

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

Máster en Ingeniería Avanzada de Fabricación

Trabajo Fin de Máster

TÍTULO Análisis de la rugosidad superficial obtenida en el taladrado de componentes híbridos aluminio-titanio usando refrigeración sostenible

AUTOR Sara Pacín Dablanca

TUTOR José Manuel Sáenz de Pipaón Sáenz de Pipaón

CO-TUTOR

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Construcción y Fabricación

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

Máster en Ingeniería Avanzada de Fabricación

TÍTULO Análisis de la rugosidad superficial obtenida en el tala-
drado de componentes híbridos aluminio-titanio usando
refrigeración sostenible

AUTOR Sara Pacín Dablanca

TUTOR José Manuel Sáenz de Pipaón Sáenz de Pipaón

CO-TUTOR

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Construcción y Fabricación

(A rellenar por la Comisión Evaluadora)

COMISIÓN EVALUADORA

PRESIDENTE: _____

VOCAL _____

SECRETARIO _____

FECHA DEFENSA ___ de _____ de _____

CALIFICACIÓN _____

Vocal

Presidente

Secretario

Fdo.: _____ **Fdo.:** _____ **Fdo.:** _____

CÓDIGOS UNESCO

--	--	--	--	--	--	--	--

--	--	--	--	--	--	--	--

--	--	--	--	--	--	--	--

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia, en especial a mis padres y mi hermano, su apoyo en cada nuevo reto profesional y académico que emprendo, aunque eso suponga pasar menos tiempo con ellos. Lo hacen todo más fácil.

En segundo lugar, agradecer la ayuda de Iván, por escucharme, darme ánimos especialmente cuando más lo he necesitado y prestarme su ayuda en todo lo que he necesitado para el término de este trabajo.

No quiero olvidarme tampoco de mis amigos, por todos los planes que han pospuesto para permitir que estudiase para los exámenes o realizase los trabajos de este máster.

Y, por último, aunque no menos importante, muchas gracias a José Manuel Sáenz de Pipaón. Especialmente por su paciencia y su amplio conocimiento, por ser siempre tan rápido, correcto y agradable en sus correcciones. Sin duda una parte muy grande del mérito de este trabajo ha sido suya. Tengo la seguridad de que sin él no habría sido posible.

LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

TP	Tutor del Trabajo
ETSII	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales
TFM	Trabajo Fin de Máster
UNED	Universidad Nacional de Educación a Distancia
FRP	Fibre Reinforced Polymer (Polímeros Reforzados con Fibra)
MMC	Metal Matrix Composite (Compuestos de Matriz Metálica)
MQL	Minimum Quantity Lubrication (Mínima Cantidad de Lubricante)
MMR	Material Removal Rate (Tasa de Eliminación de Material)
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer (Polímero Reforzado con Fibra de Carbono)
AWJM	Abrasive Water Jet Machining (Mecanizado por chorro de agua abrasivo)
IMP	Intermetallic Phase (Fases Intermetálicas)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Imagen puente Abereldy de Escocia [4]	4
Figura 2 Clasificación de los materiales a diferentes niveles de escala [6-1]	5
Figura 3 Esquema de las principales rutas químicas para la síntesis de híbridos orgánico-inorgánicos. [12]	6
Figura 4 Morfología de materiales híbridos orgánico/inorgánico [13]	7
Figura 5 Diferencias entre híbridos inorgánico-orgánico y nanocomposite inorgánico-orgánico [13]	8
Figura 6 Dos ejemplos de revestimientos híbridos con interés decorativo: (a) artículos de vidrio que demuestran la apariencia óptica de alta calidad del cristal vidrio y (b) fáciles de reciclar coloreados [12]	10
Figura 7 Aplicaciones dentales de composite de fibra de vidrio reforzado [15]	10
Figura 8 Ejemplos de sistemas mecatrónicos [12]	11
Figura 9 Elementos ópticos fabricados con materiales híbridos [12].....	11
Figura 10 Composite como fijador externo de hueso [12]	11
Figura 11 Power transmission cables with composite core. [17]	12
Figura 12 Baterías con elementos electrónicos fabricados con composites [12]	12
Figura 13 Tableros de FRP [14]	13
Figura 14 Primer puente de materiales compuestos construido en España (2004) [14]	13
Figura 15 Conjunto de freno de carbono de Boeing 767 [17]	14
Figura 16 Ejemplo de mecanizado por inundación [26]	16
Figura 17 Ejemplo herramienta para mecanizado MQL (ww.blaser.com)	16
Figura 18 Mecanizado criogénico (www.hergome.com)	17
Figura 19 Probetas mecanizadas y geometrías de brocas empleadas por cada material.[32]	18
Figura 20 Altura de la rebaba máxima por taladro obtenido en la aleación UNS A97075.[31]	18
Figura 21 Efectos de los elementos de aleación en los diagramas de fase de las aleaciones de titanio [46]	31
Figura 22 Diagrama tridimensional de la clasificación del titanio según su fase [46]	32
Figura 23 Centro de mecanizado Tongtai TMV510	35

Figura 24 Equipo de metrología óptica Alicona.....	36
Figura 25 Disposición tipo sándwich de la probeta	36
Figura 26 Simulación de taladros en la probeta	37
Figura 27 Posiciones del taladrado en la probeta	37
Figura 28 Broca para taladrado	38
Figura 29 Imagen de la sujeción de la probeta y los diferentes insertos desmontados.....	39
Figura 30 Efecto del avance.....	45
Figura 31 Efecto del refrigerante.....	45
Figura 32 Efecto de la posición respecto del inserto LRI	46
Figura 33 Herramienta-Refrigerante-LRI vs Ra	47
Figura 34 Herramienta-Refrigerante vs Ra	47
Figura 35 Refrigerante-LRI vs Ra.....	48
Figura 36 Avance-Herramienta vs Ra	48
Figura 37 Avance-Herramienta-Refrigerante vs Ra	49
Figura 38 Avance-Refrigerante-LRI vs Ra.....	49
Figura 39 Avance-Herramienta-LRI vs Ra	50
Figura 40 Avance-Refrigerante vs Ra.....	50
Figura 41 Avance-Velocidad de Corte-Herramienta-Refrigerante vs Ra	51
Figura 42 Avance-Velocidad de corte-LRI vs Ra.....	51
Figura 43 Avance-Velocidad de corte-Refrigerante vs Ra	52
Figura 44 Avance-LRI vs Ra	52
Figura 45 Velocidad de Corte-Refrigerante vs Ra.....	53
Figura 46 Avance-Velocidad de corte-Herramienta vs Ra	53
Figura 47 Avance vs Rz	58
Figura 48 Refrigerante vs Rz	58
Figura 49 LRI vs Rz	59
Figura 50 Herramienta-Refrigerante- LRI vs Rz	59
Figura 51 Refrigerante-LRI vs Rz.....	60
Figura 52 Herramienta-Refrigerante vs Rz	60

Figura 53 Avance-Refrigerante vs Rz	61
Figura 54 Avance-Herramienta-LRI vs Rz.....	61
Figura 55 Avance-Refrigerante-LRI vs Rz	62
Figura 56 Avance-Herramienta-Refrigerante vs Rz	62
Figura 57 Avance-Herramienta vs Rz.....	63
Figura 58 Velocidad de corte-Herramienta-LRI vs Rz	63
Figura 59 Avance-Velocidad de corte- Herramienta-Refrigerante-LRI vs Rz	64
Figura 60 Avance-Velocidad de corte-Refrigerante vs Rz.....	64
Figura 61 Herramienta-LRI vs Rz.....	65
Figura 62 Avance-LRI vs Rz	65
Figura 63 Avance-Velocidad de corte-LRI vs Rz	66
Figura 64 Avance-Velocidad de corte-Herramienta vs Rz	66
Figura 65 Velocidad de Corte-Refrigerante vs Rz	67
Figura 66 Relación Ra-Rz según LRI	68

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades materiales orgánicos e inorgánicos	3
Tabla 2 Propiedades polímero vs propiedades metal	7
Tabla 3 Aplicaciones de las aleaciones de magnesio en la industria automotriz [36]	22
Tabla 4 Propiedades de las aleaciones de magnesio, aleaciones de aluminio y acero [36]	23
Tabla 5 Comportamiento del Mg, Al y acero ante diferentes ambientes [36]	24
Tabla 6 Características y aplicaciones de las aleaciones de aluminio forjadas	28
Tabla 7 Características y aplicaciones de las aleaciones de aluminio fundido	29
Tabla 8 Aplicaciones de las aleaciones de aluminio según el sector de mercado	30
Tabla 9 Parámetros elegidos y sus niveles	38
Tabla 10 Refrigerante MQL (mínima cantidad de lubricante)	41
Tabla 11 Refrigerante CRIOGÉNICO.....	41
Tabla 12 Mecanizado en seco	42
Tabla 13 Análisis ANOVA Ra	43
Tabla 14 Porcentaje de contribución de cada fuente estadísticamente significativa	44
Tabla 15 Refrigerante MQL (mínima cantidad de lubricante)	54
Tabla 16 Refrigerante Criogénico	55
Tabla 17 Mecanizado en seco	55
Tabla 18 Análisis Anova Rz	56
Tabla 19 Porcentaje de contribución de cada fuente estadísticamente significativa para Rz	57
Tabla 20 Comparación de interacciones en el estudio ANOVA de Ra y Rz.....	70
Tabla 21 Comparación de porcentaje de contribución a la variabilidad de la rugosidad (Ra vs Rz).....	70

Índice

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE	3
2.1. Propiedades de los materiales híbridos	8
2.2. Aplicaciones de los materiales híbridos	9
2.3. Enfoque desde el punto de vista del mecanizado	14
2.4. Aleaciones de Magnesio	21
2.5. Aleaciones de Aluminio	25
2.6. Aleaciones de Titanio	30
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE ENSAYOS	35
3.1. Estudio de la rugosidad según Ra	40
3.2. Estudio de la rugosidad según Rz	54
CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES	69
4.1. Conclusiones generales	69
4.2. Conclusiones particulares	69
BIBLIOGRAFÍA	72

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas los avances tecnológicos se han incrementado exponencialmente. Esto ha hecho que, tanto la industria como nuestra forma de vida, hayan cambiado mucho. Las grandes exigencias de nuestra industria, por ejemplo, con el uso de maquinaria cada vez más compleja, requiere el uso de materiales muy diversos y con propiedades muy diferentes. Ocurre lo mismo con las infraestructuras de nuestros días. Edificios más altos y vanguardistas, puentes más resistentes o incluso medios de transporte como el ferrocarril, el automóvil o los aviones han evidenciado la necesidad de nuevas tecnologías y materiales que permitan llevar a cabo los avances y progresos que la ciencia ha ido alcanzando.

Nuevos productos se han ido abriendo paso para satisfacer estos avances y las nuevas necesidades. Productos más duraderos, resistentes en ambientes adversos, más económicos o con mejores propiedades mecánicas son cada vez más necesarios, y eso ha contribuido a la aparición de nuevos materiales que cumplan esas características. Es posible hoy en día crear materiales específicos para usos concretos, combinando en dichos materiales exactamente las propiedades necesarias para conseguir una buena calidad y vida útil del producto.

Es de esta forma como se ha llegado a los materiales compuestos de nuestros días. Aunque estos materiales existan desde hace muchos años, cada día están más presentes en nuestras vidas. Con los avances de la industria química a partir del siglo XX, la cantidad de materiales compuestos ha aumentado enormemente, debido a la facilidad de unión de diferentes materiales.

Especialmente desde la Segunda Guerra Mundial, se intensificó el uso de este tipo de materiales. Eran necesarios materiales ligeros adecuados para la aviación militar, y aquí los materiales compuestos jugaron un papel muy importante.

Luego continuaron usándose en barcos, revolucionando el sector náutico en su momento. Después fue el turno de la industria automovilística. Ya en los primeros coches comerciales se usaban composites.

En el siglo XXI los avances en este tipo de materiales crecieron de forma exponencial, especialmente para su uso en la industria automotriz y aeronáutica. Aunque es importante destacar que los materiales compuestos también tienen otras aplicaciones en nuestros días como estructurales o biomédicas.

Pero el uso de estos nuevos materiales supuso varios retos. Entre ellos cómo producirlos y mecanizarlos de forma económicamente rentable. Las excelentes propiedades mecánicas de algunos de los materiales compuestos o híbridos supusieron dificultades en su mecanizado.

Los múltiples usos y las buenas propiedades de estos materiales han propiciado que se haya estudiado en profundidad su mecanizado, con el fin de optimizar al máximo la fabricación de piezas hechas con materiales híbridos y así conseguir productos rentables económicamente. En especial para sectores tan competitivos y exigente como el aeronáutico y el automotriz, donde los controles de calidad son muy exhaustivos y la reducción de costes es un tema recurrente. De la ne-

cesidad de conseguir un mecanizado eficiente ha salido la motivación del presente trabajo, obtener información mediante la realización de ensayos que pueda resultar de interés en la industria actual para optimizar las condiciones de corte de materiales híbridos.

A continuación, se detalla la estructura seguida en el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster.

En el capítulo 1, *Introducción*, se define la motivación y los objetivos del trabajo, comentando el contenido de cada uno de los capítulos que forman el Trabajo Fin de Máster.

En el apartado 2, *Estado del arte*, se comenta el estado del arte de los materiales híbridos, qué tipos hay y cómo se han ido introduciendo en nuestras vidas a lo largo de los años. También se comentan sus principales propiedades y sus aplicaciones más importantes. Se hace especial hincapié en las aleaciones de titanio, magnesio y aluminio, por ser unas de las más utilizadas hoy en día, debido a sus excelentes propiedades mecánicas.

En el apartado 3, *Metodología y análisis de ensayos*, se describe los análisis que se han realizado en el laboratorio. Se han realizado ensayos de taladrado en probetas de diferentes materiales (titanio y aluminio) para determinar mediante el análisis de un diseño factorial 2^3 las rugosidades superficiales Ra y Rz obtenidas.

En el capítulo 4, *Conclusiones*, se comentan las conclusiones tras la realización de los ensayos y análisis de éstos. Se hacen dos tipos de conclusiones, unas de carácter general obtenidas de la consulta bibliográfica y otras de carácter particular obtenidas tras el análisis de los ensayos realizados.

El capítulo 5, *Bibliografía*, se da la relación de los diferentes libros y artículos consultados durante la elaboración del Trabajo Fin de Máster.

CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE

Los materiales compuestos existen en la naturaleza. Una pieza de madera es un material compuesto, con largas fibras de celulosa unidas a una sustancia llamada lignina. Todos los materiales compuestos se forman combinando dos o más materiales que tienen propiedades diferentes, pero que no se mezclan entre sí. El material resultante tiene propiedades únicas, diferentes a las de sus componentes.

Un buen ejemplo es la combinación de barro y paja en un bloque de ladrillo, conocido como adobe, que lo hace fuerte y resistente. La paja continuó proporcionando refuerzo a productos compuestos antiguos, como en la cerámica o los barcos.

Algunos de estos materiales compuestos se encuentran presentes en la naturaleza, como pueden ser las conchas de moluscos o los huesos. Sin embargo, la mayoría han sido producidos artificialmente. Suele mencionarse el material Maya Blue como el primer material de este tipo generado por el ser humano [1]. Se trata de un pigmento de color azul que data del siglo VIII y que duró más de 12 siglos. Fueron los Mayas sus creadores, de ahí su nombre. Al ser descubierto en unas pinturas, surgió la incógnita de cómo una, a simple vista, pintura de color azul había durado tantos años intacta. El pigmento en si es un compuesto formado por índigo, un tinte orgánico, y paligorskita, una arcilla natural. Es una mezcla a nivel nano molecular, donde las moléculas del elemento orgánico (índigo) están protegidas por el elemento inorgánico (arcilla), lo que lo convierte en un material híbrido.

La morfología del Maya Blue se repite en muchos materiales híbridos. En materiales híbridos orgánico-inorgánico, los más comunes, cada uno de los elementos suele proveer al material resultante de ciertas propiedades [2]. En la tabla 1 se resumen algunas de ellas.

Tabla 1 Propiedades materiales orgánicos e inorgánicos

MATERIAL ORGÁNICO	MATERIAL INORGÁNICO
Flexibilidad estructural Facilidad de procesamiento Potencial semiconductor Propiedades electrónicas Fotoconductividad Luminiscencia eficiente	Propiedades magnéticas y eléctricas Estabilidad térmica y mecánica

El desarrollo y la necesidad de materiales compuestos también dan como resultado la industria de polímeros reforzados con fibra (FRP). En 1945, se utilizaron más de 7 millones de libras de fibras de vidrio para varios productos, principalmente para aplicaciones militares. Fue a partir de 1950 cuando este tipo de materiales creció exponencialmente. La idea era introducir estos materiales en mercados como el aeroespacial, la construcción y el transporte. Uno de los sectores que más se aprovechó de los beneficios de los compuestos FRP fue el naval. En 1946 se usó el primer material compuesto para la fabricación de un barco comercial. Poco después se usó también para la carrocería del automóvil. [3]

También a partir de las décadas 1970 y 1980 se comenzaron a usar estos materiales para infraestructuras en Asia y Europa. Un ejemplo de ello fue el puente peatonal que se instaló en Aberfeldy (figura 1), Escocia, en 1992. La primera plataforma de puente de hormigón reforzado con FRP se construyó en McKinleyville, West Virginia. [4]

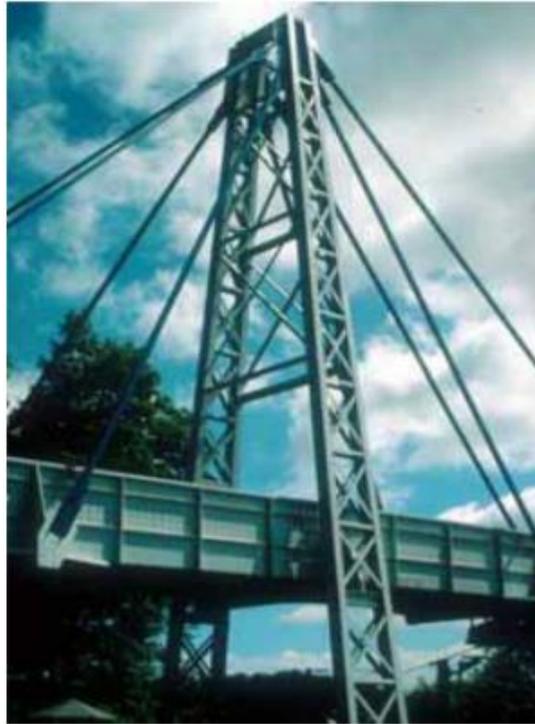


Figura 1 Imagen puente Abereldy de Escocia [4]

Como resultado de los crecientes estudios e investigaciones, a principios de la década de 2000 comienza a utilizarse la nanotecnología para productos comerciales. Los nanotubos de carbono pueden utilizarse como refuerzo en los nuevos materiales compuestos para mejorar notablemente las propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas. [4]

Es a partir de este momento cuando comienza a coger fuerza el concepto de material híbrido. Los compuestos híbridos son el resultado de la unión de varios materiales, en el que cada uno de estos proporciona unas propiedades específicas al material final. Como requisito generalmente la unión de los diferentes materiales deberá ser a escala molecular para considerarse un material híbrido [5]. Pueden tratarse de la mezcla de dos materiales inorgánicos, dos orgánicos o una mezcla de ambos. El material híbrido resultante suele poseer mejores propiedades que sus componentes por separado.

Una vez el material híbrido ha sido formado, éste posee unas propiedades diferentes a las de sus componentes por separado. Estas propiedades dependerán de la composición química y de las propias propiedades y estructura de los elementos que lo componen por separado.

Mediante la formación de compuestos híbridos pueden conseguirse materiales muy versátiles, pues modificando sus componentes, la composición, la morfología o el tamaño, es posible conseguir infinidad de posibilidades en lo que a propiedades se refiere. Es por esto que en las últimas décadas se han incrementado exponencialmente la investigación y experimentación con estos materiales.

Después del descubrimiento del Maya Blue en la década de los años 50, no fue hasta mediados de la década de 1980 cuando se comenzó a hablar de compuesto híbrido. Fue a partir de la década de los años 90 cuando se intensificó el estudio de estos materiales y se establecen procesos químicos avanzados para su producción. Especialmente, a finales del siglo XX y principios del siglo XXI, nuevas técnicas físico-químicas han supuesto un avance muy importante en el campo de la ingeniería molecular, facilitando la formación de nuevos materiales [2].

Los materiales híbridos abarcan una gran variedad de tecnologías, desde revestimientos de cristalería hasta la membrana de intercambio de protones del polimérico de última generación de pilas de combustible. También permite el diseño de micro, meso y nanoestructuras.

En los últimos años han sido muchas las publicaciones en las que se ha definido y clasificado este tipo de materiales. Los materiales compuestos por varios materiales son llamados convencionalmente "composites", por lo que a veces resulta difícil encontrar la diferencia entre material híbrido y composite. Entre los muchos autores que han definido los materiales híbridos podemos destacar varios. Yamamoto [5] los definió como una mezcla de dos o más materiales con nuevas propiedades creados por nuevos orbitales de electrones formados entre cada uno de los materiales. Por otro lado, Makishima [6] los describió como una mezcla de dos o más materiales con enlaces químicos recién formados. Fue más allá y los clasificó en (ver figura 2):

- Composites: mezcla de materiales que consiste en una matriz y dispersión a nivel de micras.
- Nanocomposites: mezcla por debajo de la micra de materiales de similar tipo.
- Híbridos: mezcla por debajo de la micra de materiales de diferente tipo.
- Nanohybrids: mezcla a nivel atómico o molecular de diferentes materiales unidos mediante enlaces químicos.

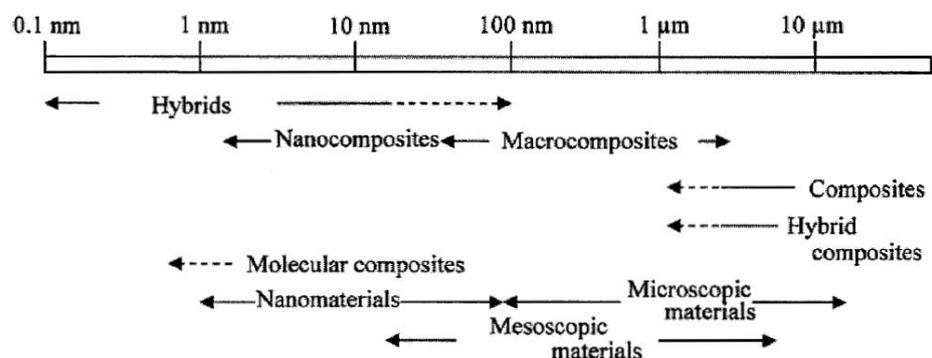


Figura 2 Clasificación de los materiales a diferentes niveles de escala [6-1]

Makishima explicó que los nanocomposites pueden incluir a materiales híbridos y nanohíbridos en muchos casos.

Gómez-Romero y Sánchez [7] definieron los materiales híbridos como materiales híbridos orgánicos-inorgánicos o biomateriales inorgánicos. Al igual que para Makishima, para ellos los materiales híbridos requerían una unión a nivel atómico o nanométrico de los materiales que lo componían.

Sin embargo, Ashby [8] dio una definición más genérica para los materiales híbridos, viéndolos como una “combinación de dos o más materiales en una geometría y escala predeterminadas, que cumplen de manera óptima un propósito de ingeniería específico”.

Por último, Hagiwara y Suzuki [9] describieron los materiales híbridos como una combinación de dos o más materiales que se unen para tener unas propiedades nuevas a las de los materiales que lo componen por separado. Para ellos la diferencia entre materiales híbridos y composites se encuentra exclusivamente en las propiedades finales del material resultante, en el caso de los composites no presentan propiedades nuevas que las de sus componentes.

Los materiales híbridos pueden clasificarse en dos clases según cómo se realice la unión de sus componentes [11]:

Clase I: las interacciones entre los componentes son débiles, normalmente consisten en fuerzas de Van der Waals y enlaces de hidrógeno.

Clase II: las interacciones moleculares son fuertes, como enlaces covalentes, iónicos, etc.

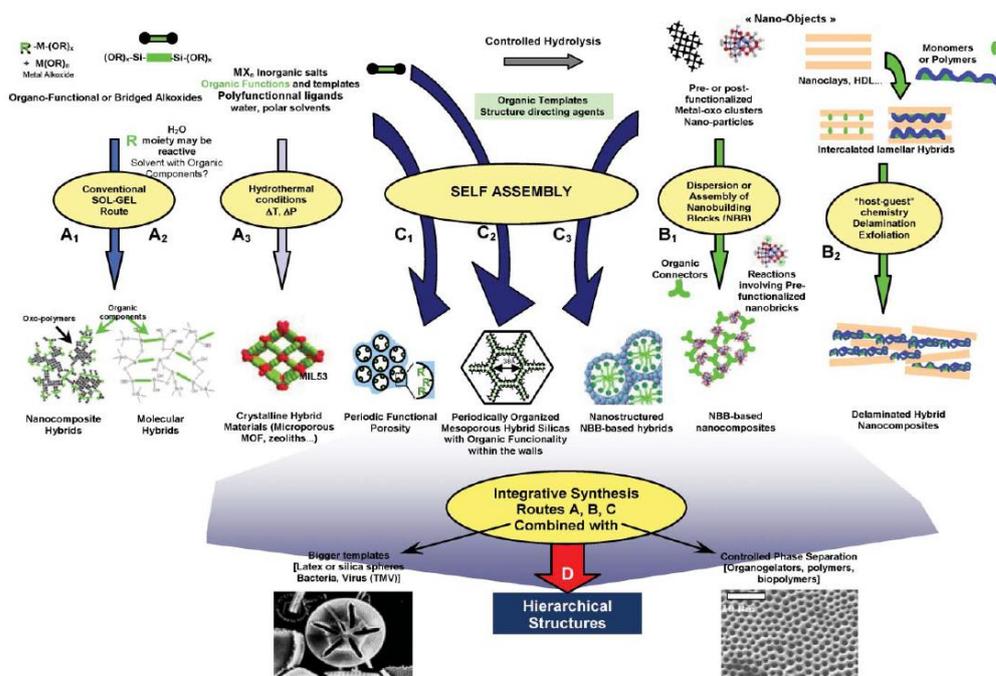


Figura 3 Esquema de las principales rutas químicas para la síntesis de híbridos orgánico-inorgánicos. [12]

Ya se ha mencionado anteriormente que los compuestos híbridos suelen estar formados de un material orgánico y uno inorgánico (ver figura 3). En la mayor parte de los casos el material orgánico suele ser un polímero y el inorgánico un metal. El primero ayuda a integrar ambos elementos y el segundo provee al material de rigidez. En la tabla 2 se muestran las propiedades que aporta al material cada uno de estos elementos:

Tabla 2 Propiedades polímero vs propiedades metal

POLÍMERO	METAL
Estética del material	Propiedades estructurales
Cohesión de los componentes	Impermeabilidad
Aislamiento térmico y eléctrico	Conductividad eléctrica

Suyama [13] propuso clasificar los híbridos inorgánico-orgánicos en tres tipos (figura 4), dependiendo de las diferencias estructurales resultantes de la hibridación. Un ejemplo son los silicatos orgánicos modificados fabricados mediante procesamiento sol-gel. Poseen unas propiedades mecánicas excelentes. Otro ejemplo son las arcillas/polímeros donde existe una fuerte unión entre silicatos y las moléculas del polímero. Por último, también se pueden distinguir los híbridos compuestos por una matriz de polímero y partículas de sílice (figura 5).

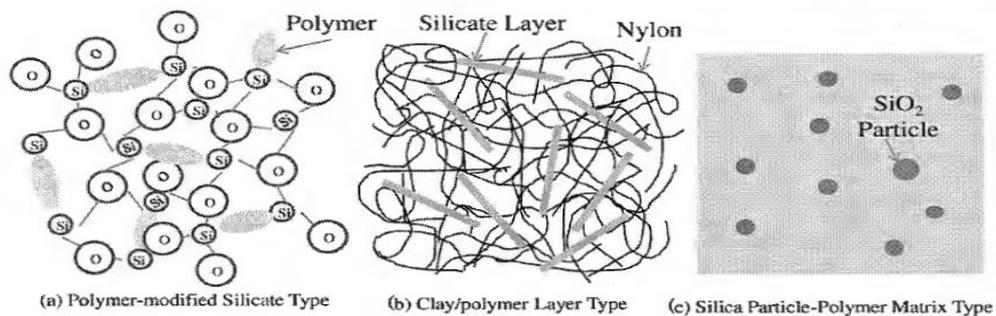


Figura 4 Morfología de materiales híbridos orgánico/inorgánico [13]

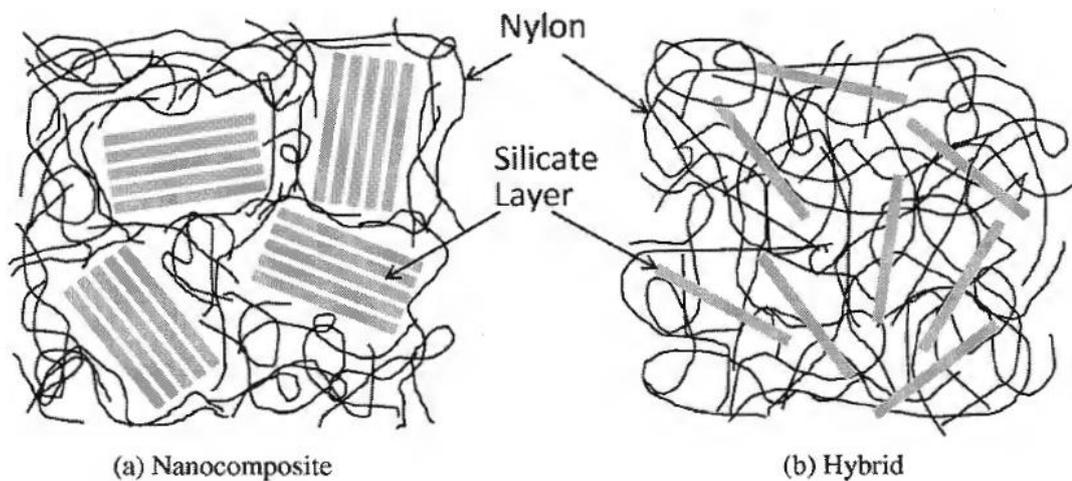


Figura 5 Diferencias entre híbridos inorgánico-orgánico y nanocomposite inorgánico-orgánico [13]

Pero la combinación de materiales híbridos no tiene por qué ser entre un material orgánico y uno inorgánico, también pueden generarse a partir de dos metales. Estos híbridos metálicos pueden dividirse en *aleaciones metálicas* y *compuestos metálicos*. Las aleaciones metálicas se forman normalmente fundiendo la mezcla de dos o más elementos. En el caso de los compuestos metálicos, la formación se produce en estado sólido, como puede ser la pulvimetalurgia.

