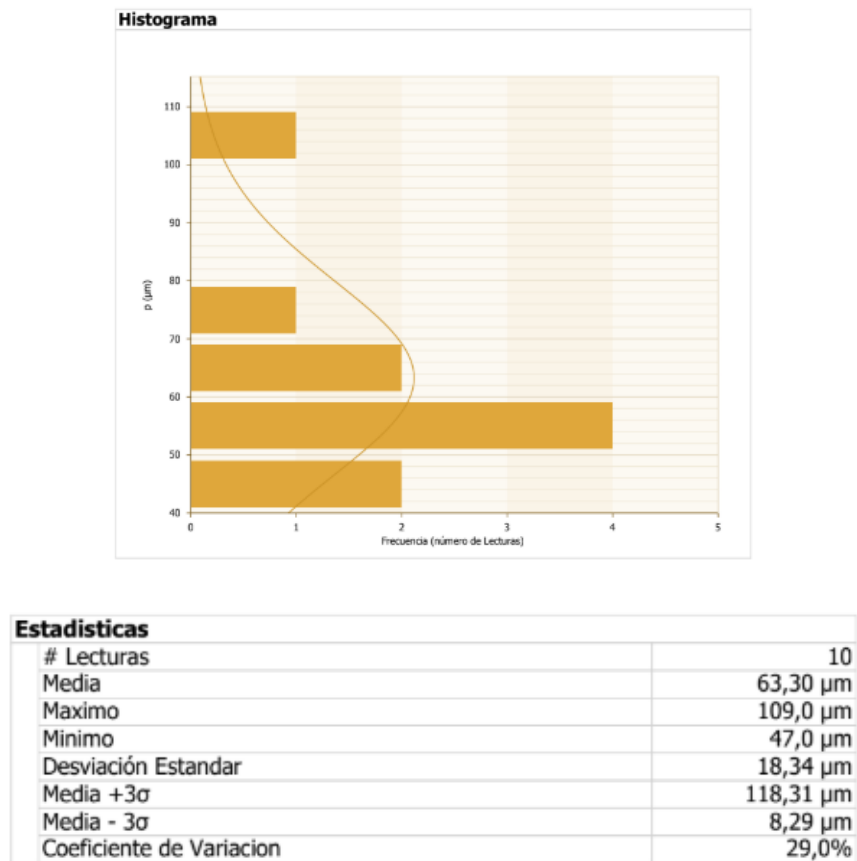


Figura 0-30. Histograma de ensayo y tabla de informe de Inspección – Perfil P300E2

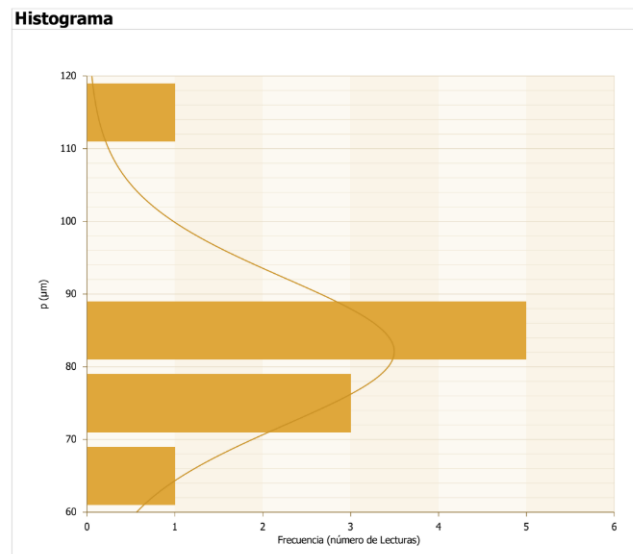
Fuente: Autores.

$$I_M = \frac{R_a(\text{material de ferencia})}{R_a(\text{Material})}$$

$$I_M = \frac{1.5 \mu\text{m}}{63.30 \mu\text{m}}$$

$$I_M = 0.0237$$

- Probeta P300E3



Estadísticas	
# Lecturas	10
Media	82,10 μm
Maximo	110,0 μm
Minimo	68,0 μm
Desviación Estandar	11,10 μm
Media +3σ	115,40 μm
Media - 3σ	48,80 μm
Coefficiente de Variacion	13,5%

Figura 0-31. Histograma de ensayo y tabla de informe de Inspección – Perfil P300E3

Fuente: Autores.

$$I_M = \frac{R_a(\text{material de ferencia})}{R_a(\text{Material})}$$

$$I_M = \frac{1.5 \mu\text{m}}{82.10 \mu\text{m}}$$

$$I_M = 0.0183$$

- Probeta P300UN1

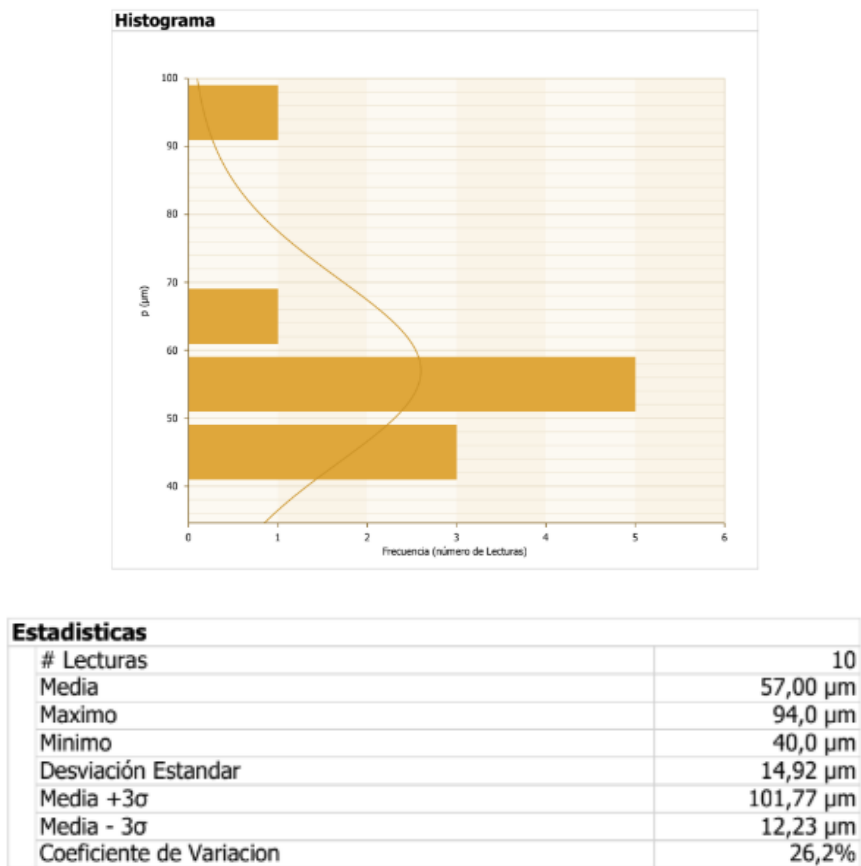


Figura 0-32. Histograma de ensayo y tabla de informe de Inspección – Perfil P300UN1

Fuente: Autores.

$$I_M = \frac{R_a(\text{material de ferencia})}{R_a(\text{Material})}$$

$$I_M = \frac{1.5 \mu\text{m}}{57.00 \mu\text{m}}$$

$$I_M = 0.0263$$

- Probeta P300UN2

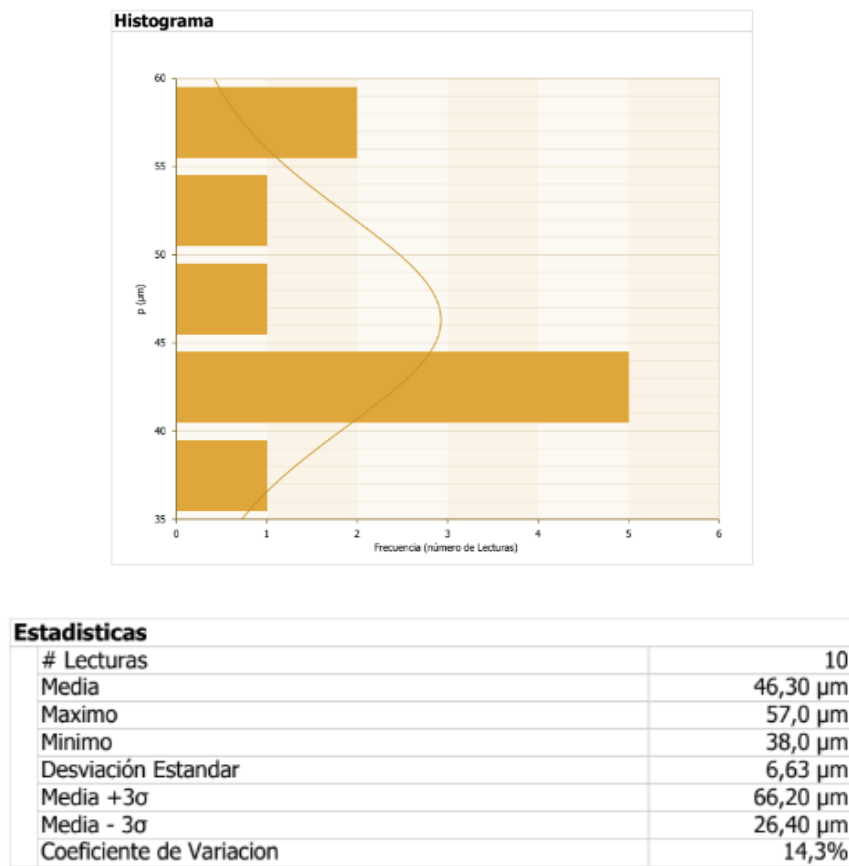


Figura 0-33. Histograma de ensayo y tabla de informe de Inspección – Perfil P300UN2

Fuente: Autores.

$$I_M = \frac{R_a (\text{material de referencia})}{R_a (\text{Material})}$$

$$I_M = \frac{1.5 \mu\text{m}}{46.30 \mu\text{m}}$$

$$I_M = 0.0324$$

- Probeta P300UN3

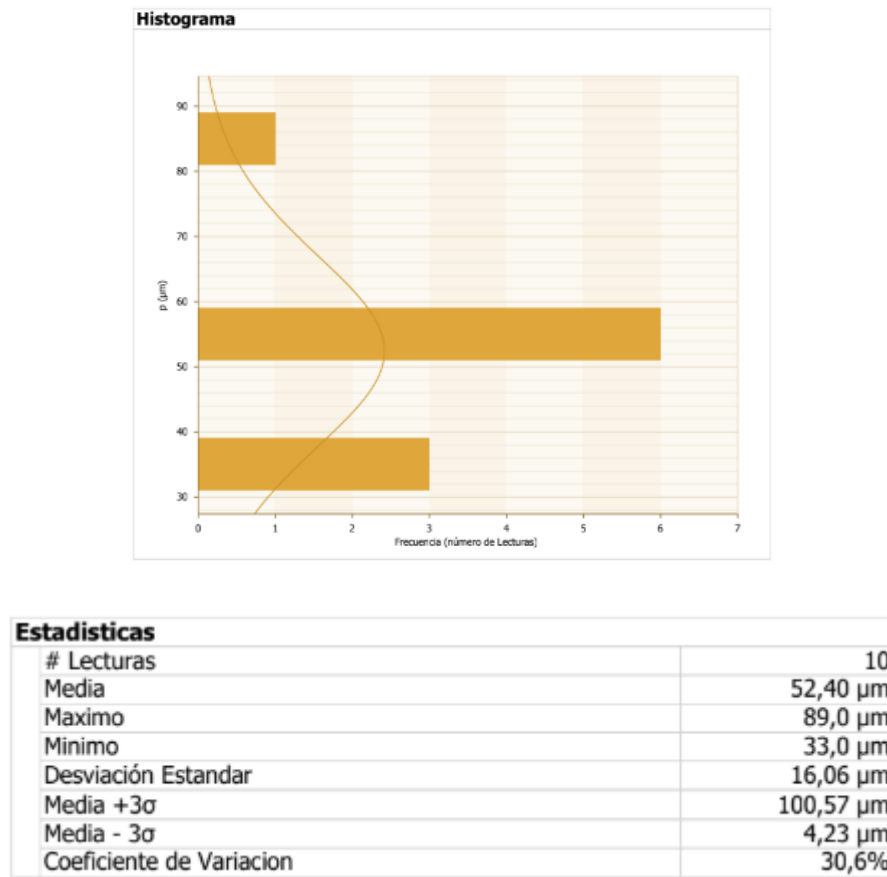


Figura 0-34. Histograma de ensayo y tabla de informe de Inspección – Perfil P300UN3

Fuente: Autores.

