



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento: Ingeniería Civil, de Materiales y de Fabricación.

**Área de Conocimiento: Ingeniería de los Procesos de
Fabricación.**

PROYECTO/TRABAJO FIN DE MÁSTER

***Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la
Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio.***

Máster en Ingeniería Industrial

Autor: Doña Ana Ruiz Bellido.

Tutor: Don Fermín Banón García.

Cotutor: Don Sergio Martín Béjar.

MÁLAGA, JULIO DE 2025

Resumen:

El presente Trabajo de Fin de Máster se centra en la caracterización de la calidad superficial del aluminio 7075 tras ser sometido a un tratamiento de texturizado láser. Esta tecnología avanzada permite modificar las propiedades superficiales del material sin alterar su geometría, ofreciendo una alternativa precisa y sostenible frente a otros métodos convencionales.

El objetivo principal ha sido evaluar el efecto de los parámetros del proceso láser (potencia, frecuencia y velocidad de escaneado), así como del patrón de texturizado, sobre las características superficiales del material tratado. Para ello, se han evaluado distintas combinaciones paramétricas y se ha analizado la rugosidad lineal y tridimensional, la mojabilidad y la dureza (Vickers) superficial obtenida.

La caracterización se ha llevado a cabo mediante tres ensayos experimentales: análisis de rugosidad mediante el equipo Alicona InfiniteFocusSL, ensayo de mojabilidad mediante la prueba de la gota y medición de dureza Vickers. Los resultados obtenidos permiten establecer relaciones claras entre los parámetros de proceso y las propiedades funcionales del material, proporcionando así una base sólida para la optimización de tratamientos láser aplicados a aleaciones ligeras.

Palabras Clave:

- Aluminio 7075.
- Texturizado láser.
- Ensayo de Dureza Vickers.
- Mojabilidad.
- Calidad Superficial.
- Rugosidad Superficial.

Summary:

This Master's Thesis focuses on the characterization of the surface quality of 7075 aluminum after undergoing laser texturing treatment. This advanced technology enables the modification of the material's surface properties without altering its geometry, offering a precise and sustainable alternative to conventional methods.

The main objective was to evaluate the effect of laser process parameters (power, frequency, and scanning speed), as well as the texturing pattern, on the surface characteristics of the treated material. To achieve this, various parameter combinations were assessed, and linear and 3D roughness, wettability, and surface hardness (Vickers) were analyzed.

The characterization was carried out through three experimental tests: roughness analysis using the Alicona InfiniteFocusSL equipment, wettability evaluation via the drop test, and Vickers hardness measurements. The results obtained allow for the establishment of clear relationships between process parameters and the functional properties of the material, thus providing a solid foundation for the optimization of laser treatments applied to lightweight alloys.

Key Words:

- 7075 Aluminium.
- Laser Texturing.
- Vickers Hardness Test.
- Wettability.
- Surface Quality.
- Surface Roughness.

Definiciones:

- Texturizado Láser: Proceso que utiliza rayos láser para alterar la textura y rugosidad de una superficie.
- Velocidad de escaneado: Velocidad a la que se mueve el foco del láser por la superficie del material. En este caso se mide en milímetros por segundo (mm/s).
- Potencia: Cantidad de energía que emite el láser por unidad de tiempo. En este caso se mide en vatios.
- Frecuencia: Número de pulsos por segundo que da el láser. En este caso, se mide en KHz.
- Rugosidad superficial: Conjunto de irregularidades que posee la superficie de un material como consecuencia de su proceso de fabricación o acabado.
- Rugosidad promedio aritmética: Representa la media aritmética de las desviaciones absolutas de los puntos de una superficie con respecto a una línea media ideal, a lo largo de una longitud de evaluación específica.
- Altura total del perfil: Distancia vertical entre el punto más bajo (valle) y el punto más alto (pico) del perfil.
- Altura promedio máxima: Representa la diferencia promedio entre los picos más altos y los valles más profundos en secciones específicas de la superficie.
- Altura media aritmética de una superficie: Es el valor promedio de las desviaciones absolutas de un área con respecto a una superficie o plano ideal.
- Altura máxima de una superficie: Distancia media entre los puntos más altos y más bajos de un área completa, con respecto a una distancia de evaluación especificada.
- Proporción de área interfacial desarrollada: Parámetro que mide el aumento del área efectiva debida a la rugosidad.
- Altura del núcleo: Distancia entre el nivel más alto y el más bajo de la superficie del núcleo.
- Volumen vacío del núcleo: Diferencia de volumen vacío entre las tasas portantes.
- Parámetro de densidad de energía: Energía por unidad de área que incide en la superficie del material.
- Mojabilidad: Capacidad que tiene un líquido para extenderse y penetrar en la superficie de un sólido.
- Superficie hidrofílica: Aquella que facilita la absorción y extensión de un líquido por sí misma.
- Superficie hidrófoba: Aquella que repele cualquier líquido.

Abreviaturas:

- TFM: Trabajo de Fin de Máster.
- mm/s: Milímetros por segundo.
- W: Vatios.
- KHz: Kilo Hercios.
- LST: Laser Surface Texturing.
- SS: Velocidad de escaneado.
- P: Potencia.
- F: Frecuencia.
- Ra: Rugosidad promedio aritmética.
- Rt: Altura total del perfil.
- Rz: Altura promedio máxima.
- Sz: Altura máxima de la superficie.
- Sa: Altura media aritmética de una superficie.
- Sdr: Proporción de área interfacial desarrollada.
- Sk: Altura del núcleo.
- Vvc: Volumen vacío del núcleo
- Ed: Parámetro de densidad de energía.
- J: Julios.
- cm: Centímetros.
- μm : Micrómetros.
- nm: Nanómetros.
- Pa: Pascal.
- HV: Dureza Vickers.
- ns: Nanosegundo.

Índice:

1.	Introducción y objetivos.	8
2.	Antecedentes.....	9
2.1.	Aleaciones de Aluminio en la Industria.	9
2.2.	Procesos de Mecanizado.....	10
2.3.	Modificación Superficial.	15
2.3.1.	Calidad Superficial.	15
2.3.2.	Rugosidad superficial.	16
2.3.3.	Procesos de Modificación Superficial.	21
2.4.	Fundamentos de la Activación Superficial.....	23
2.5.	Fundamentos del Texturizado Láser.....	25
2.6.	Ensayos de dureza.	30
2.6.1.	Ensayo Brinell.	30
2.6.2.	Ensayo Vickers.	31
2.6.3.	Ensayo Rockwell.	33
2.6.4.	Comparativa entre los diferentes ensayos de dureza.	33
2.7.	Líneas de Investigación Actuales.	34
3.	Metodología y Plan de Trabajo.	40
3.1.	Metodología texturizado láser.	40
3.1.1.	Equipo y herramientas: Texturizado láser.	40
3.1.2.	Montaje y procedimiento: Texturizado láser.....	45
3.2.	Metodología para la Evaluación de la Calidad Superficial.	47
3.2.1.	Equipo y herramientas: Evaluación de la Calidad Superficial.	47
3.2.2.	Montaje y procedimiento: Evaluación de la Calidad Superficial.	50
3.3.	Metodología de la Evaluación de la Mojabilidad.....	56
3.3.1.	Equipo y herramientas: Evaluación de la Mojabilidad.....	56
3.3.2.	Montaje y procedimiento: Evaluación de la Mojabilidad.	57
3.4.	Metodología Ensayo de Dureza Vickers.	58
3.4.1.	Equipo y herramientas: Ensayo de Dureza Vickers.	58
3.4.2.	Montaje y procedimiento: Ensayo de Dureza Vickers.	60
4.	Presentación y Análisis de los Resultados.....	62
4.1.	Resultados: Texturizado láser.....	62
4.2.	Resultados: Evaluación de la Calidad Superficial.....	63

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

4.2.1.	Rugosidad Aritmética Media (Ra).....	69
4.2.2.	Altura total del perfil (Rt).....	74
4.2.3.	Altura promedio máxima (Rz).....	78
4.2.4.	Rugosidad media superficial (Sa).....	83
4.2.5.	Altura máxima de la superficie (Sz).....	87
4.2.6.	Índice de superficie desarrollada (Sdr).....	92
4.2.7.	Resumen Resultados Calidad Superficial.....	97
4.3.	Resultados: Evaluación de la Mojabilidad.	97
4.4.	Resultados: Ensayo Vickers.	100
4.4.1.	Dureza Vickers.	100
4.4.2.	Profundidad de la entalla.	106
4.4.3.	Resumen Resultados Dureza Vickers.....	112
5.	Conclusiones.....	115
6.	Líneas Futuras.	116
7.	Bibliografía.....	117

Índice de figuras:

Figura 1: Perfiles de Aluminio [1].....	9
Figura 2: Procesos de mecanizado [8][9]	11
Figura 3: Fresado [10].	11
Figura 4: Torneado [11].....	12
Figura 5: Taladrado [12].....	12
Figura 6: Limado[13].	13
Figura 7: Rectificado[14].....	13
Figura 8: Mecanizado por descarga eléctrica[15].....	14
Figura 9: Mecanizado por chorro abrasivo [8].	14
Figura 10: Defectos geométricos.....	15
Figura 11: Altura total del perfil y rugosidad promedio aritmética.....	17
Figura 12: Altura promedio máxima.	18
Figura 13: Altura media aritmética de una superficie [20].....	19
Figura 14: Altura máxima de una superficie [21].....	19
Figura 15: Altura del núcleo [19].	20
Figura 16: Proporción de área interfacial desarrollada[20].....	20
Figura 17: Electrodeposición [25].	21
Figura 18: Pulido [24].	22
Figura 19: Granallado [25]..	22
Figura 20: Ángulo de Contacto.	24
Figura 21: Esquema resumen del comportamiento de una superficie en función de su mojabilidad [32].	25
Figura 22: Relación entre rugosidad y mojabilidad de una superficie [33].....	25
Figura 23: Esquema láser de CO ₂ [34].	26
Figura 24: Esquema láser de fibra [35].	27
Figura 25: Valores del parámetro de densidad de energía en función de la potencia y la frecuencia.....	28
Figura 26: Implante biomédico tratado con texturizado láser [35].	29
Figura 27: Gravado láser [36].....	29
Figura 28: Esquema ensayo Brinell.....	30
Figura 29: Esquema ensayo Vickers.	31
Figura 30: Esquema para el cálculo de la profundidad de la entalla.	32
Figura 31: Resultados experimentales obtenidos en la evaluación de la rugosidad del perfil tras el texturizado láser en el artículo de Bañón et al. [38].....	35
Figura 32: Variación del ángulo de contacto líquido-sólido en función de la potencia y la velocidad de escaneado en el artículo de Bañón et al [39].....	36
Figura 33: Gráficas de la evolución de Sa y Sz en función de la densidad de energía y la velocidad de escaneado [39].....	37
Figura 34: Ángulos de contacto resultantes en el artículo [40] para: (a) superficie no tratada (b) y (c) superficie tratada con patrones diferentes.	37
Figura 35: Fotografías de las superficies tratadas en el artículo [32] en función de la densidad de energía y la velocidad de escaneado.....	38

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

Figura 36: Esquema dimensiones placa de aluminio 7075 tratada en el proyecto.	40
Figura 37: Hardware del LS-XT-S de LASING®.....	41
Figura 38: Láser de fibra integrado en el LS-XT-S de LASING®	41
Figura 39: Interfaz inicial del software EXcad3.0 de JCZ.	42
Figura 40: Interfaz Material Parameter Assistant.....	43
Figura 41: Material Parameter Assistant configurado.	44
Figura 42: Patrón de cuadrados concéntricos.	44
Figura 43: Patrón de líneas paralelas.	44
Figura 44: Placa de aluminio sin tratar dentro del habitáculo de la LS-XT-S de LASING®.	45
Figura 45: Accionamiento manual eje Z superior.	46
Figura 46: Placa de aluminio 7075 tras terminar el primer proceso de texturizado láser.	46
Figura 47: InfiniteFocusSL.....	47
Figura 48: Mando de movimiento de Alicona InfiniteFocusSL.....	49
Figura 49: Placa de Aluminio 7075 tratada y lista para ser medida en Alicona InfiniteFocusSL	50
Figura 50: Puntero láser para ayudar al posicionamiento.	51
Figura 51: Interfaz inicial del software especializado de Alicona InfiniteFocusSL.....	51
Figura 52: Interfaz del software de Alicona InfiniteFocusSL tras el escaneo de la superficie (I).	52
Figura 53: Interfaz del software de Alicona InfiniteFocusSL tras el escaneo de la superficie (II).	53
Figura 54: Interfaz Profile Roughness Measurement (II).....	54
Figura 55: Interfaz Profile Roughness Measurement (I).....	54
Figura 56: Interfaz Surface Texture Measurement (I).....	55
Figura 57: Interfaz Surface Texture Measurement (II).	56
Figura 58: Pipeta manual.....	57
Figura 59: Imagen ejemplo para la evaluación de la superficie tratada.	58
Figura 60: Interfaz del software ImageJ.....	58
Figura 61: Microdurómetro Matsuzawa MXT70.	59
Figura 62: Placa de aluminio 7075 preparada para ensayo de dureza en Matsuzawa MXT70.	60
Figura 63: Pantalla de resultados Matsuzawa MXT70.....	61
Figura 64: Placas de aluminio 7075 tras e proceso de texturizado láser.	62
Figura 65: Superficie para velocidad 100 mm/s, potencia 60 W, frecuencia 100 KHz y patrón de cuadrados concéntricos.....	66
Figura 66: Superficie para velocidad 100 mm/s, potencia 60 W, frecuencia 100 KHz y patrón de cuadrados concéntricos.....	66
Figura 67: Superficie para velocidad 100 mm/s, potencia 20 W, frecuencia 100 KHz y patrón de cuadrados concéntricos.....	67
Figura 68: Superficie para velocidad 100 mm/s, potencia 20 W, frecuencia 500 KHz y patrón de cuadrados concéntricos.....	68
Figura 69: Superficie para velocidad 900 mm/s, potencia 20 W, frecuencia 100 KHz y patrón de cuadrados concéntricos.....	68
Figura 70: Superficie para velocidad 900 mm/s, potencia 100 W, frecuencia 100 KHz y patrón de cuadrados concéntricos.....	69

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

Figura 71: Valores de rugosidad media lineal en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 100 mm/s.	70
Figura 72: Valores de rugosidad media lineal en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 100 mm/s.	70
Figura 73: Valores de rugosidad media lineal en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 500 mm/s.	71
Figura 74: Valores de rugosidad media lineal en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 500 mm/s.	71
Figura 75: Valores de rugosidad media lineal en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 900 mm/s.	72
Figura 76: Valores de rugosidad media lineal en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 900 mm/s.	72
Figura 77: Diagrama de Pareto que representa la influencia de la velocidad, frecuencia, potencia y patrón en el valor de Ra.	73
Figura 78: Valores de altura total del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 100 mm/s.	74
Figura 79: Valores de altura total del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 100 mm/s.	75
Figura 80: Valores de altura total del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 500 mm/s.	75
Figura 81: Valores de altura total del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 500 mm/s.	76
Figura 82: Valores de altura total del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 900 mm/s.	76
Figura 83: Valores de altura total del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 900 mm/s.	77
Figura 84: Diagrama de Pareto que representa la influencia de la velocidad, frecuencia, potencia y patrón en el valor de Rt.	77
Figura 85: Valores de altura promedio máxima del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 100 mm/s.	79
Figura 86: Valores de altura promedio máxima del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 100 mm/s.	79
Figura 87: Valores de altura promedio máxima del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 500 mm/s.	80
Figura 88: Valores de altura promedio máxima del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 500 mm/s.	80
Figura 89: Valores de altura promedio máxima del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 900 mm/s.	81
Figura 90: Valores de altura promedio máxima del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 900 mm/s.	81
Figura 91: Diagrama de Pareto que representa la influencia de la velocidad, frecuencia, potencia y patrón en el valor de Rz.	82
Figura 92: Valores de rugosidad media superficial del área tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 100 mm/s.	83
Figura 93: Valores de rugosidad media superficial del área tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 100 mm/s.	84

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

Figura 94: Valores de rugosidad media superficial del área tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 500 mm/s.	84
Figura 95: Valores de rugosidad media superficial del área tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 500 mm/s.	85
Figura 96: Valores de rugosidad media superficial del área tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 900 mm/s.	85
Figura 97: Valores de rugosidad media superficial del área tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 900 mm/s.	86
Figura 98: Diagrama de Pareto que representa la influencia de la velocidad, frecuencia, potencia y patrón en el valor de Sa.	86
Figura 99: Valores de altura máxima de la superficie tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 100 mm/s.	88
Figura 100: Valores de altura máxima de la superficie tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 100 mm/s.	88
Figura 101: Valores de altura máxima de la superficie tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 500 mm/s.	89
Figura 102: Valores de altura máxima de la superficie tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 500 mm/s.	89
Figura 103: Valores de altura máxima de la superficie tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 900 mm/s.	90
Figura 104: Valores de altura máxima de la superficie tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 900 mm/s.	90
Figura 105: Diagrama de Pareto que representa la influencia de la velocidad, frecuencia, potencia y patrón en el valor de Sz.	91
Figura 106: Valores del índice de superficie desarrollada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados con céntricos y velocidad 100 mm/s.	92
Figura 107: Valores del índice de superficie desarrollada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 100 mm/s.	93
Figura 108: Valores del índice de superficie desarrollada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados con céntricos y velocidad 500 mm/s.	93
Figura 109: Valores del índice de superficie desarrollada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 500 mm/s.	94
Figura 110: Valores del índice de superficie desarrollada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados con céntricos y velocidad 900 mm/s.	94
Figura 111: Valores del índice de superficie desarrollada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 900 mm/s.	95
Figura 112: Diagrama de Pareto que representa la influencia de la velocidad, frecuencia, potencia y patrón en el valor de Sdr.	96
Figura 133: Superficie para velocidad 900 mm/s, potencia 60 W, frecuencia 300 KHz y patrón de cuadrados concéntricos.	99
Figura 134: Superficie para velocidad 900 mm/s, potencia 60 W, frecuencia 300 KHz y patrón de cuadrados concéntricos.	100
Figura 113: Gráfica dureza Vickers para velocidad 100 mm/s, frecuencia 100 KHz y cada caso de potencia.	101

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

Figura 114: Gráfica dureza Vickers para velocidad 100 mm/s, frecuencia 300 KHz y cada caso de potencia.....	101
Figura 115: Gráfica dureza Vickers para velocidad 100 mm/s, frecuencia 500 KHz y cada caso de potencia.....	102
Figura 116: Gráfica dureza Vickers para velocidad 500 mm/s, frecuencia 100 KHz y cada caso de potencia.....	102
Figura 117: Gráfica dureza Vickers para velocidad 500 mm/s, frecuencia 300 KHz y cada caso de potencia.....	103
Figura 118: Gráfica dureza Vickers para velocidad 500 mm/s, frecuencia 500 KHz y cada caso de potencia.....	103
Figura 119: Gráfica dureza Vickers para velocidad 900 mm/s, frecuencia 100 KHz y cada caso de potencia.....	104
Figura 120: Gráfica dureza Vickers para velocidad 900 mm/s, frecuencia 300 KHz y cada caso de potencia.....	104
Figura 121: Gráfica dureza Vickers para velocidad 900 mm/s, frecuencia 500 KHz y cada caso de potencia.....	105
Figura 122: Diagrama de Pareto que representa la influencia de la velocidad, frecuencia y potencia en el valor de HV.	106
Figura 123: Gráfica profundidad de la entalla para velocidad 100 mm/ s, frecuencia 100 KHz y cada caso de potencia.....	107
Figura 124: Gráfica profundidad de la entalla para velocidad 100 mm/ s, frecuencia 300 KHz y cada caso de potencia.....	107
Figura 125: Gráfica profundidad de la entalla para velocidad 100 mm/ s, frecuencia 500 KHz y cada caso de potencia.....	108
Figura 126: Gráfica profundidad de la entalla para velocidad 500 mm/ s, frecuencia 100 KHz y cada caso de potencia.....	108
Figura 127: Gráfica profundidad de la entalla para velocidad 500 mm/ s, frecuencia 300 KHz y cada caso de potencia.....	109
Figura 128: Gráfica profundidad de la entalla para velocidad 500 mm/ s, frecuencia 500 KHz y cada caso de potencia.....	109
Figura 129: Gráfica profundidad de la entalla para velocidad 900 mm/ s, frecuencia 100 KHz y cada caso de potencia.....	110
Figura 130: Gráfica profundidad de la entalla para velocidad 900 mm/ s, frecuencia 300 KHz y cada caso de potencia.....	110
Figura 131: Gráfica profundidad de la entalla para velocidad 900 mm/ s, frecuencia 500 KHz y cada caso de potencia.....	111
Figura 132: Diagrama de Pareto que representa la influencia de la velocidad, frecuencia y potencia en el valor de h.	111
Figura 135: Esquema superficies heterogénea y homogénea.....	112
Figura 136: Superficie para velocidad 100 mm/s, potencia 20 W, frecuencia 500 KHz y patrón de cuadrados concéntricos.....	113
Figura 137: Superficie para velocidad 100 mm/s, potencia 100 W, frecuencia 500 KHz y patrón de cuadrados concéntricos.....	113
Figura 138: Gráfica dureza Vickers media en función de la potencia y la velocidad. .	114

1. Introducción y objetivos.

El texturizado láser consiste en una tecnología avanzada que permite modificar las propiedades superficiales de aleaciones metálicas, su rugosidad y activación superficial, para adaptar el material a requisitos funcionales específicos. Además, este proceso permite modificar las propiedades funcionales de una pieza sin necesidad de alterar su geometría, sino solamente su superficie, lo que lo convierte en una solución sostenible y precisa frente a tratamientos convencionales.

El presente Trabajo de Fin de Máster tiene como objetivo caracterizar la superficie de Aluminio 7075 tras ser expuesto a un tratamiento de texturizado láser, variando sus principales parámetros (potencia, frecuencia y velocidad de escaneado) y el patrón de texturizado, para así obtener superficies con diversos valores de rugosidades lineales y tridimensionales que influyen directamente en la mojabilidad y propiedades mecánicas de la superficie del material tratado.

Para ello, tras el tratamiento de texturizado láser, se han llevado a cabo los siguientes análisis o ensayos:

- Análisis de la rugosidad superficial mediante Alicona InfiniteFocusSL.
- Caracterización de la mojabilidad de la superficie mediante la prueba de la gota.
- Ensayo de dureza Vickers.

Durante el desarrollo de este proyecto, se explicarán los antecedentes, procesos llevados a cabo y el equipo utilizado.

2. Antecedentes.

En este apartado se exponen todos los antecedentes y marco teórico necesario para el desarrollo y entendimiento del presente Trabajo de Fin de Máster.

2.1. Aleaciones de Aluminio en la Industria.

El aluminio es un metal ligero, de color plateado y relativamente suave, que se encuentra en la posición número 13 de la tabla periódica con el símbolo Al. En la *figura 1* se puede ver una imagen en la que aparecen perfiles de aluminio.



Figura 1: Perfiles de Aluminio [1].

Entre sus propiedades más interesantes se encuentran [2]:

- **Ligereza:** El aluminio es muy ligero en comparación con otros metales, lo que lo hace ideal en aplicaciones en las que se requiere un peso reducido, como en la industria aeronáutica o en la automotriz.
- **Resistencia a la corrosión:** En contacto con el oxígeno, se forma en su superficie una delgada capa de óxido de aluminio (Al_2O_3), que le confiere resistencia a la corrosión.
- **Buena conductividad térmica y eléctrica:** El aluminio es un excelente conductor del calor y la electricidad, por lo que se usa frecuentemente en instalaciones eléctricas y aplicaciones en las que se necesite disipar calor.
- **Maleabilidad y ductilidad:** Es un metal fácil de trabajar, por lo que se puede transformar mediante diferentes tipos de procesos, como la extrusión, el laminado o la fundición.

Se pueden ver además en la *tabla 1* los valores aproximados de las propiedades mecánicas del aluminio en general.

Resistencia a la tracción	90-120 MPa
Límite de fluencia	40-70 MPa
Dureza Vickers	15-20 HV
Módulo de elasticidad	69 GPa

Tabla 1: Propiedades mecánicas del Aluminio[3].

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

Sus aleaciones más utilizadas son el aluminio 7075 (de alta resistencia), el aluminio 2024 (de alta resistencia estructural) y el aluminio 6061 (equilibrio entre resistencia y soldabilidad). Estas aleaciones son las más utilizadas porque ofrecen un equilibrio ideal entre resistencia mecánica, durabilidad y facilidad de fabricación, lo que las hace versátiles y adecuadas para una amplia gama de aplicaciones industriales[4]. En la *tabla 2* se puede ver un resumen de sus principales propiedades.

Propiedad	Aluminio 7075	Aluminio 2024	Aluminio 6061
Densidad (g/cm ³)	2.81	2.78	2.7
Resistencia a la tracción (MPa)	570-700	470-500	310-350
Límite de fluencia (MPa)	480-560	280-325	275
Módulo de elasticidad (GPa)	71	72	68-69
Resistencia a la fatiga (MPa)	160-230 (Alta)	140-180 (Media-Alta)	96-130 (Media)
Dureza Vickers (HV)	175-190	120-138	95-105
Resistencia a la corrosión	Moderada (Requiere protección)	Baja (Se oxida fácilmente)	Alta (Buena protección natural)
Soldabilidad	Mala (Difícil de soldar)	Pobre (Se agrieta)	Excelente (Ideal para soldadura)
Maquinabilidad	Excelente	Buena	Buena
Coste	Alto	Medio	Bajo

Tabla 2: Propiedades principales de las aleaciones de aluminio más utilizadas [5][6][7]

Las principales aplicaciones industriales de cada una de estas aleaciones son las siguientes:

- Aluminio 7075: Aviación, armas de fuego y automóviles y bicicletas de alto rendimiento [6]
- Aluminio 2024: Se usa mucho en la industria aeroespacial; estructuras y fuselajes de aviones, componentes de los mismos, cohetes, satélites, etc [7].
- Aluminio 6061: Estructuras de edificios, marcos de ventanas, puertas, carrocerías de automóviles, drones y piezas mecanizadas para una variedad de aplicaciones, ya que es fácil de cortar, fresar, torneado y soldar [6].

2.2. Procesos de Mecanizado.

Prácticamente, cualquier objeto que usamos hoy en día se ha fabricado mediante diversos procesos de fabricación, entre los que probablemente estén el mecanizado y la modificación superficial.

El mecanizado consiste en modificar la geometría de una pieza base, eliminando material, para obtener una forma y dimensiones requeridas. Los procesos de mecanizado se pueden dividir en procesos convencionales y no convencionales, tal y como se puede ver en el esquema de la *figura 2*.

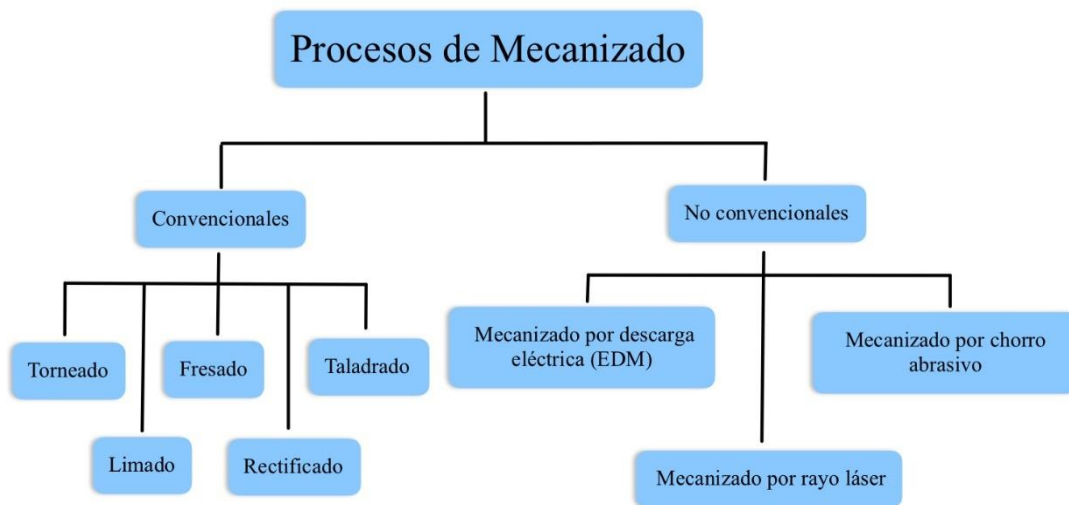


Figura 2: Procesos de mecanizado [8][9]

A continuación, se explican los procesos de mecanizado convencionales:

- Fresado: Consiste en eliminar material mediante una herramienta de corte (fresa en este caso) que rota mientras la pieza se desplaza en las tres dimensiones del espacio (*Figura 3*).



Figura 3: Fresado [10].

- Torneado: Proceso de fabricación mediante el cual se elimina material de una pieza base, siendo, en este caso, la propia pieza la que gira mientras que la herramienta queda fija (*Figura 4*).

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio



Figura 4: Torneado [11].

- Taladrado: Método de mecanizado que consiste en la creación o mejora de orificios usando una broca rotativa. Durante esta operación, la pieza de trabajo permanece inmóvil mientras la broca, que gira, penetra en el material (*Figura 5*) [9].



Figura 5: Taladrado [12].

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

- **Limado:** Consiste en una técnica tradicional y una de las formas más antiguas de remover o eliminar material de una superficie o bloque. Aunque tiene una capacidad limitada, se usa para ajustes precisos (*Figura 6*) [9].



Figura 6: Limado[13].

- **Rectificado:** Este proceso consiste en utilizar una muela abrasiva para eliminar material y obtener superficies de alta precisión y acabado, ideal para piezas que requieren tolerancias muy ajustadas (*Figura 7*) [9].



Figura 7: Rectificado[14].

Por otro lado, algunos de los procesos de mecanizado no convencionales más conocidos son los siguientes:

- **Mecanizado por descarga eléctrica (EDM):** También conocido como mecanizado por chispa, implica la eliminación de material a través de la erosión. Este tipo de proceso no requiere el contacto directo entre la pieza de trabajo y la herramienta, lo que lo hace ideal para mecanizar materiales débiles. Además, también es muy útil cuando el material a tratar exige niveles de tolerancia extremadamente estrechos (*Figura 8*) [8].



Figura 8: Mecanizado por descarga eléctrica[15].

- Mecanizado por chorro abrasivo: Este tipo de mecanizado no convencional consiste en golpear una pieza de trabajo con un chorro de partículas abrasivas presurizadas con gas o aire a alta velocidad (Figura 9) [8].

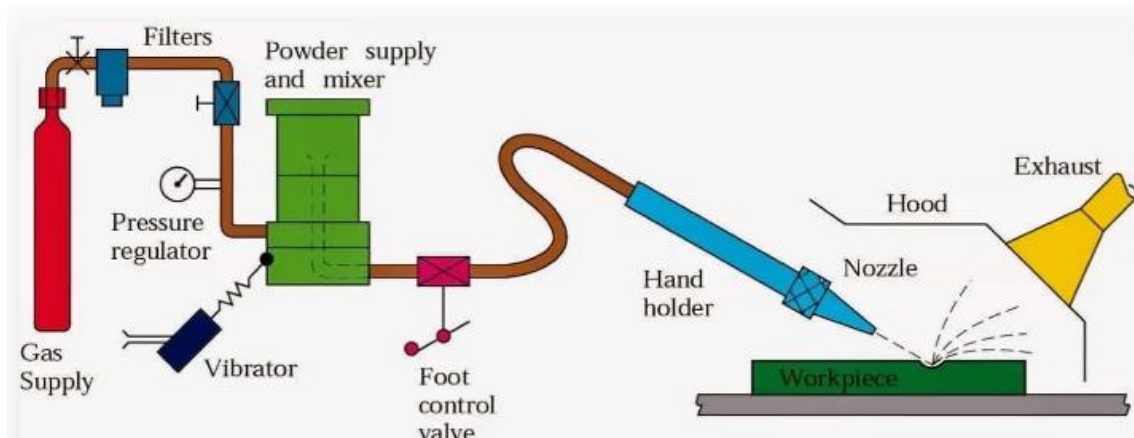


Figura 9: Mecanizado por chorro abrasivo [8].

- Mecanizado por haz láser: Consiste en un tipo de mecanizado térmico, es decir, que se basa en fundir el material gracias a un haz de luz de alta energía (rayo láser). Es un proceso muy preciso y versátil que permite acabados de alta calidad [9].

Es el proceso de mecanizado que se ha elegido en el presente Trabajo de Fin de Máster, dado que permite modificar las propiedades superficiales del material sin necesidad de cambiar su geometría. Por ello, es una tecnología muy útil si lo que se quiere es, precisamente, obtener distintos valores de rugosidad superficial, dureza o mojabilidad, propiedades que se estudiarán a lo largo del desarrollo del proyecto.

2.3. Modificación Superficial.

Otra forma de modificar las propiedades y características de un material o pieza es mediante procesos de modificación superficial, que a menudo suelen ser tratamientos de acabado y no afectan como tal a la geometría inicial.

El objetivo de este tipo de tratamientos es mejorar ciertas características específicas de la superficie del material, como su resistencia al desgaste, corrosión, dureza o apariencia estética, lo que se consigue modificando tanto la rugosidad superficial como las características geométricas de la superficie.

2.3.1. Calidad Superficial.

La calidad de una superficie se refiere a las características físicas y geométricas de la capa externa de un material. Para entenderla, es necesario hacer una clasificación entre los diferentes defectos geométricos que afectan a la superficie de una pieza o material, que se pueden ver en la *figura 10*.

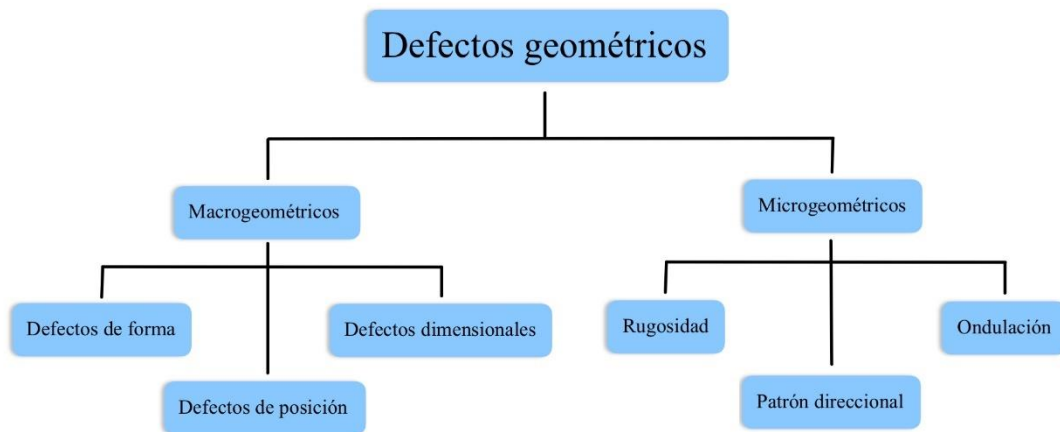


Figura 10: Defectos geométricos.

1. Defectos macrogeométricos [16]:

Los defectos macrogeométricos son aquellos que afectan a la forma global de una pieza y suelen ser producidos por errores de fabricación, montaje o deformaciones externas. Dentro de este tipo de defectos, los principales son:

- Defectos de forma: Rectitud, planitud, circularidad y cilindricidad.
- Defectos de posición: Perpendicularidad, paralelismo, angularidad, excentricidad o coaxialidad.
- Defectos dimensionales: Medidas fuera de las tolerancias establecidas o espesores no uniformes.

2. Defectos microgeométricos[17]:

Los defectos microgeométricos son aquellos que afectan a la textura superficial de la pieza a nivel microscópico y suelen estar relacionados con el proceso de mecanizado o el tratamiento superficial. Este tipo de defectos se clasifican en:

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

- **Rugosidad:** Crestas y valles (regulares o no) que se presentan en la superficie del material a nivel microscópico. Se expresa mediante parámetros normalizados (Ra, Rt, Rz, etc).
- **Ondulación:** Desviaciones intermedias entre los defectos de forma y la rugosidad. Puede ser causada por vibraciones, desalineación con la máquina o desequilibrio térmico.
- **Patrón direccional:** Consiste en la textura de la propia superficie, líneas o marcas en una dirección específica que le dan forma. Viene determinado por el tipo de proceso o tratamiento superficial.

Por otro lado, es necesario definir qué es la *metrología*, es decir, la ciencia encargada de estudiar, establecer y aplicar normas y sistemas para realizar mediciones precisas y fiables. Esta disciplina abarca desde la medición de magnitudes físicas hasta la calibración y mantenimiento de los instrumentos utilizados en dichas mediciones.

Calidad superficial y metrología se encuentran estrechamente relacionadas, ya que esta última permite cuantificar la calidad de la superficie de una pieza o material, proporcionando medidas precisas de la misma.

2.3.2. Rugosidad superficial.

La rugosidad superficial, que consiste en una propiedad que describe las irregularidades microscópicas que presenta la superficie de una pieza dada y que pueden tener un gran impacto en las características de dicha pieza, viene definida por una serie de parámetros.

Los parámetros de rugosidad superficial que se van a tratar en el presente trabajo vienen recogidos en las normas UNE-EN ISO 21920-2:2023 [18] y UNE-EN ISO 25178-2:2023 [19]. La principal diferencia entre estas normas es el método de medición y la porción de la superficie que analiza, que se pueden ver en la *tabla 4*.

	UNE-EN ISO 21920-2:2023	UNE-EN ISO 25178-2:2023
Método de medición	Por perfil (2D)	Por área (3D)
Porción de la superficie analizada	Sección lineal trazada sobre la superficie	Superficie completa

Tabla 3: Principales diferencias UNE-EN ISO 21920-2:2023 y UNA-EN ISO 25178-2:2023

1. UNE-EN ISO 21920-2:2023 [19]:

Esta norma habla sobre la especificación geométrica del producto, centrándose en la calidad superficial medida mediante el método del perfil. Establece los términos, definiciones y parámetros normalizados que describen la textura superficial de una pieza a lo largo de un perfil designado.

Las principales ventajas de medir la rugosidad superficial por perfil son la simplicidad y la velocidad.

De entre los parámetros que define esta norma, en el presente proyecto se han obtenido y analizado los siguientes:

- Rugosidad promedio aritmética (Ra): Representa la media aritmética de las desviaciones absolutas de los puntos de una superficie con respecto a una línea media ideal ($|y(x)|$), a lo largo de una longitud de evaluación específica (L). Se puede calcular a partir de la expresión que se puede ver en la *ecuación 1*:

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (1)$$

3. Altura total del perfil (Rt): Distancia vertical entre el punto más bajo (valle) y el punto más alto (pico) del perfil.

En la *figura 11* se pueden ver representadas la altura total del perfil (Rt) y las variables necesarias para calcular la rugosidad promedio aritmética (Ra) en un perfil de ejemplo.

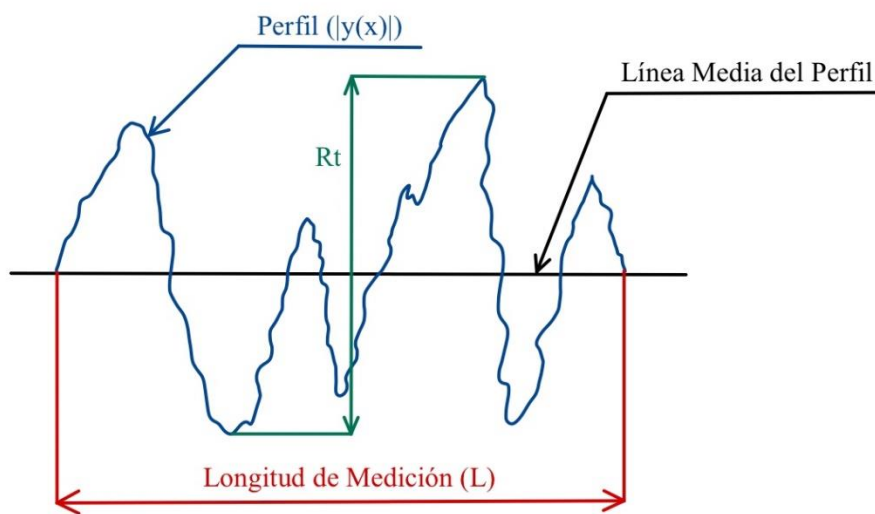


Figura 11: Altura total del perfil y rugosidad promedio aritmética.

4. Altura promedio máxima (Rz): Representa la diferencia promedio entre los picos o crestas más altos (R_{pi}) y los valles más profundos (R_{vi}) en secciones específicas de la superficie y para un número de muestras (n) dentro de la longitud de evaluación. Se puede calcular a partir de la expresión mostrada en la *ecuación 2*.

$$Rz = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_{pi} - |R_{vi}|) \quad (2)$$

En la *figura 12* se puede ver un ejemplo de perfil con tres valles y tres crestas ($n=3$), que tiene señalizados todos los elementos necesarios para calcular la altura promedio máxima (Rz).

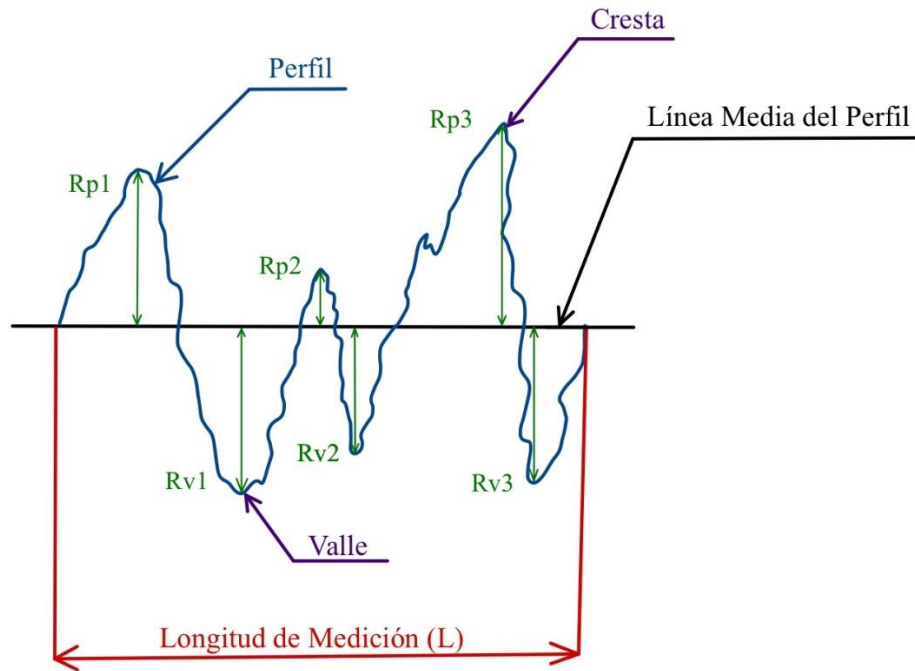


Figura 12: Altura promedio máxima.

2. UNE-EN ISO 25178-2:2023 [20]:

Esta norma también trata la especificación geométrica del producto y se centra en la calidad superficial, solo que este caso evalúa la textura mediante el método del área, complementando las mediciones tradicionales que se tratan en la norma UNE-EN ISO 21920-2:2023. Establece los términos, definiciones y parámetros fundamentales utilizados para describir cuantitativamente la rugosidad tridimensional de la superficie.

Las principales ventajas de medir la rugosidad superficial por área son las siguientes:

- Análisis completo de la superficie.
- Mayor representabilidad; las superficies pueden ser heterogéneas, por lo que un solo perfil no puede reflejar todos sus defectos.
- Se pueden obtener parámetros de volumen.
- Mayor reproducibilidad; al analizar todo el área se reduce la posibilidad de errores de posicionamiento o selección de traza.

De entre los parámetros que define esta norma, en el presente proyecto se han obtenido y analizado los siguientes:

- Altura media aritmética de una superficie (S_a): Es el valor promedio de las desviaciones absolutas de un área con respecto a una superficie o plano ideal. Es decir, el equivalente a R_a pero en un área completa. Se calcula de a partir de la ecuación 3 y se puede ver representada en la figura 13.

$$S_a = \frac{1}{A} \int_A \int |Z(x, y)| dx dy \quad (3)$$

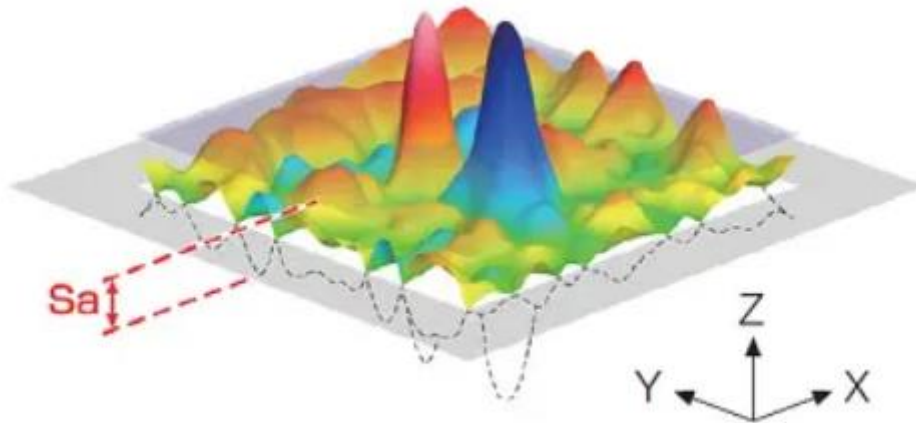


Figura 13: Altura media aritmética de una superficie [20].

- **Altura máxima de una superficie (S_z):** Consiste en la suma del valor de la altura máxima de pico y del valor de profundidad máxima de hoyo de la superficie. Sería el equivalente a R_t , pero de nuevo, en un área completa en lugar de una trayectoria o sección específica. En la *figura 14* se puede ver una representación de esta variable.

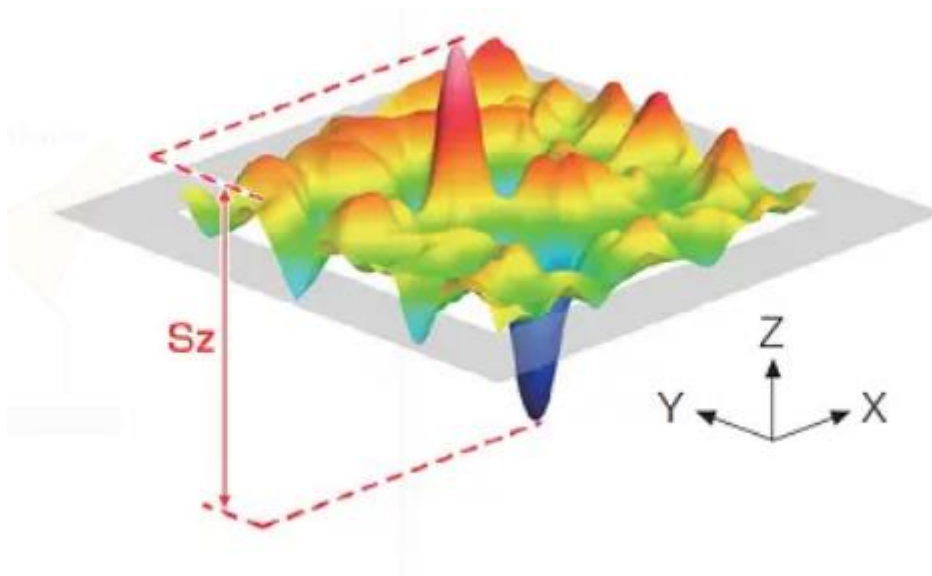
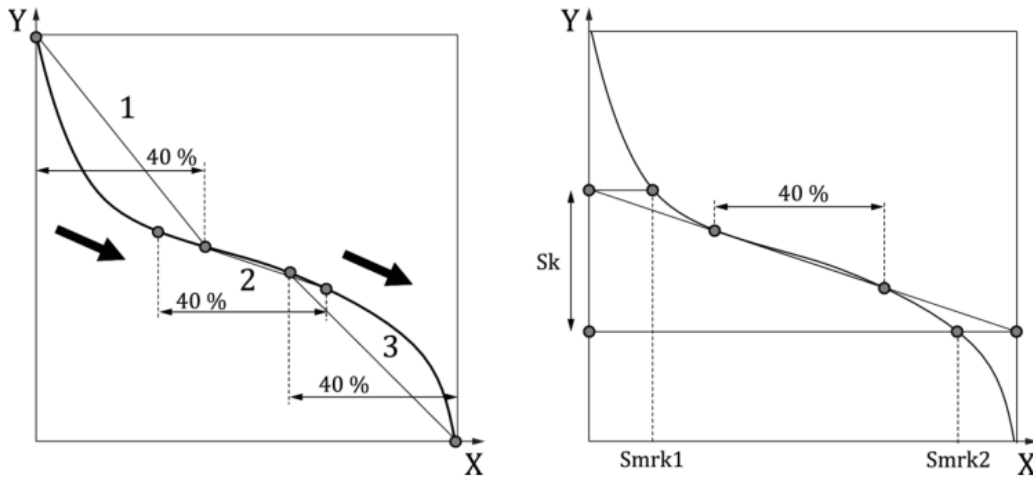


Figura 14: Altura máxima de una superficie [21].

- **Altura del núcleo (S_k):** Es la distancia entre el nivel más alto y el más bajo de la superficie del núcleo. En la *figura 15* se puede observar la representación de este parámetro y aquellos que son necesarios para su obtención.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio



Leyenda

X	Tasa portante de área
Y	Posición de la línea de intersección
1, 3	Secantes
2	Secante con el menor gradiente
Sk	Altura del núcleo
Smrk1, Smrk2	Tasas portantes

Figura 15: Altura del núcleo [19].

- Volumen vacío del núcleo (Vvc): Diferencia de volumen vacío entre las tasas portantes.
- Proporción de área interfacial desarrollada (Sdr): Consiste en la relación del incremento del área interfacial de la superficie de escala limitada sobre el área de evaluación. Se calcula a partir de la ecuación 4 y se puede ver representado en la figura 16.

$$Sdr = \frac{1}{A} \int_A \int (\sqrt{1 + (\frac{\partial z(x,y)}{\partial x})^2 + (\frac{\partial z(x,y)}{\partial y})^2} - 1) dx dy \quad (4)$$

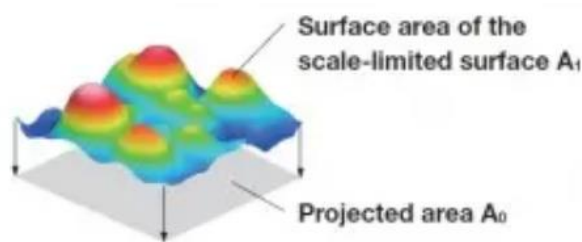


Figura 16: Proporción de área interfacial desarrollada[20].

Hoy en día existen diversas tecnologías que permiten evaluar todos estos parámetros [20], como, por ejemplo:

- Interferometría: Consiste en un método sin contacto que mediante la interferencia de los haces de luz permiten el análisis volumétrico, funcional y geométrico completo de la superficie, determinando parámetros de rugosidad superficial de perfil y de área.

- Método de la sonda óptica: Una sonda óptica consiste en un dispositivo sin contacto que utiliza principios ópticos para capturar la topografía de una superficie, obteniendo así sus parámetros de rugosidad superficial tanto por perfil como por área. Es un método versátil y que permite una alta resolución.

2.3.3. Procesos de Modificación Superficial.

Hoy en día existen diversas tecnologías que sirven para modificar las propiedades superficiales de los materiales. Éstos, se podrían clasificar en procesos químicos, mecánicos o térmicos.

1. Procesos de modificación superficial químicos:

Son procesos de modificación superficial que implican reacciones químicas o modificación de la composición química de la superficie a tratar. Un ejemplo de este tipo de procesos pueden ser:

- Procesos electroquímicos [21]: Consisten en técnicas de modificación superficial que se basan en reacciones que, inducidas por una corriente eléctrica, alteran la composición de la superficie del material. Este tipo de técnicas requieren un cátodo, un ánodo y un electrolito, que permiten procesos como la electrodeposición (deposición de otros metales en la superficie), electropulido (eliminación controlada del material para alisar la superficie) o anodizado (formación de una capa de óxido protectora, común en el aluminio). En la *figura 17* se puede ver un esquema del funcionamiento de la electrodeposición.

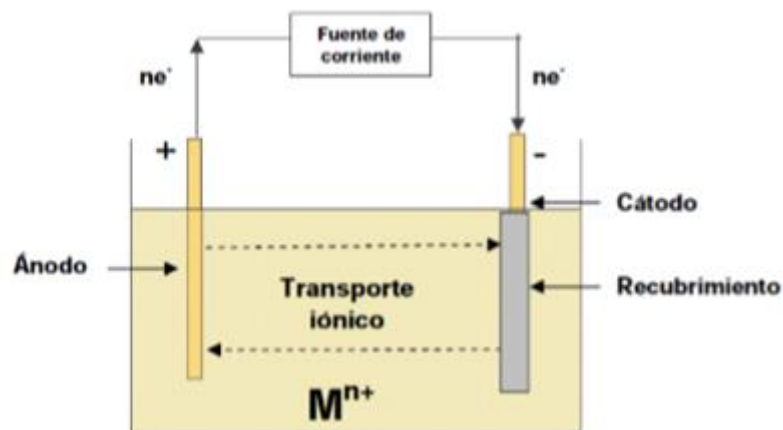


Figura 17: Electrodeposición [25].