2.1. Propiedades de los materiales híbridos

Tal y como hemos explicado, las propiedades de un material híbrido dependerán de las propiedades de sus elementos por separado y de la unión de ellos. Sin embargo, hay ciertas propiedades características de este tipo de materiales. Suelen presentar una estructura cristalina porosa, que dota al material de propiedades adsorbentes. Además, son normalmente catalizadores para productos químicos. También poseen tanto propiedades ópticas pasivas, constantes independientemente de las condiciones externas, como activas, en el caso de materiales fotocromáticos y electrocromáticos. En general, las propiedades más significativas de estos materiales son [14]:

- Gran ligereza y buenas características mecánicas, donde destacan sus elevadas resistencia y rigidez específicas y buena resistencia a la fatiga. Esto influye favorablemente en la facilidad del transporte y costes de ejecución.
- Buena resistencia a la corrosión y al ataque de agentes ambientales. Especialmente importante en aplicaciones costeras, marinas o cualquier ambiente agresivo.
- Poseen una baja conductividad térmica.
- Presentan gran libertad de formas y diseños, ya que existe la posibilidad de moldeo de grandes piezas. Con materiales convencionales, esto resulta imposible para ciertas aplicaciones.

- Eligiendo los componentes y su porcentaje de su presencia en el material híbrido pueden crearse infinidad de materiales, cada uno con unas propiedades únicas.

Aunque las propiedades mecánicas están fuertemente influenciadas por la composición, los materiales híbridos, por norma general, presentan una resistencia excepcional a la fractura.

En el caso de los materiales híbridos formados por dos metales, se caracterizan generalmente por poseer buena resistencia a la corrosión, buena resistencia mecánica y alta resistencia eléctrica o alta conductividad térmica [11].

Ha sido la necesidad de nuevos materiales con mejores propiedades que los ya existentes lo que ha propiciado que los estudios alrededor de materiales híbridos hayan crecido exponencialmente en los últimos años. En concreto, los más utilizados en el caso de los metales son las aleaciones de aluminio y aceros, mientras que en el caso de compuestos orgánico-inorgánico son los polímeros reforzados con fibras, en particular los polímeros reforzados con fibra de carbono.

Especialmente interesa el problema de la unión de diferentes materiales, así como las nuevas aplicaciones de estos materiales híbridos.

Aunque este tipo de materiales presenta muchas ventajas, también hay algunos inconvenientes que conviene tener en cuenta [13]:

- Son caros, más que el acero. Aunque los precios están bajando en los últimos años debido al incremento de su producción y el desarrollo de métodos de fabricación más eficaces.
- Degradación de sus propiedades a temperaturas no excesivamente elevadas, debido al deterioro de la matriz.
- Falta de conocimiento y experiencia por parte de los técnicos acerca de este tipo de materiales, así como la ausencia de una normativa y guías de diseño específicas para ellos.

2.2. Aplicaciones de los materiales híbridos

Son múltiples las aplicaciones de los materiales híbridos hoy en día, aunque aún se encuentran en la mayoría de casos en fases de estudio. Entre las aplicaciones de estos nuevos materiales se encuentran [12]:

- **Recubrimientos protectores y decorativos:** (figura 6) son usados en la industria de pinturas por su resistencia a la corrosión y a la climatología. También sirven para crear recubrimientos multifuncionales, ya sean conductivos, antifricción, auto limpiantes, etc. [12]

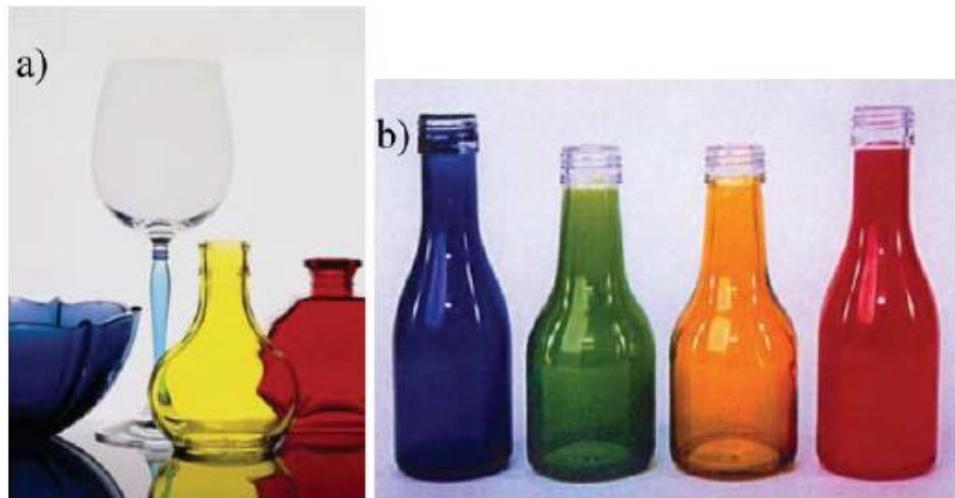


Figura 6 Dos ejemplos de revestimientos híbridos con interés decorativo: (a) artículos de vidrio que demuestran la apariencia óptica de alta calidad del cristal vidrio y (b) fáciles de reciclar coloreados [12]

- **Aplicaciones dentales:** (figura 7) los materiales híbridos denominados nanocompuestos penetran bien en las cavidades dentales. Esto, junto con la contracción mínima que presentan, que no son tóxicos y no transparentes a rayos X los convierten en una buena opción para estas aplicaciones.

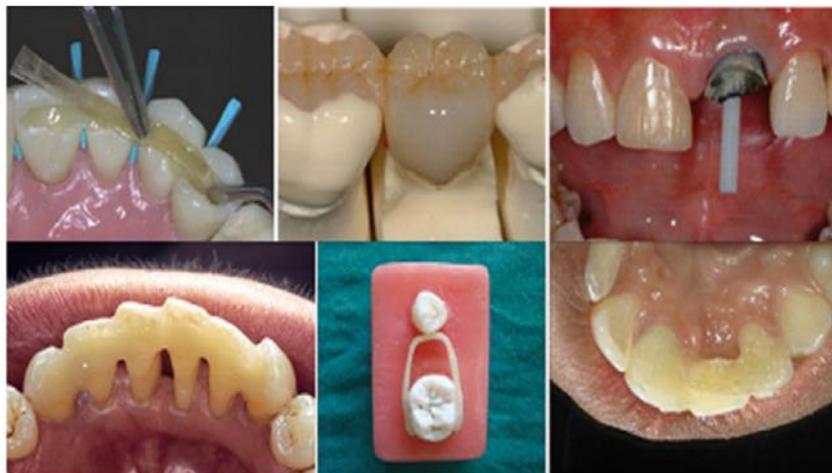


Figura 7 Aplicaciones dentales de composite de fibra de vidrio reforzado [15]

- **Sistemas mecatrónicos:** (figura 8) juntando dos materiales que por separado tienen funciones diferentes en este tipo de productos, podemos conseguir un material que realice varias funciones al mismo tiempo. Algunos ejemplos son sensores, motores, diodos emisores de luz, fotodiodos, etc.

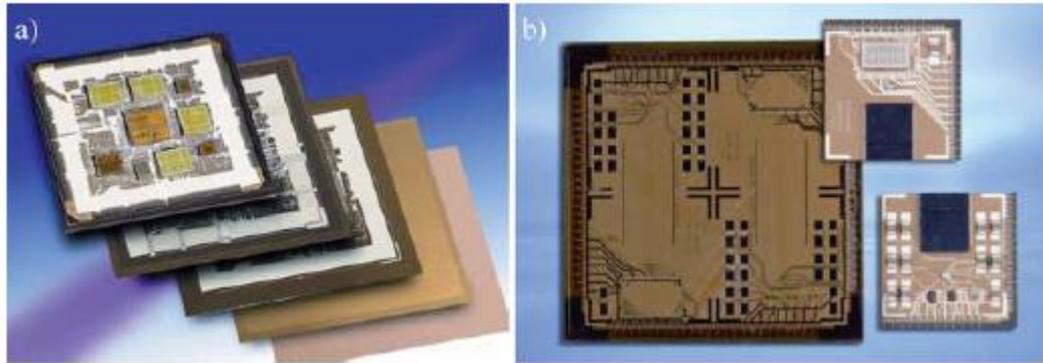


Figura 8 Ejemplos de sistemas mecatrónicos [12]

- **Micro-óptica:** (figura 9) se han usado materiales híbridos para fabricar lentes o para revestimientos ópticos de interferencia.



Figura 9 Elementos ópticos fabricados con materiales híbridos [12]

- **Biomedicina:** (figura 10) Otro campo de aplicación muy importante de este tipo de materiales es la industria biomédica. Especialmente en el caso de aleaciones de magnesio, ya que poseen propiedades muy interesantes como la biocompatibilidad con el cuerpo humano, unas tasas de corrosión moderadas y buenas propiedades mecánicas. Su uso potencial para productos ortopédicos y dispositivos cardiovasculares han sido estudiados en los últimos años. En el caso de dispositivos cardiovasculares son muy buena opción porque el cuerpo absorbe los implantes una vez ya cumplieron su función, sin necesidad de que sean retirados en una operación quirúrgica posterior. [16]



Figura 10 Composite como fijador externo de hueso [12]

- **Cables eléctricos:** (figura 11 y 12) existen materiales híbridos orgánicos-inorgánicos excelentes en resistencia al arco eléctrico, con muy buenas propiedades dieléctricas y de resistencia al calor. Además, poseen propiedades adhesivas y buenas propiedades mecánicas.



Figura 11 Power transmission cables with composite core. [17]



Figura 12 Baterías con elementos electrónicos fabricados con composites [12]

- **Aplicaciones estructurales:** (figura 13 y 14) como ya se ha mencionado anteriormente, son muchas las construcciones, como pueden ser puentes, en los que estos tipos de materiales han resultado ser una revolución en los últimos años. Lo más habitual, es el uso de tableros de FRP (Fibre Reinforced Polymer) sobre vigas metálicas, de hormigón o madera. Los tableros de FRP, además de no poseer armadura de acero (evitando así la resistencia a la corrosión), cuentan con un peso específico muy reducido y a la vez una alta resistencia mecánica. Al tener un bajo peso, su instalación es sencilla y rápida. En la figura podemos ver los tableros más comúnmente utilizados. [14]

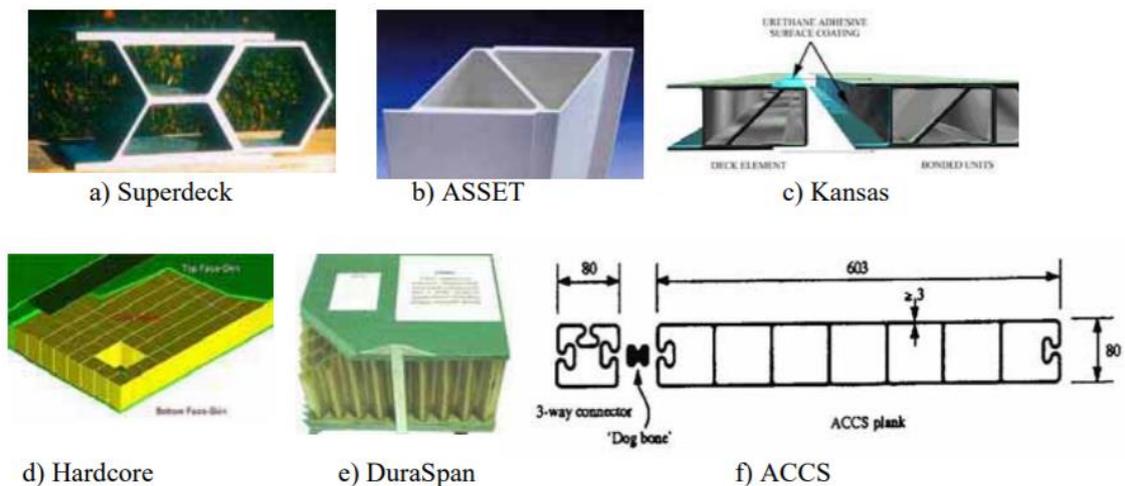


Figura 13 Tableros de FRP [14]



Figura 14 Primer puente de materiales compuestos construido en España (2004) [14]

Pero la gran mayoría de todas estas aplicaciones se refieren a materiales híbridos formados por un material orgánico y otro inorgánico. Aquí nos interesará más centrarnos en aquellos materiales híbridos formados por dos metales.

En las últimas décadas, el rendimiento, la eficiencia energética y el uso moderado de recursos naturales han cobrado una notable importancia en las nuevas tecnologías. Esto supone que la

industria está cada vez más centrada en trabajar con sistemas que reduzcan el consumo de energía. Una forma de conseguirlo es reemplazar los materiales tradicionales más pesados por otros más ligeros, como pueden ser las aleaciones ligeras y los polímeros. Este motivo ha influido especialmente en que la industria del transporte se haya centrado en descubrir nuevos materiales que favorezcan un ahorro de combustible y contaminación (figura 15). [18]

La reducción del 10% del peso de un vehículo puede suponer un ahorro de combustible de hasta un 8%. Para ello se ha recurrido a aleaciones de titanio, magnesio, aluminio y de fibra de carbono y compuestos poliméricos.

En la industria aeronáutica el ahorro de peso juega aún un papel más importante, por ello se usan aleaciones ligeras con el objetivo de ahorrar costes de forma significativa. [19]



Figura 15 Conjunto de freno de carbono de Boeing 767 [17]

Para conseguir estos materiales ligeros pero que a su vez posean unas buenas propiedades mecánicas y de resistencia al desgaste, inevitablemente se ha de recurrir a combinaciones de diferentes materiales, de los cuales la gran mayoría serán materiales híbridos.

Una aplicación relacionada con el sector automovilístico también es el uso de aleaciones magnesio-acero para mejorar la resistencia a los choques de los coches. Para ello, la aleación de acero-magnesio tradicional se sustituyó por un material con una estructura híbrida, mejorando notablemente la resistencia al impacto, además de ser un material más ligero que en el caso de las aleaciones tradicionales. [20]

2.3. Enfoque desde el punto de vista del mecanizado

Al tratarse de materiales relativamente recientes, aún se encuentra en estudio cómo afectan al mecanizado las buenas propiedades mecánicas que poseen y, aunque este tipo de estudios se ha

incrementado exponencialmente en los últimos años, aún es poca la bibliografía dedicada exclusivamente a este tema.

Uno de los retos más importantes en cuanto al mecanizado del material híbrido es la diferente maquinabilidad de los materiales que lo componen, por lo que es necesario un proceso de mecanizado específico para cada tipo de pieza en función de los materiales que la conforman. Este problema propiciará que aparezcan defectos en los acabados superficiales y que el mecanizado pueda ser demasiado costoso.

Además, un factor muy determinante a la hora de mecanizar las piezas fabricadas con materiales híbridos será su excelente resistencia al desgaste. Como se ha indicado anteriormente, esta es una de las características principales de este tipo de materiales y, aunque los convierte en una opción muy atractiva para ciertas aplicaciones, se presenta como un problema a la hora de darles forma a las piezas, ya que, para evitar un desgaste demasiado alto de la herramienta, habrá que poner especial atención a la elección de herramienta más adecuada.

2.3.1. Tipos de lubricantes para mecanizado de materiales híbridos

Al igual que con los materiales tradicionales, es importante identificar los mecanismos de desgaste que contribuyen a reducir la vida útil de la herramienta. Para ello, un elemento importante en el que nos deberemos fijar es en el método de refrigeración adecuado, cuyos efectos son diferentes en los materiales tradicionales frente a materiales híbridos.

MECANIZADO EN SECO

Aunque en algunos casos se sugiere que la utilización de un fluido de corte es redundante debido al uso del mecanizado en seco realizado con éxito en materiales en el pasado [21-23], lo habitual es que los resultados sean mejores al utilizar algún mecanismo de enfriamiento.

El mecanizado en seco genera normalmente un aumento significativo en la temperatura de mecanizado. Como consecuencia, es habitual la formación de una acumulación de borde, por lo que se somete el proceso de mecanizado a los beneficios e inconvenientes asociados con el borde acumulado. Además, el aumento de temperatura también aumenta el riesgo de desgaste por difusión, que ocurre cuando los átomos de la matriz de refuerzo y la herramienta se intercambian la punta. Esto nos llevará a tener una herramienta con una punta debilitada que impactará negativamente en las propiedades de la herramienta [24]. Se ha demostrado que los aumentos en la temperatura de mecanizado conducen a un aumento exponencial de la tasa de desgaste por difusión.

MECANIZADO POR INUNDACIÓN

El enfriamiento por inundación es un método muy habitual, que consiste en “inundar” la interfaz de la herramienta con refrigerante suministrado por una bomba de baja presión [25]. En los últimos años se ha disminuido su uso debido a sus efectos negativos sobre el medioambiente y la salud de las personas. El principal problema es la eliminación del refrigerante una vez su vida útil haya terminado (figura 16).



Figura 16 Ejemplo de mecanizado por inundación [26]

El uso de refrigerantes de corte tradicionales elimina la acumulación de borde de la herramienta utilizada y la erosión de las herramientas. En las investigaciones de Hung [27] se determina que, para materiales de matriz metálica (MMC), el fluido de corte ni aumenta ni disminuye la vida útil de la herramienta de corte. Aunque sí hay estudios que demuestran que el acabado superficial empeora ligeramente al usar este mecanismo de refrigeración en materiales híbridos [28][29].

MECANIZADO MEDIANTE LUBRICACIÓN DE CANTIDAD MÍNIMA (MQL)

En este tipo de mecanizado se aplica un aceite, una emulsión o agua mediante una fina pulverización sobre la interfaz de mecanizado. Es un método relativamente reciente que ha surgido como respuesta a las preocupaciones medioambientales del uso de enfriamiento por inundación. Se está convirtiendo en uno de los métodos más utilizados y son varios los estudios que se han realizado recientemente en referencia a su uso con materiales híbridos (figura 17).



Figura 17 Ejemplo herramienta para mecanizado MQL (www.blaser.com)

Solhjoei [30] realizó una serie de fresado a alta velocidad con herramientas de carburo sobre muestras de alúmina reforzada con aluminio. Los resultados sugirieron que el uso de MQL era satisfactorio cuando la alúmina estaba reforzada al 10 y 15%, sin embargo, no era satisfactorio para la alúmina estaba reforzada por encima del 20%. En cuanto al acabado superficial, se obtuvieron valores similares o mejorados frente al uso de refrigerante por inundación [31].

MECANIZADO CRIOGÉNICO

El mecanizado criogénico consiste en usar gases licuados para la refrigeración. Esta tecnología disminuye la temperatura de corte y se obtienen piezas totalmente limpias. Los resultados son similares o incluso mejores en comparación al mecanizado con taladrinas. Entre las ventajas de este mecanizado destacan la gran reducción de temperatura en la cara de desprendimiento, la obtención de piezas sin contaminantes de fluidos de corte, la reducción del desgaste de la herramienta, la alta tasa de producción, el ahorro energético y el ahorro en cuanto a gestión de las taladrinas frente a mecanizados convencionales (figura 18). [32]



Figura 18 Mecanizado criogénico (www.hergome.com)

En un estudio comparativo entre el taladrado en seco y refrigerado mediante CO₂ de materiales estratégicos para el sector aeronáutico, promovido por la empresa Hergome en el que participaron la Universidad de Cádiz y la Universidad de Vigo, se demostró que los resultados del mecanizado criogénico son mejores frente al mecanizado en seco (figura 19, 20).

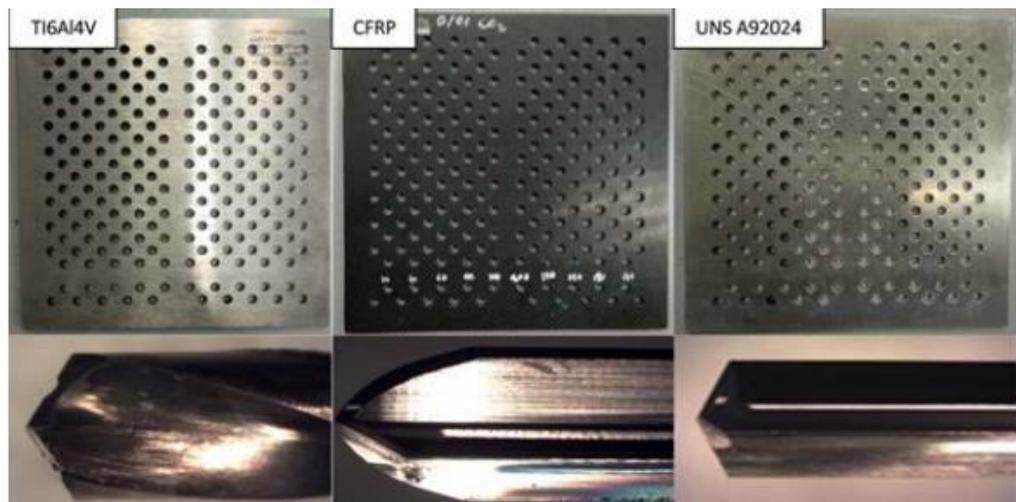


Figura 19 Probetas mecanizadas y geometrías de brocas empleadas por cada material.[32]

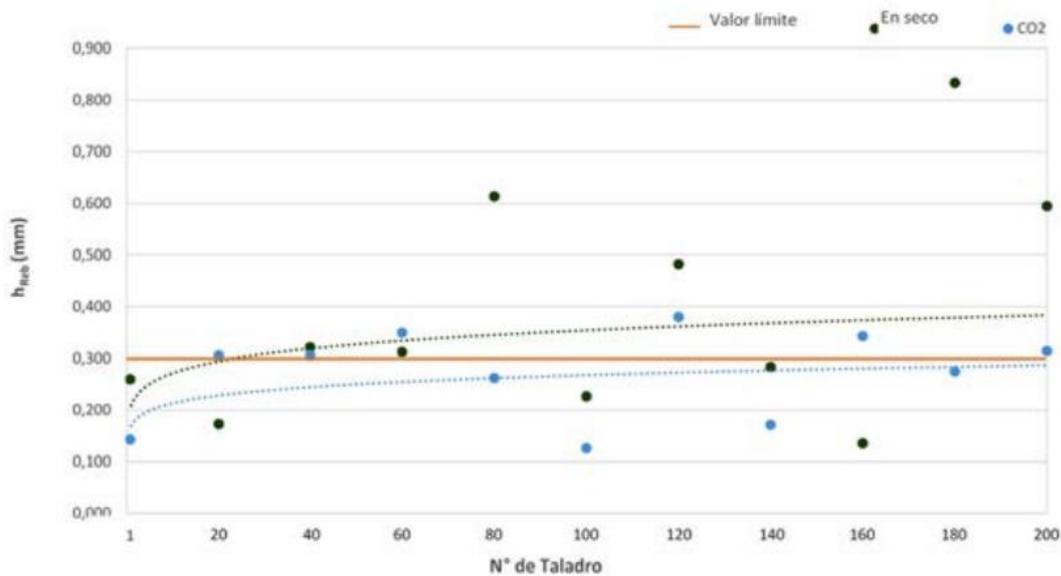


Figura 20 Altura de la rebaba máxima por taladro obtenido en la aleación UNS A97075.[31]

OTROS MÉTODOS DE REFRIGERACIÓN

Otro método de refrigeración estudiado para materiales híbridos es la refrigeración por aire comprimido. En un estudio de McGinty y Preuss [33] se comprobó que para perforar placas de aluminio reforzadas con un 55% de fibras de alúmina los resultados de desgaste de herramienta fueron notablemente mejores usando aire comprimido como refrigerante frente al enfriamiento por inundación.

Por otro lado, Shetty [34] estudió la viabilidad de utilizar vapor como refrigerante y lubricante. En todas las pruebas realizadas, se encontró que el vapor mejoraba las condiciones de corte.

La alta resistencia mecánica de los materiales híbridos influye negativamente en la vida útil de la herramienta. Para aumentar este parámetro, así como la tasa de eliminación de material o MRR (del inglés Material Removal Rate), se necesitará escoger cuidadosamente la selección de parámetros y condiciones de corte óptimos.

De entre los artículos revisados, nos hemos centrado en aquellos en los que al menos uno de los materiales del compuesto híbrido es un metal, debido al interés que despiertan actualmente por su uso en las industrias aeronáutica y automotriz.

De la bibliografía consultada podemos separar entre:

- Compuestos híbridos de matriz metálica
- Materiales reforzados compuestos de metales y fibra de carbono
- Aleaciones metálicas híbridas

Todos ellos se tratan de los denominados “materiales ligeros” tan usados en la industria automotriz y sobre todo en la industria aeronáutica, debido a la proporción tan interesante que presentan entre su peso y sus propiedades mecánicas. Sin embargo, debido a las diferentes características de la unión entre sus componentes, el mecanizado entre unos y otros varía significativamente, presentando en cada caso unos defectos debidos al mecanizado variados y la necesidad de los parámetros de mecanizado diferentes para cada uno de ellos.

2.3.2. Compuestos híbridos de matriz metálica

Han sido varios los artículos encontrados acerca de nanocompuestos híbridos a base de un metal con partículas de refuerzo, como por ejemplo compuestos de magnesio o aluminio reforzados con grafeno. Estos son producidos mediante normalmente pulvimetalurgia.

Estos materiales son muy usados en la industria automotriz, como por ejemplo para fabricar discos de freno o ejes de transmisión.

El factor más determinante a la hora de determinar los parámetros de mecanizado será la cantidad de partículas de refuerzo que tenga el compuesto. A más partículas, menos mecanizable será y más resistencia opondrá a la herramienta. Es muy importante seleccionar adecuadamente los parámetros de mecanizado en función de la composición del material para mejorar al máximo la vida útil de la herramienta y al mismo tiempo optimizar el tiempo y acabado del mecanizado.

2.3.3. Materiales reforzados compuestos de metales y fibra de carbono

En este caso uno de los materiales que conforman el híbrido será un metal, habitualmente Titanio, Magnesio o Aluminio, y el otro material se trata de un polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP). Este tipo de materiales tiene una estructura laminar, alternando láminas de metal con láminas del polímero.

En este caso la diferente maquinabilidad entre el metal y el polímero será el factor más determinante para realizar un mecanizado exitoso con pocos defectos. Además de tener esto en cuenta, habrá que prestar especial atención a la unión entre ambos materiales, pues será el punto más crítico y susceptible de sufrir daños durante el mecanizado. Los defectos en esta zona serán denominados “delaminación”, pues ocurren en la separación de las capas que componen el material y que supone una significativa pérdida de resistencia mecánica del material.

La delaminación será más susceptible de aparecer cuando la primera capa a mecanizar es la de metal y la segunda del polímero. Por otro lado, cuando se comienza el mecanizado por la capa del polímero la delaminación es más inusual [35].

Mecanizar materiales de diferente maquinabilidad requiere además el uso de geometrías de corte específicas y estrategias de mecanizado complejas, esto significa un aumento en el tiempo de mecanizado y los costes operativos.

Se ha demostrado que es posible mecanizar piezas de estos materiales mediante diversas técnicas alcanzando rugosidades superficiales y acabados que satisfacen los estándares aeronáuticos. Uno de estos métodos es el mecanizado por chorro de agua abrasivo (AWJM del inglés Abrasive Water Jet Machining), que ha demostrado ser una buena opción por sus buenas tasas de eliminación de material y bajas fuerzas de corte y mecanizado de diferentes materiales al mismo tiempo.

2.3.4. Aleaciones metálicas híbridas

Al igual que en el caso de metales reforzados con fibras de carbono, la disposición de los diferentes materiales que forman el compuesto híbrido será en capas (denominadas fases intermetálicas – IMP del inglés Intermetallic phase), con la diferencia de que en este caso los materiales serán todos metálicos. La unión se realiza habitualmente mediante soldadura con rayo láser. Habitualmente los materiales más usados en estas combinaciones serán el magnesio, el aluminio y el titanio, por su abundancia, sus buenas propiedades mecánicas en relación a su peso.

En estas piezas el punto más crítico del mecanizado también será la unión entre las diferentes capas y deberá ponerse especial atención a los parámetros de mecanizado.

