



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

EFFECTO DEL MÉTODO DE SUMINISTRO DEL FLUIDO DE CORTE EN LA INTEGRIDAD DE SUPERFICIE EN EL FRESADO FRONTAL DE LA ALEACIÓN ALUMINIO 7075

ADOLFO ENRIQUE OSORIO VARGAS

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de ingeniería, Área curricular de ingeniería mecánica y mecatrónica
Maestría en ingeniería-materiales y procesos
Bogotá Colombia
2018

EFFECTO DEL MÉTODO DE SUMINISTRO DEL FLUIDO DE CORTE EN LA INTEGRIDAD DE SUPERFICIE EN EL FRESADO FRONTAL DE LA ALEACIÓN ALUMINIO 7075

Adolfo Enrique Osorio Vargas

Tesis o trabajo de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería -Materiales y procesos

Director:

PhD. JOSÉ MANUEL ARROYO

Línea de Investigación:

Procesos de manufactura y metalurgia

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Bogotá, Colombia

2018

*Life is short, Break the Rules. Forgive quickly,
Kiss slowly. Love truly. Laugh uncontrollably
And never regret ANYTHING That makes you
smile.*

Mark Twain

Agradecimientos

A la Universidad Nacional.

Al Ingeniero José Manuel Arroyo, por la dirección del trabajo de investigación y los esfuerzos dedicados a realizar este trabajo.

A los laboratoristas y los laboratorios de Laboratorio de Metrología Dimensional de precisión del Dpto. de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica y al laboratorio de Difractometría de rayos X del Dpto. De Física por la colaboración prestada y la ayuda en la realización de este proyecto.

A mis Padre y Madre, a mis hermanas y familia por apoyarme en todo, por no dejarme caer jamás, por ser mi soporte y por no permitir jamás que me rindiera en mis metas por más arduas que se situaran las cosas.

Resumen

En esta tesis se presenta un estudio del efecto del método de suministro de fluido de corte en la integridad de superficie, en el proceso de fresado frontal en la aleación de aluminio 7075. Este estudio se abordó con base al análisis de la rugosidad superficial y la microestructura superficial.

Para ello se planteó un diseño experimental en bloques (DBCA), con el fin, de comparar el efecto de tres métodos de suministro de fluido de corte sobre la rugosidad superficial, con este propósito, fue diseñada una probeta adecuada que cumpliera con los parámetros establecidos en el modelo experimental y a las posibilidades de montaje en el centro de maquinado HARTFORT SMC-5 donde se realizaron los experimentos.

El primer análisis de integridad superficial realizado, fue la evaluación de la morfología superficial por medio de microscopía electrónica de barrido, encontrando diferentes defectos superficiales atribuidos al método de suministro de fluido de corte empleado.

También, se realizaron análisis de rugosidad de las superficies por medio de un perfilómetro de variación focal, estos resultados se analizaron a profundidad en dos estudios propuestos; el primer estudio realizado fue un análisis de las medias generales de todos los parámetros de rugosidad estudiados, este estudio arrojó como principal resultado la identificación de los parámetros de rugosidad que presentan mayor sensibilidad ante los cambios a las condiciones de corte propuestas, R_t , R_z y R_{max} . Adicionalmente mediante gráficas descriptivas se lograron relacionar las mediciones de rugosidad con varios de los defectos presentados en los análisis morfológicos.

El segundo estudio propuesto para el análisis de la rugosidad superficial fue mediante un ANOVA (análisis de varianza) evaluando la influencia del método de suministro de fluido de corte sobre la rugosidad superficial. Los resultados del diseño experimental mostraron

que el factor método de suministro de fluido de corte no fue estadísticamente significativo sobre la rugosidad superficial.

Se realizó un estudio de esfuerzos residuales mediante la técnica de difracción de rayos-X (DRX-P), en este estudio se evidenció que las muestras maquinadas empleando los métodos con fluido de corte presentaron esfuerzos compresivos, esto puede atribuirse al efecto de lubricación el cual disminuye las tensiones provocadas por el maquinado. De otro lado, la muestra maquinada sin fluido de corte desarrolló esfuerzos de tensión posiblemente a la fricción con el flanco de la herramienta de corte en el proceso de formación de viruta.

Por último, se realizó un estudio de difracción de rayos x con el fin de estudiar los cambios en la microestructura de las superficies maquinadas. Se observó que el método de suministro de fluido de corte aparentemente tiene influencia en variaciones en el tamaño de grano del material en la superficie maquinada.

Palabras clave: aleación de aluminio 7075, morfología de la superficie, rugosidad superficial, esfuerzos residuales.

Abstract

This thesis presents an explanation of the effect of the cutting fluid supply method on the surface integrity, in the front milling process in the 7075 aluminum alloy. This study was addressed based on the analysis of the surface roughness and the surface microstructure.

To do this, an experimental block design was proposed, in order to compare the effect of three cutting fluid supply methods on the surface roughness, from the DBCA, a specimen was designed under the parameters established in the experimental model, additionally, the design process considered the assembly possibilities of the HARTFORT SMC-5 machining center of the laboratory of machines and tools of the National University, guaranteeing a precise and rigid clamping of the raw material. The manufacturing plan was designed taking into account product and process engineering criteria; was simulated, before running it on the real machine.

Samples were extracted from the surfaces of the machined test part by means of the wire electrical discharge machining process. These, first, the surface morphology was evaluated by means of the scanning electron microscopy, finding a series of superficial defects characteristic of each method used.

The second analysis was through an ANOVA (analysis of variance) evaluating the influence of the method of supply of cutting fluid on the surface quality. The results of the experimental design showed that the cutting fluid factor was not statistically significant on the surface roughness. To validate this result, the validation of the statistical assumptions was performed through a graphical analysis and statistical tests to approve the suitability of the selected experimental model.

Finally, a study of x-ray diffraction was carried out in order to study the microstructure of the machined surface. In a study of phases, it was possible to demonstrate that the method of supply of cutting fluid causes partial changes in the surface and subsurface of the

material, these changes are mainly due to an increase in temperature that causes the partial change.

Keywords: Aluminum 7075, surface integrity, statistical analysis, surface morphology, surface roughness, phase change, residual stress.

Contenido

Resumen	IX
Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XVIII
Lista de Símbolos y abreviaturas	XIX
Introducción	1
1. Revisión bibliográfica	25
1.1 Maquinado de la aleación de aluminio 7075.....	25
1.1.1 Microestructura de la aleación de aluminio 7075	27
1.2 Método de suministro de fluido de corte	28
1.2.1 Suministro de fluido de corte a alta presión	30
1.2.2 mínima cantidad de fluido de corte MQL (<i>minimum quantity lubrication</i>).....	31
1.2.3 Maquinado en seco	31
1.3 Efecto de la aplicación de fluido de corte	33
1.4 Integridad de superficie	35
1.5 Rugosidad de la superficie	37
1.5.1 Parámetros de Rugosidad:	39
1.5.2 Métodos de medición de la superficie	43
1.6 Medición de esfuerzos residuales mediante difracción de rayos x.....	46
1.6.1 Análisis de Esfuerzos residuales en mecanizado.....	46
1.6.2 medición del esfuerzo:	47
1.6.3 Determinación del esfuerzo:	49
1.6.4 Análisis de esfuerzo triaxial	51
2. Materiales y Métodos	53
2.1 Selección del diseño experimental para el análisis de la rugosidad superficial. 54	54
2.2 Diseño de la probeta:	56
2.3 Herramienta de corte y parámetros de corte:	57
2.4 Montaje experimental	59
2.4.1 Alistamiento de la materia prima.....	59
2.4.2 Ejecución de proceso experimental	60
2.4.3 Probetas para caracterización	62
2.4.4 Caracterización morfología de las superficies maquinadas.....	63
2.4.5 Análisis de la rugosidad superficial	63
2.4.6 Caracterización por difracción de rayos X.....	63
3. Resultados y discusión	64
3.1 Topografía de la superficie maquinada.....	64
3.2 Rugosidad de las superficies maquinadas	72
3.2.1 Análisis de varianza.....	80
3.3 Análisis de difracción de rayos X (DRX)	82

3.3.1 Difracción de rayos X (DRX) y análisis de transformación de fases.....	82
3.3.2 Medición de esfuerzos residuales.....	86
4. Conclusiones	90
4.1 Recomendaciones para trabajos futuros.....	93
Bibliografía	94
A. Anexo: A. Procedimiento para el cálculo de las replicas.....	103
B. Anexo:B. Microscopia electrónica de barrido-SEM.....	107
C. Anexo: :C. Análisis semicuantitativo de rugosidad.....	111
D. Anexo: D.Análisis de varianza y validación de supuestos.....	116
E. Anexo: E. Esfuerzos Residuales.....	126

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Análisis metalográfico de un lingote fundido de AA7075, estructura multifase. El precipitado fino en la matriz de aluminio se forma durante el enfriamiento lento de la solidificación inicial del lingote. [xxx].....	27
Figura 1-2: Efecto de la aplicación de diferentes método de suministro de fluido de corte con diferentes materiales de herramienta. [33.]	34
Figura 1-3: Diagrama causa-efecto de parámetros que afectan la rugosidad [42]....	36
Figura 1-4: Reducción de la resistencia a la fatiga del acero fundido sometido a diversas operaciones de acabado superficial. [43]	37
Figura 1-5: Representación gráfica de la textura superficial. Textura de la superficie (rugosidad superficial, ondulación y direccionalidad o <i>Lay</i>), ANSI / ASME B46.1, ASME [43].	38
Figura 1-6: Esquema de un perfil de superficie $z(x)$ [43]	39
Figura 1-7: perfil de simetría parámetro R_{sk} . (a) simetría mayor a 0 (b) simetría menor a cero [46]	41
Figura 1-8: perfil de simetría parámetro R_{ku} . (a) densidad mayor a 3 (b) densidad menor a 3 [46]	41
Figura 1-9: Altura máxima de perfil R_t (ejemplo de perfil de rugosidad) [47].	42
Figura 1-10: Altura máxima del pico del perfil y profundidad máxima del valle del perfil (ejemplo de perfil de rugosidad) [47].	42
Figura 1-11: (a) Altura máxima del perfil y (b) altura de los elementos del perfil (ejemplos de perfiles de rugosidad) [47].	43
Figura 1-12: Microscopia SEM de una traza realizada por un instrumento de aguja que muestra el daño superficial a una superficie recubierta de Ni-P sin electrolito (material de punzón, diamante, radio de punzón = 0,1 μm y carga de estilete = 10 μN o 1 mg). [48].	43
Figura 1-13: Selección del tipo de método de medición de superficie [49]	44
Figura 1-14: Diagrama esquemático de un dispositivo de medición típico basado en la variación del enfoque. [51]	45
Figura 1-15: tipos de esfuerzos residuales en superficies maquinadas [55].....	46
Figura 1-16: sistema de coordenadas utilizado para el cálculo de la tensión superficial. Obsérvese que ϵz y σ_3 son normales a la superficie de la muestra [58].....	48
Figura 1-17: Esquema donde se muestra los planos de difracción paralelos a la superficie y en un ángulo $\phi\psi$. Nota σ_1 y σ_2 se encuentran ambos en el plano de la superficie de la muestra [58].....	48
Figura 1-18: Ejemplo de un gráfico d vs $\sin 2\psi$ [58].....	50

Figura 1-19:	Otros ejemplos de graficas del mismo principio de d vs $\sin^2\psi$ [58]	51
Figura 2-1:	esquema general del diseño experimental para evaluar la integridad de superficie en el fresado frontal de la aleación de aluminio 7075.....	54
Figura 2-2:	probeta diseñada bajo los principios del diseño experimental	57
Figura 2-3:	dimensiones principales de la fresa de escuadra marca Walter.	57
Figura 2-4:	plano de alistamiento de la probeta	59
Figura 2-5:	montaje de la probeta en el centro de maquinado.....	61
Figura 2-6:	Probetas de las superficie maquinadas bajo diferentes métodos de suministro de fluido de corte.	62
Figura 3-1:	Morfología de la superficie maquinada bajo diferentes condiciones de fluido de corte: (a)chorro (b)corte en seco (c) corte interno a alta presión.....	64
Figura 3-2:	Imágenes SEM de la superficie maquinada bajo el método de suministro de fluido de corte interno a alta presión.....	65
Figura 3-3:	Mecanismo de formación de desgarro en maquinado [35].	66
Figura 3-4:	Imágenes SEM (A) partículas adheridas sobre la superficie maquinada. (B) topografía de la superficie maquinada magnificación $20\ \mu\text{m}$	67
Figura 3-5:	Mecanismo de formación de los defectos causados por partículas duras. [66]	67
Figura 3-6:	Imágenes SEM de la superficie maquinada en seco.	68
Figura 3-7:	Imágenes SEM de la superficie maquinada bajo el método de suministro de fluido por chorro.	70
Figura 3-8:	Diagrama Esquemático de la ubicación de los puntos de Medición de Rugosidad Superficial.	73
Figura 3-9:	Ejemplos típicos de perfiles de rugosidad superficial 2D obtenidos, $L_c:0,8\ \text{mm}$, longitud de la muestra $4\ \text{mm}$, filtro: gaussiano (<i>high pass</i>). (a) chorro (b) interno a alta presión (c) seco.	73
Figura 3-10:	Influencia del avance sobre la rugosidad superficial, en el fresado frontal con insertos de punta esférica. (a) influencia de parametrdo de avance por diente en la rugosidad superficial (b) influencia del numero de insertos en la rugosidad superficla. ...	74
Figura 3-11:	Variación experimental para los parámetros, a de los perfiles de rugosidad 2D.	75
Figura 3-12:	Comparación de los parámetros promedio de rugosidad, , influencia del método de suministro de fluido de corte que se utilice	77
Figura 3-13:	Comparación de los parámetros de altura parámetros de amplitud máximos y los parámetros promedio de rugosidad	77
Figura 3-14:	Comparación de parámetros de amplitud.....	78
Figura 3-15:	(a) Comparación de parámetros de rugosidad estadísticos. (b) definición de la asimetría (R_{sk}) [80].	79
Figura 3-16:	difractogramas de las muestras maquinadas, Análisis de fases.	83
Figura 3-17:	difractogramas DRX de la muestras maquinadas, en el pico principal $\text{Al } \alpha$ (111).	84
Figura 3-18:	comparación del tamaño de grano inferido por DRX en las muestras maquinadas empleado diferentes condiciones de suministro de fluido de corte.....	84

Figura 3-19:	esquema de la geometría de las muestras maquinadas durante la medición de esfuerzo residuales. Definición del sistema de ejes de referencia.	86
Figura 3-20:	Patrones de difracción en el las posiciones de 2θ de 64.50° y 65.58° . .	87
Figura 3-21:	esfuerzos residuales en maquinado debidas al efecto de la técnica de suministro de fluido de corte.....	88
Figura 0-1	: grafico de probabilidad normal.	116
Figura 0-2	: grafico de histogramas.....	117
Figura 0-3	: grafico de residuos vs orden de tiempo.....	118
Figura 0-4	: gráfico de residuos vs. Predichos.....	118

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Composición química de la aleación de aluminio 7075 [11]	25
Tabla 1-2: Designación numérica para las aleaciones de aluminio [12]	26
Tabla 1-3: características de los fluidos de corte	29
Tabla 1-4: Niveles de estudio de la integridad de superficie	36
Tabla 1-5: Promedio de la línea central y grados de rugosidad [45].....	40
Tabla 2-1: Propiedades físicas del aluminio 7075 [60]	53
Tabla 2-2: Especificaciones del centro de maquinado SMC-5 HARTFORD.....	53
Tabla 2-3: Especificaciones del refrigerante SWISSCOOL MAGNUM UX 200	54
Tabla 2-4: arreglo de datos diseño DBCA propuesto.	55
Tabla 2-5: código NC premaquinado probetas.....	60
Tabla 2-6: Muestreo Aleatorio, orden de maquinado.	62
Tabla 2-7: Especificaciones microscopio electrónico de barrido TESCAN VEGA3	63
Tabla 2-8: Especificaciones instrumento de medición microscopio variación focal INFINITE FOCUS.	63
Tabla 3-1: parámetros de rugosidad 2D [77].....	72
Tabla 3-2: Valores medios de la rugosidad superficial.	76
Tabla 3-3: Tabla ANOVA. Análisis de Varianza para Ra.....	80
Tabla 2-5 :Tabla de ANOVA del estudio base [97].....	105
Tabla 2-6 :valores de $\Delta *$ para determinar el número de replicaciones [88].....	105

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
Ra	Media aritmética	μm	Ec 1.1
Rq_T	desviación estándar	μm	Ec.1.2
Rsk	Asimetría	---	Ec. 1.5
Rku	kurtosis	---	Ec. 1.6
Rt	altura máxima de pico a valle	μm	Figura 1.8
Rp	altura máxima del pico	μm	Figura 1.9
Rv	profundidad máxima del valle	μm	Figura 1.9
Rz	Altura media de pico a valle	μm	Figura 1.10
Rpm	altura media pico a media	μm	Figura 1.10
dn	Parámetro de red		
ap	Profundidad de corte	mm	
ae	Profundidad de corte axial	mm	
Vc	Velocidad de corte	m/min	
fz	Avance por diente	mm/diente	
n	Velocidad angular	rpm	Ec 2.3
Vf	Velocidad de avance	mm/min	Ec 2.4

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
ϵ_z	Deformación en la dirección z	Mpa	Ec.1.1
φ			$\frac{m_j}{m_{bm\varphi}}$
ψ			Sección 3.2
σ			$1 - \frac{\rho_s}{\rho_w}$
v			Figura 3-1
Δ^*	diferencia mínima estandarizada		
α	probabilidad de cometer error tipo I		
β	probabilidad de cometer error tipo II		
μ	Media general		
σ_p^2	cuadrado medio del error		

Abreviaturas

Abreviatura	Término
MQL	<i>minimum quantity lubrication</i> (minima cantidad de fluido)

Abreviatura Término

HSS	High Speed Steel (acero rapido)
SEM	microscopio electrónico de barrido
AFM	Atomic force microscopy (microscopio de fuerza atómica)
LVDT	Transformador diferencial variable lineal
DRX-P	Difracion de rayos X polvo
UE	Unidad experimental
DBCA	Diseño en bloques completamente aleatorizado
BUE	Build Up Edge (Filo recrecido)
BUL	Build Up Layer (Capa recrecida)

Introducción

En los componentes fabricados por maquinado la integridad de superficie es crítica para el desempeño y funcionamiento de un componente. Por esta razón, varios investigadores han estudiado analíticamente y experimentalmente las relaciones entre los parámetros del proceso de maquinado, la naturaleza de las alteraciones superficiales producidas y su efecto sobre el rendimiento funcional del producto. En este sentido, esta tesis de maestría tiene como principal propósito entender el efecto del método de suministro del fluido de corte en la integridad de superficie de la aleación de aluminio 7075 maquinada mediante fresado frontal. Esta aleación tiene una muy buena relación peso/resistencia y elevada conductividad térmica razón por la cual es frecuentemente empleada en productos de las industrias aeronáutica y automotriz. Las aleaciones se pueden maquinar de forma rápida y económica, no obstante, en el maquinado se presentan algunos problemas asociados a diversas causas como son: la selección inadecuada de la herramienta de corte, la microestructura específica de la aleación, parámetros de corte inapropiados y el método de suministro del fluido de corte. Estos factores afectan la maquinabilidad e influyen en la integridad de la superficie fabricada por maquinado.

El maquinado es un proceso de fabricación en el cual se remueve material de la pieza procesada por medio de una herramienta de corte. Este proceso es un sistema complejo, donde intervienen diferentes variables como: el material de la pieza de trabajo, la herramienta de corte, el fluido de corte, el sistema de sujeción del material de trabajo y de la herramienta de corte, así como la máquina herramienta. En la literatura se hace especial énfasis en una selección adecuada de cada una de las variables dado que influyen directamente en los fenómenos físicos, químicos y mecánicos del proceso de corte [1]. El estado y los atributos de una superficie maquinada que influyen en el desempeño son descritos por el término integridad de superficie [2].