$$I_M = \frac{R_a (\text{material de referencia})}{R_a(\text{Material})}$$

$$I_M = \frac{1.5 \mu\text{m}}{52.40 \mu\text{m}}$$

$$I_M = 0.0286$$

- Probeta P400E1

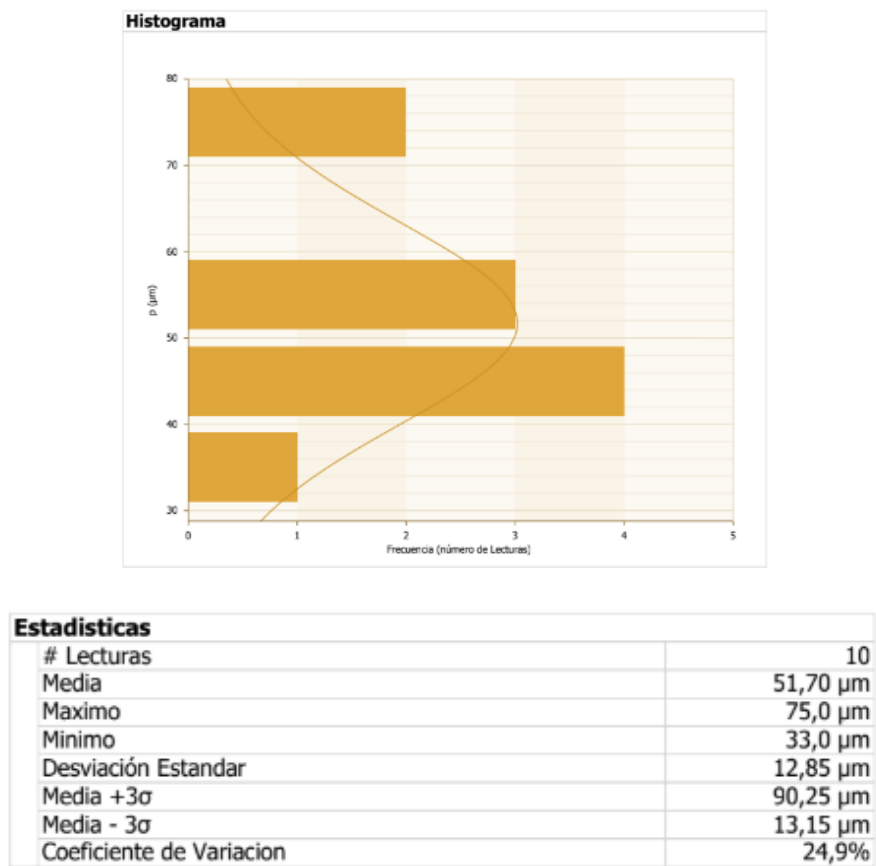


Figura 0-35. Histograma de ensayo y tabla de informe de Inspección – Perfil P400E1

Fuente: Autores.

$$I_M = \frac{R_a(\text{material de ferencia})}{R_a(\text{Material})}$$

$$I_M = \frac{1.5 \mu\text{m}}{55.10 \mu\text{m}}$$

$$I_M = 0.0272$$

- Probeta P400E2

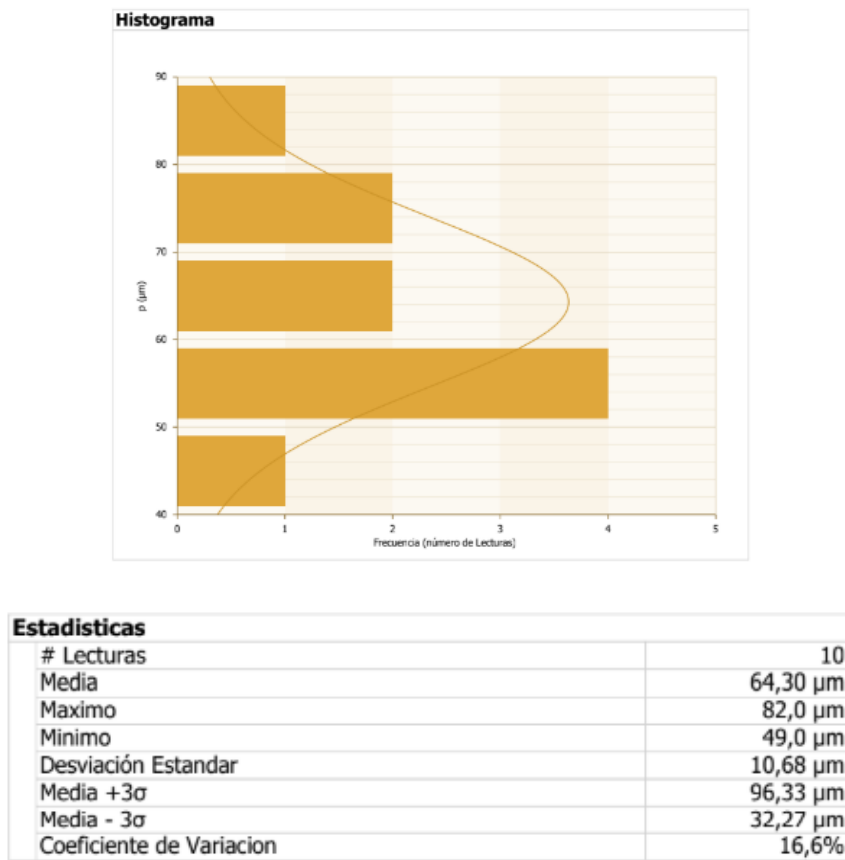


Figura 0-36. Histograma de ensayo y tabla de informe de Inspección – Perfil P400E2

Fuente: Autores.

$$I_M = \frac{R_a(\text{material de ferencia})}{R_a(\text{Material})}$$

$$I_M = \frac{1.5 \mu\text{m}}{64.30 \mu\text{m}}$$

$$I_M = 0.0233$$

- Probeta P400E3

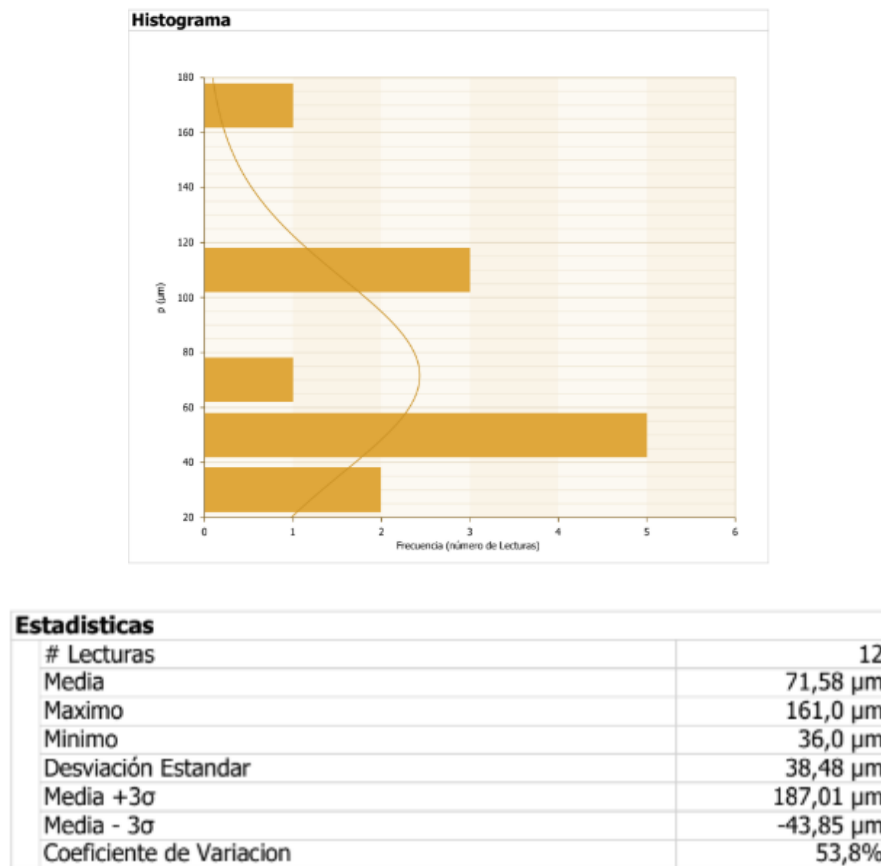


Figura 0-37. Histograma de ensayo y tabla de informe de Inspección – Perfil P400E3

Fuente: Autores.

$$I_M = \frac{R_a(\text{material de ferencia})}{R_a(\text{Material})}$$

$$I_M = \frac{1.5 \mu\text{m}}{71.58 \mu\text{m}}$$

$$I_M = 0.0210$$

- Probeta P400UN1

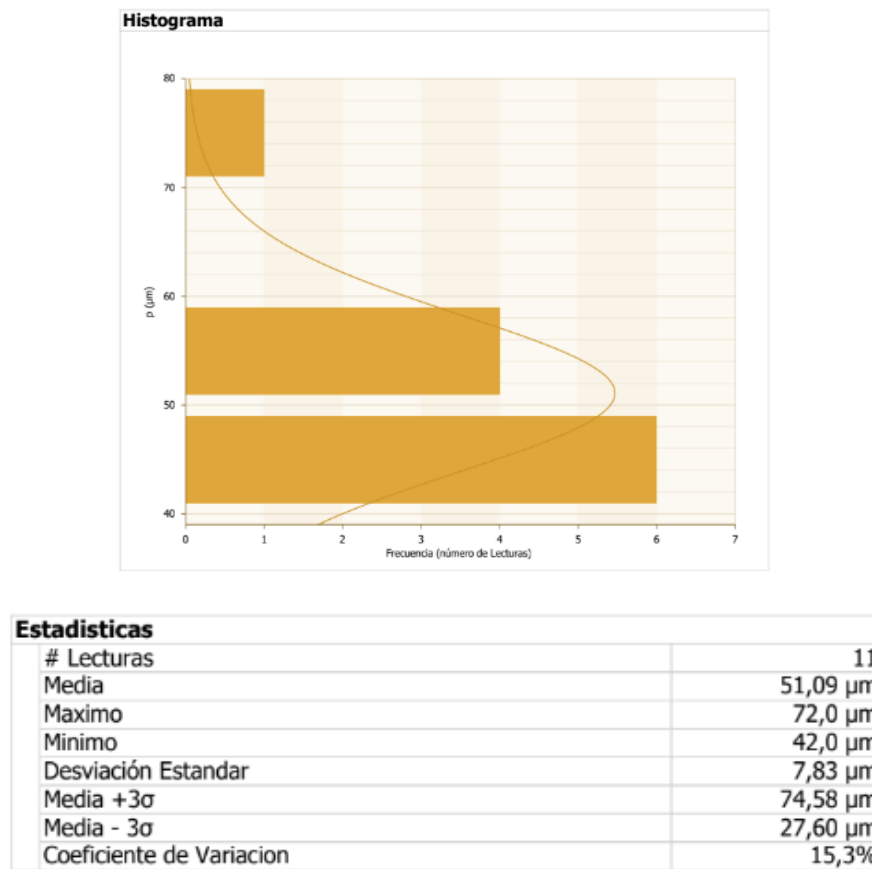


Figura 0-38. Histograma de ensayo y tabla de informe de Inspección – Perfil P400UN1

Fuente: Autores.

$$I_M = \frac{R_a(\text{material de ferencia})}{R_a(\text{Material})}$$

$$I_M = \frac{1.5 \mu\text{m}}{51.09 \mu\text{m}}$$

$$I_M = 0.0294$$

3.5.2 Datos obtenidos de la medición de rugosidad en probetas

Entonces a partir de los datos obtenidos de medición de rugosidad de las probetas se procede a la tabulación de los mismos en tablas designadas por tipo de estrategia con su respectivo avance.

- **Estrategia espiral**

Los datos de rugosidad obtenidos para dicha estrategia de cada una de las probetas con su respectiva identificación o nomenclatura se representan en las tablas subsiguientes.

Tabla 12
Datos de rugosidad para velocidad de 200

Vc 200		
Avance [mm/z]	Ra [μm]	NOMENCALTURA
0	120	NO MAQUINADA
0,2	62,9	P200E1
0,5	59,85	P200E2
0,8	65,3	P200E3

Fuente: Autores.

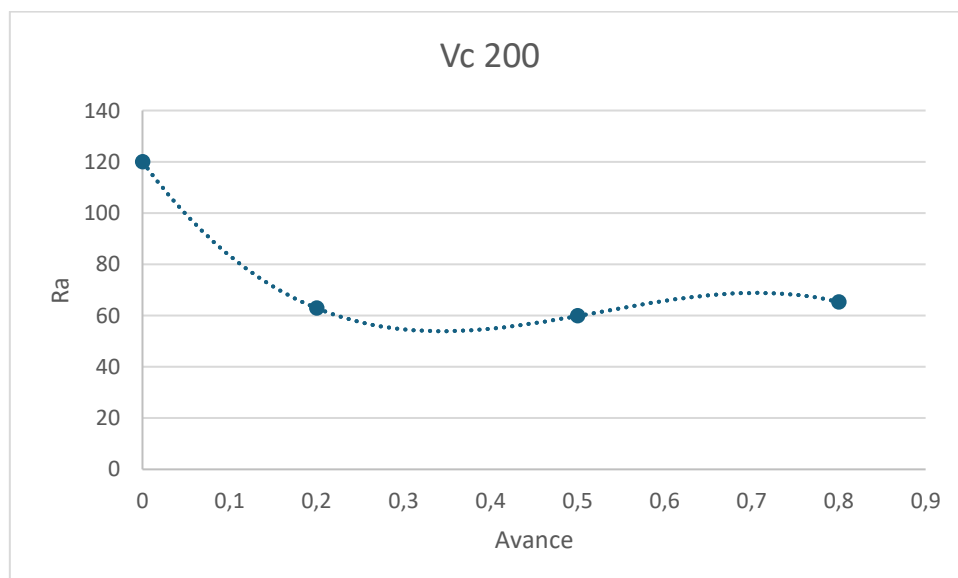


Figura 0-39 Tendencia de rugosidad para velocidad de 200

Fuente: Autores.

Tabla 13
Datos de rugosidad para velocidad de 300

Vc 300		
Avance [mm/z]	Ra [μm]	NOMENCALTURA
0	120	NO MAQUINADA
0,2	54,9	P300E1
0,5	63,3	P300E2
0,8	57,6	P300E3

Fuente: Autores.