Por otro lado, también el mecanizado de este tipo de materiales se realiza desde el punto de vista del mantenimiento, siendo el taladrado una de las operaciones de este tipo más comunes en la industria aeronáutica. Para ensamblar piezas generalmente se realizan una gran cantidad de taladros para que las piezas puedan unirse posteriormente mediante remaches. Estos taladros suelen estar sometidos a fatiga y deben revisarse regularmente, pues pequeños daños pueden causar la rotura de la pieza con consecuencias graves.

Tal y como se ha mencionado previamente, los requerimientos en cuanto a acabados y rugosidades superficiales en la industria aeroespacial y aeronáutica son muy exigentes, esta será la principal preocupación a la hora de estudiar el mecanizado en estas piezas. Aunque se ha visto que la rugosidad superficial en el taladrado de estas piezas aumenta según aumenta la profundidad, es posible mantenerse en el rango admisible y realizar taladros que cumplan con los requerimientos.

2.4. Aleaciones de Magnesio

Como se indicó anteriormente, las aleaciones de magnesio son muy usadas en las industrias automotriz, aeroespacial y biomédica, debido a su baja densidad y buena resistencia mecánica, además de su biocompatibilidad. Sin embargo, también hay propiedades que limitan su uso, como pueden ser su baja rigidez y los problemas de corrosión.

Las aleaciones de magnesio presentan un menor peso que las aleaciones de aluminio.

La aleación de Mg realizada mediante forja ofrece una mayor resistencia que otros métodos, porque da un grano pronunciado sin poros y con una composición uniforme después del proceso de elongación [36].

En aplicaciones automotrices estas aleaciones muestran un muy buen desempeño debido a su rigidez y la alta absorción de vibraciones, así como un excelente rendimiento de corte. Por otra parte, debido a su baja resistencia a la corrosión, es posible que en aleaciones de magnesio se produzca una falla por fatiga por corrosión bajo ambientes no corrosivos.

Las aleaciones de magnesio pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- **Aleaciones por fundición:** se fabrican vertiendo el metal fundido en un molde, donde solidifica con la forma requerida. Estas aleaciones están formadas por varios elementos además del magnesio, pero no pueden superar el 10% de la aleación total. Estos elementos suelen ser aluminio, manganeso y zinc. Con tratamientos térmicos posteriores pueden mejorarse las propiedades mecánicas de estas aleaciones.
- **Aleaciones por forja:** son aleaciones sometidas a trabajo mecánico como operaciones de forja, extrusión y laminación para alcanzar la forma deseada. Los principales elementos además del magnesio son también el aluminio, el manganeso y el Zinc. A su vez, estas aleaciones se clasifican en tratables térmicamente y no tratables térmicamente.

En la tabla 3 pueden verse algunas de las aplicaciones de las aleaciones de magnesio en la industria automotriz:

Tabla 3 Aplicaciones de las aleaciones de magnesio en la industria automotriz [36]

Pieza	Marca
Carcasas de transmisión	Volkswagen, Audi, Mercedes Benz, BMW, Ford, Jaguar, Daewoo, Volvo, Porsche
Paneles de instrumentación	GM, Chrysler, Ford (Ranger, Aero Star 1994), Audi, Toyota, Hyundai, Honda
Culata	Dodge, Honda, Alfa Romeo, Daewoo, BMW, Ford, Isuzu, Volvo, Hyundai, KIA, GM (Corvette)
Componentes de dirección	Ford, Chrysler (Jeep 1993), Toyota, BMW, Lexus, GM, Hyundai, KIA
Armazón del asiento y otros componentes	GM, Mercedes Benz, Lexus, Hyundai, KIA
Cárter	Ford, Ghrysler (LH midsize 1993)
Bloque motor	BMW
Ruedas/llantas	GM, Toyota, Alfa Romeo, Porsche, AG, Marti Suzuki
Pedales de embrague y freno	GM
Otros	Alfa-Romeo, Porsche

2.4.1. Propiedades térmicas y mecánicas de las aleaciones de magnesio

Comparado con el aluminio, el magnesio presenta mejor maquinabilidad, sin embargo, debido a su baja resistencia mecánica el magnesio debe alearse con otros materiales para su uso en aplicaciones reales. Para ello se han desarrollado sistemas comerciales de aleación de magnesio forjado, como los sistemas AZ, ZK y WE. En China se está formando una industria a gran escala para producir láminas de aleación de magnesio en masa. A partir de diversas investigaciones están desarrollando resistencias de aleaciones de magnesio y un nuevo sistema de aleación, que refuerza el refinamiento de grano y los efectos de precipitación y textura. En la tabla 4 se muestra una comparación de las propiedades mecánicas de las aleaciones de magnesio frente a las aleaciones de aluminio y acero [36].

Tabla 4 Propiedades de las aleaciones de magnesio, aleaciones de aluminio y acero [36]

Propiedad	Aleaciones de magnesio	Aleaciones de aluminio	Hierro fundido
Estructura cristalina	hcp	FCC	BCC
Densidad (MG/m ³)	1,74-1,95	2,5-2,9	7,05-7,25
Temperatura de fusión T _m (°C)	447-649	475-677	1130-1250
Módulo de Young E (Gpa)	42-47	68-82	165-180
Límite elástico (Mpa)	70-400	30-500	215-790
Resistencia a la tracción (Mpa)	185-475	58-550	350-1000
Tenacidad (deformación plana) k _{IC} (Mpa √m)	12-18	22-35	22-54
Conductividad térmica λ (W/mK)	50-156	76-235	29-44
Dilatación térmica α (10 ⁻⁶ /°C)	24,6-28	21-24	10-12,5

Las ventajas de las aleaciones de magnesio podrían resumirse en:

- Tienen la densidad más baja de todos los materiales de construcción metálicos (1.7 g/cm³)
- Alta resistencia específica
- Buena colabilidad, adecuada para la fundición a presión
- Se puede torneear y fresar a alta velocidad
- Buena soldabilidad bajo atmósfera controlada
- Cuanta más pureza en magnesio tenga la aleación, mejor resistencia a la corrosión presenta
- Disponibilidad en el mercado

Además, comparado con aleaciones de aluminio, presenta las siguientes ventajas:

- Su calor latente es bajo, así puede producir más fundición por unidad de tiempo
- Tiene mejor calidad superficial
- Alta resistencia específica

Por otra parte, si comparamos los materiales poliméricos con las aleaciones de magnesio, estas últimas:

- Poseen mejores propiedades mecánicas
- Son más resistentes al envejecimiento
- Tienen mejor conductividad eléctrica y térmica
- Son reciclables

Y, no menos importantes, como desventajas de las aleaciones de magnesio podremos destacar:

- Limitada tenacidad en frío
- Baja resistencia mecánica a temperaturas elevadas
- Alto grado de contracción en la solidificación
- Alta reactividad química
- En algunas aplicaciones tienen una resistencia a la corrosión limitada

Una de las desventajas más importantes de las aleaciones de magnesio es que tienen baja resistencia a la corrosión. Esto limita mucho su uso en las industrias automotriz y aeroespacial. Para solventar estos problemas de corrosión pueden realizarse tratamientos superficiales [37, 38], como los recubrimientos poliméricos. Estos recubrimientos son muy útiles cuando la pieza en cuestión está expuesta a ambientes agresivos.

Uno de los usos muy frecuentes de las aleaciones de magnesio es en aplicaciones biomédicas, como por ejemplo implantes ortopédicos temporales e implantes cardiovasculares [39, 40]. Estas aleaciones son más compatibles con el hueso humano que otras aleaciones como el acero inoxidable o las aleaciones de titanio. Sin embargo, la degradación del magnesio en entornos fisiológicos juega en la contra de estas aplicaciones, sufriendo en ocasiones una descomposición demasiado rápida, incluso antes de que los tejidos cicatricen completamente [41, 42]. Si estos problemas de corrosión de las aleaciones de magnesio son resueltos, su aplicación en la ingeniería biomédica crecería mucho.

En la tabla 5 se muestra la resistencia ambiental de las aleaciones de magnesio, aleaciones de aluminio y aleaciones de acero.

Tabla 5 Comportamiento del Mg, Al y acero ante diferentes ambientes [36]

Material	Inflamabilidad	Agua dulce	Agua salada	Luz solar (UV)	Resistencia al desgaste
Aleaciones Mg	Muy buena	Muy buena	Mala	Muy buena	Media
Aleaciones Al	Buena	Muy buena	Buena	Muy buena	Media
Hierro fundido	Muy buena	Buena	Media	Muy buena	Muy buena

Las aleaciones de magnesio son por tanto una buena opción para aplicaciones automotrices, aeroespaciales y biomédicas, siempre teniendo en cuenta sus limitaciones. Poseen una buena amortiguación y buena capacidad de resistencia al calor, sobre todo en comparación con otros materiales. Atendiendo a las limitaciones de estas aleaciones, es importante encontrar un equilibrio entre el uso y la fabricación de las mismas para asegurar una buena funcionalidad y seguridad. De cara al futuro, se necesitarían aleaciones con una mayor resistencia a la corrosión y a la fatiga, así como mejorar los precios de fabricación y mejorar la biocompatibilidad. También sería interesante conseguir una mayor rigidez y resistencia a la fluencia.

La investigación en temas como la aleación de magnesio forjada será muy importante en el futuro para mejorar las aplicaciones de las aleaciones de magnesio y mejorar el rendimiento en las industrias automotriz y aeroespacial [36].

2.5. Aleaciones de Aluminio

El aluminio es el material no ferroso más consumido en el mundo. Aproximadamente el 75% del aluminio es “aluminio primario”, es decir, aluminio extraído del mineral. Por contra, el aluminio secundario es aquel extraído de chatarra o restos de aluminio que han sido usados previamente.

Con el paso de los años se ha tenido que ir mejorando las propiedades del aluminio con el fin de poder competir con nuevos materiales con ventajas muy competitivas y más baratos. Los fabricantes de aluminio han ido explorando nuevas tecnologías de producción para reducir costes y llegar a materiales con mejores propiedades [43].

Aunque es el primer metal y el tercer elemento químico más abundante en la tierra, hasta hace unos 150 años el aluminio en su forma metálica era desconocido para los humanos. La explicación reside en que, a diferencia del hierro o el cobre, no existe como metal en la naturaleza, siempre se encuentra combinado con otros elementos. A finales del siglo XIX se descubrió cómo extraer el aluminio de forma económica a partir de óxido de aluminio mediante un proceso electrolítico. Ahora mismo es el segundo metal natural más usado en el mundo, sólo superado por el hierro.

Las aleaciones de aluminio son muy usadas en productos que usamos a diario, desde el papel de aluminio y latas de bebidas hasta elementos estructurales de coches y aviones. Una combinación de buenas propiedades mecánicas junto con la facilidad de producir estas aleaciones, explican que sean tan usadas hoy en día, además de ser fácilmente reciclables.

Para analizar las propiedades de estas aleaciones las separaremos en dos grupos [44]:

- Aleaciones forjadas: formadas mecánicamente por extrusión, forja o laminación.
- Aleaciones fundidas: formadas mediante fundición.

2.5.1. Propiedades de las aleaciones de aluminio forjadas

- Baja densidad
- Alto ratio fuerza-peso
- Excelente resistencia a la corrosión
- Alta conductividad térmica
- Alta conductividad eléctrica
- Alta reflectividad
- Alta tenacidad a la fractura y capacidad de absorción de energía
- Resistencia a la fatiga

- Bajo módulo elástico
- Buena maquinabilidad
- Fácilmente reciclable

2.5.2. Propiedades de las aleaciones fundidas de aluminio

Las características de las aleaciones de forja son aplicables también a las aleaciones fundidas, sin embargo, la elección de una aleación fundida u otra recaerá en su capacidad para cumplir con una o más de las características siguientes [44]:

- Facilidad de fundición
- Calidad del acabado
- Alta resistencia, especialmente a altas temperaturas
- Alta tenacidad

2.5.3. Limitaciones de las aleaciones de aluminio

Hay varias características de las aleaciones de aluminio a las que hay que prestar especial atención a la hora de diseñar o elegir una aleación u otra. Las principales son [42]:

- Módulo de elasticidad: el módulo de elasticidad del aluminio es mucho inferior al del acero, por lo que en aplicaciones estructurales puede generar problemas.
- Temperatura de fusión: su temperatura de fusión se encuentra entre 570 y 650 °C, mucho menor que la del acero, por lo que para aplicaciones donde esté sometido a grandes temperaturas (conductos de humos, puertas contraincendios) no suele ser la mejor opción. Aunque es importante resaltar que incluso en los incendios más intensos, las aleaciones de aluminio no se queman, por lo que son considerados no combustibles.
- Resistencia a la corrosión: algunas aleaciones de aluminio presentan una baja resistencia a la corrosión, por lo que es recomendable someterlas a algún tratamiento térmico para evitar que esto se produzca.
- Incompatibilidad con mercurio: nunca deben usarse aleaciones de aluminio cuando puedan estar en contacto directo con mercurio, ya que pueden sufrir una fragilización de los límites de grano.

2.5.4. Sistema de designación de las aleaciones forjadas de aluminio

En el caso de las aleaciones forjadas de aluminio, la “Aluminum Association” estableció un sistema de cuatro dígitos numéricos que a veces pueden llevar un prefijo o sufijo alfabético. El primer dígito define la clase principal de la aleación, el segundo variaciones de la aleación básica original y los dígitos tercero y cuarto designan la aleación específica dentro de la serie [44].

Según el primer dígito las aleaciones forjadas de aluminio serán:

- 1XXX: aluminio puro o sin ningún elemento añadido intencionadamente.
- 2XXX: el principal elemento de aleación es el cobre.

- 3XXX: el principal elemento de aleación es el manganeso.
- 4XXX: aleaciones basadas en silicio.
- 5XXX: aleaciones basadas en magnesio.
- 6XXX: aleaciones basadas en magnesio y silicio.
- 7XXX: tienen como principal elemento de aleación el Zinc.
- 8XXX: contienen elementos usados mucho menos frecuentemente como acero o estaño
- 9XXX: aleaciones sin asignación.

2.5.5. Sistemas de designación de las aleaciones de aluminio fundido

Para este tipo de aleaciones la designación es similar, pero con algunas diferencias importantes. También consta de cuatro dígitos, pero entre el tercero y el cuarto se usa un punto decimal para identificar aleaciones en forma de piezas fundidas o lingote de fundición. Dependiendo del primer dígito, las aleaciones de aluminio fundido serán [42]:

- 1XX.X: aluminio puro o casi puro.
- 2XX.X: el principal elemento de aleación es el cobre.
- 3XX.X: aleaciones basadas en silicio con cobre y/magnesio.
- 4XX.X: aleaciones basadas en silicio.
- 5XX.X: el elemento de aleación es el magnesio.
- 6XX.X: no se usa.
- 7XX.X: zinc como elemento principal de aleación.
- 8XX.X: aleaciones basadas en estaño.
- 9XX.X: el elemento principal de aleación es cualquier otro.

2.5.6. Mecanizado de piezas de aleaciones de aluminio

Las aleaciones de aluminio son fácilmente mecanizables y ofrecen ventajas como velocidades de corte muy altas, buen control dimensional, baja fuerza de corte y excelente vida útil de la herramienta [44].

Entre las herramientas que se usan para mecanizar este tipo de materiales destacan:

- Aceros endurecidos con agua
- Aceros rápidos
- Aleaciones duras de fundición

- Carburos sinterizados
- Diamantes

Los procesos de mecanizado que suelen usarse con para mecanizar aleaciones de aluminio son los convencionales: torneado, taladrado, rectificado, fresado, etc.

2.5.7. Acabados del aluminio

Son muchos los procedimientos de acabado que se le pueden dar a las aleaciones de aluminio. Éstos pueden ser mecánicos, químicos, electroquímicos o aplicados. Uno de los acabados más comunes es el anodizado. Consiste en darle una capa de óxido transparente y gruesa mediante una solución de ácido sulfúrico. También es habitual el acabado denominado anodizado duro, para dotar a la pieza de mayor resistencia al desgaste. Se realiza mediante una combinación de ácidos que producen una capa densa de milésimas de espesor en la pieza tratada [44].

2.5.8. Aplicaciones de las aleaciones de aluminio

A continuación, se muestran las tablas 6, 7 y 8 que resumen las aplicaciones y características de las diferentes aleaciones de aluminio.

Tabla 6 Características y aplicaciones de las aleaciones de aluminio forjadas

	CARACTERÍSTICAS	APLICACIONES
1XXX	Endurecible Resistencia a la corrosión y conductividad eléctrica muy altas Fácilmente soldable	Láminas y tiras para embalaje, carrocerías de vagones o camiones cisterna, aplicaciones eléctricas
2XXX	Pueden tratarse térmicamente Alta resistencia a temperaturas elevadas En algunos casos son soldables	Alas de aeronaves y piezas de fuselaje, carrocerías de camiones, aplicaciones aeroespaciales
3XXX	Alta formabilidad y resistencia a la corrosión Soldable Endurecible por deformación	Utensilios de cocina, herramientas, techos y revestimiento
4XXX	Tratable térmicamente Buenas características de fluidez y resistencia media Admite soldadura	Pistones forjados para aviones, aleación de relleno para aplicaciones automotrices y estructurales

5XXX	Endurecible por deformación Excelente resistencia a la corrosión, tenacidad, fuerza moderada Soldables	Edificación, construcción (tanques de almacenamiento y recipientes a presión), industria automotriz y marina (plataformas de perforación), tanques criogénicos
6XXX	Tratable térmicamente Alta resistencia a la corrosión, muy buena capacidad de extrusión y resistencia moderada Soldable	Elementos arquitectónicos y estructurales, chasis de automóviles
7XXX	Tratable térmicamente Muy alta resistencia y alta tenacidad	Industria aeronáutica, tuberías de perforación
8XXX	Tratable térmicamente Alta conductividad, resistencia y dureza	Aplicaciones aeroespaciales

Tabla 7 Características y aplicaciones de las aleaciones de aluminio fundido

	CARACTERÍSTICAS	APLICACIONES
2XX.X	Tratable térmicamente, fundiciones en arena y molde permanente Alta resistencia a temperatura ambiente y elevada, algunas aleaciones de alta tenacidad	Industria aeroespacial, componentes sometidos a grandes esfuerzos en construcción y máquinas herramienta, ingeniería eléctrica (carcasas de interruptores). Algunas aleaciones especiales para cabezas de pistón de motor o cojinetes.
3XX.X	Tratable térmicamente, molde de arena, permanente y fundición a presión. Excelente fluidez, alta resistencia y algunas aleaciones alta tenacidad Soldable	Las más usadas. Aplicaciones críticas (ruedas de automóviles)
4XX.X	No es tratable térmicamente, molde arena, molde permanente y fundición a presión	Piezas fundidas complejas, carcasas, equipos dentales

	Excelente fluidez	les, componentes industria naval y aplicaciones arquitectónicas
5XX.X	No tratable térmicamente Resistente al vaciado, buenas características de acabado Excelente resistencia a la corrosión y maquinabilidad	Puertas, herrajes Fundiciones a presión con anodizado decorativo
7XX.X	Tratable térmicamente Molde de arena y molde permanente Excelente maquinabilidad	Aplicaciones donde el acabado es importante: muebles, herramientas, máquinas de oficina.
8XX.X	Tratable térmicamente Molde arena y molde permanente Excelente maquinabilidad	Cojinetes y casquillos

Tabla 8 Aplicaciones de las aleaciones de aluminio según el sector de mercado

Industria eléctrica	Cables conductores, torres eléctricas
Construcción	puentes, fachadas, revestimientos, estructuras de viviendas
Industria automotriz	Chasis, carrocería, defensa, tubos de aire acondicionado e intercambiadores de calor, ruedas
Industria aeroespacial	Revestimientos del fuselaje, estructuras del ala, componentes del motor, hélices, remaches
Transporte marítimo	Material del casco, vigas estructurales, estaciones en alta mar
Transporte ferroviario	Travesaños, paneles exteriores
Envases	Papel de aluminio, latas y cierres
Industria química y petroquímica	Tuberías, recipientes a presión

2.6. Aleaciones de Titanio

El titanio es un metal de baja densidad que puede ser reforzado significativamente mediante procesos de aleación y deformación. Se trata de un material no magnético y tiene buenas propiedades de transmisión de calor. El titanio puro sin alear tiene entre 99.5% y 99% de titanio, siendo los elementos adicionales más comunes el acero, carbono, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno [45].

En cuanto a las aleaciones de titanio, presentan una alta resistencia a la tracción y buena tenacidad. Son ligeros y poseen una extraordinaria resistencia a la corrosión, así como una buena capacidad para soportar temperaturas extremas. Además, son moldeables y fácilmente mecanizables. Todas estas propiedades convierten a esta aleación en una buena opción para estructuras aeroespaciales y aplicaciones de alto rendimiento.

Aunque el titanio es muy abundante en la naturaleza, no fue descubierto hasta el siglo XXVIII, probablemente porque en la naturaleza se encuentra siempre unido a otros elementos [45].

El titanio comercial puro tiene unas propiedades mecánicas aceptables y ha sido usado para implantes dentales y ortopédicos, sin embargo, lo más habitual es que se use en sus formas aleadas.

2.6.1. Propiedades generales y clases de las aleaciones de titanio

El titanio existe en dos formas cristalográficas. El titanio sin alear tiene una estructura cristalina hexagonal compacta (hcp), conocida como fase alfa (ALPHA). Cuando alcanza cierta temperatura (aproximadamente 885°C) la estructura cristalina cambia a una estructura bcc, conocida como fase beta (BETA). Así, podremos clasificar las aleaciones de Titanio en [46]:

- Aleaciones Alfa: suelen contener elementos como aluminio y estaño y se usan para aplicaciones a alta temperatura. No pueden ser reforzadas con tratamientos térmicos y no son tan resistentes como las aleaciones beta.
- Aleaciones Beta: contienen elementos como vanadio, niobio y molibdeno. Pueden ser templados y tratados térmicamente. Además, presentan una alta resistencia a la fractura.
- Aleaciones Alfa+Beta: las propiedades mecánicas de estas aleaciones son algo intermedio de las dos aleaciones antes mencionadas.

Cada elemento de la aleación tiene un efecto sobre el tipo de aleación. En la figura 14 se muestran los diagramas de fase de las aleaciones de titanio según el tipo y los elementos de aleación. Por otra parte, en la figura 15, se muestra un diagrama tridimensional de las fases alfa y beta en función de la temperatura y el porcentaje de los elementos de aleación.

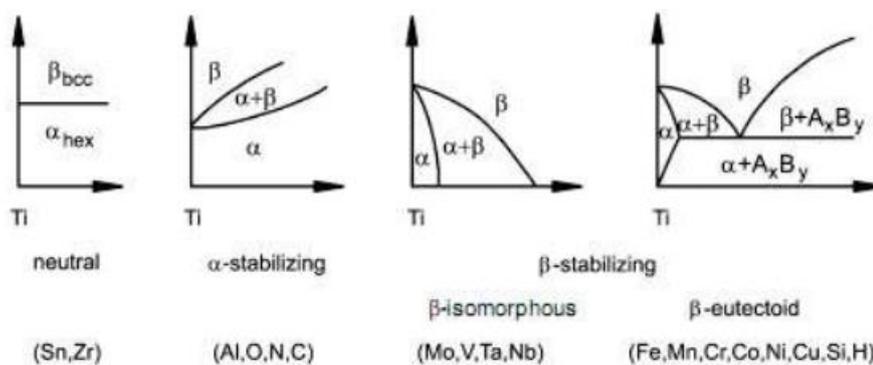


Figura 21 Efectos de los elementos de aleación en los diagramas de fase de las aleaciones de titanio [46]

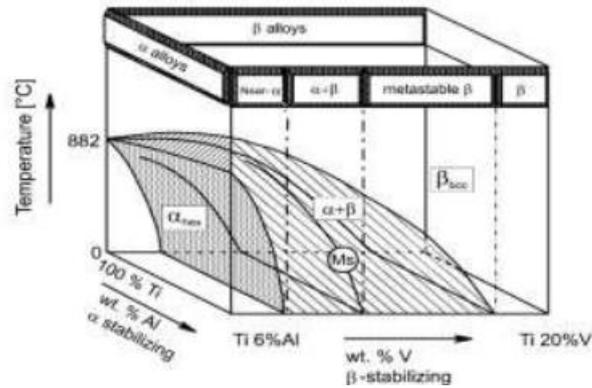


Figura 22 Diagrama tridimensional de la clasificación del titanio según su fase [46]

Generalmente el titanio de fase alfa es más resistente y menos dúctil, pero la fase beta es más dúctil. El dióxido de titanio se disuelve en el metal a altas temperaturas, lo que provoca que el titanio, excepto el más puro, tiene una cantidad significativa de oxígeno disuelto, lo que podría considerarse una aleación Ti-O. Los precipitados de óxido ofrecen cierta resistencia, pero no responden muy bien al tratamiento térmico y pueden disminuir sustancialmente la tenacidad de la aleación.

El nitinol, una aleación con memoria de forma, es una mezcla de titanio y níquel, mientras que las aleaciones de niobiotitanio se utilizan como alambres para imanes superconductores.

Gran número de aleaciones contienen además titanio como un aditivo en menor cantidad, por lo que no son oficialmente denominadas “aleaciones de titanio”.

Aunque el titanio es un metal muy ligero, es fuerte y tan resistente como el acero. También es el doble de resistente que el aluminio y sólo un 60% más pesado. [47]

La densidad del titanio es de 4.54 g/cm^3 , intermedia entre la del aluminio y la del hierro, y su punto de fusión es $1668 \text{ }^\circ\text{C}$. El titanio puro se puede laminar en frío a temperatura ambiente hasta una reducción del espesor superior al 90% sin que se produzcan grietas importantes.

2.6.2. Aplicaciones de las aleaciones de titanio

Las aplicaciones principales del titanio y sus aleaciones se resumen en dos áreas donde sus características justifican su selección: donde su resistencia a la corrosión juega un papel muy importante y en estructuras donde se necesita una gran resistencia.

Para aplicaciones de gran resistencia a la corrosión normalmente se usan productos de titanio sin alear de menor resistencia. Algunos ejemplos de esta aplicación serían: tanques, intercambiadores de calor, recipientes de reactores para procesamiento químico y plantas de desalinización y generación de energía. Otros usos importantes son prótesis y piezas de válvulas cardíacas.

Por otro lado, algunos ejemplos de aplicaciones donde se requiera una gran resistencia son: turbinas de gas, fuselaje de aviones, equipos de perforación, implantes biomédicos y cuadros de bicicletas. Estas aleaciones se producen bajo requisitos más estrictos y costosos que el titanio sin alear. [48, 49]

Como apuntamos anteriormente, las dos grandes ventajas del titanio y sus aleaciones son su baja densidad y su gran resistencia.

Recientemente se está usando mucho el titanio y sus aleaciones en la industria del procesamiento del petróleo, especialmente para intercambiadores de calor. Al ser resistente a los sulfuros, cloruros y otros productos químicos, su uso en refinerías es muy común.

El titanio sin alear, que se usa cuando su aplicación no requiere una gran resistencia, se usa en estructuras de aire, equipos de desalinización, piezas en ambientes marinos, intercambiadores de calor, motores de aeronaves, tubos de condensadores y evaporadores, implantes quirúrgicos, ventiladores, compresores de gas. [47, 48]

Dentro de las aleaciones de titanio más usadas se encuentra la Ti-5Al-2.5Sn. Se trata de una aleación alfa, debido a la presencia de aluminio y estaño. Es soldable y posee una buena estabilidad y resistencia a la oxidación a temperaturas elevadas. Puede soldarse y usarse para piezas forjadas y de chapa, de ahí su aplicación para álabes y motores de aviones. También tiene un buen comportamiento a baja temperatura. En resumen, es soldable, tiene buena resistencia a la fluencia y a la tenacidad, alta resistencia y baja ductilidad.

La aleación de titanio más usada es la Ti-6Al-4V. También es soldable y puede forjarse y mecanizarse fácilmente. Se usa para muchos productos de laminación, extrusión, alambres y varillas. Otro uso resaltable es el de forja de artillería.

Para aplicaciones donde la aleación deba trabajar a altas temperaturas y con alta resistencia, como los motores de reacción, se han desarrollado aleaciones como: Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo y Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.25Si.

En cuanto a las aleaciones alfa-beta, sus principales aplicaciones se centran en carcasas de cohetes, compresores de aeronaves, recipientes a presión, equipos de artillería, componentes marinos, fuselajes de aeronaves, y componentes para motores a reacción. Este tipo de aleaciones tienen las mayores resistencias de todas las aleaciones de titanio. Se han comercializado muchas aleaciones desde que se formó la industria y estas se usan en aviones, misiles y cohetes, ya que la alta resistencia a altas temperaturas y su bajo peso son ideales para estas aplicaciones.

Por último, una de las aleaciones beta más usadas es la Ti-15Mo-2.7Nb—3Al-0.2Si y tiene una excelente resistencia a la oxidación, buenas propiedades de tracción y una buena resistencia a la corrosión y al hidrógeno. Se usa en aplicaciones a altas temperaturas durante tiempo prolongado.

Sin embargo, el alto coste del titanio ha disminuido el uso de sus aleaciones en los últimos años, aunque ha sido uno de los materiales clave en la industria aeronáutica y espacial [48]. Esto se debe a las exigentes propiedades que requieren estos componentes. Deben poseer una gran eficiencia entre resistencia y estabilidad a temperaturas elevadas, así como una buena resistencia a la rotura por tensión y fatiga.