El desempeño funcional de cada pieza en particular depende directamente de la calidad de la superficie resultante de los procesos de fabricación utilizados para producir dicha pieza y una serie de variables, tales como: el tipo y condición de suministro de material de trabajo, las especificaciones técnicas de la pieza de trabajo, los requerimientos de calidad, la geometría y las variables de maquinado mencionadas anteriormente; todas ellas afectan el resultado final, en particular, cuando algunas de las condiciones no se cumplen o son mal seleccionadas la calidad de la superficie puede verse comprometida y presentar un acabado superficial deficiente o una tolerancia geométrica inadecuada.

Actualmente dentro de los parámetros de calidad establecidos a nivel industrial en la fabricación de productos metalmecánicos una superficie no homogénea no cumple con los parámetros establecidos en los estándares de calidad, debido a que compromete el desempeño del producto [3]. Al respecto Benardos et al. Señalan que la productividad de cualquier componente maquinado está determinada por la calidad de la superficie producida. Por lo tanto, las tolerancias geométricas, dimensionales y rugosidad superficial son parámetros muy importantes de la calidad en productos maquinados, en la mayoría de los casos, un requisito técnico para los componentes mecánicos [4].

Dicho lo anterior, se ha establecido que el fluido de corte, es uno de los parámetros más importantes del proceso; su uso correcto determina la vida de la herramienta y la calidad del producto; no obstante, los empleos incorrectos del fluido pueden generar consecuencias como que la viruta no se evacue adecuadamente o la temperatura en la interfase de corte supere la aceptable para el proceso, causando una serie de efectos perjudiciales en la pieza de trabajo y en la herramienta de corte [5].

En muchas situaciones en los procesos de maquinado, el empleo de fluidos de corte es indispensable si se proyecta aumentar la eficiencia, debido a que el calor imposibilita aumentar las velocidades de corte sin que la herramienta falle o sufra desgaste adhesivo y se produzcan diferentes defectos superficiales, tales como: Formación de muescas y defectos en la superficie, deformación plástica de la capa superficial, cambio en la dureza, microgrietas y macrogrietas, así como de tensiones residuales en la capa superficial [6].

En la actualidad existen diferentes métodos de suministro de fluido de corte entre otros: fluido externo por chorro, fluido interno a alta presión, método de mínima cantidad de fluido de corte MQL (*minimum quantity lubrication*) y maquinado en seco. Entre los métodos más usados se encuentra el suministro interno a alta presión, corte en seco y el método más empleado fluido externo mediante chorro [7]. No obstante, el método de suministro de fluido de corte por chorro está en descenso, debido a su impacto negativo en la salud de los operadores y en el medio ambiente

Propuesta de tesis

De esta forma, atendiendo las teorías esbozadas en este prólogo, el presente trabajo de investigación plantea una comparación cuantitativa y cualitativa, orientada a estudiar la variable de integridad de la superficie obtenida después del proceso de fresado frontal, de la aleación de aluminio 7075, maquinada considerando tres métodos de suministro de fluido de corte 1. fluido de corte externo por chorro, 2. Suministro a alta presión interna a través de la herramienta de corte. 3. método en seco; procedimiento realizado en el centro de maquinado HARTFORT SMC-5 de la Universidad Nacional.

Para lograr determinar el efecto del método de suministro de fluido de corte en la integridad de superficie se realizó un estudio de nivel estándar [41] donde se evalúa la superficie obtenida durante el proceso de maquinado.

Para tal evaluación, se realizó un diseño en bloques completamente aleatorizados para poder comparar el efecto del método en la rugosidad superficial. Para desarrollar dicho diseño experimental, se diseñó una probeta con una geometría donde se pudiera comparar tales métodos. Posteriormente, las superficies maquinadas se examinaron por medio del microscopio electrónico de barrido realizando un análisis a la topografía superficial, y de este modo, poder detallar los defectos causados por el empleo de cada método de suministro.

Por otra parte, para evaluar si la aplicación de diferentes métodos tenía influencia significativa sobre la rugosidad superficial, se realizó una comparación por medio de un análisis de varianza. Finalmente se realizó una evaluación de los esfuerzos residuales mediante la técnica de difracción de rayos-X para poder determinar los cambios en la

microestructura que pudieron ocasionar la aplicación de tales métodos. Los elementos acá nombrados se describen en detalle en la sección de métodos y técnicas.

El trabajo de investigación propuesto busca resolver la siguiente pregunta: ¿Qué diferencias hay en el efecto del fluido de corte en la integridad de la superficie maquinada de aleación de aluminio 7075 procesada por de fresado frontal de acabado? A partir de esta pregunta se plantean los siguientes objetivos:

Objetivo general

Analizar experimentalmente el efecto del método de suministro de fluido de corte (en seco, por chorro e interno a alta presión) en la integridad de superficie en el proceso de fresado de la aleación de aluminio 7075.

Objetivos específicos

- Diseñar un proceso experimental de maquinado adecuado, para comparar los tres tipos de suministro de fluido de corte
- Establecer el efecto del método de suministro de fluido de corte en la morfología de las superficies y en las tensiones residuales.
- Determinar el efecto del método de suministro de fluido de corte en la rugosidad superficial y en la microestructura de la superficie maquinada.

1.Revisión bibliográfica

1.1 Maquinado de la aleación de aluminio 7075

El uso de aleaciones de aluminio en diferentes aplicaciones tecnológicas e industriales ha aumentado significativamente en los últimos años. Esto se debe a que este material combina una alta resistencia con un bajo peso, esto es requisito en industrias como la aeronáutica. Dado que muchos componentes de aluminio se procesan utilizando procesos de maquinado [8], la investigación dirigida a obtener mejores resultados con estos procesos es altamente pertinente.

Las aleaciones de aluminio se han empleado intensivamente en la industria automovilística y aeroespacial, empleando especialmente las aleaciones de la serie 2xxx, 6xxx y 7xxx [9]. Las aleaciones de aluminio también han sustituido gradualmente al acero y fundiciones de hierro en algunas aplicaciones, por ejemplo, la aleación 2024-T3 es utilizada para el fuselaje de aviones, la aleación 7075-T651 se usa para la fabricación de ejes y engranajes para maquinaria estándar y aplicaciones de micro maquinado [10].

La aleación 7075 se caracteriza por ser un material altamente conductivo térmicamente y por facilitar la obtención de un acabado superficial brillante, esta aleación es ampliamente utilizada en componentes mecánicos en las industrias marítima, aeroespacial y en la fabricación de moldes de inyección de plástico e incluso en la industria militar. La **Tabla 1-1** muestra la composición química de la aleación 7075.

Tabla 1-1: Composición química de la aleación de aluminio 7075 [10]

Peso %	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
7075	0.40	0.50	2.0	0.30	2.9	0.28	6.1	0.20

Las aleaciones de aluminio se dividen en dos grandes categorías [11]:

- Aleaciones de aluminio para moldeo
- Aleaciones de aluminio para conformado

La diferencia en las dos categorías arriba mencionadas, se puede lograr teniendo en cuenta los mecanismos involucrados en la obtención de las propiedades mecánicas

finales; los tratamientos térmicos de estas aleaciones se basan en la solubilidad de las fases; e incluyen entre otros el solubilizado, temple y el endurecimiento por precipitación.

Para codificar las aleaciones para moldeo y conformado, se emplea designaciones numéricas de cuatro dígitos para identificar a las aleaciones de aluminio. El primer dígito indica el grupo de aleación; el segundo dígito indica modificaciones realizadas sobre la aleación original o límites de impurezas y los dos últimos identifican la aleación de aluminio o indican la pureza del mismo. El sistema de designación para aleaciones de aluminio para conformado y moldeo se muestra en la **Tabla 1-2**.

Tabla 1-2: Designación numérica para las aleaciones de aluminio [11]

Serie	Principales elementos aleantes
1XXX	Aluminio 99% puro (no tratable térmicamente)
2XXX	Cobre (térmicamente tratable)
3XXX	Manganeso (no tratable térmicamente)
4XXX	Silicio (no tratable térmicamente)
5XXX	Magnesio (no tratable térmicamente)
6XXX	Magnesio y Silicio (térmicamente tratable)
7XXX	Zinc (térmicamente tratable)
8XXX	Otros elementos
9XXX	No usado

Las aleaciones de aluminio presentan buena maquinabilidad en comparación con otras familias de aleaciones metálicas ligeras como las aleaciones de titanio y las de magnesio. Sin embargo, este material también presenta algunas desventajas debido a que alguno de sus componentes microestructurales son susceptibles a la corrosión, limitando sus aplicaciones en condiciones de humedad y temperatura elevadas [12].

El aluminio cuando se mecaniza presenta una mecánica particular debido a su bajo módulo de elasticidad (72 Gpa); se forma una gran área de contacto entre la herramienta de corte y la viruta, en consecuencia, la relación de espesor de viruta es alta lo que contribuye a aumentar las fuerzas de corte, la potencia de corte, el calor en la interfase de corte y generar virutas largas y fibrosas causando un acabado de superficie pobre [13]. Sin embargo este proceso puede variar dependiendo del elemento aleante principal que pueden aumentar la dureza y las propiedades mecánicas del aluminio causando una reducción en el área de contacto entre la herramienta y la viruta.

En cuanto a la temperatura, en el maquinado de aleaciones de aluminio no es un problema importante, debido a su bajo punto de fusión, no es capaz de alterar las propiedades mecánicas de la herramienta de corte disminuyendo la tasa de desgaste de la herramienta [14]. Sin embargo, un aumento de la temperatura de corte a un nivel dado puede generar alteraciones microestructurales, tensiones residuales en la capa superficial, errores de tolerancia, distorsiones superficiales y acelerar el desgaste de la herramienta y la adherencia del material de trabajo sobre los bordes de la herramienta. Temperaturas más

altas también pueden aumentar la ductilidad del material, lo que produce viruta más larga [15] también causa la interacción química entre el aluminio y el material de revestimiento de la herramienta provocando la difusión [16]. Según Yousefi e Ichida [17], el calor generado aumenta la temperatura de corte a medida que aumenta la velocidad de corte.

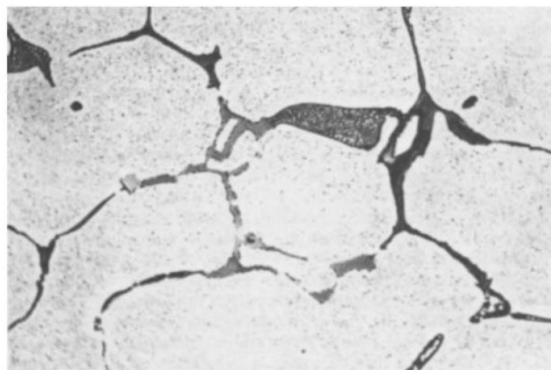
1.1.1 Microestructura de la aleación de aluminio 7075

El aluminio tiene una red cristalina cúbica de caras centradas (fcc) con un parámetro de red $a = 4,0413 \text{ \AA}$. El aluminio deformado y recocido tiene una alta plasticidad ($\delta = 35-40\%$), baja resistencia mecánica [$\sigma = 8-10 \text{ kgf/mm}^2$] y una dureza de 25 HB. La aleación AA 7075 se compone principalmente de 2 fases principales.

La aleación de aluminio 7075 dependiendo el estado se puede encontrar: fase α (fcc, la matriz, M) que contiene $\approx 99 \text{ en\% Al}$ y $\approx 1 \text{ en\% Zn}$, y fase β (hexagonal, los precipitados), a menudo denotada en la literatura como β (Zn), que tiene $\approx 99.5 \text{ en\% Zn}$ y $\approx 0.5 \text{ en\% Al}$, adicionalmente, esta aleación se genera la presencia de fases secundarias como las fases η (MgZn_2), T ($\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$) y S (Al_2CuMg) [18].

El zinc es el elemento aleante más importante y cuando se agrega una pequeña cantidad de magnesio resulta tratable térmicamente logrando alta resistencia mecánica y mayor potencial de endurecimiento por precipitación. El zinc, por sí mismo, es altamente soluble en aluminio y no ejerce una influencia apreciable en la microestructura de una aleación simple como AA7075. Sin embargo, los elementos aleantes que se encuentra con mayor frecuencia son: magnesio, cobre, así como aditivos como el cromo, manganeso, circonio, hierro y silicio. En forma de lingotes fundidos, la aleación 7075 forma una o más variantes de $(\text{Fe, Cr})_3\text{SiAl}_{12}$, Mg_2Si , y una fase eutéctode pseudobinaria compuesta de aluminio y MgZn_2 (Figura 1-1) [19].

Figura 1-1: Análisis metalográfico de un lingote fundido de AA7075, estructura multifase. El precipitado fino en la matriz de aluminio se forma durante el enfriamiento lento de la solidificación inicial del lingote. [19]



1.2 Método de suministro de fluido de corte

Los fluidos de corte son imprescindibles en la mayoría de las operaciones de maquinado y entre otros producen los siguientes efectos [20]:

- Reducen la temperatura.
- Aminoran la fricción herramienta-material de trabajo
- Disminuyen la tasa de desgaste de la herramienta

El empleo de los fluidos de corte es de crucial importancia durante el maquinado, adicionalmente, tiene efecto sobre el estado final del componente maquinado, los fluidos de corte también influyen en la vida de la herramienta.

El efecto positivo del uso de fluidos de corte fue reportado por primera vez en 1894 por F. Taylor, quien observo que, al aplicar grandes caudales de agua en el área de corte, la velocidad de corte podría aumentar hasta 33% sin reducir la vida de la herramienta. Desde entonces, se han desarrollado fluidos de corte que resultan en una extensa gama de productos que cubren la mayoría de los materiales y operaciones [21].

Los fluidos de corte se clasifican en cuatro categorías:

- (i) Aceites integrales.
- (ii) Aceites solubles (emulsiones).
- (iii) Fluidos sintéticos (químicos).
- (iv) Fluidos semi-sintéticos (semiquímicos).

Los aceites de corte integrales, pueden ser productos derivados del petróleo, vegetales o mixtos, con aditivos. Debido a su bajo desempeño en la refrigeración y su alta lubricidad son empleados en aplicaciones de baja temperatura y baja velocidad de corte.

Los aceites solubles son básicamente partículas de aceite suspendidas en agua. Se fabrican mezclando aceite con un agente emulsionante en agua (lo que aumenta la estabilidad de la emulsión). Contiene aceite base, emulsionante y otros aditivos. El aceite base puede ser aceite mineral o vegetal; Otros aditivos incluyen agentes de neutralización; Y aditivos de lubricación tales como aditivos antidesgaste, biocidas, fungicidas e inhibidores de espuma. Los emulsionantes dispersan el aceite en el agua con el fin de hacer una emulsión estable de aceite en el agua [22].

Los fluidos de corte a base de minerales son derivados del petróleo y se dividen en dos tipos: parafínicos y nafténicos. Tienen una biodegradabilidad deficiente por tanto pueden contaminar el medio ambiente. Los fluidos de corte sintéticos y semisintéticos se mezclan normalmente con agua y diversos productos químicos. Los productos químicos añadidos tienden a prevenir el óxido, mejorar la lubricación y reducir la tensión superficial. Los fluidos

de corte sintéticos tienden a tener buenas propiedades de refrigeración, pero sus propiedades lubricantes son menores que los fluidos de corte [23].

Los fluidos de corte semisintéticos son combinaciones de fluidos de corte sintéticos y emulsiones. Los fluidos de corte semisintéticos se componen de un menor porcentaje aceite (2-30% de aceite), mientras que los fluidos de corte sintéticos no contienen aceite. Las ventajas y desventajas relativas de los diferentes tipos de fluidos de corte se presentan en la Tabla 1-3.

Tabla 1-3: características de los fluidos de corte

Aceite de corte	Aceites solubles	semisintéticos	sintéticos
Ventajas			
<ul style="list-style-type: none"> • Excelente lubricidad • Control de oxidación 	<ul style="list-style-type: none"> • Buena lubricidad • Buena capacidad refrigerante 	<ul style="list-style-type: none"> • Buena refrigeración • Control de oxidación • Buen control microbiano 	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente enfriamiento • Excelente control microbiano • Inflamable • Control de oxidación • Reducción de la niebla y formación de espuma
desventajas			
<ul style="list-style-type: none"> • Baja capacidad de enfriamiento • Peligro de incendio • Limitado a baja velocidad y operaciones de corte pesadas 	<ul style="list-style-type: none"> • Problemas de control de oxidación • Crecimiento de bacterias • Perdidas por evaporación 	<ul style="list-style-type: none"> • Formación de espuma • La estabilidad se ve afectada por la dureza del agua • Fácilmente contaminado por otros fluidos de la máquina 	<ul style="list-style-type: none"> • Pobre lubricidad • Se contamina fácilmente por otros tipo de fluidos

No obstante, el impacto en el medio ambiente y los elevados costos asociados principalmente a la manipulación, reciclado y eliminación del fluido están conduciendo al desarrollo de alternativas tales como nuevos materiales para herramienta y revestimientos que permiten el corte en seco y la aplicación de pequeñas cantidades de fluido como niebla [24]. Según Kress, los costos asociados con el uso de fluidos de corte representan aproximadamente el 17% del coste de la pieza acabada, frente al 4% representado en el costo de las herramientas [25].

La herramienta de corte es sensible a los cambios en las condiciones de corte (velocidad de corte, profundidad de corte) y presencia de fluido de corte. Si bien el daño a la herramienta no puede evitarse, a menudo puede reducirse si su mecanismo de falla y los

factores que lo controlan se entienden suficientemente [26]. A continuación, se describen los métodos de suministro de fluido de corte más empleados actualmente.

1.2.1 Suministro de fluido de corte a alta presión

El método de suministro de fluido de corte por chorro es el método de suministro de fluido de corte más empleado, sin embargo, presenta varios problemas en el maquinado de algunos materiales o en el maquinado con bajas velocidades de corte debido a la dificultad de controlar la viruta, esto ocasiona un desgaste acelerado de la herramienta de corte. Las virutas largas y continuas pueden provocar atascos y, en consecuencia, un fallo de la herramienta o, en el peor de los casos, dañar piezas costosas. Asimismo, también pueden rayar la superficie del material y afectar el acabado superficial, obligando a desechar un componente [27].

Para evitar las desventajas de los sistemas de aplicación de fluido de corte tradicionales por chorro, fabricantes como Seco Tools han desarrollado sistemas de herramientas con suministro de fluido a alta presión por ductos internos en el portaherramientas y en la herramienta de corte, mejorando la presión y la precisión a la hora de dirigir los fluidos de corte hacia las zonas de corte. La presión y el flujo del fluido de corte, junto con el pequeño diámetro de los conductos, permiten que un fino flujo de fluido a alta velocidad penetre fácilmente y lubrique la zona en la interfase de corte, justo detrás del filo de corte. Adicionalmente, este tipo de método de suministro ayuda a la generación de virutas de menor tamaño.

El método de suministro interno a alta presión se está empleando cada vez más debido a las ventajas que ofrece con respecto a otros métodos de suministro, diversos fabricantes de herramientas están diseñando modelos de herramientas y porta herramientas que funcionan bajo este método, tal es el caso de *Sandvik Coromant* [28] que dentro de sus catálogos nombra algunas de las ventajas en cuanto a reducción de tiempo y mejora de la productividad, tales ventajas son:

- Aumento de la vida de la herramienta al mecanizar materiales difíciles, como aceros inoxidables, titanio.
- Hasta un 50 por ciento de aumento en la capacidad de corte en los mismos parámetros de corte.
- la capacidad de aumentar la velocidad de corte en un 20 por ciento en materiales aeroespaciales, como titanio y aleaciones de níquel, manteniendo la misma distancia de corte.

1.2.2 mínima cantidad de fluido de corte MQL (*minimum quantity lubrication*)

El maquinado con el método de mínima cantidad de lubricante (Minimum Quantity Lubricant o MQL), también conocido como maquinado casi en seco, es una alternativa al uso de fluidos de corte convencionales. Los objetivos de este método de suministro son reducir el consumo de fluidos de corte y facilitar el reciclaje de las virutas no contaminadas de aceite.

El método MQL emplea una cantidad muy pequeña de lubricante (normalmente inferior a 50 ml/h) que se distribuye con precisión sobre la superficie de corte por medio de difusores externos o a través de conductos internos que atraviesan la herramienta. A menudo, la cantidad de lubricante que se atomiza es tan pequeña que la pieza no queda recubierta por lubricante. El lubricante remanente puede formar una película que protege la pieza de la oxidación o bien puede evaporarse completamente debido al calor que se produce durante el proceso de maquinado [29].