- Procesos por deposición química [22]: Técnicas mediante las que se forma una capa sólida sobre una superficie a través de reacciones químicas controladas. Permiten recubrimientos funcionales de materiales cerámicos, metálicos o polímeros. Un ejemplo de este tipo de técnicas es el CVD (Chemical Vapor Deposition), proceso en el que el recubrimiento se forma por reacción de gases sobre la superficie caliente del material o sustrato.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

- Procesos por reacciones químicas [22]: Técnicas de modificación superficial en las que la superficie del material reacciona con sustancias químicas externas, para así formar una nueva capa compuesta. Ejemplos comunes de este tipo de técnicas son la nitruración (difusión de nitrógeno en la superficie para aumentar dureza y resistencia al desgaste) o la cementación (incorporación de carbono para endurecer aceros).

2. Procesos de modificación superficial mecánicos [23]:

Consisten en técnicas que implican la acción física directa sobre la superficie de un material para mejorar o modificar sus propiedades funcionales. Estos procesos incluyen métodos como el pulido (*figura 18*) o el granallado (*figura 19*).



Figura 18: Pulido [24].



Figura 19: Granallado [25].

3. Procesos de modificación superficial térmicos [26]:

Técnicas que modifican las propiedades superficiales mediante la aplicación de calor. Permiten mejorar características como la dureza, la resistencia al desgaste o la tenacidad. Ejemplos de este tipo de técnicas pueden ser el temple superficial, el recocido localizado o el texturizado láser.

Precisamente, el texturizado láser es un proceso de modificación superficial muy versátil, preciso y rápido. Por ello y otras razones que se expondrán a lo largo del desarrollo del presente Trabajo de Fin de Máster, es la tecnología de modificación superficial que se ha elegido para comprobar cómo varían las propiedades superficiales del aluminio 7075 tras su tratamiento, en función de diferentes valores de potencia, frecuencia y velocidad de escaneado del láser.

2.4. Fundamentos de la Activación Superficial.

La activación superficial se refiere a los procesos que permiten modificar la superficie de un material, para mejorar sus propiedades o facilitar la interacción con otros materiales, sin alterar sus propiedades volumétricas. El objetivo general suele ser mejorar la energía superficial para favorecer la adhesión de pinturas, recubrimientos, adhesivos u otros materiales [27].

En procesos de activación superficial es muy importante la limpieza de la superficie debido a los siguientes factores [28]:

- Un tratamiento que implique activación superficial solo modifica aquello con lo que entre en contacto, es decir, si hay una capa de contaminante, el tratamiento puede afectar a esa capa y no al material base.
- Contaminantes orgánicos y siliconas pueden incluso generar residuos no deseados tras el tratamiento.
- Una superficie que no se haya limpiado correctamente puede requerir mayor densidad de energía o tiempo de tratamiento, reduciendo así la eficiencia del proceso y aumentando el coste.

La activación superficial se ve implicada en aquellos sectores de la industria en los que adhesión y compatibilidad superficial son importantes, como en la industria automotriz [28] (activación de superficies antes de pintarlas o pegarlas), la industria electrónica [29] (activación de la superficie para imprimir circuitos electrónicos flexibles) o en dispositivos biomédicos [30] (la activación superficial puede mejorar la compatibilidad de implantes).

Además, también es conveniente hablar en este contexto del término *mojabilidad*, que consiste en la capacidad que tiene una superficie para hacer que un líquido se extienda por ella o, por el contrario, lo repela.

Para entender este concepto es necesario discernir entre los componentes de la energía superficial [31]:

- Componente dispersiva: Debida a las fuerzas de Van der Waals, es decir, fuerzas de atracción débiles y universales que existen entre todas las moléculas.
- Componente polar: Proviene de la interacción entre moléculas que tienen carga eléctrica opuesta, que se atraen como si se tratara de imanes (lo que se conoce como interacción dipolo-dipolo). Esta componente afecta mucho a la humectabilidad y la adhesión.

Por otro lado, cuando hablamos de mojabilidad, también nos interesa la interacción entre las diferentes fases o medios, que son:

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

- **Sólido-Líquido:** Un líquido entra en contacto con una superficie sólida. Si la energía de adhesión entre el sólido y el líquido es alta, este se extiende y moja bien la superficie. En cambio, si es baja, el líquido forma gotas.
- **Sólido-Aire:** Una superficie sólida entra en contacto con el aire, siendo la energía superficial entre ambas una medida de la tensión superficial.
- **Líquido-Aire:** Un líquido entra en contacto con el aire, generando una tensión en la superficie del líquido, que es la fuerza que hace que las moléculas del líquido se mantengan juntas.

En este caso, se estudia la interacción sólido-líquido, en la cual el comportamiento del líquido dependerá *ángulo de contacto* (θ_c) entre la superficie de ambas fases o medios, cuando se encuentran en equilibrio (*figura 20*).

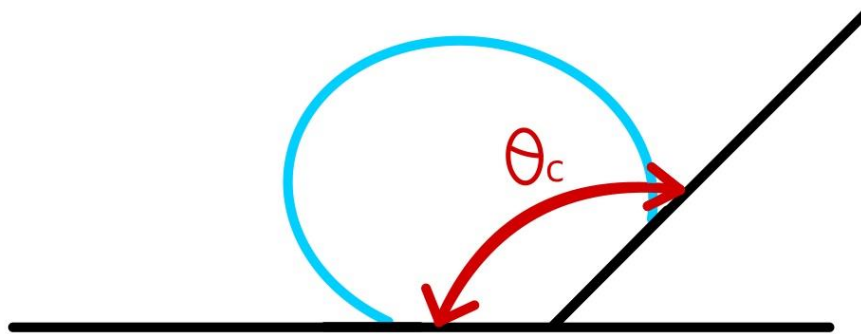


Figura 20: Ángulo de Contacto.

Cuando θ_c es menor de 90° , la superficie se considera *hidrofílica*, es decir, que tiene una alta humectabilidad, ya que las moléculas de agua tienden a extenderse por ella en lugar de formar gotas.

Cuando θ_c es mayor a 90° , la superficie se considera *hidrófoba*, lo que significa que repele cualquier líquido.

Se puede ver un esquema-resumen en la *figura 21*.

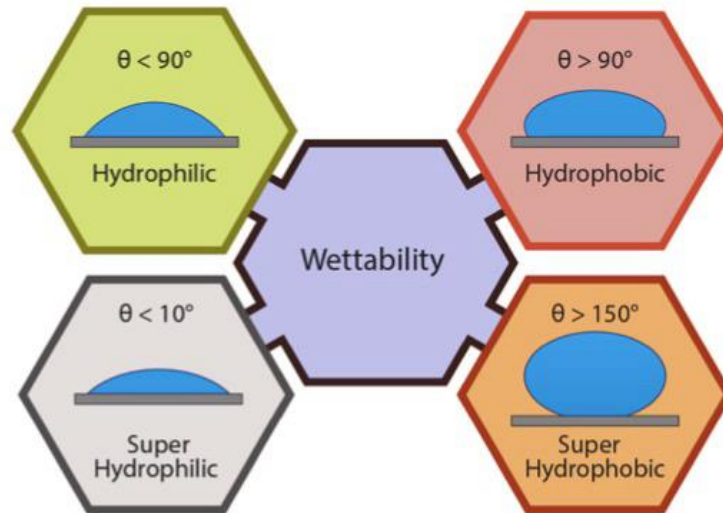


Figura 21: Esquema resumen del comportamiento de una superficie en función de su mojabilidad [32].

En la figura 22 se puede ver como el comportamiento de la superficie en cuanto a su mojabilidad depende de la rugosidad superficial de la misma.

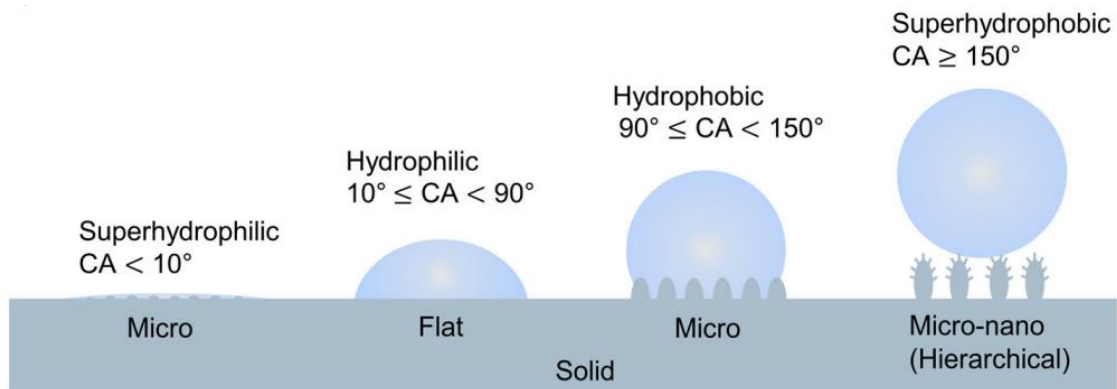


Figura 22: Relación entre rugosidad y mojabilidad de una superficie [33]

2.5. Fundamentos del Texturizado Láser.

El texturizado láser consiste en un proceso que utiliza un haz láser para modificar la textura, rugosidad y propiedades superficiales de un material.

Presenta múltiples ventajas, como:

- Precisión y reproducibilidad.
- Menores costes, pues no se necesitan consumibles y se reducen los tiempos de producción.
- Versatilidad, los láseres son flexibles y compatibles con muchos materiales y superficies.

Por tanto, es el proceso ideal si se necesita alta precisión, texturas funcionales, limpieza o si se trabaja con materiales delicados. Además, permite una alta personalización en cuanto al patrón de texturizado, que puede ser desde uno simple, como líneas paralelas, cuadrados concéntricos o una malla, hasta una imagen concreta.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

Hay múltiples tipos de láseres diferentes que se usan en el texturizado de superficies, pero los más comunes son:

- Láser de dióxido de carbono (CO_2): En este tipo de láseres, se excitan los átomos del gas mediante una descarga eléctrica que se genera con la aplicación de un cierto voltaje entre cátodo y ánodo. Estas moléculas de CO_2 excitadas tratan de volver a su estado fundamental, emitiendo fotones en forma de luz en el proceso y, con ello, generando la radiación láser. En la *figura 23*, se puede ver un esquema genérico de un láser de dióxido de carbono. Se utilizan generalmente para cortar o grabar patrones en superficies con alta precisión. Este tipo de láseres son de nano-segundos, es decir, la duración de un pulso es de 10^{-9} segundos.

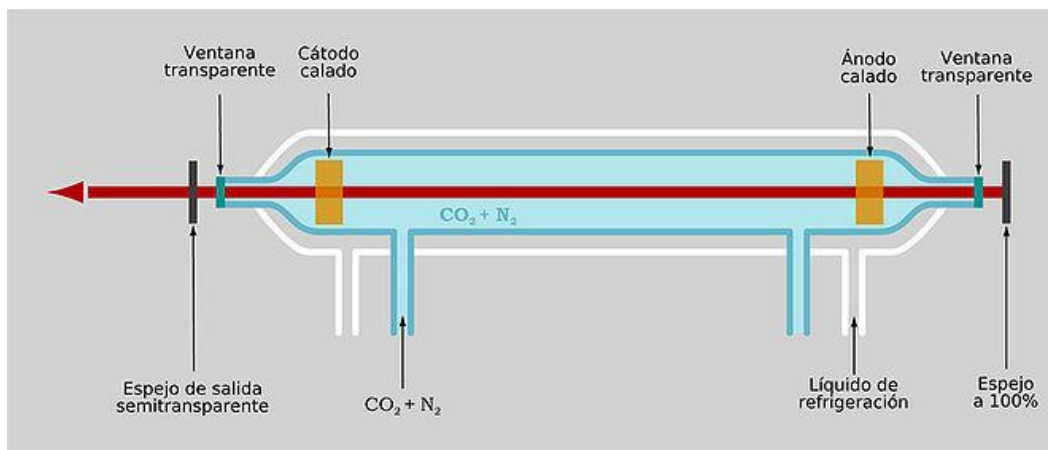


Figura 23: Esquema láser de CO_2 [34].

- Láser de femtosegundos: Consiste en un tipo de láser capaz de emitir pulsos extremadamente cortos, con una duración de femtosegundos (del orden de 10^{-15} segundos). Al ser pulsos tan rápidos, permiten procesos de alta precisión, además de un control prácticamente total sobre la energía depositada sobre la superficie del material. En estos láseres, se hace uso de un medio activo capaz de amplificar la luz, que puede ser sólido, líquido o gas, aunque el más común es el Ti:Zafiro, compuesto por zafiro (Al_2O_3) dopado con iones de titanio. Se usa sobre todo en procedimientos de cirugía ocular, aunque también en fabricación de materiales avanzados y microfabricación.
- Láser de fibra: Este tipo de láseres generan su haz haciendo pasar la luz de un diodo a través de un cable de fibra óptica dopado con ciertos elementos que amplifican la potencia de la luz (*figura 24*). Pueden ser de nano-segundos o de pico-segundos (duración del pulso de 10^{-12} segundos).

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

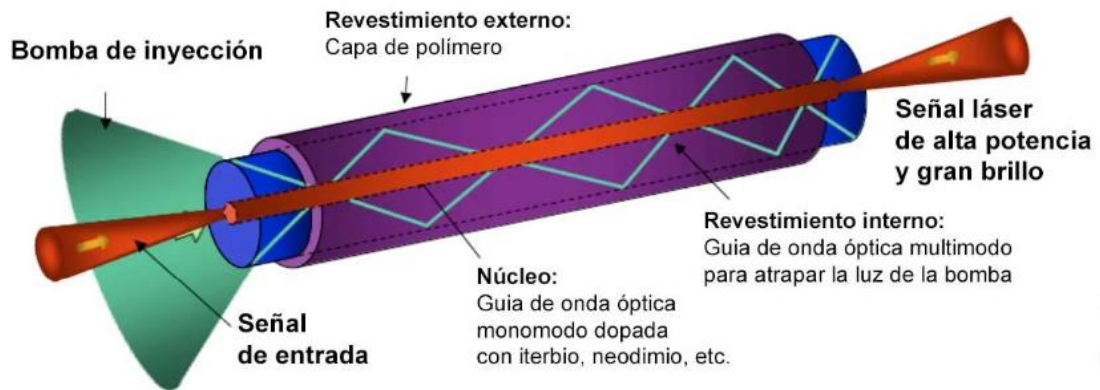


Figura 24: Esquema láser de fibra [35].

Su movimiento está programado con control numérico, como un proceso de mecanizado común, de forma que, los patrones que se grabarán en la superficie de la pieza habrán sido previamente diseñados o definidos por el usuario.

Las principales ventajas de un láser de fibra son:

- Son muy eficientes, pues gran parte de la energía del diodo láser se convierte en energía útil.
- El haz resultante es de pequeño diámetro y muy definido, lo que hace este tipo de láseres perfectos para aplicaciones que requieran alta precisión.
- Requieren de poco mantenimiento.
- Se pueden conseguir un rango amplio de potencias.
- Son más pequeños y ligeros que otros tipos de láseres.
- No necesitan gases para generar el haz láser, lo que los hace más baratos y menos contaminantes.

En el proceso de texturizado láser intervienen diversos parámetros, en función de los cuales se obtienen diferentes resultados finales. Éstos son:

- Velocidad de escaneado: Velocidad a la que se mueve el foco del láser por la superficie del material. En este caso se mide en milímetros por segundo (mm/s).
- Potencia: Cantidad de energía que emite el láser por unidad de tiempo. En este caso se mide en vatios.
- Frecuencia: Número de pulsos por segundo que da el láser. En este caso, se mide en KHz.
- Ancho de pulso: Tiempo durante el cual el láser permanece activo o emite el haz.
- Patrón de texturizado: Disposición de formas, relieves o estructuras que se generan sobre la superficie del material gracias al láser.
- Número de pasadas: Consiste en el número de veces que el láser pasa sobre la misma zona de un material.
- Separación entre pasadas: Distancia lateral entre dos trayectorias consecutivas del haz láser.
- Tiempo de exposición: Tiempo durante el cual el láser incide sobre la zona a tratar del material en cuestión.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

- Parámetro de densidad de energía: Energía por unidad de área que incide en la superficie del material. Éste se puede calcular a partir de las expresiones de la ecuación 5, ecuación 6 y ecuación 7.

$$Ed = \frac{\text{Energía Pulso}}{\text{Área Pulso}} = \frac{J}{m^2} \quad (5)$$

$$\text{Energía Pulso} = \frac{\text{Potencia}}{\text{Frecuencia}} = J \quad (6)$$

$$\text{Área Pulso} = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (7)$$

Siendo:

- Energía Pulso: Energía que proporciona el láser en cada pulso, en Julios.
- Potencia: Potencia del láser en cada caso, en Watios.
- Frecuencia: Frecuencia del láser en cada caso, en Herzios.
- D: Diámetro del haz del láser en el plano focal. Según el manual del láser utilizado en el presente trabajo, es de 50 μm .
- Área Pulso: Área afectada en cada pulso. Dado que el diámetro del haz del láser no varía, es de $1.96 * 10^{-9}$ m.

Se obtienen entonces los siguientes valores (*figura 25*) del parámetro de densidad de energía en función de la frecuencia y la potencia en cada caso.

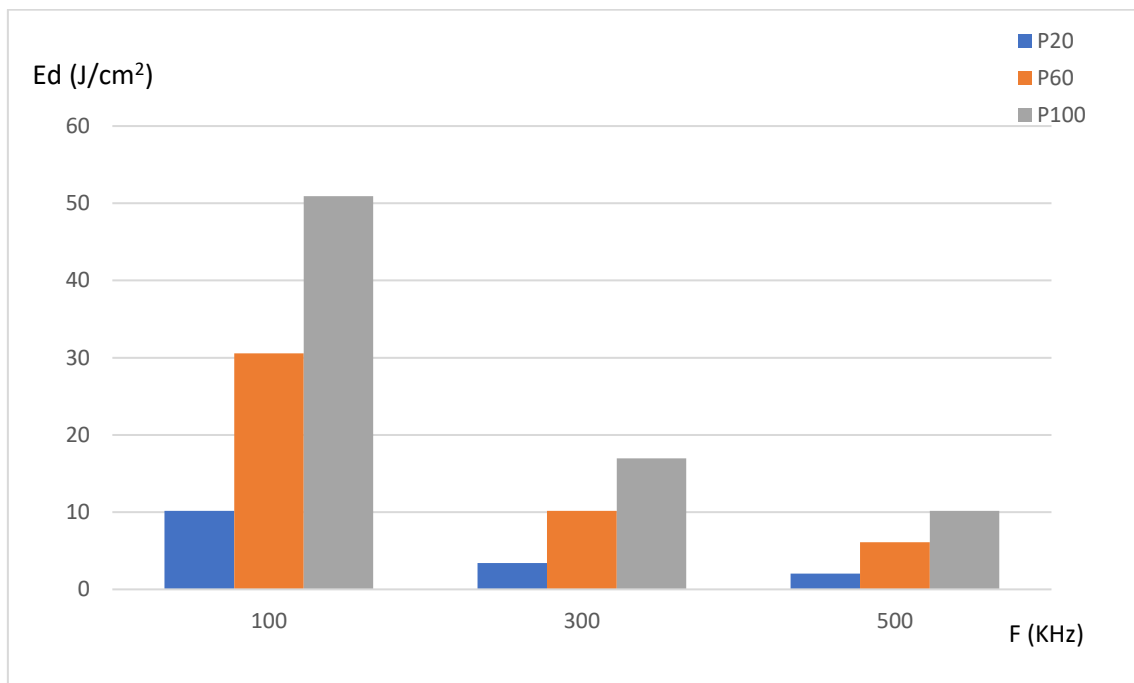


Figura 25: Valores del parámetro de densidad de energía en función de la potencia y la frecuencia.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

Actualmente la tecnología del texturizado láser se utiliza en múltiples sectores, tales como:

- Industria médica: Para la mejora de las superficies de implantes biomédicos e instrumentos quirúrgicos (*figura 26*).

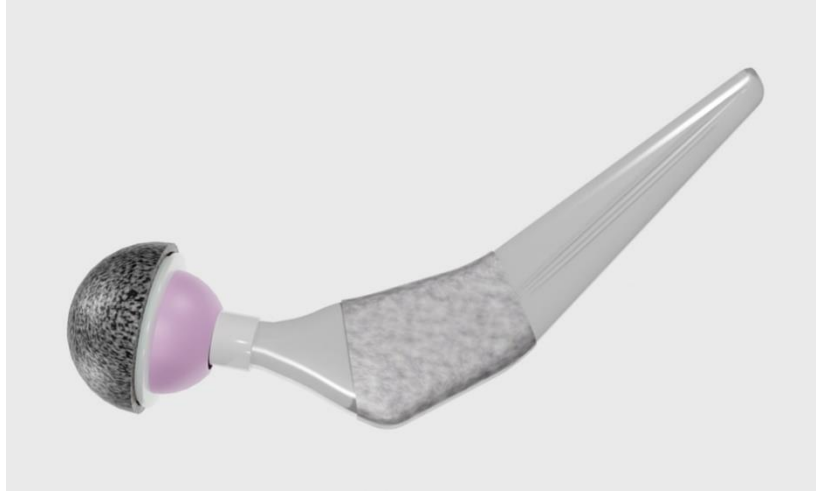


Figura 26: Implante biomédico tratado con texturizado láser [35].

- Óptica y fotónica: Creación de superficies antirreflectantes y microestructuras que controlan la dispersión o transmisión de luz.
- Industria automotriz y aeroespacial: Para mejorar la eficiencia en la aerodinámica de las superficies, además de para personalizarlas con fines estéticos o funcionales.
- Industria electrónica: Con el texturizado láser se puede modificar la conductividad y crear patrones específicos en las superficies para integrar circuitos.
- Estética y personalización: Para decoración de elementos finales, como creación de logotipos o patrones específicos (*figura 27*).

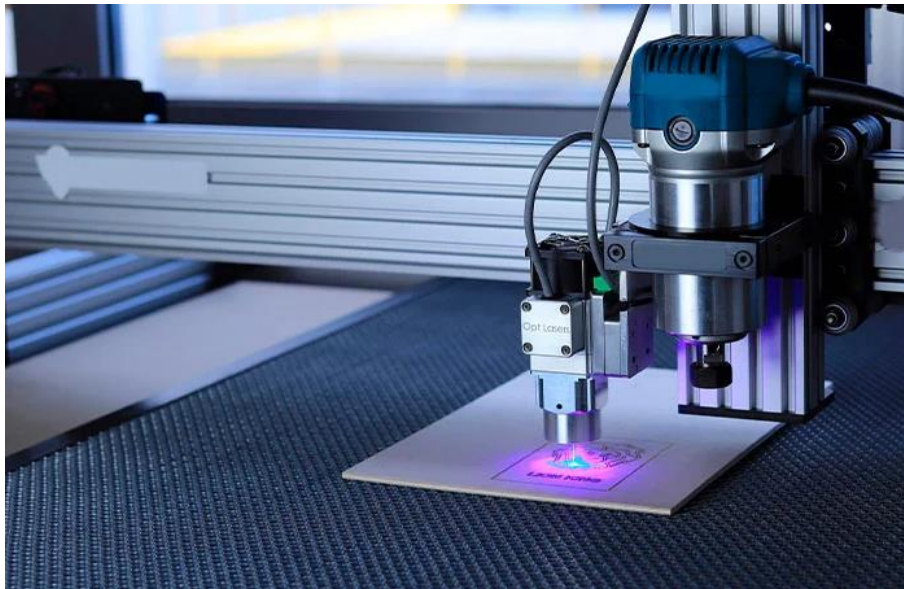


Figura 27: Marcado láser [36].

2.6. Ensayos de dureza.

Los ensayos de dureza son pruebas fundamentales en la ingeniería y la ciencia de los materiales, que permiten evaluar la resistencia de un material a la deformación plástica o a la penetración de un cuerpo más duro. Los resultados obtenidos de este tipo de ensayos permiten la selección adecuada de materiales para cada aplicación, optimizando el proceso de fabricación.

Evaluar la dureza tras un tratamiento de texturizado láser es clave para entender cómo ha cambiado el material, pues la dureza superficial puede aumentar o disminuir después de este proceso. Permite establecer una relación entre la dureza y los diferentes parámetros que pueden variar en el proceso de texturizado (potencia, frecuencia y velocidad de escaneado en este caso), además de valorar la funcionalidad del tratamiento y las posibles aplicaciones que puede tener el material o superficie tras el mismo.

Existen diferentes métodos de ensayo de dureza, pero los más extendidos son el ensayo Brinell, el ensayo Vickers y el ensayo Rockwell.

2.6.1. Ensayo Brinell.

Para este ensayo se utiliza una bola de acero que se presiona contra la superficie del material a ensayar con una carga definida y constante.

La dureza Brinell (HB) se calcula a partir del diámetro de la huella resultante (d), el diámetro de la bola utilizada en el ensayo (D) y la carga aplicada (P), mediante la expresión de la *ecuación 8*.

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (8)$$

En la *figura 28* se puede ver un esquema del ensayo Brinell.

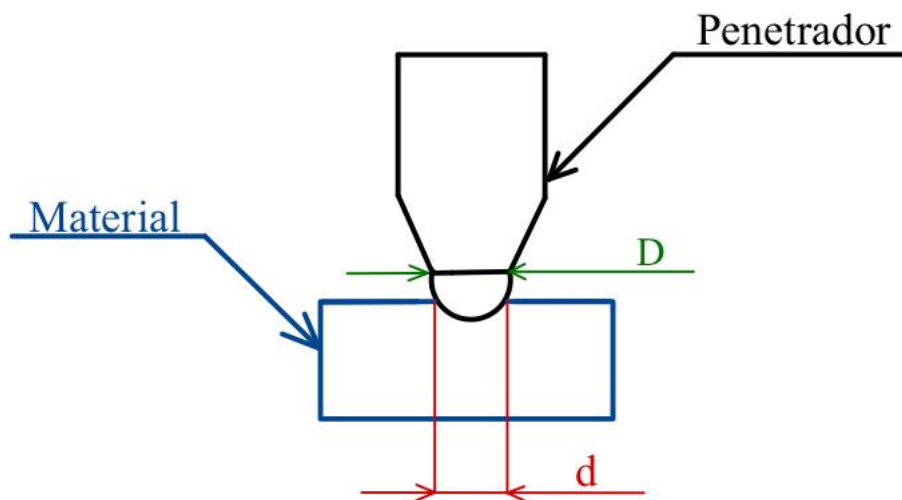


Figura 28: Esquema ensayo Brinell

Es ideal para materiales gruesos o con superficies rugosas, aunque no para materiales duros o en ensayos en los que se necesite una mayor precisión. Se usa principalmente en la industria para metales de gran espesor, como fundiciones de hierro, acero y ciertas aleaciones de aluminio.

2.6.2. Ensayo Vickers.

En el ensayo Vickers se utiliza como penetrador una pirámide de diamante con una base cuadrada y un ángulo de 136° entre sus caras, que se presiona contra la superficie del material con una carga definida.

La dureza Vickers (HV) se determina mediante la media de las diagonales que dan forma a la huella del penetrador (d), el ángulo entre las caras de la pirámide ($\theta=136^\circ$) y la carga aplicada durante el ensayo (F), a través de la *ecuación 9*.

$$HV = \frac{2F \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2} \quad (9)$$

En la *figura 29* se puede ver un esquema del ensayo Vickers.

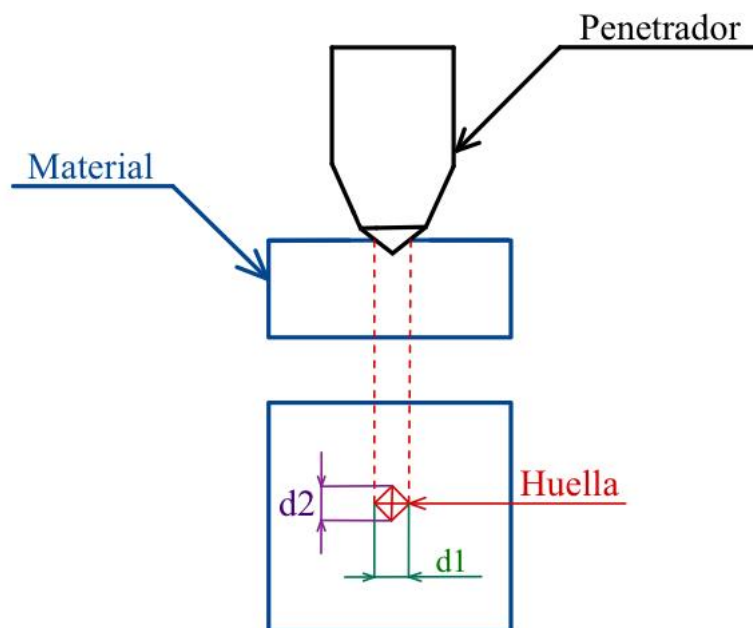


Figura 29: Esquema ensayo Vickers.

Se puede calcular además la profundidad de la entalla (h) a partir de las diagonales resultantes del ensayo. En el esquema de la *figura 30* se pueden ver todos los elementos mencionados en los cálculos.

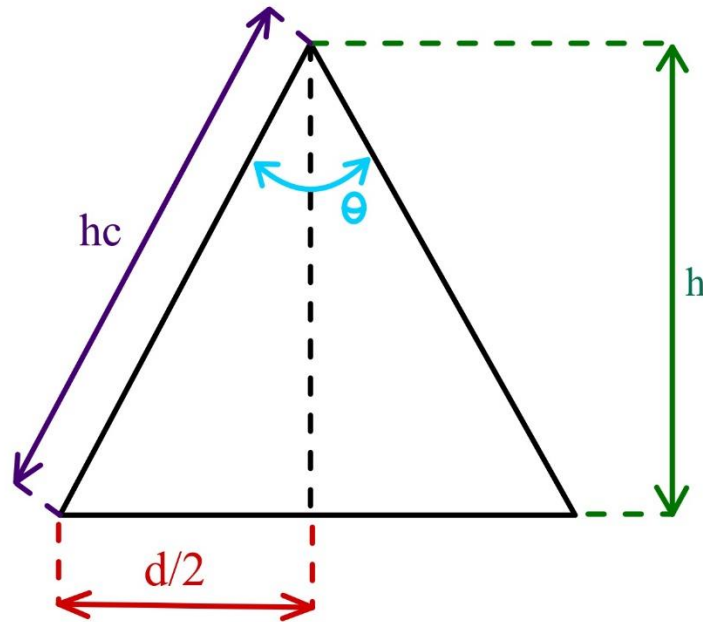


Figura 30: Esquema para el cálculo de la profundidad de la entalla.

En primer lugar, como las diagonales $d1$ y $d2$ pueden tener valores diferentes, es necesario calcular la *diagonal efectiva* “ d ”, a partir de la *ecuación 10*.

$$d = \sqrt{d1 * d2} \quad (10)$$

Una vez hecho esto, se obtiene la distancia entre el vértice superior de la pirámide y cualquiera de los vértices inferiores “ hc ” a partir de la *ecuación 11*.

$$hc = \frac{d}{2} * \frac{1}{\text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (11)$$

Y, por último, se puede calcular la profundidad de la entalla “ h ” a partir de la *ecuación 12*.

$$h = hc * \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (12)$$

El ensayo Vickers es muy versátil, puede ser usado tanto en materiales blandos como en materiales duros, ya que la carga puede variar entre valores muy altos y muy bajos. La huella que produce es pequeña y precisa, siendo ideal para materiales con una microestructura compleja, superficies pequeñas y láminas delgadas, aunque es un ensayo más lento que el resto.

Se utiliza ampliamente en la industria electrónica, aeronáutica, investigación y en componentes pequeños o de precisión.

2.6.3. Ensayo Rockwell.

El ensayo Rockwell es similar a los dos anteriores, solo que es menos preciso. En este caso, la dureza se mide en función de la profundidad de la huella que produce el indentador en el material. Tiene varias escalas, entre ellas, las más utilizadas son:

- **Rockwell C (HRc):** Se utiliza un cono de diamante con un ángulo de 120° entre sus caras y una carga total de 150 kg. Ideal para materiales duros, como aceros endurecidos, herramientas de corte y aleaciones metálicas de alta dureza. En este caso, se aplica primero una carga de 10 kg y luego una carga final de 140 kg. La diferencia entre la profundidad de la primera y la segunda penetración (h) sirve para determinar la dureza del material en escala Rockwell C, a partir de la ecuación 13.

$$HRc = 100 - \frac{h}{0.002} \quad (13)$$

- **Rockwell B (HRB):** Se utiliza como indentador una bola de acero 1/16 pulgadas (1.5875 mm). No es apto para materiales duros, se utiliza sobre todo en la industria metalúrgica, para medir la dureza de aceros de bajo carbono, aleaciones de aluminio y otros metales no ferrosos, y también para el control de calidad, para garantizar que productos como pernos, tuercas o componentes de maquinaria cumplen con los estándares de dureza especificados. Al igual que en Rockwell C, se aplica una carga preliminar de 10 kg, pero en este caso la carga final es de 100 kg. Una vez se ha realizado el ensayo como tal, se mide de nuevo la diferencia de profundidad entre la primera y segunda entalla (h) y, con ella, se puede calcular el valor de la dureza en escala Rockwell B:

$$HRB = 130 - \frac{h}{0.002} \quad (14)$$

2.6.4. Comparativa entre los diferentes ensayos de dureza.

A continuación, se puede ver una tabla-resumen (*tabla 4*) en la que se comparan los diferentes ensayos de dureza tratados anteriormente, Rockwell, Brinell y Vickers.

Característica	Rockwell	Vickers	Brinell
Método	Doble penetración con un indentador de cono de diamante o una bola de acero.	Penetración con un indentador de diamante en forma de pirámide con base cuadrada.	Penetración con un indentador de acero en forma de esfera.
Escala	HRB,HRc,etc.	HV	HB
Ventajas	Sencillo y adecuado para materiales metálicos comunes.	Muy preciso, ideal para pequeñas muestras y materiales duros.	Bueno para materiales gruesos.
Aplicación	Metales y aleaciones (aceros)	Materiales finos, duros y recubrimientos.	Materiales gruesos o de grano grueso (fundiciones).

Tabla 4: Comparación entre los ensayos Vickers, Rockwell y Brinell.

2.7. Líneas de Investigación Actuales.

Son muchos los estudios ya realizados en cuanto a las propiedades de ciertos materiales tras ser tratados con un proceso de texturizado láser.

1. Bañón et al. [37] realizaron un trabajo en el cual aplicaron modelos predictivos basados en RSM (Metodología de la Superficie de Respuesta) y ANN (Redes Neuronales Artificiales) para hallar la rugosidad y la humectabilidad obtenidas tras realizar un tratamiento de texturizado láser en una aleación de acero al carbono S275. Para ello, establecieron que las variables de “entrada” del proceso serían la potencia (5-10-20 W), la frecuencia (20-80 KHz) y la velocidad de escaneado (10-100-250 mm/s) y, a partir de las diferentes combinaciones de las mismas, obtuvieron los valores medios de los parámetros de rugosidad (R_a , R_t , R_z y R_v), que se pueden ver reflejados en las gráficas de la *figura 31*. En este artículo, se llega a la conclusión de que la velocidad de escaneado y la densidad de energía controlan gran parte de las propiedades resultantes del tratamiento de texturizado láser, de forma que a bajas velocidades de escaneado y alta densidad de energía se consigue aumentar la rugosidad de la superficie y disminuir su humectabilidad.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

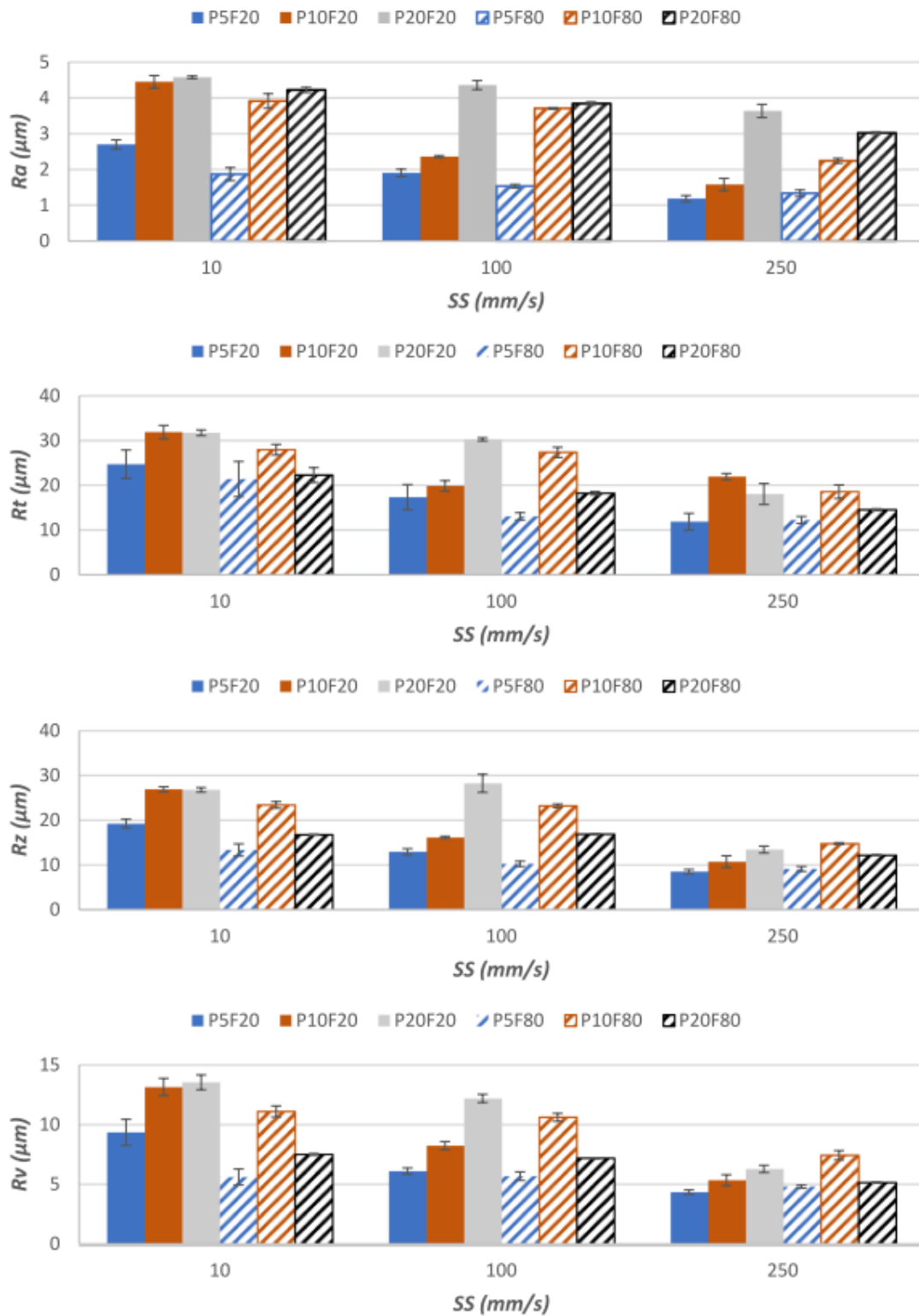


Figura 31: Resultados experimentales obtenidos en la evaluación de la rugosidad del perfil tras el texturizado láser en el artículo de Bañón et al. [38].

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

- Bañón et al. [38] evaluaron la energía libre superficial en el texturizado láser del acero al carbono S275, además de la mojabilidad de la superficie (*figura 32*). En este caso, los parámetros que decidieron variar han sido la potencia (5-10-20 W) y la velocidad de escaneo (10-100-250 mm/s). La frecuencia se mantuvo constante (20 KHz) y, al variar la potencia, también lo hizo el parámetro de densidad de energía (8.84-17.68-35.37 J/cm²).

Las principales conclusiones de este artículo son que a medida que aumentan la velocidad de escaneo se reduce la capacidad de penetración del láser y, con ello aumenta el ángulo de contacto y que, a medida que aumenta la potencia, pasa al contrario.

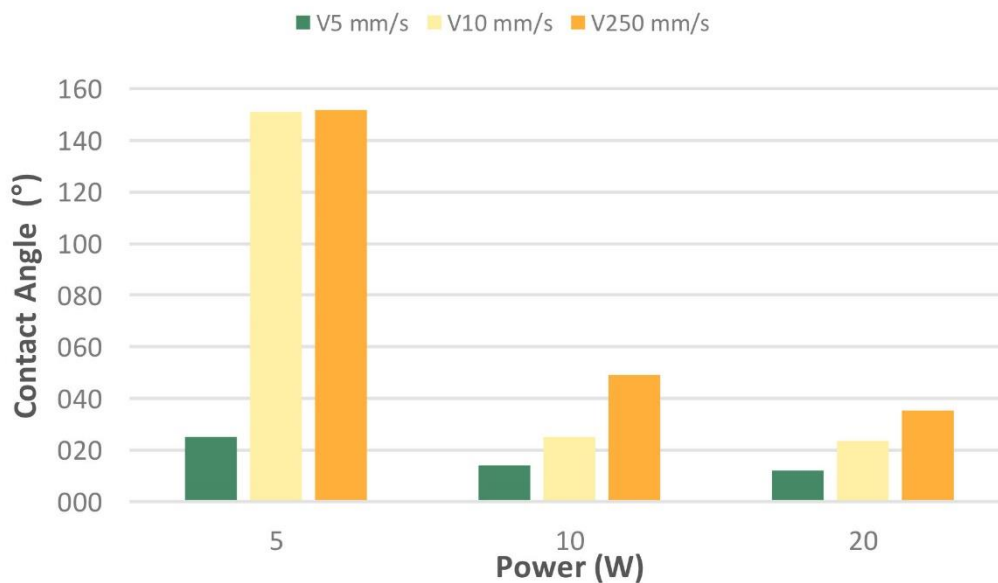


Figura 32: Variación del ángulo de contacto líquido-sólido en función de la potencia y la velocidad de escaneo en el artículo de Bañón et al [39].

- I. Del Sol et al. [39] tratan de mejorar el comportamiento tribológico de un composite de matriz metálica de Al-SiC mediante texturizado láser. Para ello, aplicaron diferentes patrones superficiales modificando la densidad de energía (8.84-17.68-35.37 J/cm²) y la velocidad de escaneo (10-100-200 mm/s). La conclusión más interesante relacionada con el presente proyecto que obtuvieron fue que el parámetro de densidad de energía es el que más afecta a la definición de las características geométricas de la pieza, lo que se puede ver reflejado en las gráficas de la *figura 33*.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

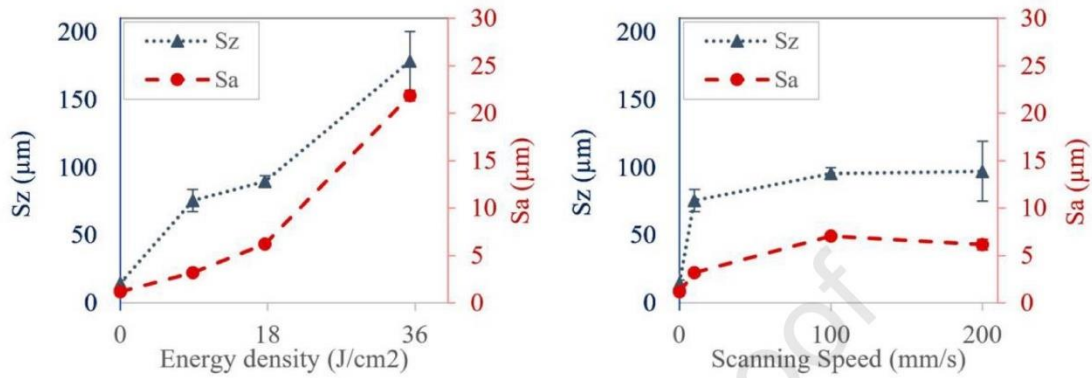


Figura 33: Gráficas de la evolución de Sa y Sz en función de la densidad de energía y la velocidad de escaneado [39].

4. Min Ji. Et al. [40] evalúan cómo afecta el texturizado superficial por láser a las propiedades tribológicas y la biocompatibilidad celular de la aleación Ti6Al4V con aplicaciones en odontología. Para ello, modificaron la potencia (16-40-64 W), frecuencia (100-500-1000 KHz) y la velocidad de escaneado (400-600-800 mm/s) del láser durante el proceso de texturizado, además del patrón. Las superficies resultantes presentaron un comportamiento más hidrófobo, pues el ángulo de contacto medio entre gota y superficie aumentó tras el tratamiento para los dos patrones utilizados (figura 34).

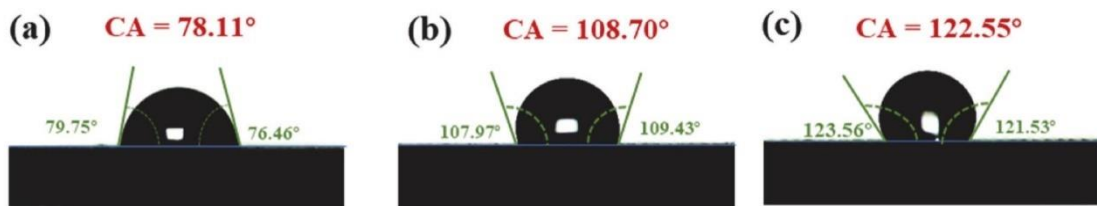


Figura 34: Ángulos de contacto resultantes en el artículo [40] para: (a) superficie no tratada (b) y (c) superficie tratada con patrones diferentes.

5. Muhammad Adeel Khan et al. [32] presentan una revisión exhaustiva sobre cómo el texturizado superficial con láser modifica la morfología y la mojabilidad en una variedad de materiales (metales, cerámicos, polímeros, etc), obteniendo como conclusión principal que, en efecto el texturizado láser es una herramienta versátil para diseñar superficies con una mojabilidad controlada. De este artículo cabe destacar también un tabla en la que muestran fotografías de la superficie tratada en función de la densidad de energía y la velocidad de escaneado (figura 35).

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

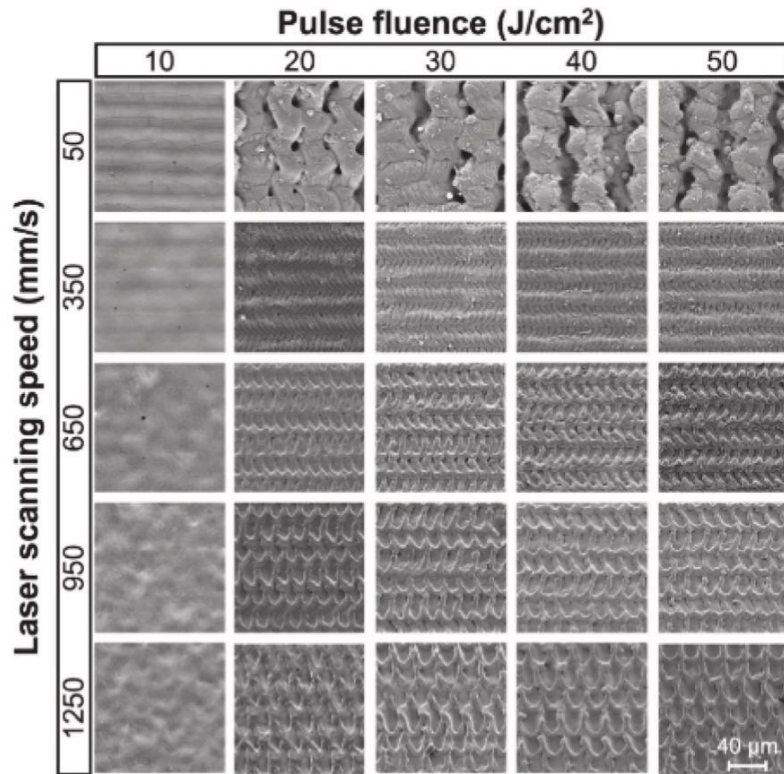


Figura 35: Fotografías de las superficies tratadas en el artículo [32] en función de la densidad de energía y la velocidad de escaneado.

- Hui-Chung Cheng et al. [41] han investigado cómo el texturizado láser de picosegundos modifica la rugosidad y la mojabilidad en superficies de cobra lisas y recubiertas de sílice. En ambos casos, la superficie pasó de hidrofílica a hidrófoba tras el tratamiento, concluyendo además que el tiempo de exposición era un factor clave en cuanto a la mojabilidad de la superficie.

Todos estos artículos han servido como referente previo en este trabajo, ayudando a elegir los valores de los parámetros que van a variar a la hora de hacer las diferentes pruebas con el láser. Además, las conclusiones extraídas de los mismos han sido útiles para tener una idea de cuales han de ser los resultados de las pruebas y el comportamiento aproximado de la superficie del material objeto de estudio ante ciertos valores definidos de frecuencia, potencia y velocidad de escaneado en el proceso de texturizado láser.

A continuación, se muestra una tabla-resumen (*tabla 5*) con las principales conclusiones extraídas de cada uno de los artículos anteriormente mencionados, los parámetros que han modificado y el material utilizado.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

Ref.	Parámetros	Material	Conclusiones Principales
[37]	<ul style="list-style-type: none"> F: 20/80 Khz. P: 5/10/20 W. SS 10/100/250 mm/s 	Aleación de acero s275 al carbono.	<ul style="list-style-type: none"> Texturas mejor definidas a menores valores de P altos y SS media. A mayor SS, menor tiempo de exposición. A menor F, menor rugosidad superficial. A mayor P, el patrón queda más definido. Si $Ed/SS > 1.5$, la superficie es hidrofílica. Si $Ed/SS \approx 0$, la superficie es hidrofóbica.
[38]	<ul style="list-style-type: none"> F: 20 Khz. P: 5/10/20 W. SS: 10/100/250 mm/s 	Aleación de acero s275 al carbono.	<ul style="list-style-type: none"> A medida que SS aumenta, se reduce la capacidad de penetración del láser. A mayor P, aumenta Ed y se produce una mayor porosidad.
[39]	<ul style="list-style-type: none"> Ed: 8.84/17.68/35.37 J/cm³ SS: 10/100/200 mm/s 	Compuesto de aluminio y carburo de silicio (Al-SiC)	<ul style="list-style-type: none"> Si Ed aumenta, disminuyen calidad superficial y rugosidad. Ed es el parámetro que más afecta a la definición de características geométricas de la pieza/superficie.
[40]	<ul style="list-style-type: none"> F: 100/500/1000 Khz. P: 16/40/64 W. SS: 400/600/800 mm/s 	Aleación de titanio compuesta por aluminio en un 6% y vanadio en un 4% (Ti6Al4V)	<ul style="list-style-type: none"> Se consigue un mejor texturizado a 40 W, 600 mm/s y 100 KHz. El texturizado de tipo "malla" mejora la capacidad de absorción de la superficie, haciendo que tenga un comportamiento hidrofílico.
[32]	Es un artículo muy general, no habla de parámetros ni materiales concretos.		<ul style="list-style-type: none"> Cuando SS aumenta, Ed disminuye, al igual que la rugosidad superficial. Secciones de tipo "malla" muestran un menor ángulo de penetración de líquidos (superficie hidrofílica)
[41]	<ul style="list-style-type: none"> F: 300 KHz. P: 5 W. SS: 100 mm/s 	<ul style="list-style-type: none"> Cobre sin recubrimiento. Cobre con recubrimiento de Sílice. 	A mayor tiempo de exposición, más hidrófoba se vuelve la superficie.

Tabla 5: Conclusiones y parámetros relevantes de los artículos estudiados.

3. Metodología y Plan de Trabajo.

En el presente Trabajo de Fin de Máster, se han realizado diversos procesos con el fin de caracterizar las propiedades superficiales y la dureza de una placa de Aluminio 7075, de 10 mm de espesor, 98 mm de ancho y de 188 mm de largo. La metodología seguida, en orden, ha sido la siguiente:

1. Texturizado láser: Se ha realizado un proceso de texturizado láser haciendo uso de dos patrones diferentes (líneas paralelas y cuadrados concéntricos), y cambiando los valores de potencia, frecuencia y velocidad de escaneo del láser.
2. Caracterización de las propiedades superficiales del material tratado: Se han medido las propiedades superficiales (R_a , R_z , R_t , S_a y S_z) haciendo uso de un equipo de medición y análisis óptico de alta precisión.
3. Análisis de la adhesión de líquidos a la superficie: Se ha llevado a cabo depositando gotas de agua en la superficie del material tratado haciendo uso de una pipeta, para así evaluar su comportamiento frente a líquidos.
4. Ensayo de dureza: Se ha realizado un ensayo de dureza Vickers al material una vez tratado, para caracterizar su dureza en esta escala.