Resumiendo, el titanio y sus aleaciones poseen estas propiedades:

- Alta resistencia a la tracción
- Alta resistencia a la tenacidad

- Baja densidad
- Excelente resistencia a la corrosión
- Buen comportamiento a altas temperaturas
- No reacciona con el cuerpo humano, por lo que es una buena opción para prótesis

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE ENSAYOS

El mecanizado de componentes híbridos supone un reto en cuanto a la optimización de los parámetros de corte, aunque existan recomendaciones de las condiciones de corte y herramientas a emplear para los diferentes componentes individuales, puede que estas recomendaciones no sean las más adecuadas cuando los materiales se mecanizan formando parte de un conjunto ya que presentan diferentes características de corte, así como distintas durezas.

Por tanto, para optimizar los procesos de mecanizado de los componentes híbridos es necesario realizar ensayos que permitan estudiar las diferentes variables que influyen en el resultado y sus posibles interacciones, así como poder analizar y buscar las mejores condiciones de corte (parámetros de corte, herramientas, lubricantes) para su mecanizado.

Con el fin de realizar el estudio se ha determinado utilizar un diseño factorial completo 2^3 por un bloque de dos factores 3×2 con tres replicaciones de acuerdo con el nivel de refrigeración en cada caso (Seco, MQL, Criogénico).

Un paso previo a la realización del estudio consiste en definir el modelo donde se realizarán los ensayos, o del modelo donde llevar a cabo dichos ensayos.

Se realizaron en el laboratorio del Departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación de la ETSII UNED diferentes ensayos de taladrado para posteriormente analizar los resultados obtenidos. La máquina que se usó es el centro de mecanizado Tongtai TMV510 (Figura 23) equipado con control numérico Fanuc series oi-MC. Por otro lado, las mediciones de rugosidad superficial se realizaron con un equipo de metrología óptica de medición sin contacto Alicona (Figura 24).



Figura 23 Centro de mecanizado Tongtai TMV510



Figura 24 Equipo de metrología óptica Alicona

La probeta sobre la que se realizó el taladrado consistió en distintos materiales intercalados, de forma que la broca atravesará de un material a otro durante el mecanizado. Una vez taladrado se midió la rugosidad superficial en los distintos materiales.

La probeta (Figuras 25, 26, 27) que se usó está dispuesta a modo de sándwich con la combinación de:

- Aleación de aluminio UNS A96061
- Aleación de titanio UNS R56400
- Aleación de aluminio UNS A96061

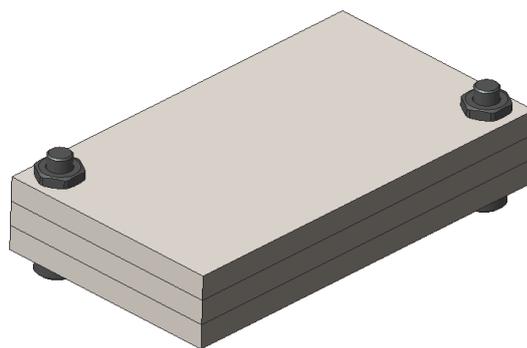


Figura 25 Disposición tipo sándwich de la probeta

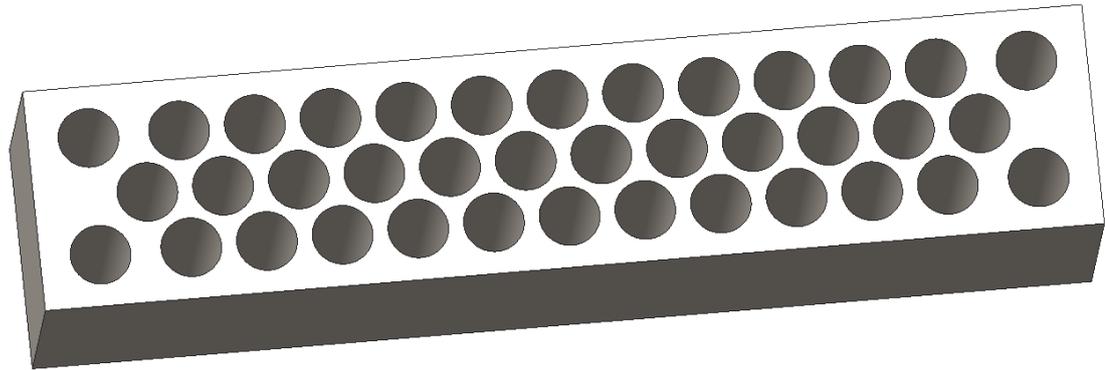


Figura 26 Simulación de taladros en la probeta

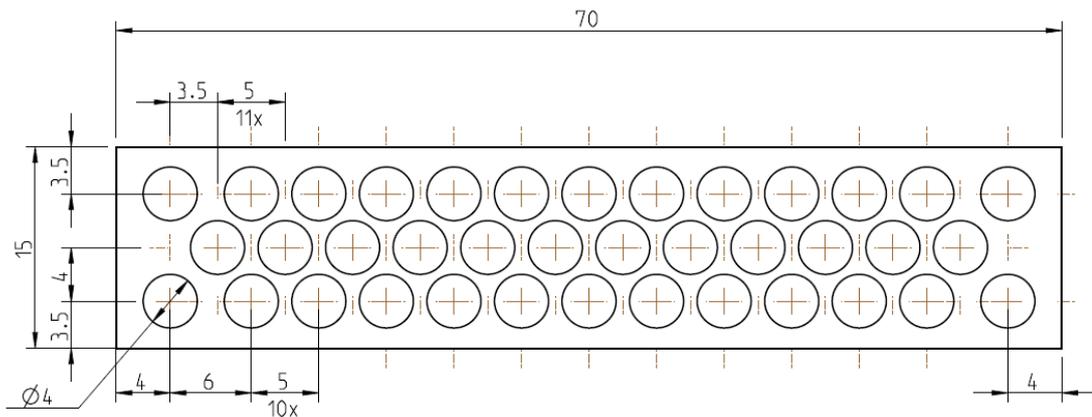
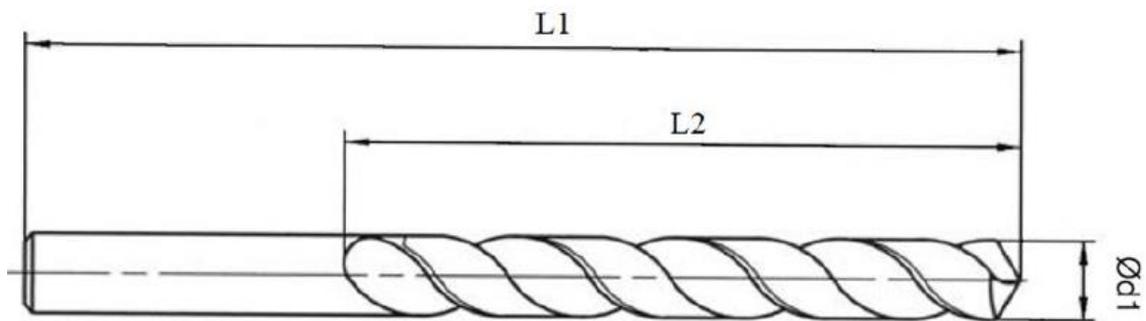


Figura 27 Posiciones del taladrado en la probeta

Esta probeta simula la reparación de alojamientos en cubiertas que son unidas por elementos como los remaches, unión ampliamente utilizada en aeronáutica. Las propiedades de las herramientas son las siguientes:

- Diámetro 3,3 mm
- Fabricante Garant
- Al 1240 con recubrimiento TiAlN; Al 1244 con 8% de cobalto y Al 1253 con recubrimiento de TiN
- Brocas helicoidales con mango cilíndrico tipo INOX de acero ultrarrápido con ángulo de punta 130° y núcleo reforzado para una resistencia más alta al desgaste y mayor estabilidad (Figura 28)

Estas brocas suelen usarse para el taladrado de aceros, aceros inoxidables, aleaciones de titanio, aleaciones de aluminio y aleaciones de cobre.



Parámetros(mm)	
d1	3,3
L1	65
L2	36

Figura 28 Broca para taladrado

Ya que la intención es simular operaciones de reparación y mantenimiento, los valores elegidos de los factores de velocidad de giro y avance son los más adecuados para dichas operaciones. Los parámetros escogidos fueron (ver tabla 9):

- Velocidades de giro de husillo: 637 rpm y 796 rpm
- Avance de herramienta: 50 mm/min y 100 mm/min
- Método de refrigeración: MQL (mínima cantidad de lubricante), criogénico y seco.

Tabla 9 Parámetros elegidos y sus niveles

Factores	Niveles (notación)	Niveles (valores)		
Avance, f (mm/min)	$f1, f2$	50		100
Velocidad de giro, S (rpm)	$S1, S2$	637		796
Herramienta, T	$T1$	A1 1240	A1 1244	A1 1253
Refrigeración		MQL	Criogénico	Seco
Posición relativa respecto del inserto, LRI	$LRI1, LRI2, LRI3$	Antes del inserto	En el inserto	Tras el inserto
Posición relativa respecto de la probeta, LRS	$LRS1, LRS2$	Inicio de la probeta	Fin de la probeta	

Para el factor de posición relativa respecto de la probeta se tomaron dos niveles: uno al inicio de la probeta (LRS1) y otro al final de la probeta (LRS2). Por otro lado, para el factor de posición

relativa respecto del inserto se tomaron tres niveles: antes del inserto (LRI1), en el inserto (LRI2) y después del inserto (LRI3).

A la hora de realizar el ensayo se ha observado que los valores al principio y al final de la probeta eran muy similares, por lo que se han obviado las mediciones al final de la probeta (LRS2). Sí se han tomado las medidas de rugosidad superficial antes del inserto (LRI1), en el inserto (LRI2) y después del inserto (LRI3) (Figura 29).

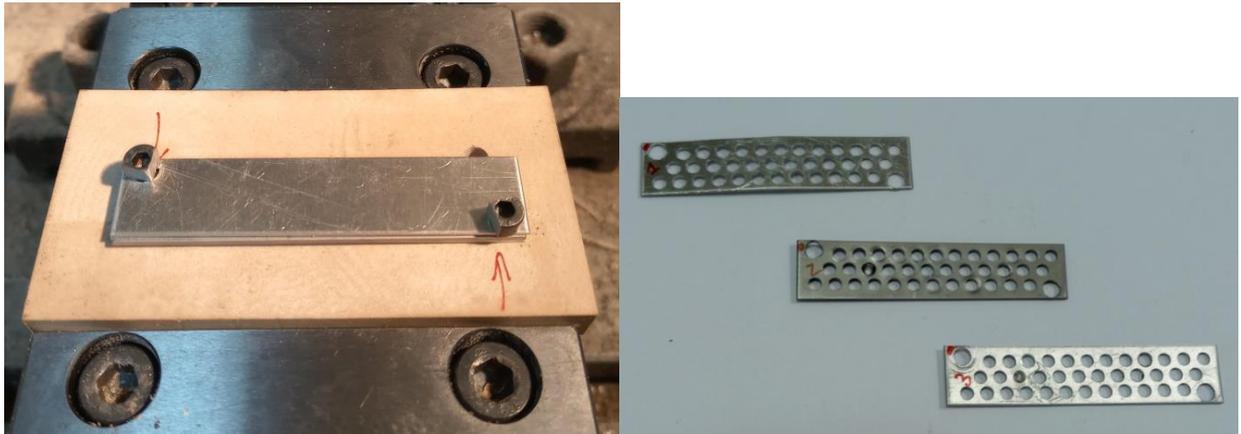


Figura 29 Imagen de la sujeción de la probeta y los diferentes insertos desmontados

Para sistematizar los ensayos de mecanizado y que no haya diferencias entre ellos, todos los ensayos se realizaron siguiendo los siguientes pasos:

1. Colocar en el centro de mecanizado la probeta a mecanizar.
2. Sujetar en el portaherramientas la herramienta a ensayar.
3. Introducir los parámetros de corte (velocidad de giro y avance) y el tipo de herramienta a utilizar.
4. Mecanizar los taladros según el plano de la pieza antes mostrado.
5. Retirar cuidadosamente la herramienta utilizada y fotografiarla en diferentes posiciones para apreciar las alteraciones sufridas durante el mecanizado. Si hubiera alteraciones, almacenar las fotografías.
6. Retirar la probeta mecanizada.
7. Limpiar la zona de recogida de viruta.

Antes de proceder con el procedimiento de medición, se realizaron los siguientes pasos:

1. Trazar sobre las probetas las zonas específicas para realizar el posicionamiento a la hora de medir la rugosidad superficial.
2. Colocar los elementos auxiliares necesarios, conectar el equipo y realizar la calibración del mismo.

3. Elaborar los protocolos adecuados para el registro de mediciones de rugosidad (con ayuda del software disponible).

En nuestro caso, la medición se realizó:

1. Colocando sobre el bloque en V la probeta mecanizada.
2. Realizando el posicionamiento para proceder con las mediciones.
3. Realizando la medición de la rugosidad superficial en las zonas especificadas anteriormente de la probeta.

El análisis de rugosidad se realizará primero con valores de Ra y después con valores de Rz. Estas dos magnitudes son las más usadas actualmente para medir la rugosidad, son un método fiable para medir la calidad del acabado superficial de un proceso de mecanizado. Ra y Rz se calculan de forma diferente.

Ra se calcula mediante un algoritmo que mide la longitud media entre los picos y valles y la desviación de la línea media en toda la superficie dentro de la longitud de muestreo. Luego neutraliza los puntos periféricos para que los puntos extremos no tengan un impacto significativo en los resultados finales.

Por contra, Rz se calcula midiendo la distancia vertical desde el pico más alto hasta el valle más bajo dentro de 5 longitudes de muestreo, realizando después la media de estas distancias. Por lo tanto, Rz sólo tiene en cuenta los 5 picos más altos y los 5 valles más profundos, a diferencia de Ra, por lo que los extremos tienen una influencia mucho mayor en el valor final.

3.1. Estudio de la rugosidad según Ra

Tras la realización de los ensayos y seguir todos los procedimientos indicados previamente, se registraron los resultados obtenidos en diversas tablas (Tablas 10, 11 y 12), en función del tipo de lubricante utilizado.

Tabla 10 Refrigerante MQL (mínima cantidad de lubricante)

AVANCE	VELOCIDAD	RECUBRIMIENTO	LRI1	LRI2	LRI3
			Ra	Ra	Ra
50	637	Al 1244	1,769	1,124	1,203
50	637	Al 1240	1,125	1,153	1,006
50	637	Al 1253	1,482	0,9	1,37
100	796	Al 1244	1,286	1,461	1,461
100	796	Al 1240	1,444	0,947	0,992
100	796	Al 1253	0,703	1,243	1,225
50	796	Al 1244	1,03	1,098	1,396
50	796	Al 1240	1,76	0,878	1,166
50	796	Al 1253	1,057	1,026	1,314
100	637	Al 1244	1,09	0,88	0,977
100	637	Al 1240	1,561	1,08	0,898
100	637	Al 1253	1,087	0,905	1,192

Tabla 11 Refrigerante CRIOGÉNICO

AVANCE	VELOCIDAD	RECUBRIMIENTO	LRI1	LRI2	LRI3
			Ra	Ra	Ra
50	637	Al 1244	1,314	1,463	1,291
50	637	Al 1240	1,416	1,229	1,265
50	637	Al 1253	1,458	1,374	1,257
100	796	Al 1244	1,492	1,134	1,64
100	796	Al 1240	2,31	1,329	1,489
100	796	Al 1253	1,953	1,394	1,259
50	796	Al 1244	2,152	1,152	1,668
50	796	Al 1240	2,242	1,033	1,266
50	796	Al 1253	2,242	1,392	1,335
100	637	Al 1244	1,889	0,966	1,791
100	637	Al 1240	2,416	1,13	1,585
100	637	Al 1253	1,382	1,188	1,152

Tabla 12 Mecanizado en seco

AVANCE	VELOCIDAD	RECUBRIMIENTO	LRI1	LRI2	LRI3
			Ra	Ra	Ra
50	637	Al 1244	1,791	1,445	1,154
50	637	Al 1240	1,504	1,395	1,367
50	637	Al 1253	3,904	1,988	2,132
100	796	Al 1244	1,789	1,151	1,32
100	796	Al 1240	1,15	1,248	1,579
100	796	Al 1253	1,922	1,157	1,511
50	796	Al 1244	1,677	1,055	1,006
50	796	Al 1240	2,17	1,013	1,292
50	796	Al 1253	3,103	1,051	1,265
100	637	Al 1244	2,332	1,071	1,092
100	637	Al 1240	1,305	0,975	1,377
100	637	Al 1253	1,253	0,923	1,575

En base a los datos recogidos, se realiza el análisis ANOVA de efectos fijos considerando las interacciones de orden 5. Se elimina un factor cada vez (en caso de P-Value mayor que 0,05). Los factores y sus interacciones que resultan estadísticamente significativas son aquellos cuyo P-Value es menor que 0,05.

Los resultados del análisis ANOVA se muestran en la tabla 13:

Tabla 13 Análisis ANOVA Ra

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	99	22,9918	0,23224	7,37	0,003
Linear	8	8,9836	1,12295	35,61	0
Avance	1	0,3397	0,3397	10,77	0,011
Velocidad de Corte	1	0,0202	0,0202	0,64	0,447
Herramienta	2	0,208	0,10399	3,3	0,09
Refrigerante	2	2,7954	1,39769	44,33	0
LRI	2	5,6203	2,81016	89,12	0
2-Way Interactions	25	5,1435	0,20574	6,52	0,005
Avance x Velocidad de corte	1	0,1172	0,11715	3,72	0,09
Avance x Herramienta	2	0,8878	0,44392	14,08	0,002
Avance x Refrigerante	2	0,6073	0,30365	9,63	0,007
Avance x LRI	2	0,3825	0,19123	6,06	0,025
Velocidad de corte x Herramienta	2	0,0508	0,02541	0,81	0,48
Velocidad de Corte x Refrigerante	2	0,3543	0,17717	5,62	0,03
Velocidad de corte x LRI	2	0,0466	0,02328	0,74	0,508
Herramienta x Refrigerante	4	1,4209	0,35522	11,27	0,002
Herramienta x LRI	4	0,0743	0,01856	0,59	0,68
Refrigerante x LRI	4	1,2019	0,30048	9,53	0,004
3-Way Interactions	38	6,7444	0,17748	5,63	0,007
Avance x Velocidad de Corte x Herramienta	2	0,3477	0,17385	5,51	0,031
Avance x Velocidad de Corte x Refrigerante	2	0,4853	0,24264	7,7	0,014
Avance x Velocidad de Corte x LRI	2	0,5434	0,2717	8,62	0,01
Avance x Herramienta x Refrigerante	4	0,8603	0,21507	6,82	0,011
Avance x Herramienta x LRI	4	0,6393	0,15983	5,07	0,025
Avance x Refrigerante x LRI	4	0,7101	0,17753	5,63	0,019
Velocidad de Corte x Herramienta x Refrigera- nte	4	0,3004	0,07509	2,38	0,138
Velocidad de Corte x Herramienta x LRI	4	0,3591	0,08979	2,85	0,097
Velocidad de Corte x Refrigerante x LRI	4	0,4281	0,10703	3,39	0,066
Herramienta x Refrigerante x LRI	8	2,0706	0,25883	8,21	0,004
4-Way Interactions	28	2,1203	0,07572	2,4	0,099
Avance x Velocidad de Corte x Herramienta x Refrigerante	4	0,5525	0,13813	4,38	0,036
Avance x Velocidad de Corte x Herramienta x LRI	4	0,2986	0,07464	2,37	0,139
Avance x Velocidad de Corte x Refrigerante x LRI	4	0,1591	0,03979	1,26	0,36
Avance x Herramienta x Refrigerante x LRI	8	0,833	0,10413	3,3	0,055
Velocidad de Corte x Refrigerante x LRI	8	0,277	0,03463	1,1	0,449
Error	8	0,2523	0,03153		
Total	107	23,244			

Los factores para los cuales el valor P ha resultado ser menor que 0,05 son el Refrigerante, la posición respecto del inserto LRI y el avance. El porcentaje de contribución de cada fuente estadísticamente significativa se muestran en la tabla 14.

Tabla 14 Porcentaje de contribución de cada fuente estadísticamente significativa

LRI	24,18
Refrigerante	12,03
Herramienta*Refrigerante*LRI	8,91
Herramienta*Refrigerante	6,11
Refrigerante*LRI	5,17
Avance*Herramienta	3,82
Avance*Herramienta*Refrigerante	3,70
Avance*Refrigerante*LRI	3,05
Avance*Herramienta*LRI	2,75
Avance*Refrigerante	2,61
Avance*Velocidad de Corte*Herramienta*Refrigerante	2,38
Avance*Velocidad de Corte*LRI	2,34
Avance*Velocidad de Corte*Refrigerante	2,09
Avance*LRI	1,65
Velocidad de Corte*Refrigerante	1,52
Avance*Velocidad de Corte*Herramienta	1,50
Avance	1,46

En las figuras 30, 31 y 32 se representan gráficamente los efectos de los factores LRI, Refrigerante y Avance:

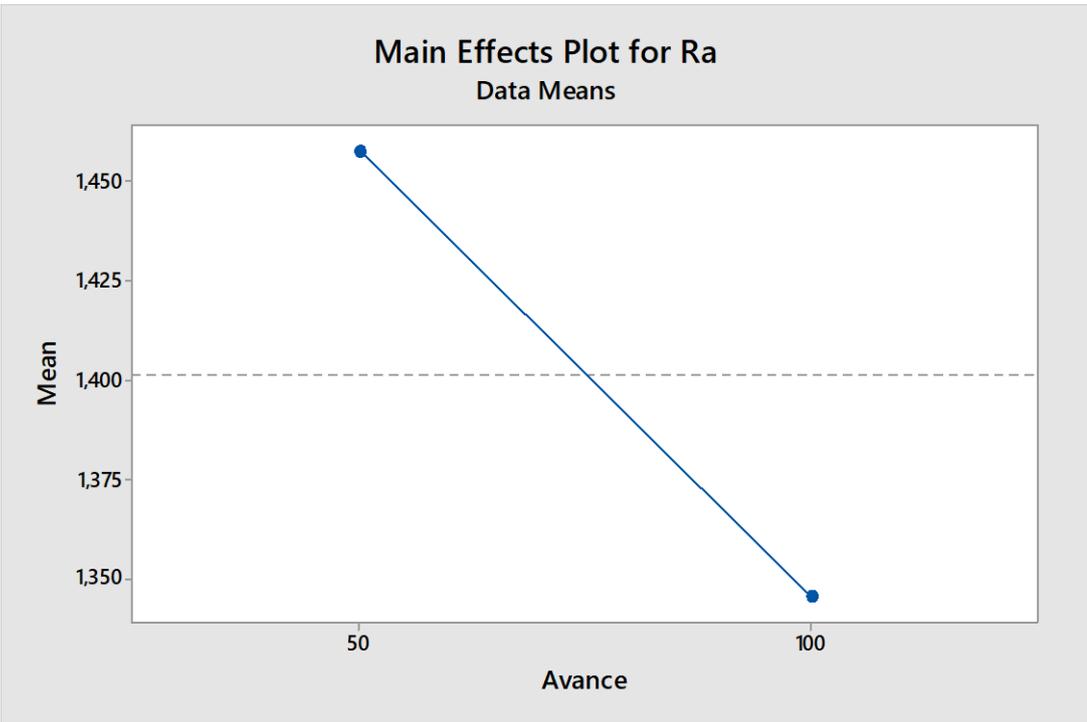


Figura 30 Efecto del avance

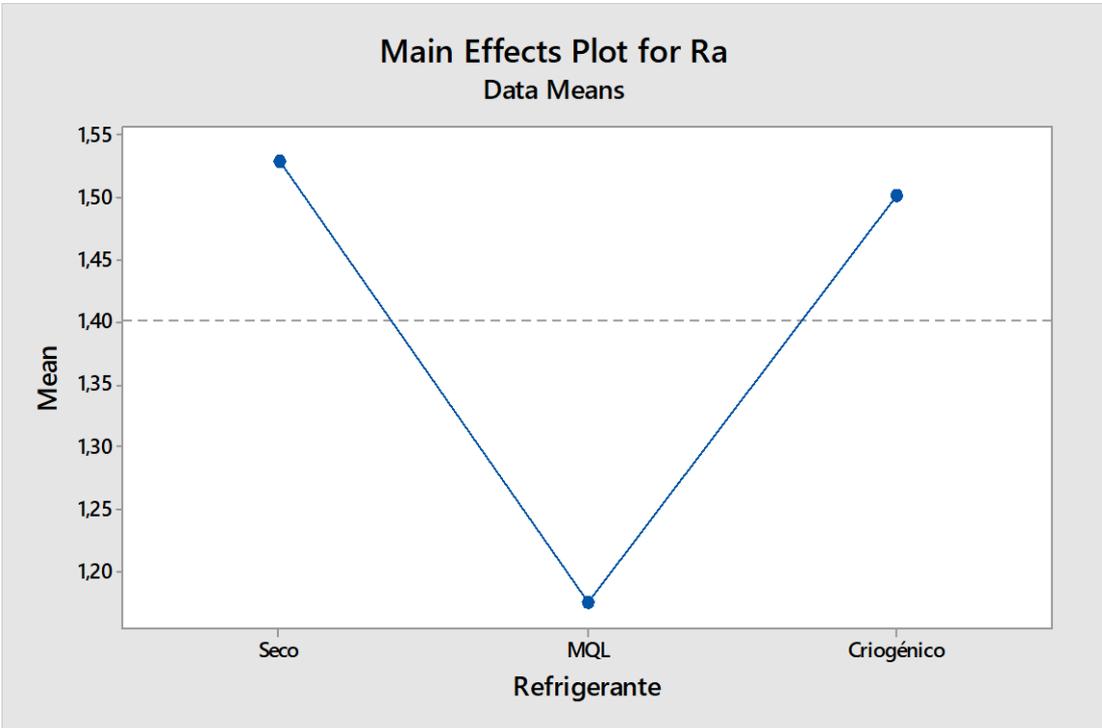


Figura 31 Efecto del refrigerante

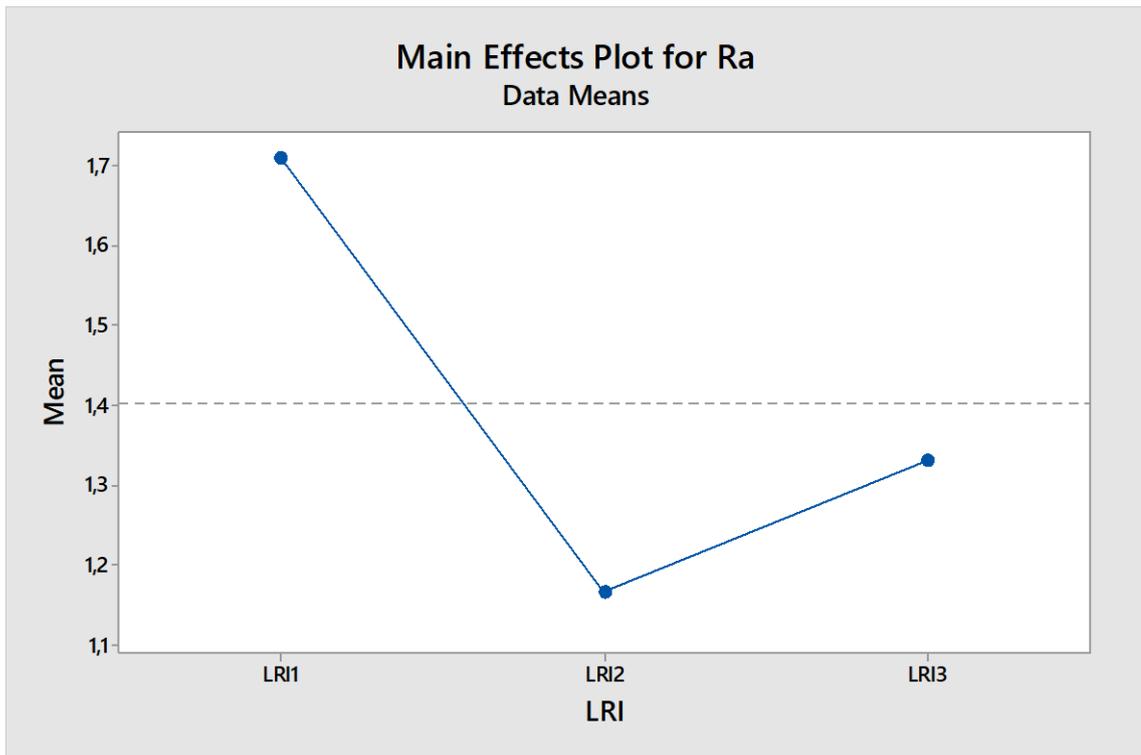


Figura 32 Efecto de la posición respecto del inserto LRI

De las tres figuras anteriores, podemos destacar que, teniendo sólo en cuenta el parámetro de avance de la herramienta, la rugosidad será menor a un avance de 100 mm/min que teniendo en cuenta un avance de 50 mm/min. En el caso del parámetro del refrigerante, la rugosidad es menor usando la técnica MQL que con refrigeración en seco o criogénica. Esto confirma lo ya comentado en el apartado 2.3.1. donde se adelantaba que con la técnica MQL se obtenían mejores valores de rugosidad que usando refrigerante por inundación [31]. De la tercera gráfica podemos deducir que la rugosidad del primer inserto será ligeramente mayor que en los dos insertos siguientes.