El control sobre la cantidad de lubricante empleado en el proceso de maquinado es importante, porque, diferentes procesos requieren diferentes cantidades de fluido de corte. Por ejemplo, el fresado frontal es una operación de superficie, y requiere una cantidad mínima de lubricidad. La perforación de orificios o taladrado profundos es una operación especial que requiere una adecuada cantidad de fluido de corte para permitir la evacuación de viruta. Sin embargo, se requiere un tercer nivel de lubricidad para las operaciones de roscado debido a su alta presión superficial [30].

El objetivo del método de suministro de fluido de corte MQL es entregar una cantidad precisa de aerosol. Es decir, el diámetro de las partículas de aerosol se mantiene a una tolerancia precisa para mantener óptimas propiedades de humectación y lubricación. En máquinas diseñadas para aplicar el método MQL, la lubricidad se puede controlar usando un parámetro en el programa NC de la pieza que varía la cantidad y duración del aerosol.

Junto con la capacidad de controlar la lubricidad, el método MQL mejora la vida de la herramienta y el acabado superficial al eliminar partículas de silicio abrasivo suspendidas en el refrigerante. Las piezas de trabajo de aluminio contienen aproximadamente un 13 por ciento de silicio, lo que reduce la vida de la herramienta y conduce a acabados superficiales deficientes. Mientras que los sistemas de filtración eliminan las partículas de 40 micras, las partículas más pequeñas que 40 micrones pasan a través del sistema para reciclar con el refrigerante [31].

1.2.3 Maquinado en seco

El maquinado en seco supone la eliminación total del fluido de corte. Este tipo de proceso ha cobrado importancia a partir de que ofrece ventajas en comparación de los métodos donde se emplea fluido de corte, obteniendo resultados similares. Estas ventajas consisten en la eliminación de los costos que se producen por el uso de un fluido de corte, así como

su posterior reciclaje una vez que ha cumplido con su tiempo de vida útil. Al eliminar el fluido de corte en un proceso de maquinado se produce una disminución en los riesgos en la salud del operador por inhalar los humos o neblinas que se producen y por el contacto directo con el fluido de corte. Se considera que la eliminación del fluido de corte no afecta la productividad, produce ahorros en tiempo y en costos [32].

El maquinado en seco es ecológicamente deseable y se considerará como una necesidad para las empresas manufactureras en el futuro cercano. Las industrias se verán obligadas a considerar el mecanizado en seco para hacer cumplir las leyes de protección ambiental y las normas de seguridad y salud en el trabajo. Varias y posibles rutas para lograr procesos de maquinado limpios fueron analizadas y discutidas por Byrne y Scholta [33]. La eliminación del uso de fluidos de corte, de ser posible, puede ser un incentivo importante. Se estima que los costos relacionados con el uso de fluidos de corte son mayores a los costos laborales y generales [34]. Por lo tanto, la implementación del maquinado en seco reducirá los costos de fabricación.

En la actualidad muchas maquinas-herramientas y muchas herramientas de corte están desarrollándose para soportar el maquinado en seco. Además de diseñarse para trabajar con altas velocidades de corte y altas temperaturas. En efecto, se entiende que la mejor solución sería recurrir a un proceso sostenible y rentable que elimine los fluidos de corte tradicionales, ya que no se ven incorporados en los productos finales. Sin embargo, los fluidos de corte son necesarios, para la fabricación de productos con una calidad superficial que cumpla con los estándares de calidad, su eliminación no siempre es posible, especialmente cuando se maquinan materiales difíciles de cortar [29], por ejemplo, el aluminio y sus aleaciones se consideran los materiales más críticos en relación al maquinado en seco. Debido a su alta conductividad térmica, la pieza de trabajo tiene la capacidad de absorber el calor generado durante el proceso de maquinado, en consecuencia, puede causar deformación debido a su excelente capacidad de expansión térmica. Además, las aleaciones de aluminio pueden causar problemas relacionados con la formación de viruta. Por lo tanto, en el mecanizado de aluminio y sus aleaciones, es esencial utilizar herramientas con revestimientos adecuados [32].

En el proceso de fresado con fluido de corte, las aristas se calientan y se enfrían al entrar y salir de la interfase de trabajo, el cambio súbito de temperatura causa fluctuaciones de temperatura que ocasionan la expansión y contracción del material provocando un tipo de falla conocida como fatiga térmica. Este tipo de falla se reconoce fácilmente por que se forman grietas perpendiculares al filo de corte provocando finalmente la falla de la herramienta [35]

1.3 Efecto de la aplicación de fluido de corte

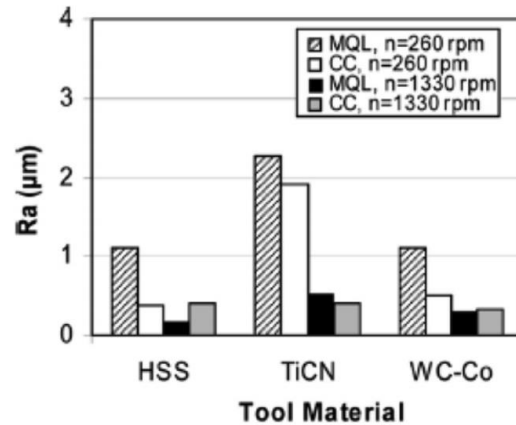
Existen diversos estudios acerca de los defectos de superficie producidos por el proceso de fresado en general. Las investigaciones han reportado principalmente que los defectos más frecuentes en el maquinado de las aleaciones de aluminio son las siguientes: deformación plástica en la subsuperficie maquinada, virutas redepositadas en la superficie maquinada, transformaciones de fase y alteración de la microdureza en la subsuperficie [36]. De la misma manera se han realizado estudios acerca del efecto del fluido de corte en el maquinado de estas aleaciones.

El-khabeeryet [37] realizó una investigación acerca del maquinado con fluido de corte y sin fluido de corte en la aleación de aluminio 2024; los resultados revelaron que, a velocidades de corte bajas, entre 0,1 a 0,8 m/s, la aplicación de fluido de corte reduce la rugosidad superficial y los defectos subsuperficiales como la deformación, por otra parte, la aplicación de fluido de corte a altas velocidades de corte, entre 1,6 a 3,2 m/s, tienen poco efecto en el proceso de corte. Los resultados discutidos en esta investigación fueron efectos combinados de la condición del fluido de corte y la longitud de contacto de la viruta-herramienta.

Sadat [38] encontró que la aplicación de fluido de corte es eficaz a bajas velocidades de corte debido a que promueve la reducción de las fuerzas de corte y el calor en la interfase viruta-herramienta, la superficie maquinada presentó poca variación de la dureza y menor deformación plástica. La aplicación de fluido de corte redujo el impacto del daño superficial en términos de intensidad y área total afectada. De otro lado, el corte en seco produjo menores tensiones residuales en comparación a la superficie maquinada con fluido de corte, esto se atribuye al alivio parcial de las tensiones residuales debido al enfriamiento lento en el maquinado en seco.

Tosun et al [39] investigaron el fresado de la aleación AA 7075-T6, y encontraron que el método de suministro MQL producía un mejor acabado superficial en comparación con el método de suministro por chorro externo convencional en alta velocidad de corte. Se usaron herramientas de acero (HSS), de metal duro (WC-Co) sin recubrimiento y recubiertas TiCN. Adicionalmente se reportó que el empleo del método MQL mejoró la vida útil de la herramienta y redujo el desgaste en el filo de corte en aproximadamente un 60% en comparación con el fresado en seco en todas las condiciones de maquinado probadas, también demostró evitar la formación de rebabas. El método MQL generó una rugosidad superficial inferior a 0,2 μm .

Figura 1-2: Efecto de la aplicación de diferentes método de suministro de fluido de corte con diferentes materiales de herramienta. [39]



Sharman [40] encontró que la presión y la dirección del fluido de corte tenían relativamente poca influencia sobre la integridad de superficie obtenida al torneado de la aleación de aluminio 7075. Los resultados mostraron que el empleo del método de suministro de fluido de corte interno a alta presión indujo tensiones residuales de compresión durante el maquinado; ese efecto es positivo cuando se requieren superficies con estas características y así evitar costosas técnicas de postprocesamiento como el granallado. La aplicación de refrigerante por el método convencional de chorro externo indujo esfuerzos residuales de tracción en la capa superficial y una zona de tensión compresiva debajo de esta capa.

Li et al [41] realizaron pruebas de fresado frontal con insertos de punta plana en la aleación de aluminio 7075 T6, variando la velocidad de corte entre 150 a 450 m min⁻¹ sin usar fluido de corte. Estos autores encontraron que las fuerzas de corte disminuyen con el aumento de la velocidad de corte debido al aumento de la temperatura en la interfase de corte, causando ablandamiento del material. También se encontró deformación en los granos de la subsuperficie en la dirección del avance, sin embargo, no tan pronunciados como los reportados en la literatura para el proceso de torneado.

Esta abreviada descripción sobre el efecto de la aplicación de fluido de corte en el maquinado de diferentes aleaciones de aluminios, explica porque las investigaciones centradas en el estudio del efecto del método de suministro de fluido de corte sobre la integridad de las superficies son escasas; la mayoría de las obras e investigaciones se centran en estudios multifactoriales donde el propósito es lograr descubrir la mejor combinación de los diferentes parámetros de corte en el maquinado de estas aleaciones; otras obras investigan los diferentes tipos de aceros y materiales de difícil maquinado como el titanio; en general se dispone de información mínima sobre la influencia de la aplicación de fluido de corte en la integridad de la superficie de aleaciones de aluminio.

1.4 Integridad de superficie

La calidad de las superficies, logradas mediante procesos de maquinado, ha sido objeto de estudio por muchos investigadores, entre ellos se puede referenciar el trabajo de Fiel y colaboradores [42] quienes introdujeron el término “Integridad de Superficie” para describir la condición de la capa superficial de un material.

Se define la Integridad de Superficie (IS), como un estado característico de las superficies, en el cual tienen vigencia elementos que determinan la apariencia, funcionalidad y vida útil de un componente fabricado. Los factores para tal caracterización consideran diferentes aspectos como:

- VISUALES: Decoloraciones, Quemaduras, Grietas, Oxidación y Corrosión, Elementos de Presentación Estética.
- DIMENSIONALES: Acabado superficial, Perfil geométrico, Tolerancias y ajustes dimensionales, Tolerancias y ajustes geométricos, Textura superficial, Rigurosidad, Ondulación, Deformaciones, dobleces, Plegamientos.
- RELACIONADOS: Con esfuerzos residuales de tensión y compresión, magnitud, dirección, perfil de esfuerzos, gradientes y flujos de esfuerzos.
- RELACIONADOS: Con mecanismos de desgaste como la dureza, abrasión, adhesión, erosión, arado.
- RELACIONADOS: Con la micro estructura y transformaciones de fase.
- RELACIONADOS: Con otras propiedades del material: químicas, eléctricas, magnéticas, ópticas.

Comprender el comportamiento de las alteraciones producidas sobre la superficie de un material, debidas a las variables del proceso de maquinado, es fundamental para mejorar la calidad del producto.

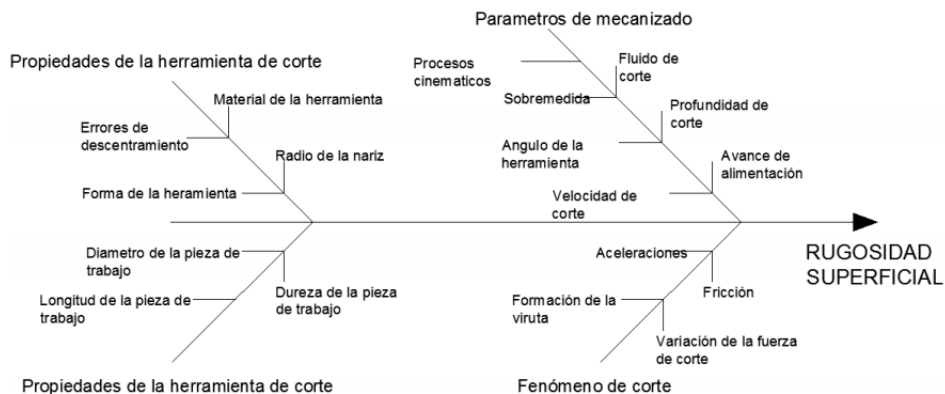
La integridad de superficie desde el punto de vista de la ingeniería puede ser definida como un conjunto de propiedades o atributos superficiales y subsuperficiales que condicionan el desempeño de la superficie en servicio, dichas propiedades pueden ser geométricas, físicas, químicas y hasta biológicas [43].

Cuando se hace referencia a la integridad superficial en productos obtenidos por medio de procesos de maquinado, se tienen en cuenta características topográficas o rugosidad superficial y propiedades mecánicas y metalúrgicas. Field y Khales [42] propusieron un procedimiento experimental para la evaluación de parámetros de integridad superficial, dicha metodología especifica el uso de tres niveles diferentes para estudiar y evaluar las características de una superficie maquinada (Ver **Tabla 1-4**).

Tabla 1-4: Niveles de estudio de la integridad de superficie

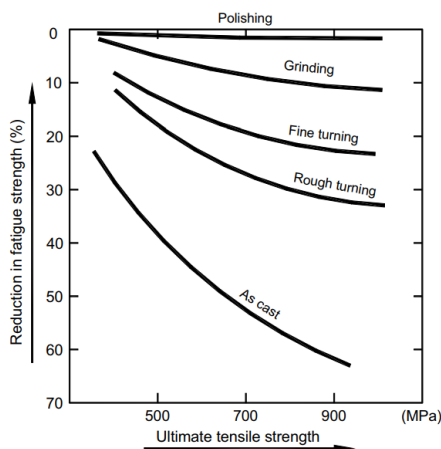
Nivel Básico	Nivel estándar	Nivel extendido
Rugosidad superficial	Nivel Básico	Nivel estándar
Microestructura	Test de fatiga	Test de fatigas (condiciones de diseño)
Microfisuras	Test de corrosión	Test de tensión
Deformación plásticas	Esfuerzos residuales	Test de flexión
Trasformación de fase		Test de fluencia
Microdureza		

La rugosidad de superficie, es típicamente el parámetro de mayor importancia y aplicación al momento de caracterizar una superficie obtenida a través de diferentes procesos de fabricación [44]. La rugosidad se expresa mediante una serie de parámetros numéricos dimensionales, que permiten evaluar el estado de una superficie. En los procesos de fabricación intervienen muchos factores que inciden sobre la calidad de la superficie obtenida, Benardos y colaboradores, presentaron una apreciación de tales factores, (**Fig 1-3**), y desarrollaron una revisión de diferentes procesos, metodologías e investigaciones realizadas con el objetivo de predecir las condiciones de operación óptimas para lograr las calidades superficiales especificadas [4]

Figura 1-3: Diagrama causa-efecto de parámetros que afectan la rugosidad [4]

La integridad de superficie no sólo se refiere a los aspectos topográficos (geométricos) de la superficie, sino a todo el conjunto de sus propiedades físicas, mecánicas, metalúrgicas, químicas y biológicas y sus características. Su objetivo es asegurar las propiedades de diseño de las superficies en la fabricación de piezas y productos, puesto que las diferentes operaciones de fabricación afectan directamente estas propiedades. Por ejemplo, la **Figura 1-4** muestra la influencia de la operación de acabado superficial sobre la resistencia a la fatiga de una fundición de acero [45]. Como se ve en la figura, esta resistencia depende de la operación de mecanizado elegida para el acabado de la superficie de una pieza en particular, así como de la resistencia a la tracción final del material de trabajo.

Figura 1-4: Reducción de la resistencia a la fatiga del acero fundido sometido a diversas operaciones de acabado superficial. [45]



1.5 Rugosidad de la superficie

Una superficie sólida tiene una estructura y propiedades complejas dependiendo de la naturaleza de los sólidos, el método de preparación de la superficie y la interacción entre la superficie y el medio ambiente.

Las propiedades de las superficies sólidas son cruciales para la interacción superficial, porque, las propiedades superficiales afectan el área real de contacto, fricción, desgaste y lubricación. Además de las funciones tribológicas, las propiedades superficiales son importantes en otras aplicaciones, como el rendimiento óptico, eléctrico, térmico y apariencia. Además de una correcta deposición de recubrimientos.

Las superficies sólidas, independientemente de su método de formación, contienen irregularidades o desviaciones de la forma geométrica prescrita [46-47]. Las superficies contienen irregularidades de varios órdenes que van desde desviaciones de forma a irregularidades del orden de las distancias interatómicas. Ningún método de maquinado, por más preciso que sea, puede producir una superficie molecularmente plana sobre materiales convencionales. Incluso las superficies más lisas, como las obtenidas por la escisión de algunos cristales, contienen irregularidades, cuyas alturas superan las distancias interatómicas.

La textura superficial es la desviación repetitiva o aleatoria de la superficie nominal que forma la topografía tridimensional de la superficie; la **Figura 1-5** es una representación gráfica de la textura de la superficie con la disposición unidireccional [48].

La textura de la superficie incluye:

- 1) Aspereza (nano- y microrugosidad).
- 2) Ondulación (macrorugosidad).
- 3) direccionalidad (Lay).
- 4) Defectos.

Las asperezas se denominan picos en un perfil de dos dimensiones y cumbres en un mapa de superficie (tridimensional), la nano y microrugosidad incluyen aquellas características intrínsecas al proceso de producción; se considera que éstas incluyen marcas de avance transversales (*Lay*) y otras irregularidades dentro de los límites de la longitud de muestreo de rugosidad.

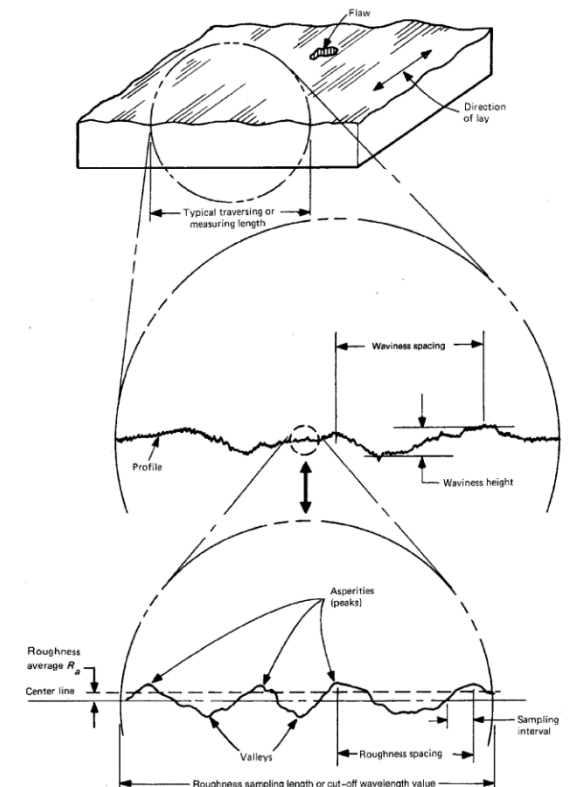
La nano y microrugosidad están formadas por fluctuaciones en la superficie de longitudes de onda cortas, caracterizadas por colinas (asperezas), (máximos locales) y valles (mínimos locales) de amplitudes y espaciamientos variables; estas geometrías son grandes en comparación con las dimensiones moleculares.

La ondulación es la irregularidad superficial caracterizada por una longitud de onda más larga y se conoce como rugosidad macro, la ondulación puede ser el resultado de factores tales como desviaciones de la máquina o de la pieza de trabajo, vibraciones, y tensiones de deformación. La ondulación incluye todas las irregularidades cuya separación es mayor que la longitud de muestreo de rugosidad y menor que la longitud de muestreo de ondulación.

La direccionalidad (*Lay*) es la dirección principal del patrón de superficie predominante, normalmente determinada por el método de producción.

Las fallas son discontinuidades no deseadas en la textura; por lo demás, la superficie puede contener desviaciones gruesas de forma nominal conocidas como errores de forma.

Figura 1-5: Representación gráfica de la textura superficial. Textura de la superficie (rugosidad superficial, ondulación y direccionalidad o *Lay*), ANSI / ASME B46.1, ASME [48].