Una vez realizados todos los procesos y ensayos, se han recopilado los resultados y obtenido conclusiones a partir de los mismos.

3.1. Metodología texturizado láser.

En el presente apartado se va a explicar cómo y con qué equipo se ha llevado a cabo el texturizado láser de la placa de aluminio 7075 objeto de estudio, que tienen las dimensiones del esquema que se puede ver en la *figura 36*.

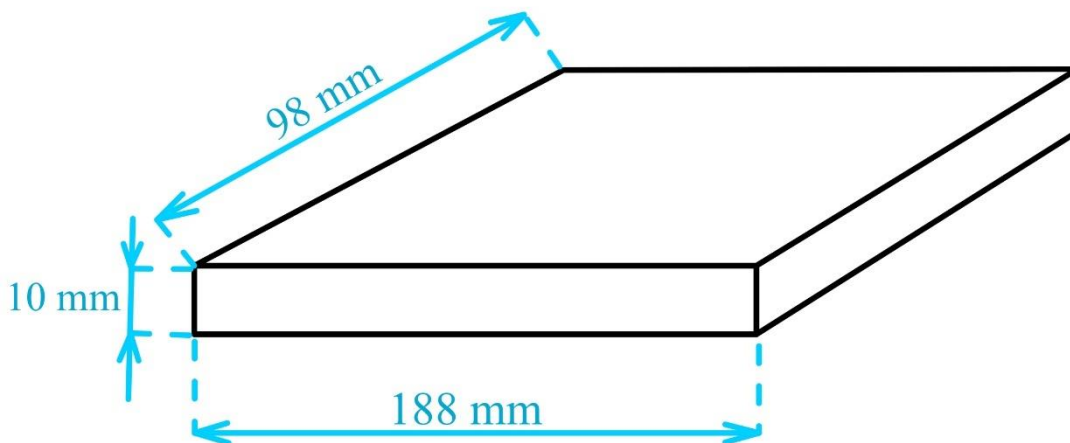


Figura 36: Esquema dimensiones placa de aluminio 7075 tratada en el proyecto.

3.1.1. Equipo y herramientas: Texturizado láser.

Para realizar el proceso de texturizado láser se ha utilizado el LS-XT-S de LASING®, un sistema de procesamiento láser. A continuación, se detallan las características del hardware y el software del sistema.

1. Hardware del LS-XT-S de LASING®.

El hardware del sistema de procesador láser LS-XT-S del LASING® está formado por los siguientes elementos, que se pueden ver en la *figura 37*.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio



Figura 37: Hardware del LS-XT-S de LASING®.

- Ordenador y periféricos: Gracias al ordenador, teclado, ratón y al software especializado se puede controlar el proceso de texturizado láser de forma relativamente sencilla.
- Láser integrado: Consiste en un láser de fibra (*figura 38*), cuyas propiedades principales quedan recogidas en la *tabla 6*.



Figura 38: Láser de fibra integrado en el LS-XT-S de LASING®

Longitud de onda	1064 nm
Modo de emisión	Pulsada
Potencia máxima	≈100 W
Refrigeración	Aire
Diámetro del haz	≈50 μm

Tabla 6: Propiedades principales del láser de fibra integrado en el LS-XT-S de LASING®.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

Cabe destacar que, además, es un láser de clase 4, lo que significa que es necesario extremar las precauciones, pues la exposición al mismo puede causar daños oculares y cutáneos tanto en contacto directo, indirecto o por reflexión del haz láser. También, puede generar incendios.

Por ende, aunque el láser se encuentra confinado en el interior del habitáculo y tras una puerta de seguridad que no permite que el proceso comience hasta que se encuentre cerrada, se recomienda el uso de gafas de protección.

2. Software del LS-XT-S de LASING®.

El software que utiliza el sistema del LS-XT-S de LASING® es el EZcad3.0 de JCZ, que consiste en un software de control especializado en máquinas de marcado y texturizado láser.

En la *figura 39* se puede ver una imagen de la interfaz de inicio, en la cual se puede introducir un dibujo que podemos hacer a mano o incluso cargar una fotografía. Además, se pueden cambiar diferentes parámetros del láser, como su potencia, frecuencia o velocidad de escaneado.

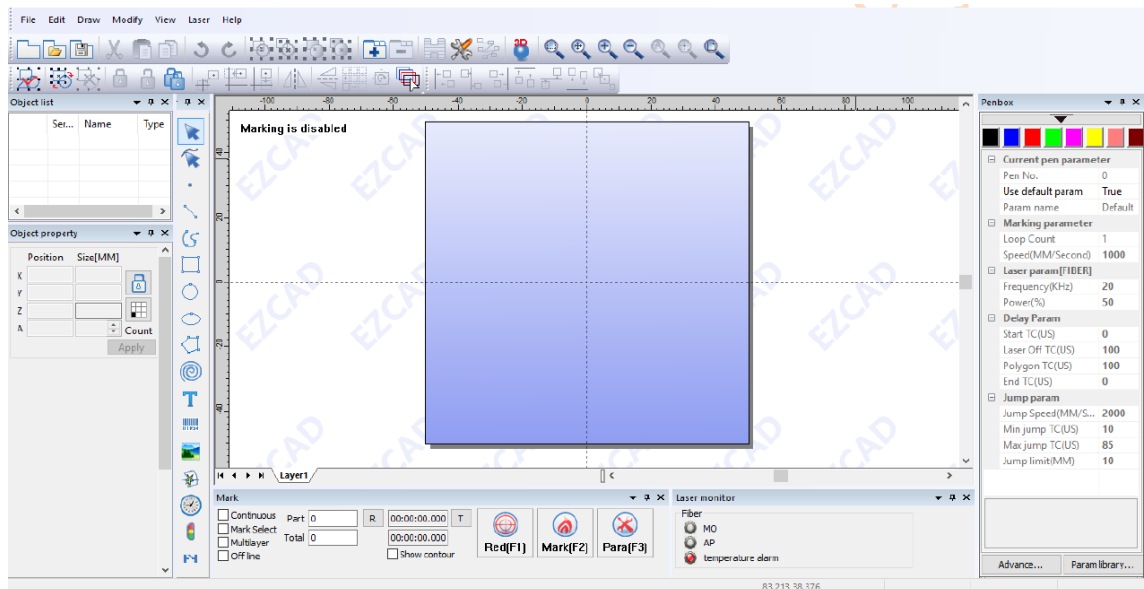


Figura 39: Interfaz inicial del software EXcad3.0 de JCZ.

Para realizar el diseño se utilizó la herramienta *Material Parameter Assistant*, con la cual se pueden realizar tantas pruebas como se desee (hasta un límite de 81), variando dos parámetros del láser, tal y como se puede ver en la *figura 40*.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

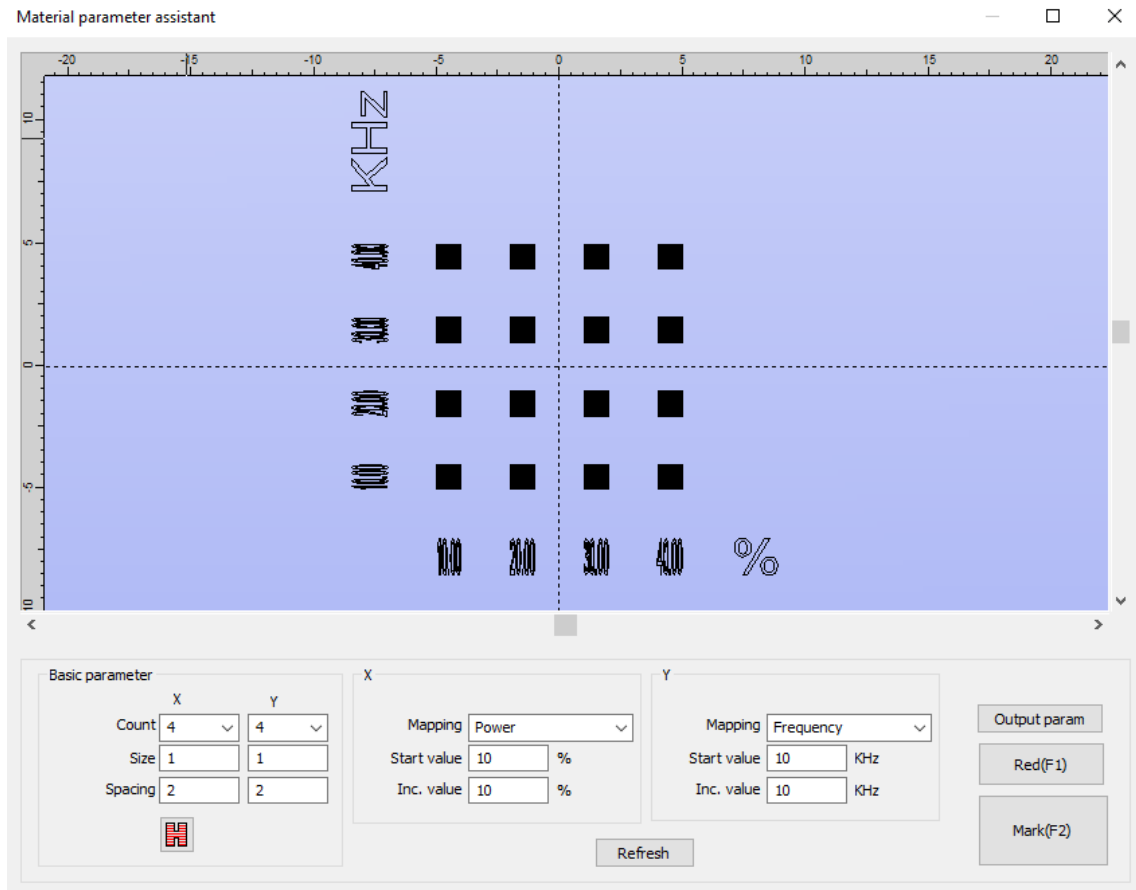


Figura 40: Interfaz Material Parameter Assistant.

Dentro de esta interfaz se pueden distinguir los siguientes elementos:

- **Basic parameter:** Sirve para establecer el número de filas y el número de columnas (y con ello el número de elementos diferentes), además de su tamaño, espaciado y el patrón con el que se va a llevar a cabo el texturizado.
- **X:** Sirve para establecer la variable que va a ir variando a lo largo del eje X y los diferentes valores que va a tomar la misma.
- **Y:** Sirve para establecer la variable que va a ir variando a lo largo del eje Y y los diferentes valores que va a tomar la misma.
- **Red:** Sirve para señalar en el material con un haz de luz láser (no permanente) el marco dentro del cual se va a realizar el texturizado.
- **Mark:** Sirve para marcar la pieza de forma permanente, es decir, llevar a cabo el texturizado como tal, con las especificaciones dadas en *Basic parameter*, *X* e *Y*.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

En el presente Trabajo de Fin de Master se decidió crear una matriz de 6x9 (6 filas y 9 columnas), variando la frecuencia entre 100 y 600 KHZ en el eje Y, la potencia entre 20 y 100 W en el eje X y manteniendo valores de velocidad de escaneado constantes en cada texturizado, aunque se han realizado a tres velocidades diferentes (100,500 y 900 mm/s). El tamaño de cada elemento es de 2x2 mm. Todo esto se puede ver reflejado en la *figura 41*.

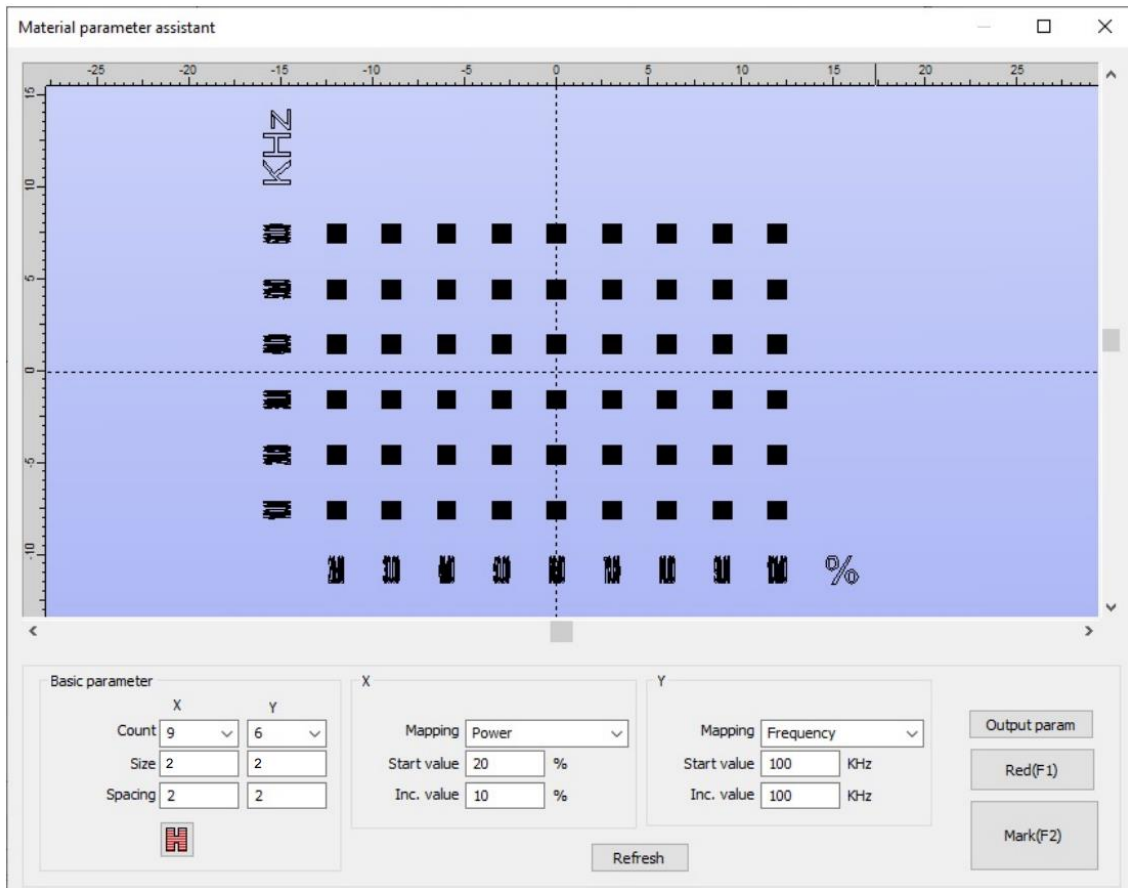


Figura 41: Material Parameter Assistant configurado.

Además, dentro del *Basic parameter*, como ya se ha mencionad con anterioridad, se puede cambiar el patrón del texturizado. En este caso se han usado dos patrones diferentes; líneas paralelas (*figura 42*) y cuadrados concéntricos (*figura 43*).

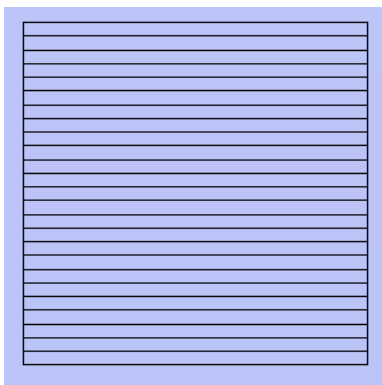


Figura 43: Patrón de líneas paralelas.

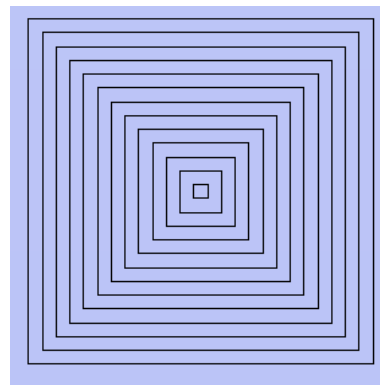


Figura 42: Patrón de cuadrados concéntricos.

3.1.2. Montaje y procedimiento: Texturizado láser.

Para llevar a cabo el proceso de texturizado, el procedimiento es el siguiente:

1. Colocar el material a texturizar en el habitáculo: El material a texturizar consiste en una placa de aluminio 7075 de 10 mm de espesor, 98 mm de ancho y de 188 mm de largo (*figura 44*).

Se debe colocar la misma dentro del habitáculo eligiendo, con ayuda del software, la localización que más nos interese para que el texturizado se lleve a cabo en la zona de la placa que sea necesario. Para ello, se hace uso de la herramienta *Red* dentro de *Material Parameter Assistant*, que hace saber cuál va a ser la superficie exacta que se va a tratar.

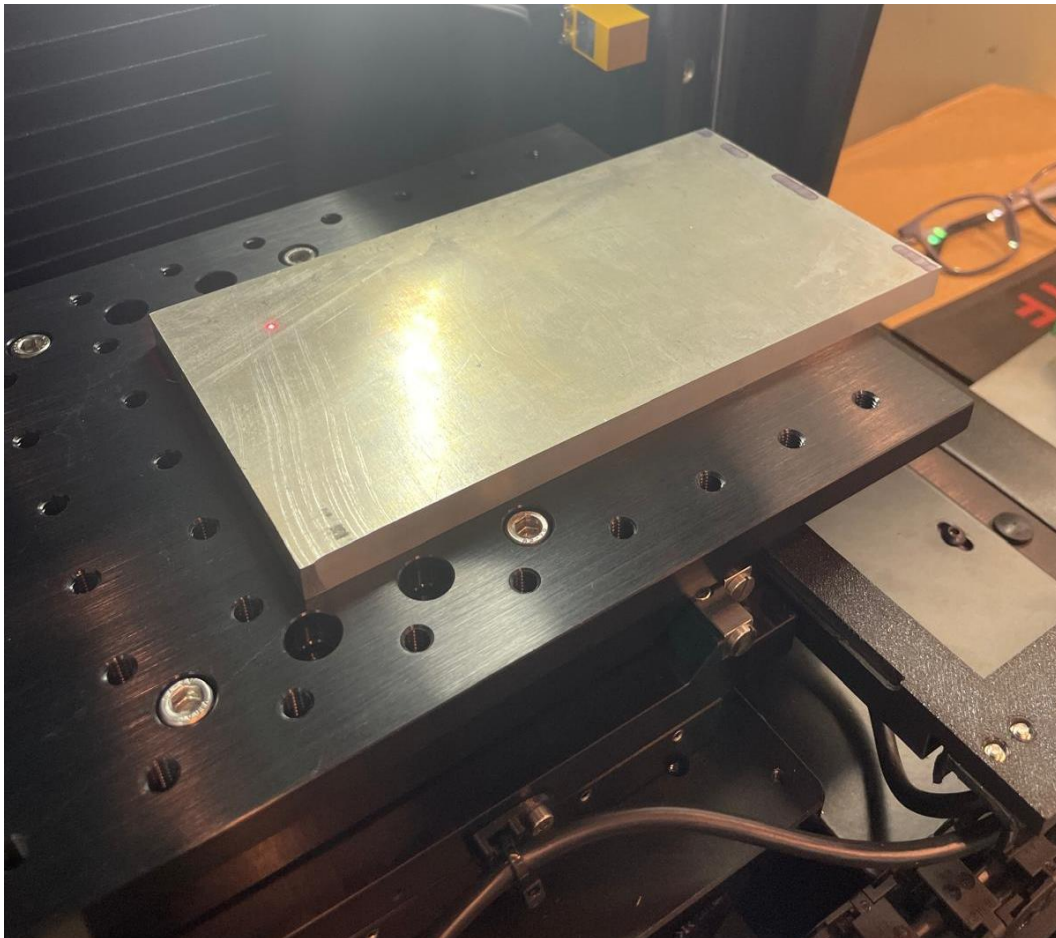


Figura 44: Placa de aluminio sin tratar dentro del habitáculo de la LS-XT-S de LASING®.

2. Calibrar el eje Z: Una vez colocado el material a texturizar, es necesario calibrar el eje Z superior, es decir, la altura a la que está el láser. Para esto, la propia máquina tiene un mando cuya única funcionalidad es mover el eje Z (*figura 45*).

Accionamiento manual eje Z superior



Figura 45: Accionamiento manual eje Z superior.

3. Configuración del software: Tras colocar el material y calibrar el eje Z, se procede a la configuración del software.
En primer lugar, se establece la velocidad de escaneado desde la interfaz de inicio y, una vez hecho esto, se accede a *Material Parameter Assistant*, donde se establece la configuración de la *figura 41*, variando el patrón en función del caso que se quiera llevar a cabo.
4. Texturizado láser: Una vez terminados los pasos anteriores, se procede a cerrar la ventana de seguridad y a marcar la superficie, es decir, realizar el proceso de texturizado láser. En la *figura 46* se puede ver la placa en el interior del habitáculo tras el primer proceso de texturizado.

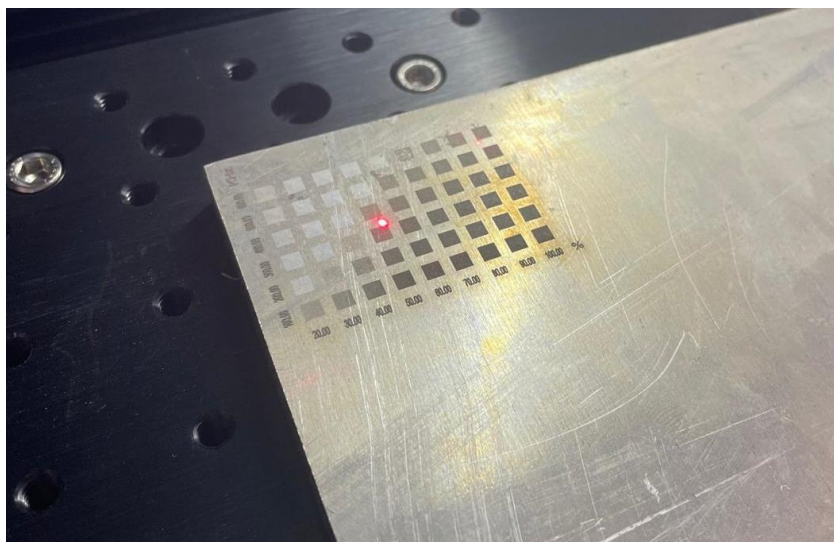


Figura 46: Placa de aluminio 7075 tras terminar el primer proceso de texturizado láser.

3.2. Metodología para la Evaluación de la Calidad Superficial.

Debido a que los resultados del texturizado láser en cuanto a los parámetros de rugosidad superficial no se pueden analizar a simple vista, se ha llevado a cabo la evaluación de la calidad superficial con un equipo especializado en ello.

3.2.1. Equipo y herramientas: Evaluación de la Calidad Superficial.

En el presente apartado se especifican los elementos del equipo que se ha utilizado para llevar a cabo la evaluación de la calidad superficial tras el tratamiento de texturizado láser.

1. Hardware.

Para el análisis de la rugosidad superficial se ha usado el *InfiniteFocusSL* de Alicona (figura 47), que consiste en un sistema de medición 3D de alta precisión.



Figura 47: InfiniteFocusSL.

Este equipo utiliza tecnología de microscopía de enfoque automático para inspeccionar y analizar superficies 3D a nivel micrométrico, lo que lo convierte en el equipo perfecto para caracterizar la rugosidad superficial resultado del texturizado láser.

En la *tabla 7* se pueden ver sus principales características, extraídas de su ficha técnica.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

Aumento		5x	10x	20x	50x	5xSX ²	10xSX ²	20xSX ²	50xSX ²
Distancia de muestreo	μm	2	1	0.5	0.2	2	1	0.5	0.2
Mín. Repetibilidad (vertical)	nm	120	30	15	8	180	45	25	15
Máx. Altura de escaneo (aproximada)	mm	22	16	12	9	25	25	19	12
Máx. Resolución Vertical	nm	410	100	50	20	510	130	70	45
Distancia de trabajo	mm	23.5	17.5	13	10.1	34	33.5	20	13
Campo de visión eje X	μm	4000	2000	1000	400	4000	2000	1000	400
Campo de visión eje Y	μm	4000	2000	1000	400	4000	2000	1000	400
Máx. Campo de visión.	mm ²	2500	2500	2500	1100	2500	2500	2500	1100
Máx. Medida uni-direccional.	mm	50	50	50	50	50	50	50	50
Mín. Radio medible.	μm	10	5	3	2	10	5	3	2
Mín. Rugosidad lineal medible	nm	--	300	150	80	--	450	250	150
Mín. Rugosidad superficial medible.	nm	--	150	75	50	--	250	100	80

Tabla 7: Características de Alicona InfiniteFocusSL.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

Otro elemento a destacar del hardware, es el mando de control de movimiento (*figura 48*), que permite mover la mesa del equipo con respecto a los ejes X e Y, además de ajustar la altura a la que se encuentra el objetivo de la pieza a medir, es decir, permite regular el eje Z. Este mando de control cuenta también con cuatro velocidades, que se pueden cambiar pulsando los botones 1, 2, 3 y 4 (siendo la velocidad 1 la más lenta y la 4 la más rápida). No obstante, la altura entre objetivo y pieza también se puede modificar directamente, aunque de forma menos precisa, con una rueda que se encuentra en el propio equipo.



Figura 48: Mando de movimiento de Alicona InfiniteFocusSL

2. Software.

Alicona InfiniteFocusSL cuenta con un software propio que permite controlar el sistema. Dicho software tiene una interfaz inicial en la que se puede ver en pantalla lo que la lente está proyectando, lo que es muy útil para enfocar la imagen y seleccionar el área a capturar.

Además, analiza la rugosidad de la superficie, de forma que puede calcular parámetros lineales relevantes (R_a , R_t , R_z), como parámetros de rugosidad superficial en cuanto a un área completa (S_a , S_z).

Por otro lado, para el procesamiento de todos los datos obtenidos se ha utilizado Excel y la aplicación Minitab.

En el siguiente apartado se especifica con profundidad cómo se ha utilizado el software de Alicona InfiniteFocusSL, sin entrar en mayor detalle en el funcionamiento de los otros dos programas mencionados.

3.2.2. Montaje y procedimiento: Evaluación de la Calidad Superficial.

Para realizar todas y cada una de las medidas se ha llevado a cabo un proceso repetitivo.

En cuanto al montaje, que se puede considerar el primer paso del procedimiento, las placas de aluminio 7075 ya tratadas con el láser se colocan en la “mesa” de medida del equipo, tal y como se puede ver en la *figura 49*.



Figura 49: Placa de Aluminio 7075 tratada y lista para ser medida en Alicona InfiniteFocusSL

Para explicar el resto del procedimiento, se tomará como ejemplo la prueba de patrón de cuadrados concéntricos, velocidad 100 mm/s, potencia 30 W y frecuencia 100 Hz, pues todas y cada una de las pruebas se han realizado de la misma forma.

Una vez hecho colocado el material a estudiar cómo se ha explicado anteriormente, con ayuda del software y el mando de control de movimiento, posicionamos la lente en el área a medir. El equipo, además de contar con una fuente de iluminación para que la imagen se vea correctamente, cuenta con un puntero láser para colocar el objetivo exactamente sobre el área a estudiar, tal y como se puede ver en la *figura 50*.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio



Figura 50: Puntero láser para ayudar al posicionamiento.

Con esto, se habría terminado el montaje como tal del elemento a estudiar. Es momento de centrarnos en el software, cuya interfaz antes de realizar el estudio de la superficie es la que se ve en la *figura 51*.

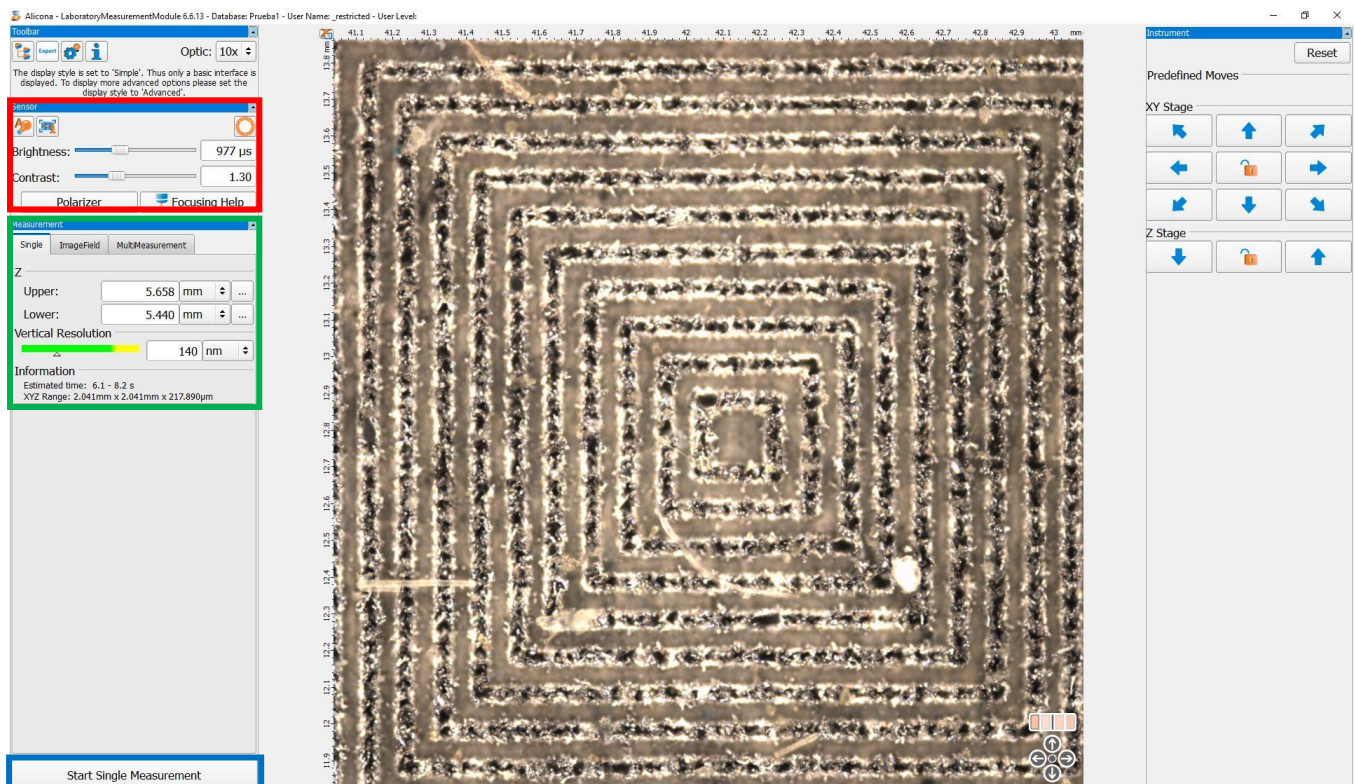


Figura 51: Interfaz inicial del software especializado de Alicona InfiniteFocusSL.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

En dicha interfaz se pueden distinguir los siguientes elementos:

- Imagen en tiempo real de la zona sobre la que está el objetivo.
- Sensor (zona encuadrada en color rojo): En este apartado tenemos los ajustes de brillo y contraste. Además, podemos ajustar la luz que emite el equipo sobre la superficie y activar el *Focusing Help*, que es simplemente el láser que ayuda al posicionamiento.
- Measurement (zona encuadrada en color verde): Desde aquí se ajusta el rango de alturas que va a “escanear” el equipo para realizar el estudio de la superficie.
- Start Single Measurement (ícono en color azul): Sirve para iniciar el “escaneo” de la superficie.

Cuando se selecciona *Star Single Measurement* comienza el escaneo de la superficie y, cuando acaba, nos aparece una imagen 3D de la misma (*figura 52*). Una vez en esta interfaz, pulsando e ícono marcado en color morado, se puede obtener una imagen a color de la superficie, en la que se distinguen las diferentes profundidades de la misma.

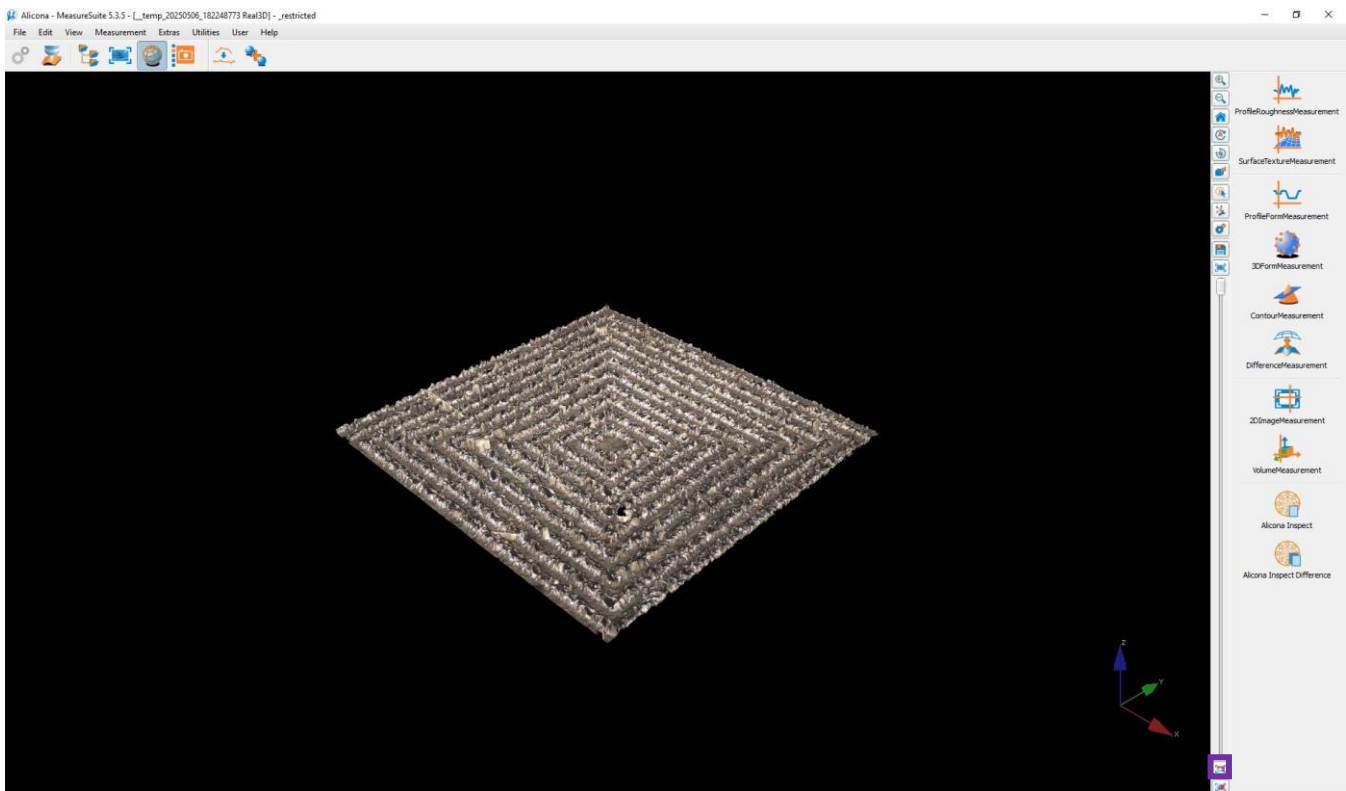


Figura 52: Interfaz del software de Alicona InfiniteFocusSL tras el escaneado de la superficie (I).

De esta forma, en la *figura 53* se puede ver la misma interfaz, pero con la imagen de la superficie representada a color. Además, también se pueden observar los diferentes íconos para llevar a cabo los estudios con los que se obtienen los valores objeto de estudio en el presente Trabajo de Fin de Grado:

- Profile Roughness Measurement (ícono marcado en rojo): Sirve para obtener los valores de rugosidad lineal a lo largo de un segmento.
- Surface Texture Measurement (ícono marcado en verde): Sirve para obtener los valores de rugosidad superficial del área escaneada.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

- Viewer settings: La pantalla emergente que se puede ver en la imagen. Aparece al seleccionar el ícono marcado en amarillo y sirve para modificar los valores máximos y mínimos que se tendrán en cuenta en el análisis de la superficie.

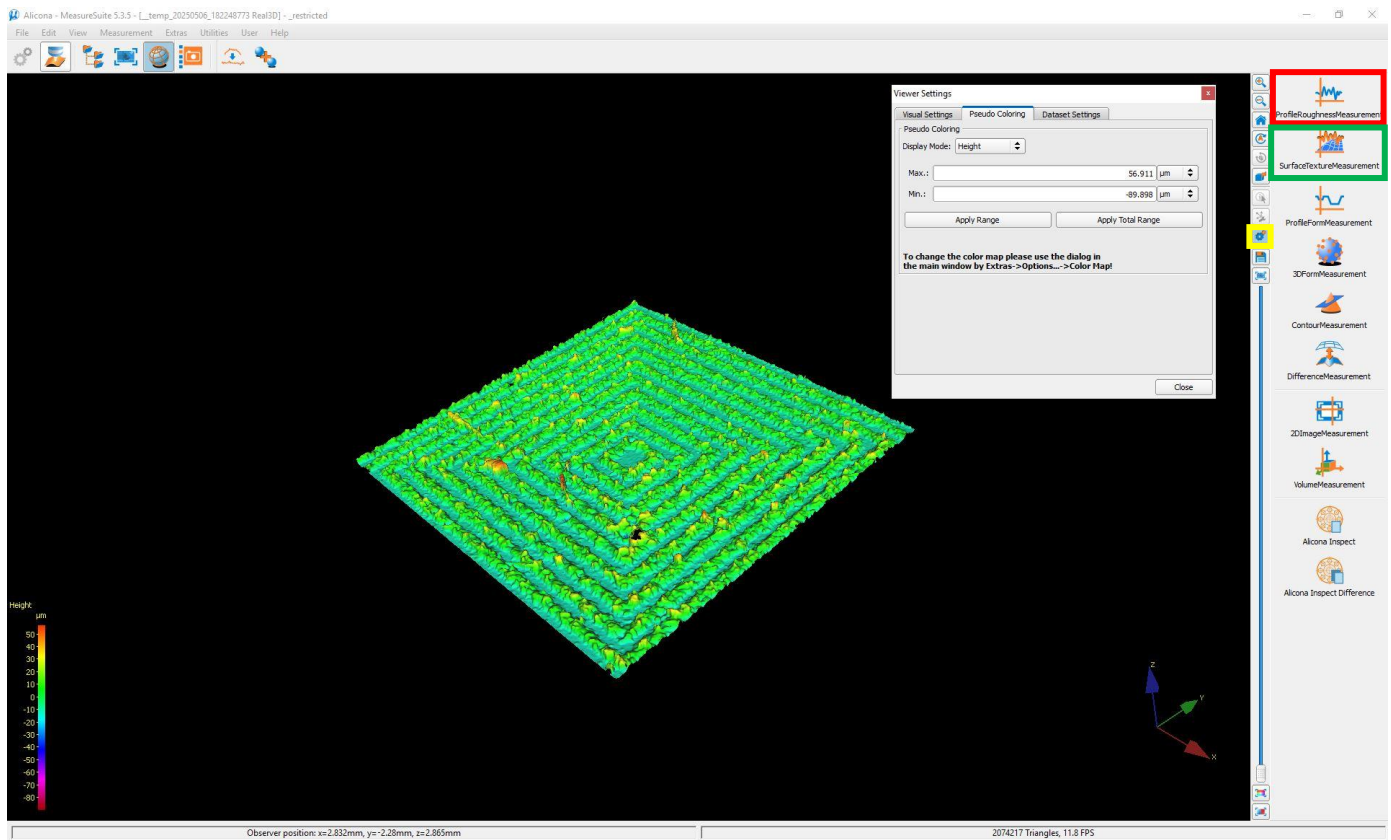


Figura 53: Interfaz del software de Alicona InfiniteFocusSL tras el escaneado de la superficie (II).

Para obtener los resultados, en primer lugar, se selecciona el ícono *Profile Roughness Measurement*, para así obtener los resultados de rugosidad lineal en un segmento que se puede definir también a través del software. En la *figura 54* se puede ver el perfil de la sección de la superficie por la que pasa el segmento elegido.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

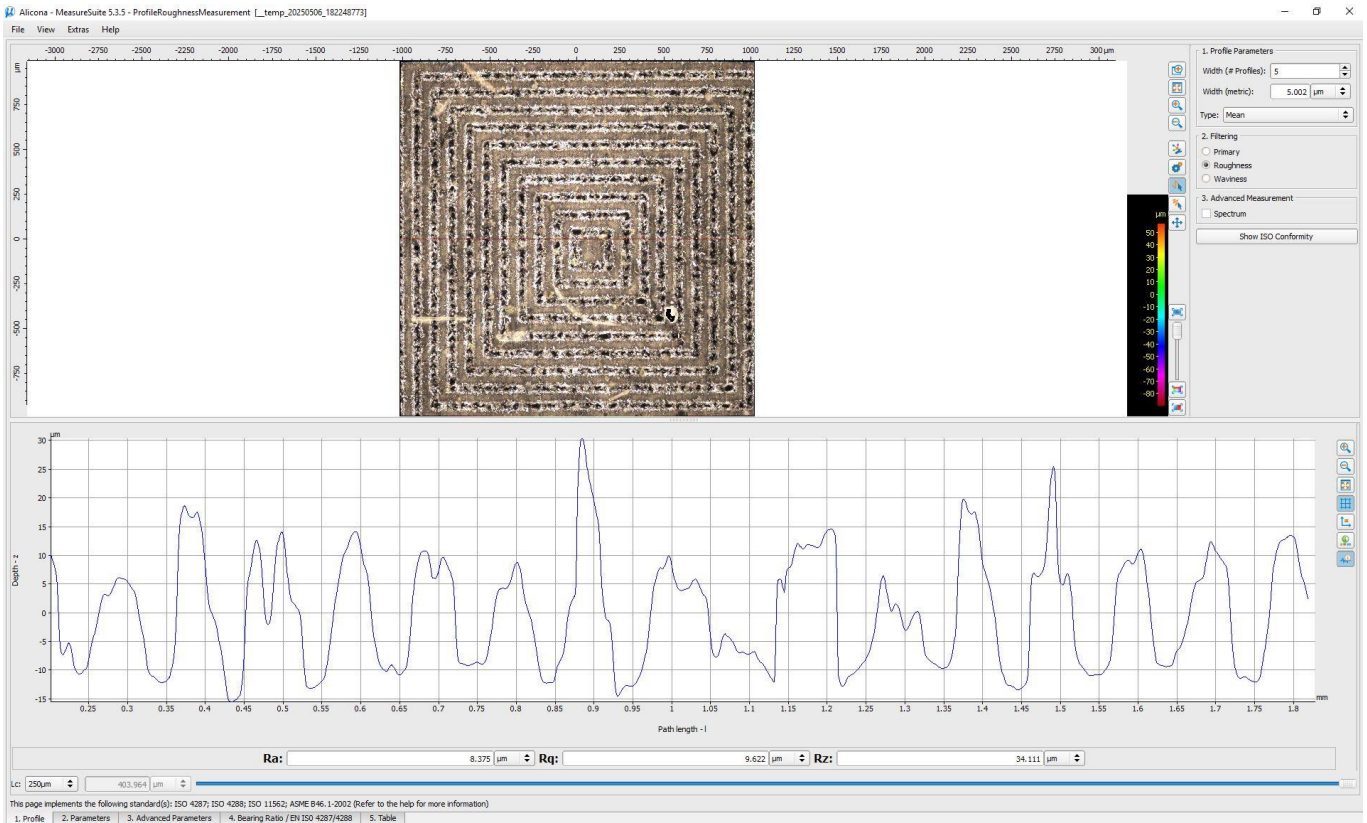


Figura 55: Interfaz Profile Roguhness Measurement (I)

Una vez seleccionado el segmento, el siguiente paso es la pestaña *Parameters* (figura 55), en la que nos aparecen diversos parámetros de rugosidad lineal, entre ellos Ra, Rt y Rz.

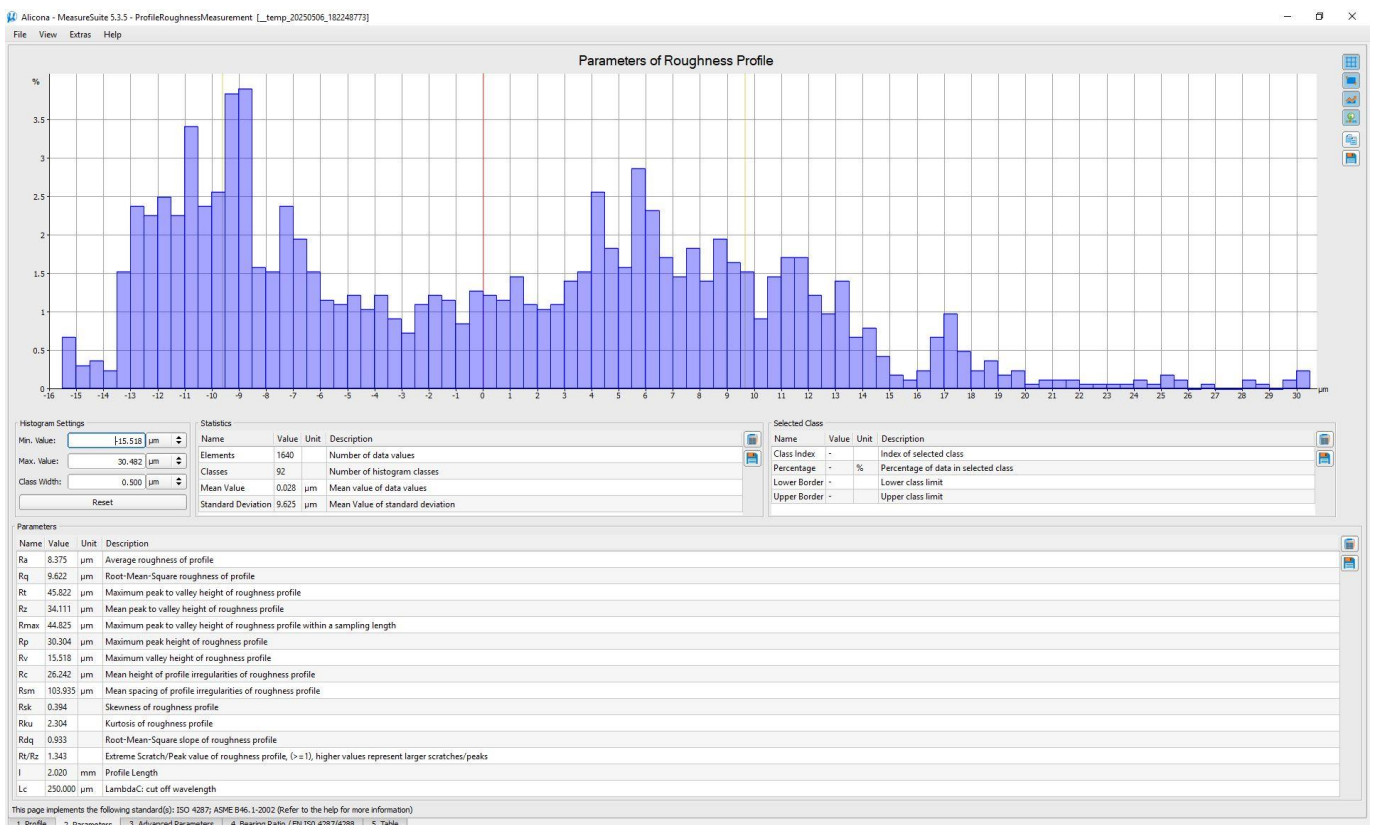


Figura 54: Interfaz Profile Roguhness Measurement (II).

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

Todos los datos que aparecen por pantalla se pueden descargar en un archivo Excel para así poder tratarlos posteriormente.

A continuación, es necesario volver a la interfaz de la *figura 41* y seleccionar el ícono *Surface Texture Measurement*. Una vez hecho esto, podemos acceder a todos los valores de rugosidad superficial media del área completa (S_a , S_z o S_k), que de nuevo se pueden guardar en formato Excel para su procesamiento. Esto se puede ver en las *figuras 56 y 57*.

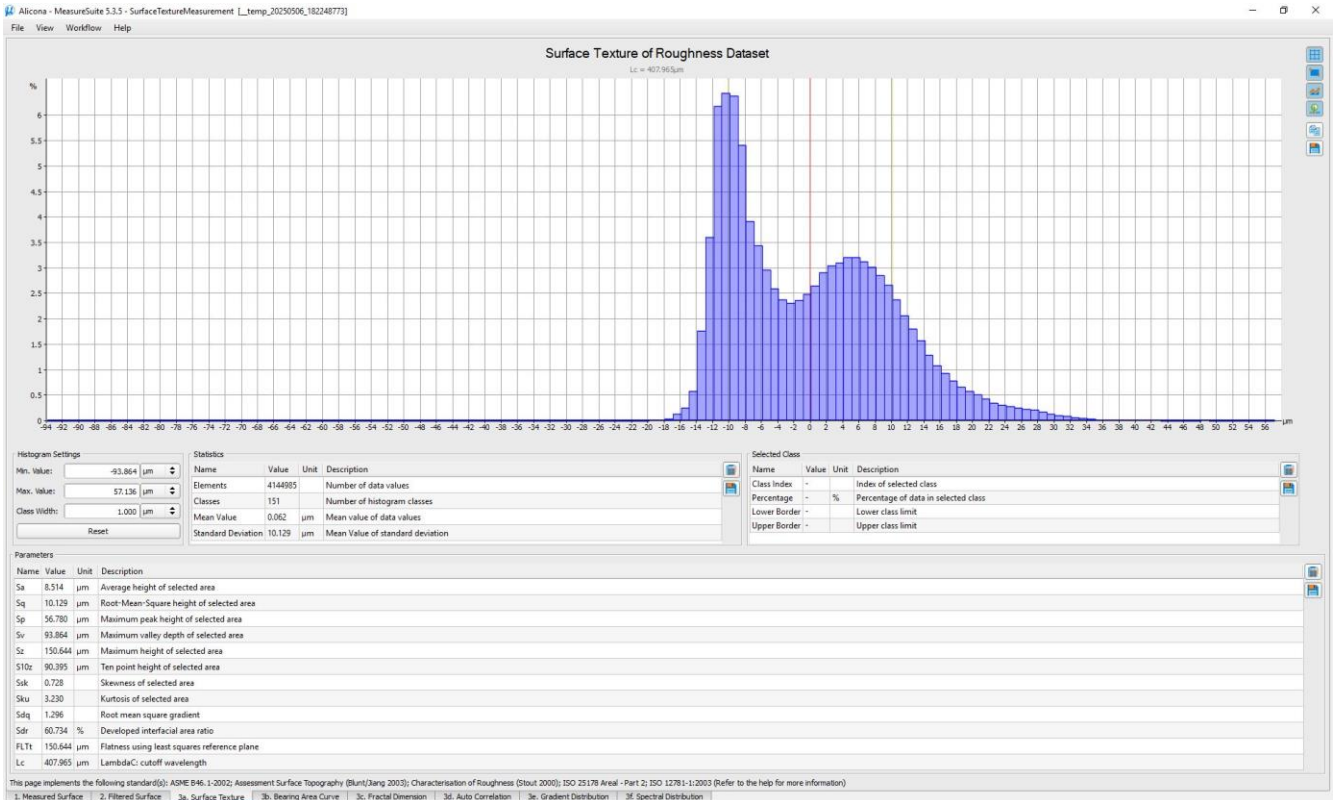


Figura 56: Interfaz Surface Texture Measurement (I).