A continuación, se muestran las gráficas resultantes del análisis ANOVA en función de su porcentaje de contribución a la variabilidad de los valores de Ra (de mayor a menor).

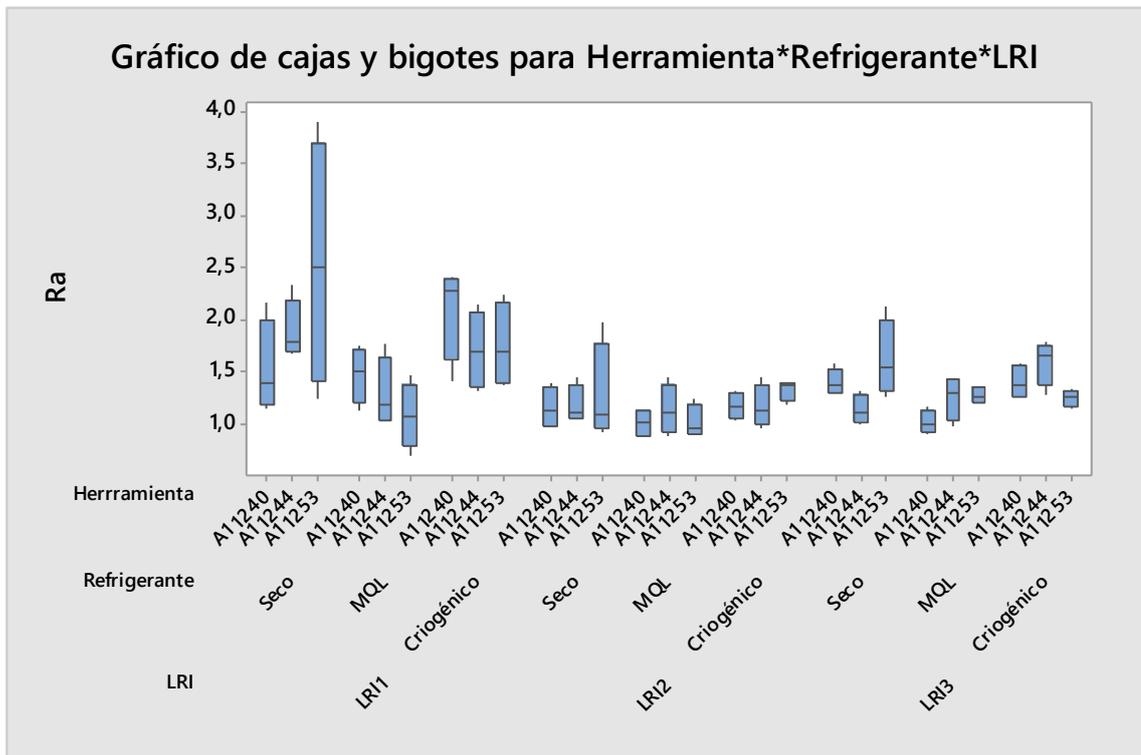


Figura 33 Herramienta-Refrigerante-LRI vs Ra

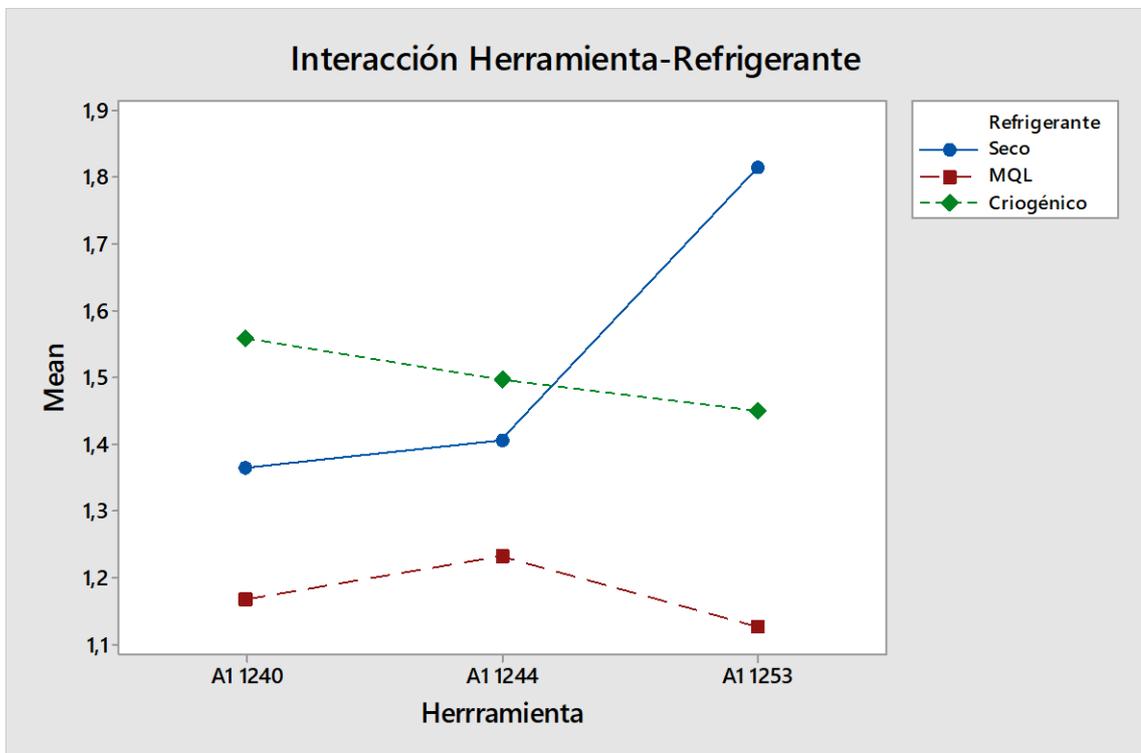


Figura 34 Herramienta-Refrigerante vs Ra

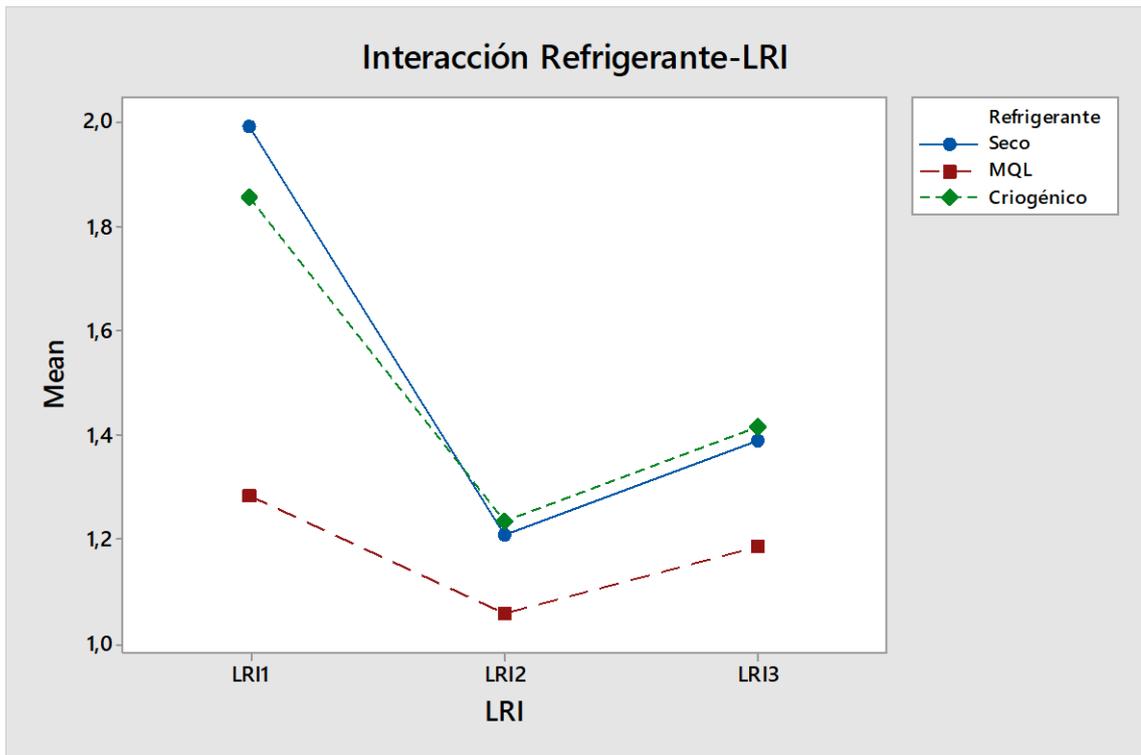


Figura 35 Refrigerante-LRI vs Ra

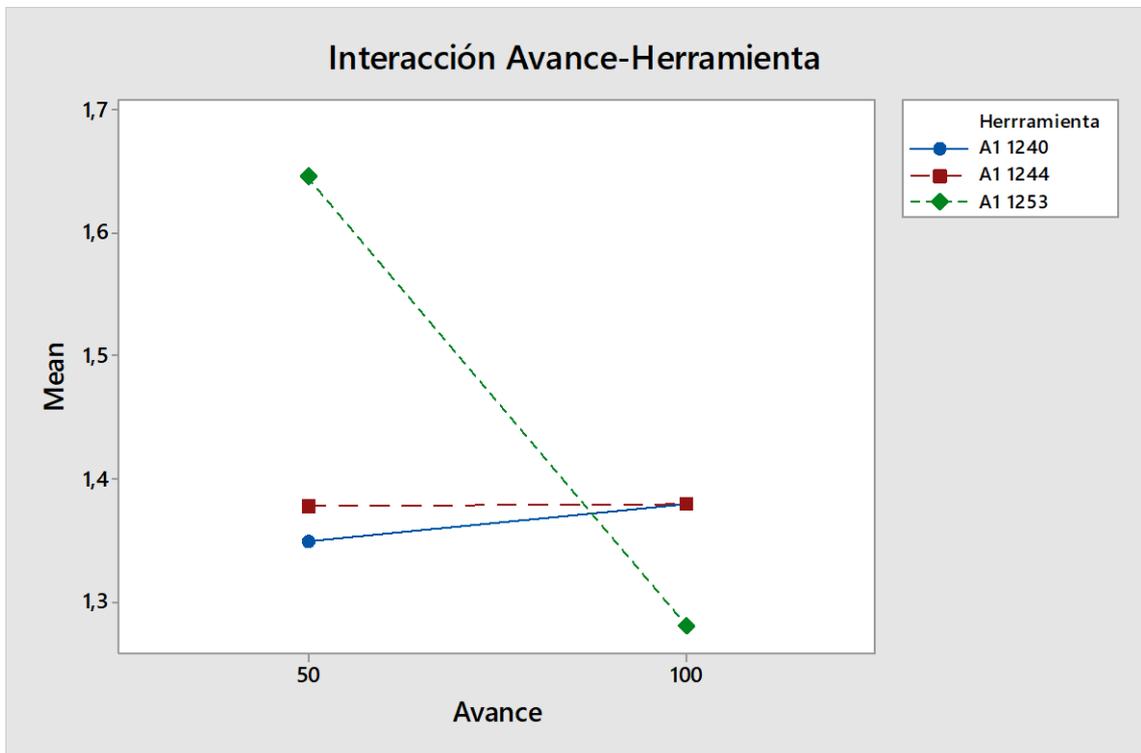


Figura 36 Avance-Herramienta vs Ra

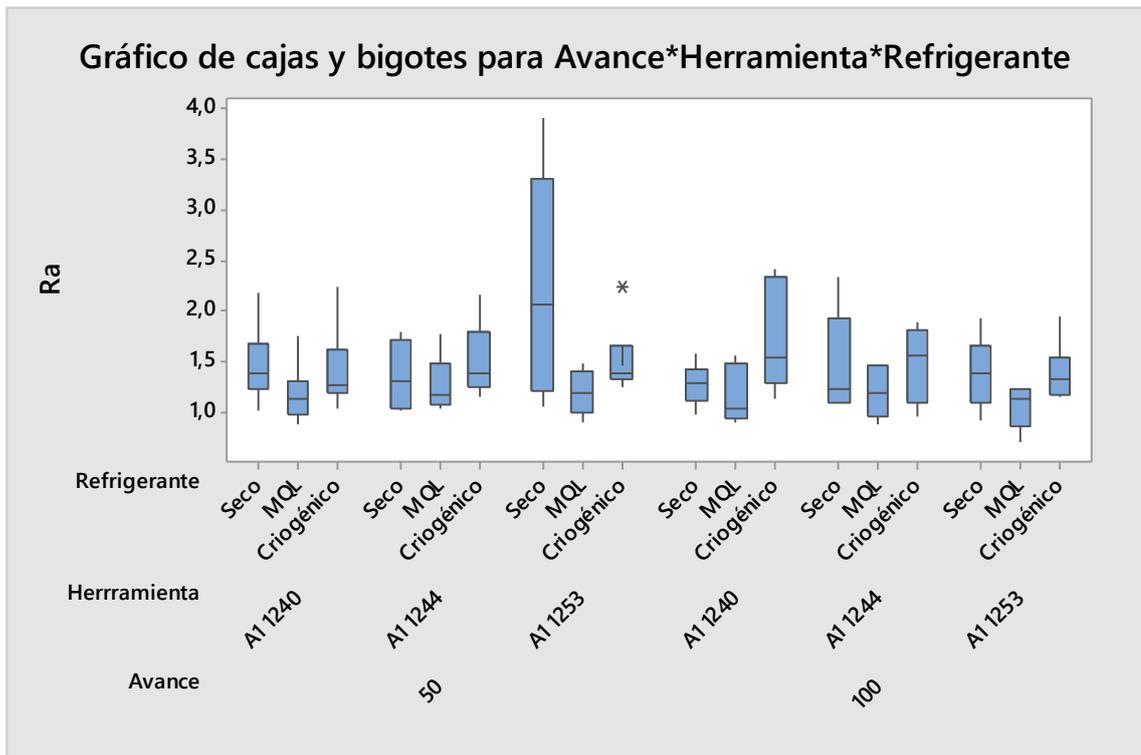


Figura 37 Avance-Herramienta-Refrigerante vs Ra

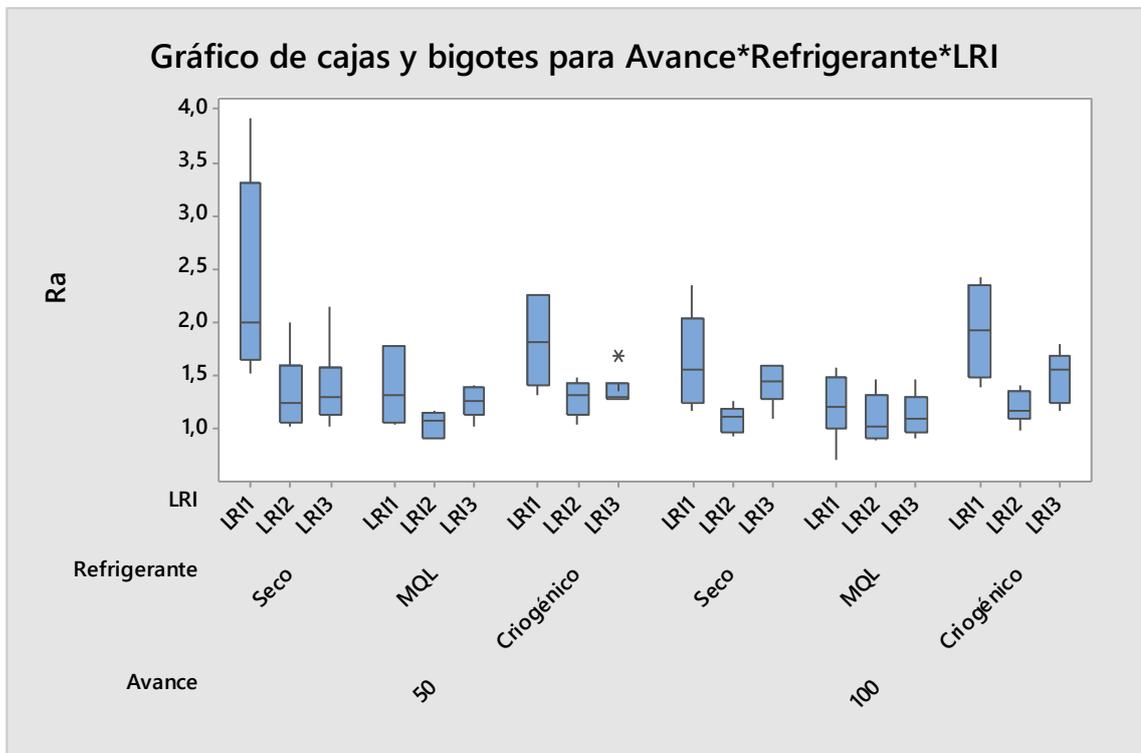


Figura 38 Avance-Refrigerante-LRI vs Ra

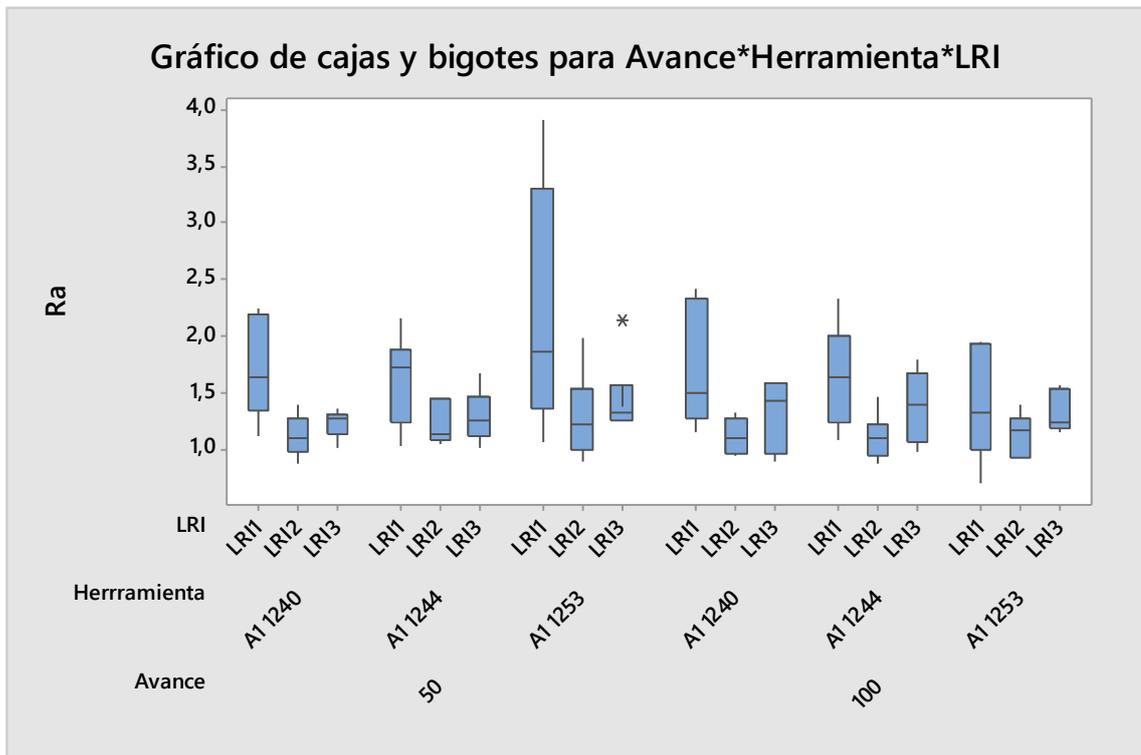


Figura 39 Avance-Herramienta-LRI vs Ra

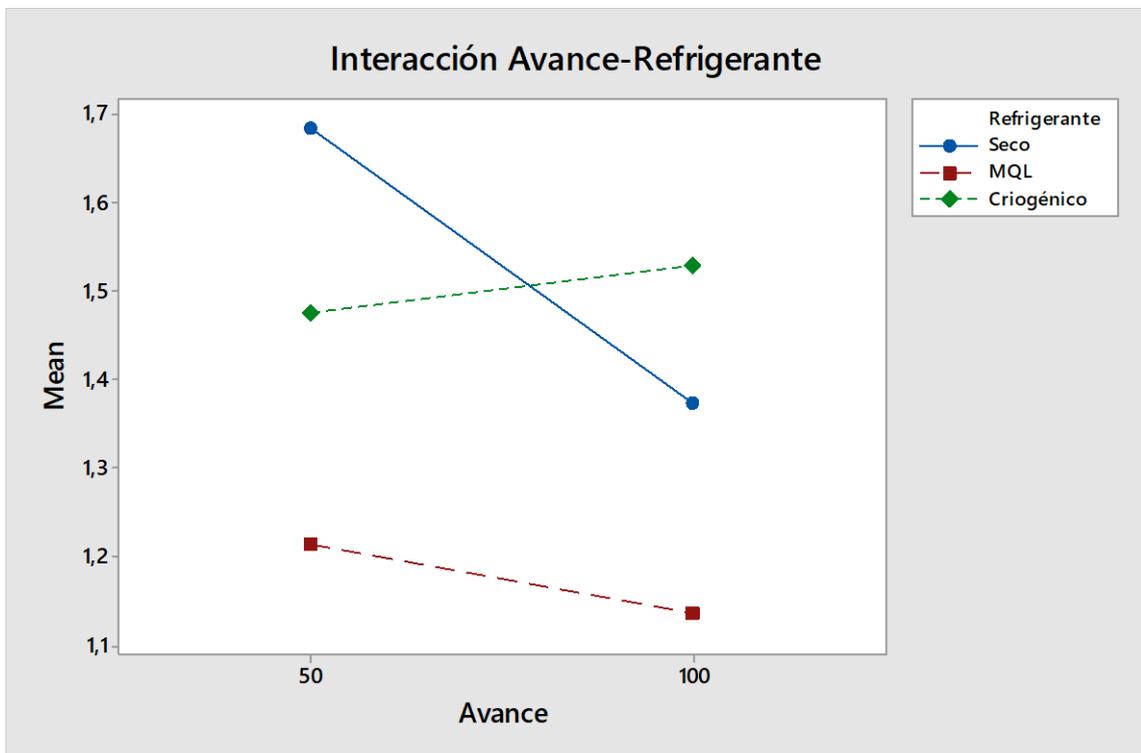


Figura 40 Avance-Refrigerante vs Ra

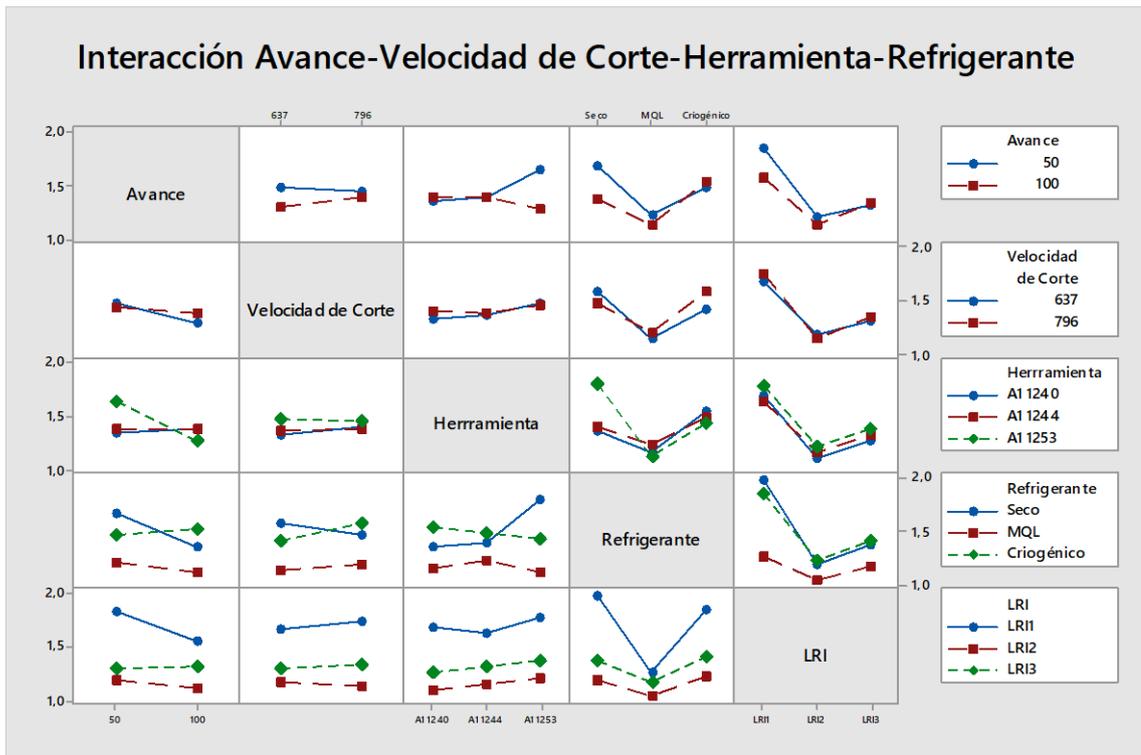


Figura 41 Avance-Velocidad de Corte-Herramienta-Refrigerante vs Ra

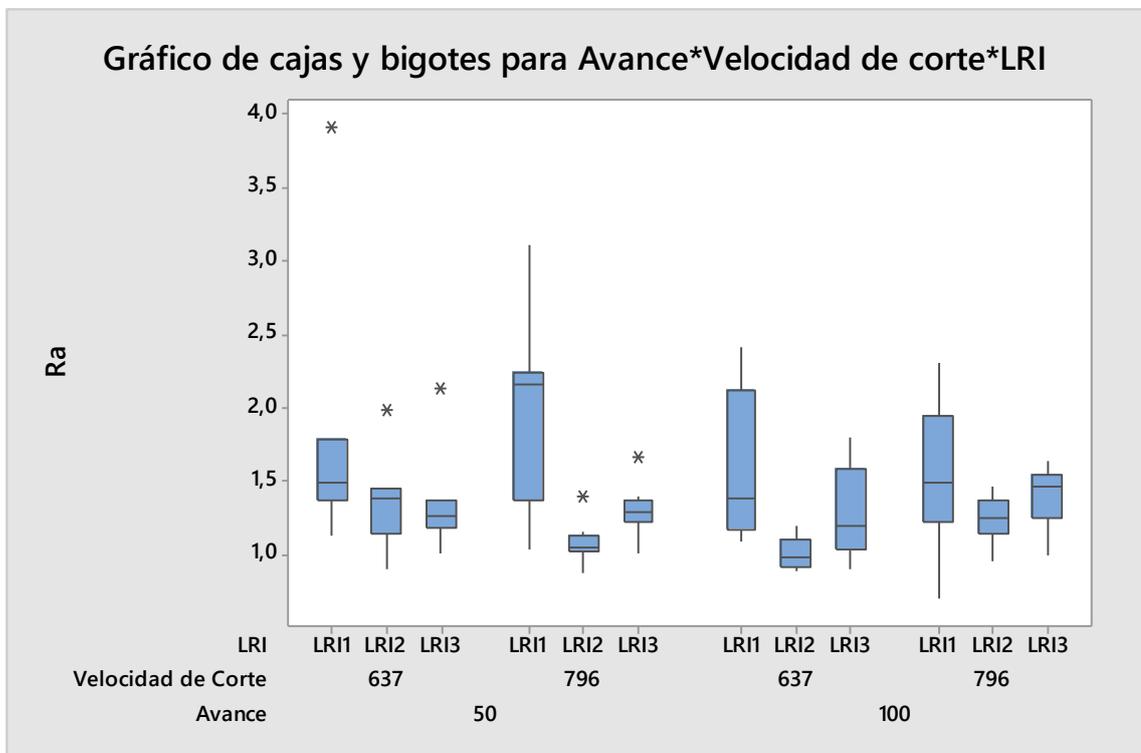


Figura 42 Avance-Velocidad de corte-LRI vs Ra

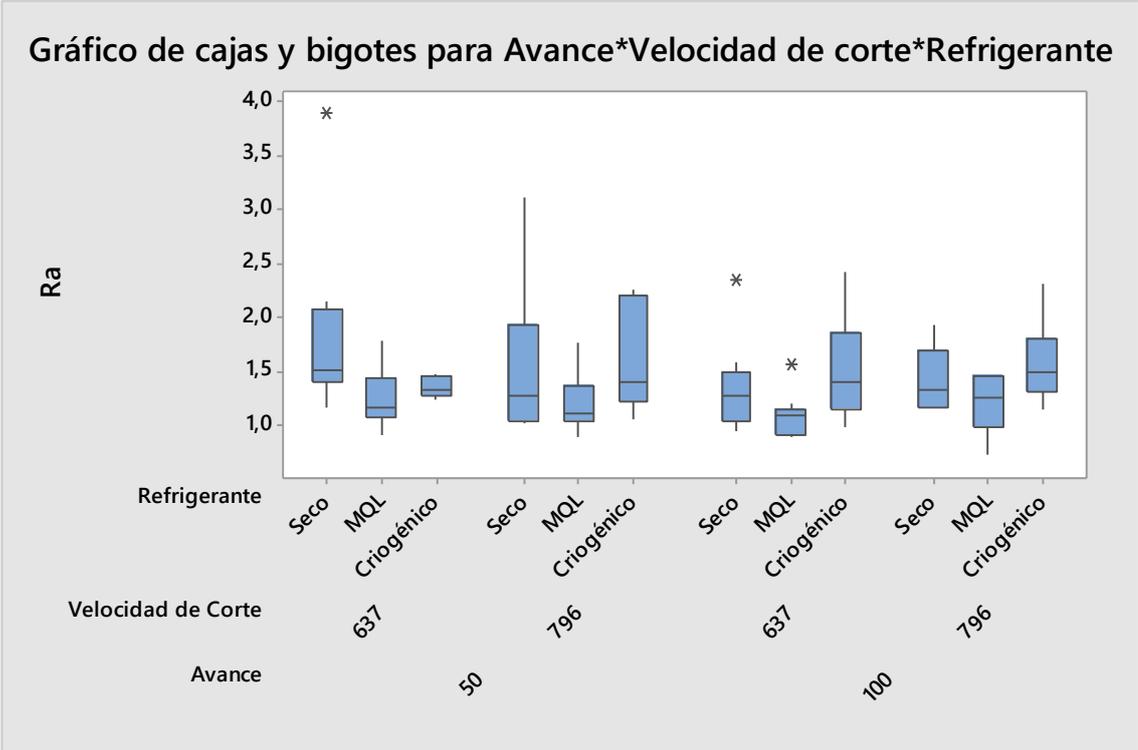


Figura 43 Avance-Velocidad de corte-Refrigerante vs Ra

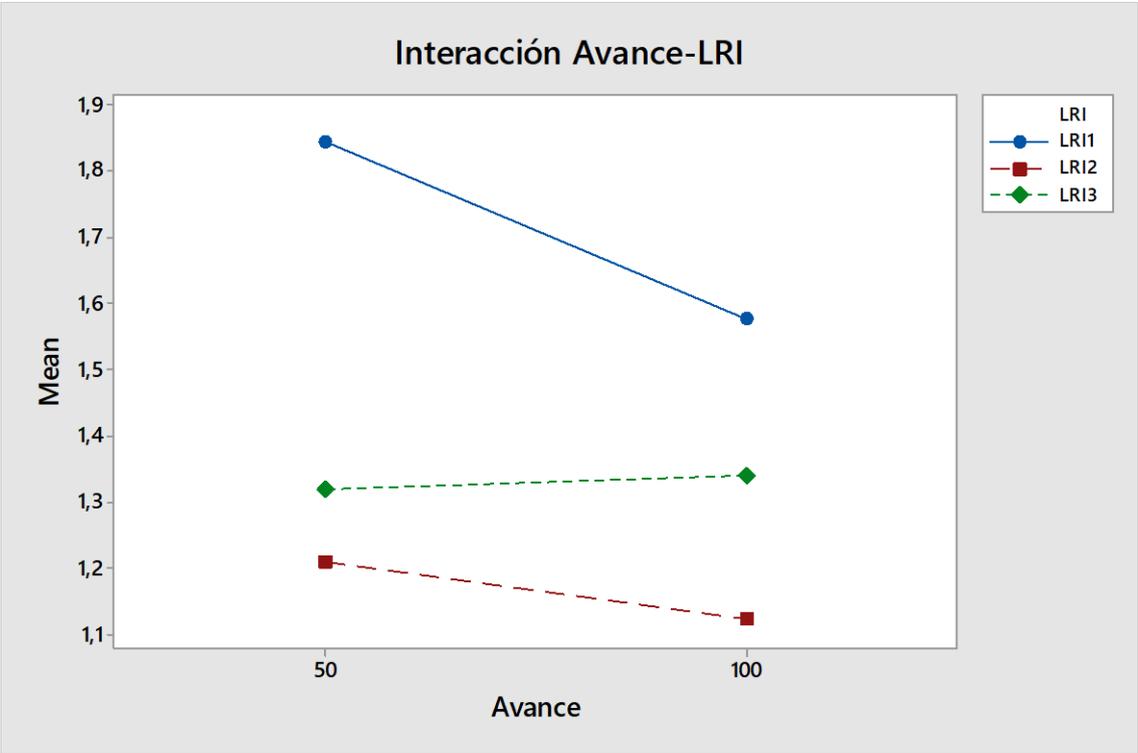


Figura 44 Avance-LRI vs Ra

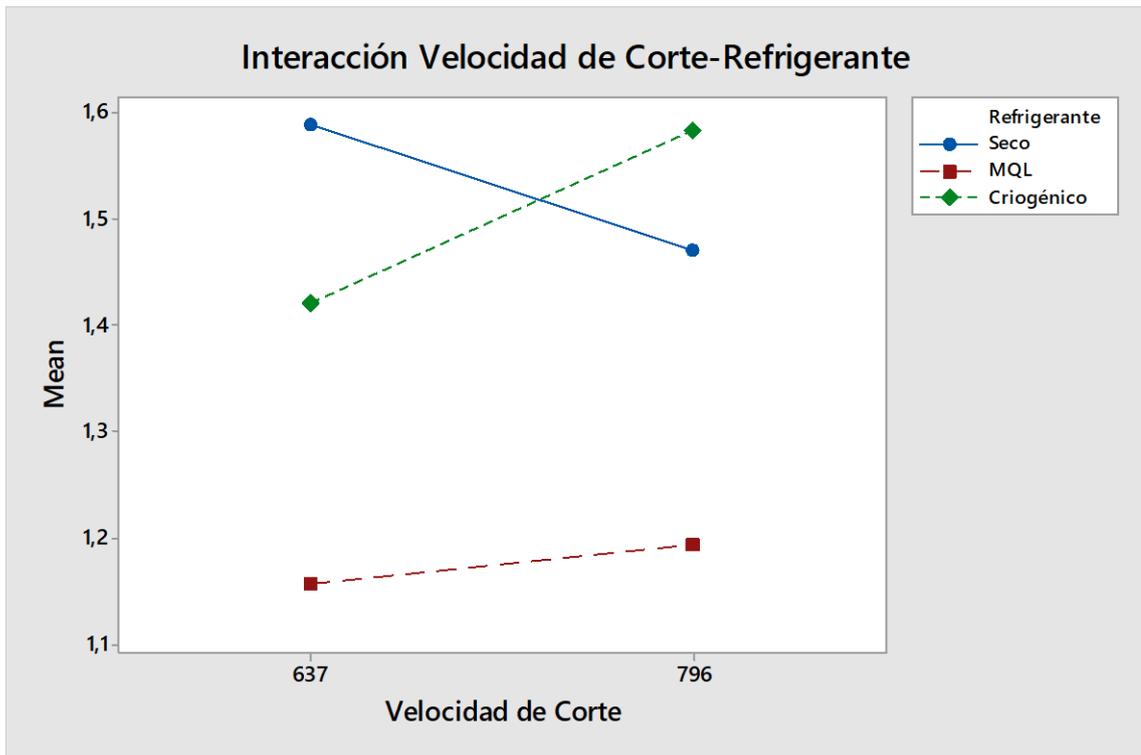


Figura 45 Velocidad de Corte-Refrigerante vs Ra

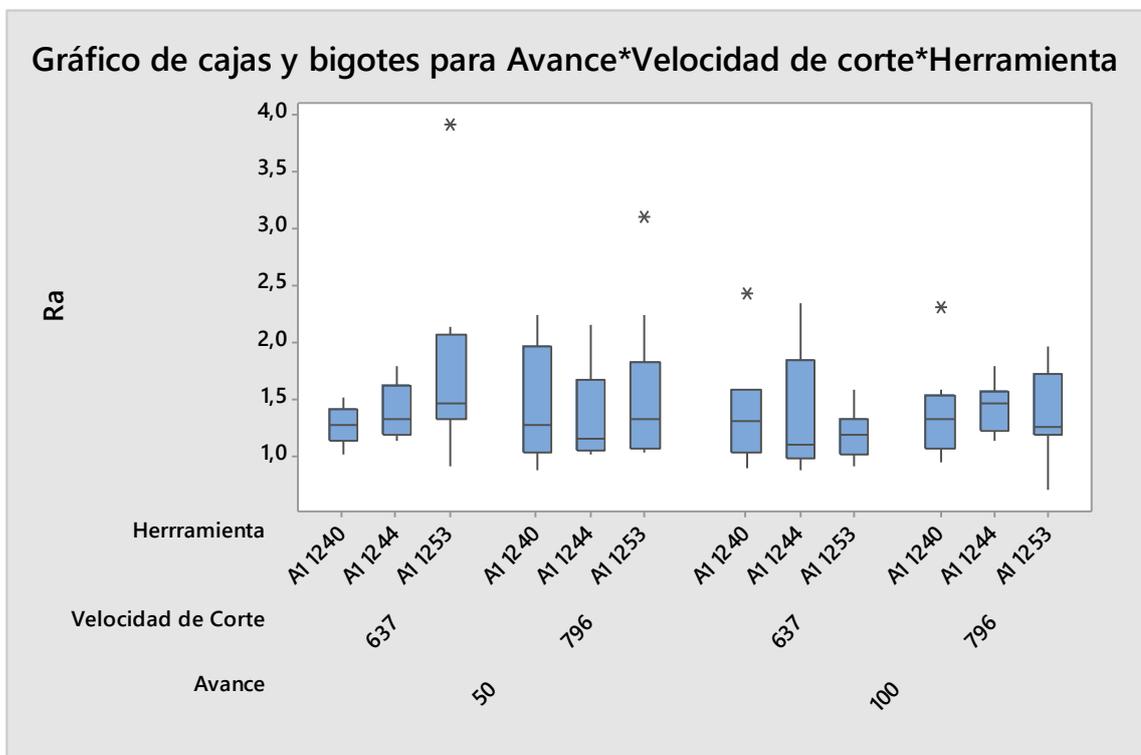


Figura 46 Avance-Velocidad de corte-Herramienta vs Ra

Digno de comentar de las gráficas anteriores es la gran influencia de la velocidad en la rugosidad cuando el material elegido de la herramienta es Al 1253, mientras que para los otros dos materiales la rugosidad prácticamente permanece constante.

De nuevo la rugosidad del inserto LRI1 es mayor teniendo también en cuenta el parámetro del avance de la herramienta. Además, la refrigeración mediante mínima cantidad de lubricante también supone un menor Ra teniendo en cuenta también otros parámetros como el avance, la velocidad de corte, la herramienta o el inserto.

Aun entrando 3 parámetros en el análisis estadístico, siempre que uno de los parámetros se trate del refrigerante, el método de mínima cantidad de lubricante arroja los mejores datos de Ra. Por contra, el inserto LRI1 es siempre el que se corresponde con mayores valores de rugosidad, mientras que el LRI2 es el que mejor rugosidad presenta.

Se confirma por tanto que los mejores datos de rugosidad se corresponden con el refrigerante MQL y el inserto LRI2. En cuanto al avance, velocidad de corte y herramienta, no parecen tan determinantes a la hora de influir en la rugosidad superficial de la pieza.

3.2. Estudio de la rugosidad según Rz

Al igual que se ha hecho con los valores Ra se hace con los valores de Rz. En las tablas 15, 16 y 17 se muestran los datos obtenidos en los ensayos en el laboratorio según el tipo de refrigerante usado:

Tabla 15 Refrigerante MQL (mínima cantidad de lubricante)

AVANCE	VELOCIDAD	RECUBRIMIENTO	LRI1	LRI2	LRI3
			Rz	Rz	Rz
50	637	AL 1244	9,685	6,893	6,12
50	637	Al 1240	6,331	6,717	5,426
50	637	Al 1253	8,107	5,425	7,402
100	796	Al 1244	6,101	8,454	7,584
100	796	Al 1240	6,773	6,064	5,974
100	796	Al 1253	4,376	8,149	6,741
50	796	Al 1244	5,273	7,063	7,924
50	796	Al 1240	9,424	5,941	6,812
50	796	Al 1253	5,256	6,195	7,602
100	637	Al 1244	6,646	5,659	5,485
100	637	Al 1240	7,932	7,4	4,984
100	637	Al 1253	7,261	6,332	6,699

Tabla 16 Refrigerante Criogénico

AVANCE	VELOCIDAD	RECUBRIMIENTO	LRI1	LRI2	LRI3
			Rz	Rz	Rz
50	637	AL 1244	7,4	9,787	6,782
50	637	Al 1240	7,846	7,955	7,685
50	637	Al 1253	9,816	7,995	7,149
100	796	Al 1244	8,77	7,756	12,839
100	796	Al 1240	15,75	9,042	8,888
100	796	Al 1253	9,55	8,501	8,094
50	796	Al 1244	11,085	8,914	9,429
50	796	Al 1240	13,668	6,147	7,437
50	796	Al 1253	12,047	8,635	7,941
100	637	Al 1244	10,388	5,861	9,495
100	637	Al 1240	16,765	7,758	9,627
100	637	Al 1253	9,884	7,986	6,657

Tabla 17 Mecanizado en seco

AVANCE	VELOCIDAD	RECUBRIMIENTO	LRI1	LRI2	LRI3
			Rz	Rz	Rz