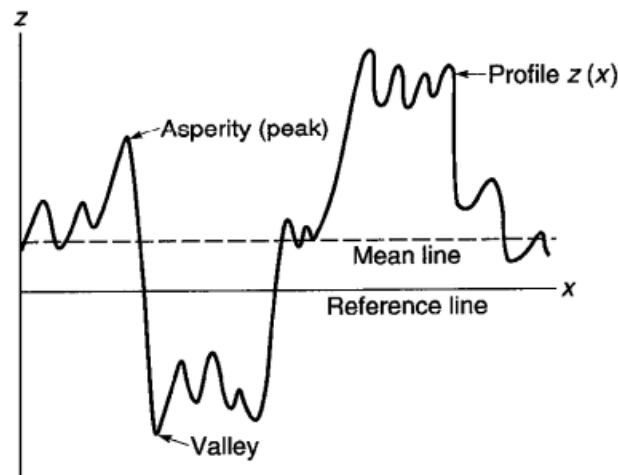


1.5.1 Parámetros de Rugosidad:

La rugosidad superficial hace referencia a las variaciones en la altura de la superficie con respecto a un plano de referencia. Se mide a lo largo de un solo perfil de línea o a lo largo de un conjunto de perfiles de líneas paralelas (mapas de superficie). Por lo general, se caracteriza por uno de los dos descriptores de altura estadística defendidos por el *American National Standards Institute* (ANSI) y la Organización Internacional de Normalización [43]. Estos son: (1) R_a , CLA (promedio de la línea central) o AA (media aritmética) y (2) la desviación estándar o varianza (σ), R_q o cuadrado medio de la raíz (RMS).

También existen otros dos descriptores de altura estadística “skewness” (R_{sk}) y “kurtosis” (R_{ku}); Otra medida de la rugosidad superficial es el que describe la altura de valor extremo R_t o altura máxima de pico a valle o simplemente distancia P-V. Otros cuatro descriptores de alturas de valores extremos de uso limitado son: R_p (altura máxima del pico, máxima altura pico-media o simplemente P-M), R_v (profundidad máxima del valle o altura media del valle), R_z (Altura media de pico a valle), y R_{pm} (altura media pico a media).

Figura 1-6: Esquema de un perfil de superficie $z(x)$ [48]



En la **Figura 1-6**: representa el perfil $z(x)$; las alturas se miden a partir de una línea de referencia; se define una línea central o línea media de modo que el área entre el perfil superior sea igual a la que está por debajo de la línea media. R_a , CLA o AA es la media aritmética de los valores absolutos de desviación vertical de la línea media a través del perfil. La desviación estándar σ es la raíz cuadrada de la media aritmética del cuadrado de la desviación vertical de la línea media. En forma matemática, se describe como:

$$R_a = CLA = AA = \frac{1}{L} \int_0^L |z - m| dx \quad (1.1 a)$$

$$m = \frac{1}{L} \int_0^L z dx \quad (1.1 b)$$

Donde L es la longitud de muestreo del perfil (longitud del perfil).

La varianza se da como

$$\sigma^2 = \frac{1}{L} \int_0^L (z - m)^2 dx = R_q^2 - m^2 \quad (1.2)$$

Donde σ es la desviación estándar y R_q es la raíz cuadrada de la media aritmética del cuadrado de la desviación vertical de una línea de referencia

$$R_q^2 = RMS^2 = \frac{1}{L} \int_0^L (z^2) dx \quad (1.3 a)$$

Para el caso especial donde m es igual a cero:

$$R_q = \sigma \quad (1.3 b)$$

El valor de R_a es un estándar oficial en la mayoría de los países industrializados. **La Tabla 1-5** da los valores de R_a adoptados internacionalmente junto con el número de grado de rugosidad alternativo. El σ comúnmente es utilizado en análisis estadísticos.

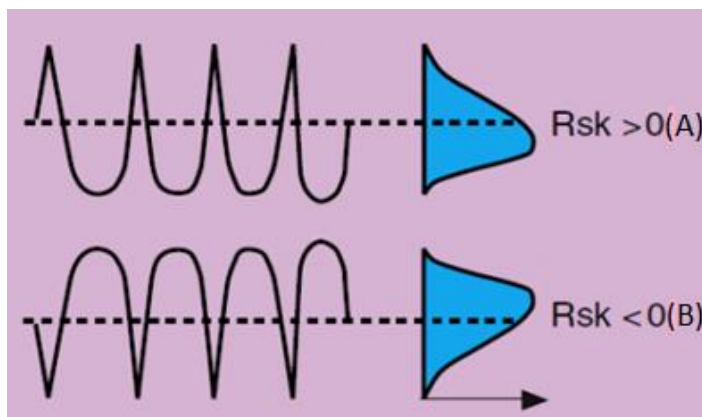
Tabla 1-5: Promedio de la línea central y grados de rugosidad [49]

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

El parámetro de asimetría R_{sk} es la curva de distribución de amplitud, tal como se ilustra en la **Figura 1-7**, este parámetro indica cierto sesgo en dirección ascendente o descendente. La forma como está distribuida la amplitud de la curva revela información en cuanto a la construcción general de la topografía de la superficie. Una asimetría negativa indica que un porcentaje mayor del perfil está por encima de la línea media y un valor positivo indica que un porcentaje mayor está por debajo de la línea media:

$$R_{sk} = \frac{1}{\sigma^3 L} \int_0^L (z - m)^3 dx \quad (1.5)$$

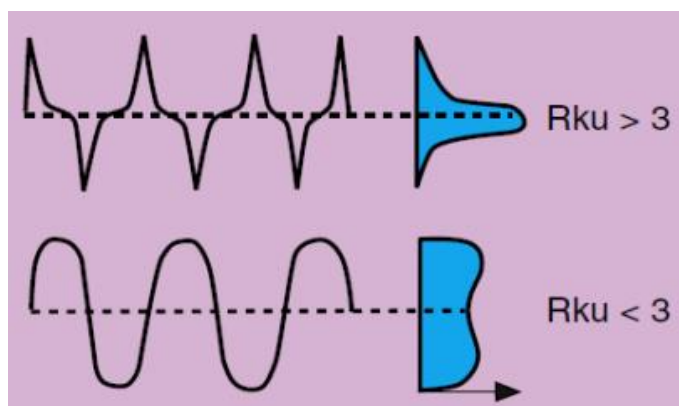
Figura 1-7: perfil de simetría parámetro R_{sk} . (a) simetría mayor a 0 (b) simetría menor a cero [50]



La Kurtosis, R_{ku} , es un indicador de probabilidad de concentración de los valores alrededor de la línea media, puede detectar si los picos de perfil se distribuyen de manera uniforme a lo largo de la de longitud de muestreo, así como proporcionar información sobre la agudeza del perfil. Al proporcionar un medio para medir la nitidez del perfil, por ejemplo, una superficie "puntiaguda" que exhibe una topografía de superficie "accidentada" tendrá un bajo valor de R_{ku} . Como consecuencia de esta capacidad para distinguir la variación en la topografía de la superficie real, R_{ku} es parámetro útil en la predicción del rendimiento de los componentes en servicio con respecto a la retención de lubricante y el comportamiento de desgaste posterior [45]. La **Figura 1.8** describe la probabilidad de agudeza de acuerdo a los valores de R_{ku} .

$$K = \frac{1}{\sigma^4 L} \int_0^L (z - m)^4 dx \quad (1.6)$$

Figura 1-8: perfil de simetría parámetro R_{ku} . (a) densidad mayor a 3 (b) densidad menor a 3 [50]

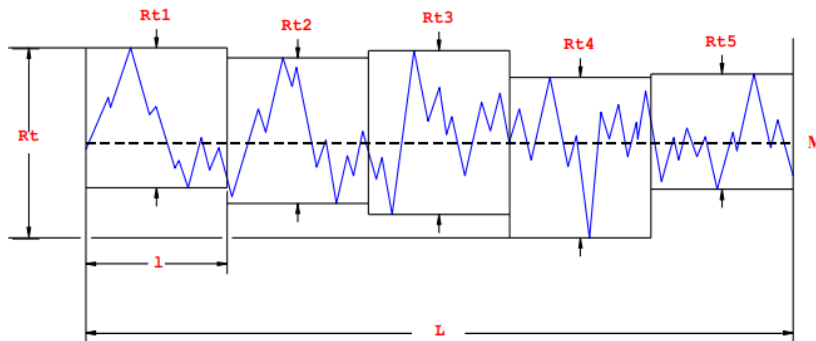


Además de los parámetros mencionados, otros parámetros de altura de uso frecuente son (ISO 13565-2: 1997):

La ecuación (1.7) representa el parámetro R_t definido como la altura total del perfil. Es la distancia vertical entre la altura máxima del pico del perfil y la profundidad máxima del valle del perfil a lo largo de la longitud de evaluación, **Figura 1.9**.

$$R_t = R_p - R_v \quad (1.7)$$

Figura 1-9: Altura máxima de perfil R_t (ejemplo de perfil de rugosidad) [51].

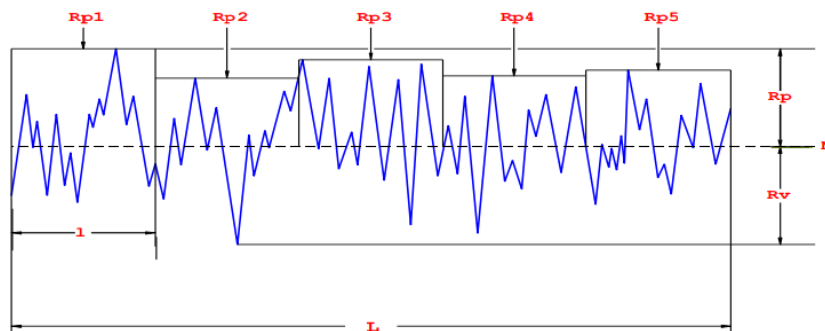


La ecuación (1.8) representa el parámetro R_p definido como la altura máxima del pico en el perfil, indicando el punto a lo largo de la longitud de muestreo en la que la curva es más alta. La ecuación (1.9) representa el parámetro R_v definido como la profundidad máxima del valle, indicando en el perfil el punto a lo largo de la longitud de muestreo en la que la curva de perfil es la más baja. La **figura1-10** describe gráficamente estos parámetros.

$$R_p = |\max(Z_x)| \quad (1.8)$$

$$R_v = |\min(Z_x)| \quad (1.9)$$

Figura 1-10: Altura máxima del pico del perfil y profundidad máxima del valle del perfil (ejemplo de perfil de rugosidad) [51].

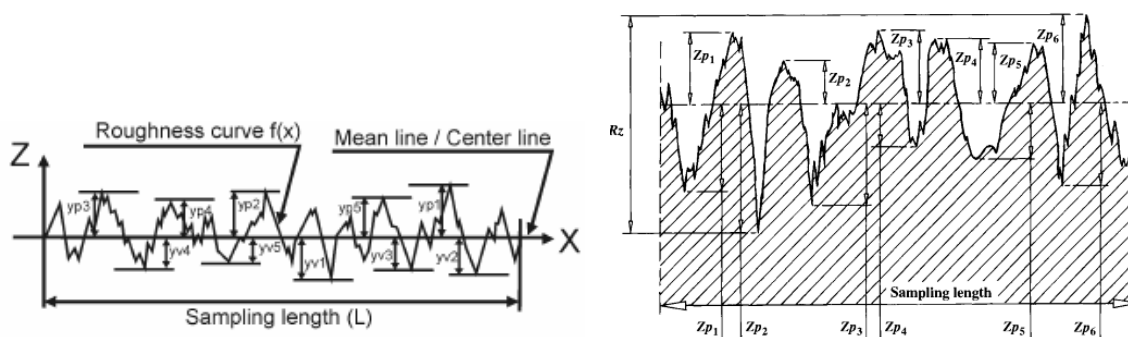


La ecuación (1.10) representa el parámetro R_z se define como la diferencia entre la altura promedio de los cinco picos más altos Y_{pi} y los cinco valles más bajos Y_{vi} . La ecuación (1.11) representa el parámetro R_c definido como la altura media de los elementos de perfil. Indica el valor promedio de la altura del elemento de la curva a lo largo de la longitud de muestreo. La **Figura 1-11** describe gráficamente estos parámetros.

$$R_z = \frac{1}{5} (\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}|) \quad (1.10)$$

$$R_c = \sum_{i=1}^M Rti \quad (1.11)$$

Figura 1-11: (a) Altura máxima del perfil y (b) altura de los elementos del perfil (ejemplos de perfiles de rugosidad) [51].



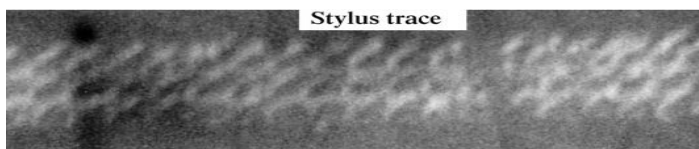
1.5.2 Métodos de medición de la superficie

En la actualidad existen diferentes técnicas e instrumentos para la medición de rugosidad. La técnica de medición se puede dividir en dos grandes categorías:

- 1) la técnica de contacto en el que, durante la medición, un componente del instrumento de medición realiza contacto con la superficie a medir
- 2) técnica sin contacto.

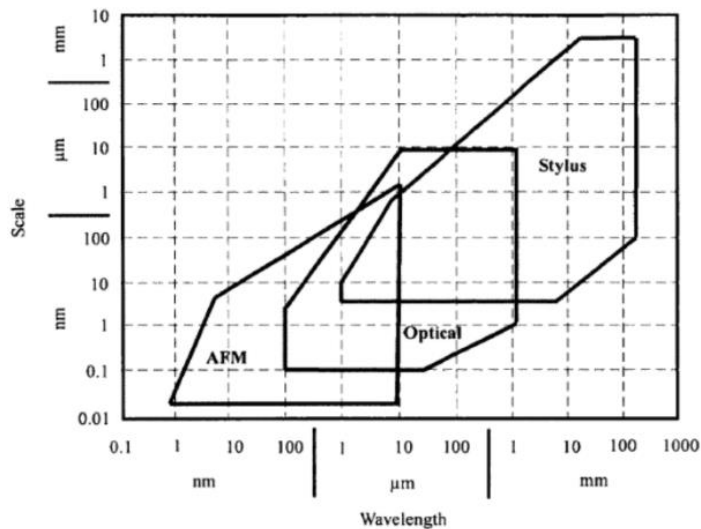
Un instrumento de medición del tipo de contacto puede dañar las superficies cuando se usa con una punta afilada, particularmente en superficies blandas (**Figura 1-12**). Para estas mediciones, las cargas normales tienen que ser lo suficientemente bajas para que las tensiones de contacto no excedan la dureza de la superficie a medir [48].

Figura 1-12: Microscopia SEM de una traza realizada por un instrumento de aguja que muestra el daño superficial a una superficie recubierta de Ni-P sin electrolito (material de punzón, diamante, radio de punzón = $0,1 \mu\text{m}$ y carga de estilete = $10 \mu\text{N}$ o 1mg). [52]



La **Figura 1-13** muestra los criterios de selección de referencia establecidos por Stedman [49], en esta ilustración se puede seleccionar el método de medición apropiado para diferentes propósitos. Como se puede observar en la ilustración, el eje X representa la longitud de onda y el eje Y la escala. Si una pieza de trabajo se mide entre la escala de unos pocos milímetros y la resolución de los micrómetros, se puede elegir el método de medición por contacto, el método óptico y el método AFM (*Atomic force microscopy*: microscopio de fuerza atómica). Sin embargo, cuando la escala de la pieza de trabajo es de más de 10 micrómetros, el método de contacto es la mejor opción. Si la longitud de onda se reduce a picómetros, se debe seleccionar el método AFM.

Figura 1-13: Selección del tipo de método de medición de superficie [53]



Por otra parte, para la mayoría de las superficies de ingeniería, los métodos microscópicos no son necesarios, y son generalmente métodos mecánicos u ópticos. Algunos de estos métodos también pueden usarse para medir parámetros geométricos de superficies [48].

Método de contacto:

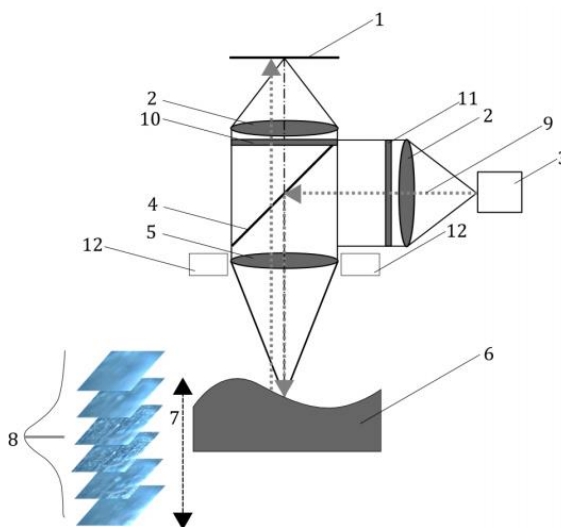
Este método utiliza un instrumento que amplifica y registra los movimientos verticales de un estilite que se desplaza a una velocidad constante en la superficie a medir. El estilite está acoplado mecánicamente sobre un transformador diferencial variable lineal (LVDT), un sensor óptico o de capacitancia. El brazo del estilite se carga contra la muestra, el estilite es escaneado a través de la superficie estacionaria de la muestra usando una unidad transversal a una velocidad constante; la muestra se transporta a través de una referencia óptica plana. A medida que se mueve el estilite, o muestra, el estilite recorre la superficie de la muestra detectando las desviaciones de la superficie por el transductor. Produce una señal analógica correspondiente al movimiento vertical del estilite. Esta señal se amplifica, acondiciona y digitaliza [54].

Método sin contacto:

En los sistemas de medición de tipo sin contacto, uno de los métodos de medición típicos es el método de variación de enfoque; esta tecnología combina la pequeña profundidad de enfoque de un sistema óptico con el escaneo vertical para proporcionar información topográfica y de color a partir de la variación del enfoque. El principio de funcionamiento se describe a continuación en base al esquema mostrado en la **Figura 1-14**.

El componente principal del sistema es una unidad óptica de precisión que contiene varios lentes que pueden equiparse con diferentes objetivos, permitiendo mediciones con diferentes resoluciones. Toda parte con un espejo que divide el haz de luz, que emerge de una fuente de luz blanca, y sigue la trayectoria óptica del sistema y se enfoca en la muestra a través del objetivo. Dependiendo la topografía de la muestra, la luz se refleja en varias direcciones tan pronto como golpea la muestra a través del objetivo. Si la topografía muestra propiedades reflectantes difusas, la luz se refleja con igual intensidad en diferentes direcciones. En el caso de reflejos especulares, la luz se dispersa principalmente en una dirección. [55]

Figura 1-14: Diagrama esquemático de un dispositivo de medición típico basado en la variación del enfoque. [55]



1. detector de matriz, 2. lentes, 3. fuente de luz blanca, 4. divisor de haz, 5. objetivo, 6. espécimen, 7. escaneo vertical, 8. curva de enfoque, 9. haz de luz, 10. analizador, 11. polarizador, 12. anillo de luz

Todos los rayos reflejados de la muestra golpean la lente del objetivo y se agrupan en el sistema óptico donde se juntan en un sensor sensible a la luz ubicado detrás del espejo divisor del haz. Debido a la pequeña profundidad de campo de los sistemas ópticos, solo pequeñas regiones del objeto o muestra tienen una imagen nítida. Para realizar una detección completa de la superficie con profundidad de campo completa, el sistema óptico de precisión se mueve verticalmente a lo largo del eje óptico, mientras se capturan

continuamente los datos de la superficie. Esto significa que cada región del objeto está totalmente enfocada. Los algoritmos convierten los datos de sensor adquiridos en información y en una imagen de color real con profundidad de campo completa. Esto se logra al analizar la variación de enfoque a lo largo del eje vertical.