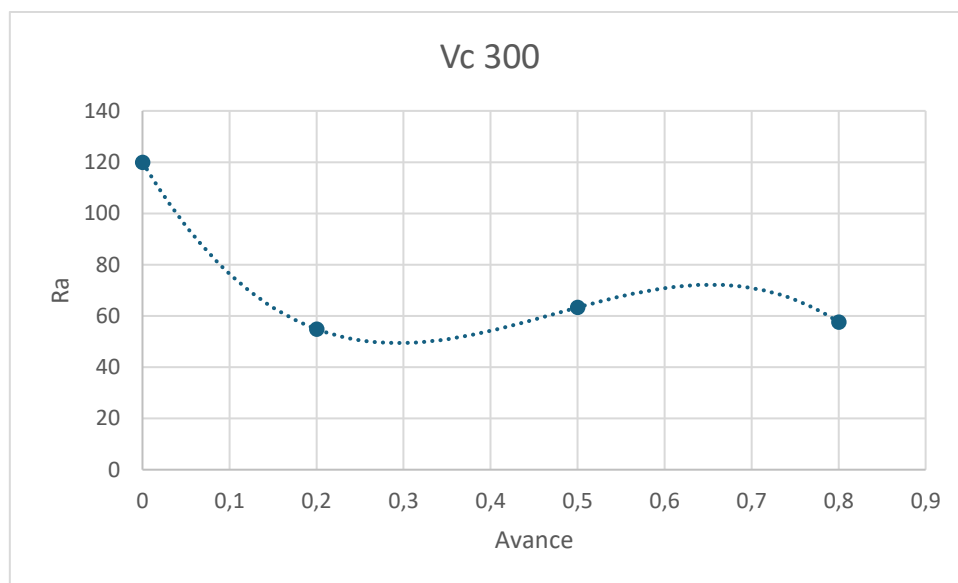


Figura 0-40 Tendencia de rugosidad para velocidad de 300

Fuente: Autores.

Tabla 14
Datos de rugosidad para velocidad de 400

Vc 400		
Avance [mm/z]	Ra [μm]	NOMENCALTURA
0	120	NO MAQUINADA
0,2	55.1	P400E1
0,5	64,3	P400E2
0,8	72,58	P400E3

Fuente: Autores.

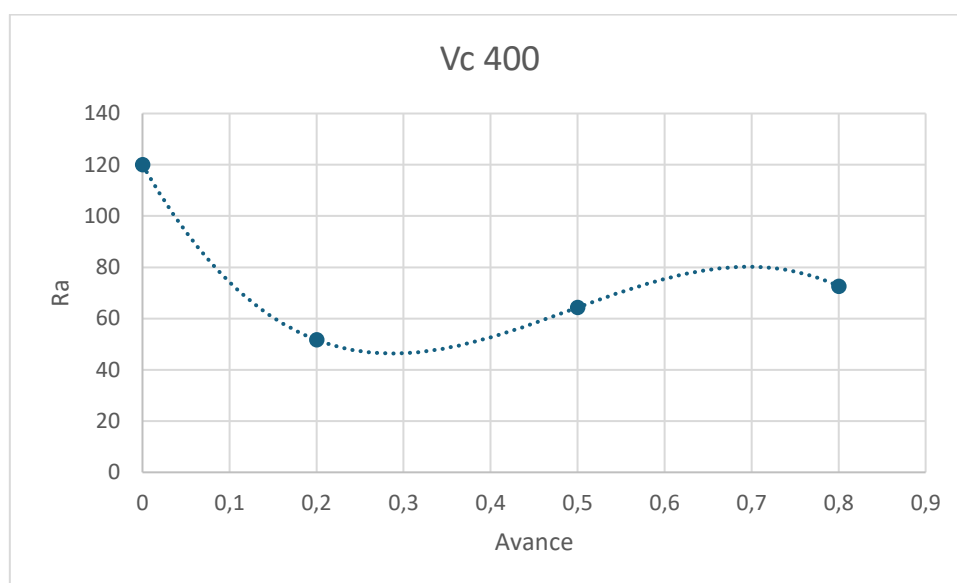


Figura 0-41 Tendencia de rugosidad para velocidad de 400

Fuente: Autores.

- **Estrategia unidireccional**

Los datos de rugosidad obtenidos para dicha estrategia de cada una de las probetas con su respectiva identificación o nomenclatura se representan en las tablas subsiguientes.

Tabla 15
Datos de rugosidad para velocidad de 200

Vc 200		
Avance [mm/z]	Ra [μm]	NOMENCALTURA
0	120	NO MAQUINADA
0,2	82,1	P200UN1
0,5	53,2	P200UN2
0,8	62,2	P200UN3

Fuente: Autores.

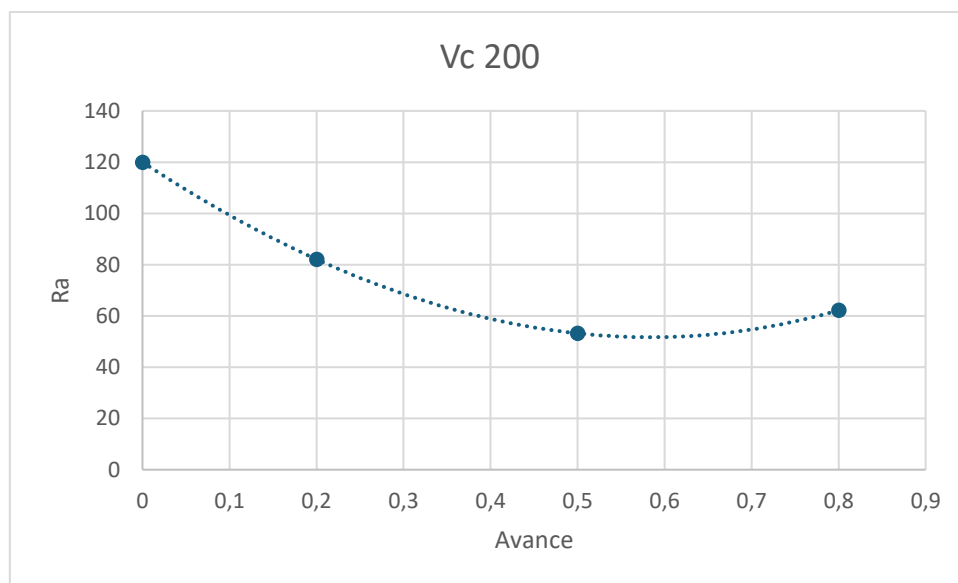


Figura 0-42 Tendencia de rugosidad para velocidad de 200

Fuente: Autores.

Tabla 16
Datos de rugosidad para velocidad de 300

Vc 300		
Avance [mm/z]	Ra [μm]	NOMENCALTURA
0	120	NO MAQUINADA
0,2	57	P300UN1
0,5	46,3	P300UN2
0,8	52,4	P300UN3

Fuente: Autores.

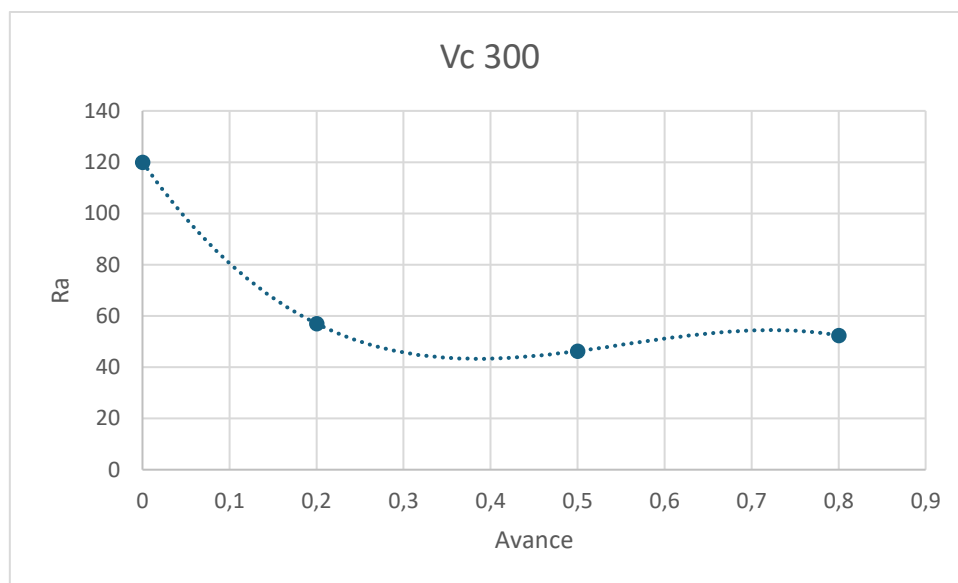


Figura 0-43 Tendencia de rugosidad para velocidad de 300

Fuente: Autores.

Tabla 17
Datos de rugosidad para velocidad de 400

Vc 400		
Avance [mm/z]	Ra [μm]	NOMENCALTURA
0	120	NO MAQUINADA
0,2	51,09	P400UN1
0,5	53,4	P400UN2
0,8	56,2	P400UN3

Fuente: Autores.

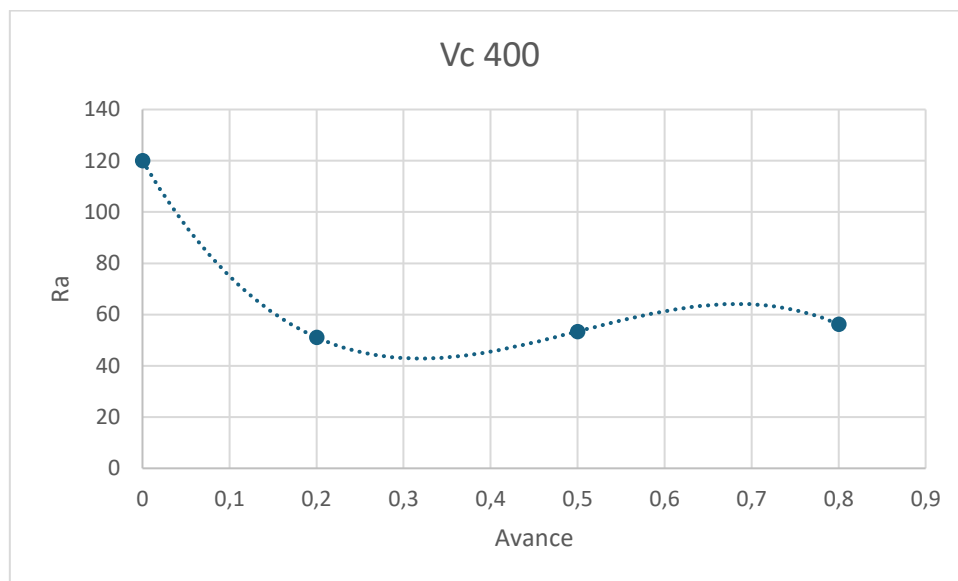


Figura 0-44 Tendencia de rugosidad para velocidad de 400

Fuente: Autores.

Estas graficas se obtiene en función de la estrategia de mecanizado y serán las que se tomen en cuenta para el análisis e interpretación de los mismos.

Como complemento del estudio se adjunta las gráficas de los datos de rugosidad con una variante que sería en función de las velocidades y como variable cada una de las estrategias de mecanizado con su respectivo avance.

- Datos en función de la velocidad de 200 m/min

Tabla 18
Datos de rugosidad con estrategia espiral

ESPIRAL		
Avance [mm/z]	Ra [μm]	NOMENCALTURA
0	120	NO MAQUINADA
0,2	62,9	P200E1
0,5	59,85	P200E2
0,8	65,3	P200E3

Fuente: Autores.

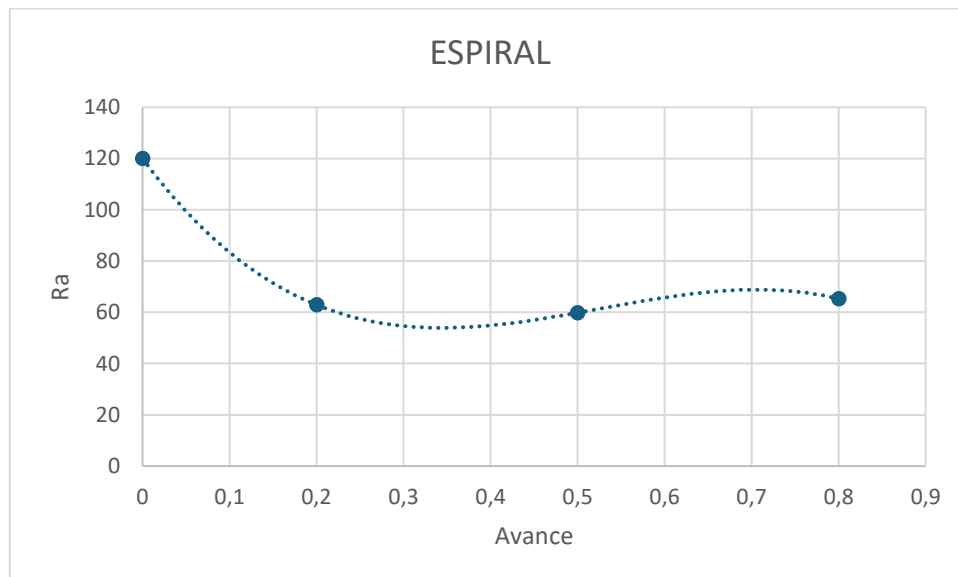


Figura 0-45 Tendencia de valores de rugosidad con estrategia espiral

Fuente: Autores.