50	637	AL 1244	10,268	9,415	6,1
50	637	Al 1240	9,397	8,317	7,618
50	637	Al 1253	26,83	10,203	13,136
100	796	Al 1244	9,706	6,991	6,81
100	796	Al 1240	8,977	8,453	9,074
100	796	Al 1253	10,882	7,771	8,3
50	796	Al 1244	9,78	8,288	6,591
50	796	Al 1240	13,296	5,972	6,758
50	796	Al 1253	19,452	6,476	6,602
100	637	Al 1244	13,103	6,996	5,695
100	637	Al 1240	6,876	5,906	6,6
100	637	Al 1253	6,877	6,071	8,529

Del análisis ANOVA obtenemos los siguientes datos:

Tabla 18 Análisis Anova Rz

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	99	982,305	9,9223	9,76	0,001
Linear	8	315,85	39,4812	38,83	0
Avance	1	8,317	8,3172	8,18	0,021
Velocidad de Corte	1	1,141	1,141	1,12	0,32
Herramienta	2	8,888	4,4442	4,37	0,052
Refrigerante	2	141,966	70,9831	69,81	0
LRI	2	155,537	77,7685	76,48	0
2-Way Interactions	25	268,443	10,7377	10,56	0,001
Avance x Velocidad de corte	1	4,769	4,7691	4,69	0,062
Avance x Herramienta	2	33,972	16,9859	16,7	0,001
Avance x Refrigerante	2	45,815	22,9073	22,53	0,001
Avance x LRI	2	15,099	7,5494	7,42	0,015
Velocidad de corte x Herramienta	2	8,038	4,0189	3,95	0,064
Velocidad de Corte x Refrigerante	2	9,231	4,6156	5,54	0,048
Velocidad de corte x LRI	2	1,925	0,9625	0,95	0,428
Herramienta x Refrigerante	4	60,128	15,032	14,78	0,001
Herramienta x LRI	4	16,707	4,1767	4,11	0,042
Refrigerante x LRI	4	72,76	18,19	17,89	0
3-Way Interactions	38	294,861	7,7595	7,63	0,003
Avance x Velocidad de Corte x Herramienta	2	9,235	4,6173	4,54	0,048
Avance x Velocidad de Corte x Refrigerante	2	19,599	9,7997	9,64	0,007
Avance x Velocidad de Corte x LRI	2	11,92	5,9599	5,86	0,027
Avance x Herramienta x Refrigerante	4	38,632	9,6581	9,5	0,004
Avance x Herramienta x LRI	4	44,773	11,1932	11,01	0,002
Avance x Refrigerante x LRI	4	42,295	10,5738	10,4	0,003
Velocidad de Corte x Herramienta x Refrigerante	4	11,49	2,8724	2,82	0,099
Velocidad de Corte x Herramienta x LRI	4	26,309	6,3272	6,22	0,014
Velocidad de Corte x Refrigerante x LRI	4	11,531	2,8827	2,83	0,098
Herramienta x Refrigerante x LRI	8	80,077	10,0097	9,84	0,002
4-Way Interactions	28	103,151	3,684	3,62	0,031
Avance x Velocidad de Corte x Herramienta x Refrigerante	4	22,763	5,6908	5,6	0,019
Avance x Velocidad de Corte x Herramienta x LRI	4	11,969	2,9923	2,94	0,091
Avance x Velocidad de Corte x Refrigerante x LRI	4	8,759	2,1898	2,15	0,165
Avance x Herramienta x Refrigerante x LRI	8	54,227	6,7784	6,67	0,007
Velocidad de Corte x Refrigerante x LRI	8	5,432	0,679	0,67	0,709
Error	8	8,135	1,0169		
Total	107	990,44			

Los factores e interacciones que han resultado ser estadísticamente significativos y su porcentaje de contribución a la variabilidad de la rugosidad Rz son los mostrados en la tabla 19.

Tabla 19 Porcentaje de contribución de cada fuente estadísticamente significativa para Rz

LRI	15,70
Refrigerante	14,33
Herramienta*Refrigerante*LRI	8,08
Refrigerante*LRI	7,35
Herramienta*Refrigerante	6,07
Avance*Herramienta*Refrigerante*LRI	5,48
Avance*Refrigerante	4,63
Avance*Herramienta*LRI	4,52
Avance*Refrigerante*LRI	4,27
Avance*Herramienta*Refrigerante	3,90
Avance*Herramienta	3,43
Velocidad de Corte*Herramienta*LRI	2,56
Avance*Velocidad de Corte*Herramienta*Refrigerante	2,30
Avance*Velocidad de Corte*Refrigerante	1,98
Herramienta*LRI	1,69
Avance*LRI	1,52
Avance*Velocidad de Corte*LRI	1,20
Avance*Velocidad de Corte*Herramienta	0,93
Velocidad de Corte*Refrigerante	0,93
Avance	0,84

En las figuras 47, 48 y 49 se muestran los valores de Rz teniendo en cuenta los parámetros avance, LRI y refrigerante.

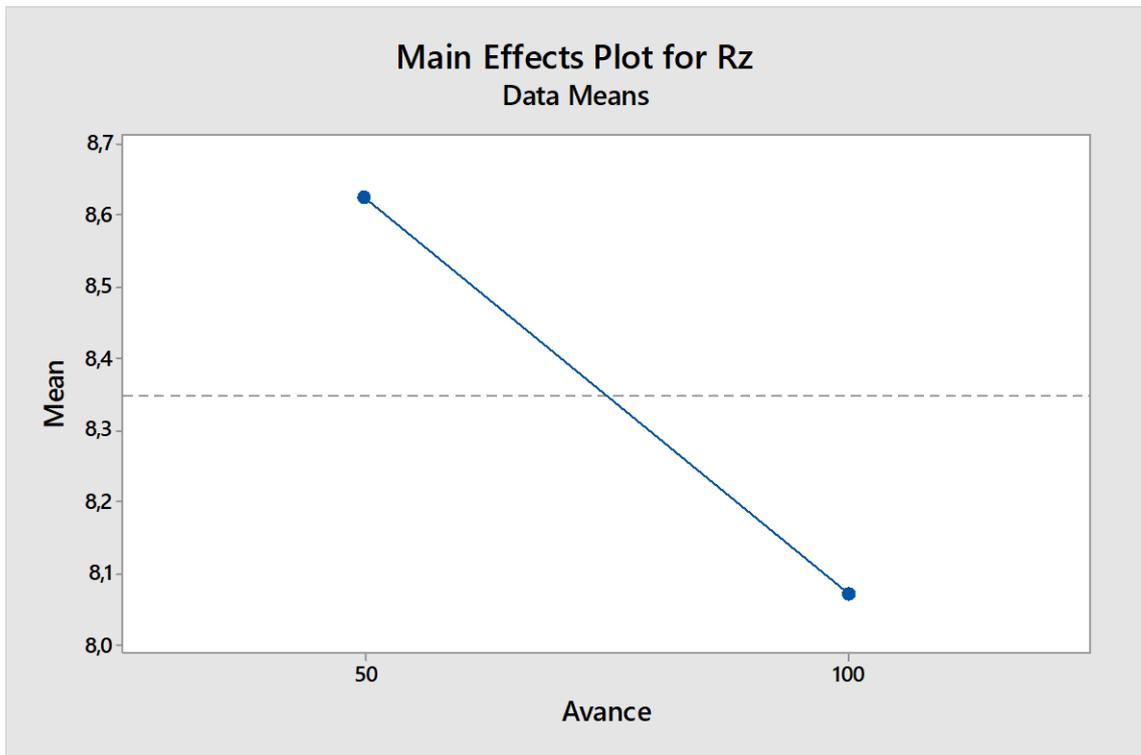


Figura 47 Avance vs Rz

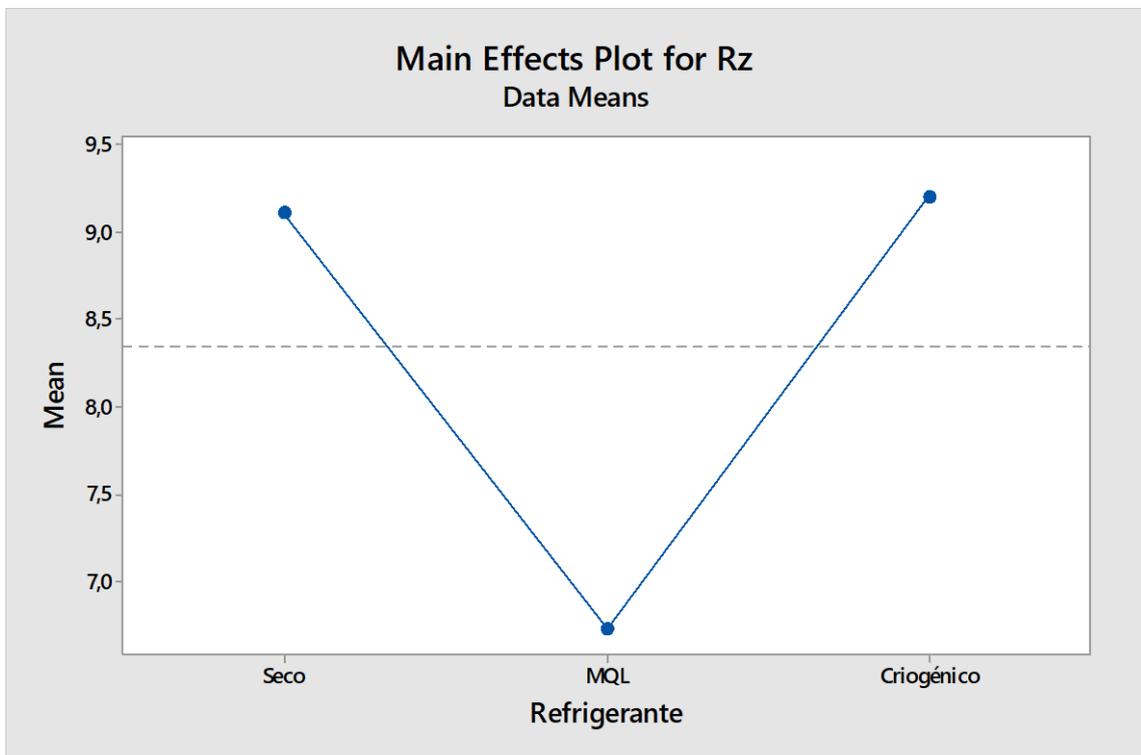


Figura 48 Refrigerante vs Rz

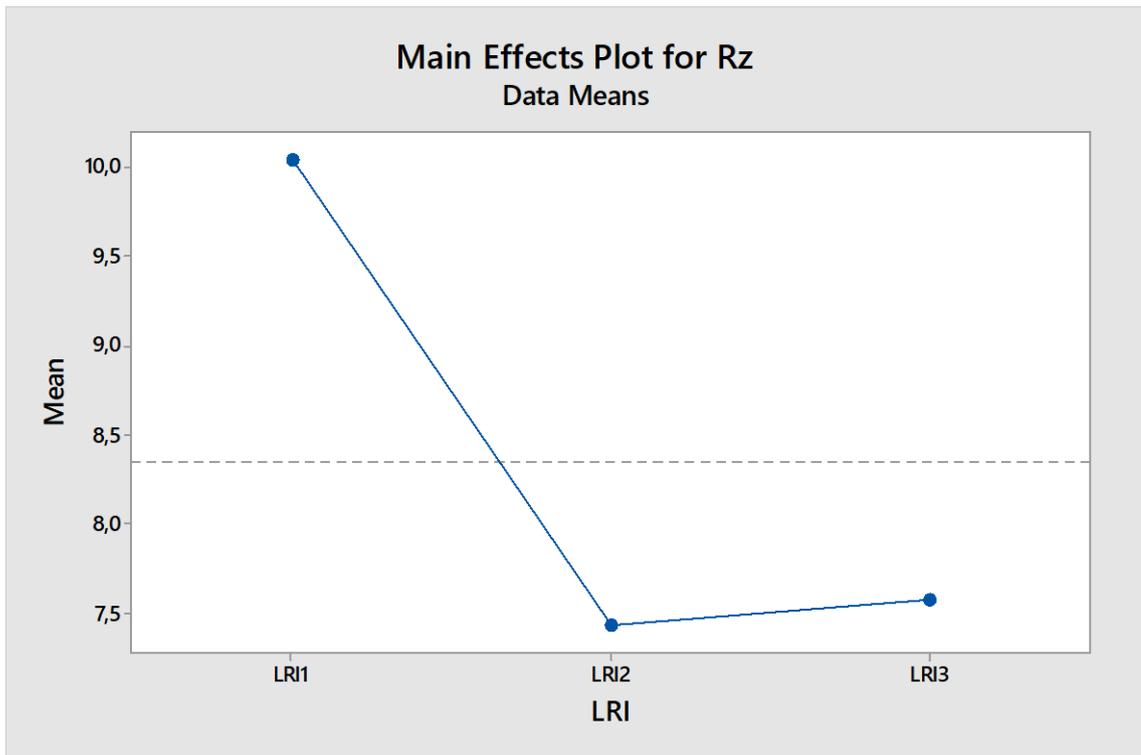


Figura 49 LRI vs Rz

Los tres factores estadísticamente significativos son los mismos del apartado anterior, el estudio de la rugosidad Ra. Sí se nota una ligera diferencia en el caso del inserto, la rugosidad de LRI3 en este caso es casi la misma que LRI2.