1.6 Medición de esfuerzos residuales mediante difracción de rayos x.

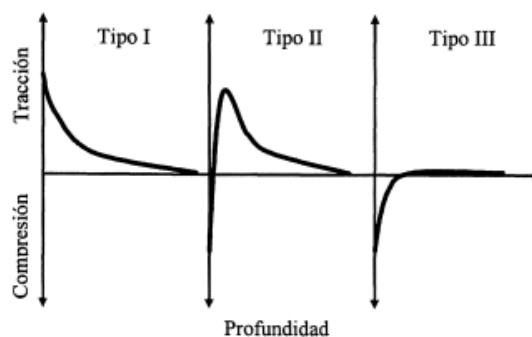
1.6.1 Análisis de Esfuerzos residuales en mecanizado.

Los principales problemas asociados con el maquinado están relacionados con la integridad de superficie [56]. Durante el maquinado, se inducen tensiones residuales en la superficie, como resultado, pueden afectar la vida en servicio de la pieza. El origen de estas tensiones está en la combinación de efectos mecánicos, térmicos y químicos.

La fuerza aplicada por la herramienta sobre la superficie de la pieza genera deformación plástica, dando lugar a tensiones residuales de compresión en la capa más superficial [57]. Por otra parte, la fricción entre la pieza de trabajo y herramienta de corte puede dar lugar a temperaturas elevadas, capaces de producir transformaciones de fase en las capas más superficiales del material. Así como tensiones residuales de tracción. Estas tensiones de tracción son perjudiciales debido a que favorecen la formación y propagación de grietas.

Los esfuerzos residuales se clasifican en dos tipos: macroscópicos y microscópicos. Las macro tensiones se extienden a lo largo de distancias relativamente grandes comparadas con el tamaño de grano del material. Las micro tensiones son aquellas que se dan en la escala de defectos y límites de grano P. Vomacka y H. Walburger [58] reconocen la clasificación realizada por Parrihs [59] de las macro tensiones residuales generadas por maquinado. En esta clasificación se distinguen tres tipos de distribución de tensiones residuales.

Figura 1-15: tipos de esfuerzos residuales en superficies maquinadas [59]



En la **Figura 1-15** se representada los tipos de esfuerzos a los cuales puede estar sometido una superficie maquinada. La curva tipo 1 representa las tensiones generadas por un proceso de mecanizado abusivo: la temperatura en la interfase de corte es elevada dando lugar a tensiones de tracción. Esta es considerada la peor distribución, porque genera tensiones de tracción en la superficie y también bajo esta. La curva tipo 2 indica que durante el proceso de mecanizado se generó calor suficiente para producir un pico de tracción, pero la deformación plástica ha dado lugar a tensiones de compresión en la misma superficie; en general, este tipo de distribución de tensiones es el obtenido tras un mecanizado normal. La curva tipo 3 representa un mecanizado bajo excelentes condiciones donde solo tiene lugar efecto mecánico de endurecimiento por deformación plástica en la superficie. Esta es la distribución ideal de tensiones, porque al no presentar tensiones de tracción se previene la formación de grietas.

1.6.2 medición del esfuerzo:

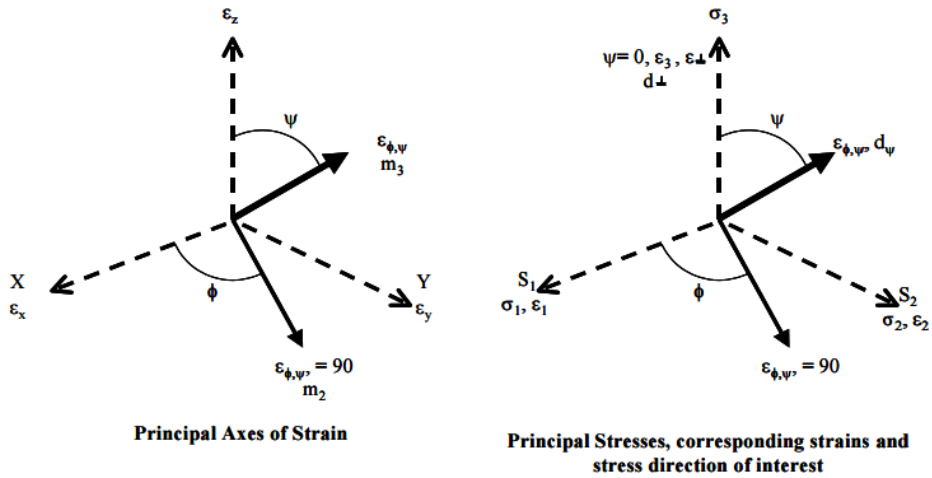
la medición de esfuerzos residuales en la superficie y subsuperficie de una superficie maquinada se puede medir mediante la técnica DRX-P, el elemento se expone a un haz de rayos X que interactúa con la red cristalina para causar patrones de difracción. Se efectúan escaneos a través de un arco de radio alrededor de la muestra. Mediante esta técnica, se pueden localizar los picos de difracción y realizar los cálculos necesarios para localizar y cuantificar los esfuerzos residuales. A continuación, se detalla el procedimiento y cálculo de estos.

Existe una clara relación entre el patrón de difracción que se observa cuando los rayos X se difractan a través de redes cristalinas y la distancia entre los planos atómicos (el espaciamiento interplanar) dentro del material. Alterando la separación interplanar para obtener diferentes patrones de difracción [60]. El cambio de la longitud de onda del haz de rayos X también dará como resultado un patrón de difracción diferente.

La separación interplanar de un material que está libre de deformación producirá un patrón de difracción característico para ese material. Cuando un material es sometido a esfuerzo, se producen alargamientos y contracciones dentro de la red cristalina, que cambian la separación interplanar de los planos de cristal $\{hkl\}$. Este cambio inducido en d provocará un cambio en el patrón de difracción.

Mediante una medición precisa de este desplazamiento, se puede evaluar el cambio en la separación interplanar y, por tanto, deducir la deformación dentro del material. Para ello se necesita establecer relaciones matemáticas entre el espaciamiento interplanar y la deformación [61]. Los sistemas de coordenadas ortogonales utilizados en las explicaciones siguientes se definen en la **Figura 1-16**.

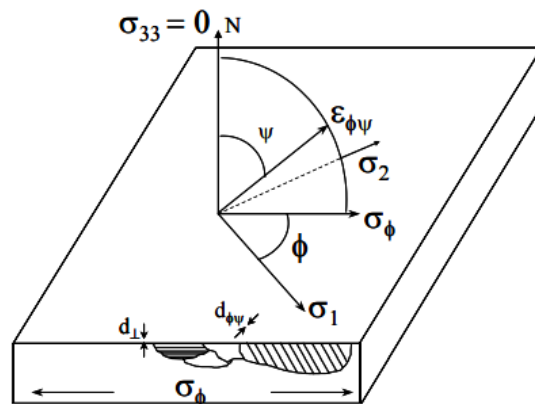
Figura 1-16: sistema de coordenadas utilizado para el cálculo de la tensión superficial. Obsérvese que ϵ_z y σ_3 son normales a la superficie de la muestra [62]



Se supone que la medición se realiza dentro de la superficie, $\sigma_3 = 0$. Sin embargo, la deformación ϵ_z no será igual a cero. La deformación ϵ_z se puede medir experimentalmente midiendo la posición de pico en 2θ , y resolviendo la ecuación (1) de la ley de Bragg para un valor de d_n . Si se conoce el espaciamento interplanar sin esfuerzo d_0 entonces;

$$\epsilon_z = \frac{d_n - d_0}{d_0} \tag{1.12}$$

Figura 1-17: Esquema donde se muestra los planos de difracción paralelos a la superficie y en un ángulo $\phi\psi$. **Nota** σ_1 y σ_2 se encuentran ambos en el plano de la superficie de la muestra [62]



De este modo, la deformación dentro de la superficie del material se puede medir comparando la separación interplanar de la red no deformada con la separación interplanar deformada. Esto, sin embargo, requiere una medición precisa de una muestra no sometida a esfuerzos. La ecuación 1.1, da las mediciones de esfuerzos tomadas en la dirección normal a la superficie. a través de la inclinación de la muestra dentro del difractómetro, pueden realizarse mediciones de planos en un ángulo ψ (véase la **Figura 1-16**) y, por lo tanto, las deformaciones a lo largo de esa dirección se pueden calcular usando:

$$\varepsilon_{\psi} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} \quad (1.13)$$

La **Figura 1-17** muestra los planos paralelos a la superficie del material y planos con un ángulo $\phi\psi$ con la superficie. Esta ilustración muestra cómo los planos que están en un ángulo $\phi\psi$ con respecto a la superficie se miden inclinando la muestra de modo que los planos lleguen a una posición en la que satisfagan la Ley de Bragg.

1.6.3 Determinación del esfuerzo:

Si bien es útil conocer las deformaciones dentro del material, es de mayor utilidad conocer los esfuerzos de ingeniería que están vinculados a estos esfuerzos. De la ley de Hooke sabemos que

$$\sigma_y = E\varepsilon_y \quad (1.14)$$

Es conocido que una fuerza de tracción que produce una deformación en la dirección X producirá no sólo una deformación lineal en esa dirección, sino que también se tensorá en las direcciones transversales [59]. Suponiendo que existe un estado de tensión plana, es decir, $\sigma_z = 0$, y que las tensiones son biaxiales, entonces la relación de las deformaciones transversales a longitudinales es la relación de *Poisson*, ν ;

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = -\nu\varepsilon_z = \frac{-\nu\sigma_y}{E} \quad (1.15)$$

Si se supone que, en la superficie del material, donde se puede considerar que ha sido hecha la medición de rayos X, es decir $\sigma_z = 0$:

$$\varepsilon_z = -\nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y) = \frac{-\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) \quad (1.16)$$

Igualando la ecuación (1.2) y (1.5)

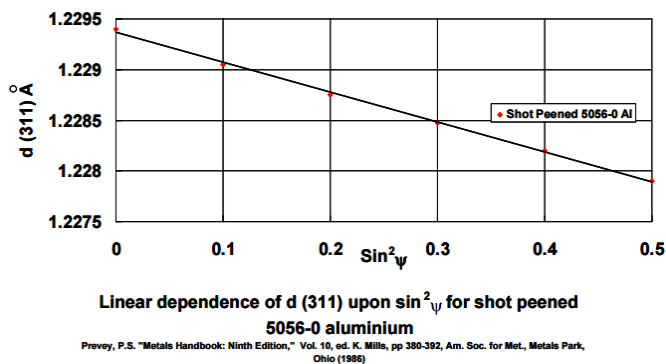
$$\frac{d_n - d_0}{d_0} = -\frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) \quad (1.17)$$

La ecuación 1.6 se aplica a un caso general, donde sólo puede obtenerse la suma de las tensiones principales, y se requiere el valor preciso de d_0 . Experimentalmente se desea medir una única tensión que actúa en alguna dirección en la superficie $\sigma\phi$. La teoría de la elasticidad para un sólido isotrópico muestra esa deformación a lo largo de una línea inclinada, ecuación 1.7 (ver **Figura 1-17**) es:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{1+\nu}{E}(\sigma_1 \cos^2 \phi + \sigma_2 \sin^2 \phi) \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (1.18)$$

En General la técnica más utilizada para la determinación de los esfuerzos residuales es el método $\sin^2\psi$; se realizan varias mediciones XRD con diferentes inclinaciones ψ (Figura 1-18). El espaciamiento inter-planar, o la posición del pico 2-theta, se mide y representa gráficamente como una curva similar a la que se muestra en la Imagen.

Figura 1-18: Ejemplo de un gráfico d vs $\sin^2\psi$ [62]



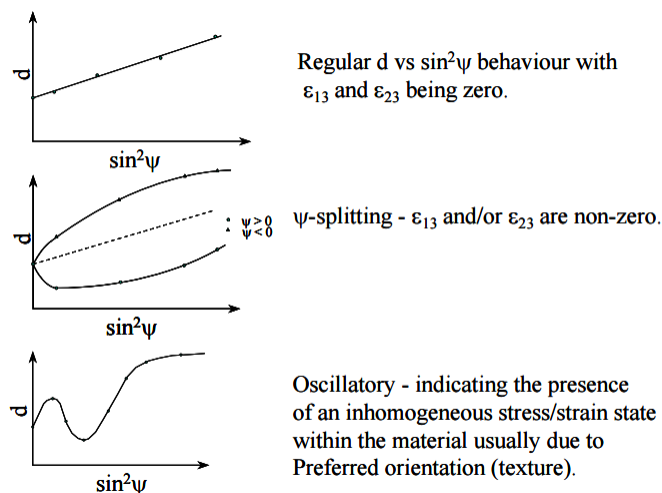
El esfuerzo se puede deducir a partir de una gráfica de este tipo mediante el cálculo del gradiente de la línea y con el conocimiento básico de las propiedades elásticas del material. Esto supone una tensión cero en $d = d_n$, donde d es la intersección en el eje Y, cuando $\sin^2\psi = 0$, como se muestra en **Figura 1-18**. Así, el esfuerzo se da por:

Ecuación 1.2)

Donde m es el gradiente de la curva d vs. $\sin^2\psi$.

Esta es la base de la determinación de la tensión mediante difracción de rayos X. Existen soluciones más complejas para situaciones no ideales en las que, por ejemplo, se produce la división ψ (causada por la presencia de esfuerzos de cizallamiento) o existe un estado de tensión no homogéneo dentro del material (**Figura 1.19**).

Figura 1-19: Otros ejemplos de gráficas del mismo principio de d vs $\sin^2\psi$ [62]



1.6.4 Análisis de esfuerzo triaxial

Los materiales policristalinos, que se consideran isotrópicos, continuos y homogéneos se tratarán como una serie de cristales individuales con orientaciones cristalográficas aleatorias y propiedades anisotrópicas en el maquinado convencional [64]. Esta anisotropía puede ser responsable de los cambios en el comportamiento dinámico del proceso de corte, es decir, cuando el filo de la herramienta pasa de un grano de cristal a otro, se encuentran diferentes propiedades mecánicas a partir del límite del grano [65].

Debido al esfuerzo de deformación resultante del mecanismo de interacción entre el filo de corte y el material durante el proceso de maquinado, se introducen esfuerzos de tensión y / o compresión en la superficie maquinada y en la sub-superficie. Por ejemplo, hay esfuerzos inducidos por el deslizamiento de la cara de separación de la herramienta en la superficie recién producida debido a la recuperación elástica del material (Horio et al., 1992). Esto se considera la tercera zona de deformación en la interfase herramienta / pieza de trabajo y material [66].

Debido a estas características la suposición de un estado de esfuerzos biaxial isotrópico no es válido. De hecho, las características limitadas a menudo pueden tener tensiones finitas fuera del plano. La ecuación 1.18 es la ecuación de esfuerzo residual de rayos X común. Predice un comportamiento lineal de d vs. $\sin^2\psi$. En este caso, los datos experimentales se utilizan para obtener la línea de mínimos cuadrados. Entonces, el esfuerzo en la dirección de σ_ϕ es la pendiente de la línea de mínimos cuadrados que supone las constantes del material, E , ν y el valor d-espacio (d_0) sin esfuerzos son conocidos.

Sin embargo, el análisis biaxial asume que los componentes de esfuerzo en la dirección de la superficie normal son despreciables. Sin embargo, ese supuesto puede no ser cierto para algunos casos. Las divisiones de- ψ muestran la existencia de esos componentes de la deformación que son ignorados análisis de esfuerzos biaxial. De hecho, la existencia de los componentes de deformación en la dirección normal a la superficie de muestra indica la presencia de los de esfuerzo en esta dirección. El análisis de los esfuerzos en el caso de divisiones- ψ el comportamiento de la gráfica d vs. $\sin 2\psi$ (figura 1.19) es similar a la de las deformaciones. En este caso, los términos (a_1 a_2) se expresan:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \left\{ \frac{d_{\phi\psi^+} + d_{\phi\psi^-}}{2d_0} - 1 \right\} \\
 &= \frac{1+\nu}{E} \left\{ \sigma_{11} \cos^2 \phi + \sigma_{12} \sin 2\phi + \sigma_{22} \sin^2 \phi - \sigma_{33} \right\} \sin^2 \psi \\
 &\quad + \frac{1+\nu}{E} \sigma_{33} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})
 \end{aligned} \tag{1.19}$$

$$a_2 = \left\{ \frac{d_{\phi\psi^+} - d_{\phi\psi^-}}{2d_0} \right\} = \frac{1+\nu}{E} \left\{ \sigma_{13} \cos \phi + \sigma_{23} \sin \phi \right\} \sin |2\psi| \tag{1.20}$$

Por lo tanto, los componentes de esfuerzo en la ecuación 1.19 se pueden obtener a partir de la pendiente y la intersección de a_1 vs. $\sin^2 \psi$ para $\phi = 0^\circ, 45^\circ$ y 90° . Por otro lado, los componentes de tensión de la ecuación 1.20 se obtendrán de a_2 vs. $\sin^2 \psi$ para los mismos valores de ϕ excepto 45° . Una vez que se obtiene el tensor de esfuerzo en el sistema de coordenadas de la muestra, se puede transformar en cualquier sistema de coordenadas.

Si los componentes de tensión de la ecuación 1.20 son cero, entonces sugiere que la gráfica de d vs. $\sin^2 \psi$ es lineal. Entonces la ecuación 1.18 se reduce:

$$\begin{aligned}
 (\varepsilon'_{33})_{\phi\psi} &= \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} = \frac{1+\nu}{E} \left\{ \sigma_{11} \cos^2 \phi + \sigma_{12} \sin 2\phi + \sigma_{22} \sin^2 \phi - \sigma_{33} \right\} \sin^2 \psi \\
 &\quad - \frac{1+\nu}{E} \sigma_{33} + \frac{\nu}{E} \text{tr}(\sigma)
 \end{aligned} \tag{1.21}$$

2. Materiales y Métodos

Para la presente investigación fue usada la aleación de aluminio 7075 como material de estudio, la **Tabla 2-1** se muestran las especificaciones del material.

Tabla 2-1: Propiedades físicas del aluminio 7075 [67]

Resistencia a la tracción	(MPa)	220 MPA
Módulo de elasticidad	(MPa)	95 MPA
Módulo de cizallamiento	(MPa)	150 MPA
Resistencia a la fatiga	(MPa)	160 MPA
Relación de Poisson		0.33
Elongación a la rotura		17%
Coefficiente de expansión térmica	(10⁻⁶ K⁻¹)	20-100
Conductividad térmica	(W/Mk)	25

El experimento se realizó en un centro de maquinado vertical SMC-5 HARTFORD, en la **Tabla 2-2** se describen las especificaciones técnicas de la máquina.

Tabla 2-2: Especificaciones del centro de maquinado SMC-5 HARTFORD

Velocidad husillo	rpm	12000
Cono de la nariz	-	BT30
Potencia del motor del husillo	kw/HP	2.2/4.96/3.7/5.5/7.38
Transversal rápida (X, Y, Z)	mm/dk	48000/48000/48000
Número de herramientas máximo	-	14
Máximo peso de la herramienta	kg	3
Máximo tamaño de la herramienta	mm	80x250
“Pull stud bolt”	-	P30T-1
Unidad control Mitsubishi		M80A
Presión de aire requerida	kg/cm ²	6.5
Potencia eléctrica consumida	KvA	16
Peso de la máquina	kg	2100
Peso de la máquina + guacal	kg	2600

El refrigerante empleado fue SWISSCOOL MAGNUM UX 200, en la **Tabla 2-4** se especifican sus características.