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

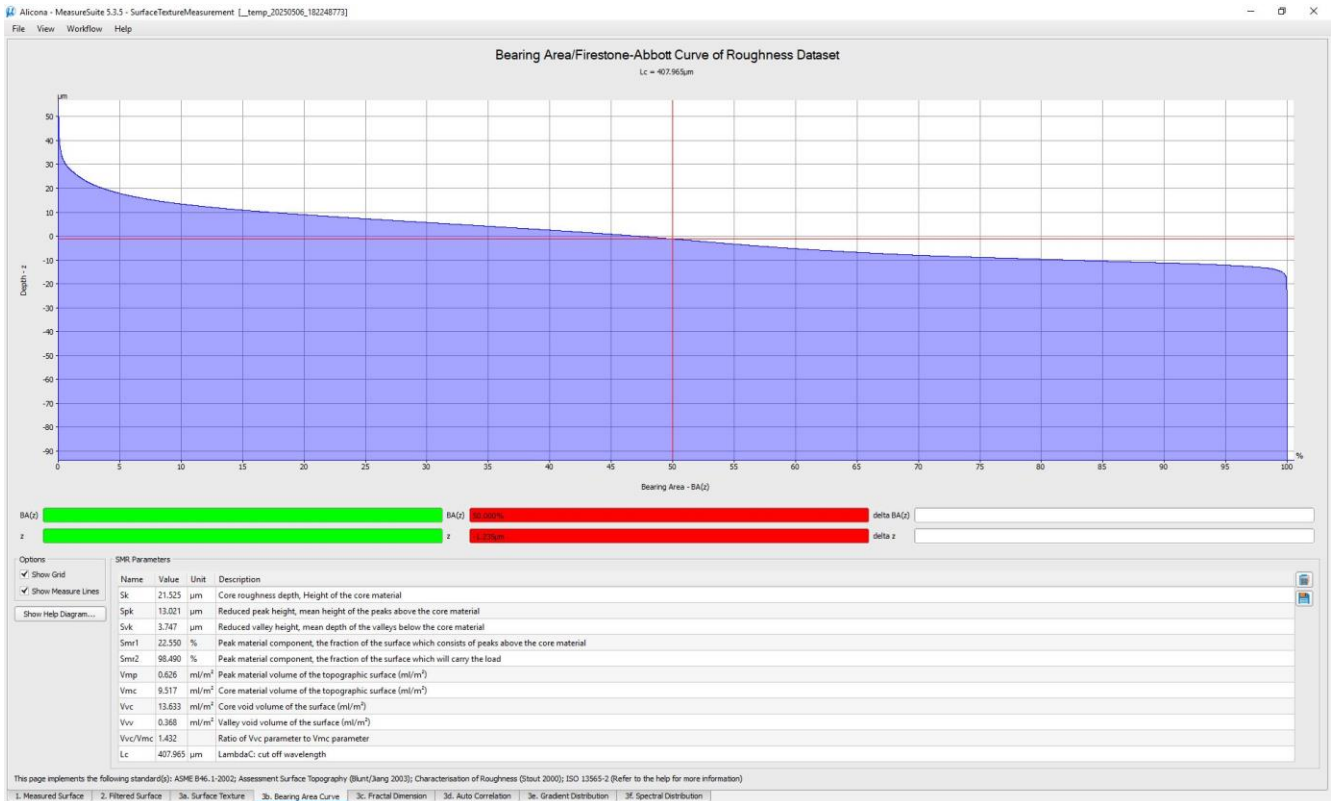


Figura 57: Interfaz Surface Texture Measurement (II).

Con esto concluye todo el procedimiento llevado a cabo con el equipo, por lo que el siguiente y último paso consiste en el procesamiento de todos los datos obtenidos, que como se ha dicho anteriormente, se ha llevado a cabo haciendo uso de Excel y Minitab.

3.3. Metodología de la Evaluación de la Mojabilidad.

En el presente apartado se detalla el equipo, montaje, procedimiento y los resultados de la evaluación de la mojabilidad de las placas de Aluminio 7075 tras ser expuesto al tratamiento de texturizado láser especificado en el apartado 4 del presente Trabajo de Fin de Máster.

3.3.1. Equipo y herramientas: Evaluación de la Mojabilidad.

Para llevar a cabo la evaluación de la superficie en cuanto a lo que mojabilidad respecta, se han utilizado los siguientes elementos:

- Una pipeta manual (figura 58) con la que es posible ajustar la cantidad de líquido en cada deposición.



Figura 58: Pipeta manual.

- Un líquido, en este caso agua.
- Una cámara, para poder sacar una fotografía a la superficie con la gota ya depositada.
- El software *ImageJ*, en el cual se puede introducir la imagen para así medir el ángulo de la gota con la superficie.

3.3.2. Montaje y procedimiento: Evaluación de la Mojabilidad.

En primer lugar, el montaje consiste sencillamente en colocar la placa sobre la que se va a llevar a cabo la evaluación en una superficie lisa. Una vez hecho esto, el procedimiento seguido fue el siguiente:

1. Llenar la pipeta.
2. Depositar la gota sobre la superficie a evaluar.
3. Hacer una fotografía, como la que se puede ver a continuación (*figura 59*).



Figura 59: Imagen ejemplo para la evaluación de la superficie tratada.

4. Medir con *ImageJ* el ángulo entre la gota y la superficie. En la *figura 60* se puede ver la interfaz de este software, que permite dibujar líneas y figuras geométricas sobre la fotografía. De esta forma, se han dibujado dos líneas, una paralela a la superficie y otra tangente a la gota, y se ha determinado el ángulo entre ambas, como se puede observar en la ventana emergente “Results” de la misma imagen.

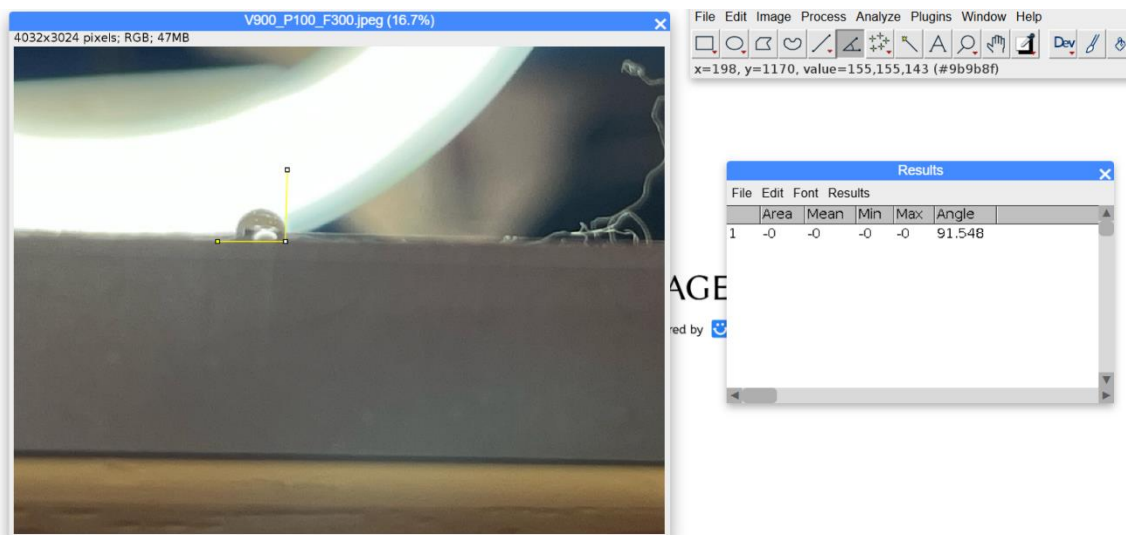


Figura 60: Interfaz del software *ImageJ*.

Una vez medido el ángulo entre superficie y gota, se puede determinar el carácter hidrofílico o hidrófobo de la superficie.

3.4. Metodología Ensayo de Dureza Vickers.

En este apartado se procede a explicar cómo se ha llevado a cabo el ensayo de dureza Vickers, que se ha realizado en último lugar pues daña la superficie tratada sobre la placa de aluminio 7075 tratada por texturizado láser, además del equipo necesario.

3.4.1. Equipo y herramientas: Ensayo de Dureza Vickers.

Para llevar a cabo este ensayo se ha utilizado el microdurómetro *Matsuzawa MXT70*, que se puede ver en la *figura 61*. Este instrumento se usa para medir la dureza de los materiales a microescala mediante el método de indentación Vickers.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio



Figura 61: Microdurómetro Matsuzawa MXT70.

Permite modificar la carga que se va a aplicar sobre la superficie, que en este caso ha sido de 300 gramos.

Una vez hecha la entalla, permite medir sus diagonales para así obtener el valor de la dureza Vickers de forma automática, que calcula a partir de la siguiente expresión:

$$HV = 0.189 * \frac{F}{d^2}$$

Siendo:

- $d = (d1 + d2) / 2$
- d1: Diagonal 1 de la entalla.
- d2: Diagonal 2 de la entalla.
- F: Carga aplicada durante el ensayo.

3.4.2. Montaje y procedimiento: Ensayo de Dureza Vickers.

El montaje de este ensayo consiste en colocar la placa objeto de estudio sobre las mordazas del *Matsuzawa MXT70*, en la posición óptima para medir la prueba requerida, tal y como se puede ver en la *figura 62*.

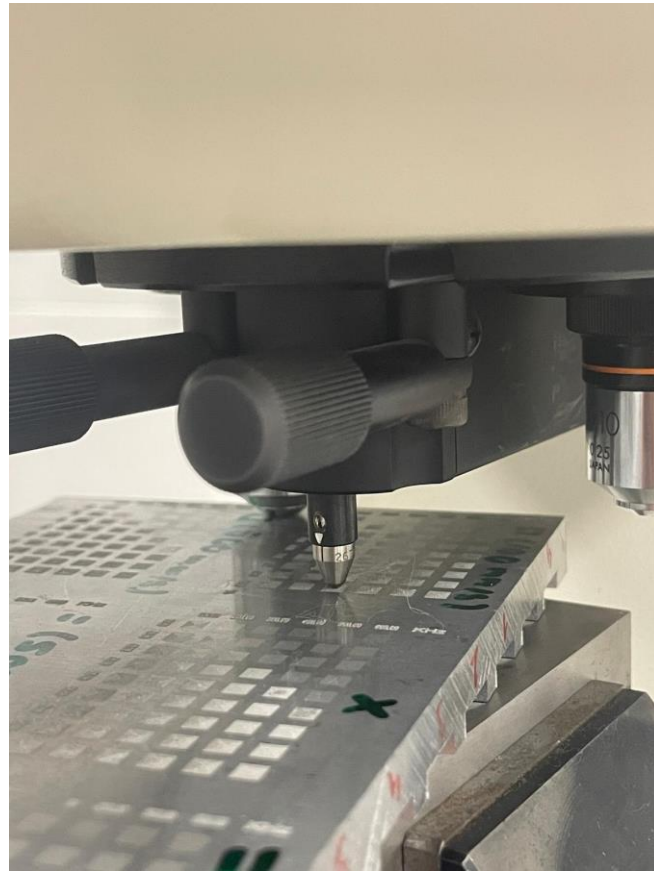


Figura 62: Placa de aluminio 7075 preparada para ensayo de dureza en Matsuzawa MXT70.

Una vez hecho esto, se inicia el ensayo, que hace el equipo de forma automática. Cuando el ensayo termina, se mide manualmente la longitud de las diagonales de la entalla, con ayuda del microscopio y las guías incorporadas también en el microdurómetro.

Tras medir las diagonales, que quedan guardadas hasta el siguiente ensayo, el equipo calcula automáticamente el valor de la dureza Vickers, lo que se ve reflejado en la pantalla de resultados (*figura 63*).

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio



Figura 63: Pantalla de resultados Matsuzawa MXT70.

Solo se ha realizado el ensayo de dureza sobre el patrón de cuadrados concéntricos pues los resultados del valor de dureza Vickers no depende del patrón.

Todos los resultados obtenidos se han recopilado en una hoja Excel para poder tratarlos y analizarlos. Posteriormente, se han introducido en el software *Minitab* para completar este proceso.

4. Presentación y Análisis de los Resultados.

En el presente apartado se van a exponer y a analizar todos los resultados obtenidos durante el desarrollo del presente proyecto.

4.1. Resultados: Texturizado láser.

Como resultado, se han obtenido 6 matrices diferentes, una para cada combinación de velocidades (100,500 y 900 mm/s) con los diferentes patrones (líneas paralelas o cuadrados concéntricos). Cada una de estas matrices contiene 54 elementos, a los que se les ha realizado el proceso de texturizado con unos valores de frecuencia o potencia diferentes al resto.

En la *figura 46* se pueden ver las placas de aluminio 7075 tras el proceso de texturizado.

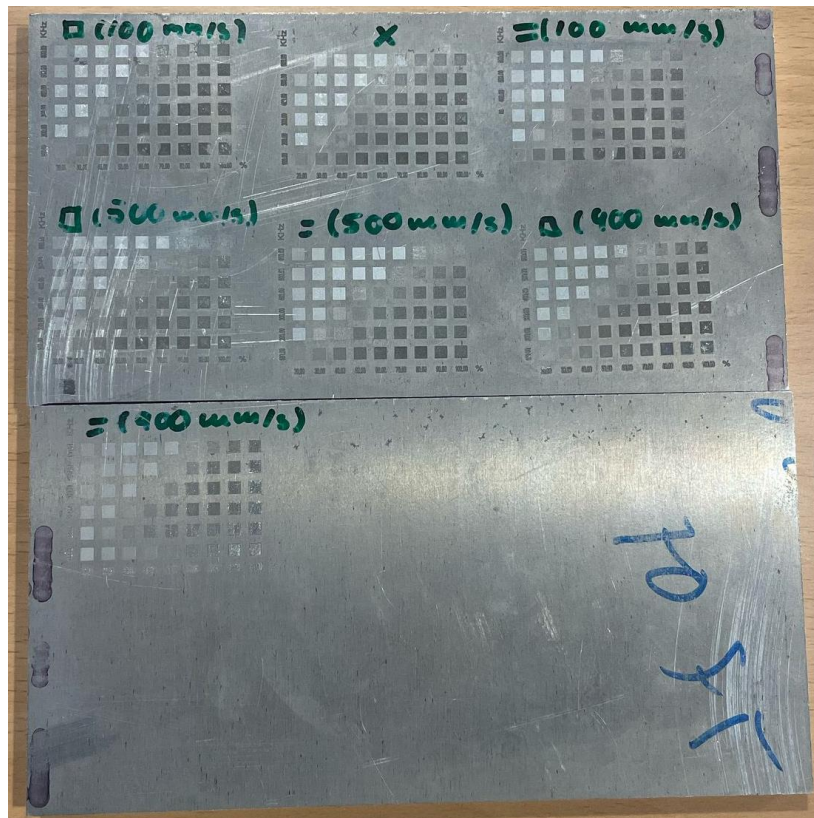


Figura 64: Placas de aluminio 7075 tras e proceso de texturizado láser.

Todos estos elementos tienen una textura superficial diferente debido al patrón establecido y los valores que han tomado los parámetros de frecuencia, potencia y velocidad de escaneado durante su tratamiento.

Como se puede observar en la imagen, cada matriz tiene asociado una etiqueta para identificar el patrón y la velocidad con la que se han realizado, pues es lo que permanece constante en cada matriz, mientras van variando los valores de frecuencia y potencia.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

4.2. Resultados: Evaluación de la Calidad Superficial.

En el presente apartado se exponen los resultados obtenidos de la evaluación de la calidad superficial llevada a cabo con Alicona InfiniteFocusSL. En primer lugar, se muestran a continuación las imágenes de las texturas obtenidas, en función del tipo de patrón:

1. Patrón cuadrados concéntricos.

En la *tabla 9*, *tabla 10* y *tabla 11*, se muestran las imágenes de la superficie tratada con el patrón de cuadrados concéntricos, para los diferentes valores de velocidad, frecuencia (F, en KHz) y potencia (P, en W).

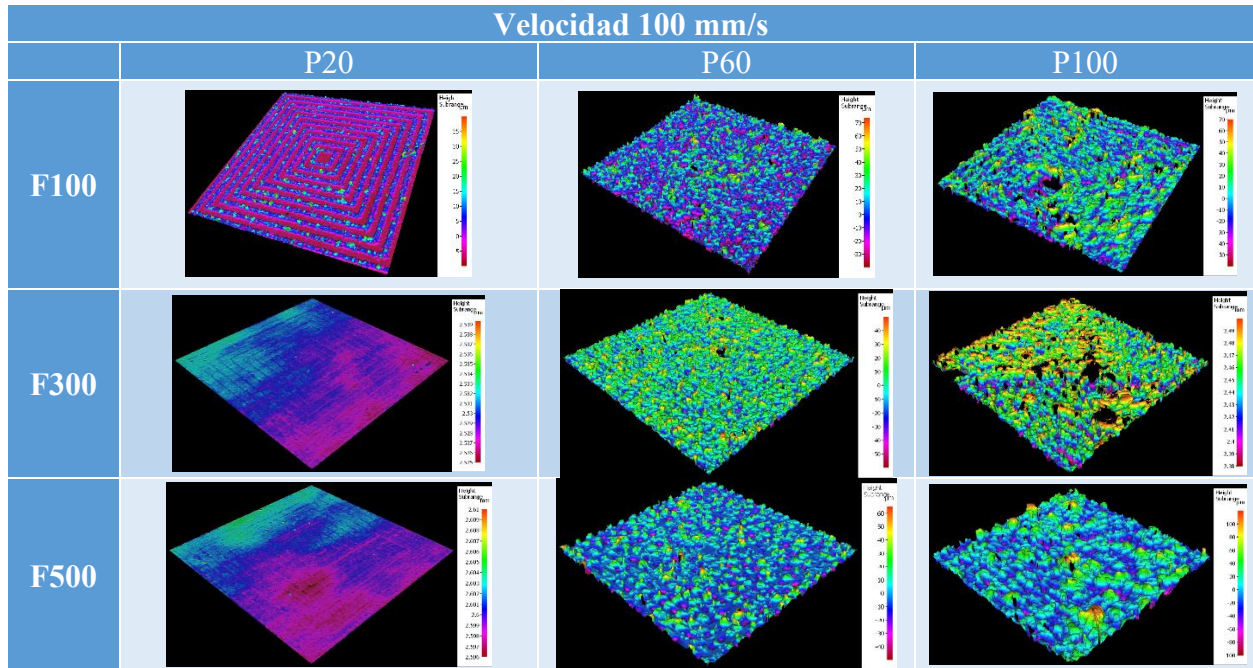


Tabla 8: Imágenes de la superficie tratada para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 100 mm/s.

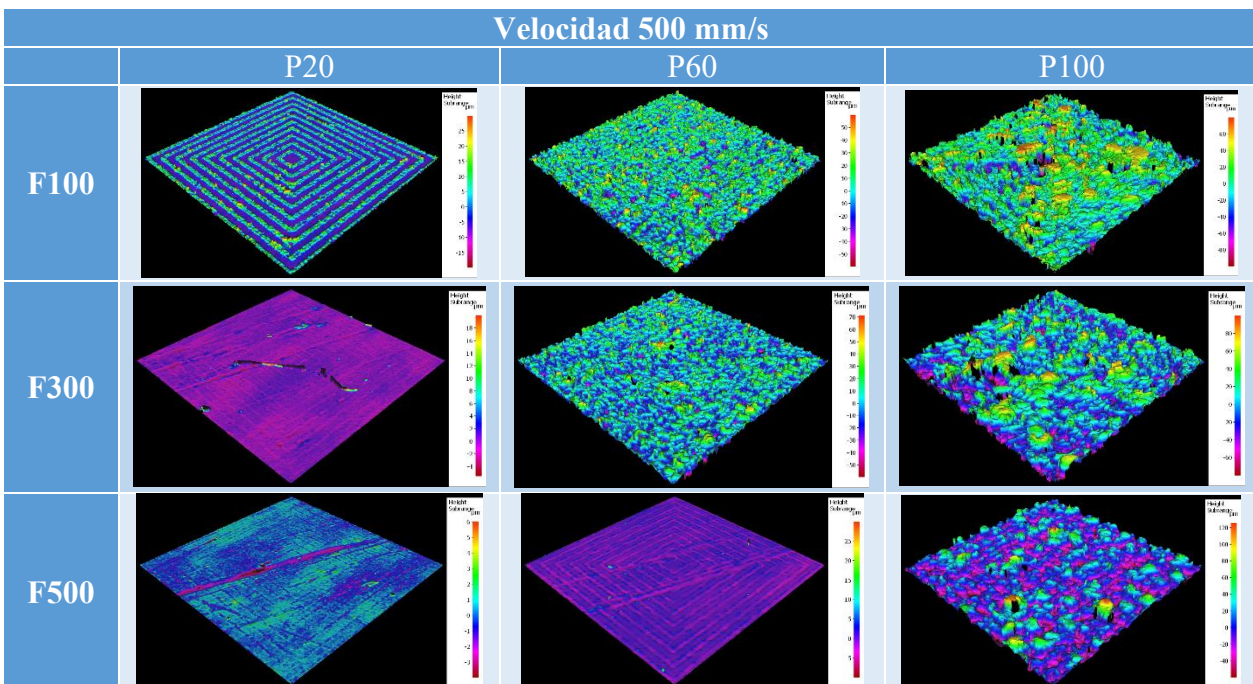


Tabla 9: Imágenes de la superficie tratada para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 500 mm/s.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

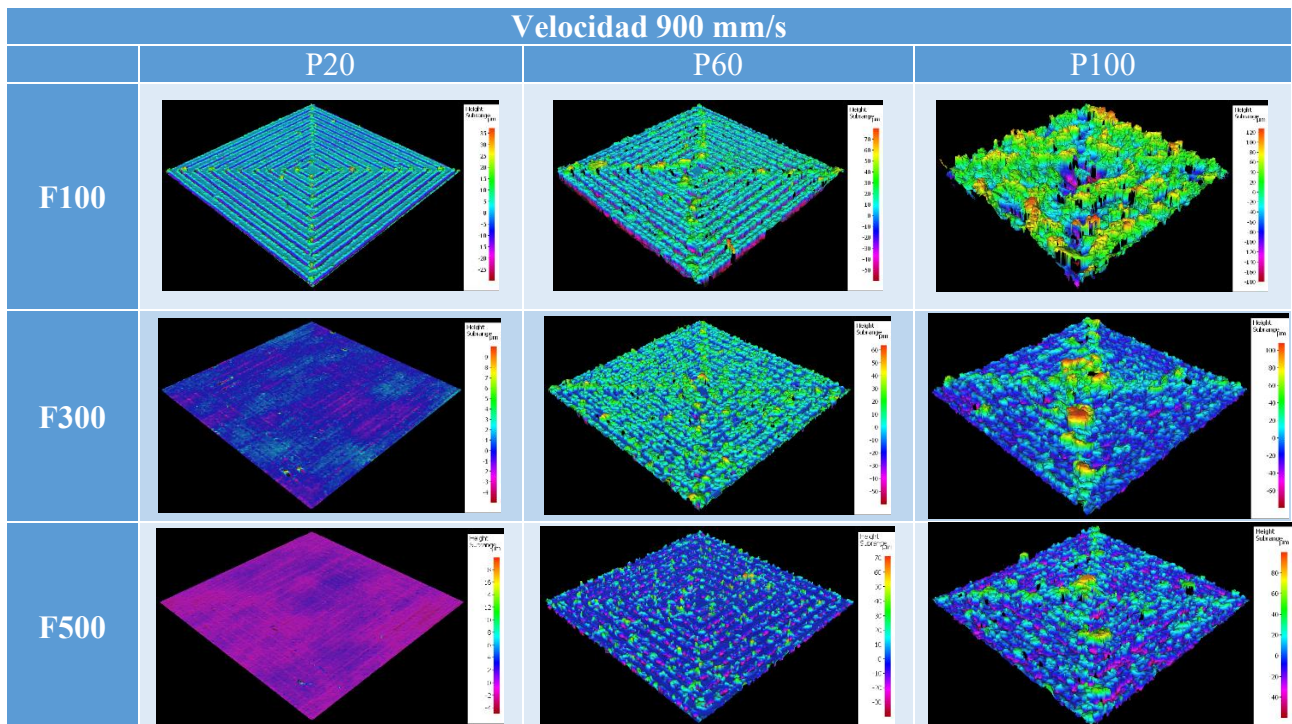


Tabla 10: Imágenes de la superficie tratada para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 900 mm/s.

2. Patrón de líneas paralelas.

En la *tabla 12*, *tabla 13* y *tabla 14*, se muestran las imágenes de la superficie tratada con el patrón de líneas paralelas, para los diferentes valores de velocidad, frecuencia (F, en Hz) y potencia (P, en W).

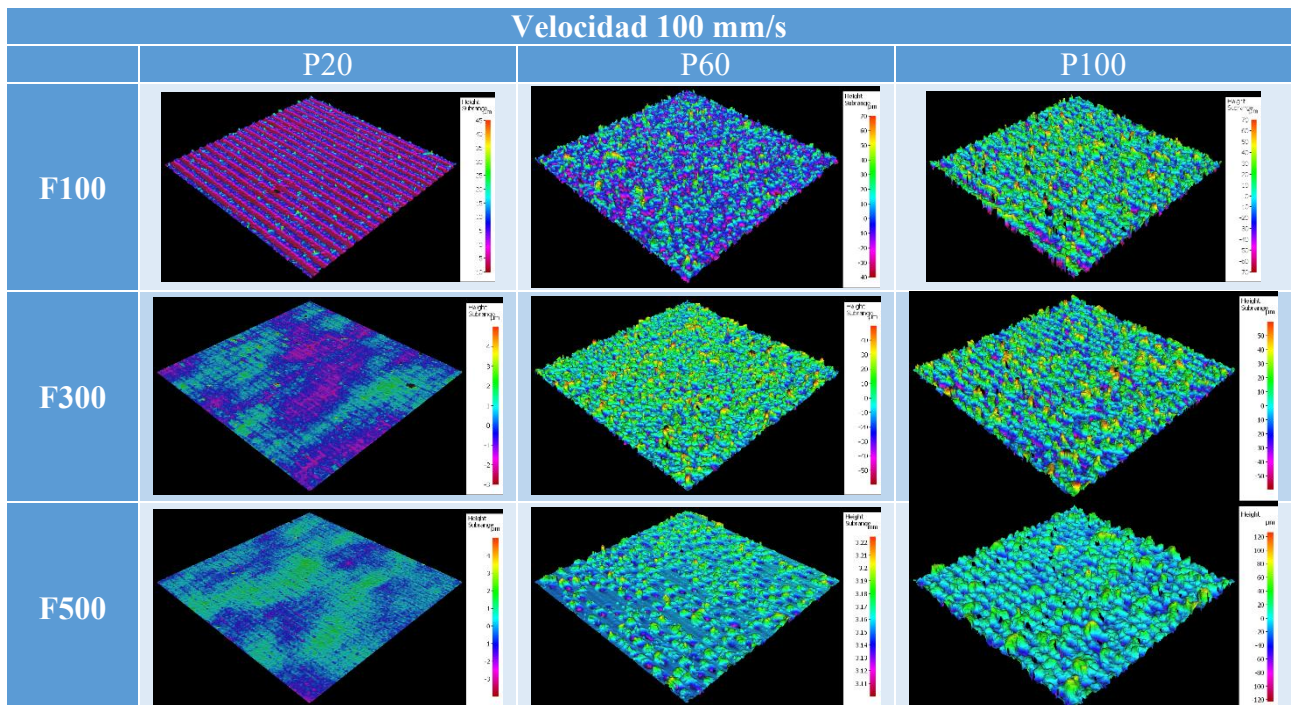


Tabla 11: Imágenes de la superficie tratada para patrón de líneas paralelas y velocidad 100 mm/s.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

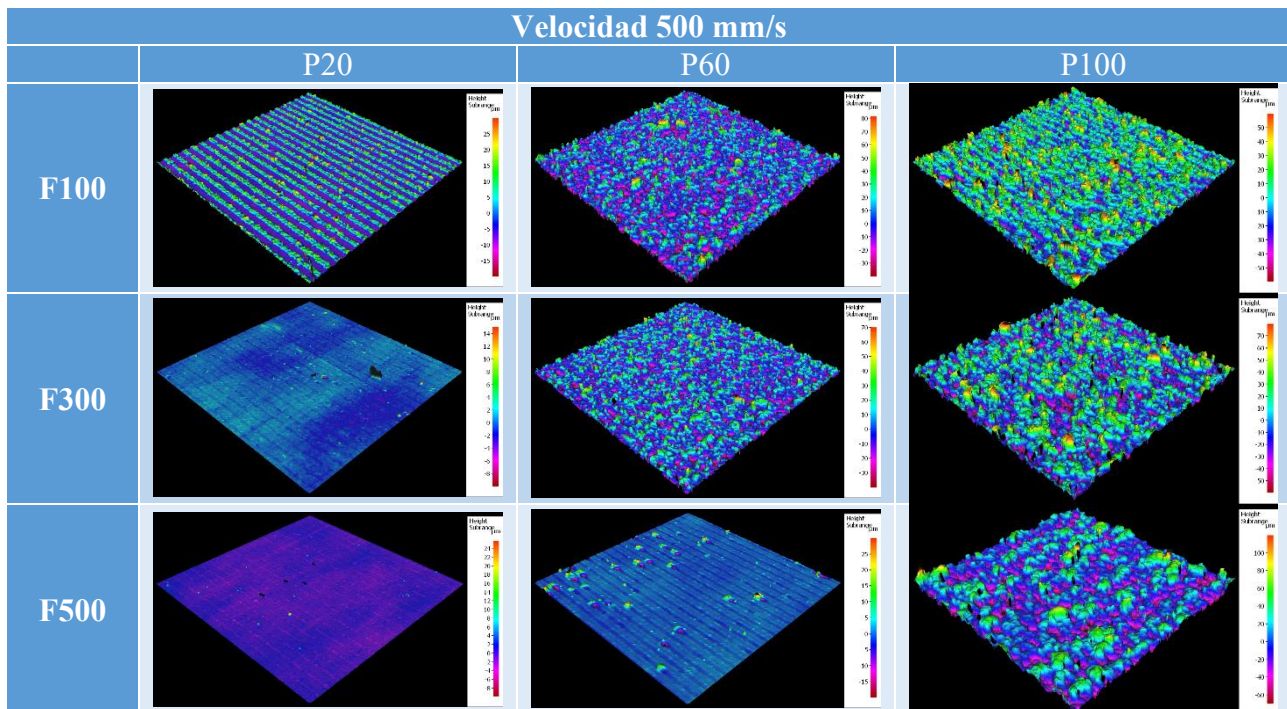


Tabla 12: Imágenes de la superficie tratada para patrón de líneas paralelas y velocidad 500 mm/s.

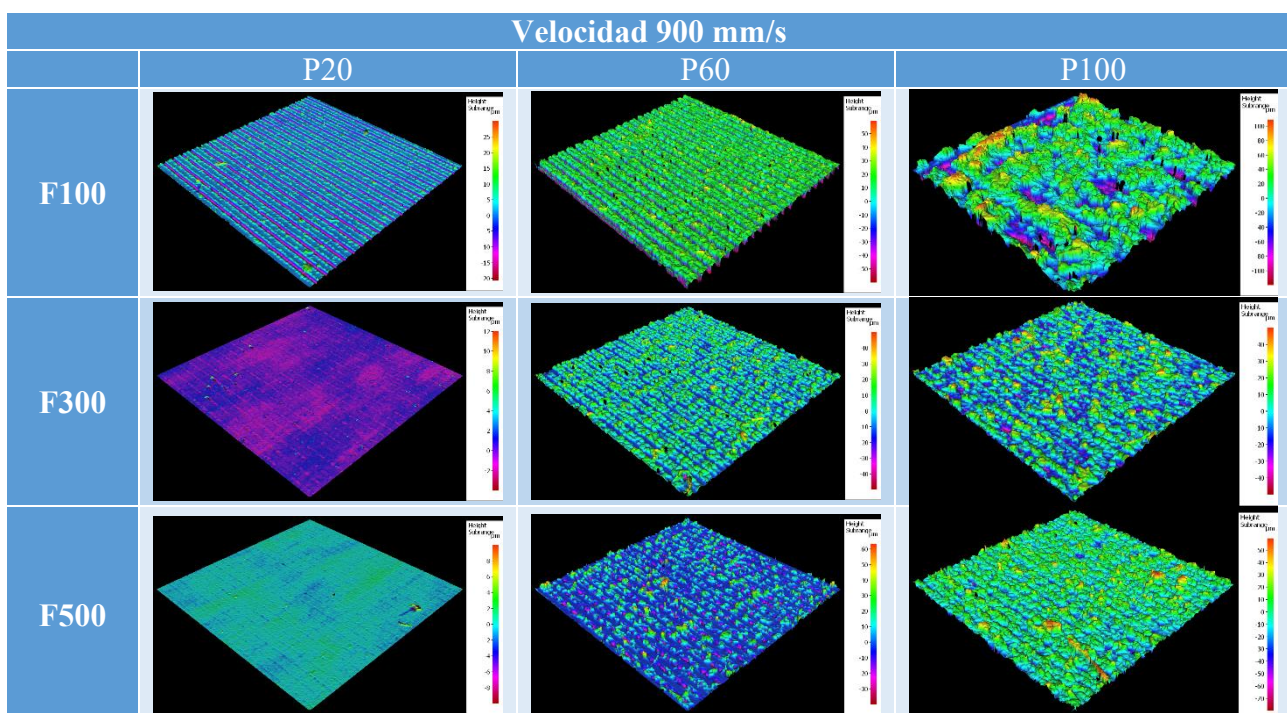


Tabla 13: Imágenes de la superficie tratada para patrón de líneas paralelas y velocidad 900 mm/s.

Para obtener todas estas texturas diferentes, se han modificado potencia, velocidad de escaneo, frecuencia y patrón. A continuación, se exponen todas las observaciones extraídas de la evaluación de la calidad superficial en función de cada uno de estos parámetros:

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

- Velocidad: Cuanto menor es el valor de la velocidad, mayor es la acción del láser sobre la superficie, pues tarda más tiempo en recorrer una misma longitud. Por otro lado, el acabado de la superficie también será más irregular cuanto menor sea la velocidad. Esto se puede observar comparando las *figuras 65 y 66*; para la velocidad de 900 mm/s se puede distinguir el patrón, mientras que para la velocidad de 100 mm/s la superficie es completamente irregular.

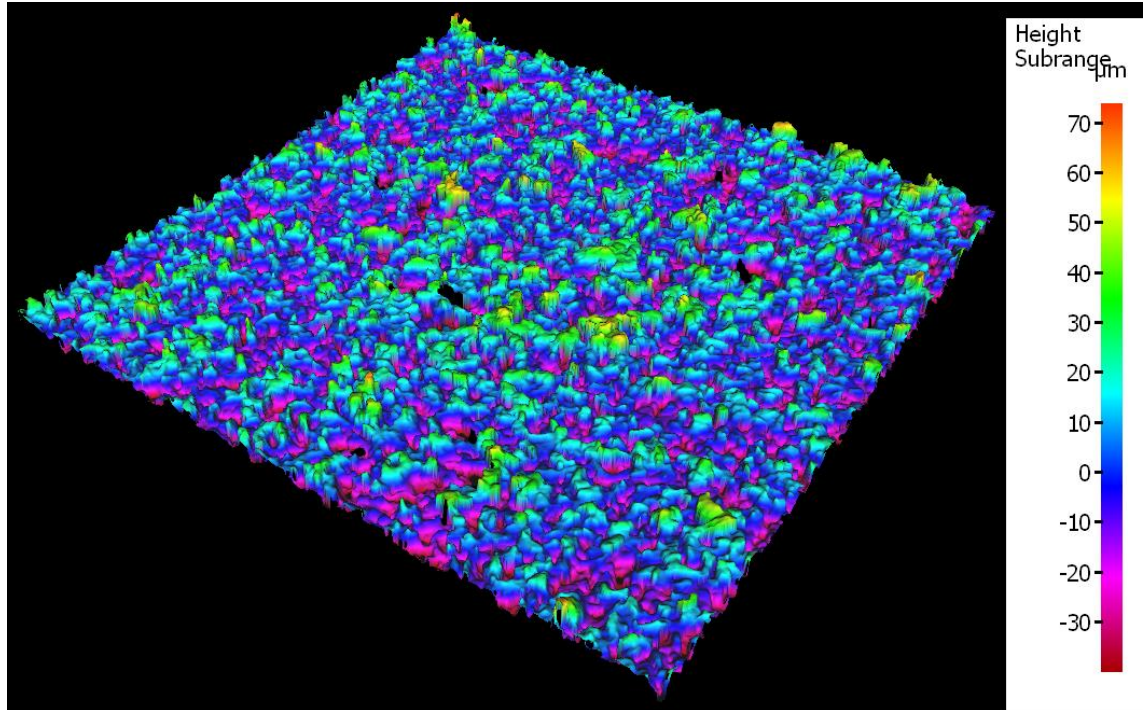


Figura 65: Superficie para velocidad 100 mm/s, potencia 60 W, frecuencia 100 KHz y patrón de cuadrados concéntricos.

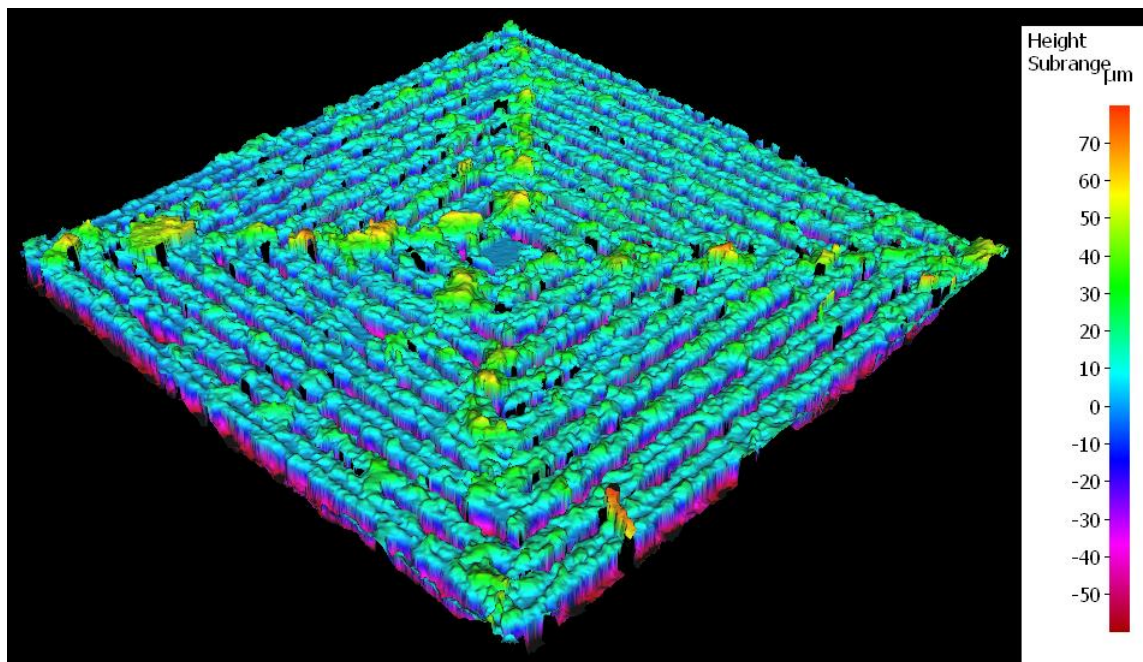


Figura 66: Superficie para velocidad 100 mm/s, potencia 60 W, frecuencia 100 KHz y patrón de cuadrados concéntricos.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

- Frecuencia: Conforme aumenta el valor de la frecuencia, se consigue una textura más densa y homogénea y se remueve una menor cantidad de material. En cambio, cuando la frecuencia es menor, se concentra la potencia del láser en menos pulsos por segundo, lo que significa que se crea una textura más irregular. En definitiva, a mayor frecuencia menor es la rugosidad superficial y, cómo es lógico, la frecuencia y el parámetro de densidad de energía son inversamente proporcionales, pues que E_d disminuye a medida que aumenta F . Para ilustrar esto, se pueden comparar las *figuras 67 y 68*, en las que se puede observar como a 500 KHz de frecuencia las desviaciones de la superficie no llegan a los $3\ \mu\text{m}$ y el patrón a penas se distingue, mientras que para la frecuencia de 100 KHz el patrón está perfectamente definido y hay picos en la superficie de has $35\ \mu\text{m}$ de altura.

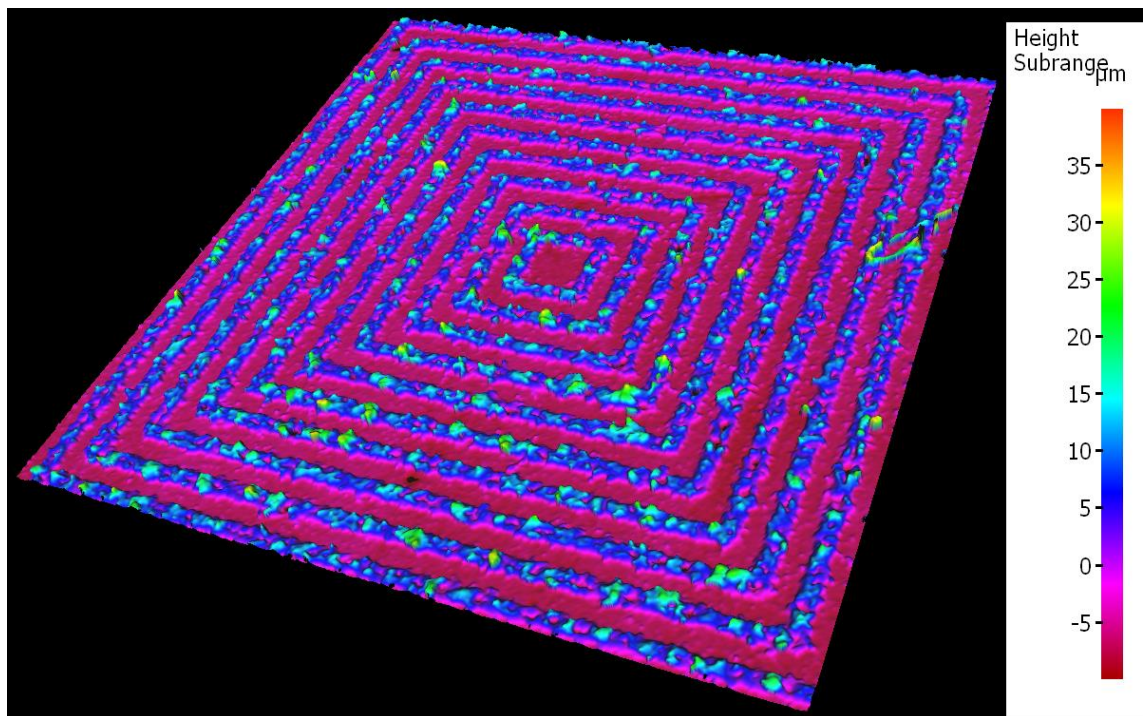


Figura 67: Superficie para velocidad 100 mm/s, potencia 20 W, frecuencia 100 KHz y patrón de cuadrados concéntricos.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

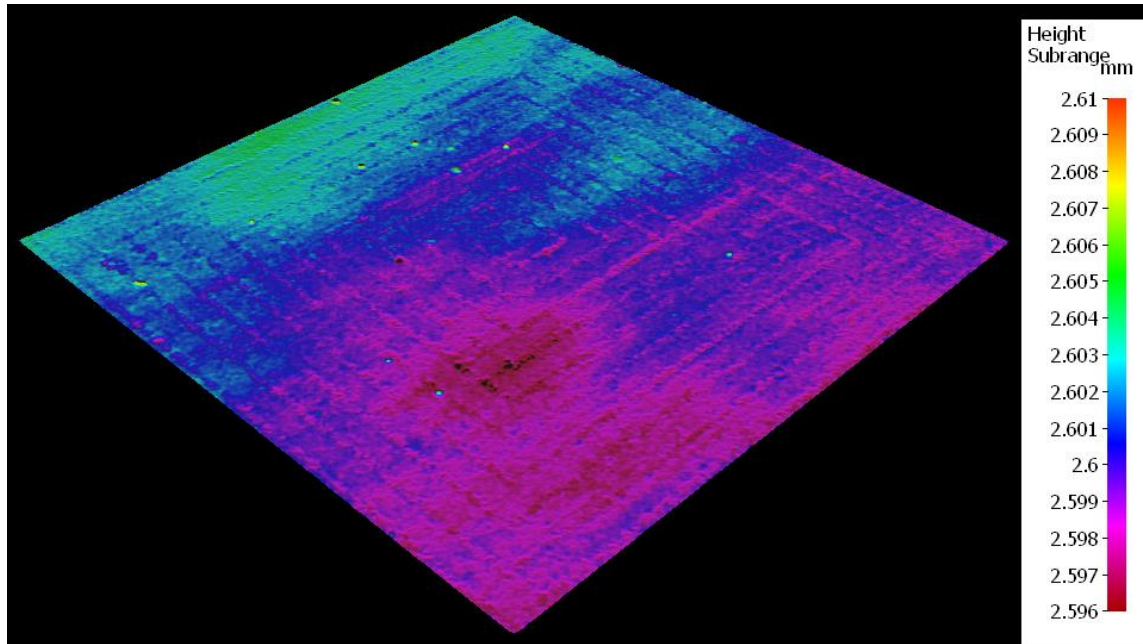


Figura 68: Superficie para velocidad 100 mm/s, potencia 20 W, frecuencia 500 KHz y patrón de cuadrados concéntricos.

- **Potencia:** Es evidente que la potencia es el factor que más afecta a la rugosidad superficial. Cuanto mayor es el valor de la potencia, más irregular y heterogénea es la superficie y, por tanto, mayores son los parámetros de rugosidad superficial. Se podría usar como ejemplo para ilustrar esto cualquiera de la imágenes obtenidas durante la caracterización de la rugosidad superficial, pero para no volver a mostrarlas todas, se usarán las *figuras 69 y 70*.

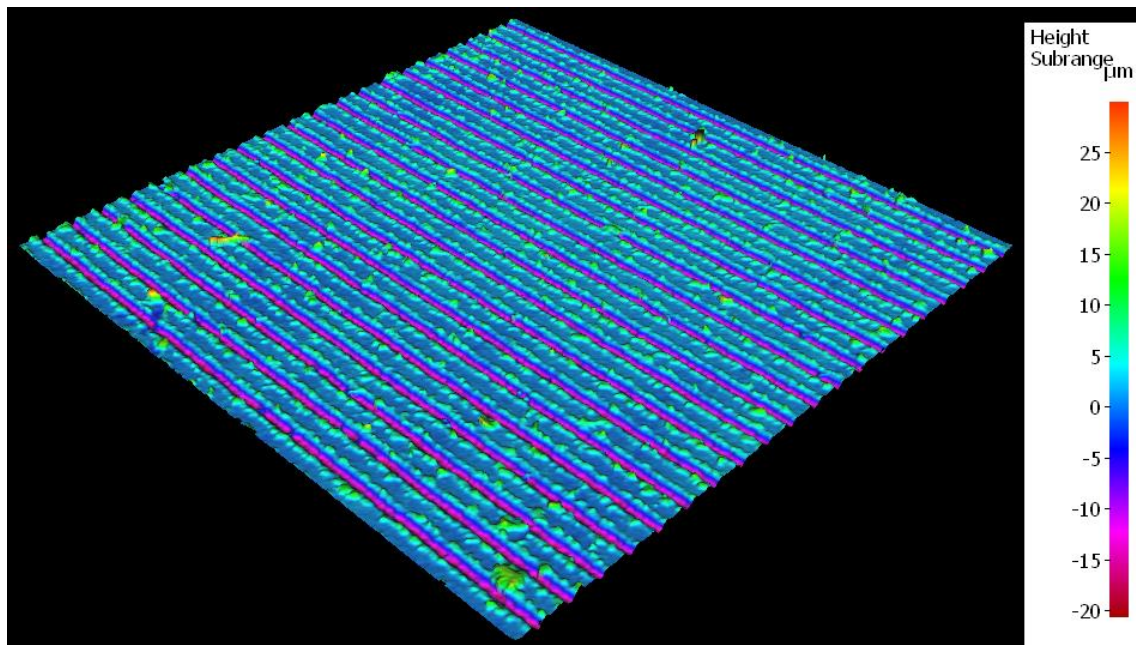


Figura 69: Superficie para velocidad 900 mm/s, potencia 20 W, frecuencia 100 KHz y patrón de cuadrados concéntricos.

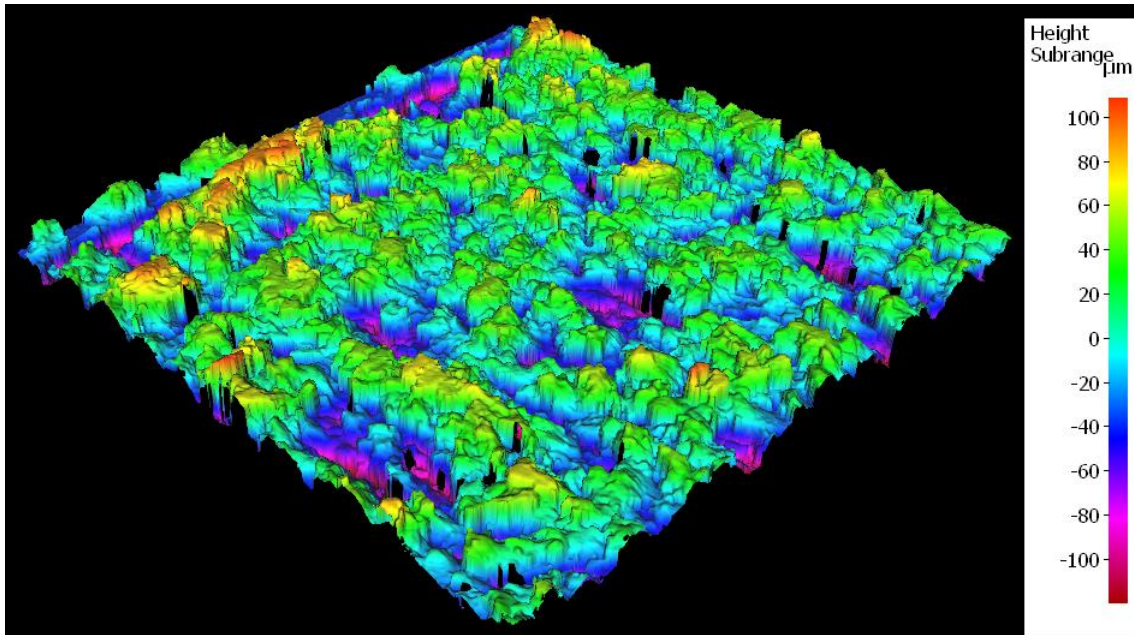


Figura 70: Superficie para velocidad 900 mm/s, potencia 100 W, frecuencia 100 KHz y patrón de cuadrados concéntricos.

- Patrón: El patrón afecta de forma poco significativa. Sobre todo, influye en los parámetros de rugosidad lineal (R_a , R_t , R_z), debido a que su valor depende del perfil seleccionado y, evidentemente, este en función de la dirección tomada si tenemos un patrón “dibujado” en la superficie.

En los siguientes apartados se muestran los resultados obtenidos en cuanto a los parámetros de rugosidad superficial.

4.2.1. Rugosidad Aritmética Media (R_a).

Para cada una de las combinaciones de patrón, velocidad, potencia y frecuencia se ha obtenido la rugosidad media lineal a lo largo de un segmento definido en el software, que consiste en la rugosidad media del perfil seleccionado.

Se han representado todos los valores obtenidos en gráficas, en función de la frecuencia y potencia, para cada patrón y valor de velocidad, lo que se puede ver en las *figuras 71-76*.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

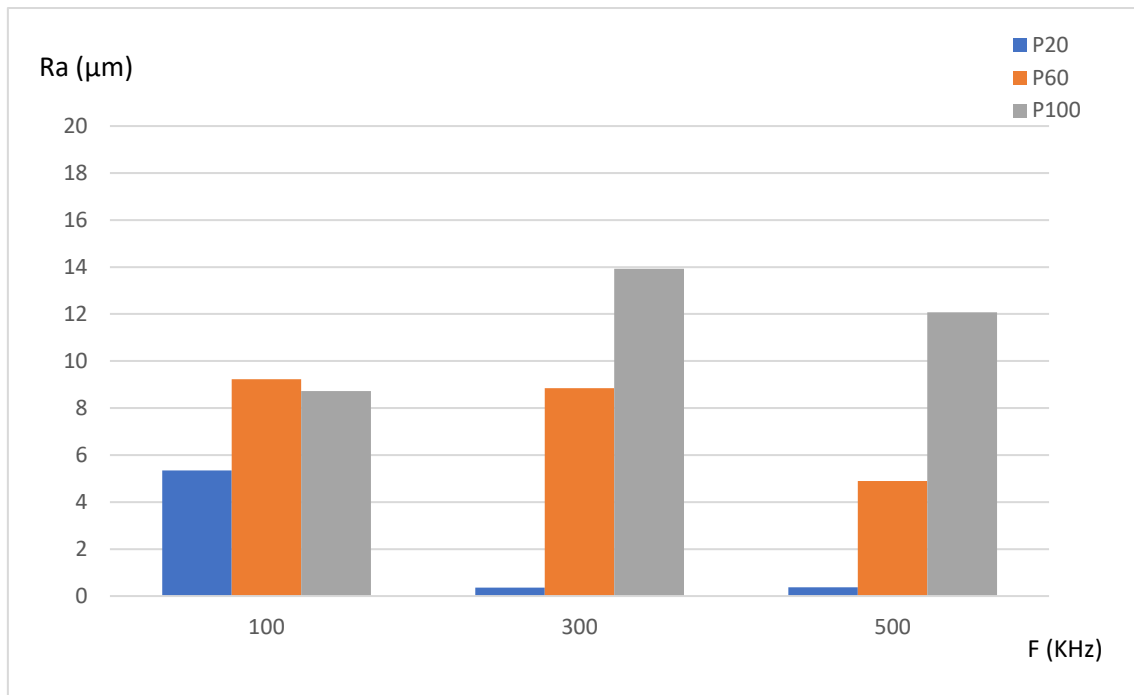


Figura 71: Valores de rugosidad media lineal en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 100 mm/s.