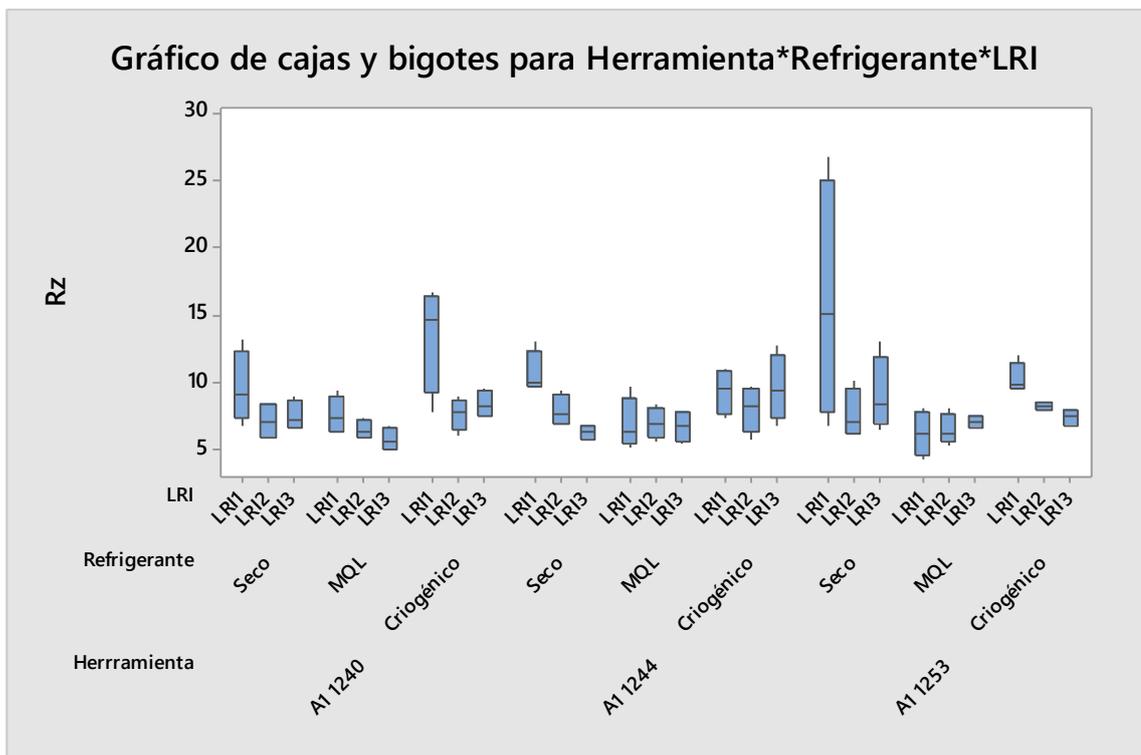


Figura 50 Herramienta-Refrigerante- LRI vs Rz

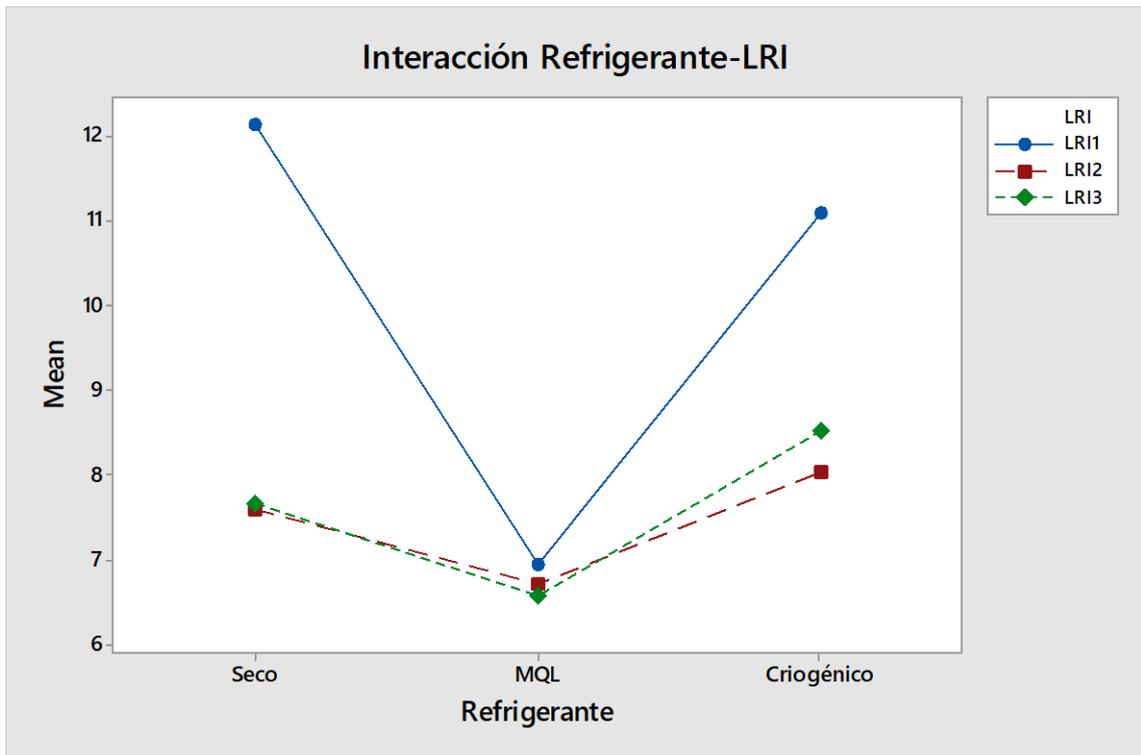


Figura 51 Refrigerante-LRI vs Rz

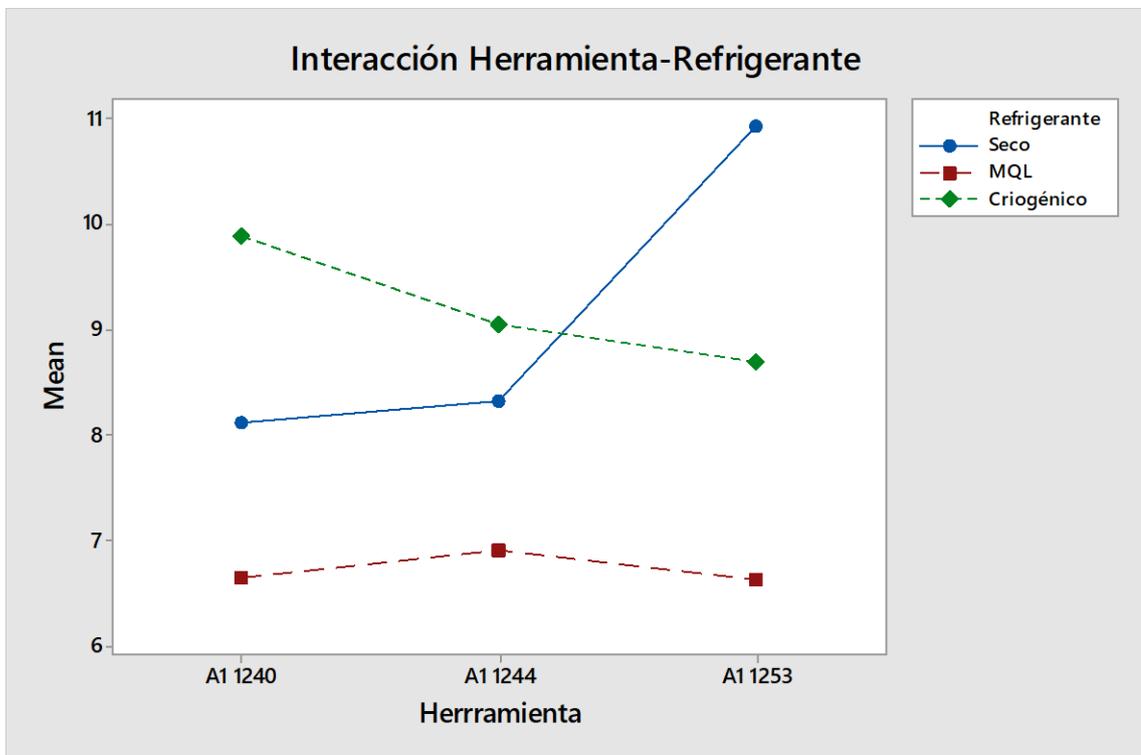


Figura 52 Herramienta-Refrigerante vs Rz

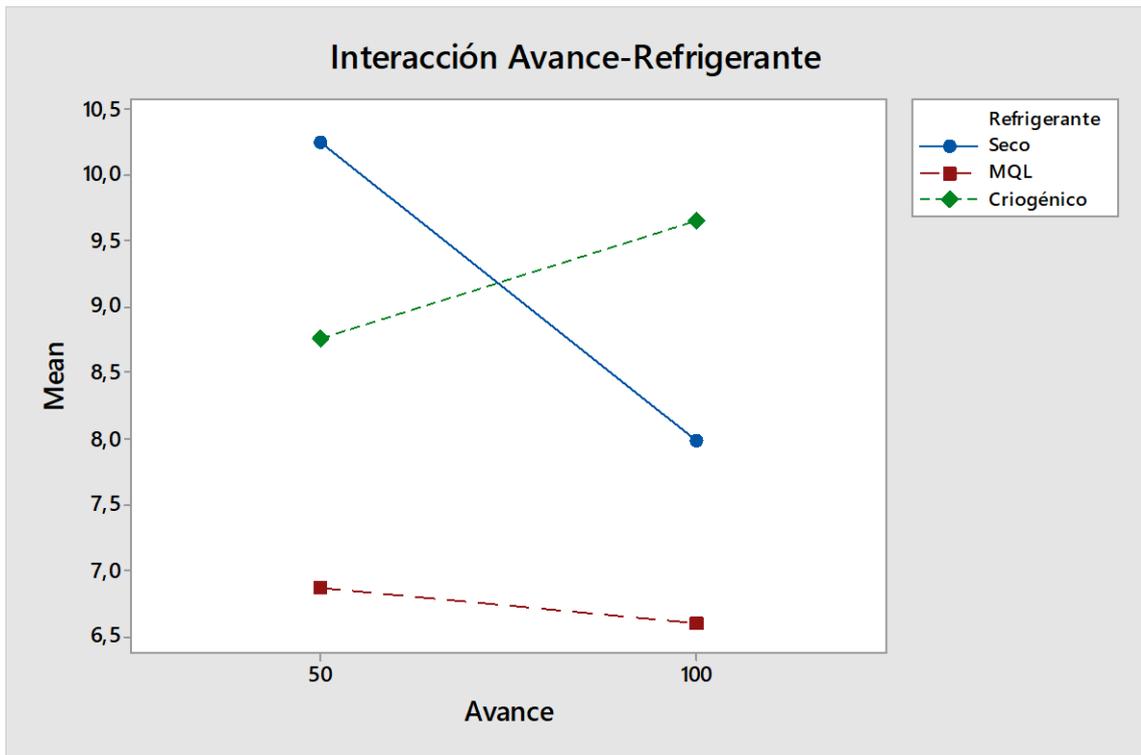


Figura 53 Avance-Refrigerante vs Rz

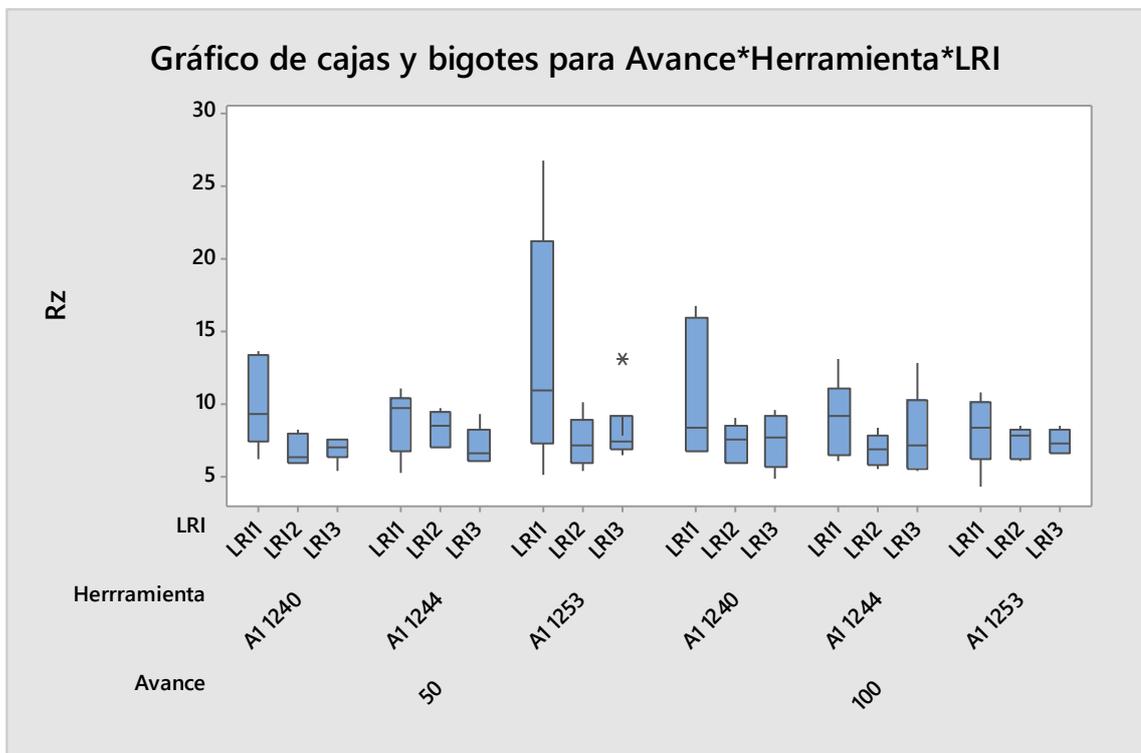


Figura 54 Avance-Herramienta-LRI vs Rz

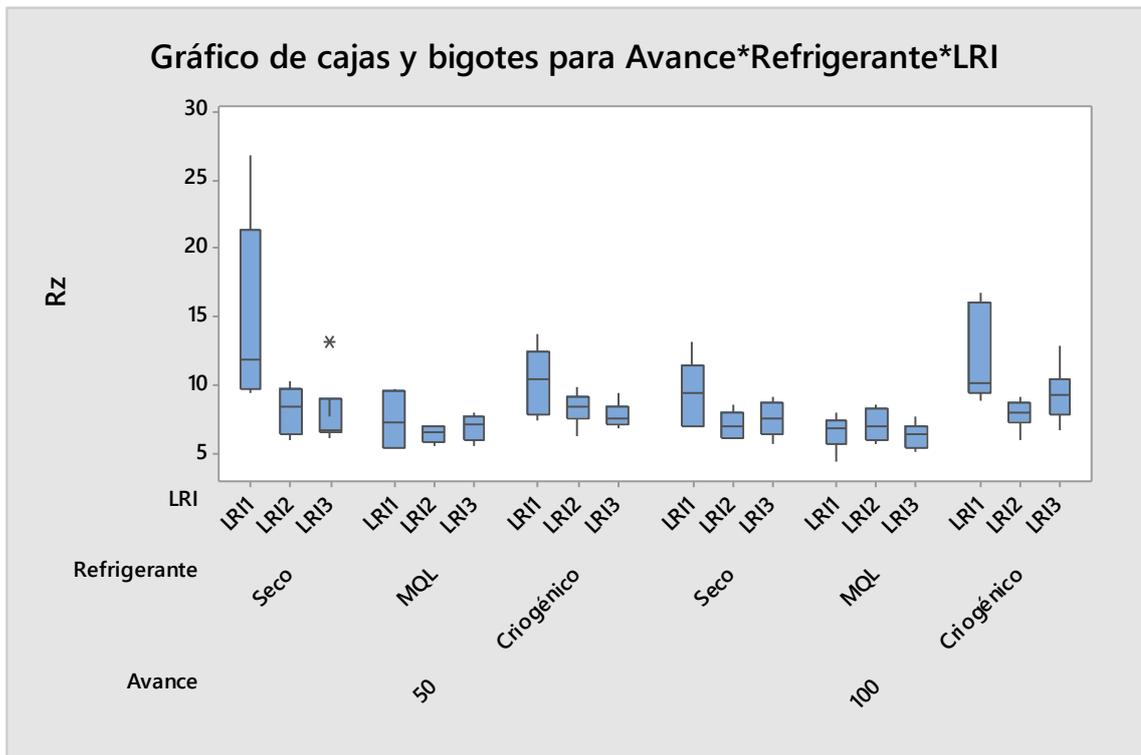


Figura 55 Avance-Refrigerante-LRI vs Rz

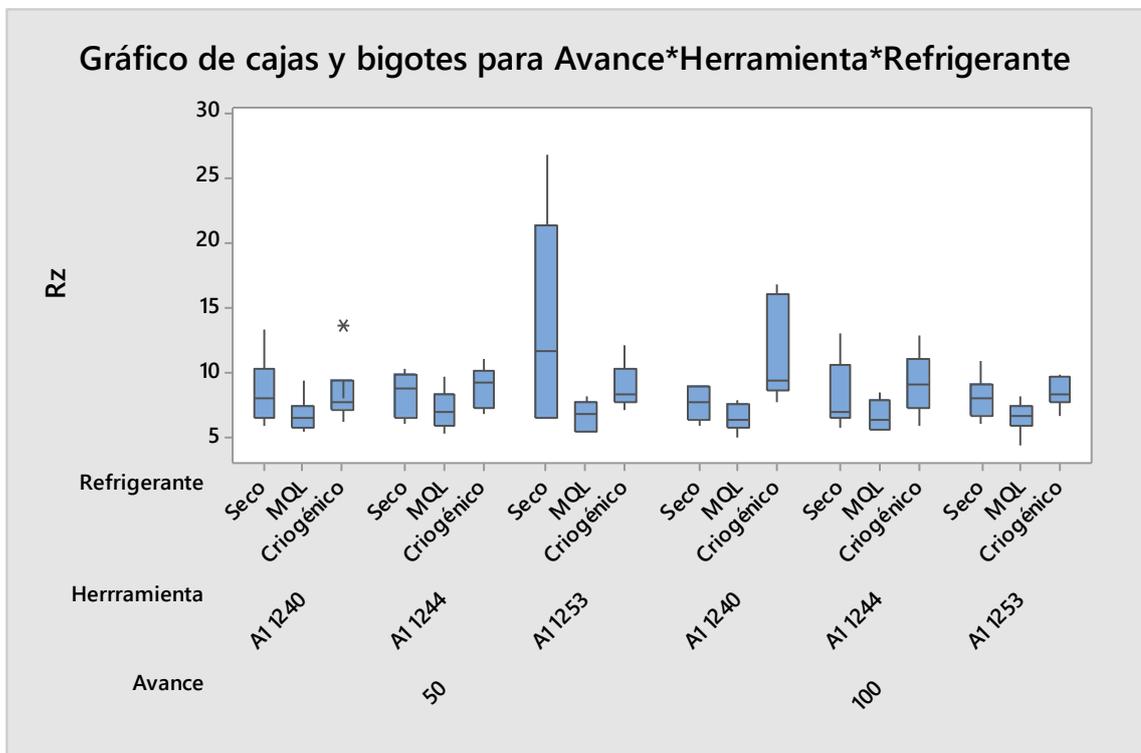


Figura 56 Avance-Herramienta-Refrigerante vs Rz

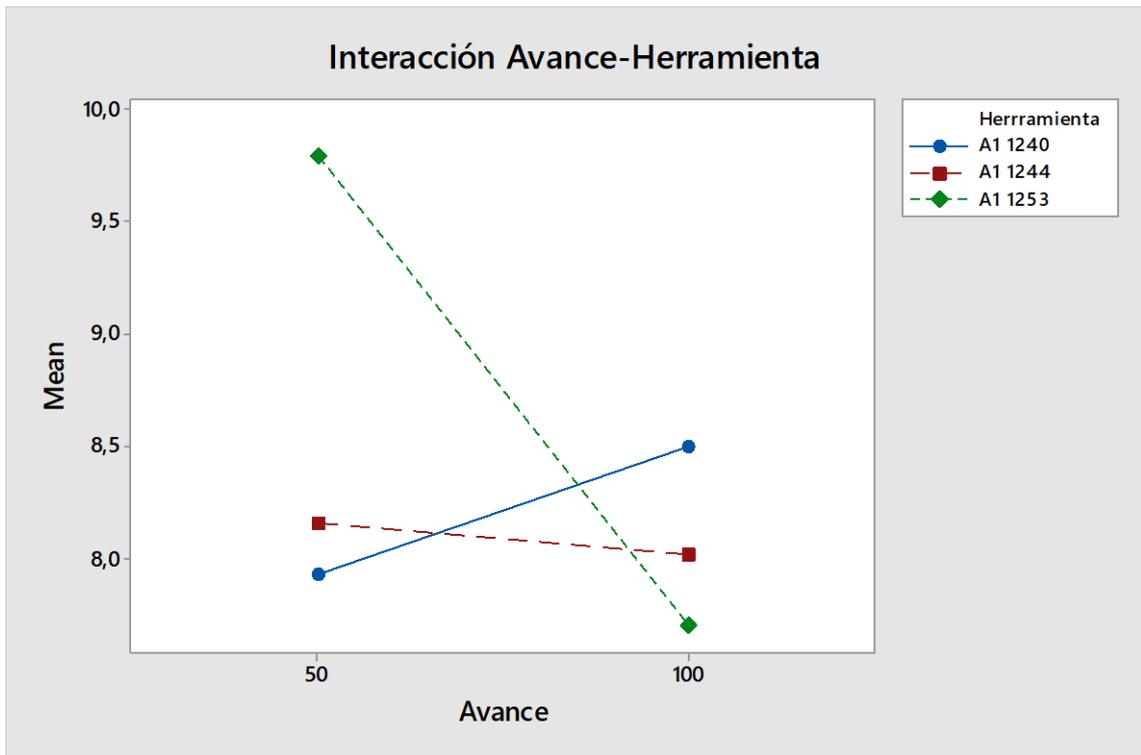


Figura 57 Avance-Herramienta vs Rz

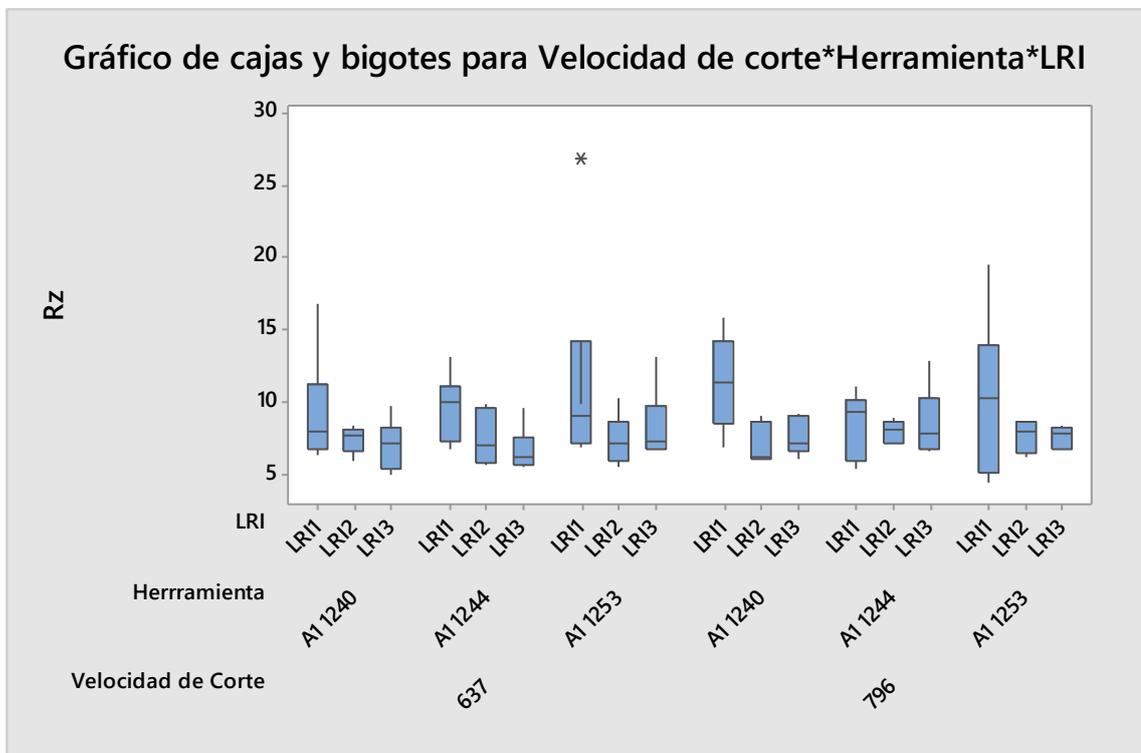


Figura 58 Velocidad de corte-Herramienta-LRI vs Rz

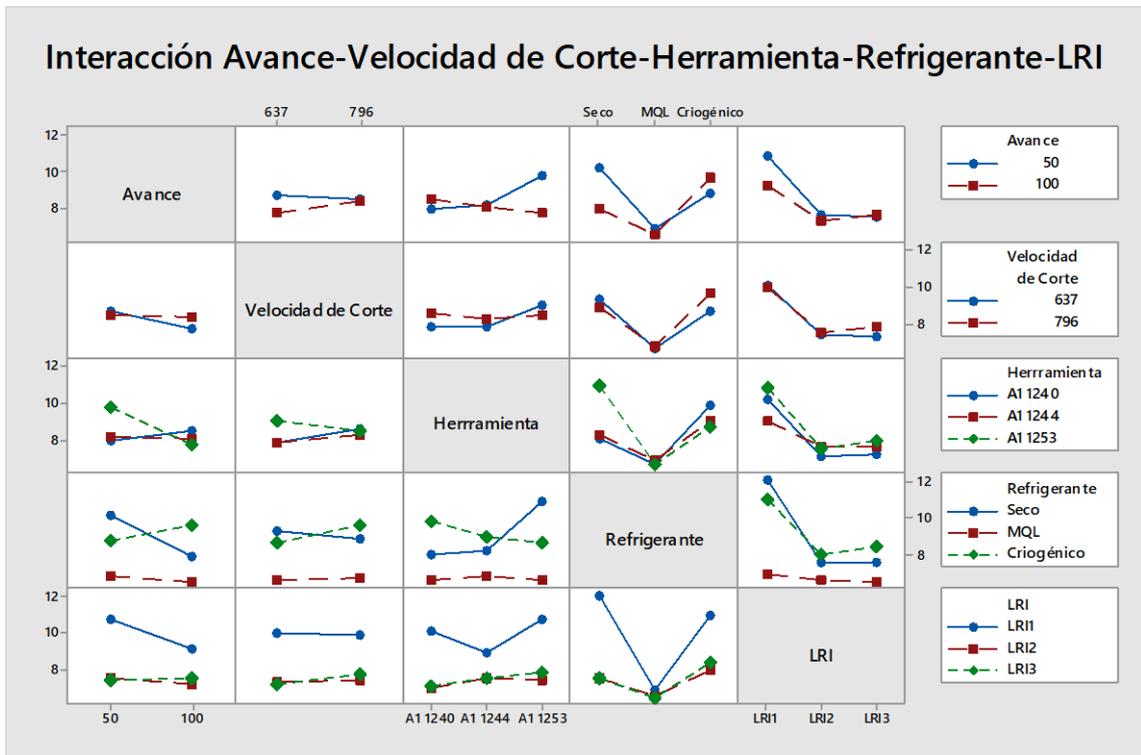


Figura 59 Avance-Velocidad de corte- Herramienta-Refrigerante-LRI vs Rz

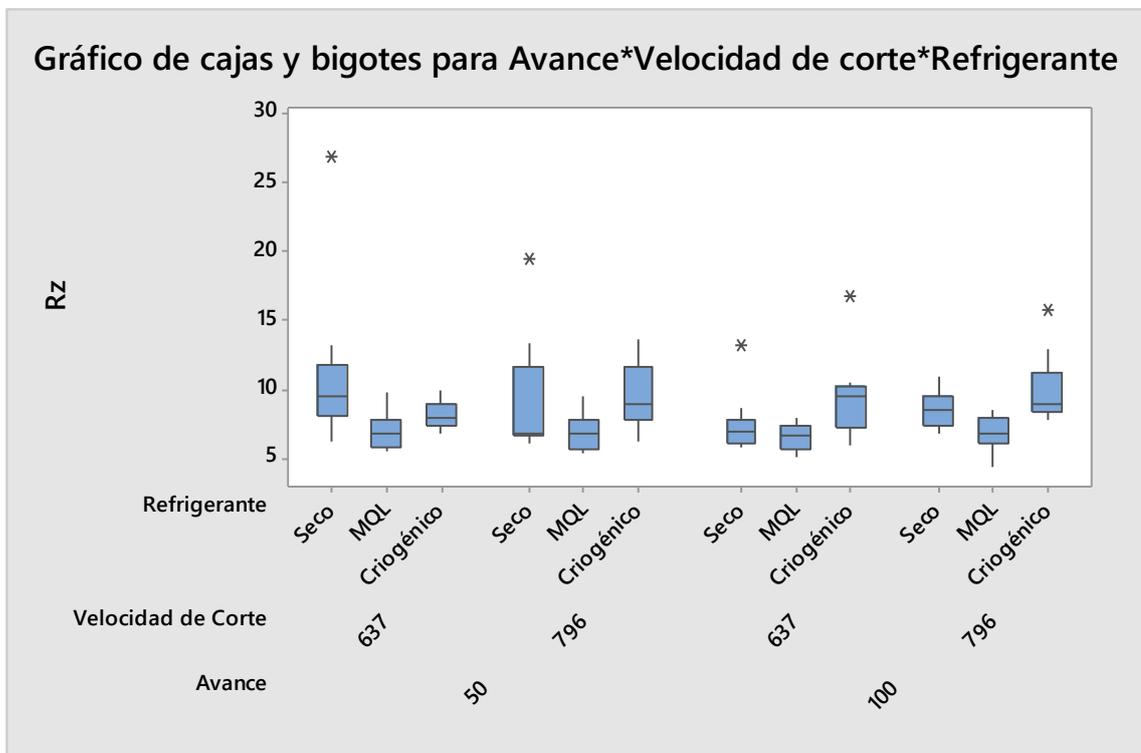


Figura 60 Avance-Velocidad de corte-Refrigerante vs Rz

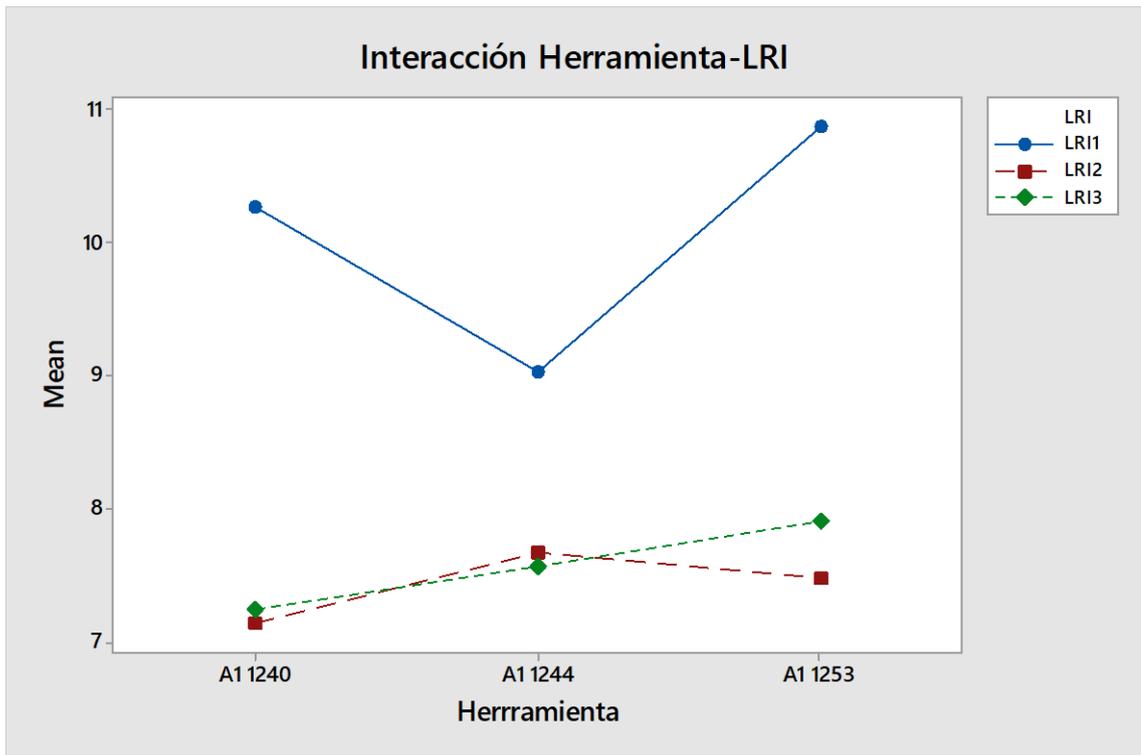


Figura 61 Herramienta-LRI vs Rz

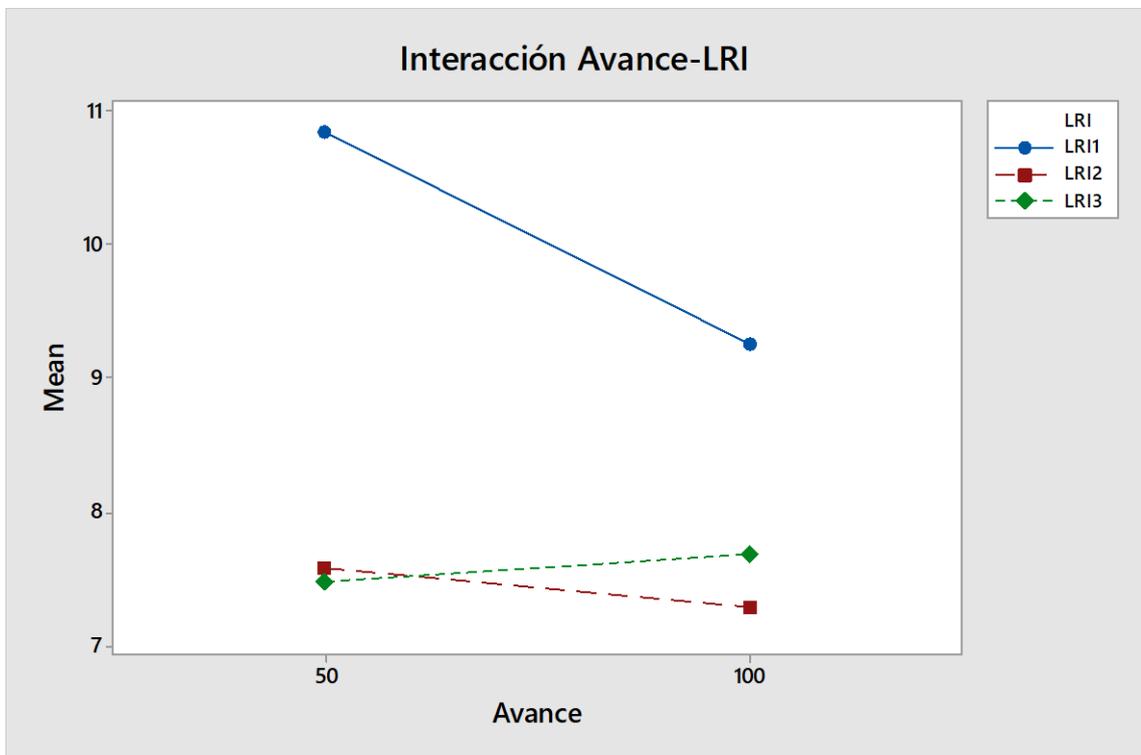


Figura 62 Avance-LRI vs Rz

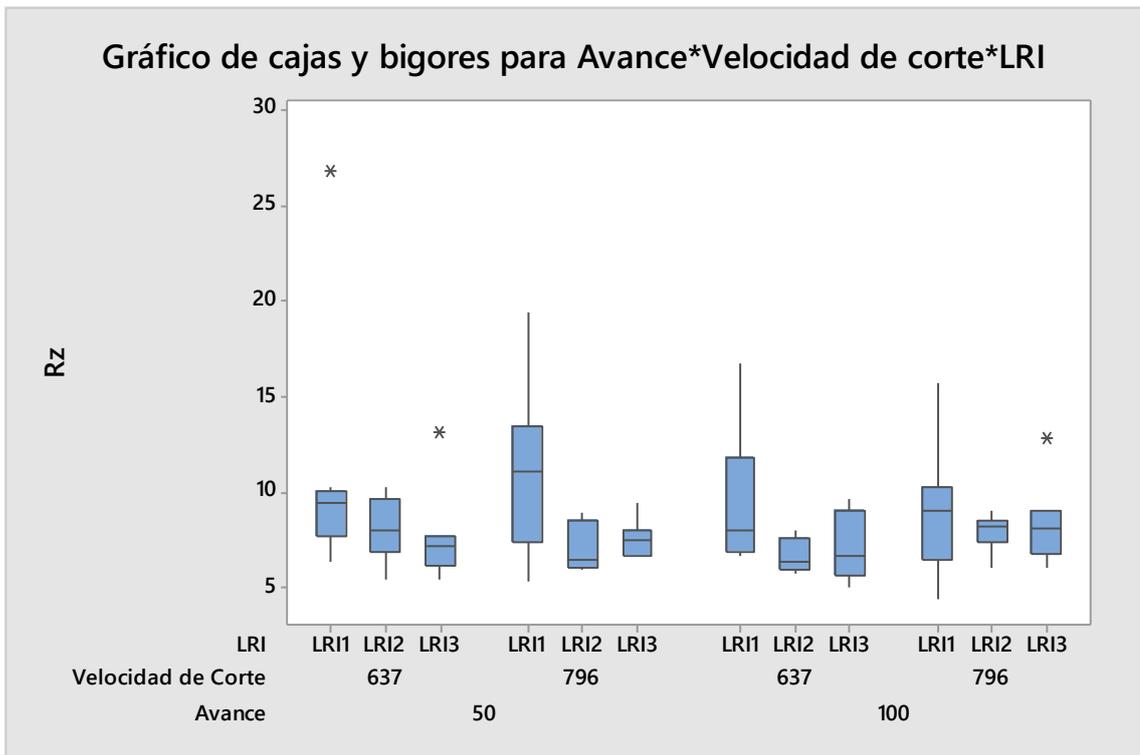


Figura 63 Avance-Velocidad de corte-LRI vs Rz

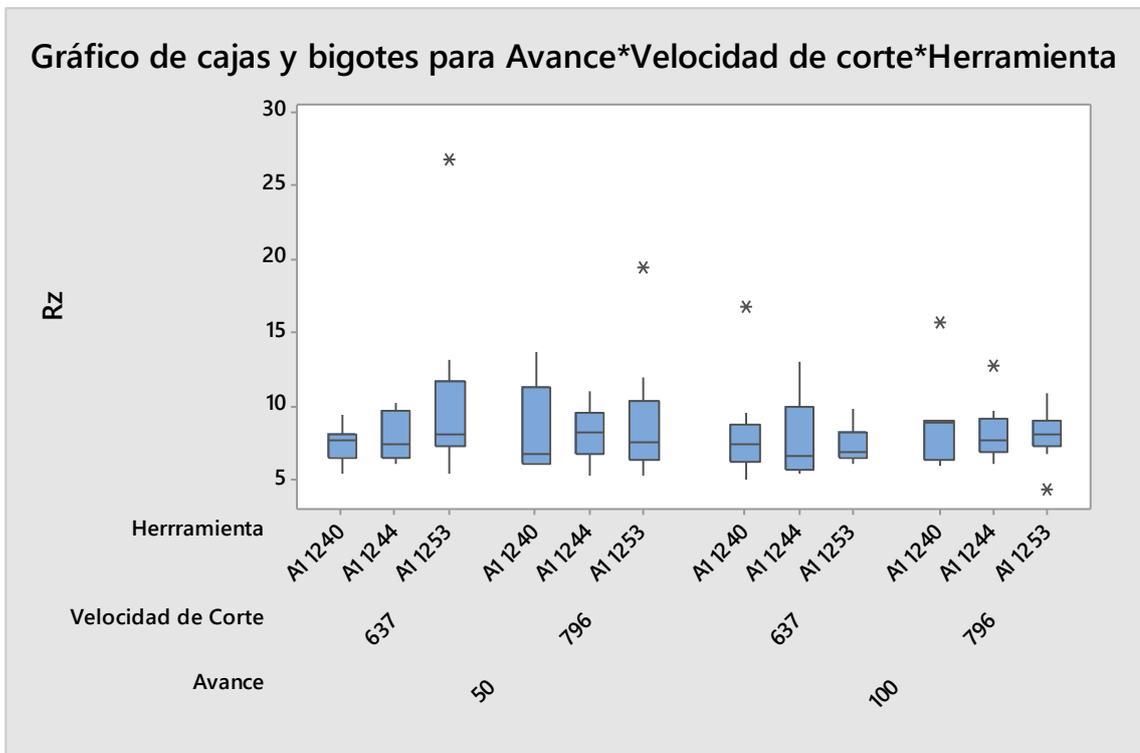


Figura 64 Avance-Velocidad de corte-Herramienta vs Rz

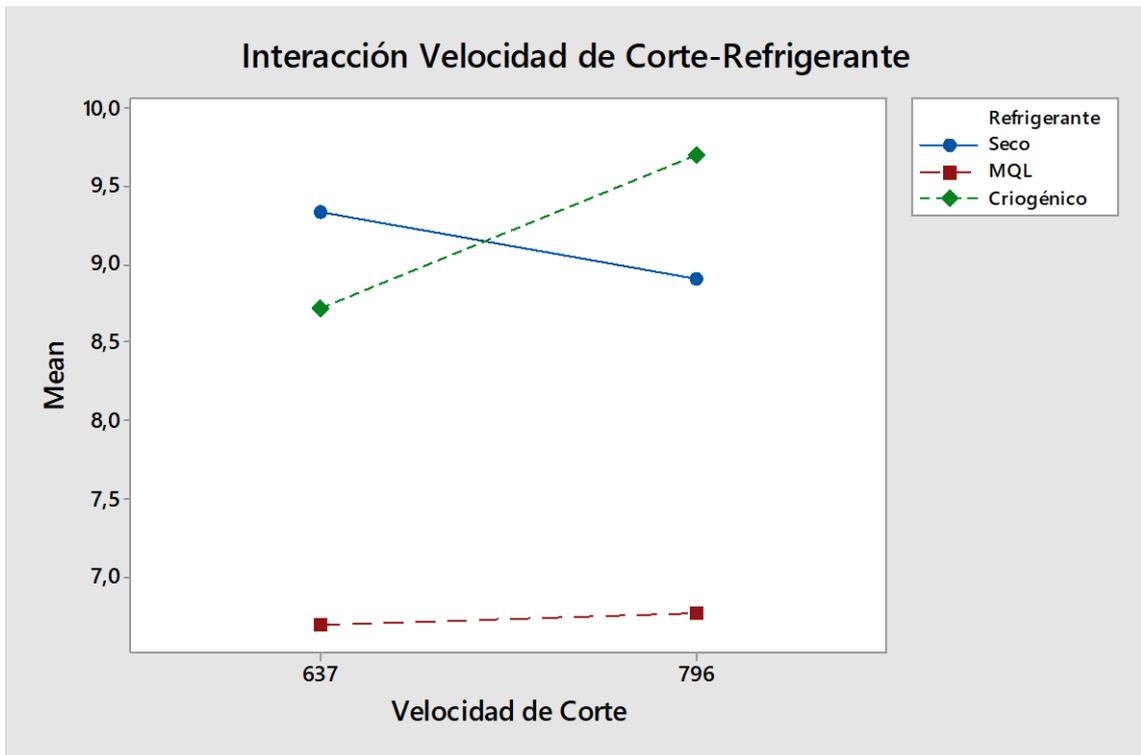


Figura 65 Velocidad de Corte-Refrigerante vs Rz

De nuevo se puede ver que usando como método de refrigeración la mínima cantidad de lubricante, MQL, se obtienen los mejores datos de rugosidad superficial. Tampoco la velocidad es un parámetro muy determinante salvo cuando la elección de la herramienta es Al 1253. Sí destaca en este caso, la poca diferencia de rugosidad que hay entre los insertos LRI2 y LRI3, mientras que para LRI1 la rugosidad es mucho más alta.

Cuando entran más parámetros en el análisis estadístico vemos que el inserto LRI1 sigue siendo el de peor rugosidad, especialmente cuando se combinan parámetros como refrigeración en seco y el uso de la herramienta Al 1253 con un avance de la herramienta bajo. La mínima cantidad de lubricante se sigue presentando como la mejor opción de refrigeración. Mención aparte merece la gráfica correspondiente a la interacción Avance x velocidad de corte x herramienta, pues presenta unos valores de rugosidad bastante constantes.

Claramente el refrigerante MQL sigue siendo la mejor opción para obtener una buena rugosidad, mientras que el resto de parámetros no son decisivos a la hora de obtener una mejora en los datos de Rz y la rugosidad en el inserto LRI1 es muy superior a la de los otros dos insertos. Se demuestra entonces lo visto en la tabla del porcentaje de contribución de cada fuente para Rz, donde LRI y el refrigerante eran claramente los parámetros más determinantes.

Después de estos resultados, puede verse en la siguiente gráfica (Figura 53) la relación de Ra y Rz en cada uno de los insertos:

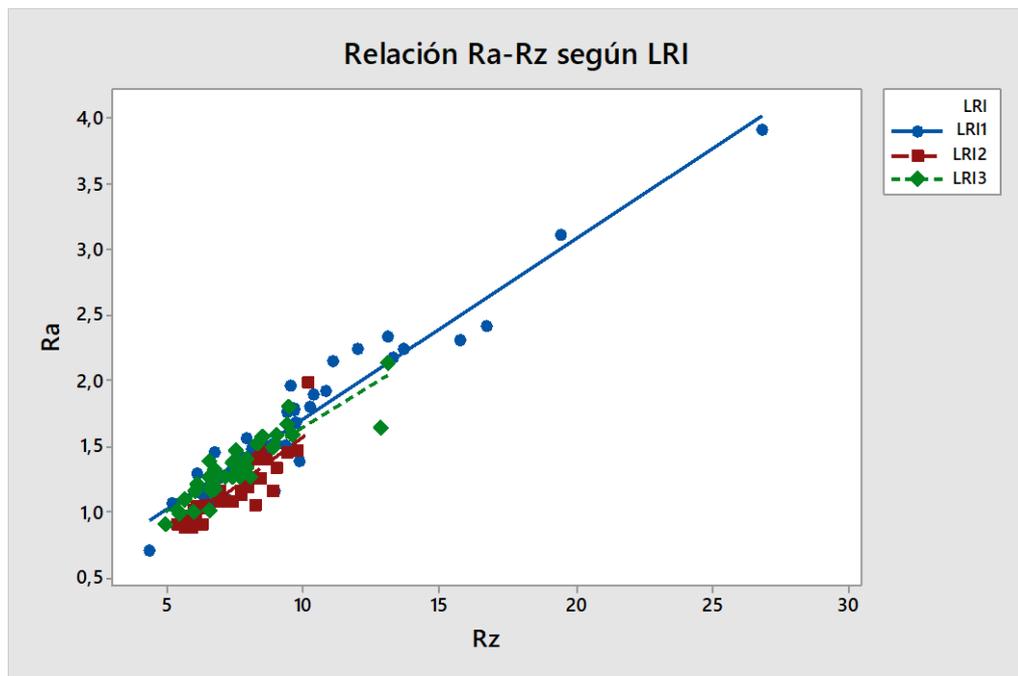


Figura 66 Relación Ra-Rz según LRI

Las aproximaciones lineales para cada uno de los insertos podrían expresarse así:

- Para LRI1: $Ra = 0,3284 + 0,137 \times Rz$
- Para LRI2: $Ra = 0,0155 + 0,1548 \times Rz$
- Para LRI3: $Ra = 0,3663 + 0,1272 \times Rz$

Como se aprecia, el valor más bajo de rugosidad se produce en el inserto LRI2 y el de mayor rugosidad superficial en LRI1.

CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES

En este capítulo se recogen las conclusiones a que ha dado lugar el Trabajo Fin de Máster desarrollado en los capítulos precedentes. Se han obtenido dos tipos de conclusiones, unas de carácter general y otras de carácter particular. Las primeras se han adoptado tras la consulta bibliográfica realizada para la elaboración del capítulo 2 *Estado del arte*, las segundas tras la realización de los ensayos descritos en el capítulo 3 *Metodología y análisis de ensayos*.

4.1. Conclusiones generales

A continuación, se recogen las conclusiones con carácter general obtenidas tras el estudio bibliográfico realizado al elaborar el capítulo 2 *Estado del arte*. Entre dichas conclusiones generales se puede destacar:

Los materiales híbridos se han convertido en objetivo de estudio en la ingeniería reciente debido a sus múltiples usos. El auge de industrias como la automovilística y aeronáutica y la necesidad de conseguir materiales que combinen una alta resistencia mecánica, a la corrosión y al desgaste con una baja densidad ha puesto en el foco de estudio a este tipo de materiales. El menor peso de los automóviles y aviones se ha hecho cada día más necesario para conseguir minimizar costes, especialmente en los últimos años. Menos peso significa menos combustible en términos de transporte, algo muy necesario en nuestros días en los que el ahorro de energía se ha convertido en una cuestión tan importante. Esto ha propiciado que el estudio de los materiales híbridos haya aumentado exponencialmente en los últimos años.

Tampoco hemos de olvidar otras aplicaciones importantes de este tipo de materiales como su uso en implantes médicos, aplicaciones dentales, recubrimientos protectores y decorativos, sistemas mecatrónicos o aplicaciones estructurales.

4.2. Conclusiones particulares

Entre las conclusiones de carácter particular obtenidas tras la realización de los ensayos descritos en el capítulo 3 *Metodología y análisis de ensayos*, cabe destacar que:

Aunque la excelente resistencia al desgaste de este tipo de materiales los presenta como una opción muy atractiva, supone un problema a la hora de mecanizar las piezas. Para optimizar el mecanizado es necesario una elección adecuada de las herramientas, así como de los parámetros de corte idóneos.

En el presente trabajo se ha estudiado el taladrado de una probeta compuesta por una combinación de tres insertos, 2 aleación de aluminio (UNS A96061) y uno de titanio (UNS R56400).

Los factores y sus interacciones que contribuyen a la variabilidad de la rugosidad Ra y Rz son muy similares, presentando pequeñas diferencias.

Tabla 20 Comparación de interacciones en el estudio ANOVA de Ra y Rz

Análisis ANOVA Ra	Análisis ANOVA Rz
Avance	Avance
Refrigerante	Refrigerante
LRI	LRI
Avance x Herramienta	Avance x Herramienta
Avance x Refrigerante	Avance x Refrigerante
Avance x LRI	Avance x LRI
Velocidad de Corte x Refrigerante	Velocidad de Corte x Refrigerante
Herramienta x Refrigerante	Herramienta x Refrigerante
Refrigerante x LRI	Refrigerante x LRI
	Herramienta x LRI
Avance x Velocidad de Corte x Herramienta	Avance x Velocidad de Corte x Herramienta
Avance x Velocidad de Corte x Refrigerante	Avance x Velocidad de Corte x Refrigerante
Avance x Velocidad de Corte x LRI	Avance x Velocidad de Corte x LRI
Avance x Herramienta x Refrigerante	Avance x Herramienta x Refrigerante
Avance x Herramienta x LRI	Avance x Herramienta x LRI
Avance x Refrigerante x LRI	Avance x Refrigerante x LRI
	Velocidad de Corte x Herramienta x LRI
Herramienta x Refrigerante x LRI	Herramienta x Refrigerante x LRI
Avance x Velocidad de Corte x Herramienta x Refrigerante	Avance x Velocidad de Corte x Herramienta x Refrigerante

Por otro lado, los factores e interacciones que han sido más determinantes en la variabilidad de la rugosidad son los mismos para Ra y Rz, aunque con porcentajes de contribución diferentes. En la siguiente tabla se muestran los 5 más determinantes.

Tabla 21 Comparación de porcentaje de contribución a la variabilidad de la rugosidad (Ra vs Rz)

Rz		Ra	
LRI	15,7	LRI	24,18
Refrigerante	14,33	Refrigerante	12,03
Herramienta*Refrigerante*LRI	8,08	Herramienta*Refrigerante*LRI	8,91
Refrigerante*LRI	7,35	Herramienta*Refrigerante	6,11
Herramienta*Refrigerante	6,07	Refrigerante*LRI	5,17

Las principales conclusiones extraídas del análisis fueron:

- El factor posición relativa respecto del inserto (LRI) es la principal causa de variabilidad tanto de la rugosidad Ra como de la rugosidad Rz. Los mejores valores se obtienen en el inserto (LRI2) que es de titanio.
- El factor refrigerante es la segunda causa de variabilidad de ambas rugosidades (Ra y Rz), siendo el método de mínima cantidad de lubricante (MQL) el que presenta mejores resultados.