Tabla 19
Datos de rugosidad con estrategia unidireccional

UNIDIRECCIONAL		
Avance [mm/z]	Ra [μm]	NOMENCALTURA
0	120	NO MAQUINADA
0,2	82,1	P200UN1
0,5	53,2	P200UN2
0,8	62,2	P200UN3

Fuente: Autores.

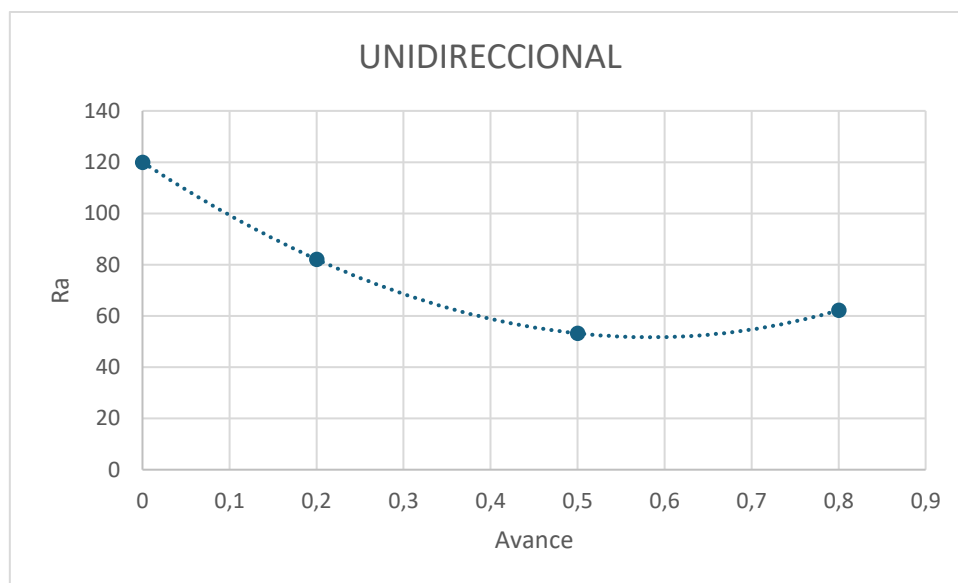


Figura 0-46 Tendencia de valores de rugosidad con estrategia unidireccional

Fuente: Autores.

- Datos en función de la velocidad de 300 m/min

Tabla 20
Datos de rugosidad con estrategia espiral

ESPIRAL		
Avance [mm/z]	Ra [μm]	NOMENCALTURA
0	120	NO MAQUINADA
0,2	54,9	P300E1
0,5	63,3	P300E2
0,8	57,6	P300E3

Fuente: Autores.

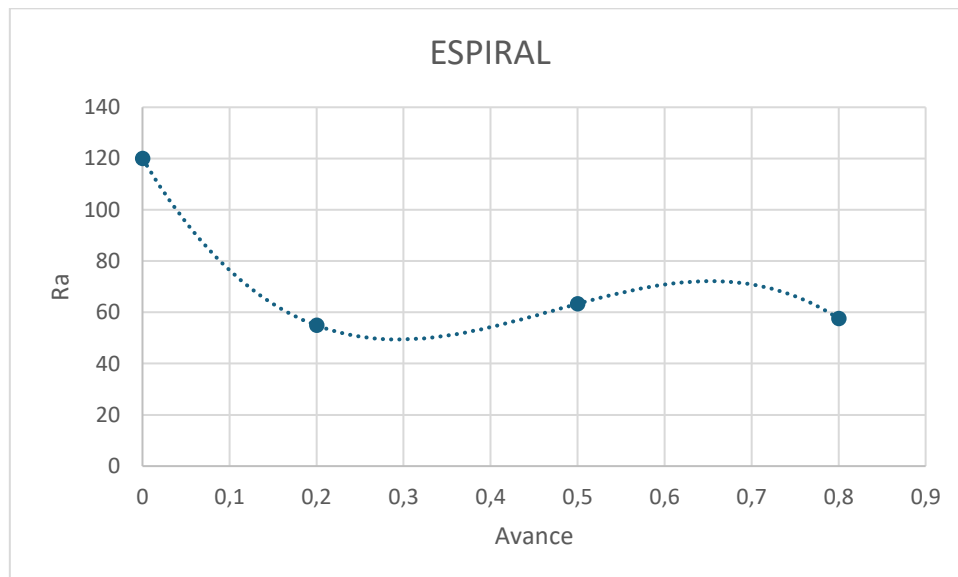


Figura 0-47 Tendencia de valores de rugosidad con estrategia espiral

Fuente: Autores.

Tabla 21
Datos de rugosidad con estrategia unidireccional

UNIDIRECCIONAL		
Avance [mm/z]	Ra [μm]	NOMENCALTURA
0	120	NO MAQUINADA
0,2	57	P300UN1
0,5	46,3	P300UN2
0,8	52,4	P300UN3

Fuente: Autores.

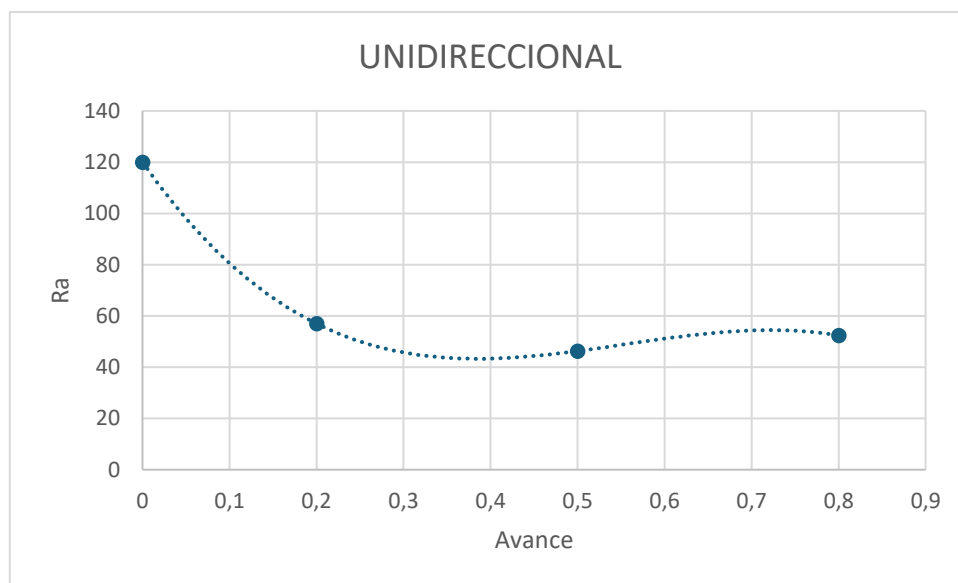


Figura 0-48 Tendencia de valores de rugosidad con estrategia unidireccional

Fuente: Autores.

- Datos en función de la velocidad de 400 m/min

Tabla 22
Datos de rugosidad con estrategia espiral

ESPIRAL		
Avance [mm/z]	Ra [μm]	NOMENCALTURA
0	120	NO MAQUINADA
0,2	55,1	P400E1
0,5	64,3	P400E2
0,8	72,58	P400E3

Fuente: Autores.

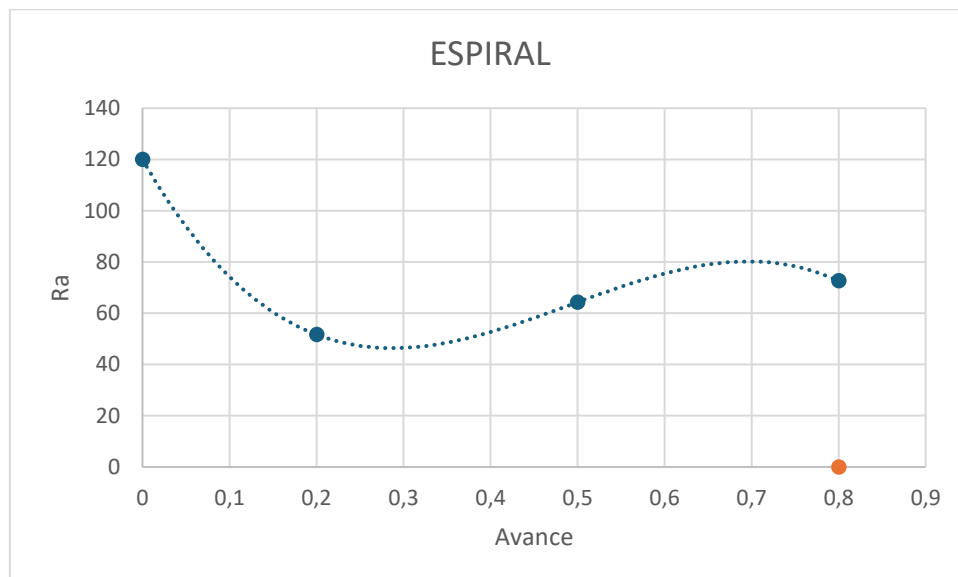


Figura 0-49Tendencia de valores de rugosidad con estrategia espiral

Fuente: Autores.

Tabla 23
Datos de rugosidad con estrategia unidireccional

UNIDIRECCIONAL		
Avance [mm/z]	Ra [μm]	NOMENCALTURA
0	120	NO MAQUINADA
0,2	51,09	P400UN1
0,5	53,4	P400UN2
0,8	56,2	P400UN3

Fuente: Autores.

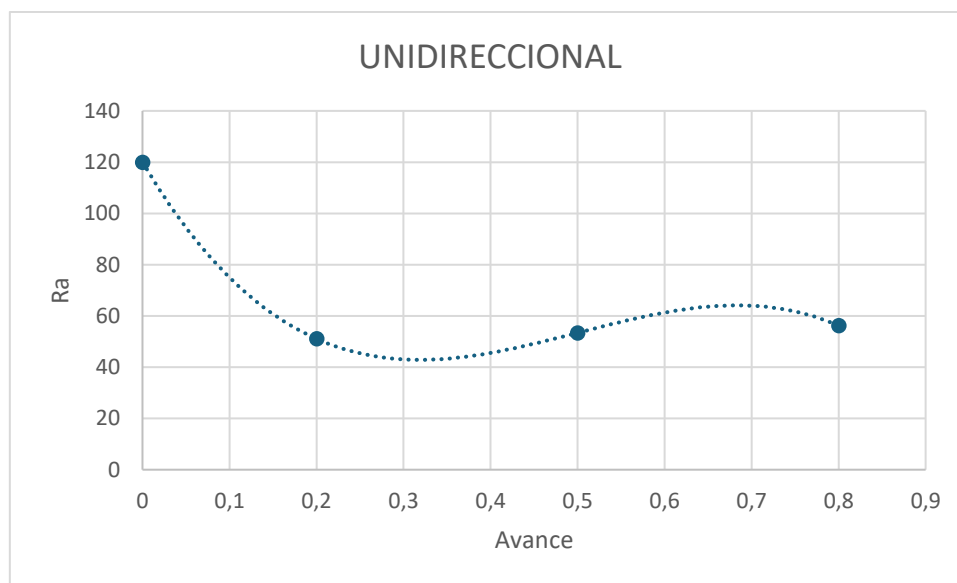


Figura 0-50 Tendencia de valores de rugosidad con estrategia unidireccional

Fuente: Autores.

3.5.3 Tabulación de la rugosidad del material en función de la velocidad y la estrategia de mecanizado

El análisis de los datos obtenidos en cada una de las tablas anteriores se procede a realizarlo en función de la mejor y la peor rugosidad obtenida por cada una de las estrategias de mecanizado y tomado en cuenta todas las probetas de estudio, obteniendo los siguientes resultados.

- **Estrategia unidireccional**

Tabla 24
Comparación de la rugosidad superficial según el avance y la velocidad de corte en mecanizado unidireccional

Vc 200			
Avance [mm/z]	Ra [μm]	NOMENCALTURA	RESULTADO
0.2	82.1	P200UN1	Peor
Vc 300			
Avance [mm/z]	Ra [μm]	NOMENCALTURA	RESULTADO
0.5	46.3	P300UN2	Mejor

Fuente: Autores.

La estrategia unidireccional requiere parámetros más ajustados para alcanzar buenos acabados, siendo más sensible a las condiciones de corte.

La probeta P200UN1 con Vc = 200 RPM, un avance de 0.2 mm/z y Ra = 82.1 μm tubo el peor resultado, la baja velocidad de corte y el bajo avance generan acumulación de material y mala evacuación de viruta, lo que aumenta la rugosidad superficial. La estrategia unidireccional limita la eficiencia del mecanizado al no aprovechar el retorno del husillo para cortar, lo que genera una superficie más irregular.

La probeta P300UN2 con Vc = 300 RPM, un avance de 0.5 mm/z y Ra = 46.3 μm tubo el mejor resultado, el aumento de la velocidad de corte mejora el acabado superficial al reducir la formación de rebabas y el efecto de pliegues. El avance moderado permite una mejor penetración sin generar fuerzas excesivas que dañen la superficie. Aunque es técnica unidireccional, al mejorar Vc y el avance, se mitiga parte del efecto negativo de esta estrategia.

- **Estrategia espiral**

Tabla 25
Comparación de la rugosidad superficial según el avance y la velocidad de corte en mecanizado espiral

Vc 300			
Avance [mm/z]	Ra [μm]	NOMENCALTURA	RESULTADO
0.2	54.9	P300E1	Mejor
Vc 400			
Avance [mm/z]	Ra [μm]	NOMENCALTURA	RESULTADO
0.8	72.58	P400E3	Peor

Fuente: Autores.