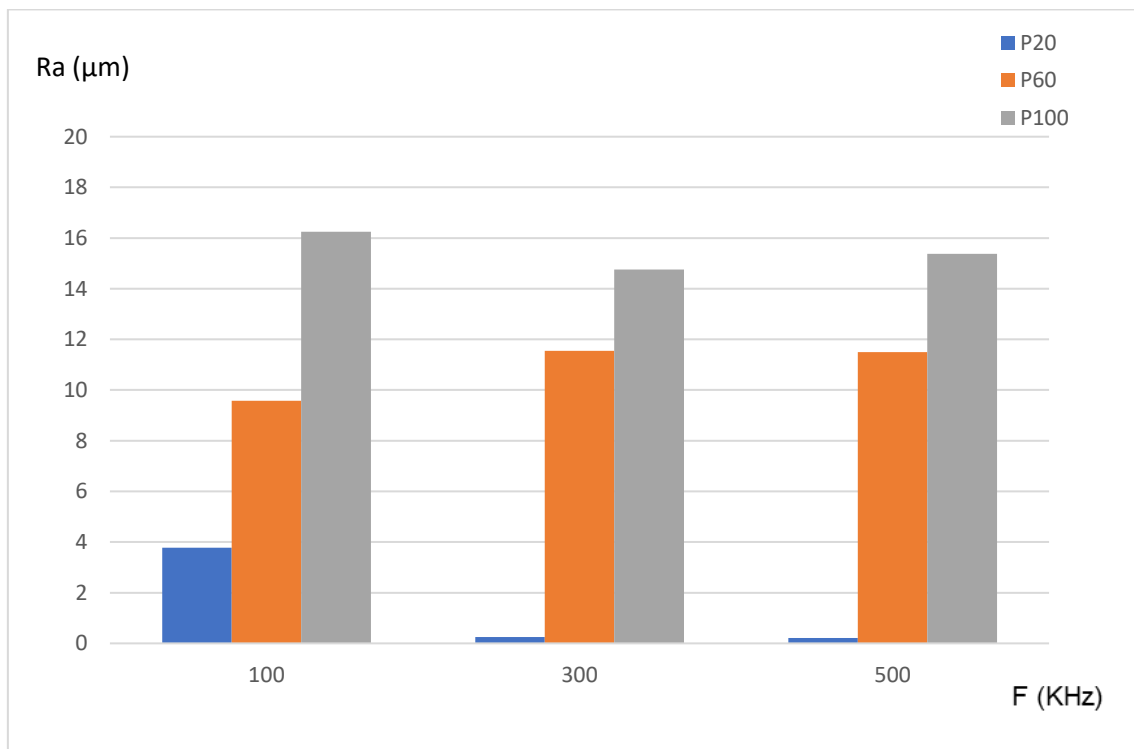


Figura 72: Valores de rugosidad media lineal en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 100 mm/s.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

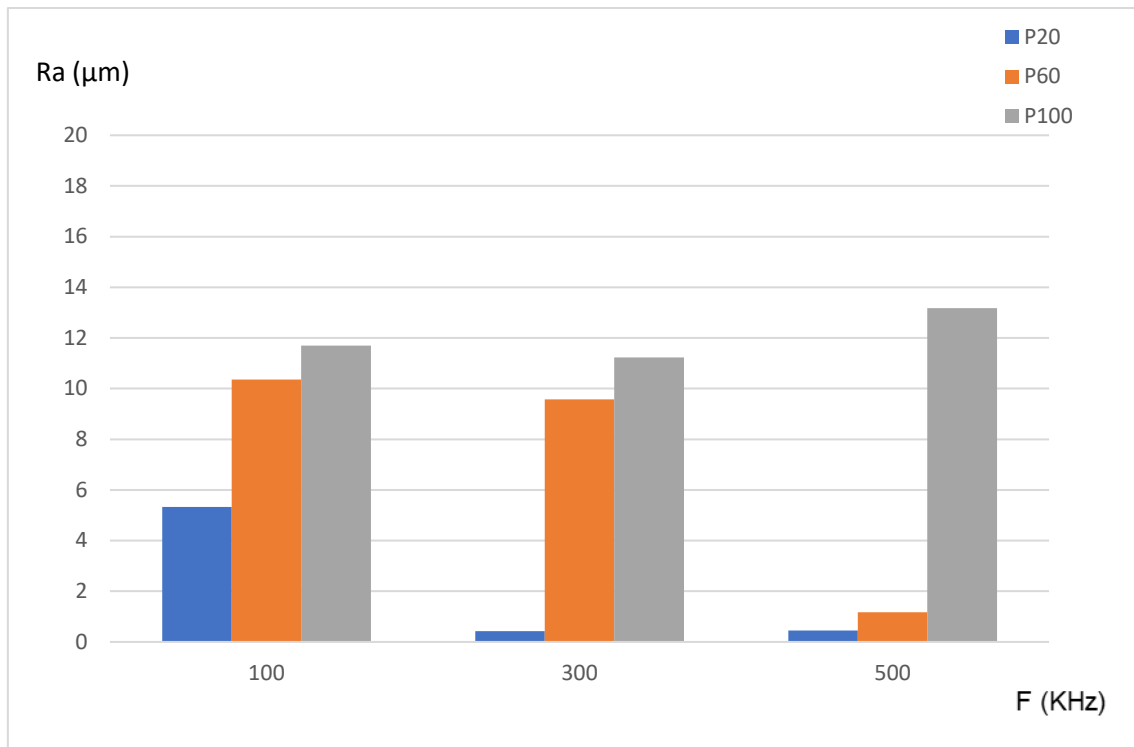


Figura 73: Valores de rugosidad media lineal en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 500 mm/s.

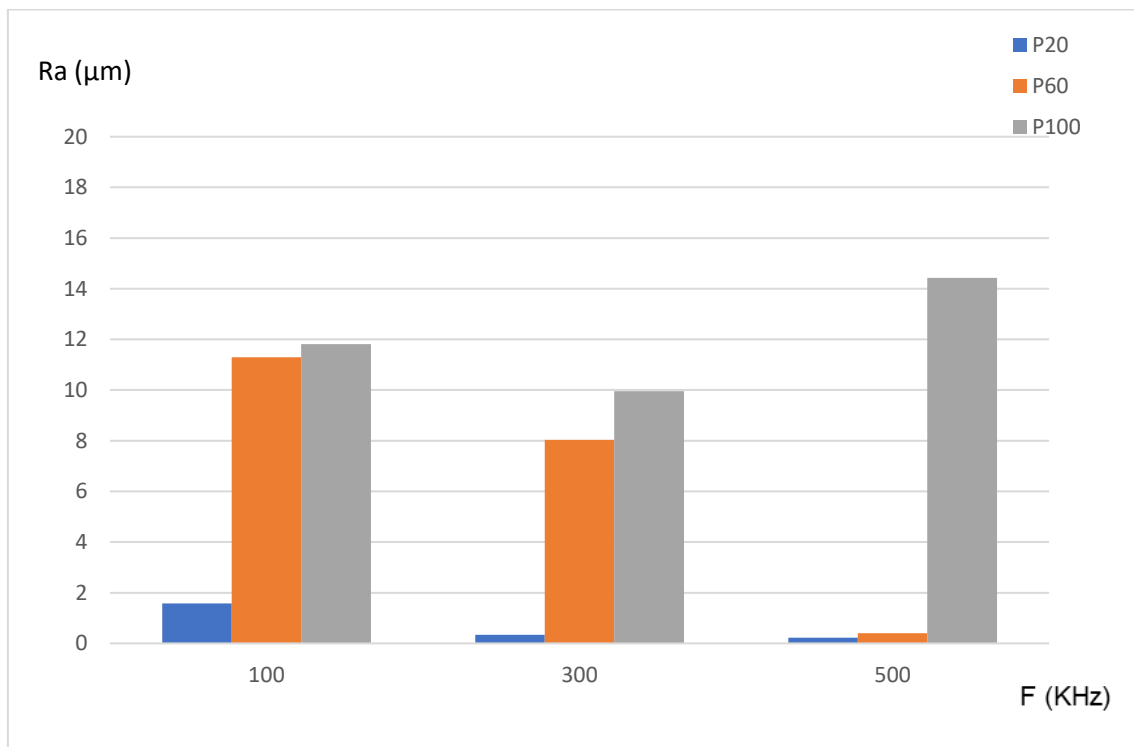


Figura 74: Valores de rugosidad media lineal en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 500 mm/s.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

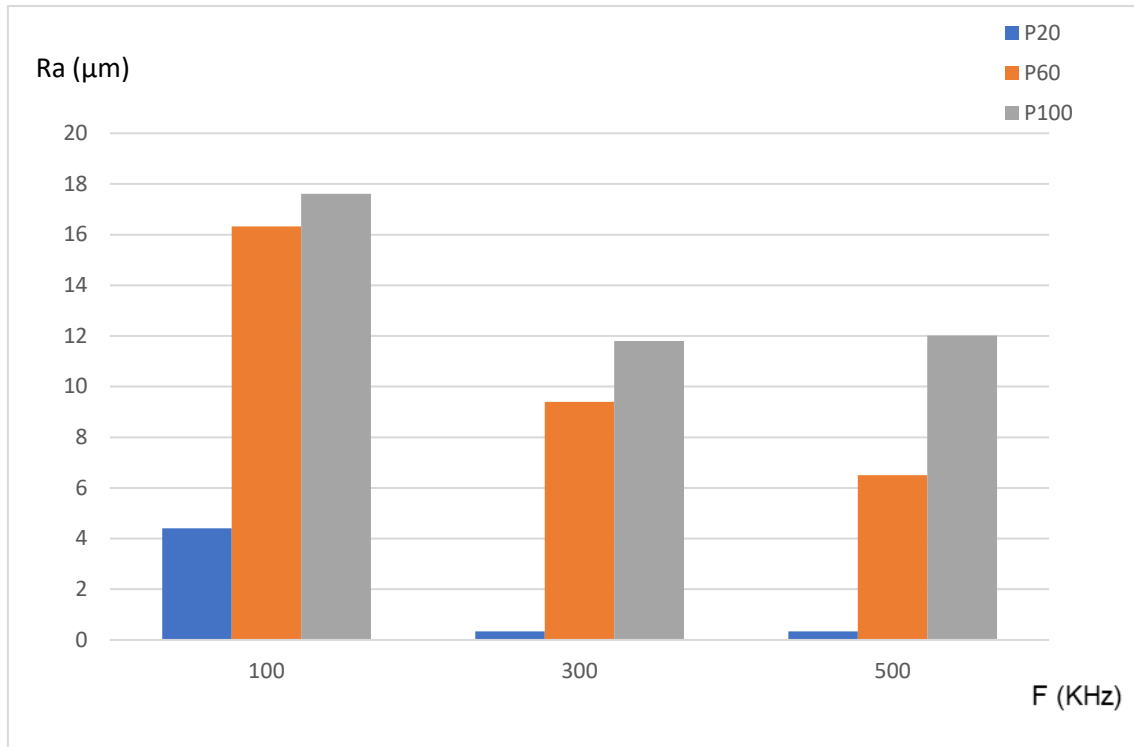


Figura 75: Valores de rugosidad media lineal en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 900 mm/s.

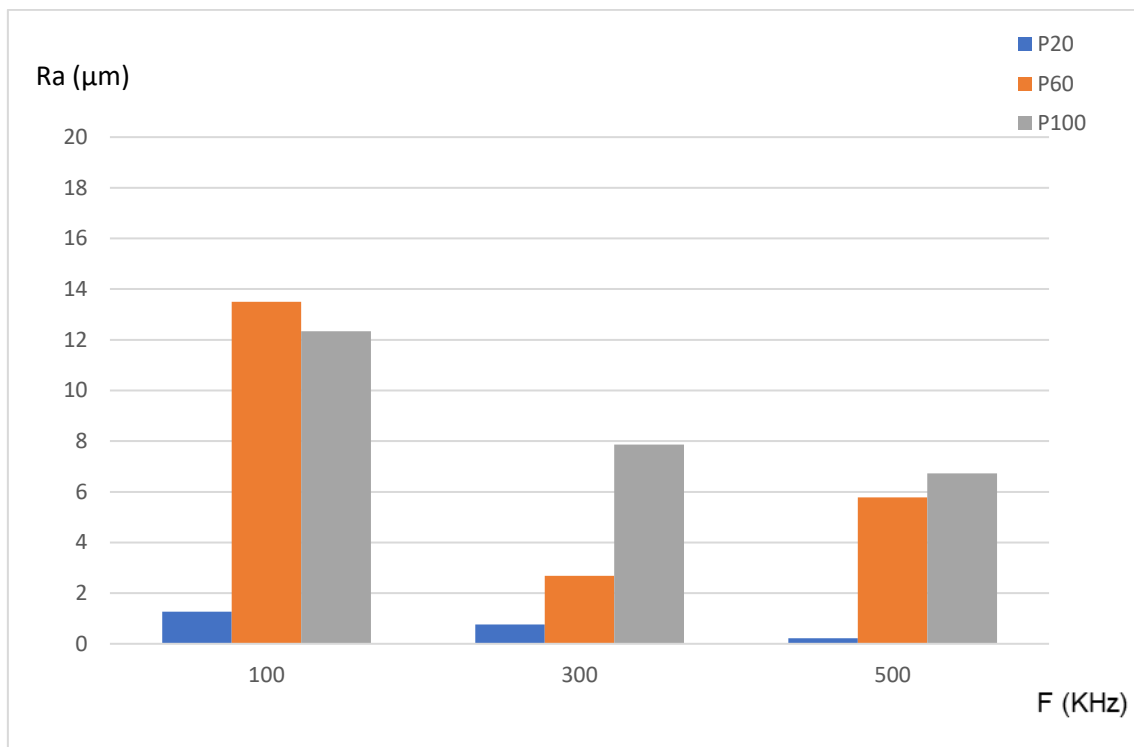


Figura 76: Valores de rugosidad media lineal en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 900 mm/s.

Por otro lado, gracias a Minitab, se puede comprobar cual de todos los parámetros que varían a la hora de hacer el ensayo influyen más en el valor de Ra. En la *figura 77* se puede ver el diagrama de Pareto que representa la influencia de todos los parámetros que intervienen en el proceso sobre la rugosidad media lineal.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

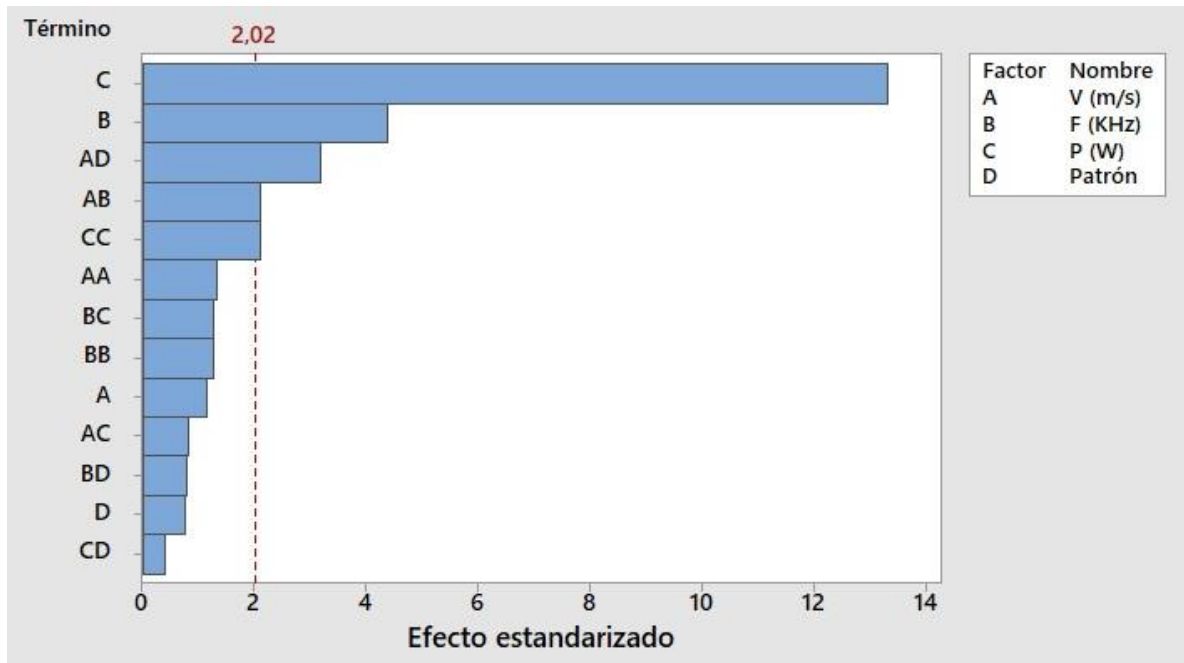


Figura 77: Diagrama de Pareto que representa la influencia de la velocidad, frecuencia, potencia y patrón en el valor de Ra.

También se obtienen dos ecuaciones que aproximan el valor de Ra en función de todas las variables que intervienen en el proceso de texturizado con un ajuste (R^2) del 84.85%.

- Ecuación para patrón de cuadrados concéntricos (*Ecuación 15*):

$$\begin{aligned}
 Ra(\mu m) = & 0.44 + 0.00168 * V\left(\frac{mm}{s}\right) - 0.0221 * F(KHz) + 0.2321 * P(W) \\
 & + 0.000006 * V\left(\frac{mm}{s}\right) * V\left(\frac{mm}{s}\right) + 0.000022 * F(KHz) \\
 & * F(KHz) - 0.000929 * P(W) * P(W) - 0.000013 * V\left(\frac{mm}{s}\right) \\
 & * F(KHz) - 0.000025 * V\left(\frac{mm}{s}\right) * P(W) + 0.000079 \\
 & * F(KHz) * P(W)
 \end{aligned} \tag{15}$$

- Ecuación para patrón de líneas paralelas (*Ecuación 16*):

$$\begin{aligned}
 Ra(\mu m) = & 1.75 - 0.00485 * V\left(\frac{mm}{s}\right) - 0.0189 * F(KHz) + 0.2404 \\
 & * P(W) + 0.000006 * V\left(\frac{mm}{s}\right) * V\left(\frac{mm}{s}\right) + 0.000022 \\
 & * F(KHz) * F(KHz) - 0.000929 * P(W) * P(W) \\
 & - 0.000013 * V\left(\frac{mm}{s}\right) * F(KHz) - 0.000025 * V\left(\frac{mm}{s}\right) \\
 & * P(W) + 0.000079 * F(KHz) * P(W)
 \end{aligned} \tag{16}$$

Se puede observar cómo la variable que más afecta al valor de Ra es la potencia, de forma que ambas aumentan de forma directamente proporcional, seguida de la frecuencia. Con ella ocurre al contrario, a medida que aumenta la frecuencia, disminuye el valor de Ra.

4.2.2. Altura total del perfil (Rt).

Para cada una de las combinaciones de patrón, velocidad, potencia y frecuencia se ha obtenido la altura total del perfil a lo largo de un segmento definido en el software, que consiste en la máxima distancia pico-valle del perfil seleccionado.

Se han representado todos los valores obtenidos en gráficas, en función de la frecuencia y potencia, para cada patrón y valor de velocidad, lo que se puede ver en las *figuras 78-83*.

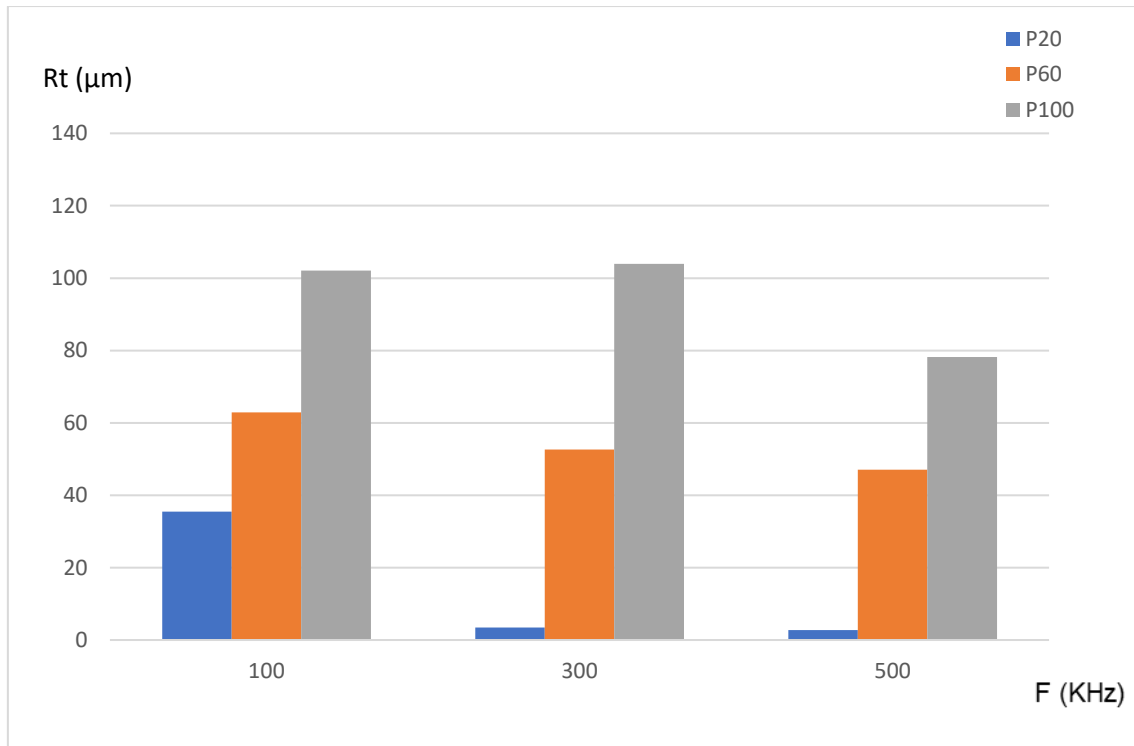


Figura 78: Valores de altura total del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 100 mm/s.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

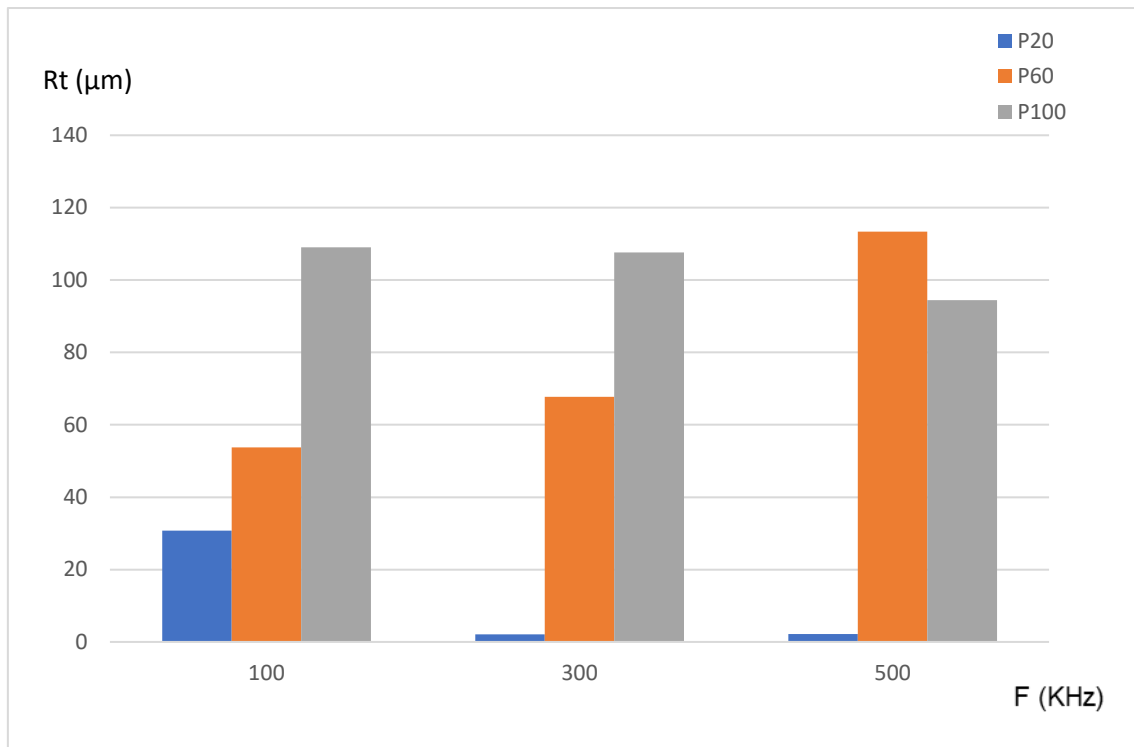


Figura 79: Valores de altura total del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 100 mm/s.

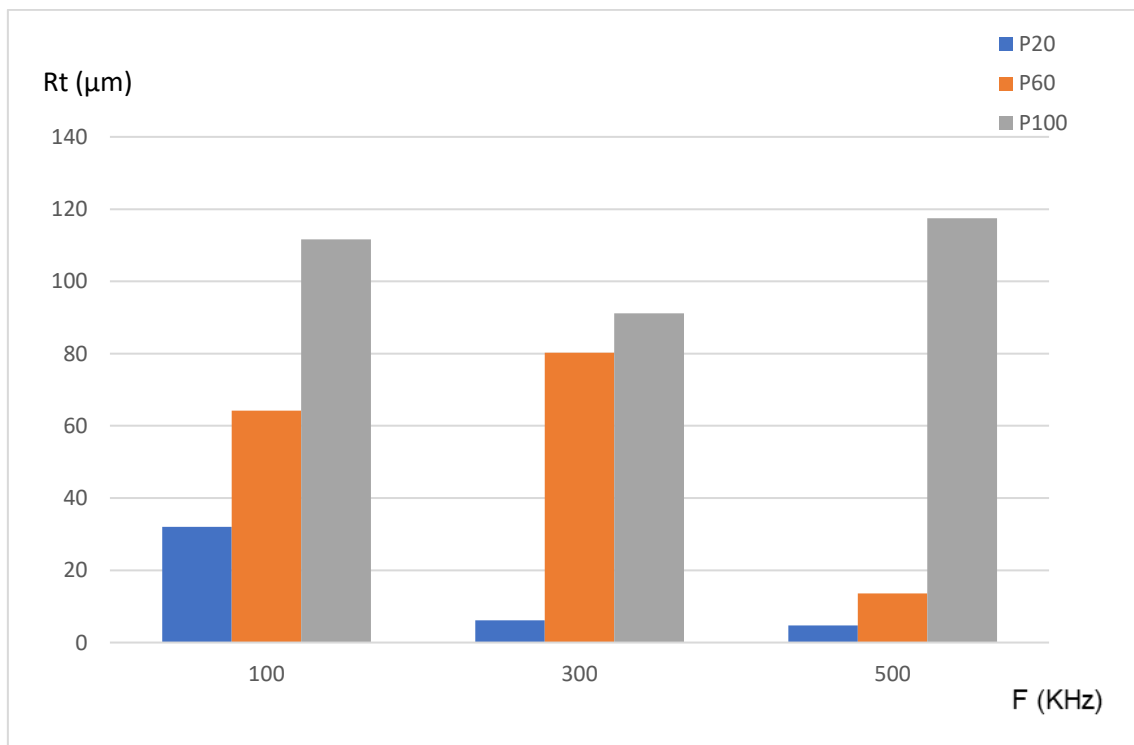


Figura 80: Valores de altura total del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 500 mm/s.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

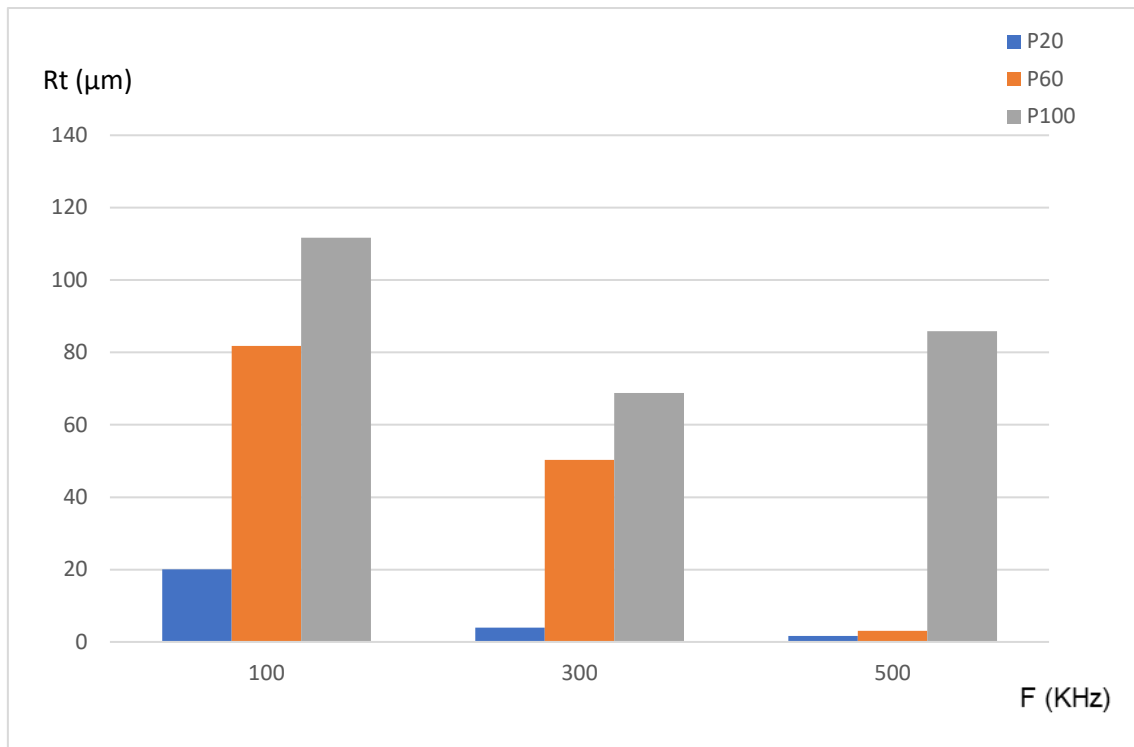


Figura 81: Valores de altura total del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 500 mm/s.

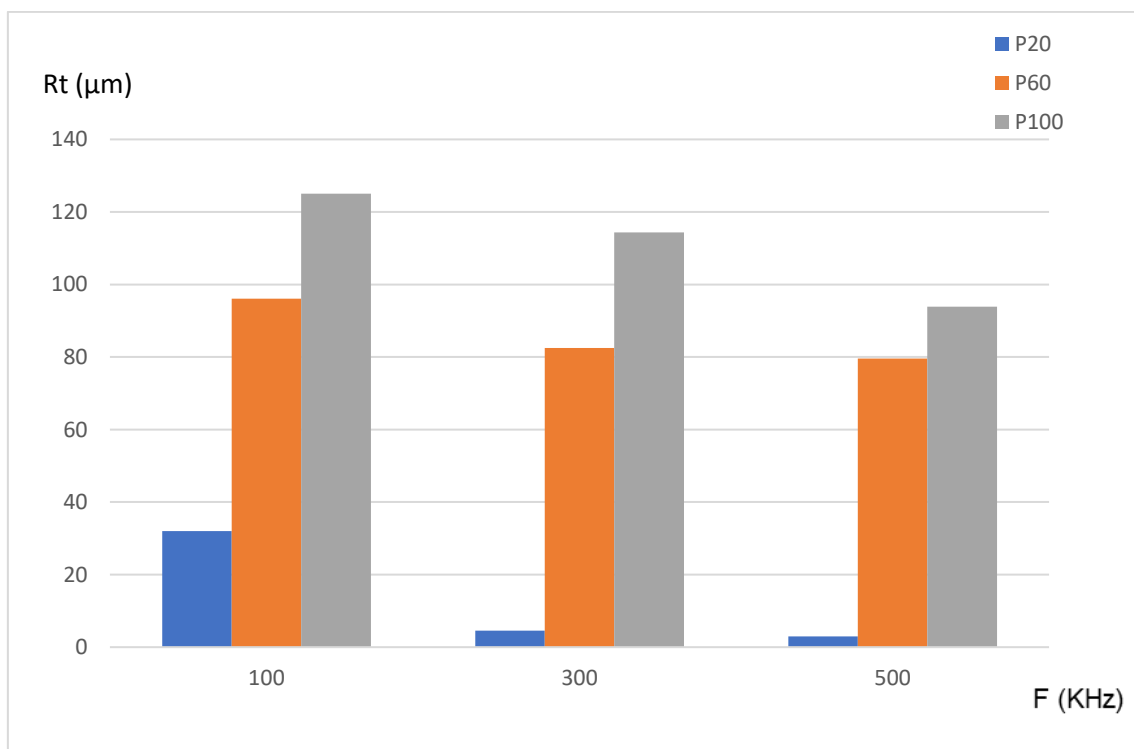


Figura 82: Valores de altura total del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 900 mm/s.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

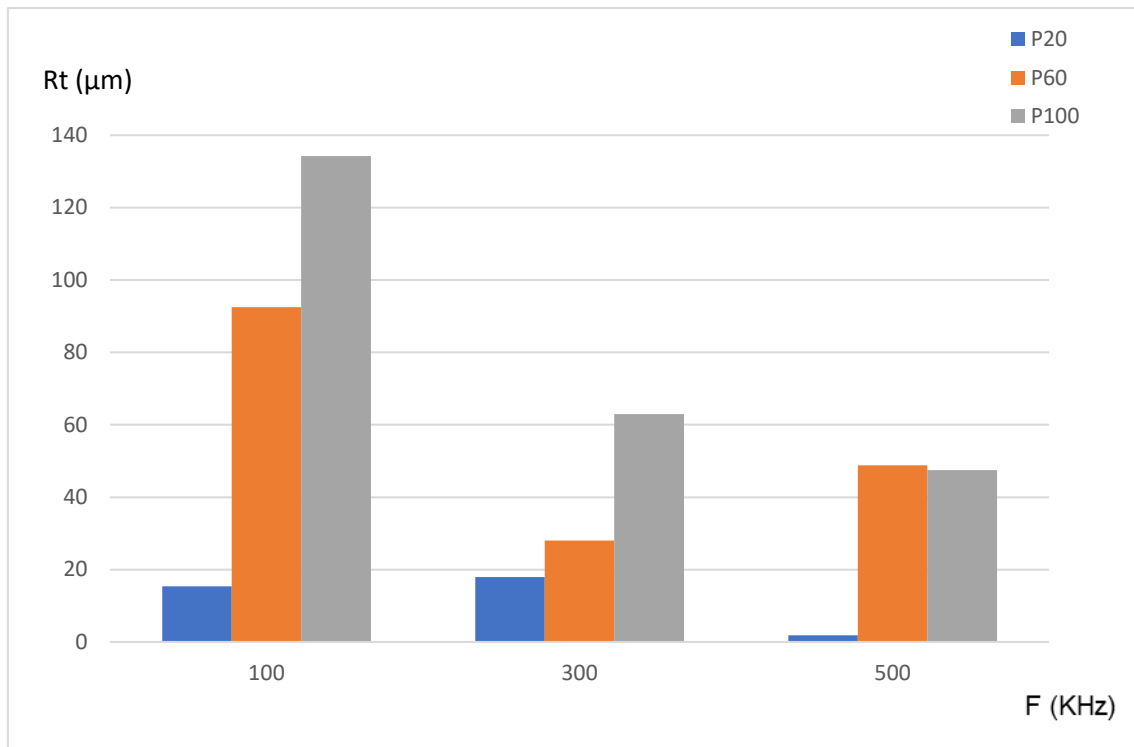


Figura 83: Valores de altura total del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 900 mm/s.

De nuevo, haciendo uso de Minitab, se puede comprobar cual de todos los parámetros que varían a la hora de hacer el ensayo influyen más en el valor de Rt. En la figura 84 se puede ver el diagrama de Pareto que representa la influencia de todos los parámetros que intervienen en el proceso sobre la altura total del perfil.

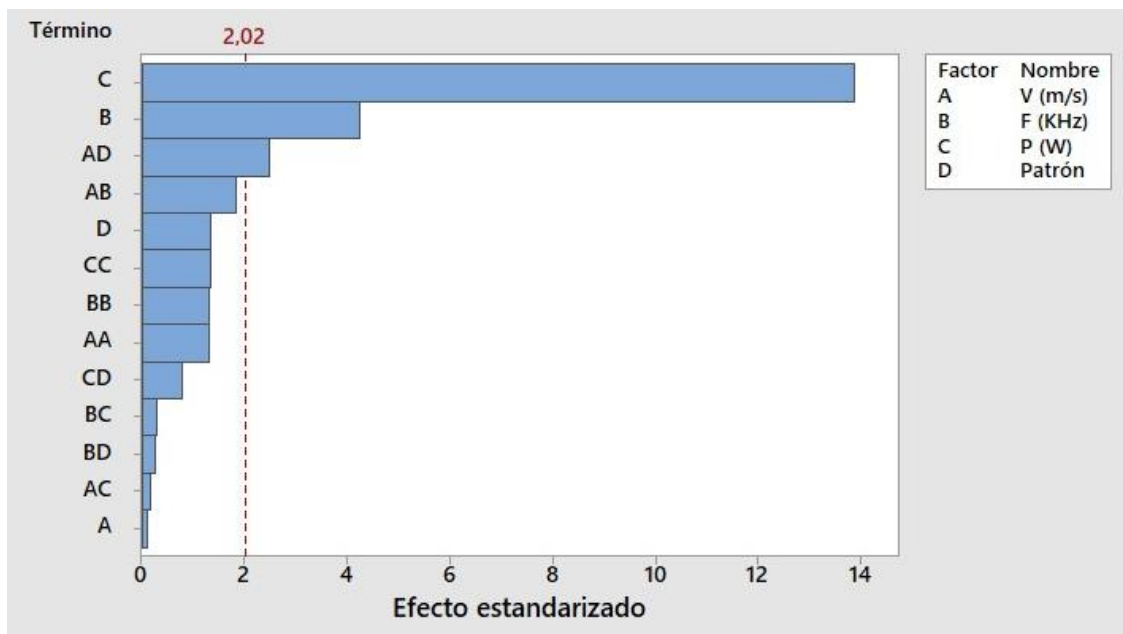


Figura 84: Diagrama de Pareto que representa la influencia de la velocidad, frecuencia, potencia y patrón en el valor de Rt.

También se obtienen dos ecuaciones que aproximan el valor de Rt en función de todas las variables que intervienen en el proceso de texturizado con un ajuste (R²) del 85.10%.

- Ecuación para patrón de cuadrados concéntricos (*Ecuación 17*):

$$\begin{aligned}
 Rt(\mu\text{m}) = & -9.0 + 0.0041 * V\left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) - 0.1153 * F(\text{KHz}) + 1.726 * P(\text{W}) \\
 & + 0.000044 * V\left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) * V\left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) + 0.000176 * F(\text{KHz}) \\
 & * F(\text{KHz}) - 0.00445 * P(\text{W}) * P(\text{W}) - 0.000086 * V\left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) \\
 & * F(\text{KHz}) - 0.000040 * V\left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) * P(\text{W}) + 0.000140 \\
 & * F(\text{KHz}) * P(\text{W})
 \end{aligned} \quad (17)$$

- Ecuación para patrón de líneas paralelas (*Ecuación 18*):

$$\begin{aligned}
 Rt(\mu\text{m}) = & 13.0 - 0.0340V\left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) - 0.1235 * F(\text{KHz}) + 1.604 * P(\text{W}) \\
 & + 0.000044 * V\left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) * V\left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) + 0.000176 * F(\text{KHz}) \\
 & * F(\text{KHz}) - 0.00445 * P(\text{W}) * P(\text{W}) - 0.000086 \\
 & * V\left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) * F(\text{KHz}) - 0.000040 * V\left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) * P(\text{W}) \\
 & + 0.000140 * F(\text{KHz}) * P(\text{W})
 \end{aligned} \quad (18)$$

Se puede observar como la potencia afecta significativamente al valor de Rt de forma directamente proporcional. Tras la potencia, el parámetro que más afecta es la frecuencia, que a medida que aumenta, el valor de Rt disminuye.

4.2.3. Altura promedio máxima (Rz).

Para cada una de las combinaciones de patrón, velocidad, potencia y frecuencia se ha obtenido la altura promedio máxima a lo largo de un segmento definido en el software, que consiste en la media de todas las distancias pico-valle del perfil.

Se han representado todos los valores obtenidos en gráficas, en función de la frecuencia y potencia, para cada patrón y valor de velocidad, lo que se puede ver en las *figuras 85-90*.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

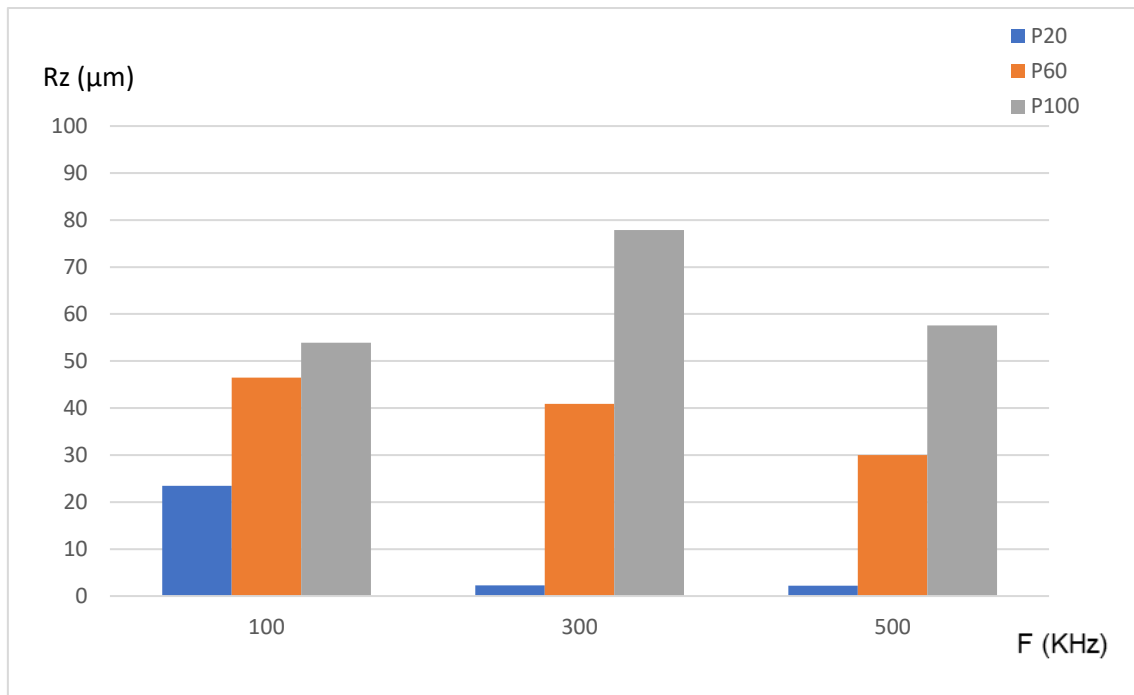


Figura 85: Valores de altura promedio máxima del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 100 mm/s.

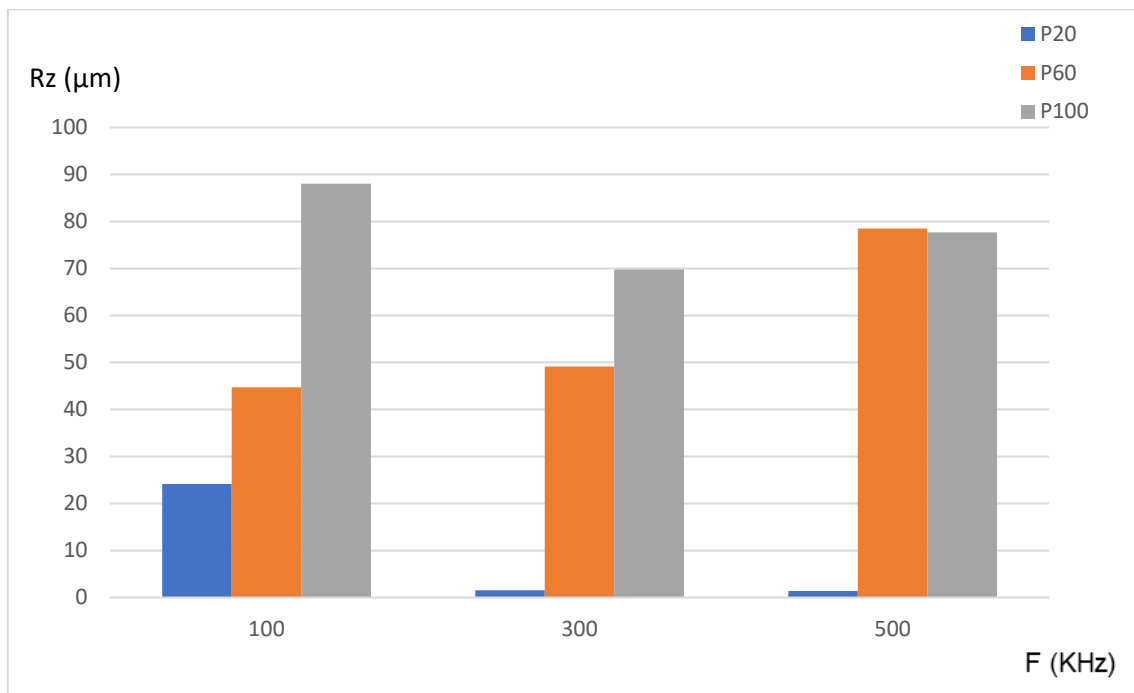


Figura 86: Valores de altura promedio máxima del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 100 mm/s.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

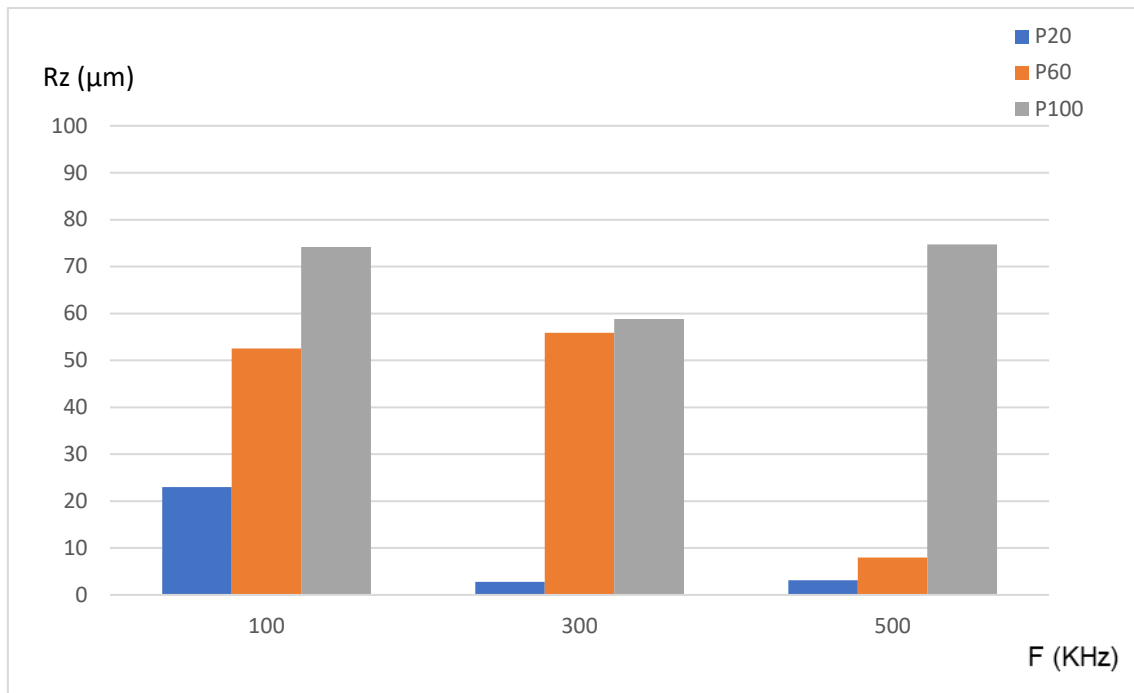


Figura 87: Valores de altura promedio máxima del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 500 mm/s.

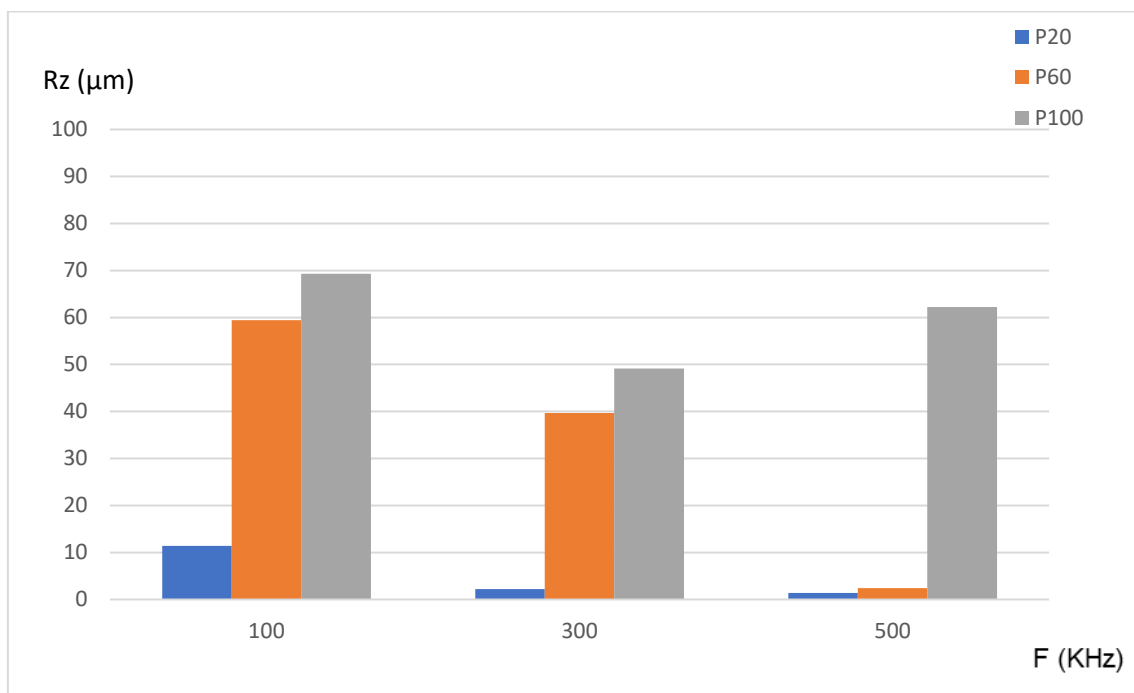


Figura 88: Valores de altura promedio máxima del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 500 mm/s.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

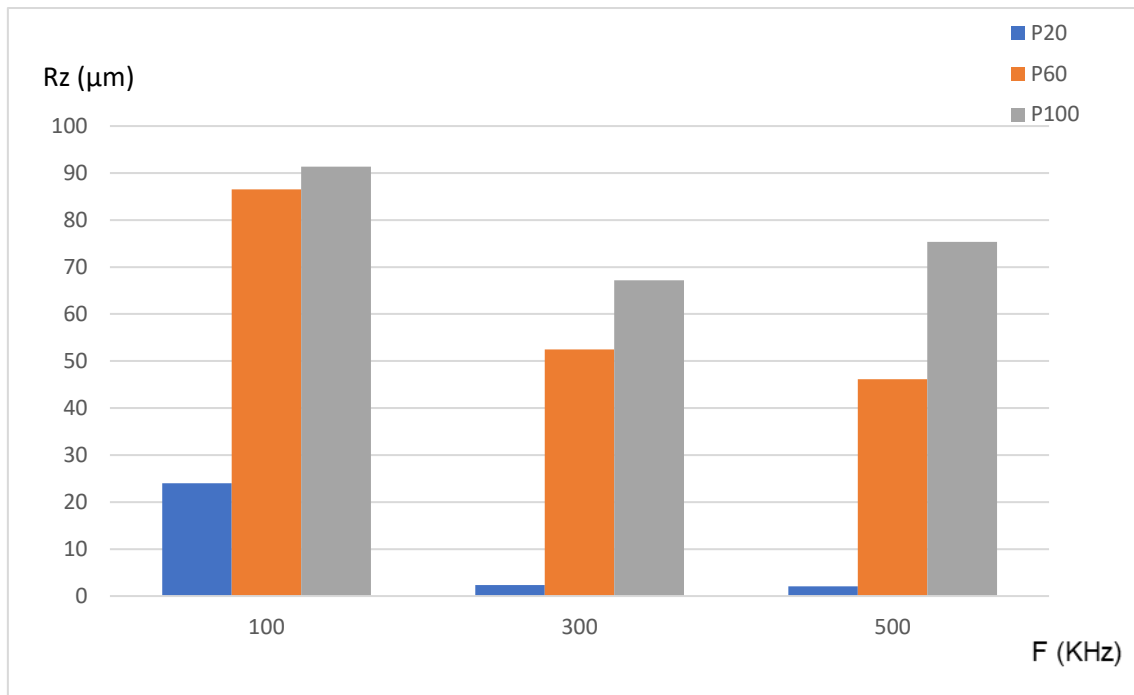


Figura 89: Valores de altura promedio máxima del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 900 mm/s.