- El factor velocidad de corte y herramienta no son considerados estadísticamente influyentes de forma individual en la rugosidad superficial. Hay que tener en cuenta que la interacción herramienta*refrigerante*LRI y herramienta*refrigerante sí son estadísticamente significativas.
- Se ha determinado una clara variación de las rugosidades respecto de la posición respecto del inserto. La hipótesis más probable de esta variación puede ser que se produzcan arañazos al extraer la viruta por la hélice de la broca.
- Se ha realizado una relación de rugosidades según la posición del inserto, LRI, obteniéndose las siguientes relaciones:
 - Para LRI1: $Ra=0,3284 + 0,137 \times Rz$
 - Para LRI2: $Ra=0,0155 + 0,1548 \times Rz$
 - Para LRI1: $Ra=0,3663 + 0,1272 \times Rz$

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gómez-Romero P., Sanchez C., Hybrid materials. Functional properties. From Maya Blue to 21st century materials, New Journal of Chemistry, 2005.
- [2] García-Martínez, J.-M.; Collar, E.P. Organic–Inorganic Hybrid Materials. *Polymers* 2021, 13, 86.
- [3] Johnson T. History of composites. The evolution of lightweight composite materials. 2018. Available from: <https://www.thoughtco.com/history-of-composites-820404>
- [4] Available from: <http://compositeslab.com/composites-101/history-of-composites/>
- [5] A. Yamada, H. Sasabe, Y. Osada and Y. Shiroda, I. Concepts of Hybrid Materials, Hybrid Materials-Concept and case Studies, ASM International, OH, USA, 1989
- [6] A. Makisima, “Possibility of Hybrid Materials”, *Ceramic Japan*, 39, (2004) 90-91
- [6-1] Materials Science Society of Japan, Molecular Hybridization and Hybrid Materials, Composite System in Materials, Shokabo Publishing Co., Tokyo, Japan (1993) 336-343
- [7] P. Gómez-Romero and C. Sanchez, Functional Hybrid Materials, ed. By P. Gómez-Romero and C. Sanchez, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., (2004) 1-6.
- [8] M. F. Ashby and Y. J. M. Bréchet, “Designing Hybrid Materials”, *Acta Mater.*, 51 [2003] 5801-5821
- [9] Y. Hagiwara and H. Suzuki, *Fracture Mechanics*, Ohmsha, Tokyo, Japan, (2000) 135-138.
- [10] Kickelbick G., Hybrid Materials-Past, Present and Future, *Hybrid Mater.* 2014; Volume 1, 39–51.
- [11] Rejab, Hamdan, Quanjin, Hystorical development of hybrid materials
- [12] Applications of hybrid organic-inorganic nanocomposites (2005)
- [13] Y. Suyama, “Research and Development of Organiz-Inorganic Nanohybrids Materials”, *Ceramics Japan*, 39 (2004) 92-93
- [14] Diego Villalón, A., Gutiérrez Jiménez, J.P., Arteaga Iriarte, A., López Hombrados, C., UTILIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE NUEVOS PUENTES, *Actas de las II Jornadas de Investigación en Construcción.*
- [15] Mariam R. Syed, Maria Khan, Farshid Sefat , Zohaib Khurshid§, Muhammad S. Zafar, Abdul S. Khan; *Bioactive Glass and Glass Fiber Composite: Biomedical/Dental Applications*; Chapter 17
- [16] Maier P., Hort N., Magnesium Alloys for Biomedical Applications, *Metals* 2020, 10, 1328.

- [17] Krishan K. Chawla, *Composite Materials, Science and Engineering*, Third Edition Springer
- [18] Rubio E.M., Blanco D., Marín M.M., Carou D., Analysis of the latest trends in hybrid components of lightweight materials for structural uses, 8th Manufacturing Engineering Society International Conference, 2019, 1047-1054.
- [19] Tanasa F., Zanoaga M., Polymer based hybrid materials for aerospace applications, International conference of scientific paper afases, 2012.
- [20] Kayan A., Preparation, Characterization and Application of Hybrid Materials Having Multifunctional Properties, *J Inorg Organomet Polym*, 2015, 25:1345–1352.
- [21] Graham D, Huddle D, McNamara D (2003) Machining dry is worth a try. *Mod Mach Shop* 76 (5):79
- [22] Heine HJ (1997) Dry machining—a promising option. *Am Mach* 141(8):92
- [23] Canter N (2009) The possibilities and limitations of dry machining. *Tribol Lubr Technol* 65(3):40–44
- [24] Molinari A, Nouari M (2002) Modeling of tool wear by diffusion in metal cutting. *Wear* 252(1–2):135–149
- [25] Black JT, Kohser RA, DeGarmo EP (2008) *DeGarmo’s materials and processes in manufacturing*, 10th edn. Wiley, Hoboken, NJ xvi. 1010 p
- [26] Silva, E., Bacci M., Rocha A., Burr Produced on the Drilling Process as a Function of Tool Wear and Lubricant-Coolant Conditions, *J. Of the Braz. Soc. Of Mech. Sci. & Eng.*, January-March 2009, Vol. XXXI, No. 1
- [27] Hung NP, Yeo SH, Oon BE (1997) Effect of cutting fluid on the machinability of metal matrix composites. *J Mater Process Technol* 67(1–3):157–161
- [28] Kannan S (2006) Machining of metal matrix composites: forces, tool wear and attainable surface quality, in department of mechanical engineering. The University of New Brunswick
- [29] Cronjäger L, Meister D (1992) Machining of fibre and particlereinforced aluminium. *CIRP Ann Manuf Technol* 41(1):63–66
- [30] Solhjoei N et al (2012) High speed milling of Al₂O₃ particles reinforced aluminium MMC. *Res J Appl Sci Eng Technol* 4(17): 3015–3020
- [31] Braga DU et al (2002) Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum– silicon alloys. *J Mater Process Technol* 122(1):127–138
- [32] A. Morales, F. Puerta, F. Bañón, J. Salguero, O. Pereira. P. Hernández, J. Fernández, Optimización del proceso de taladrado dentro del contexto de la industria 4.0; *Técnica y Tecnología*
- [33] McGinty MJ, Preuss CW (1985) Machining ceramic fiber metal matrix composites. In: Sarin VK (ed) *Congress on high productivity in machining, materials and processing*. ASM International, New Orleans, LA

- [34] Shetty R et al (2008) Steam as coolant and lubricant in turning of metal matrix composites. *Int Appl Phys Eng J* 9(9):1245–1250
- [35] Boutrih L., Ayed L.B., Nouari M., Modeling of the interface delamination process when machining hybrid multi-material assemblies, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2021) 112:1903–1916.
- [36] Saravanan A., Periyakgoundar S., Gunasekaran S. (2019) Magnesium alloys: a review of applications
- [37] F. Yang, F. Lv, X. M. Yang, S. X. Li, Z. F. Zhang, Q. D. Wang, Enhanced very high cycle fatigue performance of extruded Mg-12Gd-3Y-0.5Zr magnesium alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, 528 (2011), 2231–2238, doi:10.1016/j.msea.2010.12.092
- [38] X. Yang, Y. Okabe, H. Miura, T. Sakai, Annealing of a magnesium alloy AZ31 after interrupted cold deformation, *Mater. Des*, 36 (2012), 573–579, doi:10.1016/j.matdes.2012.08.025
- [39] G. Huang, J. Li, T. Han, H. Zhang, F. Pan, Improving low-cycle fatigue properties of rolled AZ31 magnesium alloy by pre-compression deformation, *Mater. Des*, 58 (2014), 439–444, doi:10.1016/j.matdes.2014.01.075
- [40] P. Li, G. Wu, R. Xu, W. Wang, S. Wu, K. W. K. Yeung, P. K. Chu, In vitro corrosion inhibition on biomedical shape memory alloy by plasma – polymerized alloy mine film, *Mater. Lett*, 89 (2012), 51–54, doi:10.1016/j.matlet.2012.08.054
- [41] G. Song, Control of biodegradation of biocompatible magnesium alloys, *Corros. Sci*, 49 (2007), 1696–1701, doi:10.1016/j.corsci. 2007.01.001
- [42] X. N. Liao, F. Y. Cao, L. Y. Zheng, W. J. Liu, A. Chen, J. Q. Zhang, C. Cao, Corrosion behavior of copper under chloride-containing thin electrolyte layer, *Corros Sci*, 53 (2011), 3289–98, doi:10.1016/j.corsci.2011.06.004
- [43] Totten G., Mackenzie S., (2003) *Handbook of Aluminum Vol 1: Physical Metallurgy and Processes*
- [44] Kutz M., (2015), *Mechanical Engineers Handbook, Volume 1- Materials and Engineering Mechanics (4th Edition)*
- [45] Vijayaram T.R., Nataraja M.P., Ramarao M., Ananthapadmanaban D., (2021) *Titanium and Titanium Alloys: Advanced Materials for Engineering Industries*,
- [46] Salihi S.A., Suleiman Y.I., Eynavi A.I., (2019) Classification, Properties and Applications of titanium and its alloys use in automotive industry-A review
- [47] C.Veiga, J.P. Davim and A.J.R. Loureiro, Properties and applications of titanium alloys: A brief review, *Properties and applications of titanium alloys: a brief review*, *Rev. Adv. Mater. Sci.* 32 (2012) pp: 14-34, 2912
- [48] Leyens C., Peters. M. (2003). *Titanium and titanium alloys. Fundamentals and Applications.* WILEY-VCH, Germany

[49] Yassin M. A., Khairul S. M. S., Mahadzir I., Basim A. K. (2012). Titanium and its alloy. International Journal of Science and Research (IJSR), vol. 3 Issue 10