La técnica en espiral presenta mejores resultados para condiciones moderadas, pero puede degradar rápidamente el acabado si los parámetros son demasiado agresivos.

La probeta P300E1 con Vc = 300 RPM, un avance de 0.2 mm/z y Ra = 54.9 μm tubo el mejor resultado, aunque el avance es bajo, la técnica en espiral permite una distribución más continua del corte, generando menor vibración y, por tanto, mejor acabado. Esta estrategia aprovecha el movimiento continuo, lo que reduce marcas de transición entre pasadas.

La probeta P400E3 con Vc = 400 RPM, un avance de 0.8 mm/z y Ra = 72.58 μm tubo el peor resultado, un avance muy alto junto con alta velocidad provoca generación excesiva de calor y vibraciones, lo que empeora la calidad superficial. Aunque la técnica en espiral favorece la continuidad del mecanizado, el exceso de velocidad y avance genera microfracturas o marcas en la superficie.

El mejor mecanizado por tener la mejor rugosidad se logró con P300UN2 (46.3 μm) porque la combinación de velocidad media (300 RPM) y avance moderado (0.5 mm/z) permitió un buen equilibrio entre eficiencia y acabado, incluso con estrategia unidireccional.

El peor mecanizado por tener la mayor rugosidad se logró con P200UN1 (82.1 μm) porque una velocidad baja (200 RPM) y avance bajo (0.2 mm/z) provocaron acumulación de material, generación de rebabas y mala evacuación de viruta, perjudicando significativamente la superficie.

Entonces a partir de estos resultados obtenemos las mejores y peores rugosidades a partir de cada una de las dos estrategias de mecanizado, por tal motivo se procede a realizar el ensayo esfuerzo deformación de las cuatro probetas, aumentando la probeta sin mecanizar que nos ayudara a tener una mejor comparación e interpretación de resultados.

3.5.4 Discusión de resultados obtenidos de rugosidad

En base a los resultados obtenidos y a los parámetros aplicados en el ensayo de rugosidad mediante el cual se obtiene el índice de maquinabilidad, se deduce lo siguiente.

- Luego de los ensayos de rugosidad aplicada a cada una de las probetas, el índice de maquinabilidad de la resina sikablock en estudio se ha logrado obtener de la mejor probeta mecanizada y sería un valor de 0.0324, lo cual nos da un indicativo que el material no sería mecanizable.
- La maquinabilidad de un material no se define exclusivamente por el acabado superficial que este produce, sino que involucra múltiples factores, como el desgaste de la herramienta, fuerza de corte requerida, generación de viruta, estabilidad del proceso y calidad dimensional de la pieza mecanizada (Trent & Wright, 2002). Es posible que un material genere una superficie rugosa en condiciones iniciales, pero aun así sea considerado mecanizable si se adapta el proceso a sus propiedades específicas.
- En el caso de la resina en estudio, al ser una resina rígida con posibles cargas minerales y una densidad aparentemente elevada debido a su masa, su comportamiento al corte difiere del PVC. Como lo indican (Serope & Steven, 2014), los materiales poliméricos reforzados o de baja conductividad térmica tienden a presentar una superficie más rugosa si se mecanizan sin refrigeración o con parámetros no optimizados. Esto se debe a la formación de viruta adherida, deformación térmica localizada y/o efecto de la abrasividad de las cargas presentes en la resina.
- Por otra parte, la rugosidad superficial (R_a) depende significativamente de los parámetros de corte, como la velocidad de corte (V_c), el avance por diente (f_z) y la profundidad de pasada (a_p). Según (Boothroyd & Knight, 2006), al aumentar el avance o la profundidad de corte sin modificar la geometría de la herramienta o aplicar refrigeración adecuada, la rugosidad suele incrementarse de forma proporcional. En este caso, la Sika Block fue mecanizada con un avance y profundidad superiores a los del PVC, lo cual justifica en gran parte la diferencia observada en los valores de rugosidad (8–17 μm vs. 1.5 μm).
- Además, estudios aplicados al mecanizado de modelos para fabricación aditiva o moldes indican que una rugosidad superficial de hasta 20 μm es aceptable en fases preliminares de prototipado o fabricación de herramientas blandas (Alsoufi & Elsayed, January 5, 2018). Esto refuerza que, aunque los valores de rugosidad no sean óptimos, el material puede ser utilizado funcionalmente en aplicaciones industriales con requisitos superficiales intermedios o donde se contempla un acabado secundario (lijado, sellado o pintado).

3.6 Ensayo de tracción

Este ensayo se realizará a las probetas con mejor calidad superficial obtenidas en el apartado anterior.

- **Parámetros ensayo de tracción**

Para la evaluación de las propiedades mecánicas de las probetas de resina en estudio, se realizó el ensayo de tracción siguiendo la norma ASTM D638-14. Aquí se establece los requisitos para la preparación, dimensiones y métodos de prueba para polímeros y resinas bajo carga de tracción. Las probetas fueron maquinadas con la geometría que se especifica en el apartado 3.1.2, para luego someterles a esfuerzos de tracción mediante la máquina universal de ensayos marca Shimadzu. Durante el ensayo se registraron parámetros como el esfuerzo máximo, la elongación a la rotura y el módulo de elasticidad, esto aporta al ensayo datos sobre la resistencia y ductilidad del material.



Designation: D638 – 14

Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics¹

This standard is issued under the fixed designation D638; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

Figura 0-51 Norma D638-14 Ensayo de tracción a polímeros

Fuente: ESPOL.

3.6.1 Máquina de ensayo

La máquina de ensayo para la prueba de tracción se lo realizará con una máquina universal de la marca SHIMADZU, proporcionada por ESPOL que se encuentra ubicada en el laboratorio de ensayo de materiales.

La máquina de ensayo universal **Shimadzu AGS-X de 50 kN** es un equipo de alta precisión, en este se puede realizar pruebas de tracción, compresión y flexión en diversos materiales, incluyendo polímeros, metales y compuestos. La capacidad máxima de carga es de 50 kilonewtons, y ofrece una precisión de medición de fuerza dentro de $\pm 0.5\%$ del valor indicado. El sistema de control permite velocidades de ensayo ajustables entre 0.001 y 800 mm/min, con una precisión de velocidad de $\pm 0.1\%$

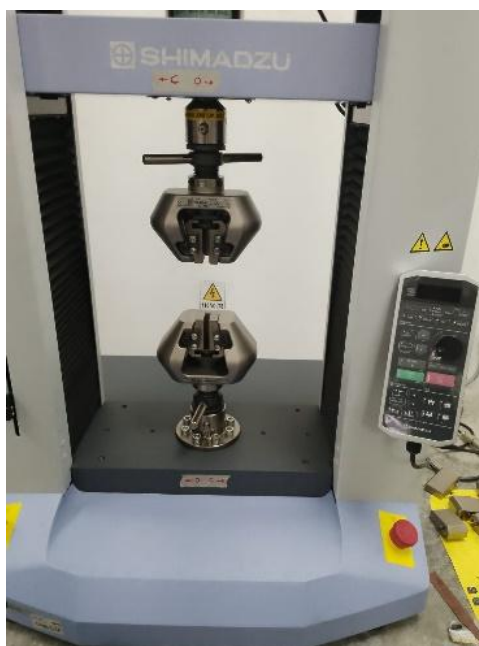


Figura 0-52 Máquina de ensayo universal SHIMADZU

Fuente: ESPOL.

Tabla 26
Características de Máquina universal para ensayo

Características	Especificaciones
Tipo de máquina	Máquina de ensayo universal
Modelo	Shimadzu AGS-X
Capacidad máxima de carga	50 kN
Tipos de ensayo	Tracción, compresión, flexión
Materiales aplicables	Polímeros, metales, compuestos
Precisión de medición de fuerza	$\pm 0.5\%$ del valor indicado
Rango de velocidad de ensayo	0.001 – 800 mm/min
Precisión de velocidad	$\pm 0.1\%$
Sistema de detección de posición	Encoder óptico
Precisión de posicionamiento	± 0.01 mm o $\pm 0.1\%$ del valor indicado (el mayor)
Tasa de adquisición de datos	Hasta 1000 Hz
Software asociado	Para configuración de ensayos y análisis de resultados
Aplicaciones	Investigación y control de calidad

Fuente: ESPOL.

El equipo incluye un encoder óptico para la detección de posición del cabezal móvil, asegurando una precisión de posicionamiento de ± 0.01 mm o $\pm 0.1\%$ del valor dado en pantalla. También cuenta con una tasa de adquisición de datos de hasta 1000 Hz. El software asociado facilita la configuración de ensayos y el análisis de resultados.



Figura 0-53 Encoder óptico

Fuente: ESPOL.

3.6.2 Proceso de ensayo de tracción

La norma de acuerdo con el espécimen seleccionado y debido a las condiciones del material y el tipo de obtención de la probeta es de tipo I, para el cual nos indica una velocidad de 5mm/min, la cual es seteada en la máquina para poder realizar el ensayo, luego de esto se procede a ajustar la probeta en las mordazas de sujeción y de esta manera el ensayo arranca.

Durante el ensayo de tracción realizado a las cinco probetas fabricadas con la resina SikaBlock, se registraron los valores correspondientes utilizando la máquina de ensayo Shimadzu AGS-X. El equipo en mención operó en conjunto con el software Trapezium X, conjuntamente se realizó la adquisición y análisis automatizado de los datos del ensayo. En el transcurso del ensayo se obtuvo valores del esfuerzo máximo, la deformación unitaria y el módulo de elasticidad de cada probeta, estos fueron registrados en el instante del ensayo y exportados para su posterior interpretación y comparación.



Figura 0-54 Probeta colocada en la maquina universal

Fuente: Autores.

Seguidamente el ensayo da inicio, el ensayo continúa hasta la rotura de la probeta. El software Ttrapezium x, recopila los datos del ensayo, en este paso se registra el trazo de la curva, los valores de la fuerza en la escala de Newtons y la elongación de la probeta en milímetros. Se puede visualizar el esfuerzo de ruptura y el fallo de la probeta.

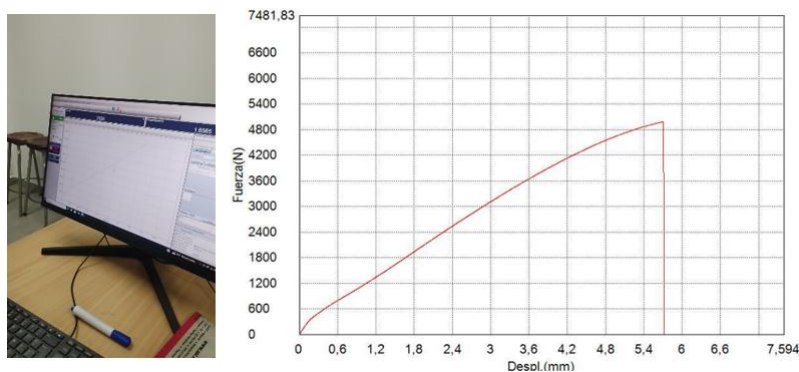


Figura 0-55 Recolección y procesamiento de datos en software Trapezium X

Fuente: Autores.

Se puede visualizar el esfuerzo de ruptura y el fallo de la probeta, esto se evidencia en el desprendimiento de la muestra tal como se indica en la figura 3.56.



Figura 0-56 Rotura de probeta en máquina universal

Fuente: Autores.

Este proceso se repite para cada una de las probetas seleccionadas como mejor y peor en cuanto a rugosidad de cada una de las estrategias y además tomamos en cuenta una probeta sin mecanizar.

3.6.3 Diagrama esfuerzo deformación

Se muestran enseguida los diagramas de esfuerzo deformación de las probetas seleccionadas como resultados mejores y peores para cada estrategia y también para la probeta sin mecanizar.

- **P300E1**

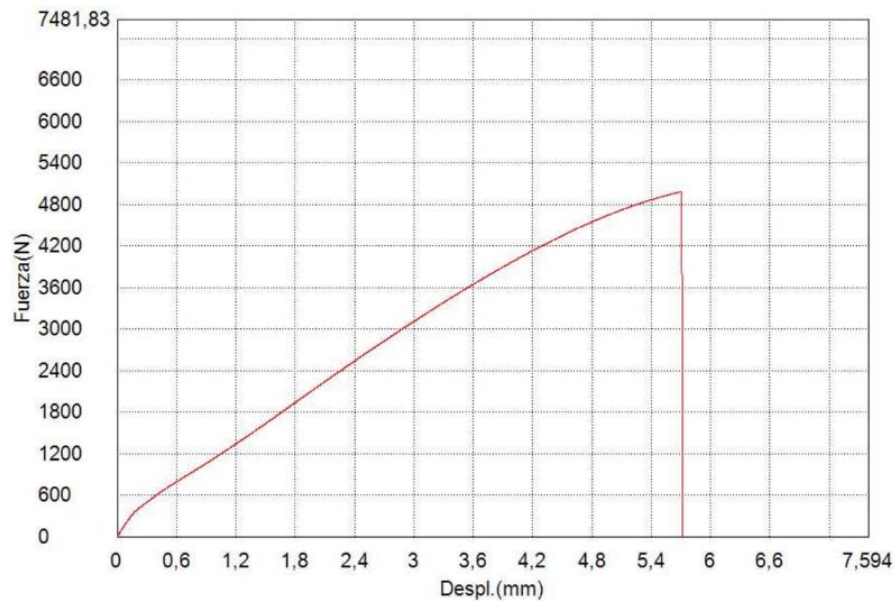


Figura 0-57 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta P300E1 con $V_c = 300$ m/min, un avance de 0.2 mm/z y $R_a = 54.9 \mu\text{m}$

Fuente: Autores.