Tabla 2-3: Especificaciones del refrigerante SWISSCOOL MAGNUM UX 200

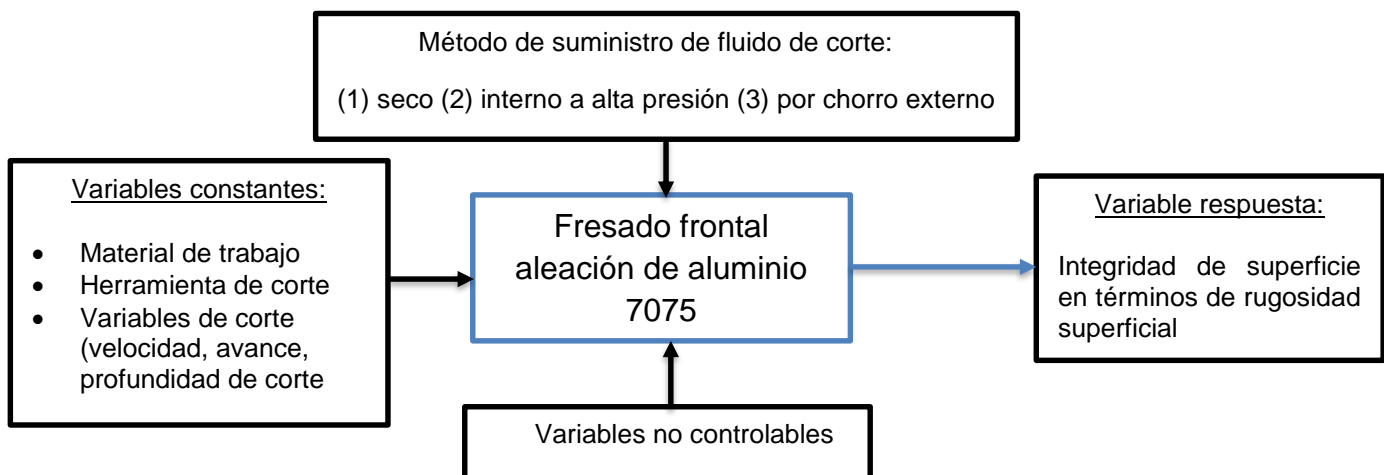
Color	-	Marrón claro
Apariencia	-	Líquida
Densidad a 20°C	g/ml	0.970
Viscosidad a 40°C	mm ² /s	50
contenido de aceite mineral	%	40
Factor para refractómetros manuales	% Brix	1.1

2.1 Selección del diseño experimental para el análisis de la rugosidad superficial

Para analizar el efecto del método de suministro de fluido de corte en la integridad de superficie en el maquinado de la aleación de aluminio 7075, fue necesario establecer los factores o variables que afectan el proceso para poder seleccionar un diseño estadístico adecuado. Dentro de las variables que afecta el proceso de fresado frontal se encuentra: velocidad, avance, profundidad de corte, refrigeración y lubricación del proceso, geometría de la herramienta y de la interfase material – herramienta, material de trabajo y material de la herramienta, máquina en la que se efectúa el proceso, capacidad, ajuste, rigidez, nivelación, etc. Sin embargo, el objetivo de esta investigación se focaliza en estudiar el efecto de emplear diferentes métodos de suministro fluido de corte sobre la integridad de superficie.

Por tanto, se pretende encontrar la influencia de la aplicación del método de fluido de corte en la integridad de superficie como factor determinante en la obtención de la calidad superficial. En consecuencia, al seleccionar el método de suministro de fluido de corte como único factor de estudio, el diseño experimental queda condicionado debido a que realiza un control o restricción sobre este. Para explicar en términos esquemáticos la formulación experimental se elaboró la siguiente figura:

Figura 2-1: esquema general del diseño experimental para evaluar la integridad de superficie en el fresado frontal de la aleación de aluminio 7075



A partir del anterior planteamiento se debió seleccionar un diseño experimental que se adecue a los razonamientos planteados. Siguiendo la clasificación realizada por Martin [68] donde este realizó una clasificación de los diseños experimentales de la siguiente manera:

1. Sistemático. Los tratamientos son asignados a las unidades experimentales de acuerdo a algún patrón predeterminado. Tales diseños no proveen estimaciones válidas del error experimental.
2. Aleatorizados. La asignación de los tratamientos a las unidades experimentales depende de algún patrón de aleatorización. Solo para estos diseños, las técnicas de análisis de varianza son válidas, y se caracterizan así:
 - a) Irrestritos. La aleatorización no está restringida a ningún arreglo de las unidades experimentales.
 - b) Restricción Única. La aleatorización se restringe a un único requisito determinado en el arreglo de las unidades experimentales. Estos son los diseños de bloques.
 - c) Restricciones múltiples. La aleatorización se restringe a dos o más requisitos localizados en los arreglos de las unidades experimentales. La misma subclase general existe para estos diseños como en el caso de los diseños de bloques con submuestreo y factoriales.

De acuerdo con la anterior clasificación se puede inferir que el diseño en bloques completamente aleatorizado (DBCA) [69] cumple con el requerimiento planteado, es decir, la restricción única deviene de fijar unas condiciones de diseño; Las condiciones propuestas fueron: fijar los parámetros de corte para cada una de las probetas maquinadas con diferentes métodos de suministro de fluido de corte, es decir, que el diseño queda condicionado o restringido por el método de suministro de fluido de corte.

Con relación a la anterior caracterización, el experimento planteado en esta investigación parte de componer los bloques conforme al método de suministro de fluido de corte, es decir, los tres bloques están representados como: (1) maquinado en seco (2) interno a alta presión (3) chorro externo, esta característica es importante debido a que el objetivo es poder lograr ver las diferencias significativas entre métodos en la respuesta al sistema planteado: rugosidad superficial. La **Tabla 2-4** representa el planteamiento logrado.

Considerando el principio del diseño DBCA, se formuló el siguiente arreglo de datos:

Tabla 2-4: arreglo de datos diseño DBCA propuesto.

Bloque (método de suministro de fluido de corte)	Tratamientos					
	1	2	3	4	I_{n+1}
Seco						
Chorro externo						
Interno alta presión						

El siguiente paso es determinar el número de réplicas o repeticiones necesarias que le permitan al diseño experimental detectar diferencias significativas entre los bloques, es decir determinar si hay o no evidencia estadística, mediante la prueba de análisis de varianza, para rechazar o aceptar la hipótesis nula propuesta. El procedimiento para determinar el número de réplicas es presentado en el anexo A.

2.2 Diseño de la probeta:

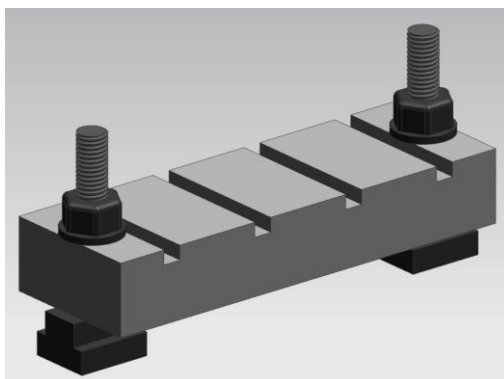
Posteriormente se definió la geometría de la pieza de trabajo. Esta geometría fue diseñada bajo los parámetros establecidos en el modelo experimental, adicionalmente, debía incorporar características funcionales de forma y dimensionales que permitiera contener las superficies experimentales para el fresado frontal cambiando el método de suministro de fluido de corte, además, se debía considerar los ensayos y mediciones posteriores de integridad de superficie, tales análisis de rugosidad superficial, topográficos y análisis de esfuerzos residuales se realizaron por medio de diferentes técnicas de caracterización. A partir de estos instrumentos se diseñó una probeta con las dimensiones óptimas y permitidas en los equipos de medición. En la mayoría de los equipos empleados, estos poseen una mesa de trabajo de 19x19 cm, sin embargo, en equipos como el SEM la cámara porta muestras tienen la limitante de ingresar muestras no mayores a 5 centímetros de largo y ancho.

En la **sección 2.1** se planteó los criterios de diseño experimental que definió el diseño en bloques como la mejor alternativa para esta investigación. Es por esto que bajo el principio del diseño en bloques se exigen los siguientes criterios:

1. Proximidad (bloques próximos)
2. Características físicas
3. Tiempo
4. Manejo de las unidades experimentales en el experimento

La probeta diseñada, **Figura 2-2**, contiene tres superficies planas rectangulares separadas entre sí, estas superficies corresponden a las superficies asignadas para el maquinado frontal y para cada método de suministro de fluido de corte, con esta característica se cumple el principio 1 y 2 del diseño experimental, adicionalmente, al maquinar la probeta con estas superficies próximas, que representan los tres métodos, trae ventajas debido a que disminuye el error experimental asociado con las condiciones aleatorias de montaje, es decir que al disminuir el número de montajes el error experimental disminuye.

Figura 2-2: probeta diseñada bajo los principios del diseño experimental



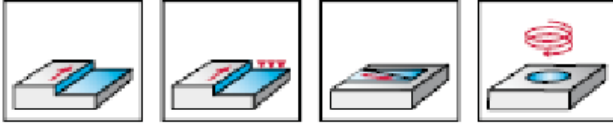

Otra de las características es el tipo de montaje, este diseño de probeta permite un montaje anclado a la mesa de trabajo. Este montaje rígido permite que durante el experimento la variabilidad causada por la vibración del proceso se reduzca, contribuyendo a disminuir el error experimental. Este diseño de probeta garantiza la replicación de cada tratamiento, es decir, las probetas tienen las mismas condiciones de maquinado durante el proceso, cumpliendo con los apartados 3 y 4 de los principios anteriormente expuestos.

2.3 Herramienta de corte y parámetros de corte:

Para el proceso de fresado frontal de desbaste y acabado se utilizó una fresa indexable de escuadra de 4 plaquitas de corte de 40 mm de diámetro fabricada por *WALTER*, referencia F4042R.B16.040.Z04.10, las principales dimensiones se ilustran en la **Figura 2-3**. Adicionalmente se utilizaron insertos de clase N, este tipo de inserto es diseñado para el maquinado de aleaciones no ferrosas. El grado de material WXN 15 de las plaquitas corresponde a un metal duro con recubierto (TiCN) fabricado por el método PVD. La **Figura 2-3** muestra los parámetros de proceso recomendados por el fabricante.

Figura 2-3: dimensiones principales de la fresa de escuadra marca Walter.

Fresa de escuadra de 4 plaquitas							
F4042R.B16.040.Z04.10	Dc	d1	l4	Lc	Ll1	Z	
ADHT10T3PER-688WXN15	40	16	40	10	--	4	

				
ROUGHING				
ap	ae	Velocidad de corte vc (m/min)		Avance por diente-informacion fz para fresado lateral (A). para ranurar (B), fz reducir en un 10%
Max	1xD	Min	Max	0.15
9 mm	22 mm	265	310	$v_f = f_z * z_n * n$ Para fz=0.15 Zn=4 n=2108.80 $v_f = 1265.28 \text{ mm/min}$

Los parámetros de corte para el proceso de fresado frontal de desbaste empleando las herramientas anteriormente descritas son los siguientes:

En el catálogo del fabricante, se ubica las características del inserto empleado, allí se puede visualizar las características geométricas, en la tabla se debe ubicar el filo de corte (dado por las últimas letras de la referencia del inserto). Con esta característica geométrica el fabricante recomienda un rango de velocidades de corte (v_c) dependiendo del material de trabajo, se debe seleccionar la velocidad de corte a partir de la relación entre la profundidad de corte radial (a_e) y del diámetro nominal de la fresa.

La ecuación 2.2, toma un (a_e) intermedio con respecto a las recomendaciones dadas en la literatura especializada que están dentro del rango de d_t (diámetro efectivo de fresado) $0.65d_t \leq a_e \leq 0.85d_t$:

$$\frac{a_e}{D_t} = \frac{22}{40} = 0.55 \approx \frac{1}{2} \quad (2.1)$$

El parámetro seleccionado es de una velocidad de corte de **$V_c=265 \text{ m/min}$** . Del mismo modo se seleccionó el avance recomendado por el fabricante, determinado por el porta-herramienta, el fabricante ofrece un rango de avance por diente para distintas aleaciones de aluminio, el material empleado en esta investigación es una fundición de aluminio. el valor seleccionado es de **$f_z=0.15 \text{ mm}$** por diente.

con esta información se procede a calcular los parámetros de velocidad angular (n), ecuación 2.3, y avance (f) ecuación 2.4.

$$n = \frac{v_c * 1000}{\pi * D_t} = \frac{265 * 1000}{\pi * 40} = 2108.80 \text{ rpm} \quad (2.2)$$

$$v_f = f_z * z_n * n = 0.15 * 4 * 2108.80 = 1265.28 \text{ mm/min} \quad (2.3)$$

Siguiendo el mismo procedimiento de cálculo empleado para hallar los valores de desbaste, se halló los valores para la operación de acabado. Del catálogo se selecciona

los parámetros de corte de la designación estandarizada de la herramienta. El parámetro seleccionado es de una velocidad de corte de **$V_c=395 \text{ m/min}$** . Del mismo modo se seleccionó el avance recomendado por el fabricante, valor seleccionado es de **$f_z=0.1 \text{ mm}$** por diente.

$$n = \frac{v_c * 1000}{\pi * D_t} = \frac{395 * 1000}{\pi * 40} = 3145 \text{ rpm} \quad (2.5)$$

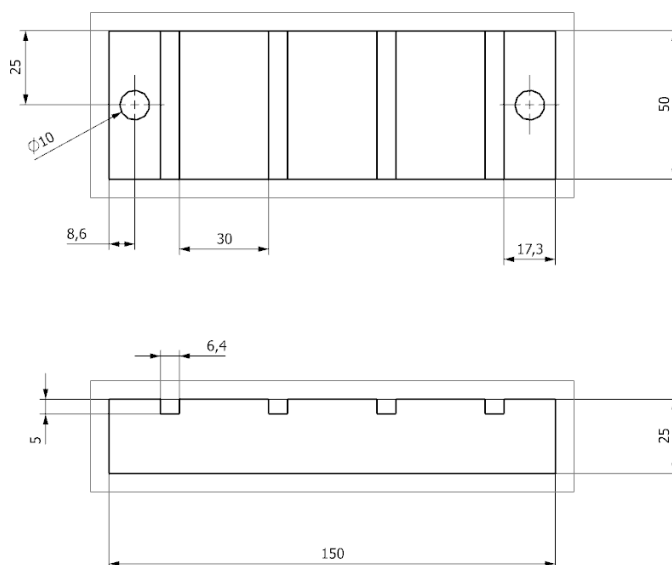
$$v_f = f_z * z_n * n = 0.1 * 4 * 3145 = 1257 \text{ mm/min} \quad (2.6)$$

2.4 Montaje experimental

2.4.1 Alistamiento de la materia prima

Para la obtención de la geometría diseñada en el apartado 2.2, se cortaron bloques de 25 mm de espesor y 150x40 mm de largo y ancho de un tocho de aluminio 7075 en bruto. Con el fin de tener control sobre los efectos aleatorios, se solicitó al fabricante cortar las unidades de material de un mismo tocho en bruto, con el fin de disminuir el error experimental asociado a la diferencia entre los porcentajes químicos y propiedades físicas que puedan existir entre diferentes lotes de producción. Adicionalmente se enumeró cada probeta de acuerdo al orden de corte, esto con el fin de tener control local sobre el diseño experimental. En la **Figura 2-4**. Se muestra el plano de las probetas.

Figura 2-4: plano de alistamiento de la probeta



Después del proceso de corte de la materia prima, se realizó el proceso de maquinado, el cual consiste en 3 operaciones de maquinado. 1. Se sujetó la materia prima en una prensa dispuesta sobre la mesa de trabajo del centro de maquinado 2. Se realizó el rectificado de toda la superficie y los agujeros mostrados en la **Figura 2-4**. Por último, con un escariador

de 1/4 de pulgada se realizaron las ranuras que separan cada superficie, El programa de control numérico, se muestra en la **Tabla 2-5**; fue simulado, refinado y verificado.

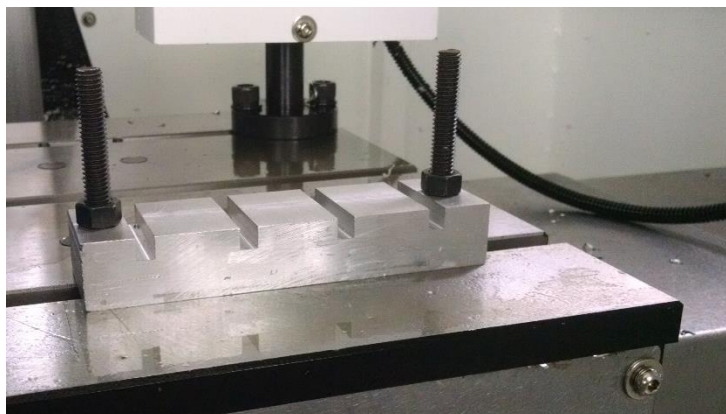
Tabla 2-5: código NC premaquinado probetas.

1	G90 G94 G21 G17 G40 G80 G49	21	G49	41	X-28	61	Z10
2	G91 G28 Z0	22	T01 M06	42	Z 10	62	X28 Y-54.53
3	G90 G0 X0	23	G43 H1 G0 Z10	43	X28	63	Z-4
4	G49	24	M8	44	Z-8	64	X-28
5	T04	25	G81 G99 X-66.4 Z- 15 R5 F80 Q2	45	X-28	65	Z10
6	M06	26	X66.4	46	Z10	66	X28
7	G43 H4 Z10	27	G80	47	X28 Y18.2	67	Z-8
8	M1	28	Z10	48	Z-4	68	X-28
9	M08	29	G00 X0 Y0	49	X-28	69	Z10
10	M03 S1909	30	M5	50	Z10	70	M5 M9
11	G00 Y-95 X-20	31	M9	51	X28	71	G91 G28 Z0
12	G01 Y115 Z-2	32	G91 G28 Z0	52	Z-8	72	G91 G28 X0 Y0
13	Z0	33	G49	53	X-28	73	G80 G40
14	X20 Y-95	34	T5 M06	54	Z10	74	M30
15	Y115 Z-2	35	G43 H5 G0 Z10	55	X28 Y-18,2		
16	Z10	36	M08	56	Z-4		
17	M09	37	M03 S5012.75	57	X-28		
18	M05	38	G00 Z1 F1002	58	Z10		
19	G91 G28 Z0	39	Y54.53 X28	59	X28 Z-8		
20	G90 G0 X0 Y0	40	Z-4	60	X-28		

2.4.2 Ejecución de proceso experimental

En el desarrollo de la fase experimental del proceso de maquinado se planteó una estrategia que cumpliera con los principios del diseño experimental (aleatorización, replicación y control local), para cumplir con estos principios se definió el montaje anclado a la mesa de trabajo, este tipo de montaje permite la replicación debido a que los elementos de sujeción están fijos a la mesa de trabajo, permitiendo, que una vez ejecutado el experimento en una probeta se realice el montaje de la siguiente bajo las mismas condiciones, logrando, el control local de las posibles fuentes de variación en el experimento. En la **Figura 2-5** se muestra las condiciones de montaje durante la ejecución del experimento.

Figura 2-5: montaje de la probeta en el centro de maquinado.



especificado el anterior procedimiento, se definió el orden de maquinado de las superficies para cada método de suministro de fluido de corte, como se mencionó en el apartado 1.3, el uso del fluido de corte durante el maquinado causa características únicas en la superficie, en consecuencia, es importante que durante la ejecución del proceso, la superficie asignada para el método en seco, no concorra presencia de fluido de corte en la herramienta y en la superficie del material, por tal motivo, el orden asignado durante el maquinado fue el siguiente:

- Primera superficie: método de refrigeración interna a alta presión
- Segunda superficie: método por chorro
- Tercera superficie: maquinado en seco

Para garantizar que durante el maquinado en seco no concorra presencia de fluido de corte, se programó una trayectoria donde la herramienta es secada con aire a presión y luego rota a una velocidad angular elevada para que expulse los remanentes de fluido de corte de su interior, además, la superficie es seca con aire a presión retirando el fluido de corte presente de las anteriores operaciones.

la siguiente estrategia diseñada, fue ejecutar el maquinado experimental en dos fases; la primera fase consistió en maquinar todas las probetas bajo la operación de desbaste y la segunda fase con la operación de acabado.

Este procedimiento tuvo como objetivo, optimizar los recursos disponibles para buscar mayor eficiencia en el proceso de maquinado, puesto que, si se ejecuta el proceso de desbaste en una superficie bajo un método de suministro y luego la operación de acabado, las paquitas de corte sufren un desgaste acelerado que puede causar una serie de alteraciones que contribuyen al aumento del error experimental, por tal motivo para la ejecución del proceso de acabado (fase 2) se rotaron las plaquitas de corte para usar el nuevo filo de corte.