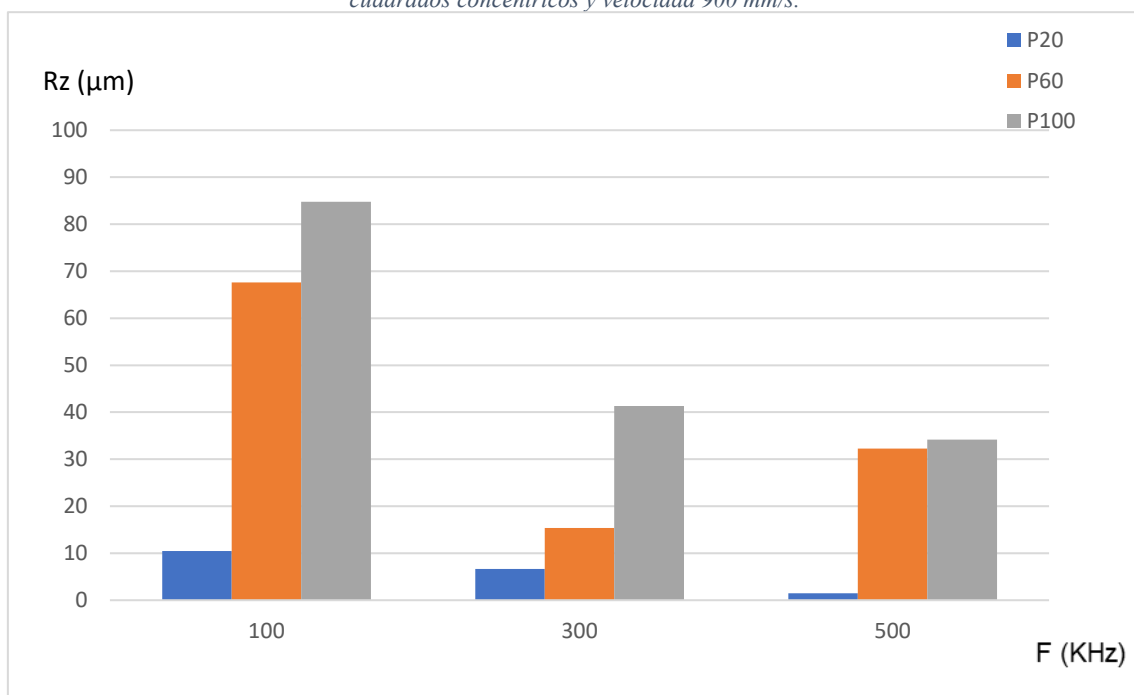


Figura 90: Valores de altura promedio máxima del perfil en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 900 mm/s.

Haciendo uso de Minitab, se puede comprobar cual de todos los parámetros que varían a la hora de hacer el ensayo influyen más en el valor de Rz. En la *figura 91* se puede ver el diagrama de Pareto que representa la influencia de todos los parámetros que intervienen en el proceso sobre la altura total del perfil.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

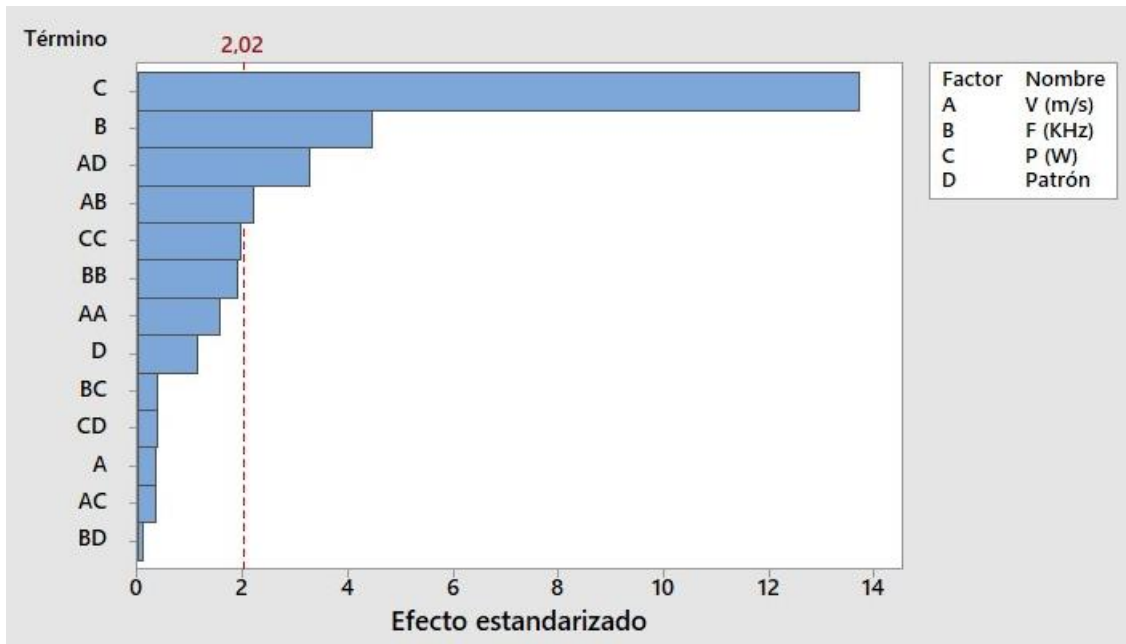


Figura 91: Diagrama de Pareto que representa la influencia de la velocidad, frecuencia, potencia y patrón en el valor de Rz.

También se obtienen dos ecuaciones que aproximan el valor de Rz en función de todas las variables que intervienen en el proceso de texturizado con un ajuste (R^2) del 85.47%.

- Ecuación para patrón de cuadrados concéntricos (Ecuación 19):

$$\begin{aligned}
 Rz(\mu m) = & -2.0 + 0.0045 * V\left(\frac{mm}{s}\right) - 0.1266 * F(KHz) + 1.295 * P(W) \\
 & + 0.000037 * V\left(\frac{mm}{s}\right) * V\left(\frac{mm}{s}\right) + 0.000177 * F(KHz) \\
 & * F(KHz) - 0.00455 * P(W) * P(W) - 0.000073 * V\left(\frac{mm}{s}\right) \quad (19) \\
 & * F(KHz) - 0.000059 * V\left(\frac{mm}{s}\right) * P(W) + 0.000130 * F(KHz) \\
 & * P(W)
 \end{aligned}$$

- Ecuación para patrón de líneas paralelas (Ecuación 20):

$$\begin{aligned}
 Rz(\mu m) = & 13.4 - 0.0308 * V\left(\frac{mm}{s}\right) - 0.1245 * F(KHz) + 1.254 * P(W) \\
 & + 0.000037 * V\left(\frac{mm}{s}\right) * V\left(\frac{mm}{s}\right) + 0.000177 * F(KHz) \\
 & * F(KHz) - 0.00455 * P(W) * P(W) - 0.000073 * V\left(\frac{mm}{s}\right) \quad (20) \\
 & * F(KHz) - 0.000059 * V\left(\frac{mm}{s}\right) * P(W) + 0.000130 \\
 & * F(KHz) * P(W)
 \end{aligned}$$

El parámetro que más afecta al valor de Rz es la potencia, de forma que cuando aumenta, también lo hace la altura promedio máxima. También afecta al valor de Rz de forma significativa la frecuencia, pero lo hace al contrario, a mayor valor de frecuencia menor es la altura promedio máxima.

4.2.4. Rugosidad media superficial (Sa).

Para cada una de las combinaciones de patrón, velocidad, potencia y frecuencia se ha obtenido la rugosidad media superficial del área todo tratada, que consiste en la rugosidad o altura media de la totalidad de la superficie.

Se han representado todos los valores obtenidos en gráficas, en función de la frecuencia y potencia, para cada patrón y valor de velocidad, lo que se puede ver en las *figuras 92-97*.

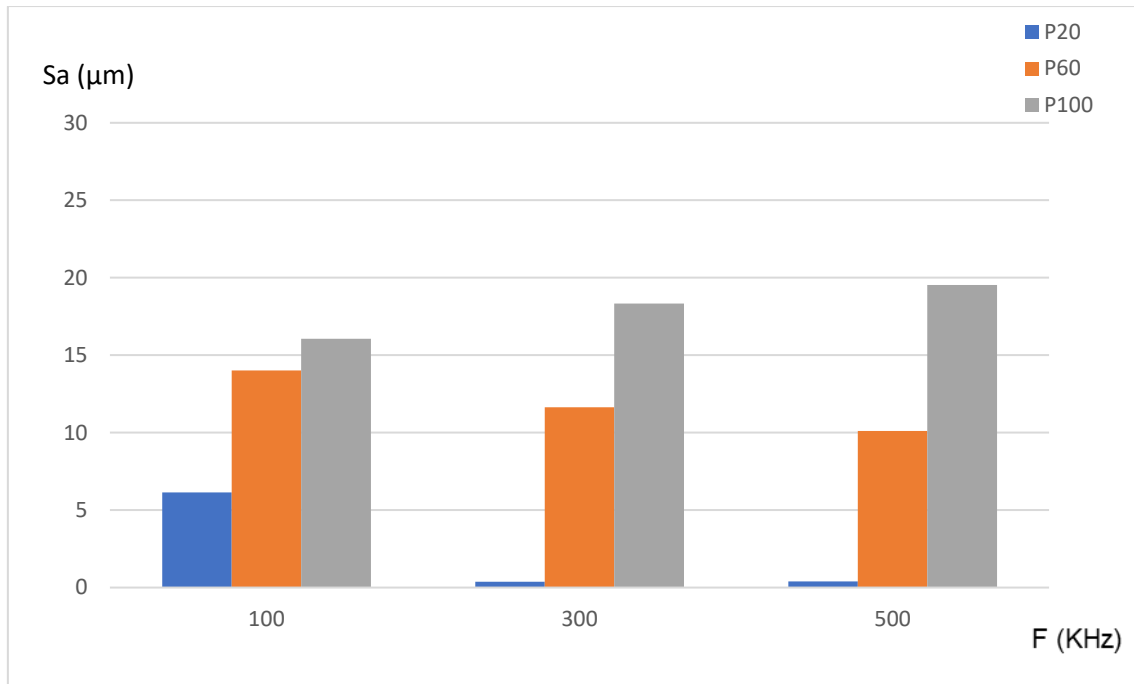


Figura 92: Valores de rugosidad media superficial del área tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 100 mm/s.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

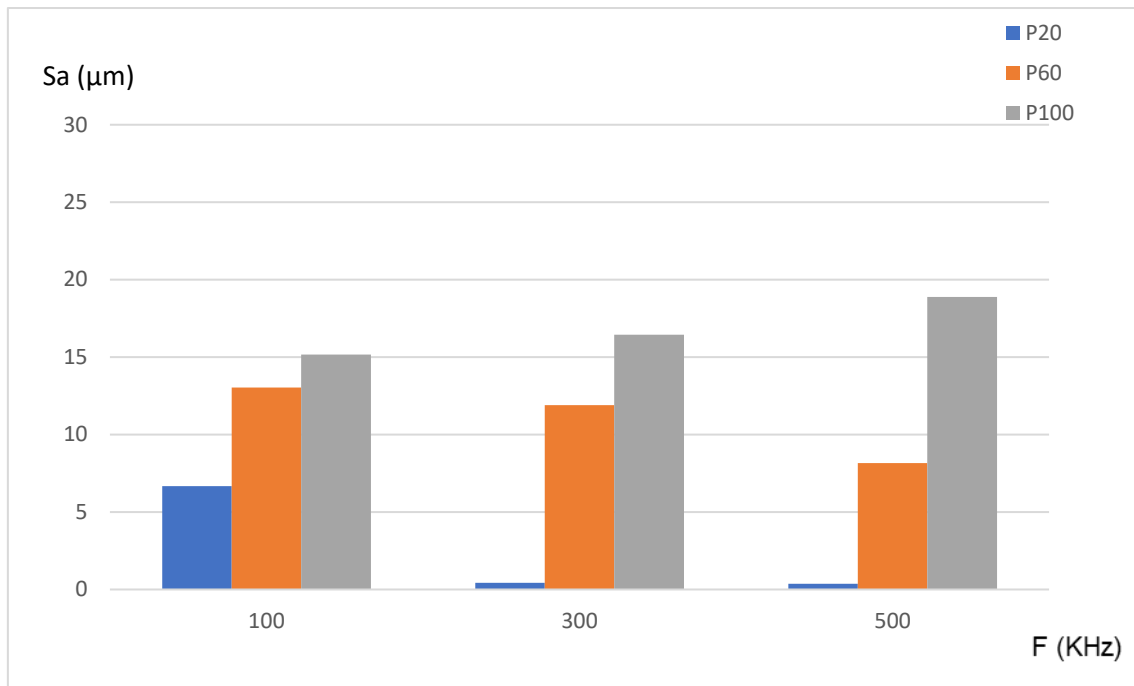


Figura 93: Valores de rugosidad media superficial del área tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 100 mm/s.

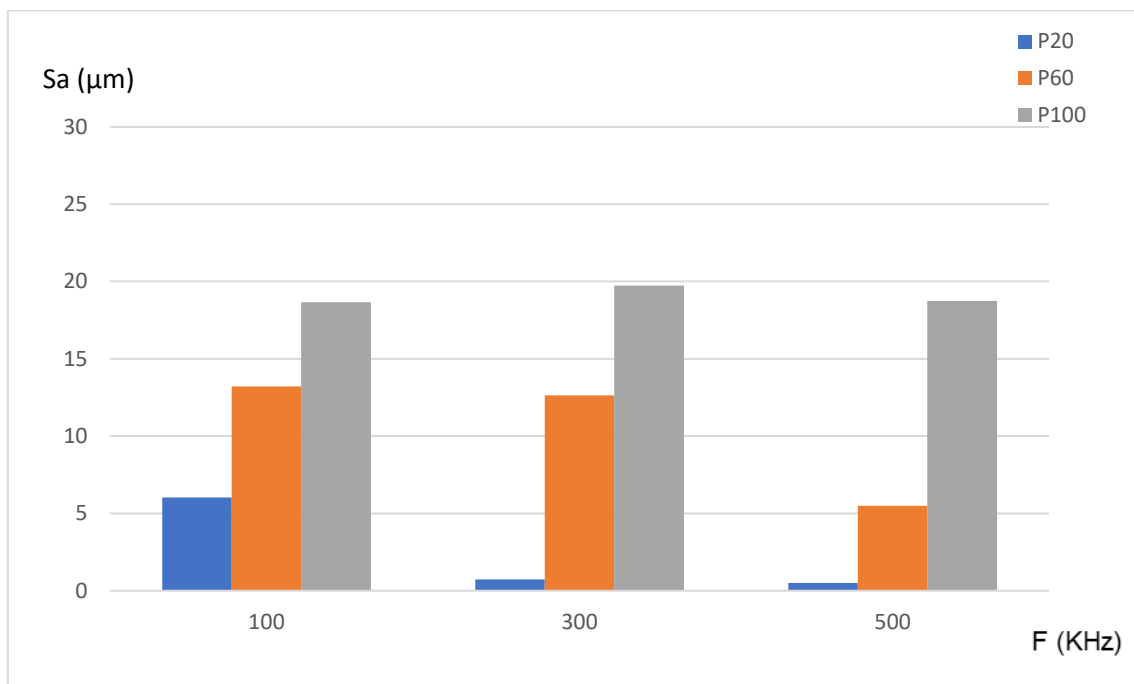


Figura 94: Valores de rugosidad media superficial del área tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 500 mm/s.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

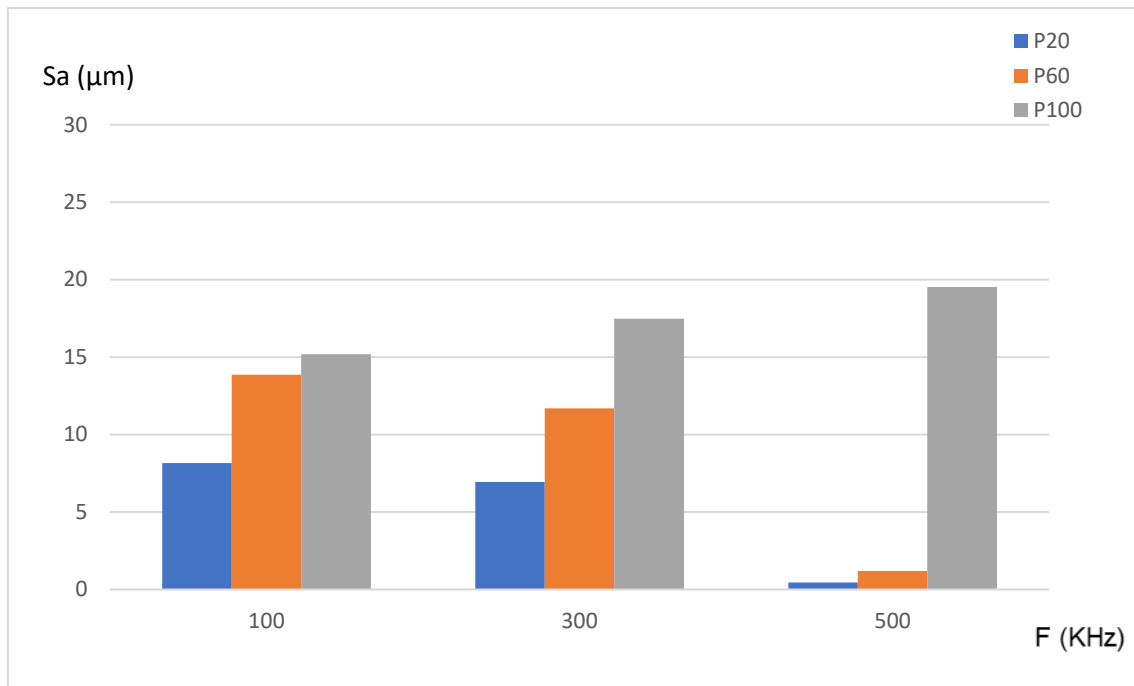


Figura 95: Valores de rugosidad media superficial del área tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 500 mm/s.

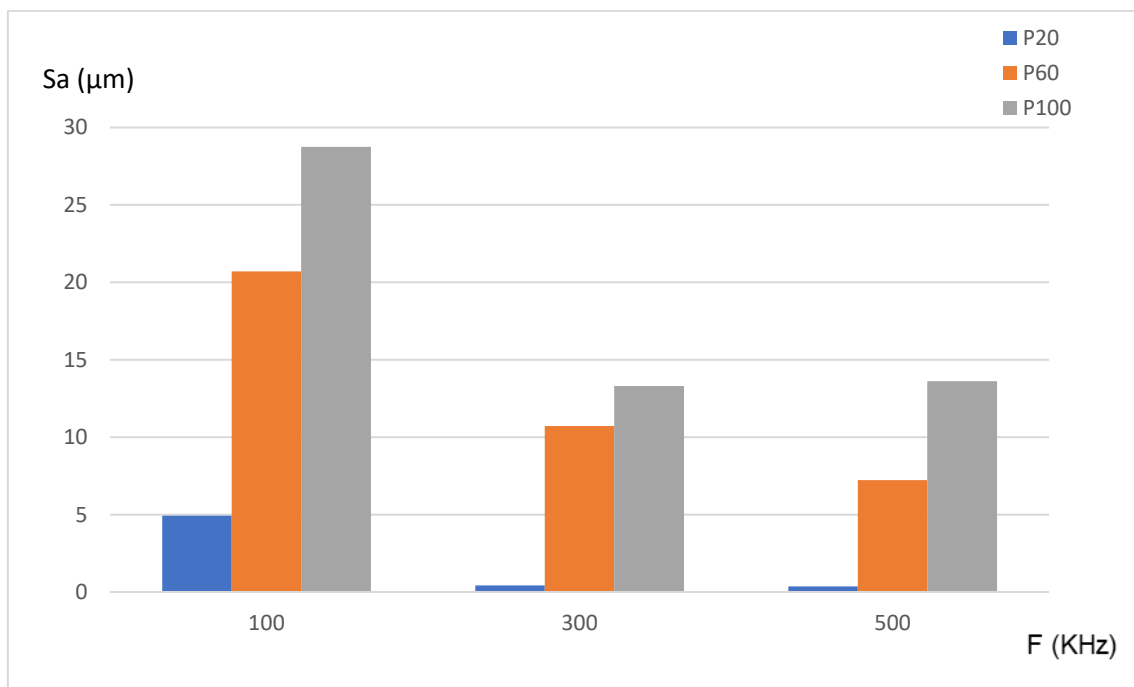


Figura 96: Valores de rugosidad media superficial del área tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 900 mm/s.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

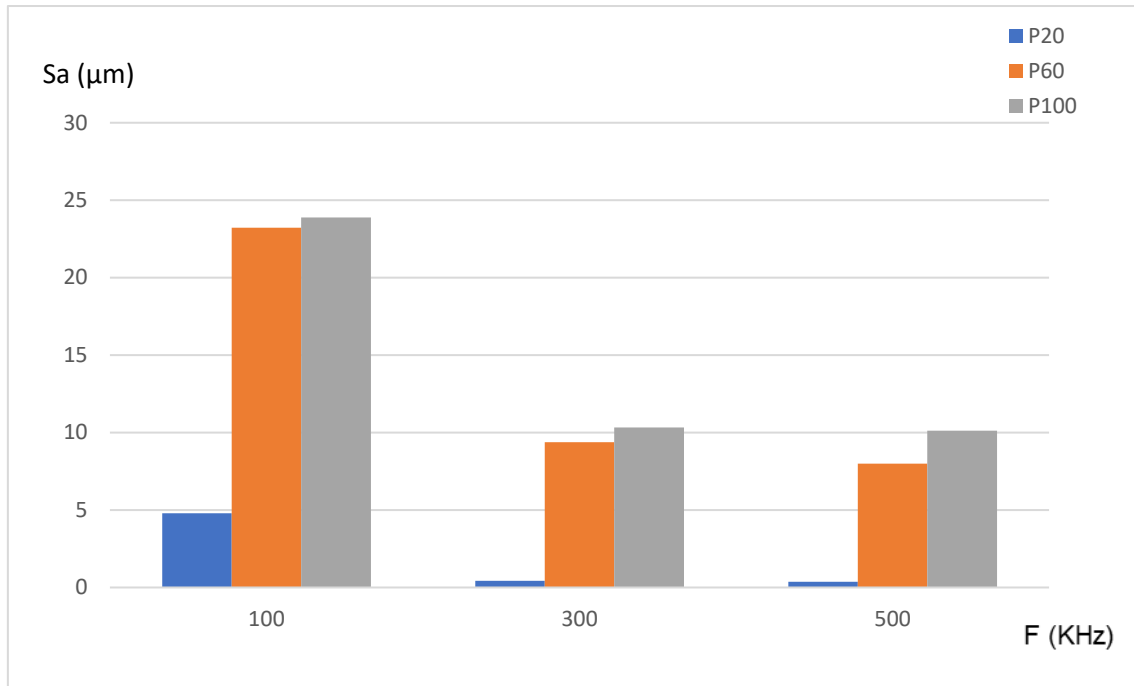


Figura 97: Valores de rugosidad media superficial del área tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 900 mm/s.

Haciendo uso de Minitab, se puede comprobar cual de todos los parámetros que varían a la hora de hacer el ensayo influyen más en el valor de Sa. En la figura 98 se puede ver el diagrama de Pareto que representa la influencia de todos los parámetros que intervienen en el proceso sobre la altura total del perfil.

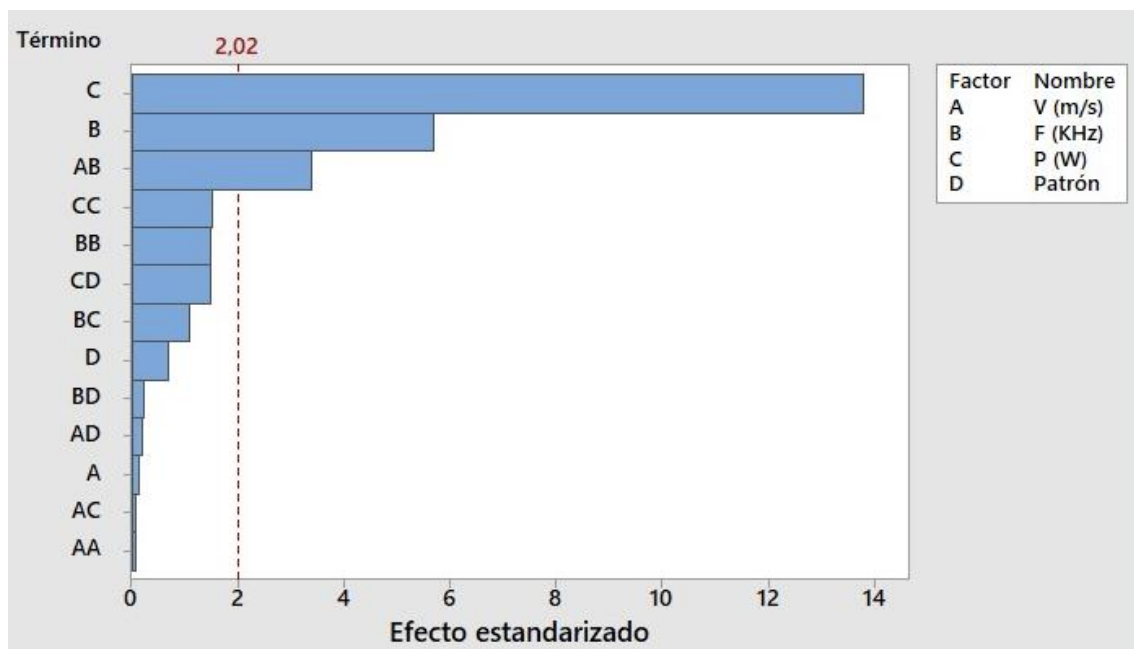


Figura 98: Diagrama de Pareto que representa la influencia de la velocidad, frecuencia, potencia y patrón en el valor de Sa.

También se obtienen dos ecuaciones que aproximan el valor de Sa en función de todas las variables que intervienen en el proceso de texturizado con un ajuste (R^2) del 85.88%.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

- Ecuación para patrón de cuadrados concéntricos (*Ecuación 21*):

$$\begin{aligned} Sa(\mu\text{m}) = & 0.00938 * V\left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) - 0.0268 * F(\text{KHz}) + 0.2838 * P(\text{W}) \\ & + 0.000035 * F(\text{KHz}) * F(\text{KHz}) - 0.000873 * P(\text{W}) * P(\text{W}) \\ & - 0.000028 * V\left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) * F(\text{KHz}) - 0.000003 * V\left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) \\ & * P(\text{W}) + 0.000089 * F(\text{KHz}) * P(\text{W}) \end{aligned} \quad (21)$$

- Ecuación para patrón de líneas paralelas (*Ecuación 22*):

$$\begin{aligned} Sa(\mu\text{m}) = & 2.41 + 0.00882 * V\left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) - 0.0281 * F(\text{KHz}) + 0.2443 * P(\text{W}) \\ & + 0.000035 * F(\text{KHz}) * F(\text{KHz}) - 0.000873 * P(\text{W}) * P(\text{W}) \\ & - 0.000028 * V\left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) * F(\text{KHz}) - 0.000003 * V\left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) \\ & * P(\text{W}) + 0.000089 * F(\text{KHz}) * P(\text{W}) \end{aligned} \quad (22)$$

El parámetro que más afecta al valor de Sa es la potencia, de forma que cuando aumenta, también lo hace la rugosidad media superficial. También afecta al valor de Sa de forma significativa la frecuencia, pero lo hace al contrario, a mayor valor de frecuencia menor es la rugosidad media superficial.

4.2.5. Altura máxima de la superficie (Sz).

Para cada una de las combinaciones de patrón, velocidad, potencia y frecuencia se ha obtenido la altura máxima de la superficie tratada, que consiste en la distancia pico-valle máxima de todo el área estudiada.

Se han representado todos los valores obtenidos en gráficas, en función de la frecuencia y potencia, para cada patrón y valor de velocidad, lo que se puede ver en las *figuras 99-104*.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

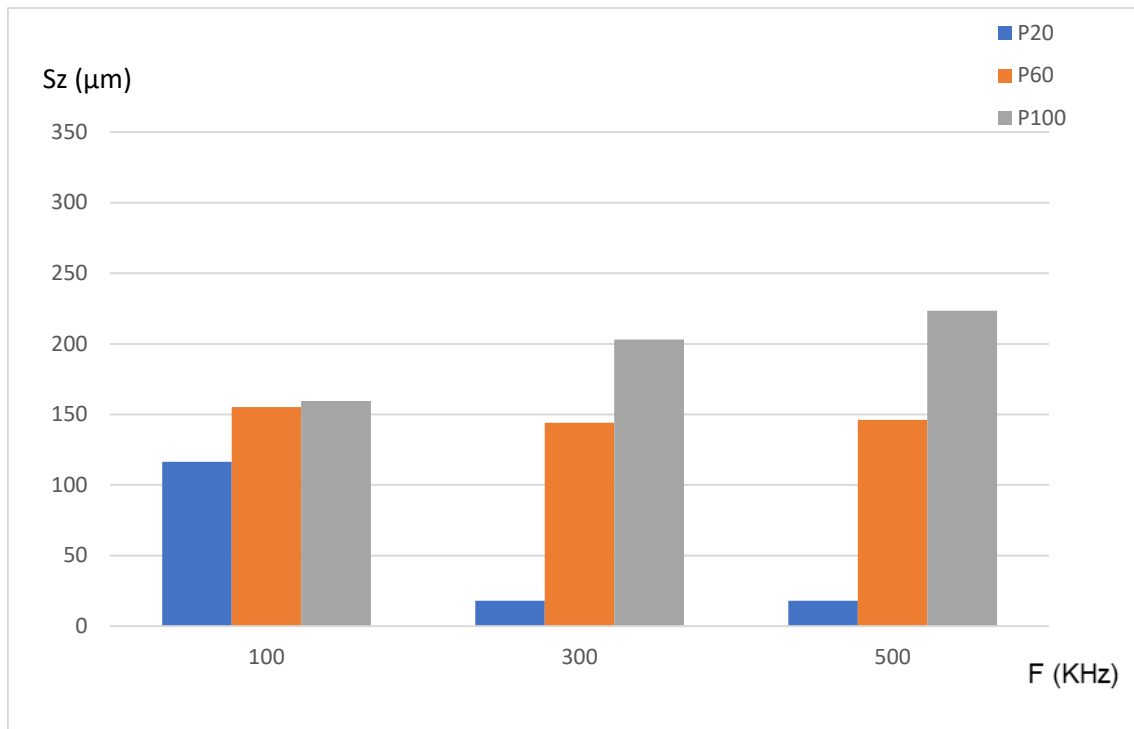


Figura 99: Valores de altura máxima de la superficie tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 100 mm/s.

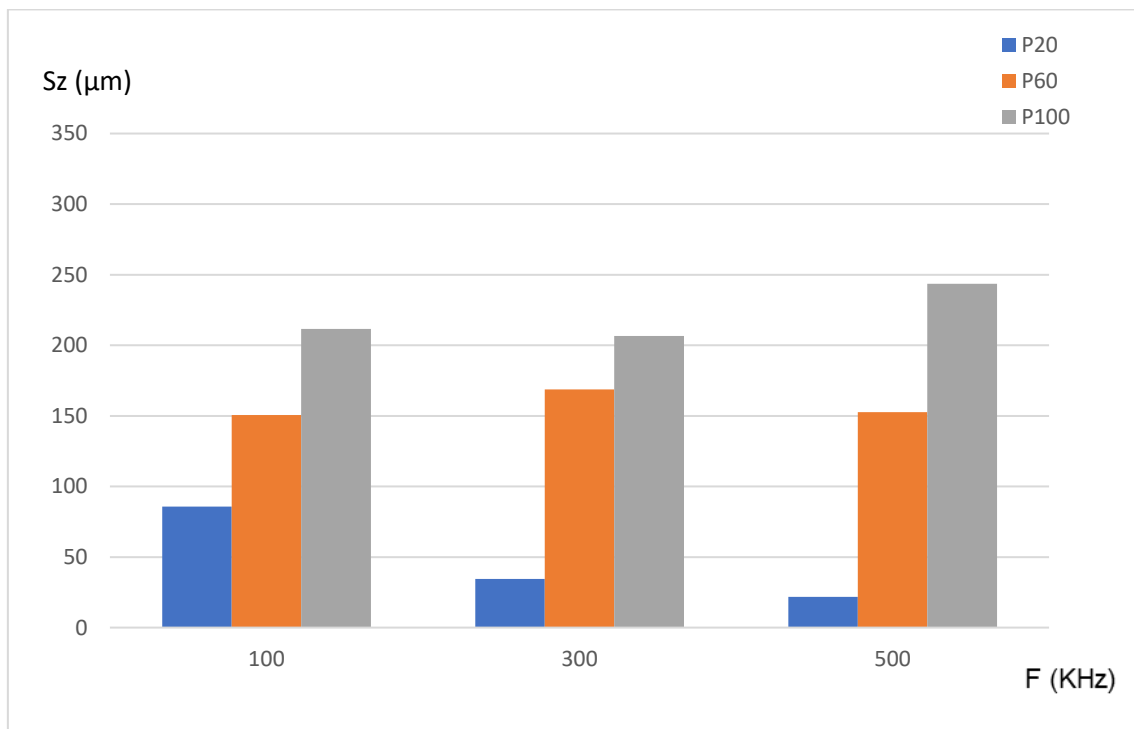


Figura 100: Valores de altura máxima de la superficie tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 100 mm/s.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

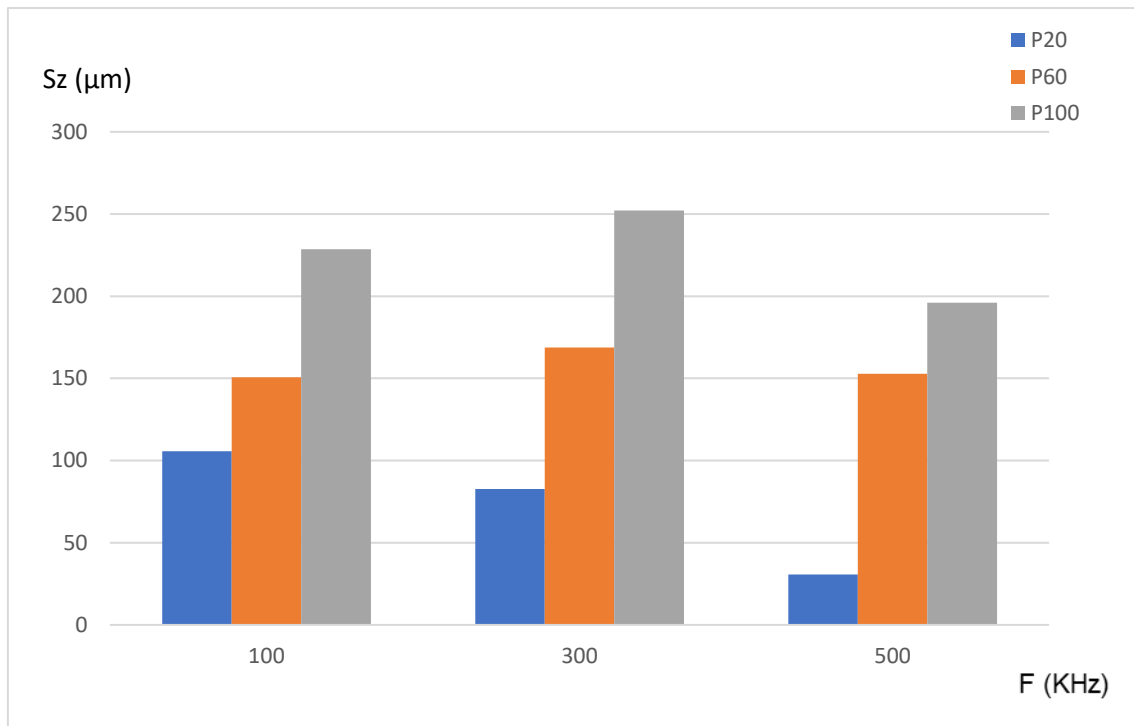


Figura 101: Valores de altura máxima de la superficie tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 500 mm/s.

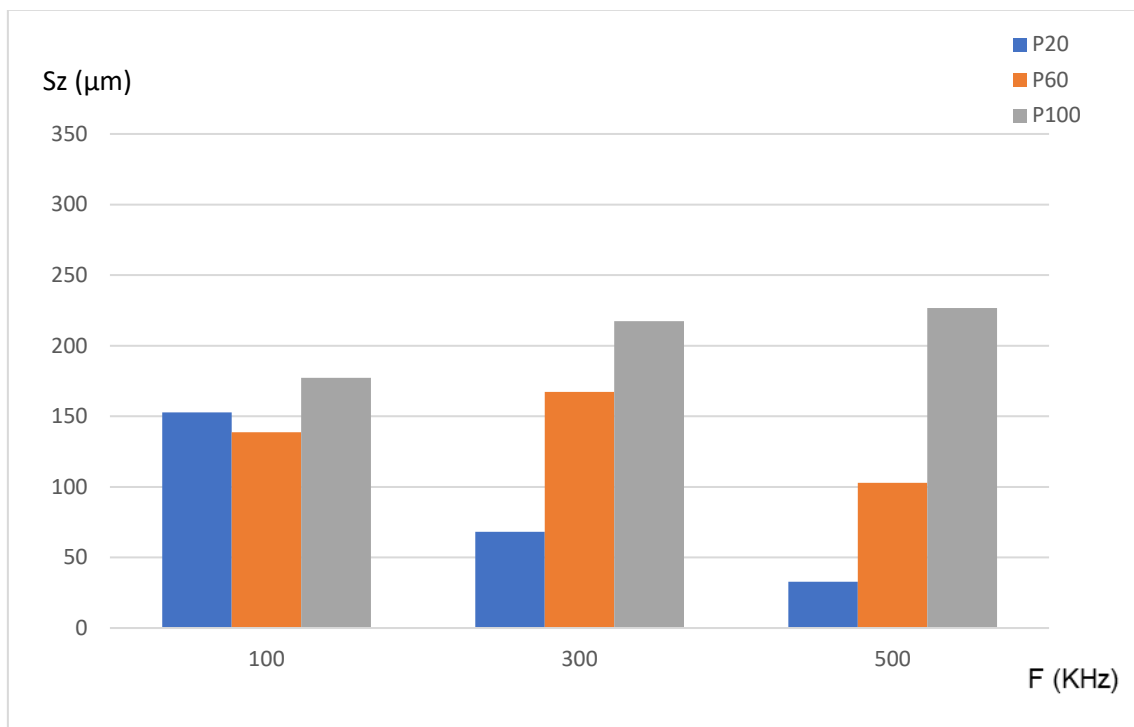


Figura 102: Valores de altura máxima de la superficie tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 500 mm/s.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

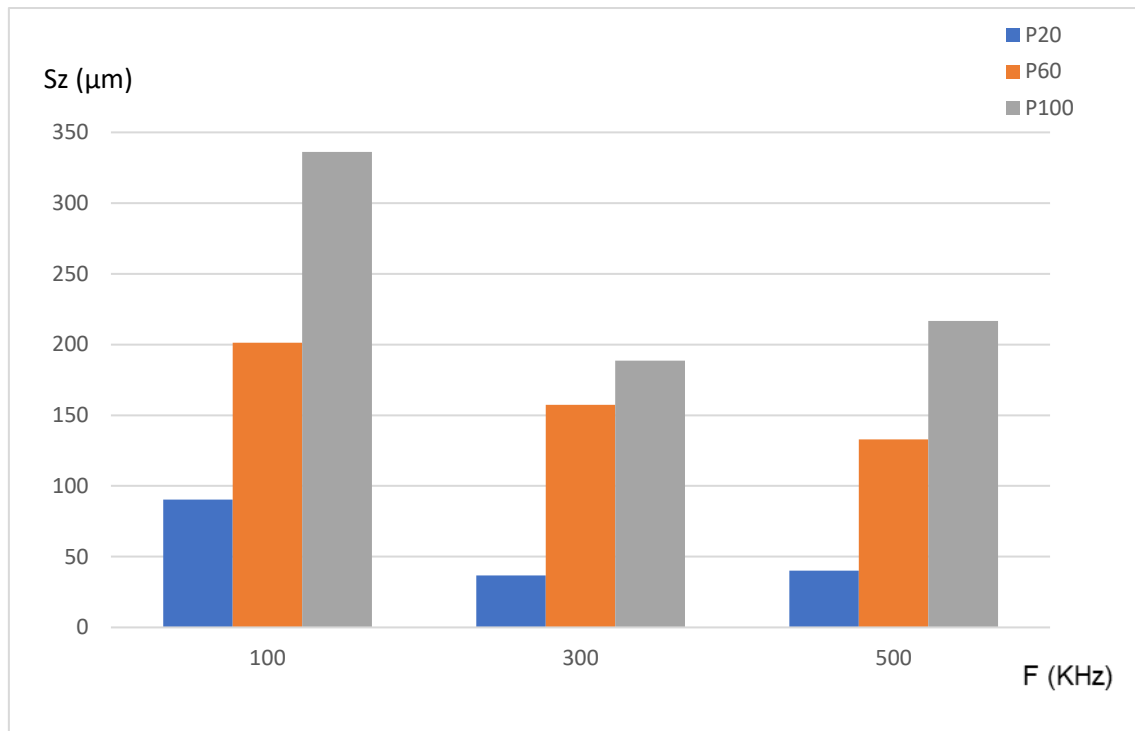


Figura 103: Valores de altura máxima de la superficie tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados concéntricos y velocidad 900 mm/s.

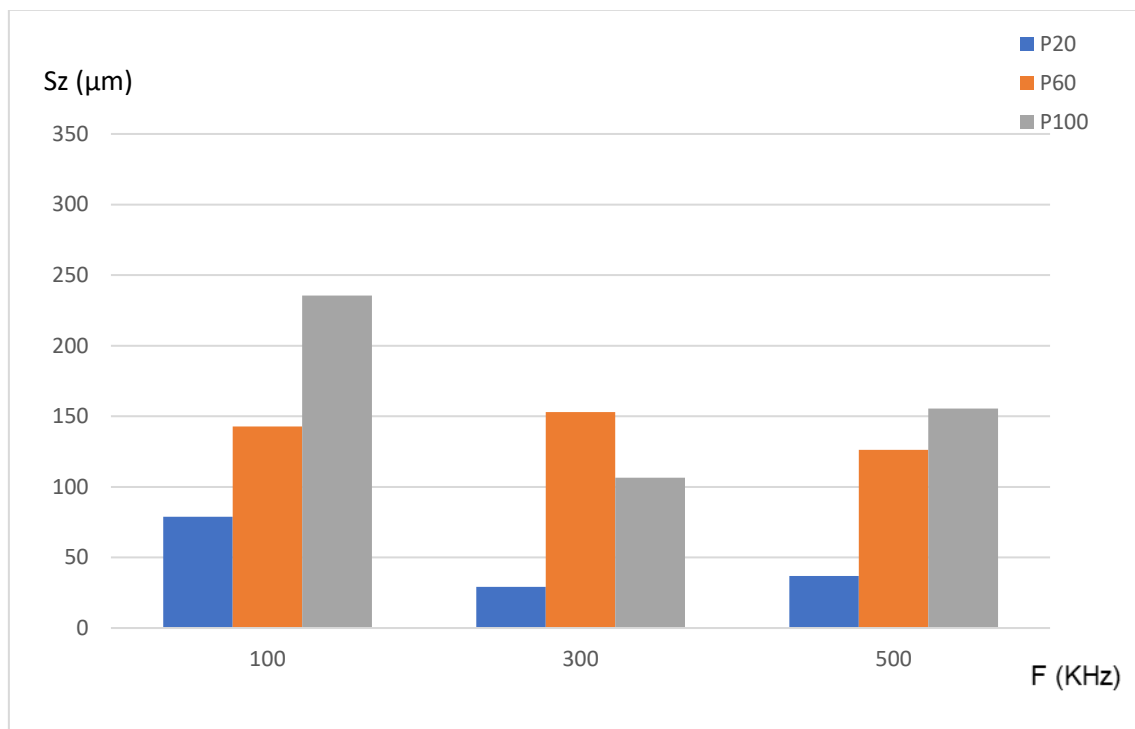


Figura 104: Valores de altura máxima de la superficie tratada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 900 mm/s.

Haciendo uso de Minitab, se puede comprobar cual de todos los parámetros que varían a la hora de hacer el ensayo influyen más en el valor de Sz. En la *figura 105* se puede ver el diagrama de Pareto que representa la influencia de todos los parámetros que intervienen en el proceso sobre la altura total del perfil.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

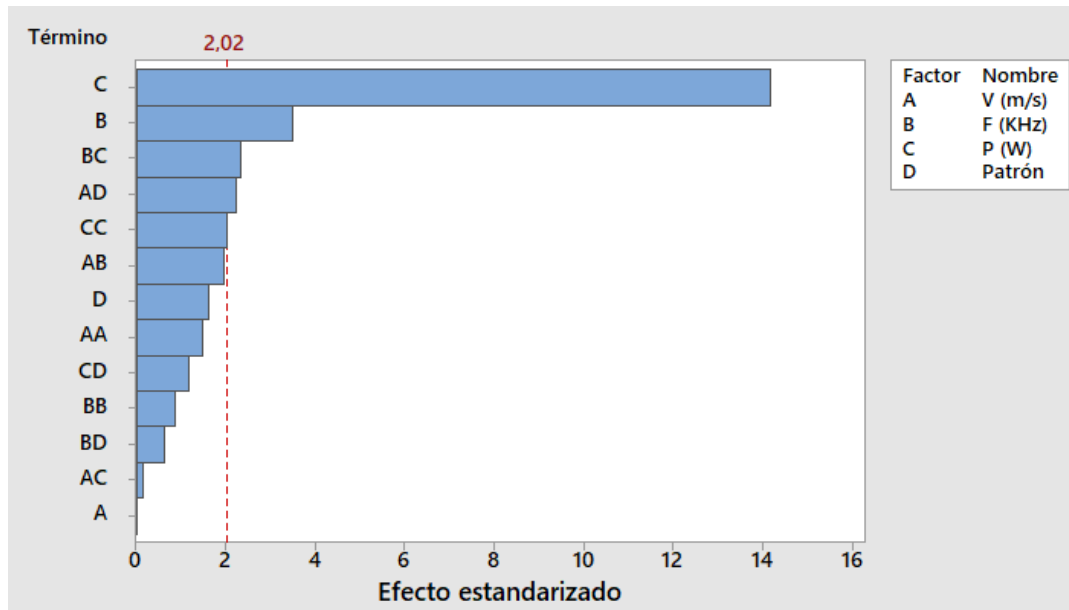


Figura 105: Diagrama de Pareto que representa la influencia de la velocidad, frecuencia, potencia y patrón en el valor de Sz.

También se obtienen dos ecuaciones que aproximan el valor de Sz en función de todas las variables que intervienen en el proceso de texturizado con un ajuste (R^2) del 85.67%.

- Ecuación para patrón de cuadrados concéntricos (*Ecuación 23*):

$$\begin{aligned}
 Sz(\mu m) = & 23.5 + 0.1667 * V\left(\frac{mm}{s}\right) - 0.266 * F(KHz) + 2.902 * P(W) \\
 & - 0.000085 * V\left(\frac{mm}{s}\right) * V\left(\frac{mm}{s}\right) + 0.000202 * F(KHz) \\
 & * F(KHz) - 0.0 * P(W) * P(W) - 0.000158 * V\left(\frac{mm}{s}\right) \\
 & * F(KHz) - 0.000069 * V\left(\frac{mm}{s}\right) * P(W) + 0.001888 \\
 & * F(KHz) * P(W)
 \end{aligned} \tag{23}$$

- Ecuación para patrón de líneas paralelas (*Ecuación 24*):

$$\begin{aligned}
 Sz(\mu m) = & 47.8 + 0.10732V\left(\frac{mm}{s}\right) - 0.266 * F(KHz) + 2.588 \\
 & * P(W) - 0.000085 * V\left(\frac{mm}{s}\right) * V\left(\frac{mm}{s}\right) + 0.000202 \\
 & * F(KHz) * F(KHz) - 0.0 * P(W) * P(W) - 0.000158 \\
 & * V\left(\frac{mm}{s}\right) * F(KHz) - 0.000069 * V\left(\frac{mm}{s}\right) * P(W) \\
 & + 0.001888 * F(KHz) * P(W)
 \end{aligned} \tag{24}$$

El parámetro que más afecta al valor de Sz es la potencia, de forma que cuando aumenta, también lo hace la altura máxima de la superficie. También afecta al valor de Sz de forma significativa la frecuencia, pero en este caso, dependiendo de la velocidad se mantiene constante o incluso aumenta a medida que lo hace la frecuencia.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

4.2.6. Índice de superficie desarrollada (Sdr).

Para cada una de las combinaciones de patrón, velocidad, potencia y frecuencia se ha obtenido el índice de superficie desarrollada, es decir, el aumento del área efectiva debido a la rugosidad.

Se han representado todos los valores obtenidos en gráficas, en función de la frecuencia y potencia, para cada patrón y valor de velocidad, lo que se puede ver en las *figuras 106-111*.

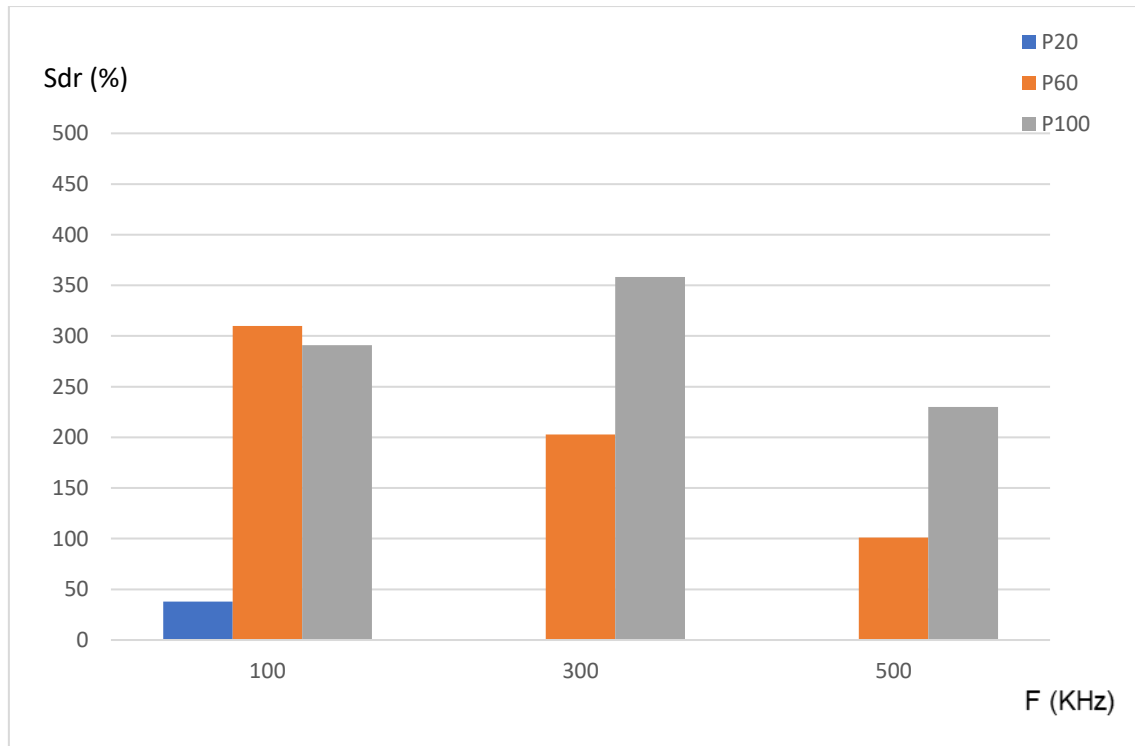


Figura 106: Valores del índice de superficie desarrollada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados con céntricos y velocidad 100 mm/s.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

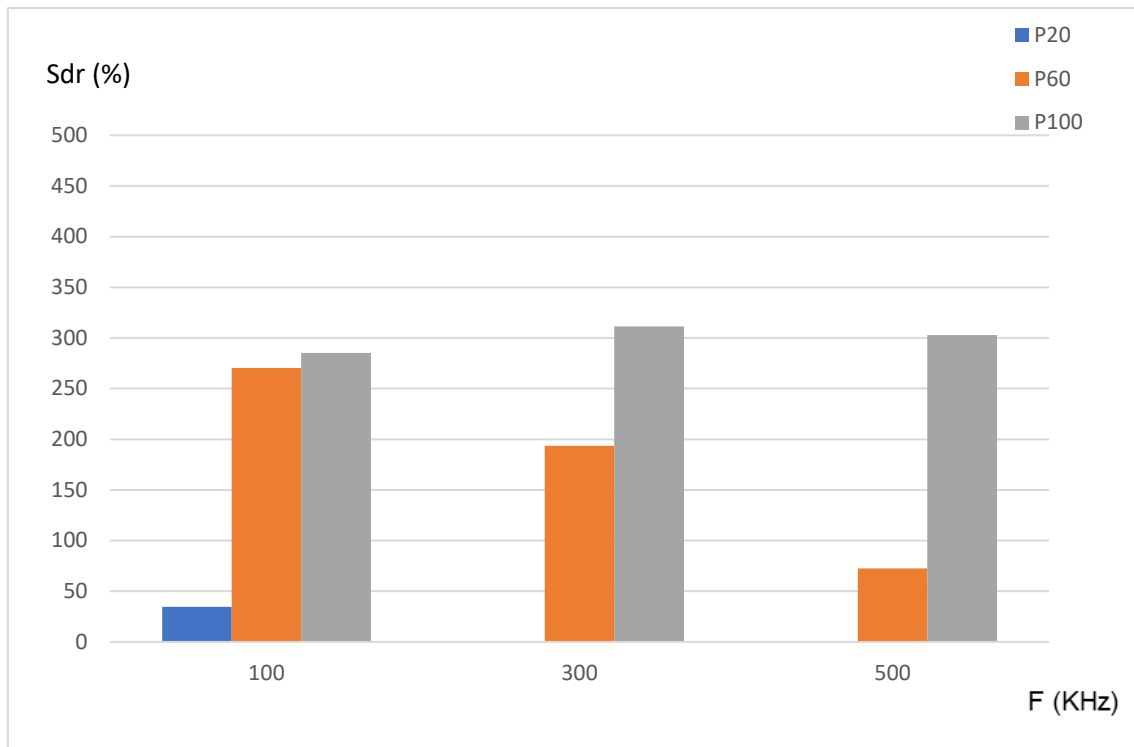


Figura 107: Valores del índice de superficie desarrollada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 100 mm/s.