- **P400E3**

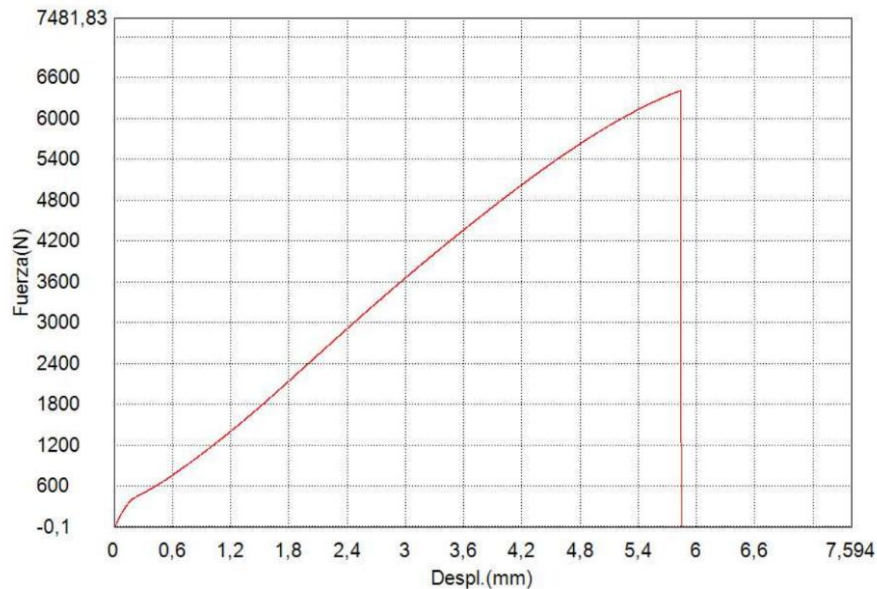


Figura 0-58 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta P400E3 con $V_c = 400$ m/min, un avance de 0.8 mm/z y $R_a = 72.58 \mu\text{m}$

Fuente: Autores.

- **P200UN1**

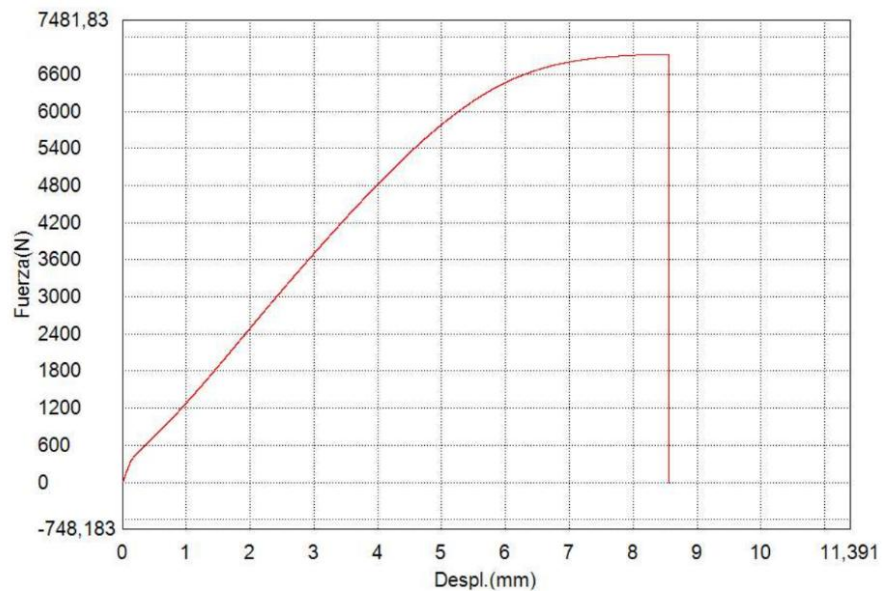


Figura 0-59 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta P200UN1 con $V_c = 200$ m/min, un avance de 0.2 mm/z y $R_a = 82.1 \mu\text{m}$

Fuente: Autores.

- **P300UN2**

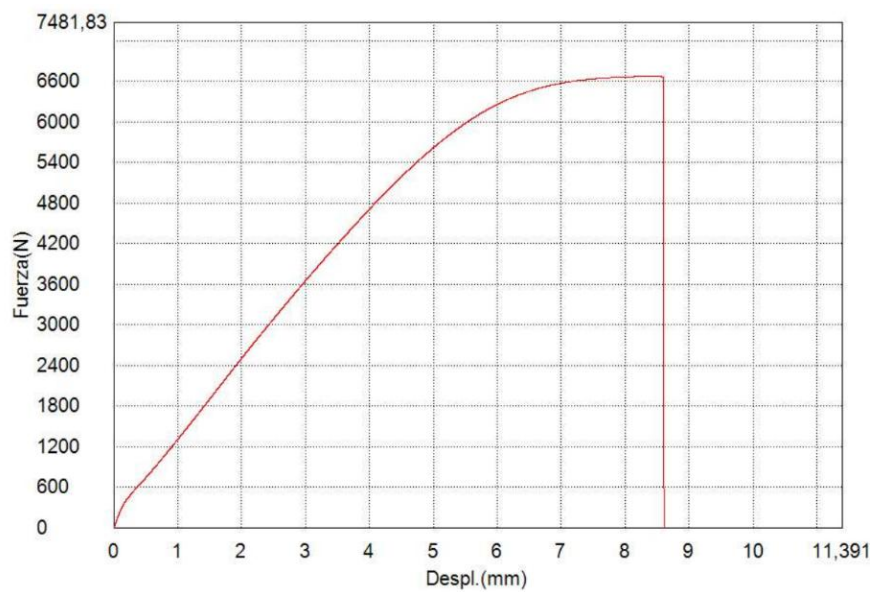


Figura 0-60 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta P300UN2 con $V_c = 300$ m/min, un avance de 0.5 mm/z y $R_a = 46.3 \mu\text{m}$

Fuente: Autores.

- **Probeta sin mecanizar - SM**

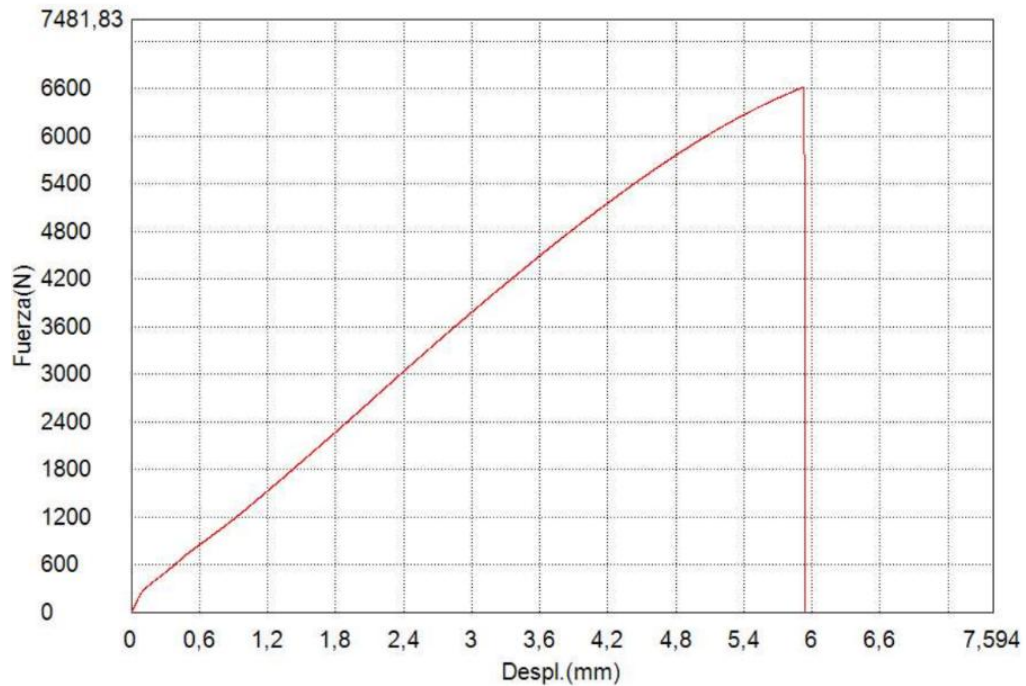


Figura 0-61 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta sin mecanizar

Fuente: Autores.

- **Datos proporcionados: PROBETA P200UN1**

Ancho de la probeta (b): 12,2 mm

Espesor de la probeta (h): 12,63 mm

Longitud calibrada (L_0): 50 mm

Fuerza máxima (F_{max}): ≈ 5400 N

Desplazamiento máximo (ΔL): $\approx 5,7$ mm

$$\text{Área de sección transversal} = b \times h = 12,2 \text{ mm} \times 12,63 \text{ mm} = 154,086 \text{ mm}^2$$

Cálculo de esfuerzo máximo:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A} = \frac{5400N}{154.086 \text{ mm}^2} = 35.05 \text{ MPa}$$

Cálculo de la deformación unitaria:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_o} = \frac{5.7mm}{50mm} = 0.114 = 11.4\%$$

Cálculo de módulo de elasticidad:

El espacio de la zona lineal según la gráfica es de 0-3 mm de desplazamiento, a los 3 mm la fuerza equivalente es de 3000N.

Deformación a 3 mm:

$$\epsilon = \frac{3}{50} = 0.06$$

Esfuerzo:

$$\sigma = \frac{3000 \text{ N}}{154.086 \text{ m}^2} = 19.47 \text{ MPa}$$

Módulo de elasticidad:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{19.47 \text{ MPa}}{0.06} = 324.5 \text{ MPa}$$

Ensayo de tracción de probeta de resina SikaBlock LAB 920 identificado como E1 se realizó el día 25 de abril de 2025 a las 11h15 am se realizó en el laboratorio de sólidos, un ensayo de tracción a una probeta plana de resina SikaBlock LAB 920 utilizando la máquina universal Shimadzu AGS-X, con velocidad de carga de 5 mm/min y software Trapezium X para la adquisición y procesamiento de datos.

La probeta tenía una longitud calibrada de 50 mm, un ancho de 12,2 mm y un espesor de 12,63 mm, lo que dio como resultado un área de sección transversal de 154,09 mm².

Durante el ensayo, se registró una fuerza máxima de tracción (según gráfico) de 5400 N, correspondiente a un esfuerzo máximo de 35,05 MPa.

La deformación unitaria total al momento de la fractura fue aproximadamente 11,4 %, se puede observar un comportamiento inicialmente elástico seguido de una zona plástica antes de la rotura. Luego en la zona lineal de la curva esfuerzo-deformación, se estimó por medio de cálculo el módulo de elasticidad con valor de 324,5 MPa.

El comportamiento del material sugiere que la resina SikaBlock LAB 920 muestra E1 posee características mecánicas de un polímero con resistencia moderada a la tracción y una transición limitada entre las fases elástica y plástica.

La curva fuerza-deformación obtenida mostró un comportamiento elástico claramente definido hasta aproximadamente los 3 mm de desplazamiento. Posteriormente, se evidenció una ligera zona plástica antes de que ocurriera la fractura a los 5,7 mm de desplazamiento. La rotura fue súbita, lo que indica que el material presenta un comportamiento frágil con una limitada capacidad de deformación plástica. El esfuerzo máximo de 35,05 MPa confirma que se trata de un material con resistencia adecuada para aplicaciones no estructurales de alta carga, y el módulo de elasticidad de 324,5 MPa es coherente con materiales tipo resina rígida.

- **Datos proporcionados: PROBETA E1**

Ancho de la probeta (b): 12,2 mm

Espesor de la probeta (h): 9,73 mm

Longitud calibrada (L_0): 50 mm

Fuerza máxima (F_{max}): ≈ 5000 N

Desplazamiento máximo (ΔL): $\approx 5,6$ mm

$$\text{Área de sección transversal} = b \times h = 12.2\text{mm} \times 9.73\text{mm} = 118.81 \text{ mm}^2$$

Cálculo de esfuerzo máximo:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A} = \frac{5000\text{N}}{118.71 \text{ mm}^2} = 42.12 \text{ MPa}$$

Cálculo de la deformación unitaria:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_o} = \frac{5.6mm}{50mm} = 0.112 = 11.2\%$$

Cálculo de módulo de elasticidad:

El espacio de la zona lineal según la gráfica es de 0-3 mm de desplazamiento, a los 3 mm la fuerza equivalente es de 3000N.

Deformación a 3 mm:

$$\epsilon = \frac{3}{50} = 0.06$$

Esfuerzo:

$$\sigma = \frac{3000 \text{ N}}{118.71 \text{ m}^2} = 25.27 \text{ MPa}$$

Módulo de elasticidad:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{25.27 \text{ MPa}}{0.056} = 450.7 \text{ MPa}$$

La muestra E1 de resina SikaBlock LAB 920 mostró un comportamiento frágil bajo carga de tracción, con una resistencia máxima de aproximadamente 42.12 MPa y una deformación unitaria de 11.2%.

El módulo de elasticidad estimado fue de 450.7 MPa, lo cual sugiere que el material posee buena rigidez, pero con capacidad limitada de deformación plástica antes de la fractura.

Los resultados obtenidos la posicionan como un material adecuado para aplicaciones estructurales de carga baja o moderada donde se privilegie la rigidez sobre la ductilidad.