Definida la estrategia de maquinado se estableció la aleatorización del experimento, el método de muestreo más conveniente para este experimento es el muestreo aleatorio

simple. Como se explicó en el acápite 2.4.1, durante el proceso de alistamiento de la materia prima se identificó cada probeta con un número del uno al nueve; con esta identificación y mediante la herramienta de aleatorización del software Excel se realizó el muestreo aleatorio, donde se asignó un orden de maquinado para cada probeta como se ve en la **tabla 2-6**.

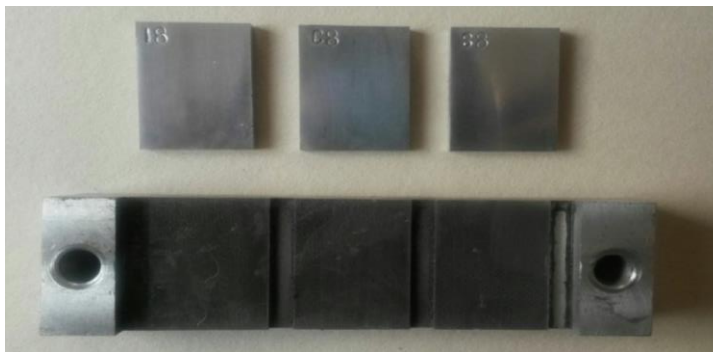
Tabla 2-6: Muestreo Aleatorio, orden de maquinado.

Orden de maquinado	Probeta #
1	2
2	9
3	6
4	4
5	8
6	3
7	1
8	5
9	7

2.4.3 Probetas para caracterización

Para poder realizar la caracterización de la superficie maquinada y proceder a los estudios y pruebas de integridad superficial, se extrajeron las geometrías diseñadas por medio del proceso de electroerosión por hilo. Las probetas obtenidas posibilitan el estudio de la superficie empleado diferentes técnicas, tales como: microscopia electrónica de barrido, para el estudio de la topografía y morfología superficial, microscopia de variación focal, para la evaluación de rugosidad superficial y finalmente el análisis de esfuerzos residuales por medio de la técnica de difracción de rayos X.

Figura 2-6: Probetas de las superficie maquinadas bajo diferentes métodos de suministro de fluido de corte.



2.4.4 Caracterización morfología de las superficies maquinadas

Los análisis morfológicos de las superficies maquinadas se realizaron empleado un microscopio electrónico de barrido Marca TESCAN, las especificaciones técnicas se detallan en la **Tabla 2-7**.

Tabla 2-7: Especificaciones microscopio electrónico de barrido TESCAN VEGA3

Cañón	--	Cátodo con cabeza de tungsteno
Resolución	nm	3 a 30Kek
Cámara de vacío	Pa ²	9x10 ⁻³
Detector empleado	---	BSE
Energía del haz de electrones	kev	220 a 30 kev

2.4.5 Análisis de la rugosidad superficial

Las mediciones de rugosidad superficial se realizaron en microscopio de variación focal de referencia Infinite Focus G5 marca Alicona perteneciente al Laboratorio de Metrología Dimensional de Precisión del Dpto. de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica., las especificaciones técnicas se detallan en la **Tabla 2-8**.

Tabla 2-8: Especificaciones instrumento de medición microscopio variación focal INFINITE FOCUS.

Magnificación objetivo	-	20X
Distancia de trabajo	mm	19
Rango latera de medición (X,Y)	mm	0.81
(X x Y)	mm ²	0.66
Resolución vertical	nm	50
Exactitud de la altura (1mm)	%	0.05
Máxima área de medición	mm ²	10000
Minima rugosidad medible (Ra)	µm	0.06

Los valores de rugosidad obtenidos en las mediciones fueron analizados con el diseño experimental seleccionado en la **Sección 2.1**, Se empleó el software R® para realizar los análisis de variancia y validación de supuestos estadísticos.

2.4.6 Caracterización por difracción de rayos X

En el estudio de esfuerzos residuales y cambios de fases se empleó un equipo de difracción de rayos X marca Panalytical X'pert³ provisto con un tubo de cobre con una radiación Cu-Kα ($\lambda = 1.54184 \text{ \AA}$, $K\alpha_1 / K\alpha_2 = 0.5$) desde una fuente operada a 40 kV y 40 mA; se realizó el experimento empleando un goniómetro de resolución estándar que contiene la geometría ($\theta-\theta$) para la realización de mediciones, en configuraciones simétricas y asimétricas con tamaño de paso mínimo de 0.001° y máximo de 1.27° ; un detector proporcional de rayos-X y como portamuestras se emplearon un goniómetro de micro-difracción con microscopio de alineación y porta-muestras de uso general.

3. Resultados y discusión

3.1 Topografía de la superficie maquinada

Las **Figuras 3-1** muestran la morfología de las superficies obtenidas al ser maquinadas empleando diferentes métodos de suministro de fluido de corte sobre la aleación de aluminio 7075, estas, fueron analizadas mediante un microscopio electrónico de barrido TESCAN VEGA3 mediante el cual se logra observar la topografía obtenida mediante el proceso de fresado frontal.

Figura 3-1: Morfología de la superficie maquinada bajo diferentes condiciones de fluido de corte: (a)chorro (b)corte en seco (c) corte interno a alta presión

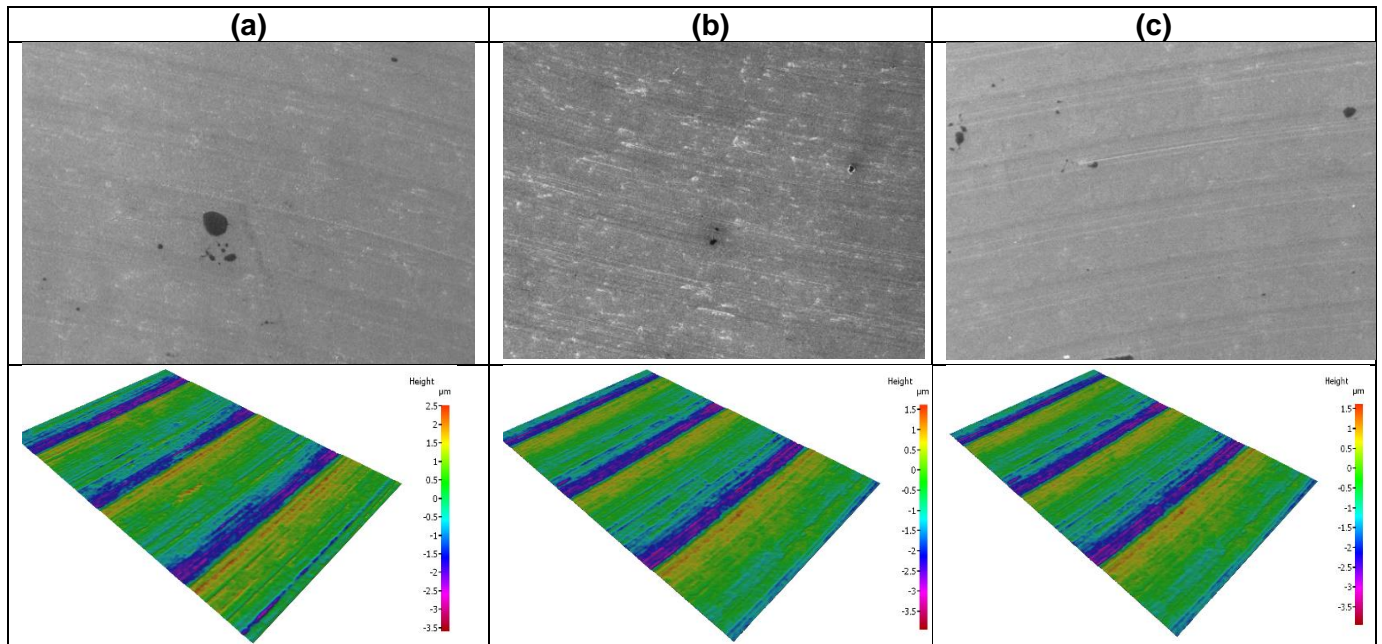
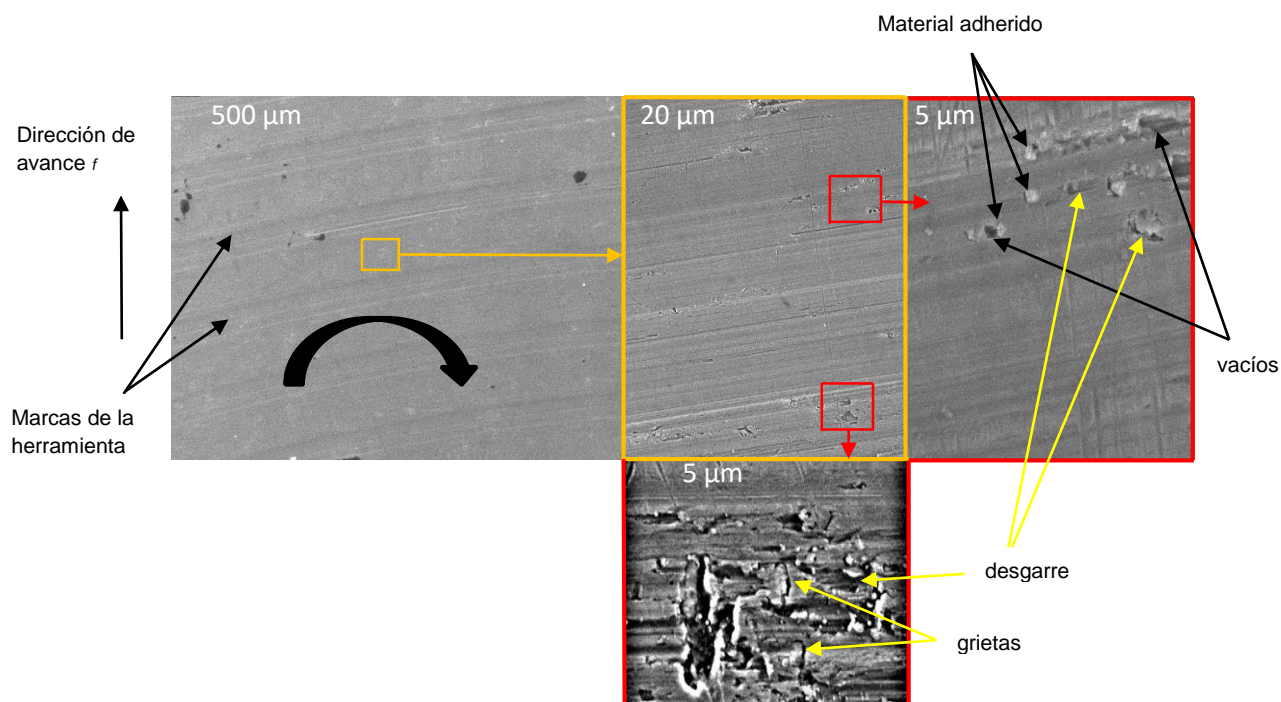
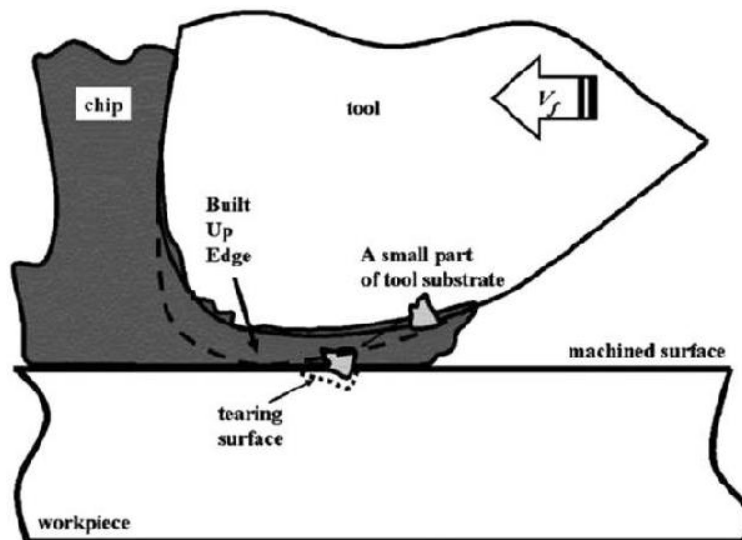


Figura 3-2: Imágenes SEM de la superficie maquinada bajo el método de suministro de fluido de corte interno a alta presión.



La **Figura 3-2** representa la topografía de la superficie obtenida por el proceso de fresado frontal empleando el método de suministro interno a alta presión. Se puede observar en la primera imagen (magnificación 500 μm) una superficie aparentemente homogénea, con algunas machas generadas durante el proceso de electroerosión por hilo durante el corte de las probetas. En la segunda imagen (magnificación 20 μm) se observa en la morfología superficial algunos defectos o discontinuidades, sin mayor detalle; con, un mayor acercamiento (5 μm), se puede apreciar los defectos superficiales con mayor detalle, defectos como grietas, desgarres, vacíos y material adherido. Los defectos superficiales más evidentes son los desgarres (*tear material*) y material adherido (*adhered material*).

En las anteriores imágenes SEM resalta una característica singular, se logra apreciar los defectos de material adherido adyacentes a los desgarres, lo que podría indicar que estos defectos estarían relacionados entre sí. Esta característica está relacionada por la presencia de BUE o BUL, Ulutan et al [36] detallaron como durante el proceso de maquinado de algunas aleaciones de aluminio y níquel la redeposición de viruta en la superficie provoca la adherencia de material sobre la superficie maquinada, en consecuencia, en algunos casos los desgarros ocurren porque la adherencia entre la herramienta y la superficie es tan alta que desgarra algunas partes de la superficie y como resultado, se produce una depresión en la superficie (desgarro), causando la perturbación de la topografía de la superficie. La **Figura 3-3**, muestra el mecanismo de formación de desgarro descrito por Ulutan et al.

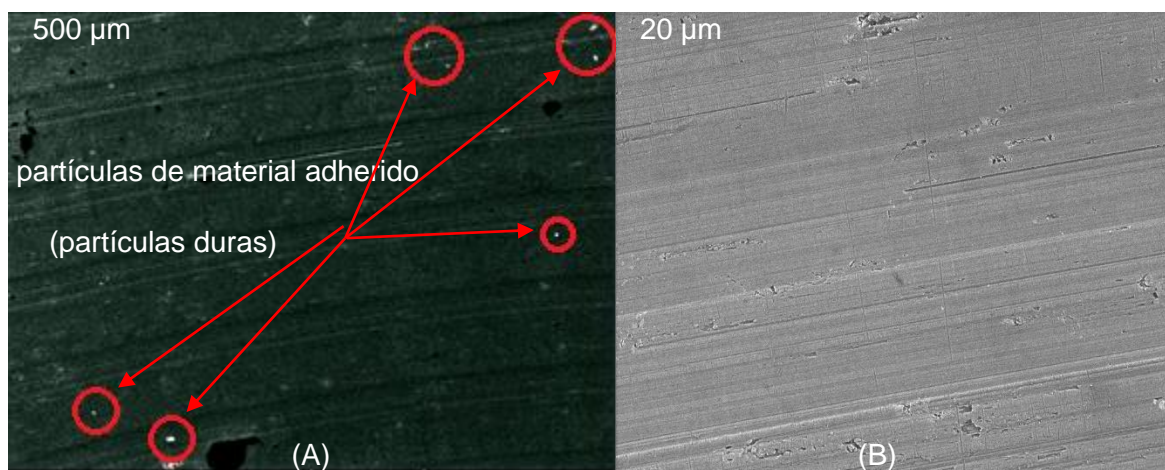
Figura 3-3: Mecanismo de formación de desgarro en maquinado [36].

Cabe aclarar que el fenómeno de redeposición de viruta, BUE, es poco probable que se forme en el maquinado de la aleación de aluminio 7075, la explicación obedece al proceso distintivo del maquinado de estas aleaciones, particularmente en esta investigación se empleó una velocidad de corte alta, como aconseja los manuales técnicos de la herramienta para el maquinado de aleaciones de aluminio, esto ocasiona, que la temperatura de corte aumente, lo que conduce al ablandamiento del material y posteriormente la reducción de las fuerzas de maquinado. Al aumentar la velocidad de corte, la formación de BUE desaparece y se producen condiciones de fricción adecuadas en la interfaz de corte entre la herramienta y la viruta [70].

Otra causa asociada a defectos concurrentes en las superficies maquinadas como grietas, desgarros, vacíos y material adherido, es el fenómeno de agrietamiento de carburo o partículas duras. Estas partículas causantes del daño superficial que se produce por la interacción entre la herramienta de corte y los carburos presentes en la matriz del material de trabajo. Walid Jomaa et al [71] detallaron como durante el maquinado de la aleación de aluminio 7075 la presencia de estas partículas genera diferentes defectos superficiales, y dependiendo de las condiciones de corte y tamaño de las partículas, pueden causar un defecto en particular como vacíos, desgarros y grietas.

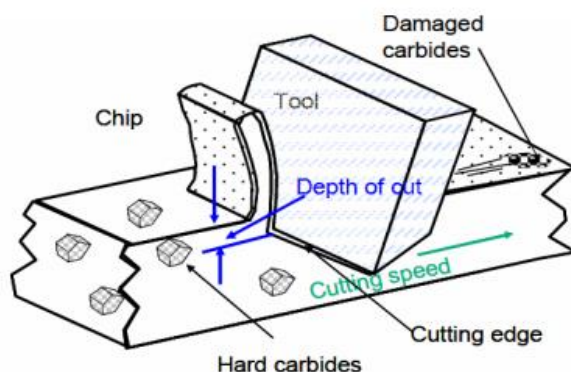
En un examen minucioso a las imágenes SEM, se reconoce la presencia de partículas en la superficie maquinada, como se observa en la **Figura 3-4 (A)**, que, mediante el uso de un filtro fotográfico, se logra visualizar partículas de material de diferentes tamaños. En la imagen SEM (**Figura 3-4 B**) los defectos presentan diferentes tamaños y formas lo que indica que estas partículas están generando algunos de los defectos superficiales como los detallados por Walid Jomaa et al en su investigación.

Figura 3-4: Imágenes SEM (A) partículas adheridas sobre la superficie maquinada. (B) topografía de la superficie maquinada magnificación 20 μm



Las partículas de carburo se generan durante la preparación de la aleación de aluminio 7075. La **Figura 3-5**, muestra como las partículas de carburo se distribuyen de forma no homogénea en el material. El fenómeno de agrietamiento de carburo, hace referencia al comportamiento de los carburos a la deformación, arrastre y rompimiento bajo el esfuerzo de deformación y maquinado. Cuando las partículas de carburo se cortan durante el proceso de maquinado, estas se agrietan o se desprenden [72]; durante este proceso, se separan de la superficie y dejan defectos. El defecto de desgarre se forma cuando las partículas de carburo desprendidas y arrastradas a lo largo de la dirección de maquinado. El mecanismo de formación de los defectos causados por carburos se ilustra en la **Figura 3-5**.