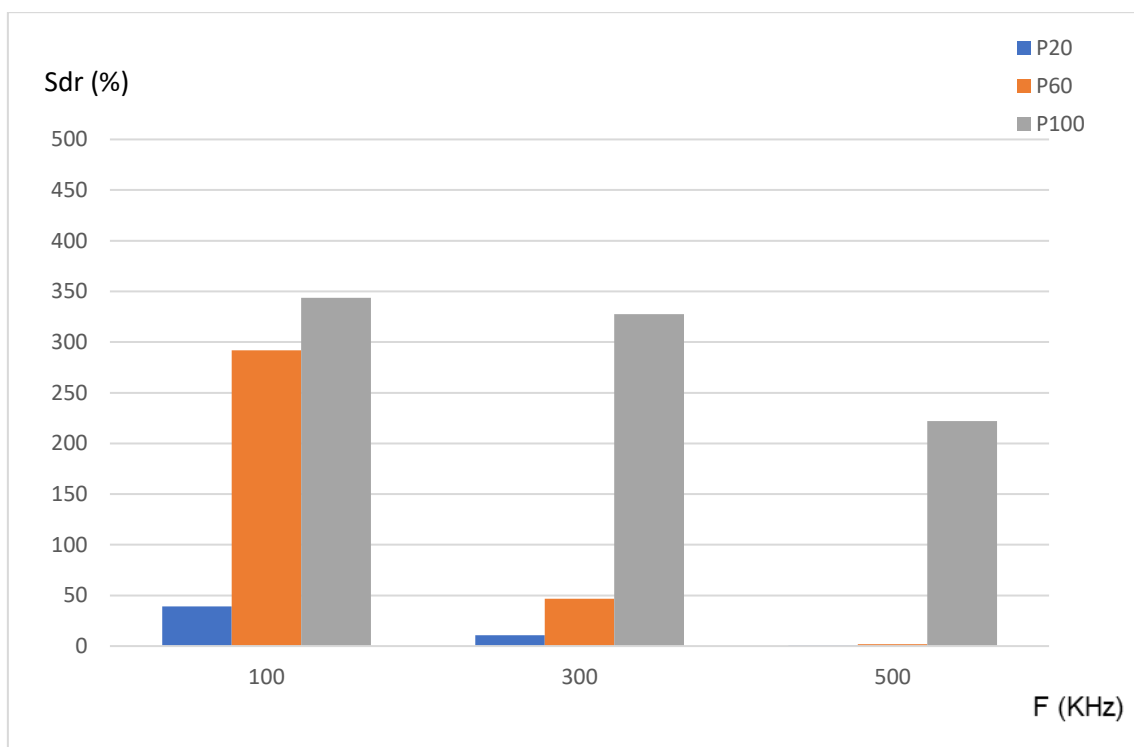


Figura 108: Valores del índice de superficie desarrollada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados con centros y velocidad 500 mm/s.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

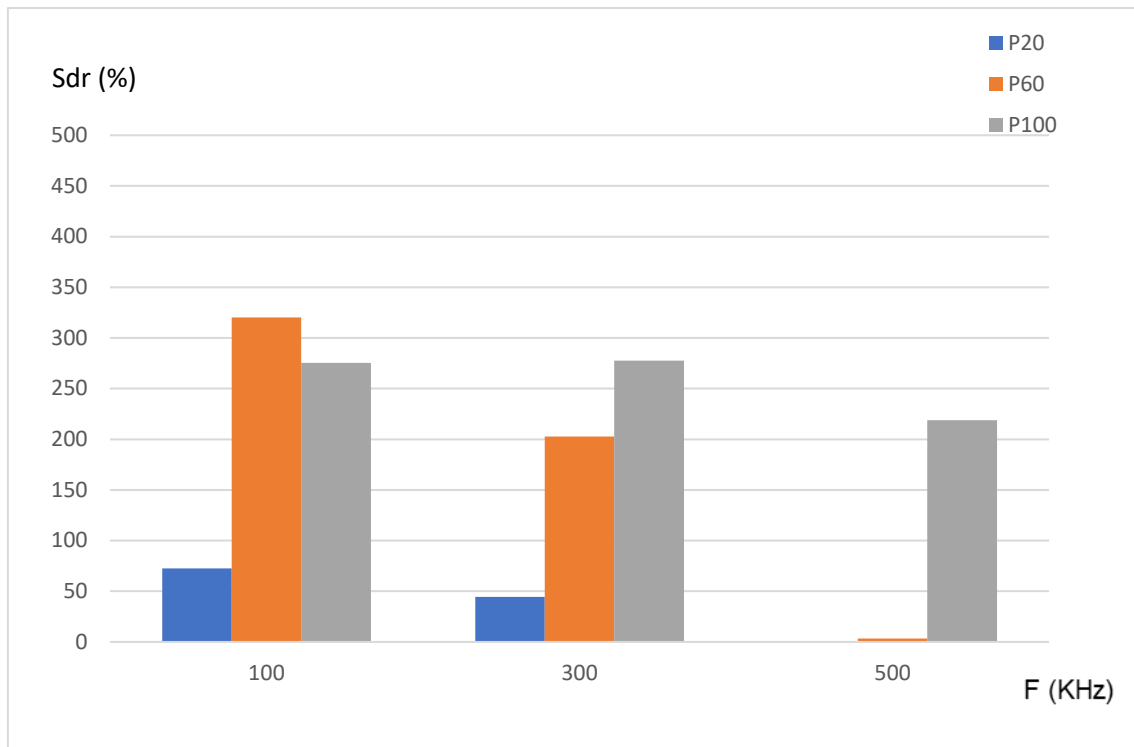


Figura 109: Valores del índice de superficie desarrollada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 500 mm/s.

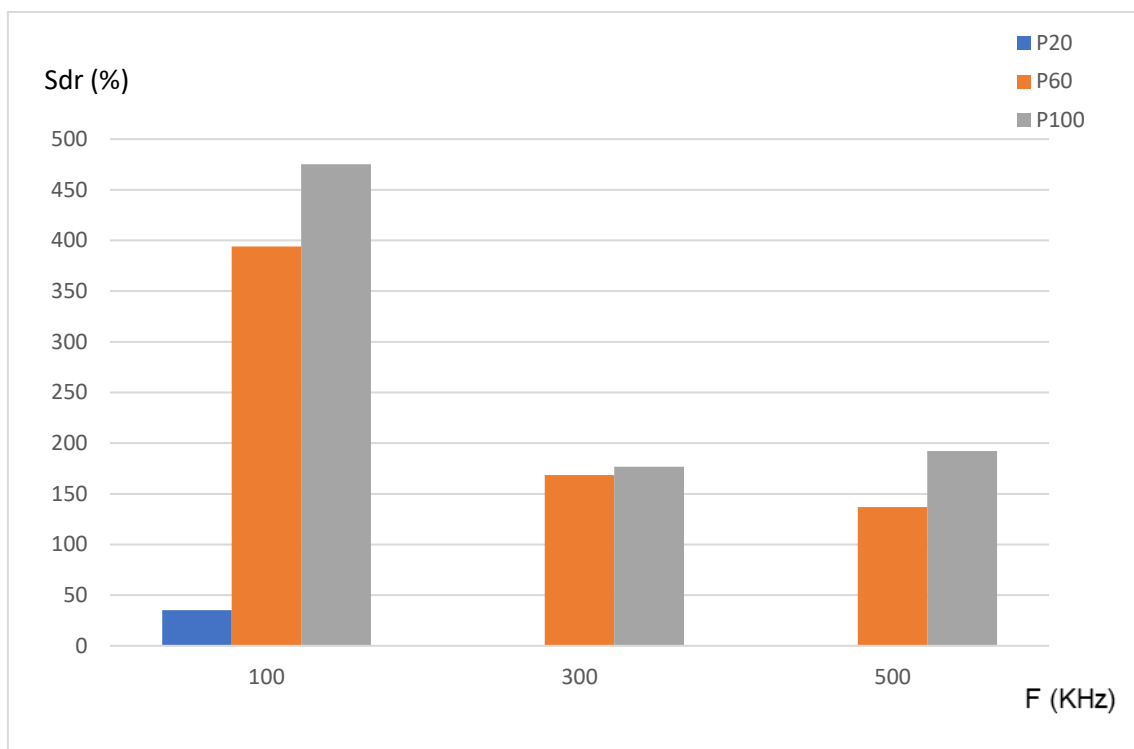


Figura 110: Valores del índice de superficie desarrollada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de cuadrados con centros y velocidad 900 mm/s.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

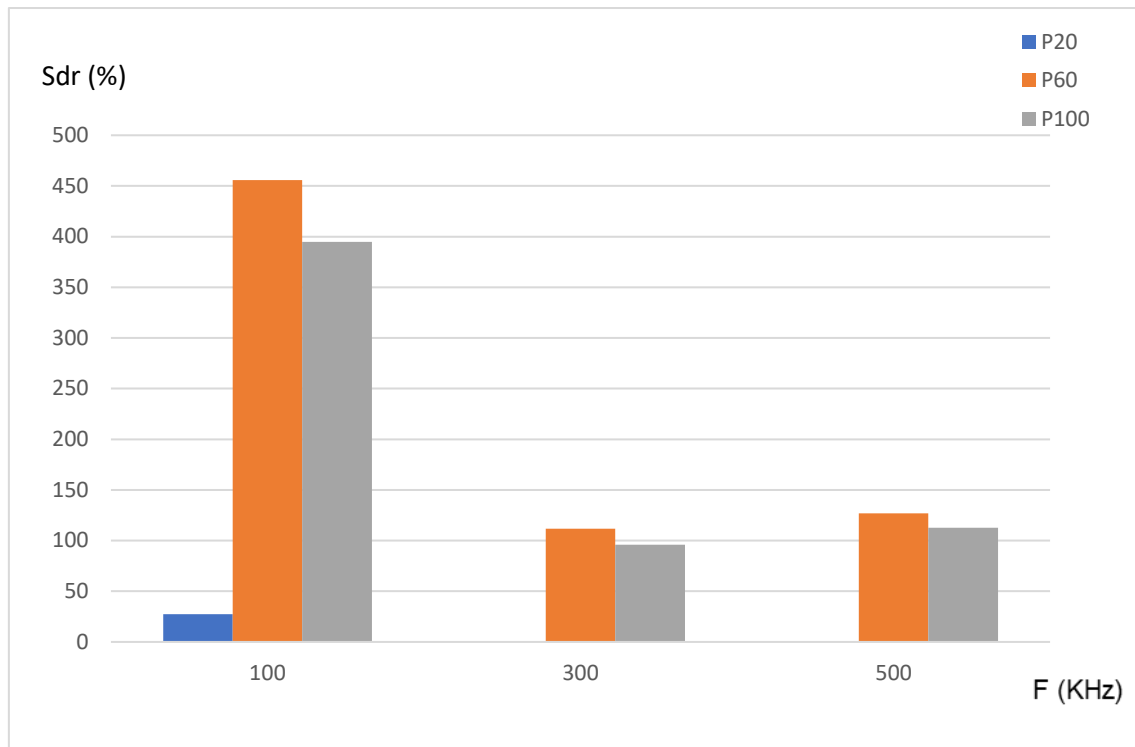


Figura 111: Valores del índice de superficie desarrollada en función de la potencia y la frecuencia para patrón de líneas paralelas y velocidad 900 mm/s.

En algunas de las gráficas no hay valores de Sdr para alguno de las combinaciones de potencia y frecuencia. Esto es debido a que el resultado es tan cercano a 0 que resulta insignificante comparado con el resto y ni si quiera se representa en la gráfica.

Haciendo uso de Minitab, se puede comprobar cual de todos los parámetros que varían a la hora de hacer el ensayo influyen más en el valor de Sdr. En la *figura 112* se puede ver el diagrama de Pareto que representa la influencia de todos los parámetros que intervienen en el proceso sobre la altura total del perfil.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

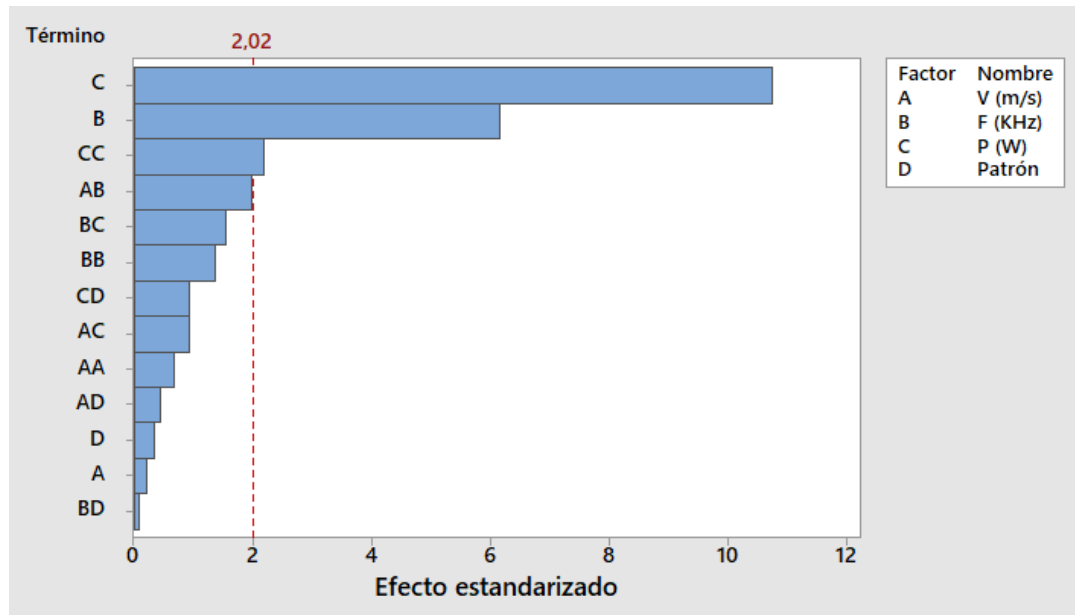


Figura 112: Diagrama de Pareto que representa la influencia de la velocidad, frecuencia, potencia y patrón en el valor de Sdr.

También se obtienen dos ecuaciones que aproximan el valor de Sa en función de todas las variables que intervienen en el proceso de texturizado con un ajuste (R^2) del 85.31%

- Ecuación para patrón de cuadrados concéntricos (*Ecuación 25*):

$$\begin{aligned}
 Sdr(\%) = & -81.4 + 0.076 * V\left(\frac{mm}{s}\right) - 0.443 * F(KHz) + 8.11 * P(W) \\
 & + 0.000089 * V\left(\frac{mm}{s}\right) * V\left(\frac{mm}{s}\right) + 0.000705 * F(KHz) \\
 & * F(KHz) - 0.0282 * P(W) * P(W) - 0.000360 * V\left(\frac{mm}{s}\right) \\
 & * F(KHz) - 0.000837 * V\left(\frac{mm}{s}\right) * P(W) + 0.00283 \\
 & * F(KHz) * P(W)
 \end{aligned} \quad (25)$$

- Ecuación para patrón de líneas paralelas (*Ecuación 26*):

$$\begin{aligned}
 Sdr(\%) = & -44.4 + 0.050 * V\left(\frac{mm}{s}\right) - 0.443 * F(KHz) + 7.56 * P(W) \\
 & + 0.000089 * V\left(\frac{mm}{s}\right) * V\left(\frac{mm}{s}\right) + 0.000705 * F(KHz) \\
 & * F(KHz) - 0.0282 * P(W) * P(W) - 0.000360 * V\left(\frac{mm}{s}\right) \\
 & * F(KHz) - 0.000837 * V\left(\frac{mm}{s}\right) * P(W) + 0.00283 \\
 & * F(KHz) * P(W)
 \end{aligned} \quad (26)$$

El índice de la superficie desarrollada depende principalmente de la potencia del láser, pero no presenta un comportamiento uniforme a medida que esta aumenta o disminuye. Si lo presenta con respecto a la frecuencia, pues cuando esta aumenta, Sdr disminuye.

4.2.7. Resumen Resultados Calidad Superficial.

Para resumir los resultados sobre calidad superficial y los parámetros de rugosidad superficial, en la *tabla 16* se encuentra un pequeño resumen de las variables que afectan más a cada uno de estos parámetros por orden, estando en primer lugar el que más afecta, luego el segundo y el tercero. Aquellos parámetros (frecuencia, potencia, patrón y velocidad) que no aparecen en la tabla no afectan significativamente al parámetro en cuestión.

Ra	Potencia	Frecuencia	Velocidad X Patrón
Rt	Potencia	Frecuencia	Velocidad X Patrón
Rz	Potencia	Frecuencia	Velocidad X Patrón
Sa	Potencia	Frecuencia	Velocidad X Frecuencia
Sz	Potencia	Frecuencia	Velocidad X Patrón
Sdr	Potencia	Frecuencia	Velocidad X Frecuencia

Tabla 14: Variables que influyen el valor de los parámetros de rugosidad superficial.

Se puede concluir que la potencia y la frecuencia son las variables que más afectan a todos estos parámetros y que la velocidad y, sobre todo, el patrón, influye en menor medida.

Si se comparan estas observaciones con lo obtenido en el artículo de Bañón et al. [37], se observa cómo, a medida que aumenta la potencia, también lo hacen los parámetros de rugosidad superficial en este estudio, al igual que en el presente Trabajo de Fin de Máster.

4.3. Resultados: Evaluación de la Mojabilidad.

Los resultados de la evaluación de la mojabilidad de las superficies tratadas han sido muy similares en su mayoría, pues la gota ni si quiera se formaba sobre gran parte de ellas, sino que se extendía.

Se han fotografiado y medido los ángulos entre superficie y gota en los casos recogidos en la *tabla 15*.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio






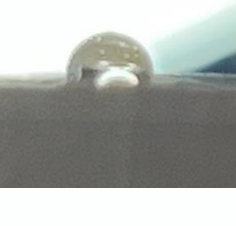

Velocidad (mm/s)	Potencia (W)	Frecuencia (KHz)	Imagen	Ángulo (°)
900	20	100		31.759
900	60	100		88.919
900	60	300		92.643
900	60	500		21.719
900	100	100		87.797
900	100	300		91.548
500	20	100		24.447

Tabla 15: Ángulo medido entre gota y superficie tratada.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

Para el resto de combinaciones de velocidad, frecuencia y potencia, la gota ni si quiera se ha formado, por lo que no ha sido posible medir el ángulo entre gota y superficie.

Con respecto a la mojabilidad de la superficie, como bien se ha explicado en el apartado de antecedentes, las superficies tratadas pueden ser *hidrófobas* o *hidrofilicas*. A continuación, se expone una lista detallada de todas aquellas combinaciones de potencia, frecuencia y velocidad que han hecho que la superficie tenga un carácter u otro, sin tener en cuenta el patrón, pues no afecta a la mojabilidad.

- **Carácter hidrófobo:** Las pruebas o combinaciones que muestran carácter hidrófobo, es decir, que repelen el líquido y forman una gota que tiene un ángulo con la superficie de contacto mayor a 90° , son solo dos: V900P60F300 (figura 133) y V900P100F300 (figura 134).

Aunque a primera vista puedan parecer superficies irregulares en las que la gota penetraría (teniendo así carácter hidrofílico), si atendemos a los resultados de la prueba de la gota (en la que ambas muestras tienen un ángulo con la superficie superior a 90°), claramente tienen carácter hidrófobo.

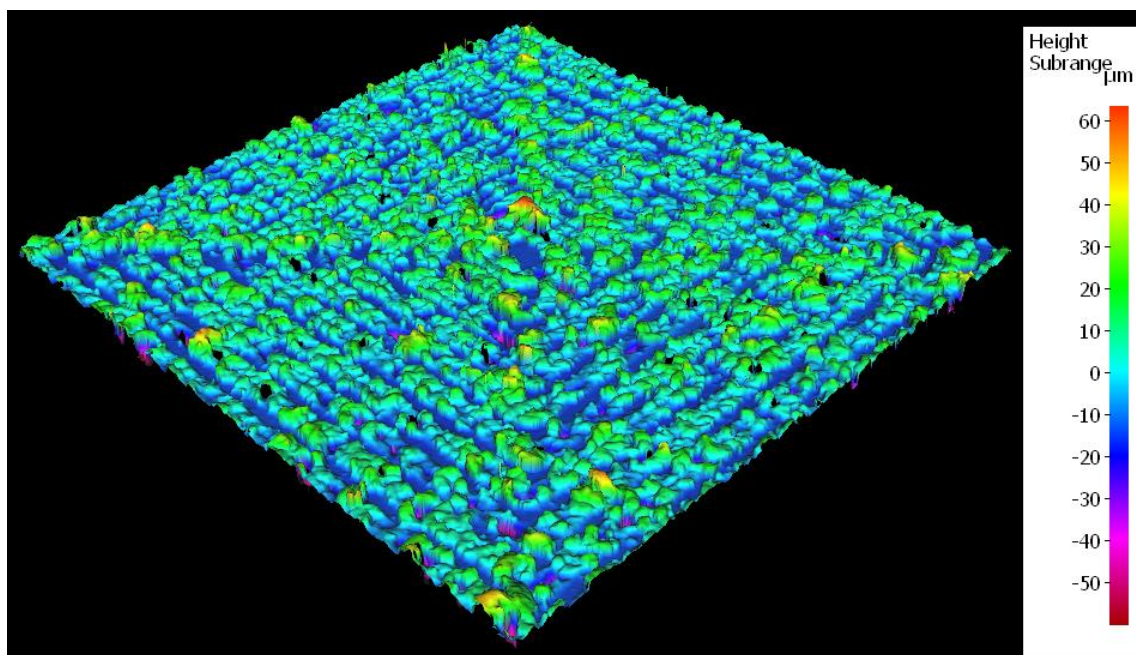


Figura 113: Superficie para velocidad 900 mm/s, potencia 60 W, frecuencia 300 KHz y patrón de cuadrados concéntricos.

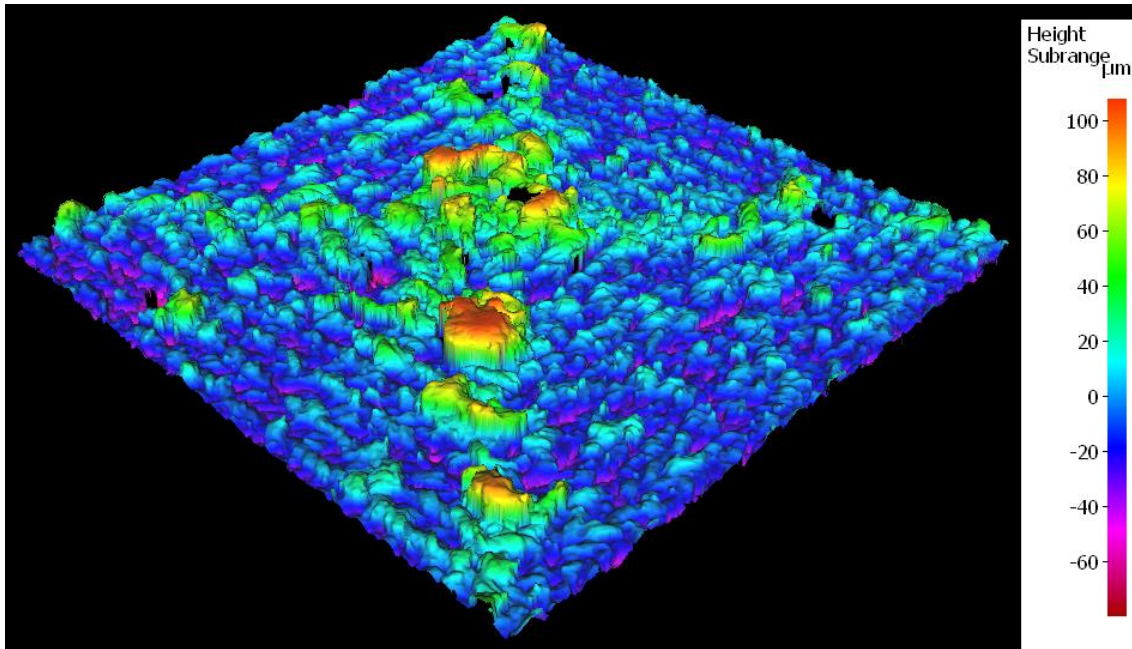


Figura 114: Superficie para velocidad 900 mm/s, potencia 60 W, frecuencia 300 KHz y patrón de cuadrados concéntricos.

- **Carácter hidrofílico:** A excepción de los dos casos nombrados anteriormente, el resto de las combinaciones de potencia, frecuencia y velocidad tienen como resultados superficies hidrofílicas, es decir, que dejan que el líquido se expanda y penetre por ellas.

Podemos concluir del estudio de la mojabilidad que, excepto en casos concretos, cualquier combinación de potencia, velocidad o frecuencia en el texturizado láser de aluminio 7075 tendrá como resultado una superficie hidrofílica, lo que puede ser de utilidad en intercambiadores de calor, sistemas de refrigeración o paneles de condensación.

4.4. Resultados: Ensayo Vickers.

En primer lugar, se han recopilado todos los datos obtenidos en este ensayo en una hoja Excel y se han evaluado la dureza Vickers y la profundidad de la entalla producida en la superficie del material.

4.4.1. Dureza Vickers.

Se han obtenido los valores de dureza Vickers para las diferentes combinaciones de velocidad, frecuencia y potencia, pero sin tener en cuenta el patrón, pues éste no afecta a la dureza. En las *figuras 113-121* se pueden ver las gráficas con los resultados.

Se han hecho en cada caso de 3 a 5 pruebas, en función de cómo de dispersos han sido los valores obtenidos. En aquellos casos en los que no aparece valor, simplemente no se ha realizado prueba porque la dureza Vickers estaba resultando uniforme.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

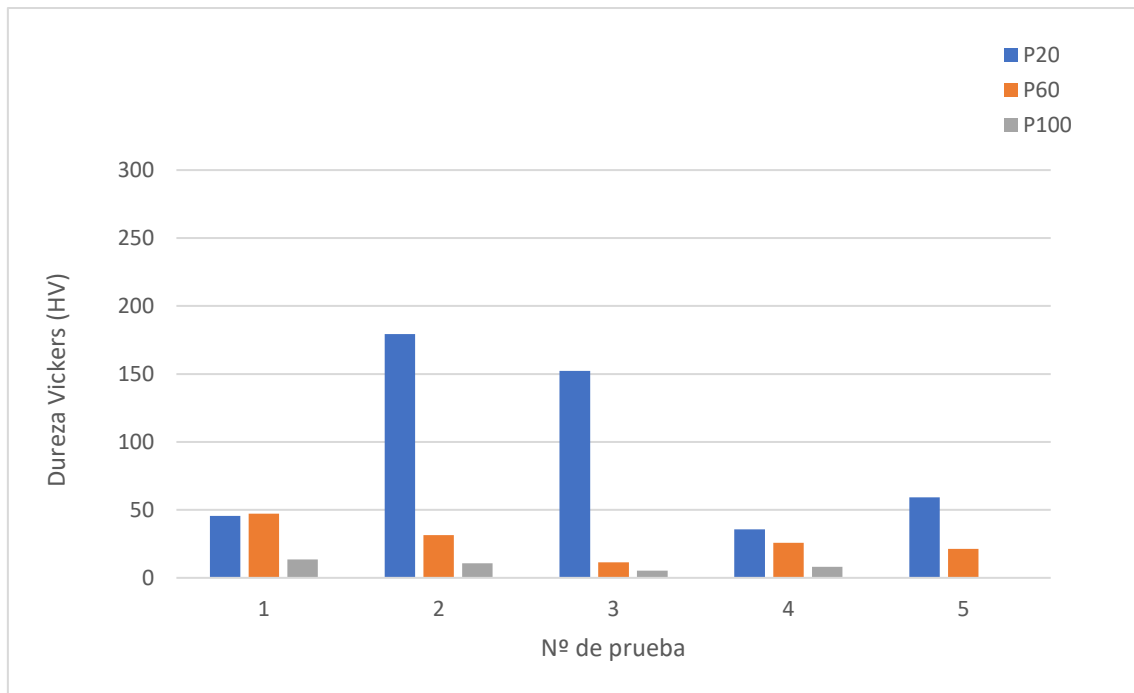


Figura 115: Gráfica dureza Vickers para velocidad 100 mm/s, frecuencia 100 KHz y cada caso de potencia.

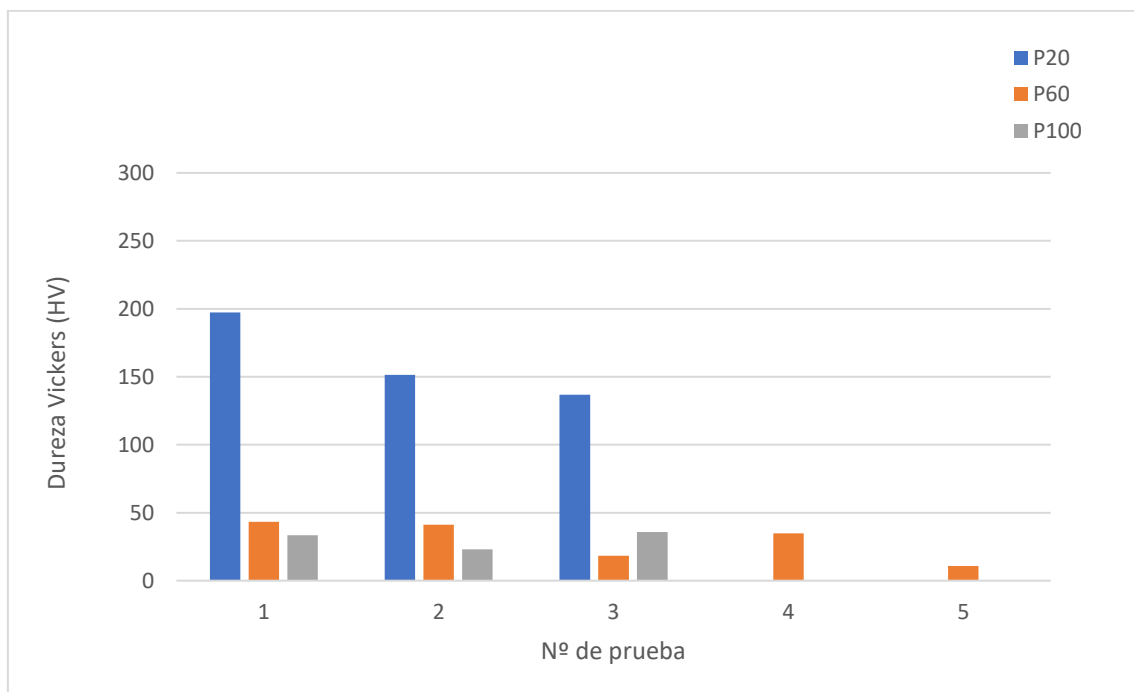


Figura 116: Gráfica dureza Vickers para velocidad 100 mm/s, frecuencia 300 KHz y cada caso de potencia.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

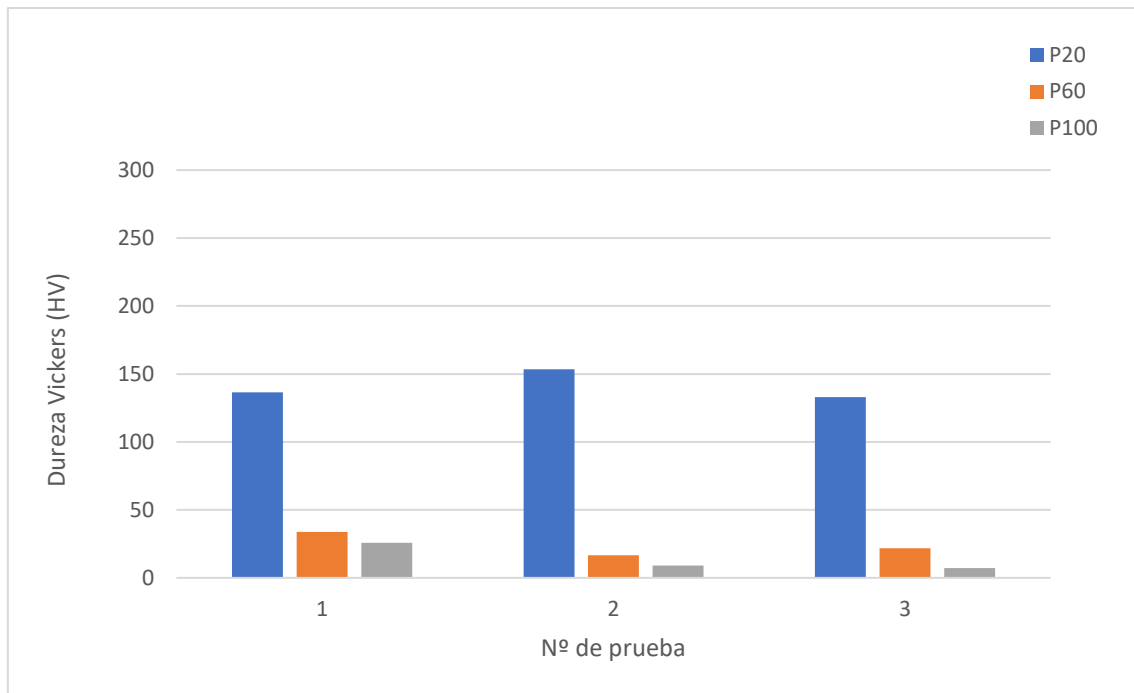


Figura 117: Gráfica dureza Vickers para velocidad 100 mm/s, frecuencia 500 KHz y cada caso de potencia.

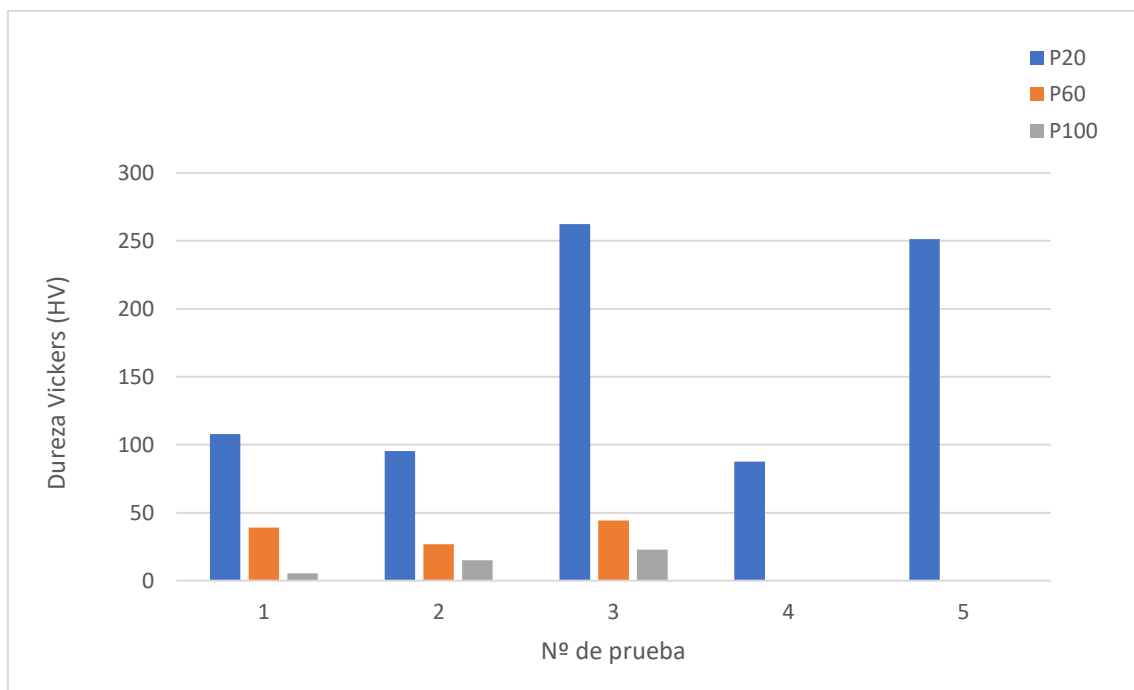


Figura 118: Gráfica dureza Vickers para velocidad 500 mm/s, frecuencia 100 KHz y cada caso de potencia.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

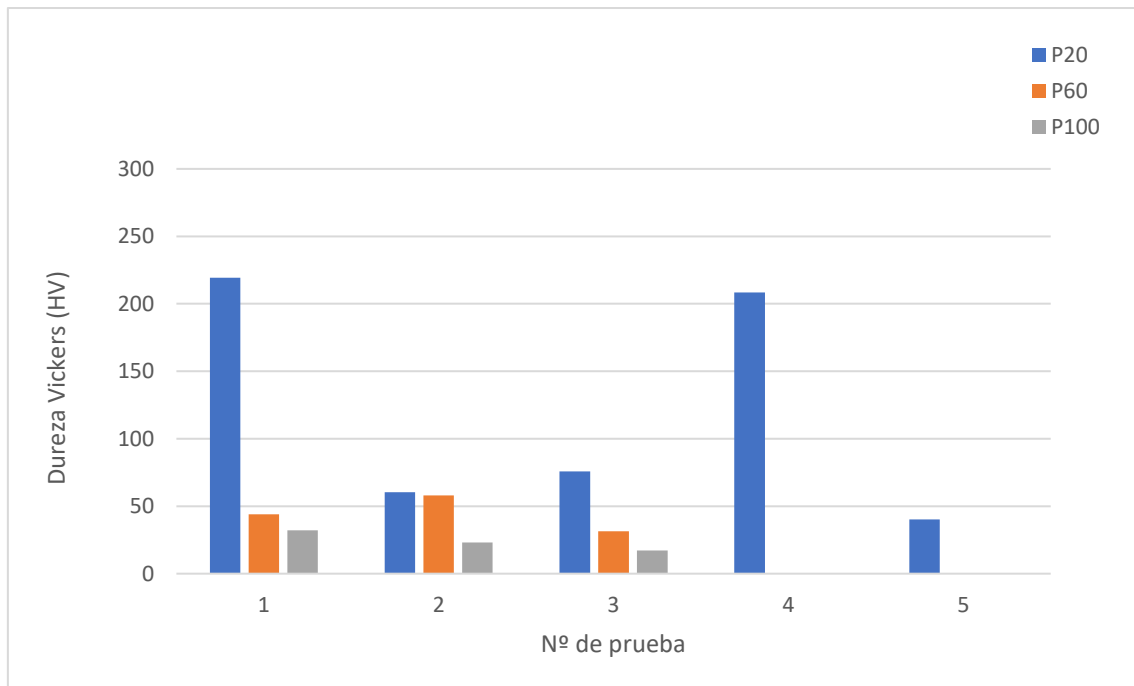


Figura 119: Gráfica dureza Vickers para velocidad 500 mm/s, frecuencia 300 KHz y cada caso de potencia.

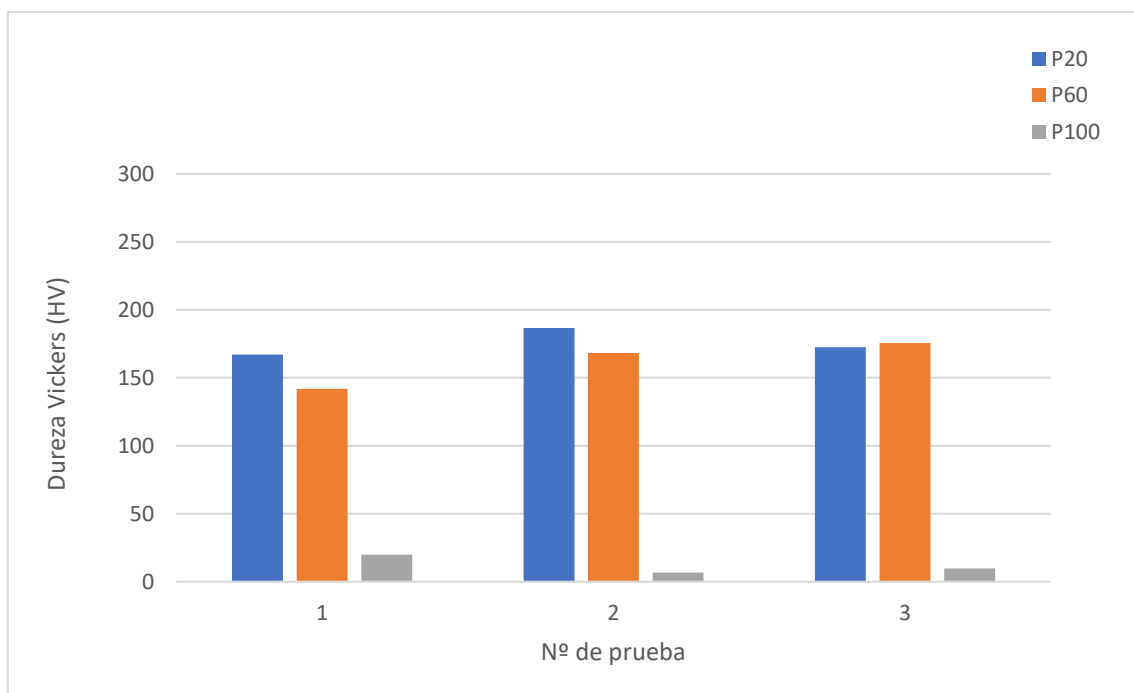


Figura 120: Gráfica dureza Vickers para velocidad 500 mm/s, frecuencia 500 KHz y cada caso de potencia.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

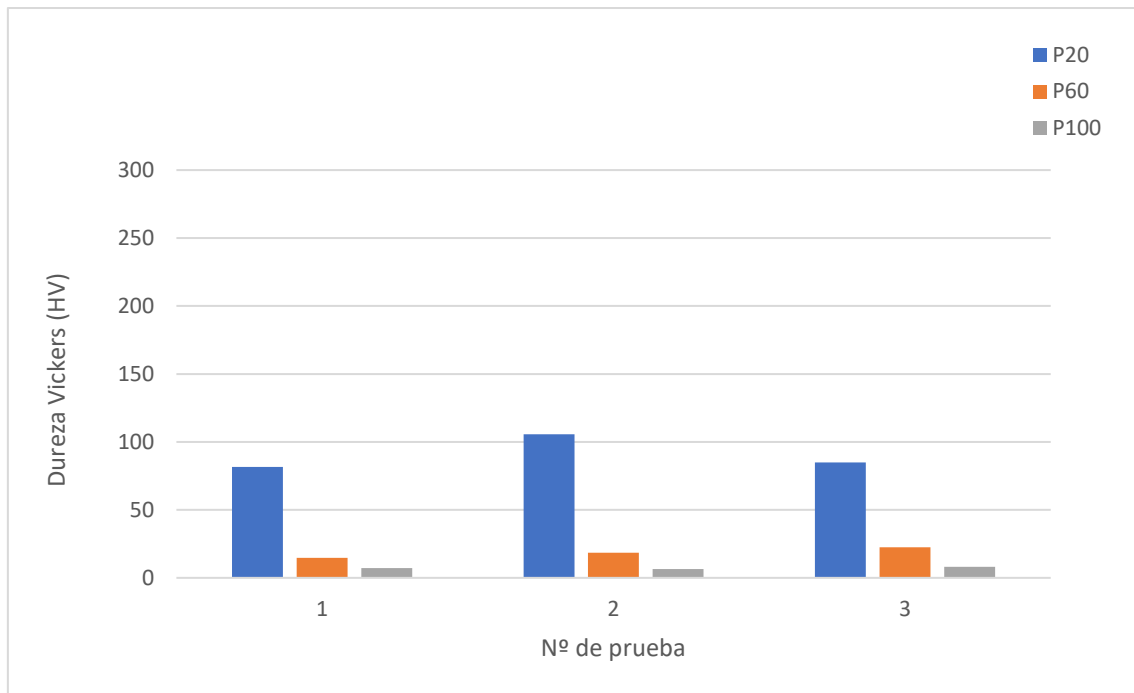


Figura 121: Gráfica dureza Vickers para velocidad 900 mm/s, frecuencia 100 KHz y cada caso de potencia.

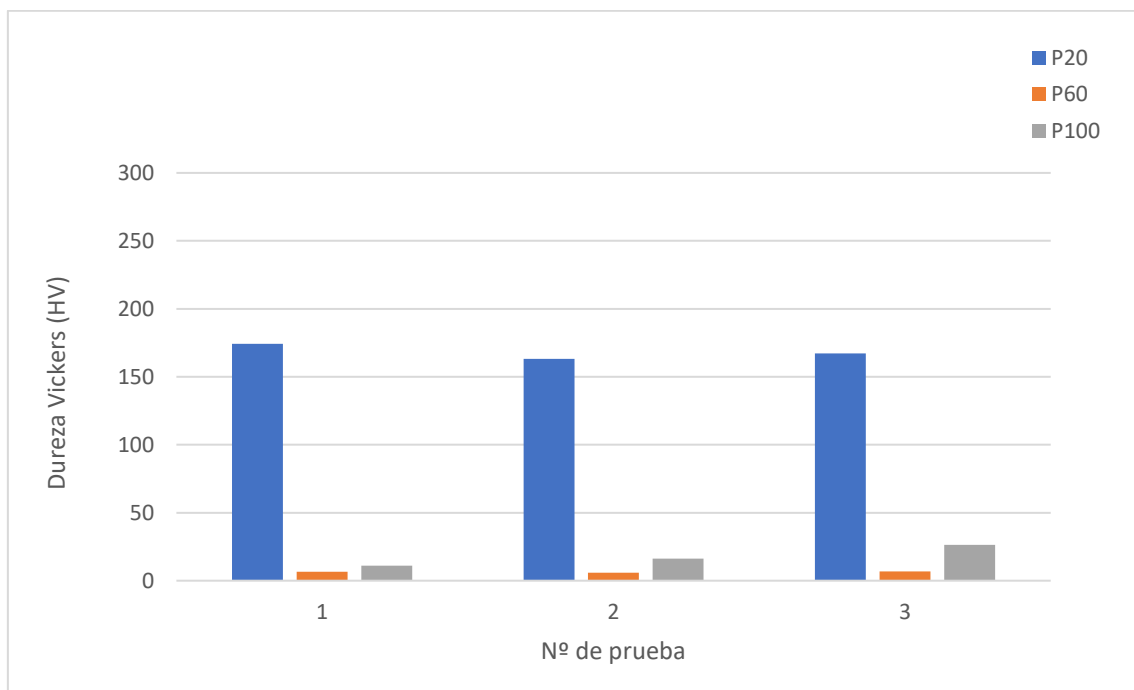


Figura 122: Gráfica dureza Vickers para velocidad 900 mm/s, frecuencia 300 KHz y cada caso de potencia.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

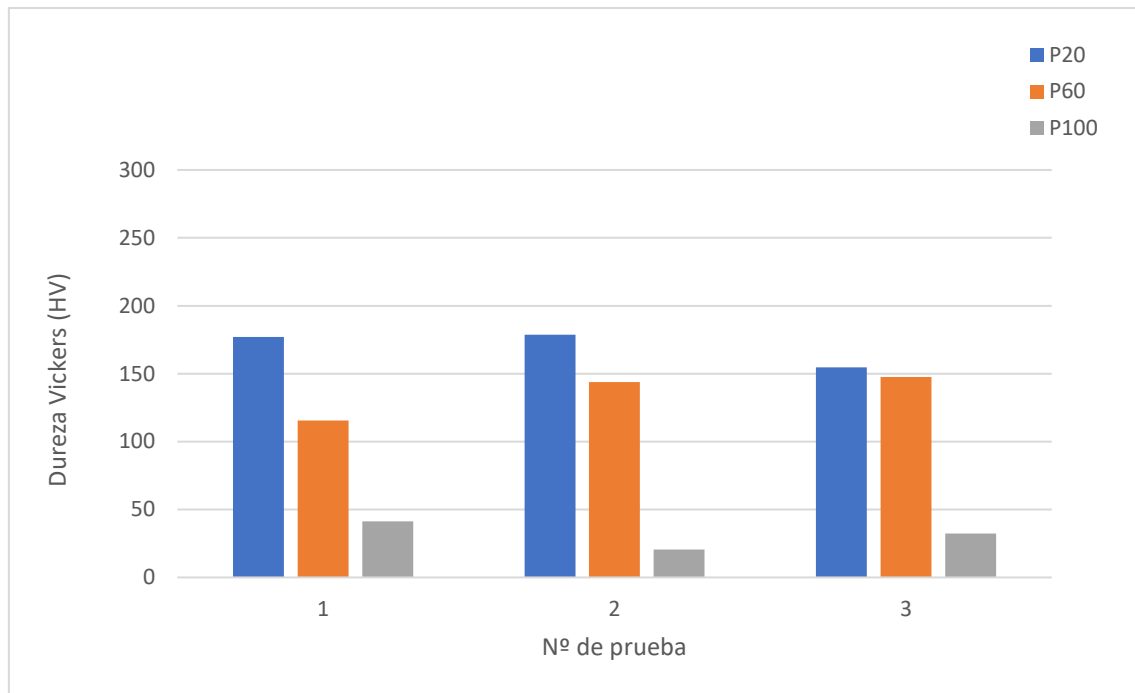


Figura 123: Gráfica dureza Vickers para velocidad 900 mm/s, frecuencia 500 KHz y cada caso de potencia.

Por otro lado, al igual que los resultados del estudio de la rugosidad superficial, se han tratado todos estos datos con el software *Minitab*, para así saber cuál de los parámetros del proceso es el que afecta más a la dureza Vickers resultante y obtener una ecuación para poder aproximar este valor.

En la *figura 122* aparece el diagrama de Pareto en el que se muestra cuanto afectan velocidad, frecuencia y potencia al valor de dureza Vickers (HV), con un ajuste (R^2) del 80.36%.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

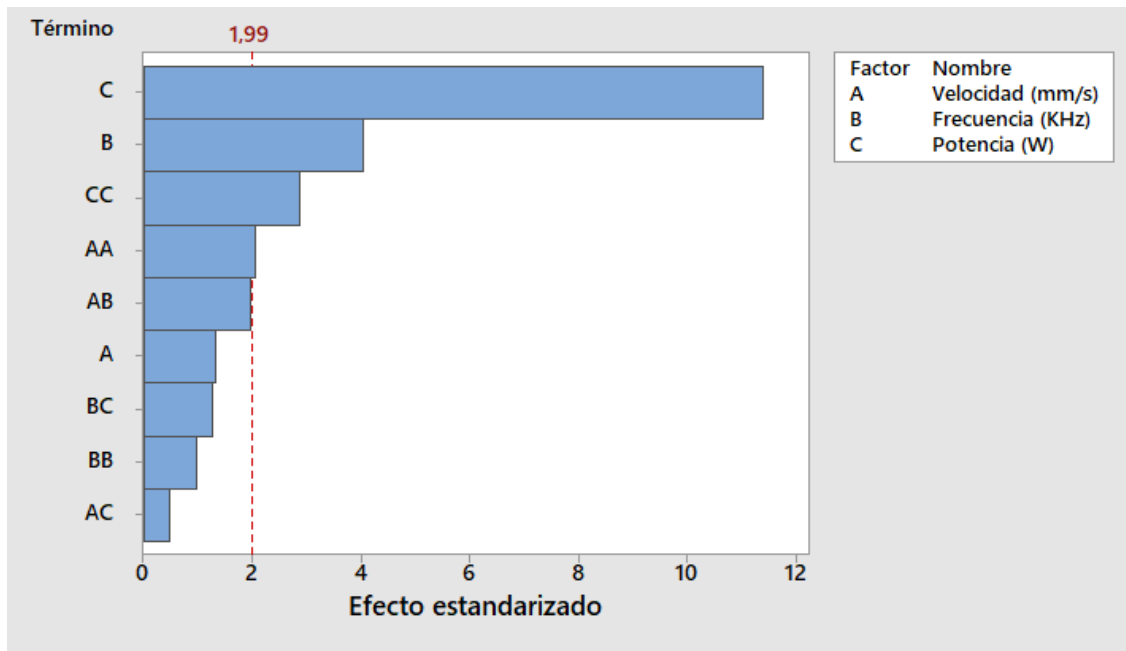


Figura 124: Diagrama de Pareto que representa la influencia de la velocidad, frecuencia y potencia en el valor de HV.