- **Datos proporcionados: PROBETA E2**

Ancho de la probeta (b): 12,2 mm

Espesor de la probeta (h): 13,5 mm

Longitud calibrada (L_0): 50 mm

Fuerza máxima (F_{max}): ≈ 6400 N

Desplazamiento máximo (ΔL): $\approx 5,8$ mm

$$\text{Área de sección transversal} = b \times h = 12.2 \text{ mm} \times 13.5 \text{ mm} = 164.7 \text{ mm}^2$$

Cálculo de esfuerzo máximo:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A} = \frac{6400 \text{ N}}{164.7 \text{ mm}^2} = 38.85 \text{ MPa}$$

Cálculo de la deformación unitaria:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{5.8 \text{ mm}}{50 \text{ mm}} = 0.116 = 11.6\%$$

Cálculo de módulo de elasticidad:

El espacio de la zona lineal según la gráfica es de 0-3 mm de desplazamiento, a los 3 mm la fuerza equivalente es de 3600N.

Deformación a 3 mm:

$$\epsilon = \frac{3}{50} = 0.06$$

Esfuerzo:

$$\sigma = \frac{3600 \text{ N}}{164.7 \text{ mm}^2} = 21.85 \text{ MPa}$$

Módulo de elasticidad:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{21.85 \text{ MPa}}{0,06} = 364.16 \text{ MPa}$$

La muestra E2 de resina SikaBlock LAB 920 mostró un comportamiento frágil bajo carga de tracción, con una resistencia máxima de aproximadamente 38.85 MPa y una deformación unitaria de 11.6%.

El módulo de elasticidad estimado fue de 364.16 MPa, lo cual sugiere que el material posee buena rigidez, pero con capacidad limitada de deformación plástica antes de la fractura.

Los resultados obtenidos la posicionan como un material adecuado para aplicaciones estructurales de carga baja o moderada donde se privilegie la rigidez sobre la ductilidad.

- **Datos proporcionados: PROBETA UN2**

Ancho de la probeta (b): 12,2 mm

Espesor de la probeta (h): 11,85 mm

Longitud calibrada (L_0): 50 mm

Fuerza máxima (F_{max}): $\approx$ 6650 N

Desplazamiento máximo (ΔL): $\approx$ 8,6 mm

$$\text{Área de sección transversal} = b \times h = 12.2 \text{ mm} \times 11.85 \text{ mm} = 144.57 \text{ mm}^2$$

Cálculo de esfuerzo máximo:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A} = \frac{6650 \text{ N}}{144.57 \text{ mm}^2} = 46.0 \text{ MPa}$$

Cálculo de la deformación unitaria:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_o} = \frac{8.6mm}{50mm} = 0.172 = 17.2\%$$

Cálculo de módulo de elasticidad:

El espacio de la zona lineal según la gráfica es de 0-3 mm de desplazamiento, a los 3 mm la fuerza equivalente es de 3000N.

Deformación a 3 mm:

$$\epsilon = \frac{3.5}{50} = 0.07$$

Esfuerzo:

$$\sigma = \frac{3800 N}{144.57 m^2} = 26.28 MPa$$

Módulo de elasticidad:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{26.28 MPa}{0.07} = 375.42 MPa$$

La muestra UN2 de resina SikaBlock LAB 920 mostró un comportamiento frágil bajo carga de tracción, con una resistencia máxima de aproximadamente 46 MPa y una deformación unitaria de 17.2%.

El módulo de elasticidad estimado fue de 375.42 MPa, lo cual sugiere que el material posee buena rigidez, pero con capacidad limitada de deformación plástica antes de la fractura.

Los resultados obtenidos la posicionan como un material adecuado para aplicaciones estructurales de carga baja o moderada donde se privilegie la rigidez sobre la ductilidad.

3.6.4 Discusión de resultados obtenidos del ensayo de tracción

Los ensayos de tracción nos arrojan una gráfica de ruptura de material frágil y dándonos como resultados para las mejores probetas en este caso las que tienen por nomenclatura P300E1 y P300UN2 los siguientes valores:

- P300E1

Esfuerzo máximo:

$$\sigma_{max} = 2.12 \text{ MPa}$$

Deformación unitaria:

$$\epsilon = 0.112 = 11.2\%$$

Módulo de Elasticidad:

$$E = 450.7 \text{ MPa}$$

- P300UN2

Esfuerzo máximo:

$$\sigma_{max} = 46.0 \text{ MPa}$$

Deformación unitaria:

$$\epsilon = 0.172 = 17.2\%$$

Módulo de Elasticidad:

$$E = 375.42 \text{ MPa}$$

Se puede preciar que para este material el mejor valor esta con la estrategia unidireccional.

3.7 Tiempo de mecanizado

Un factor importante en el desarrollo de este tipo de proyectos como los de mecanización de material es el tiempo de mecanizado que nos ayuda con la optimización del proceso en cuanto a su tiempo de desarrollo.

Este desarrollo es un valor puntual por cada estrategia y velocidad de mecanizado. A continuación, se muestra el valor de los datos obtenidos:

3.7.1 Estrategia espiral

Tabla 27
Tiempo de mecanizado para velocidad de 200 con sus respectivos avances

Vc 200		
Avance [mm/z]	Tiempo [min]	NOMENCALTURA
0,2	7,2	P200E1
0,5	7,9	P200E2
0,8	8,4	P200E3

Fuente: Autores.

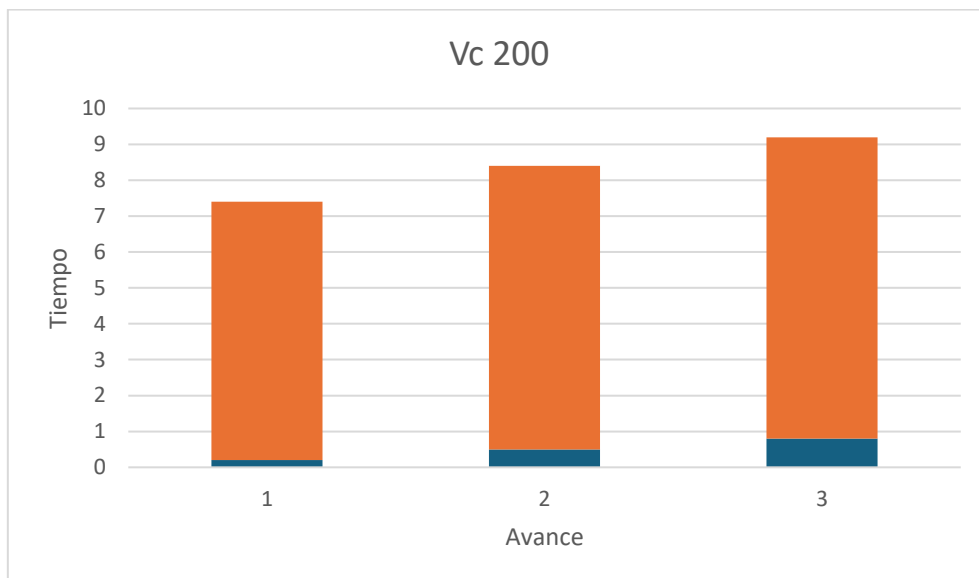


Figura 0-62 Esquema de tiempo de mecanizado para velocidad de 200

Fuente: Autores.

Tabla 28
Tiempo de mecanizado para velocidad de 300 con sus respectivos avances

Vc 300		
Avance [mm/z]	Tiempo [min]	NOMENCALTURA
0,2	9,3	P300E1
0,5	10,2	P300E2
0,8	10,9	P300E3

Fuente: Autores.

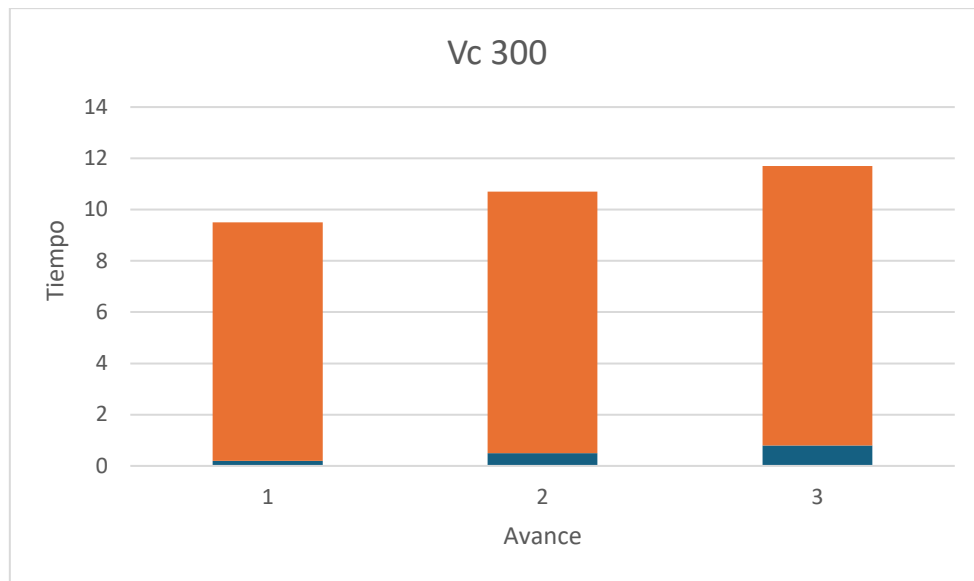


Figura 0-63 Esquema de tiempo de mecanizado para velocidad de 300

Fuente: Autores.

Tabla 29
Tiempo de mecanizado para velocidad de 400 con sus respectivos avances

Vc 400		
Avance [mm/z]	Tiempo [min]	NOMENCALTURA
0,2	11,1	P400E1
0,5	11,9	P400E2
0,8	12,5	P400E3

Fuente: Autores.

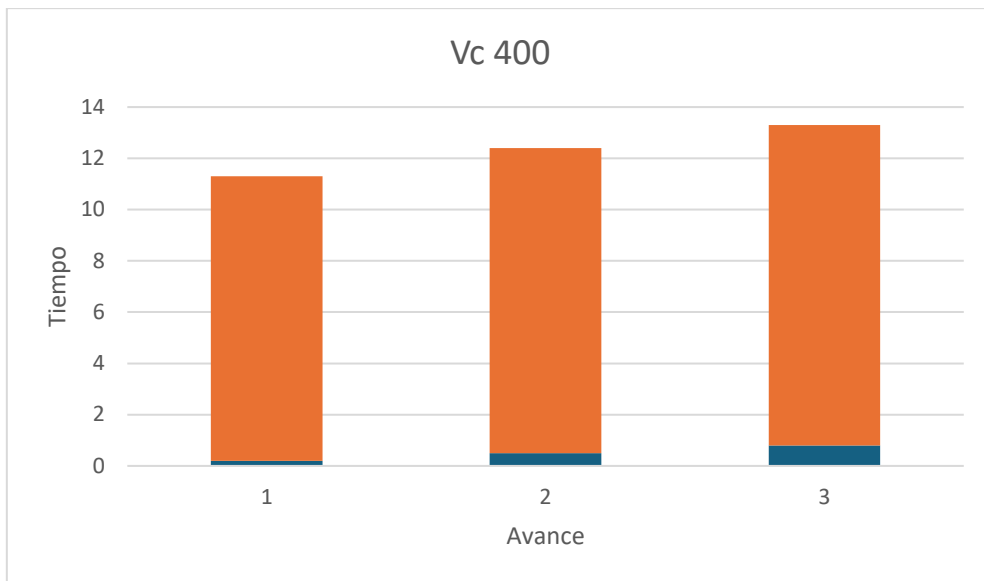


Figura 0-64 Esquema de tiempo de mecanizado para velocidad de 400

Fuente: Autores.

3.7.2 Estrategia unidireccional

Tabla 30
Tiempo de mecanizado para velocidad de 200 con sus respectivos avances

Vc 200		
Avance [mm/z]	Tiempo [min]	NOMENCALTURA
0,2	7	P200UN1
0,5	8,2	P200UN2
0,8	8,7	P200UN3

Fuente: Autores.

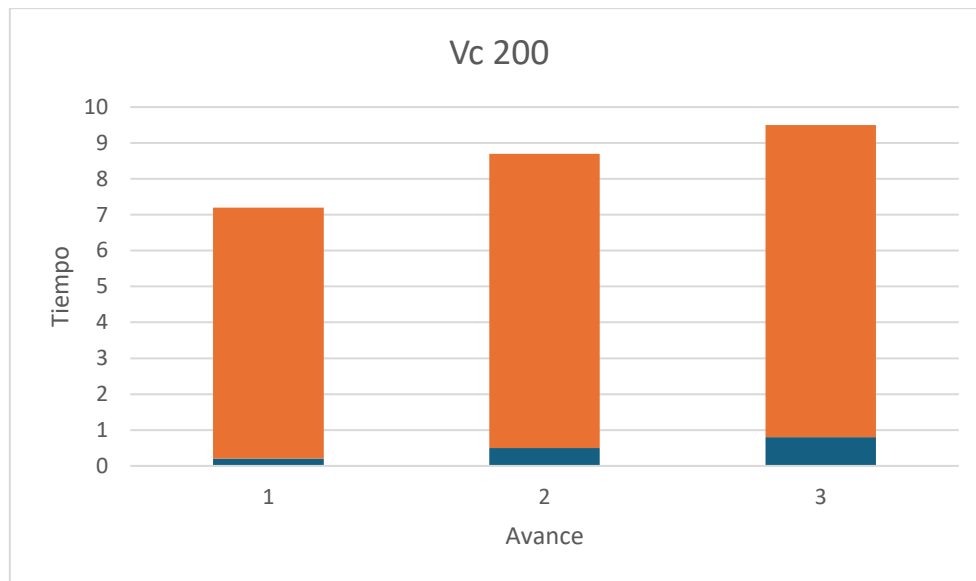


Figura 0-65 Esquema de tiempo de mecanizado para velocidad de 200

Fuente: Autores.

Tabla 31
Tiempo de mecanizado para velocidad de 300 con sus respectivos avances

Vc 300		
Avance [mm/z]	Tiempo [min]	NOMENCALTURA
0,2	9	P300UN1
0,5	9,4	P300UN2
0,8	9,8	P300UN3

Fuente: Autores.

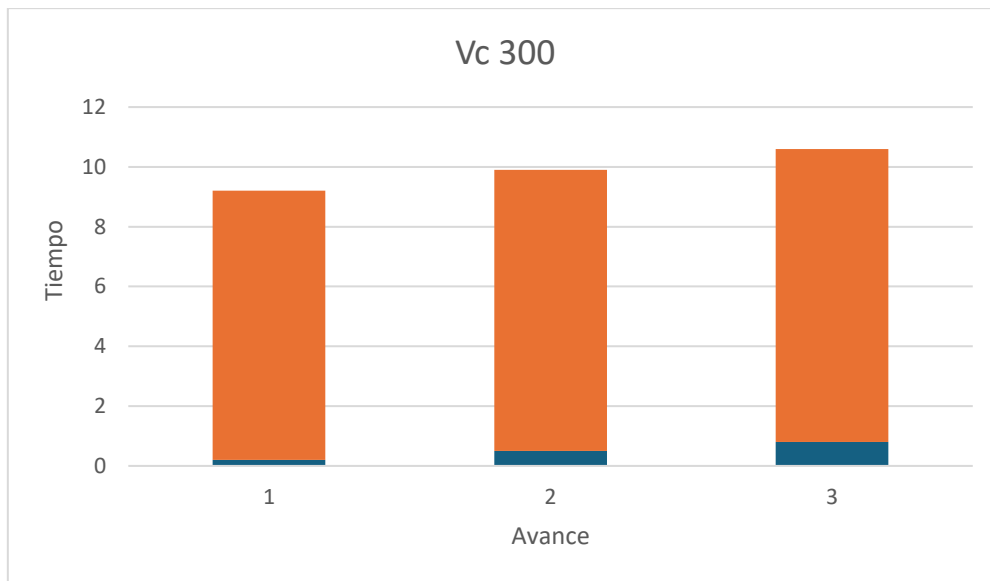


Figura 0-66 Esquema de tiempo de mecanizado para velocidad de 300

Fuente: Autores.

Tabla 32
Tiempo de mecanizado para velocidad de 400 con sus respectivos avances

Vc 400		
Avance [mm/z]	Tiempo [min]	NOMENCALTURA
0,2	12	P400UN1
0,5	12,7	P400UN2
0,8	13,2	P400UN3

Fuente: Autores.

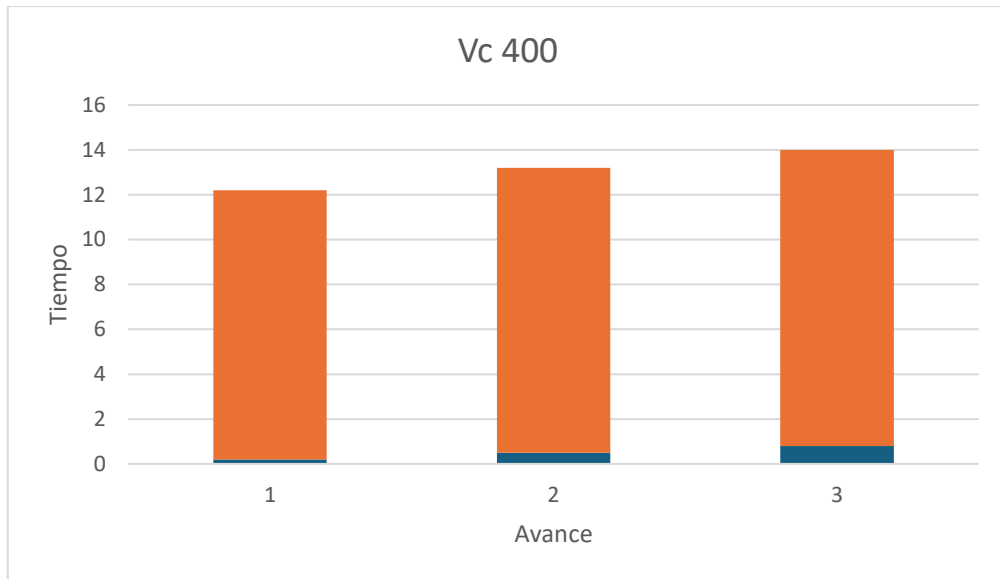


Figura 0-67 Esquema de tiempo de mecanizado para velocidad de 400

Fuente: Autores.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Con los datos anteriormente señalados y los valores de rugosidad superficial obtenidos para las muestras de resina Sika Block se encuentran en un rango de 8 a 17 micras, significativamente superiores al valor nominal de rugosidad del PVC (1.5 micras), esto no implica necesariamente que la resina no sea mecanizable. La diferencia puede atribuirse a las características intrínsecas del material, como su composición, microestructura y presencia de cargas minerales, las cuales influyen en el comportamiento durante el corte. Asimismo, es importante considerar que las condiciones de mecanizado empleadas pudieron no haber sido las óptimas para este tipo de resina, ya que los parámetros como la velocidad de corte, avance, tipo de herramienta o refrigeración pueden afectar notablemente el acabado superficial. Sin embargo, la resina demostró tener una buena respuesta al proceso de mecanizado en términos de estabilidad dimensional, facilidad de desprendimiento de viruta y ausencia de fracturas o delaminaciones, lo que respalda la viabilidad para aplicaciones industriales donde el acabado superficial no es un criterio primordial en una aplicación, que se puede mejorar mediante otros procesos. En este contexto y por lo anterior expuesto, se concluye que el material es mecanizable, aunque se requiera realizar ajustes específicos en los parámetros del proceso anteriormente descritos para optimizar la calidad superficial después del mecanizado.
- Podemos asegurar que la mejor estrategia para mecanizar este material es la estrategia unidireccional, ya que nos arroja los mejores valores en cada una en las pruebas realizadas al material, tanto en mecanización como en rugosidad ya que con esta estrategia se obtiene una rugosidad de 46.3 μm frente a los 54.9 μm obtenidos en la estrategia en espiral, recalando que cada valor es de los mejores resultados de cada una de las estrategias.
- El tiempo de mecanizado de la mejor probeta es de 9.1 minutos, lo cual nos asegura un tiempo acorde a la velocidad y a la estrategia unidireccional de mecanizado, esto se debe a un avance moderado y una velocidad intermedia de operación.
- Contribución al desarrollo sostenible: El uso de esta resina y el conocimiento generado fomentan procesos más limpios y eficientes, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 9 y 12), especialmente al optimizar recursos y reducir el desperdicio.

4.2 Recomendaciones

1. El material PVC es un termoplástico con una estructura homogénea y propiedades viscoelásticas que permiten una mejor respuesta ante herramientas de corte, por lo que se podría realizar la comparación con otro material de fractura frágil como la resina en cuestión.
2. La resina en estudio, aunque es una resina sólida, puede contener pequeñas cargas minerales, burbujas microscópicas o una microestructura que afecta la calidad del mecanizado superficial, por lo que se podría aplicar otro tipo de fresas para su mecanización.
3. Los parámetros usados (velocidad de corte, avance, profundidad de pasada, tipo de herramienta) pueden no haber sido los ideales para este material específico, como tal se podrían variar en función de los requerimientos.
4. Es posible que la generación de calor haya producido rebabas o zonas quemadas que aumentaron la rugosidad, por lo que se podría considerar refrigeración I momento de mecanizar.

BIBLIOGRAFIA

- Alsoufi, M., & Elsayed, A. (January 5, 2018). Surface Roughness Quality and Dimensional Accuracy—A Comprehensive Analysis of 100% Infill Printed Parts Fabricated by a Personal/Desktop Cost-Effective FDM 3D Printer. *Materials Sciences and Applications*, Vol.9 No.1, 7.
- Boothroyd, G., & Knight, W. (2006). *Fundamentals of Machinig and Machine Toools*. Boca Raton FL.: Taylor & Francis Group.
- Canales, E. (13 de julio de 2023). *ESTUDIO DE LA RUGOSIDAD EN EL PROCESO DE MANUFACTURA ADITIVA “BINDER JETTING” PARA SU APLICACIÓN EN CONDICIONES RESILIENTES*. Obtenido de <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000842721/3/0842721.pdf>
- Fajardo, C. (10 de abril de 2022). Obtenido de Repositorio Universidad de Pamplona: <http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/5315>
- Flores, o., Garibay, A., Viveros, L., Gonzalez, C., & Lopez, J. (20 de Septiembre. de 2024). Obtenido de https://somim.org.mx/memorias/memorias2024/articulos/MM/A2_163.pdf
- Mata, F., & Davim, J. (2010). Definición de un índice de maquinabilidad para materiales compuestos de matriz termoplástica a partir del estudio experimental.
- PRO-LEAN. (23 de 10 de 2023). *PRO-LEAN*. Obtenido de PRO-LEAN: <https://proleantech.com/es/cnc-milling-for-plastic-parts/>
- Saldarriaga, J. (2021). *Hidráulica de tuberías*. Bogota: Alfaomega.
- Santos, R. (2021). *Estudio de estrategias de mecanizado para fresado cnc de cavidades en duralón [Tesis de grado]*. Guayaquil: ESPOL. FIMCP.
- Serope , K., & Steven , S. (2014). *Manufactura, Ingeniería y tecnología*. México: Prentice Hall.
- Trent, E. M., & Wright, P. K. (2002). *Metal Cutting*. Woburn, MA: Butterworth–Heinemann.
- William D. Callister, J. (2017). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los materiales 2*. New York.: REVERTÉ.

ANEXOS

Anexo A:

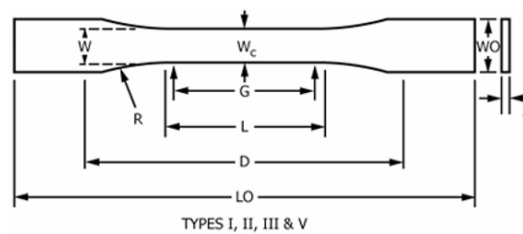
Valor de rugosidad del PVC

Material	k_s (mm)	C_{HW}
PVC	0.0015	150
Hierro dúctil	0.25	140
Acero bridado	0.45	120

Fuente: (Saldarriaga, 2021)

Anexo B:

Normativa ASTM D638



Dimensions (see drawings)	Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.) ^A					Tolerances
	7 (0.28) or under	Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under	Type IV ^B	Type V ^{C,D}	
W —Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	± 0.5 (± 0.02) ^{B,C}
L —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	± 0.5 (± 0.02) ^C
WO —Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
WO —Width overall, min ^G	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
LO —Length overall, min ^H	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G —Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	± 0.25 (± 0.010) ^C
G —Gage length ^I	...	...	...	25 (1.00)	...	± 0.13 (± 0.005)
D —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	± 5 (± 0.2)
R —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	± 1 (± 0.04) ^C
RO —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	± 1 (± 0.04)

Anexo C:

Ejemplo de código CNC para mecanizado

%

O00100119

(T1 D=12. CR=0. - ZMIN=-1. - FRESA CON PUNTA PLANA)

G90 G94 G17

G21

G91

G28 Z0.

G90

(PLANEADO1)

T1 M6

S1460 M3

G17 G90 G94

G54

G0 X6.597 Y-82.07

G43 Z13. H1

G0 Z3.

G1 Z-1. F30.

X0. F320.

X-322. F350.

G0 Z5.

X6.6 Y-76.2

Z3.

G1 Z-1. F30.

X0. F320.

X-322. F350.

G0 Z5.

X6.6 Y-70.33

Z3.

G1 Z-1. F30.

X0. F320.

X-322. F350.

G0 Z5.

X6.6 Y-64.46

Z3.

G1 Z-1. F30.

X0. F320.

X-322. F350.

G0 Z5.

X6.6 Y-58.59

Z3.

G1 Z-1. F30.

X0. F320.

X-322. F350.

G0 Z5.

X6.6 Y-52.72

Z3.

G1 Z-1. F30.

X0. F320.

X-322. F350.

G0 Z5.

X6.6 Y-46.85

Z3.

G1 Z-1. F30.

X0. F320.

X-322. F350.

G0 Z5.

X6.6 Y-40.98

Z3.

G1 Z-1. F30.

X0. F320.

X-322. F350.

G0 Z5.

X6.6 Y-35.11

Z3.

G1 Z-1. F30.

X0. F320.

X-322. F350.

G0 Z5.

X6.6 Y-29.24

Z3.

G1 Z-1. F30.

X0. F320.

X-322. F350.

G0 Z5.

X6.6 Y-23.37

Z3.

G1 Z-1. F30.

X0. F320.

X-322. F350.

G0 Z5.

X6.6 Y-17.5

Z3.

G1 Z-1. F30.

X0. F320.

X-322. F350.

G0 Z5.

X6.6 Y-11.63

Z3.

G1 Z-1. F30.

X0. F320.

X-322. F350.

G0 Z5.

X6.6 Y-5.76

Z3.

G1 Z-1. F30.

X0. F320.

X-322. F350.

G0 Z13.

G91

G28 Z0.

G90

M5

G91

G28 X0. Y0.

G90

M30

%