A continuación, se muestra la *ecuación 27* a partir de la cual se puede calcular de forma aproximada la dureza Vickers (HV) en función de la potencia, frecuencia y velocidad:

$$\begin{aligned}
 HV = & 160,5 + 0,1022 * \text{Velocidad (mm/s)} - 0,046 * \text{Frecuencia (KHz)} \\
 & - 3,129 * \text{Potencia (W)} \\
 & - 0,000121 * \text{Velocidad (mm/s)} * \text{Velocidad (mm/s)} \\
 & + 0,000231 * \text{Frecuencia (KHz)} * \text{Frecuencia (KHz)} \\
 & + 0,01669 * \text{Potencia (W)} * \text{Potencia (W)} \\
 & + 0,000164 * \text{Velocidad (mm/s)} * \text{Frecuencia (KHz)} \\
 & - 0,000207 * \text{Velocidad (mm/s)} * \text{Potencia (W)} \\
 & - 0,001063 * \text{Frecuencia (KHz)} * \text{Potencia (W)}
 \end{aligned} \tag{27}$$

4.4.2. Profundidad de la entalla.

A partir de las diagonales obtenidas en el ensayo Vickers, se puede calcular la profundidad de la entalla producida, tal y como se explica en el apartado de antecedentes del presente Trabajo de Fin de Máster.

Se obtiene entonces para cada ensayo un valor de profundidad de entalla (h) en micrómetros, que se puede ver en las gráficas representadas en las *figuras 123-131* De nuevo, en aquellos casos en los que no aparece valor, simplemente no se ha realizado prueba porque la dureza Vickers estaba resultando uniforme.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

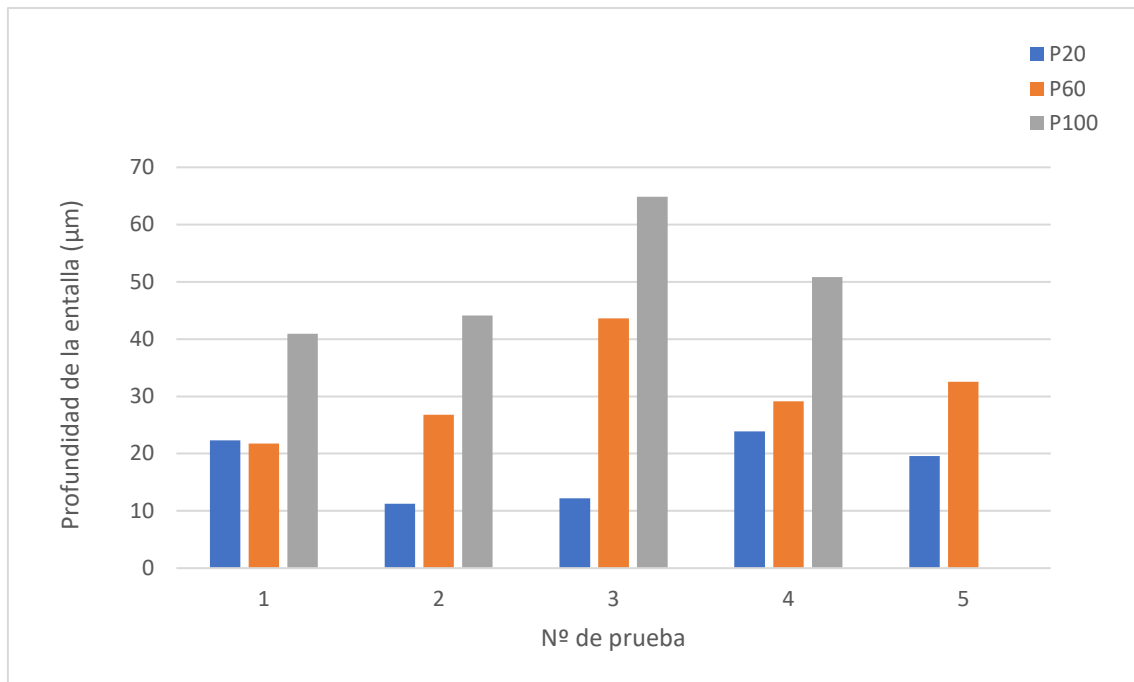


Figura 125: Gráfica profundidad de la entalla para velocidad 100 mm/ s, frecuencia 100 KHz y cada caso de potencia.

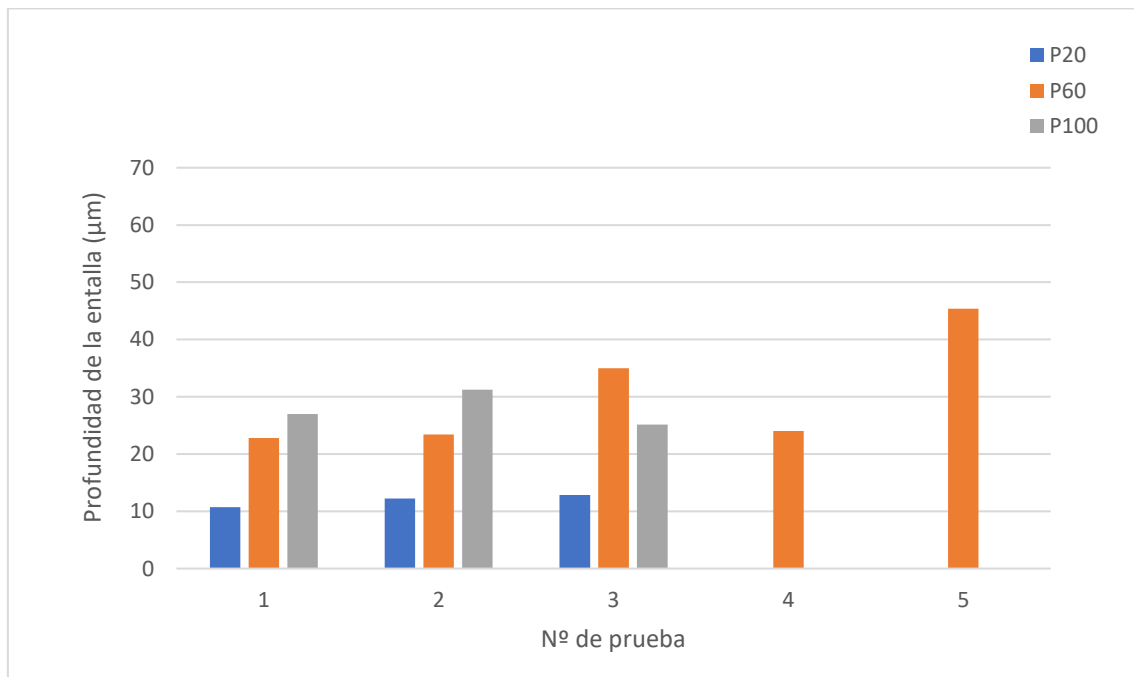


Figura 126: Gráfica profundidad de la entalla para velocidad 100 mm/ s, frecuencia 300 KHz y cada caso de potencia.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

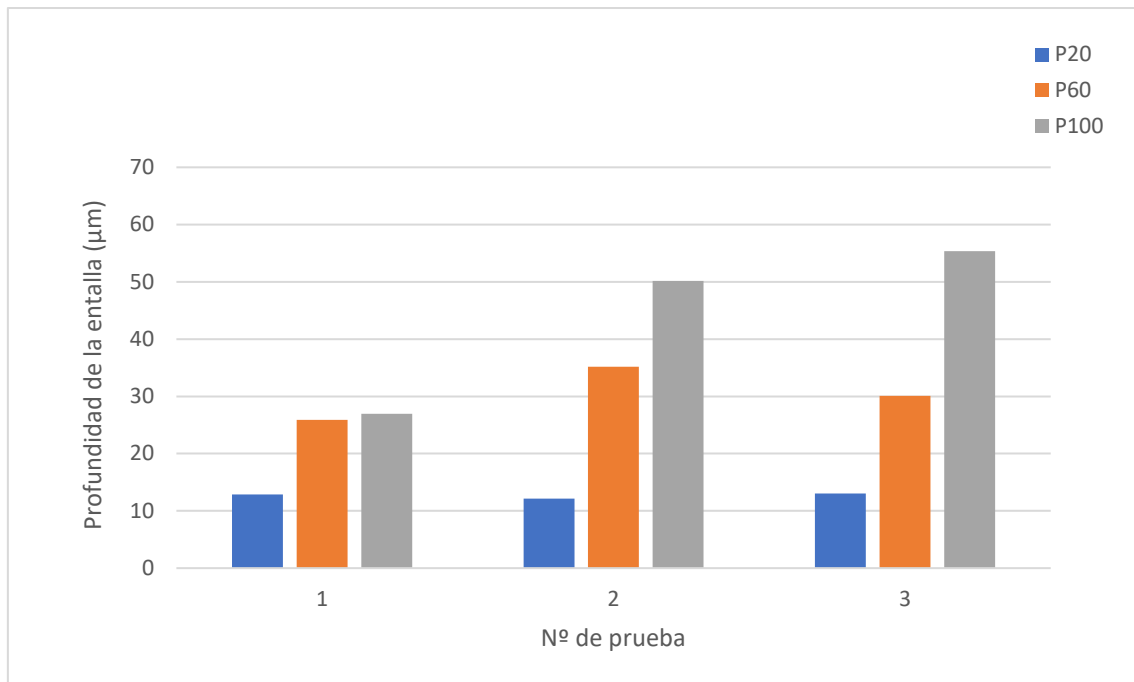


Figura 127: Gráfica profundidad de la entalla para velocidad 100 mm/ s, frecuencia 500 KHz y cada caso de potencia.

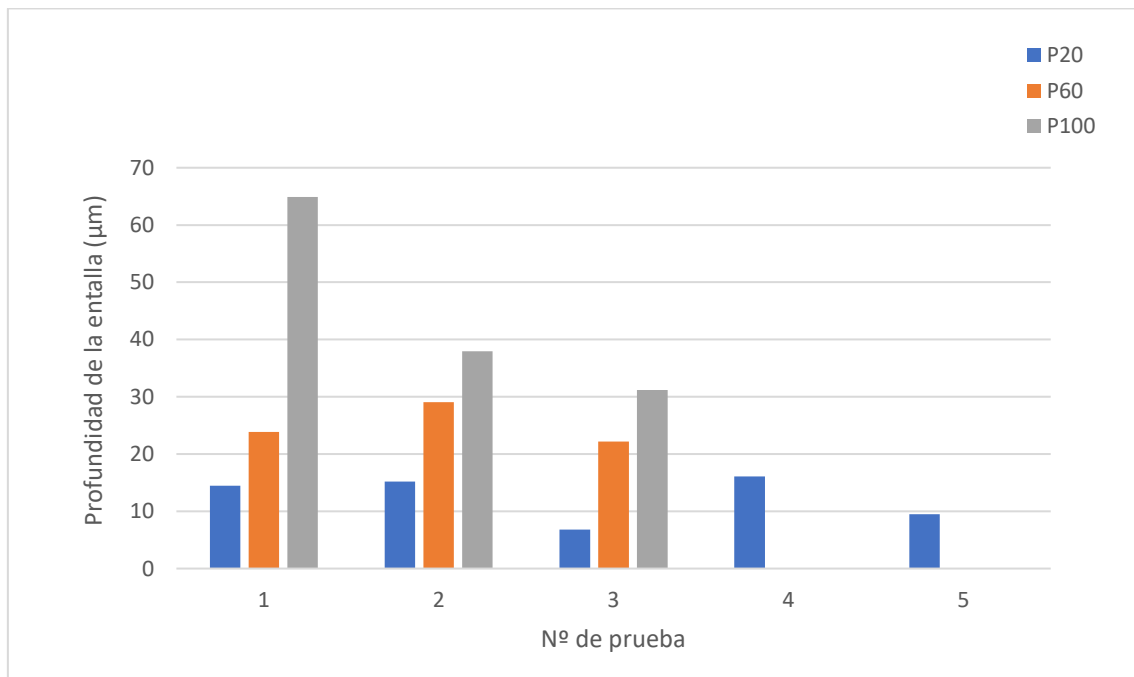


Figura 128: Gráfica profundidad de la entalla para velocidad 500 mm/ s, frecuencia 100 KHz y cada caso de potencia.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

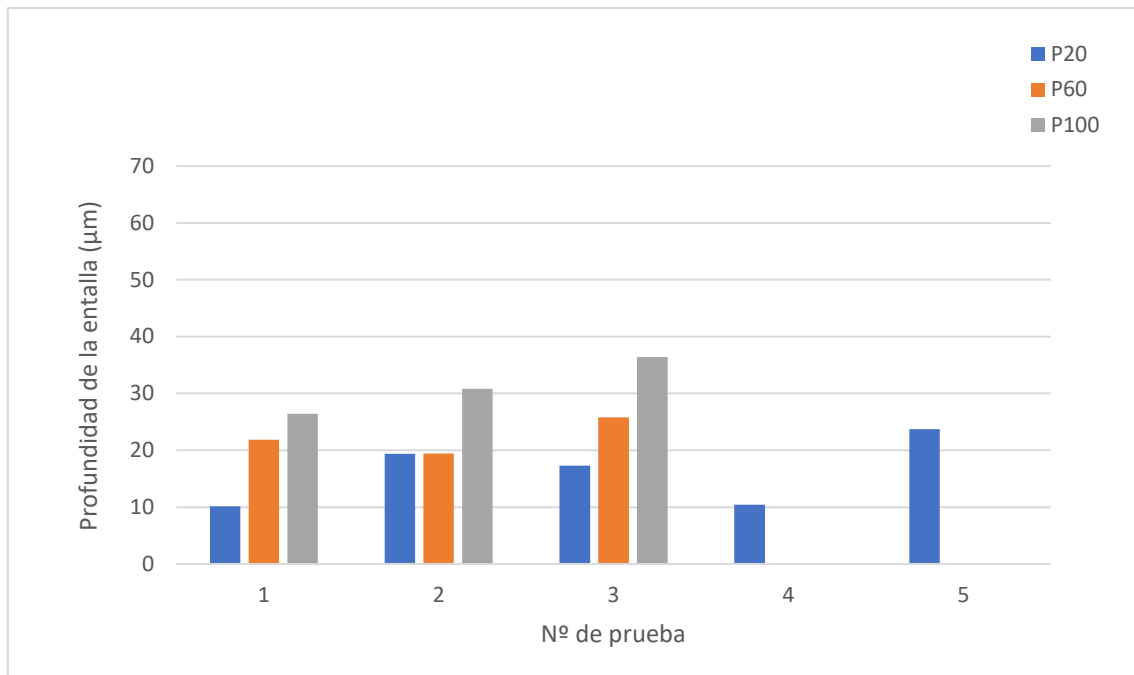


Figura 129: Gráfica profundidad de la entalla para velocidad 500 mm/ s, frecuencia 300 KHz y cada caso de potencia.

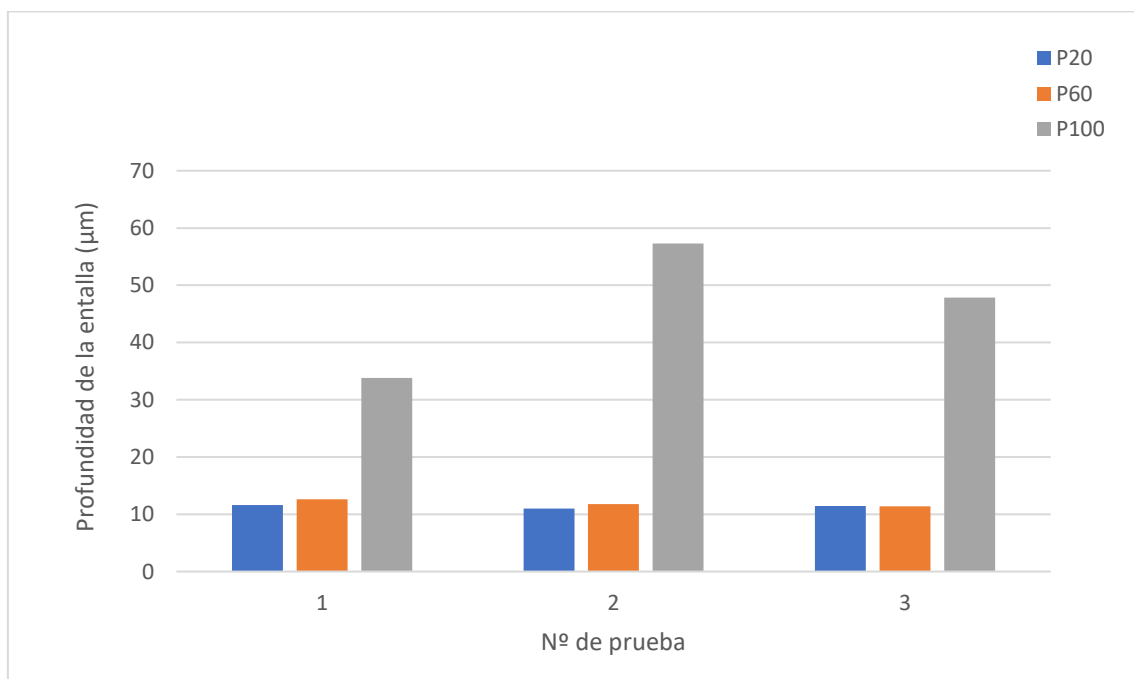


Figura 130: Gráfica profundidad de la entalla para velocidad 500 mm/ s, frecuencia 500 KHz y cada caso de potencia.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

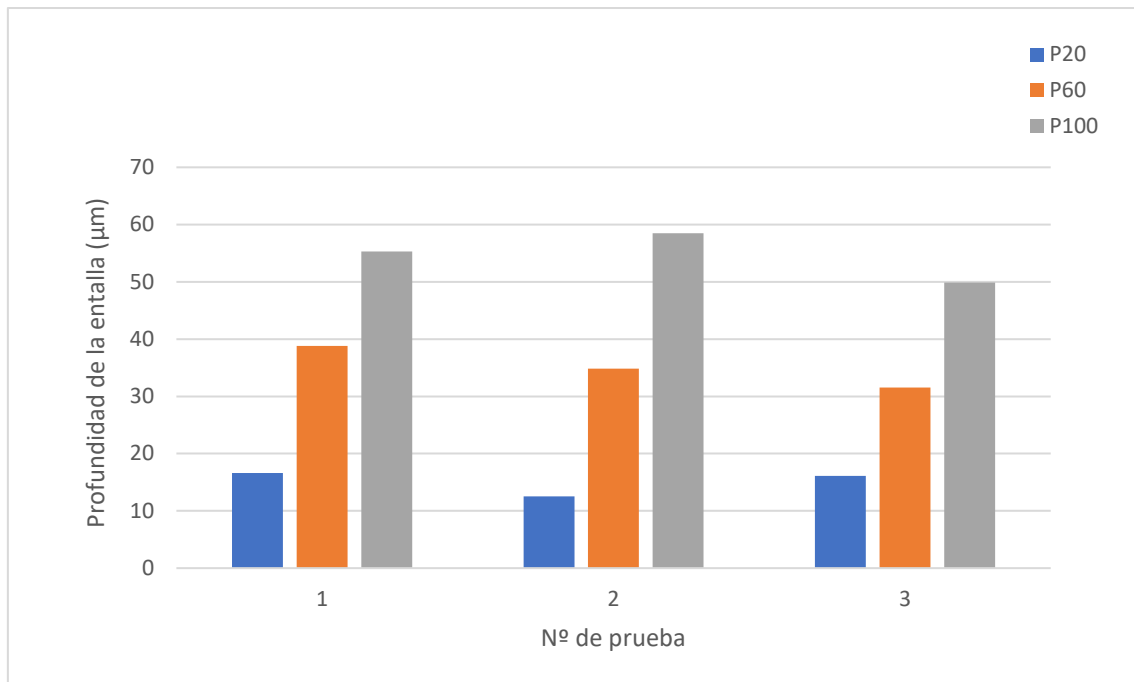


Figura 131: Gráfica profundidad de la entalla para velocidad 900 mm/ s, frecuencia 100 KHz y cada caso de potencia.

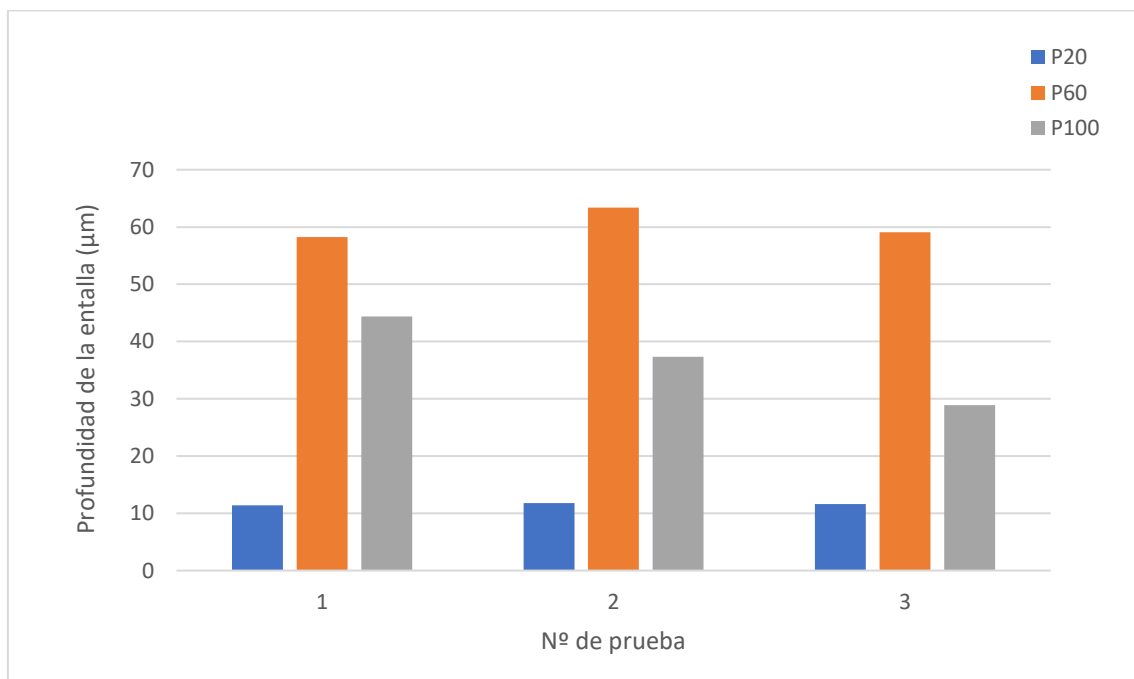


Figura 132: Gráfica profundidad de la entalla para velocidad 900 mm/ s, frecuencia 300 KHz y cada caso de potencia.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

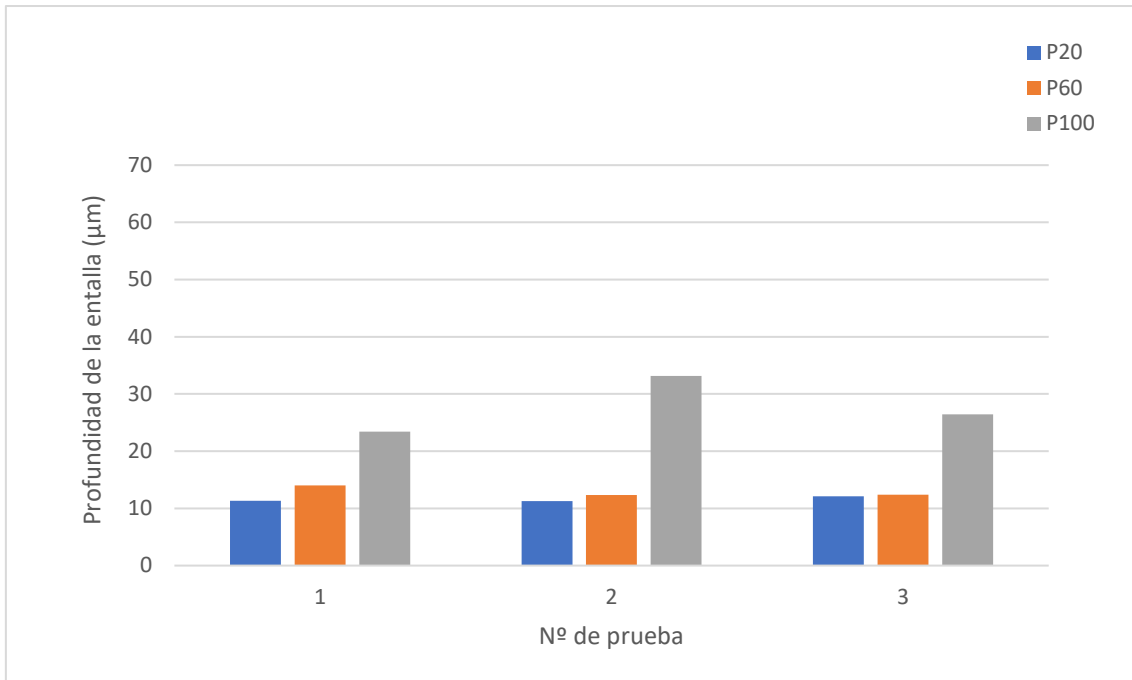


Figura 133: Gráfica profundidad de la entalla para velocidad 900 mm/ s, frecuencia 500 KHz y cada caso de potencia.

Se han introducido todos estos datos en el software *Minitab*, para así ver qué parámetro influencia más sobre el valor de la profundidad de la entalla y obtener una ecuación que permita obtener de forma aproximada su valor en función de la frecuencia, potencia y velocidad.

En la *figura 132* aparece el diagrama de Pareto en el que se muestra cuanto afectan velocidad, frecuencia y potencia al valor de la profundidad de la entalla (h), con un ajuste (R^2) del 81.22%.

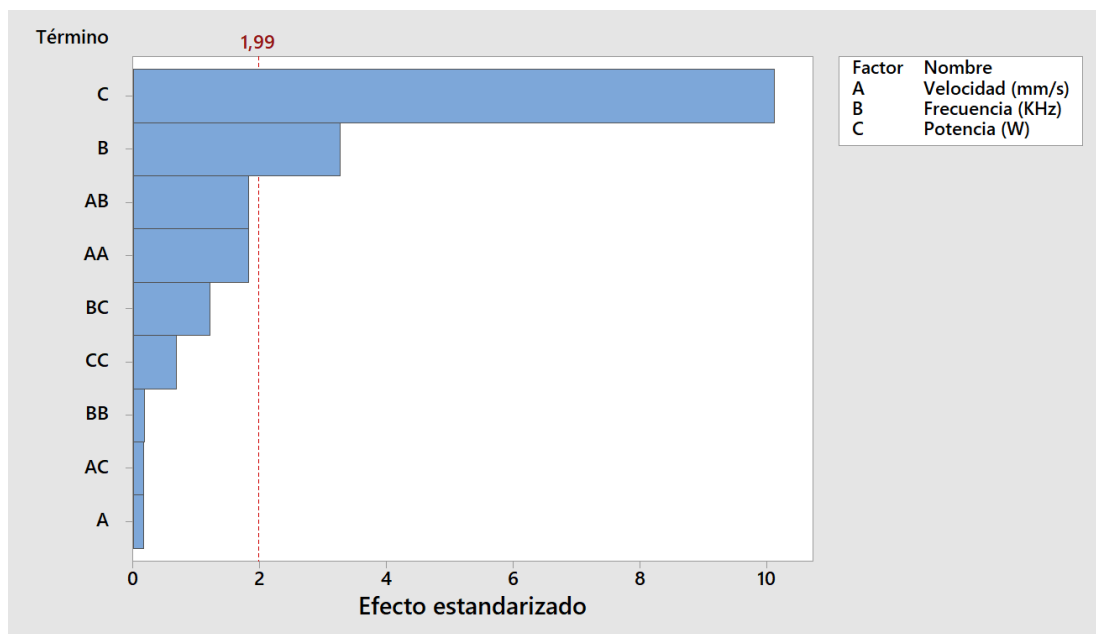


Figura 134: Diagrama de Pareto que representa la influencia de la velocidad, frecuencia y potencia en el valor de h.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

A continuación, se muestra la *ecuación 28*, a partir de la cual se puede calcular de forma aproximada la profundidad de la entalla (h) en función de la potencia, frecuencia y velocidad:

$$\begin{aligned} h (\mu\text{m}) = & 5,02 - 0,0155 * \text{Velocidad (mm/s)} + 0,0174 \text{ Frecuencia (KHz)} \\ & + 0,517 * \text{Potencia (W)} \\ & + 0,000026 * \text{Velocidad (mm/s)} * \text{Velocidad (mm/s)} \\ & - 0,000010 * \text{Frecuencia (KHz)} * \text{Frecuencia (KHz)} \\ & - 0,00097 * \text{Potencia (W)} * \text{Potencia (W)} \\ & - 0,000037 * \text{Velocidad (mm/s)} * \text{Frecuencia (KHz)} \\ & + 0,000018 * \text{Velocidad (mm/s)} * \text{Potencia (W)} \\ & - 0,000245 * \text{Frecuencia (KHz)} * \text{Potencia (W)} \end{aligned} \quad (28)$$

4.4.3. Resumen Resultados Dureza Vickers.

Las conclusiones obtenidas de este ensayo son las que se muestran a continuación:

- Patrón: El tipo de patrón es irrelevante. Lo que hace variar los resultados de dureza son las combinaciones de potencia, velocidad y frecuencia, siendo la potencia la que afecta en mayor medida.
- Potencia: A mayor potencia, más irregular es la superficie. Cuanto más irregular sea la superficie obtenida en el proceso de texturizado, menores serán los valores de dureza obtenidos. Esto es debido a que, en una superficie irregular, tenemos zonas más altas que otras, por lo que el indentador tendrá que hacer frente solamente a estas zonas más altas que pueden ponerse en contacto con él y no a toda la superficie, que opone menos resistencia en estos casos, resultando un valor de dureza menor. En la *figura 135*, se puede ver un esquema en el que se representan dos superficies, una homogénea y otra heterogénea y cómo la diagonal de la entalla que deja el penetrador o indentador es menor en la superficie homogénea que en la irregular, tal y como se ha explicado.

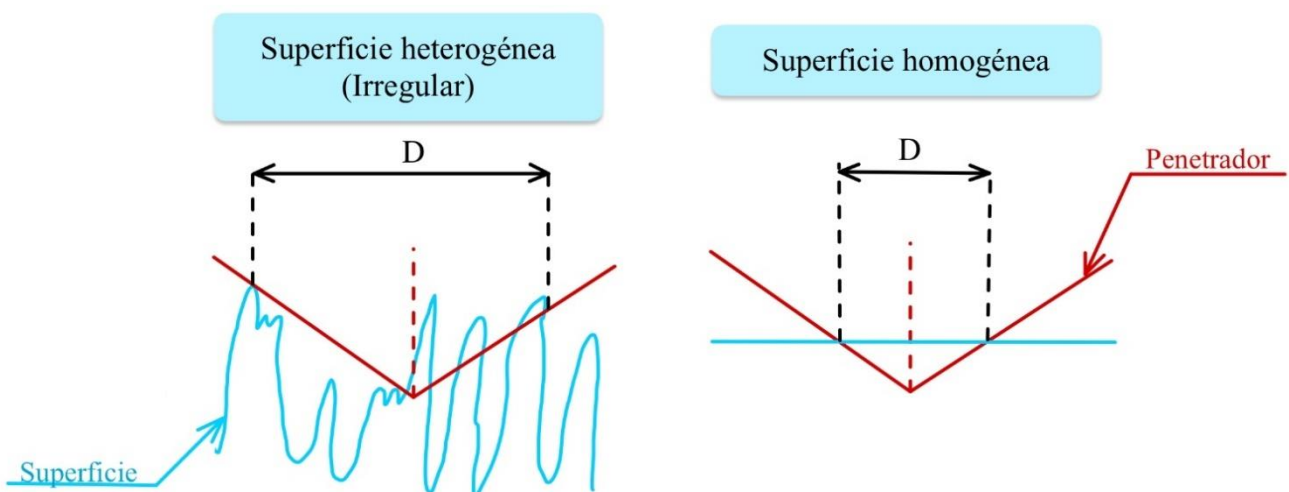


Figura 135: Esquema superficies heterogénea y homogénea.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

Se pueden poner como ejemplo las combinaciones de velocidad, potencia y frecuencia V100P20F500 (*figura 136*) y V100P100F500 (*figura 137*). La superficie tratada a menor potencia presenta una dureza media de 145 HV, mientras que la de la superficie tratada a mayor potencia es de 15 HV. Por tanto, a menor potencia, mayor dureza obtenida.

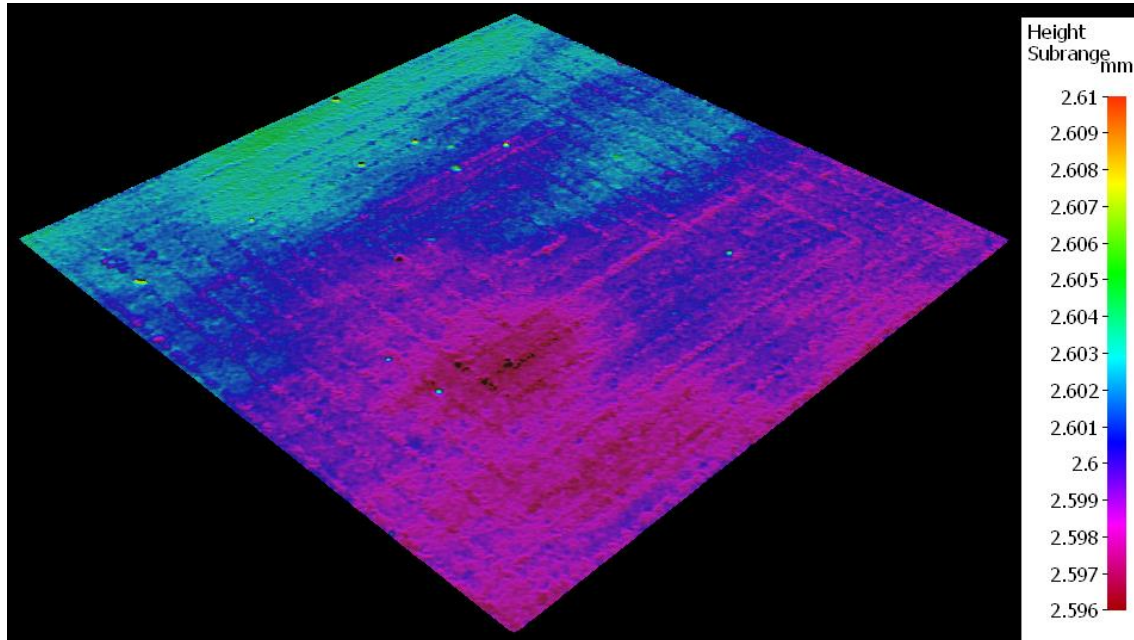


Figura 136: Superficie para velocidad 100 mm/s, potencia 20 W, frecuencia 500 KHz y patrón de cuadrados concéntricos.

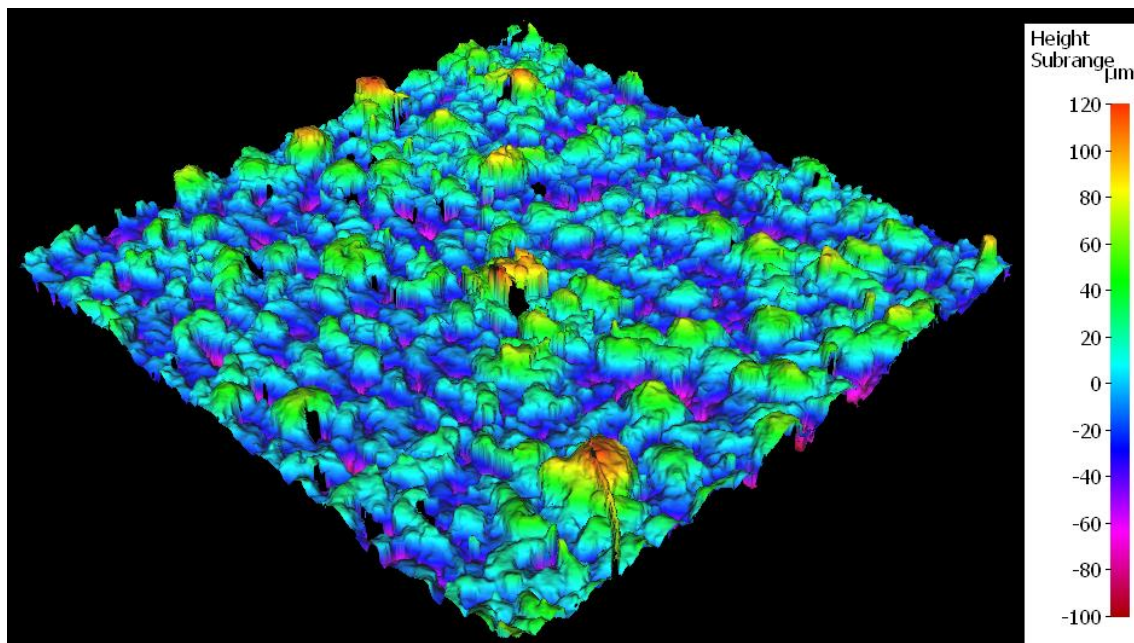


Figura 137: Superficie para velocidad 100 mm/s, potencia 100 W, frecuencia 500 KHz y patrón de cuadrados concéntricos.

Influencia de los Parámetros y Patrones de Texturizado Láser en la Calidad Superficial de Aleaciones de Aluminio

- **Velocidad:** Las velocidades medias son las que consiguen mayores resultados de dureza, excepto cuando ésta se combina con potencias altas, que los estos resultados son prácticamente constantes sin importar la frecuencia. Esto se puede ver ilustrado en la gráfica de la *figura 138*, que consiste en un resumen de los valores medios de dureza Vickers obtenidos a potencia y velocidad constantes.

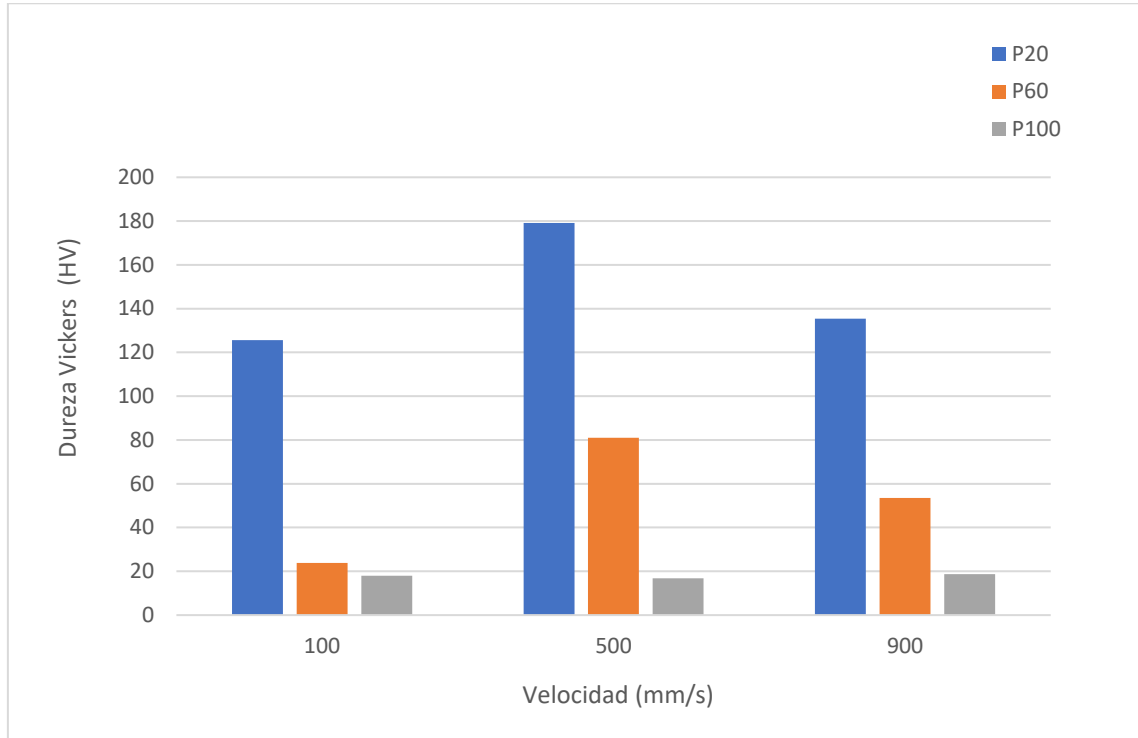


Figura 138: Gráfica dureza Vickers media en función de la potencia y la velocidad.

- **Frecuencia:** Aunque la frecuencia influye más en los valores de dureza obtenidos que la velocidad, lo hace de forma más sutil y solo acompañada de ciertas condiciones de potencia. A menor frecuencia y mayor potencia, menor es la dureza, pero como a alta potencia la dureza siempre es baja, no se puede ver una clara relación entre la frecuencia y la dureza Vickers de la superficie.
- **Profundidad de la entalla:** Es menor cuanto mayor es la dureza obtenida.

Para resumir las conclusiones obtenidas del ensayo de dureza Vickers, se puede decir que el patrón es irrelevante en este tipo de ensayo, por otro lado, a mayor potencia, menor es la dureza y, si combinamos esto con una frecuencia baja, menor aún. Además, a bajas potencias y altas velocidades, la dureza aumenta, pero a altas potencias la velocidad no influye. En cualquier caso, la dureza obtenida tras el tratamiento de texturizado láser es siempre menor que la del material de partida, es decir, el aluminio 7075.

5. Conclusiones.

En este apartado se expondrán las principales conclusiones obtenidas en el presente Trabajo de Fin de Máster, es decir, cómo cambia la calidad superficial, mojabilidad y dureza Vickers de la superficie de una aleación de aluminio 7075 tras ser expuesta a un tratamiento de texturizado láser con diferentes valores de potencia, frecuencia, velocidad de escaneado y patrón.

- Una menor velocidad de escaneado incrementa la interacción del láser con la superficie, generando un mayor grado de irregularidad. A velocidades altas, el patrón es más reconocible y la superficie más uniforme.
- A mayor frecuencia, se obtiene una superficie más densa, homogénea y con menor rugosidad. Por el contrario, frecuencias bajas concentran más energía por pulso, lo que resulta en una superficie más accidentada. Es el parámetro que más afecta a la rugosidad superficial tras la potencia.
- La potencia es el parámetro que más influencia tiene sobre la calidad superficial. Su aumento supone superficies más irregulares, heterogéneas y con mayores valores de rugosidad.
- El patrón tiene un efecto relativamente menor en la calidad superficial, aunque influye en los parámetros de rugosidad lineal (R_a , R_t , R_z) en función de la orientación del perfil analizado y apenas afecta a los parámetros de área (S_a , S_z , S_{dr}).
- Es muy sencillo conseguir superficies con carácter hidrofílico para cualquier combinación de potencia, frecuencia, velocidad de escaneado y patrón.
- Con combinaciones de frecuencia media (300 KHz) con velocidades de escaneado altas (900 mm/s) se consigue un carácter hidrófobo.
- El patrón afecta en menor medida a la mojabilidad de la superficie, pues presenta el mismo carácter en los dos patrones estudiados para las mismas combinaciones de potencia, velocidad de escaneado y frecuencia.
- A mayor potencia, más se reduce la dureza Vickers, pues la superficie es más heterogénea y presenta un perfil más irregular, lo que hace que oponga una menor resistencia, reduciéndose la dureza.
- Las velocidades medias son las que proporcionan mayores velocidades de dureza, especialmente combinadas con potencias bajas, pues a potencias altas la influencia de la velocidad se reduce notablemente.
- La influencia de la frecuencia depende del valor de la potencia. Frecuencias bajas combinadas con potencias altas consiguen una disminución considerable en la dureza de la superficie.
- La profundidad de la entalla es menor cuando la dureza es mayor, lo que confirma que superficies más uniformes ofrecen mayor resistencia al penetrador.
- El patrón de texturizado no influye en la dureza de la superficie.
- En cualquiera de los casos estudiados, la dureza de la superficie es menor o igual a la del aluminio 7075 sin tratar.

6. Líneas Futuras.

En el presente apartado se exponen algunas de las líneas futuras que se podrían seguir a partir del presente proyecto.

- Modificar la distancia entre pasadas del láser, de forma que el patrón sin distancia entre pasadas, así toda la superficie estaría tratada.
- Mantener constantes parámetros que en este caso se han variado y modificar otros, como el patrón, el ancho de pulso o el tiempo de exposición.
- Usar redes neuronales para tratar y predecir futuros resultados.
- Hacer ensayos de fricción y desgaste para conocer cómo se comportan estas superficies en condiciones de contacto y movimiento.
- Influencia de la textura en aplicaciones posteriores como aplicaciones de adhesivo o interacciones fluido-estructura.

7. Bibliografía.

- [1] “Aleación de aluminio: definición, características, tipos, propiedades y aplicaciones - TRG.” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.trgsl.es/es/noticias/aleacion-aluminio-tipos-propiedades>
- [2] “Aluminio: propiedades, usos y producción en la industria actual.” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.lasercor.com/aluminio/>
- [3] “MatWeb - The Online Materials Information Resource.” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.matweb.com/search/QuickText.aspx?SearchText=aluminium>
- [4] “Alluminium Alloy.” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/aluminium-alloys-021>
- [5] “Densidad de la aleación de aluminio, Densidad del aluminio.” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.tomorrowal.com/es/news/density-of-aluminum-alloy>
- [6] “Comparación entre aluminio 7075 y 6061: resistencia a la corrosión - LS Tech.” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.longshengmfg.com/es/7075-aluminum-vs-6061/>
- [7] “Aluminio 2024 | Alloys International, Inc.” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://alloysintl.com/es/inventory/aluminum-alloys-supplier/aluminum-2024/>
- [8] “Mecanizado: Definición, tipos y aplicaciones industriales - Metal Mecanica Noticias By Admin User - Blog Author.” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.metalmecanica.com/es/noticias/proceso-de-mecanizado-guia-y-tipos-de-aplicaciones-industriales>
- [9] “Mecanizado por láser: ¿en qué consiste? | AMG MetalMecánica.” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.amgmetalmecanica.com/mecanizado-por-laser/>
- [10] “¿Cuál es la diferencia entre un torno y una fresadora?” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.weerg.com/es/guias/fresadora-cnc-vs-torno-cnc-diferencias>
- [11] “El operador de la máquina que Foto de stock 2316264773 | Shutterstock.” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.shutterstock.com/es/image-photo/machine-operator-working-lathe-metalworking-process-2316264773>

- [12] “7 Consejos Prácticos sobre el Proceso de Taladrado de Aluminio - KDM Fabrication.” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://es.kdmfab.com/7-consejos-practicos-sobre-el-proceso-de-taladrado-de-aluminio/>
- [13] “Limado | Ajuste Mecánico.” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://ajuste.wordpress.com/2009/11/17/limado/>
- [14] “Producción y rendimiento | ¿Tienes problemas o defectos en tu proceso de rectificado con abrasivos?” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.graff.mx/blogs/tienes-problemas-o-defectos-en-tu-proceso-de-rectificado-con-abrasivos>
- [15] “Types of Machining Processes: Full Guide [junio 2025].” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://hitopindustrial.com/es/tipos-de-operaciones-de-mecanizado/>
- [16] “Defectos de forma.”
- [17] D. De and I. Mecánica, “Tema 17: Metrología del acabado superficial MÓDULO IV: METROLOGÍA DIMENSIONAL TEMA 17: Metrología del acabado superficial TECNOLOGÍA MECÁNICA.”
- [18] “UNE-EN_ISO_21920-2=2023”.
- [19] “UNE-EN_ISO_25178-2=2023”.
- [20] “Surface Roughness Measurement—Parameters | Evident.” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://evidentscientific.com/es/applications/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters>
- [21] M. Schlesinger and M. Paunovic, Eds., *Modern Electroplating*. Wiley, 2010. doi: 10.1002/9780470602638.
- [22] H. O. Pierson, *Handbook of chemical vapor deposition : principles, technology, and applications*. Noyes Publications, 1999.
- [23] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, “MANUFACTURING ENGINEERING AND TECHNOLOGY SEVENTH EDITION IN SI UNITS.” [Online]. Available: <http://www.pearsoned-asia.com/kalpakjian>.
- [24] “Pulido de metales | wolcraft GmbH.” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.wolcraft.com/es/proyectos/bricolaje-y-taller/pulido-de-metales>
- [25] “¿Qué es el Granallado? Beneficios y Ventajas para los Metales.” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.weerg.com/es/guias/que-es-el-granallado-y-para-que-sirve>
- [26] “Tratamientos superficiales: tipos, equipo especializado y medidas de seguridad.” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://grupoacura.com/es/blog/tratamientos-superficiales/>

- [27] “Surface activation - LNF Wiki.” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: https://lnf-wiki.eecs.umich.edu/wiki/Surface_activation
- [28] C. Rodríguez-Villanueva, N. Encinas, J. Abenojar, and M. A. Martínez, “Assessment of atmospheric plasma treatment cleaning effect on steel surfaces,” *Surf Coat Technol*, vol. 236, pp. 450–456, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.10.036.
- [29] L. Li, L. Han, H. Hu, and R. Zhang, “A review on polymers and their composites for flexible electronics,” Dec. 22, 2022, *Royal Society of Chemistry*. doi: 10.1039/d2ma00940d.
- [30] Y. Jiang, J. F. Yang, Z. M. Xie, R. Gao, and Q. F. Fang, “Corrosion resistance of W-Cr-C coatings fabricated by spark plasma sintering method,” *Surf Coat Technol*, vol. 254, pp. 202–206, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.06.012.
- [31] K. Song, J. Lee, S. O. Choi, and J. Kim, “Interaction of Surface Energy Components between Solid and Liquid on Wettability, and Its Application to Textile Anti-Wetting Finish,” *Polymers 2019, Vol. 11, Page 498*, vol. 11, no. 3, p. 498, Mar. 2019, doi: 10.3390/POLYM11030498.
- [32] M. A. Khan, A. Mohd Halil, M. S. Zainol Abidin, M. H. Hassan, and A. Anjang Ab Rahman, “Influence of laser surface texturing on the surface morphology and wettability of metals and non-metals: A review,” Oct. 01, 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.mtchem.2024.102316.
- [33] C. Ma, A. Nikiforov, D. Hegemann, N. De Geyter, R. Morent, and K. Ostrikov, “Plasma-controlled surface wettability: recent advances and future applications,” *International Materials Reviews*, vol. 68, no. 1, pp. 82–119, 2023, doi: 10.1080/09506608.2022.2047420.
- [34] “DIFERENCIAS entre las máquinas de CORTE LÁSER Co2 y las máquinas de CORTE LÁSER FIBRA – HOLY-LASER Technology-BLOG.” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://hoiylasertechnology.wordpress.com/2021/03/29/diferencias-entre-las-maquinas-de-corte-laser-co2-y-las-maquinas-de-corte-laser-por-fibra/>
- [35] “Automated USP Laser Texturing of Orthopedic Implants | Coherent.” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.coherent.com/news/blog/ap-530S-laser-texturing>
- [36] “¿Cómo funciona el grabado láser? - Couth.” Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.couth.com/como-funciona-el-grabado-laser/>
- [37] F. Bañón, S. Martín, J. M. Vázquez-Martínez, J. Salguero, and F. J. Trujillo, “Predictive models based on RSM and ANN for roughness and wettability achieved by laser texturing of S275 carbon steel alloy,” *Opt Laser Technol*, vol. 168, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.optlastec.2023.109963.
- [38] F. Bañón, R. Montaña, J. M. Vázquez-Martínez, and J. Salguero, “Free surface energy evaluation in the laser texturing of a carbon steel s275,” in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2022, pp. 72–76. doi: 10.1016/j.procir.2022.03.016.

- [39] I. Del Sol, M. Batista, P. Mayuet, F. Bañon, and J. M. Vazquez-Martinez, “Improvement of the tribological behavior of high reinforcement concentration Al–SiC (63%) metal matrix composite through laser surface texturing,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 28, pp. 2338–2346, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.12.107.
- [40] M. Ji *et al.*, “Enhanced tribological properties and cyto-biocompatibility of dental Ti6Al4V alloy via laser surface texturing,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 33, pp. 4105–4115, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2024.10.083.
- [41] H. C. Cheng, Z. X. Jiang, T. L. Chang, and P. H. Chen, “Roughness and wettability properties of plain and silica-coated copper surfaces textured with picosecond laser,” *Appl Surf Sci*, vol. 514, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.apsusc.2020.145918.