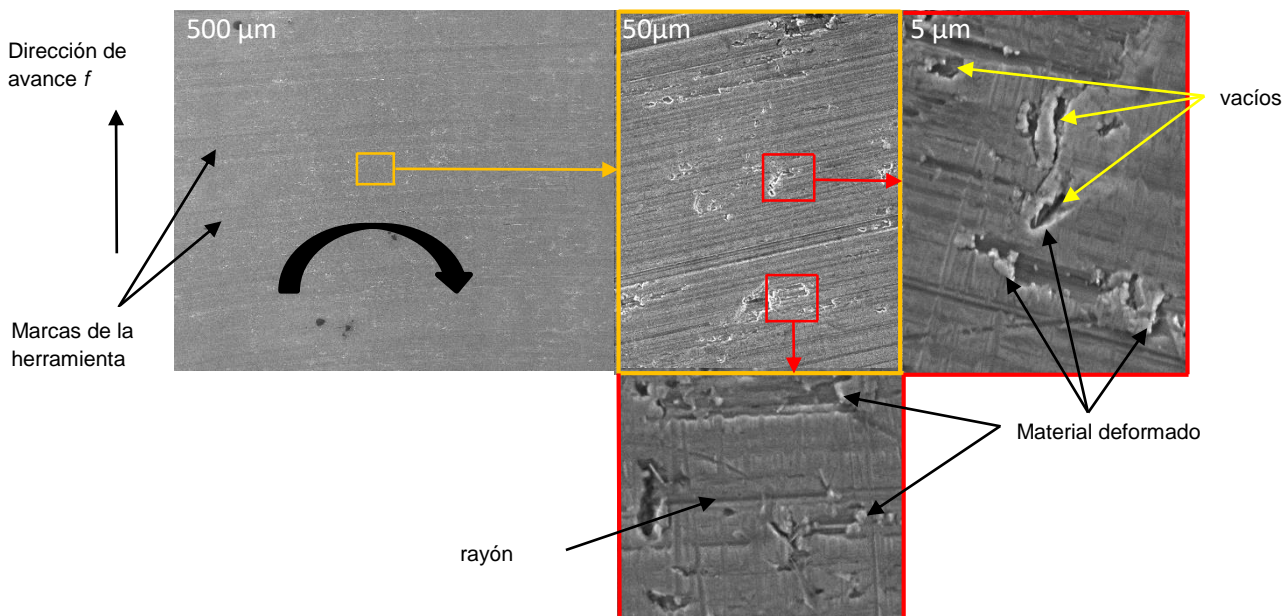
Figura 3-5: Mecanismo de formación de los defectos causados por partículas duras. [72]



Ante los anteriores planteamientos hechos, se entiende, que la mayoría de defectos superficiales son causados por la presencia de partículas duras, que durante el maquinado generan estas marcas sobre la topografía superficial. En este mismo sentido, la forma como se presenta estos defectos sobre la superficie del material al ser maquinada bajo este método de refrigeración obedece a la mecánica de corte distintiva en esta técnica de suministro de fluido de corte, según Machado [73], el objetivo principal del chorro de fluido de corte a alta presión es romper las virutas, al emplear este método se reduce la longitud de contacto herramienta-viruta, el área de contacto de la herramienta-viruta comprende la zona de adherencia y la zona de deslizamiento [74], el chorro de alta energía incidente actúa como una cuña que levanta la viruta facilitando la fractura de la viruta al reducir el radio de rizo, así como el contacto plástico en la zona de deslizamiento, en consecuencia, en la zona de adherencia la viruta hace contacto totalmente plástico con la superficie de incidencia de la herramienta [75-80], según Trent [78] Se debe tener en cuenta que el lubricante solo puede ser efectivo en la zona de deslizamiento debido a que no hay posibilidad de que el fluido de corte, ya sea sólido, líquido o gaseoso, tenga acceso a la región de adherencia. Dentro de la zona de deslizamiento, el lubricante de corte puede obtener acceso y reducir la generación de calor. A alta velocidad, se proporciona poco tiempo para que el fluido de corte entre en contacto en la zona de deslizamiento, el refrigerante puede no tener suficiente tiempo para eliminar el calor acumulado en la zona de corte, hay una menor reducción de la temperatura bajo condiciones de enfriamiento empleando refrigeración a alta presión y alta velocidad de corte [77].

En consecuencia, ante la imposibilidad de disminuir adecuadamente el calor, no se generan las condiciones de corte óptimas, como se describió previamente, esto da a lugar que se generen la formación de BUE o BUL y propicie las condiciones descritas por Ulutan et al, provocando la adherencia de material sobre la superficie maquinada y ocasionando los desgarros, en este caso particular adyacentes uno del otro.

Figura 3-6: Imágenes SEM de la superficie maquinada en seco.



La **Figura 3-6** representa las imágenes SEM de la superficie obtenida mediante el proceso de fresado frontal maquinado en seco.

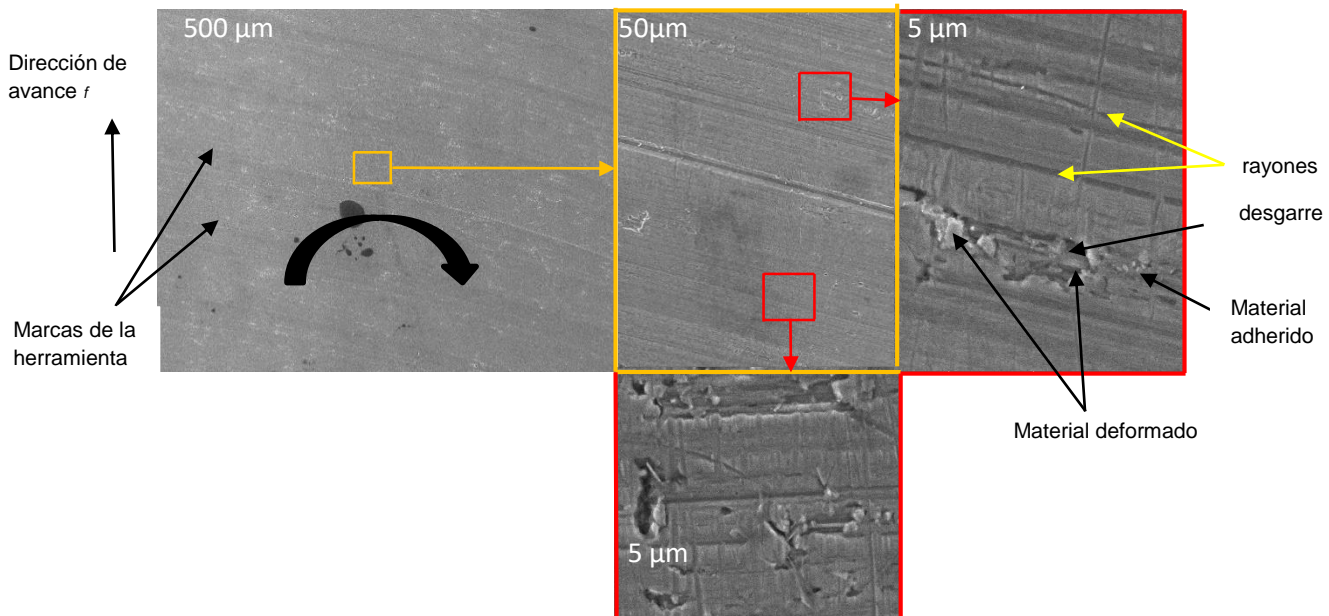
La primera imagen (magnificación 500 μm) evidencia una superficie aparentemente homogénea caracterizada por tener una textura con algunos detalles con contraste más claro con respecto a la superficie (textura piel de naranja); además, la superficie posee algunas machas generadas durante el proceso de electroerosión por hilo.

A continuación, en un mayor acercamiento (magnificación 50 μm) define con más claridad los defectos presentes en la morfología superficial, estos defectos se caracterizan por tener un contraste más claro alrededor de su geometría. En un mayor acercamiento (magnificación 5 μm) se observan los defectos presentes en la superficie, tales como desgarres, vacíos y deformación plástica.

La textura de la superficie puede explicarse esencialmente durante la operación de fresado frontal, donde, en la matriz del material existe micro cavidades y carburos que generan los defectos anteriormente descritos (**Figura 3-5**), adicionalmente, el defecto de deformación plástica se da como resultado del flujo plástico de material deformado durante el proceso de corte [80].

Las aleaciones de aluminio se encuentran entre los materiales particularmente críticos con respecto al maquinado en seco debido a sus propiedades térmicas; durante el proceso de maquinado la pieza de trabajo absorben calor debido a su alto nivel de conductividad térmica además de un alto nivel de expansión térmica, en vista del bajo punto de fusión y reblandecimiento causa problemas relacionados con la formación de viruta, además, muchas aleaciones de aluminio son susceptibles a la adhesión con la herramienta y a la formación de BUE que generan un aumento en la fuerzas de corte [81]. Por lo tanto, Las características topográficas halladas en la superficie maquinada en seco tienen origen de la siguiente forma; como se observa en los análisis de rugosidad superficial y las imágenes SEM de la topografía la superficie es más homogénea y no se observa la presencia del defecto superficial de adherencia, esto se debe a que la herramienta empleada corresponde a un metal duro con recubierto (TiCN) fabricado por el método PVD, las calidades PVD generan menor calor de fricción, fuerzas de corte más bajas y resisten la formación de bordes acumulados [82], en consecuencia, durante el proceso de maquinado en seco el gradiente de temperatura no tendrá descenso, por el contrario, a medida que aumente el tiempo de maquinado este ascenderá, debió a que el aluminio presenta una buena conductividad térmica, la temperatura se conservaría estable lo que propicia las condiciones de corte optimas y no tendría a lugar la formación BUE o BUL, sin embargo, debido a que en la interfase de corte hay una mayor temperatura esto provoca el ablandamiento del material, en consecuencia, el flujo plástico del material es deformado hasta el fallo repentino (falla dúctil) caracterizado por el contraste claro mostrado alrededor de la geometría del defecto superficial [83].

Figura 3-7: Imágenes SEM de la superficie maquinada bajo el método de suministro de fluido por chorro.



La **Figura 3-5** representa las imágenes SEM de la superficie maquinada bajo el método de suministro de fluido de corte por chorro.

La primera imagen (magnificación 500 μm) revela una superficie aparentemente homogénea con textura que se caracteriza por tener algunos detalles de contrastes claros similar a la textura piel de naranja, de menor aspecto comparado al maquinado en seco, esta superficie posee algunas manchas generadas durante el proceso de electroerosión por hilo.

Un mayor acercamiento (magnificación 50 μm) detalla a simple vista, en la morfología superficial, los defectos como rayones y material adherido; una mayor proximidad (magnificación 5 μm) permite apreciar los defectos que posee esta superficie, tales como desgarros, rayones, deformación plástica y material adherido.

Característicamente en las imágenes se observa que la superficie maquinada con este tipo de método de suministro de fluido de corte, se pueden apreciar los defectos a una mayor magnitud, comparado con los otros métodos. En esta superficie se encontraron una combinación de los defectos vistos en las **Figuras 3-2** y **3-6** como son los desgarros, material adherido y deformado y rayones. En esta superficie nuevamente aparece los defectos de desgarros acompañados de material adherido, similar al método de alta presión, adicionalmente de material deformado, esta apreciación, indica que al emplear este método de suministro se genere una combinación de los factores que provocan los defectos en las dos técnicas de suministro anteriormente estudiadas, por tanto, probaría

que esta técnica de suministro cause una variación de temperatura en la interfase de corte tal y como se ha demostrado en diferentes investigaciones. El empleo de esta técnica de suministro a resultado poco efectiva, cuando el fluido de corte entra en contacto en la interfase de corte este se evapora aumentando progresivamente la temperatura, además, los fluidos tienden a enfriar solo las áreas circundantes que antes eran cálidas de tal modo intensificando los gradientes de temperatura y aumentando las tensiones térmicas.

3.2 Rugosidad de las superficies maquinadas

El efecto del método de suministro de fluido de corte en la integridad superficial, se desarrolló a través del análisis cuantitativo y estadístico; el estudio y evaluación de la rugosidad superficial, se realizó empleando un perfilometro marca *Alicona infinity focus*, (ver sección 1.5.2). El objetivo fue cuantificar el efecto del método de suministro de fluido de corte sobre la topografía superficial, teniendo en cuenta él estudió de las distribuciones de altura y amplitud de los parámetros de rugosidad de la superficie generada para cada técnica de suministro. La **tabla 3.1** describe los parámetros de rugosidad de la superficie 2D estudiados.

Tabla 3-1: parámetros de rugosidad 2D [84]

Parámetros de rugosidad 2D (μm)									
Parámetros de amplitud(μm)							estadísticos		
Ra	Rq	Rt	Rz	Rmax	Rv	Rp	Rc	Rsk	Rku

En un estudio más amplio, para el análisis superficial y evitar la ambigüedad inherente de estudiar un solo indicador de rugosidad, se debe examinar más de un parámetro. Comúnmente se estudia la rugosidad superficial media (Ra) que proporciona una clara descripción general de las variaciones de altura, pero no suministra ninguna información sobre ondulaciones y no es sensible en pequeños cambios en el perfil. Por el contrario, incorporar otros parámetros de rugosidad al estudio de superficies, describen más de una característica de la superficie maquinada, por ejemplo, la altura pico valle (Rt), la altura media pico a valle (Rz) y la media de altura de pico (Rmax) son parámetros sensibles a la presencia de altos picos y rasguños profundos.

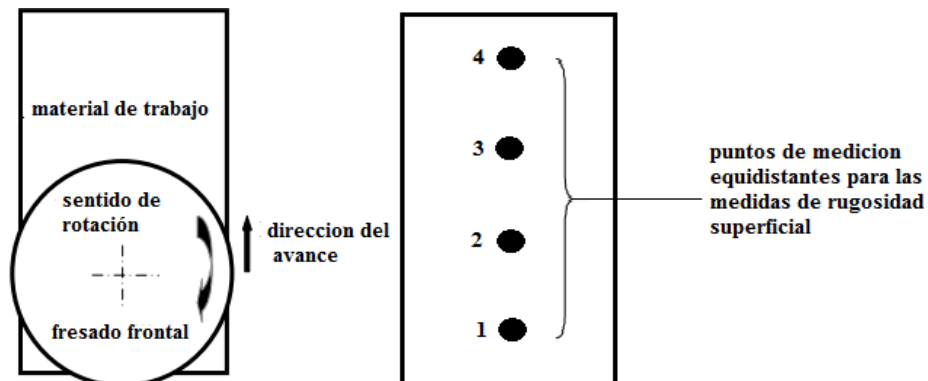
La simetría (Rsk) describe la simetría de la distribución de altura en relación con la línea media, es sensible a ocasionales valles profundos o altos picos, la asimetría cero se refleja en distribuciones de altura simétrica, mientras que la asimetría positiva describe superficies con altos picos o valles llenos, la simetría negativa describe rasguños profundos o pérdida de picos [66]. Por otro lado, la curtosis (Rku) es la medida de la nitidez de la distribución de altura, cuando Rku es menor a tres (3) describe la densidad de probabilidad de nitidez del perfil para superficies con picos bajos y valles bajos, y cuando es mayor a tres (3) representa superficies con picos más altos y valles bajos [85].

El trabajo de investigación se realizó, definiendo las medidas de rugosidad superficial en una zona representativa de la superficie maquinada; los valores de rugosidad superficial para cada experimento se obtuvieron, promediando cuatro lecturas distribuidas equidistantemente en la pieza de trabajo (ASME B46.1, 1995).

La **Figura 3-8** explica la lectura de rugosidad superficial en cada punto; la lectura se tomó en dirección paralela a la dirección de avance; el procedimiento adoptó un filtro de corte

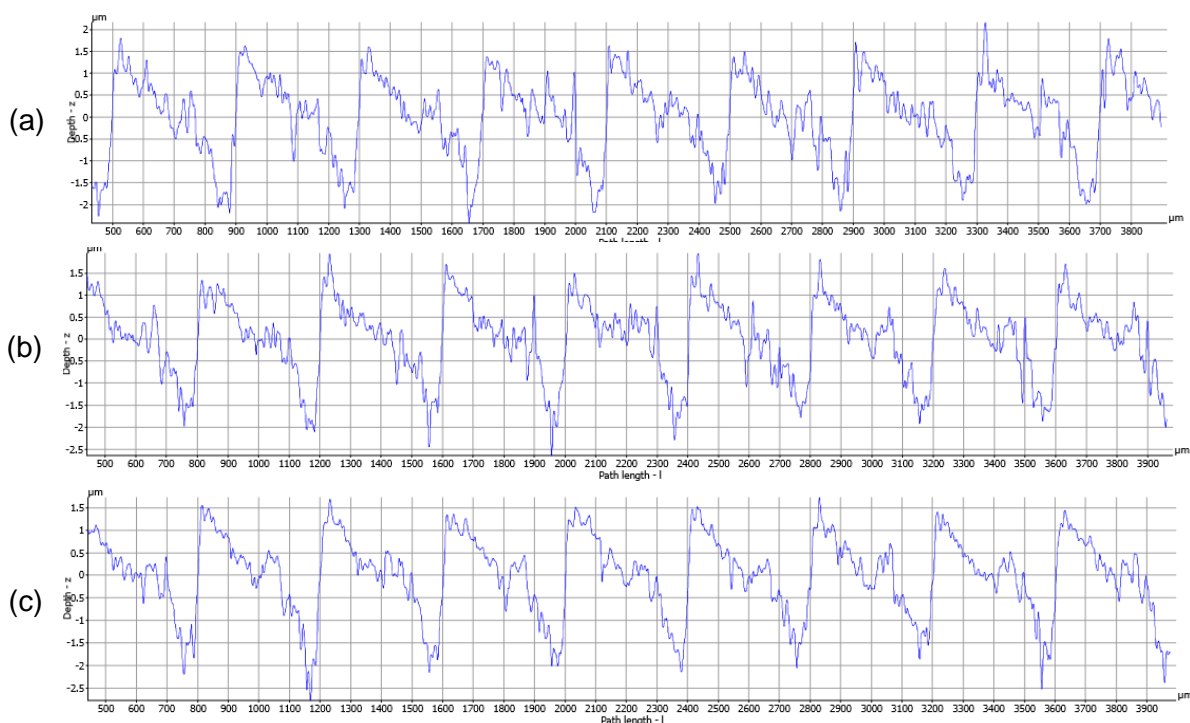
de tipo gaussiano, la longitud de corte fue de 0,8 mm, y la longitud de la muestra se ajustó a 4 mm (ISO 4288).

Figura 3-8: Diagrama Esquemático de la ubicación de los puntos de Medición de Rugosidad Superficial.



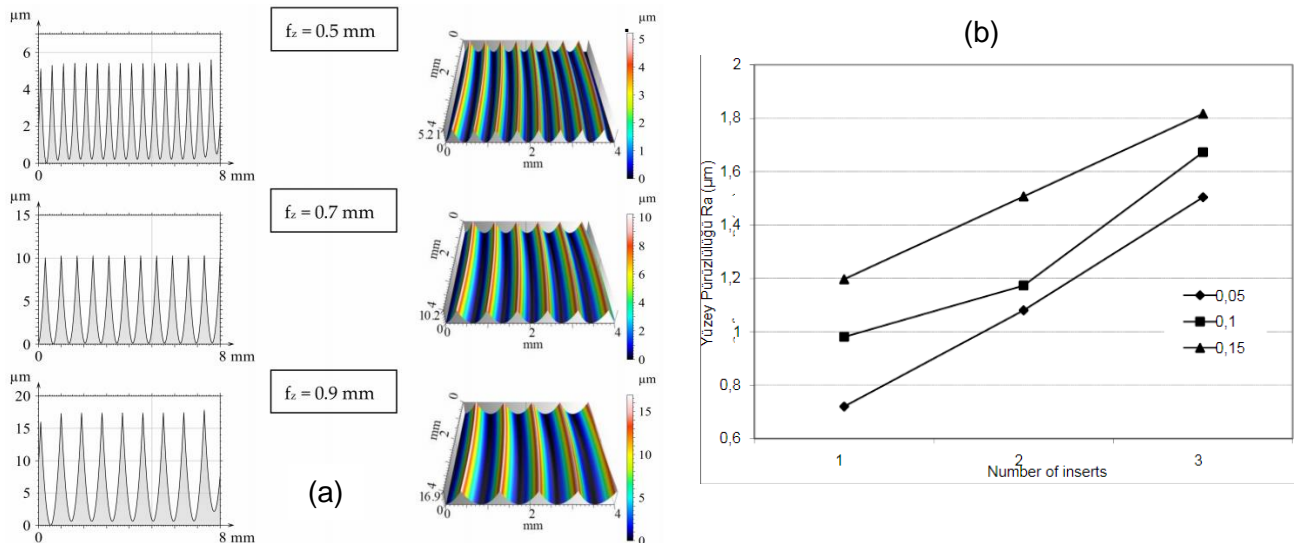
Los perfiles de rugosidad 2D obtenidos en las zonas representativa de la superficie maquinada para cada método de suministro de fluido de corte, se representan en la **Figura 3.9**, en el **Anexo C** se presenta los resultados obtenidos de las mediciones experimentales. Los parámetros de rugosidad mostrados en esta imagen, corresponden a los reportados por el equipo, bajo la norma ISO4287. Estos perfiles presentan un comportamiento simétrico entre los picos y los valles y no observa la presencia de picos y valles irregulares.

Figura 3-9: Ejemplos típicos de perfiles de rugosidad superficial 2D obtenidos, $L_c:0,8$ mm, longitud de la muestra 4mm, filtro: gaussiano (*high pass*). (a) chorro (b) interno a alta presión (c) seco.



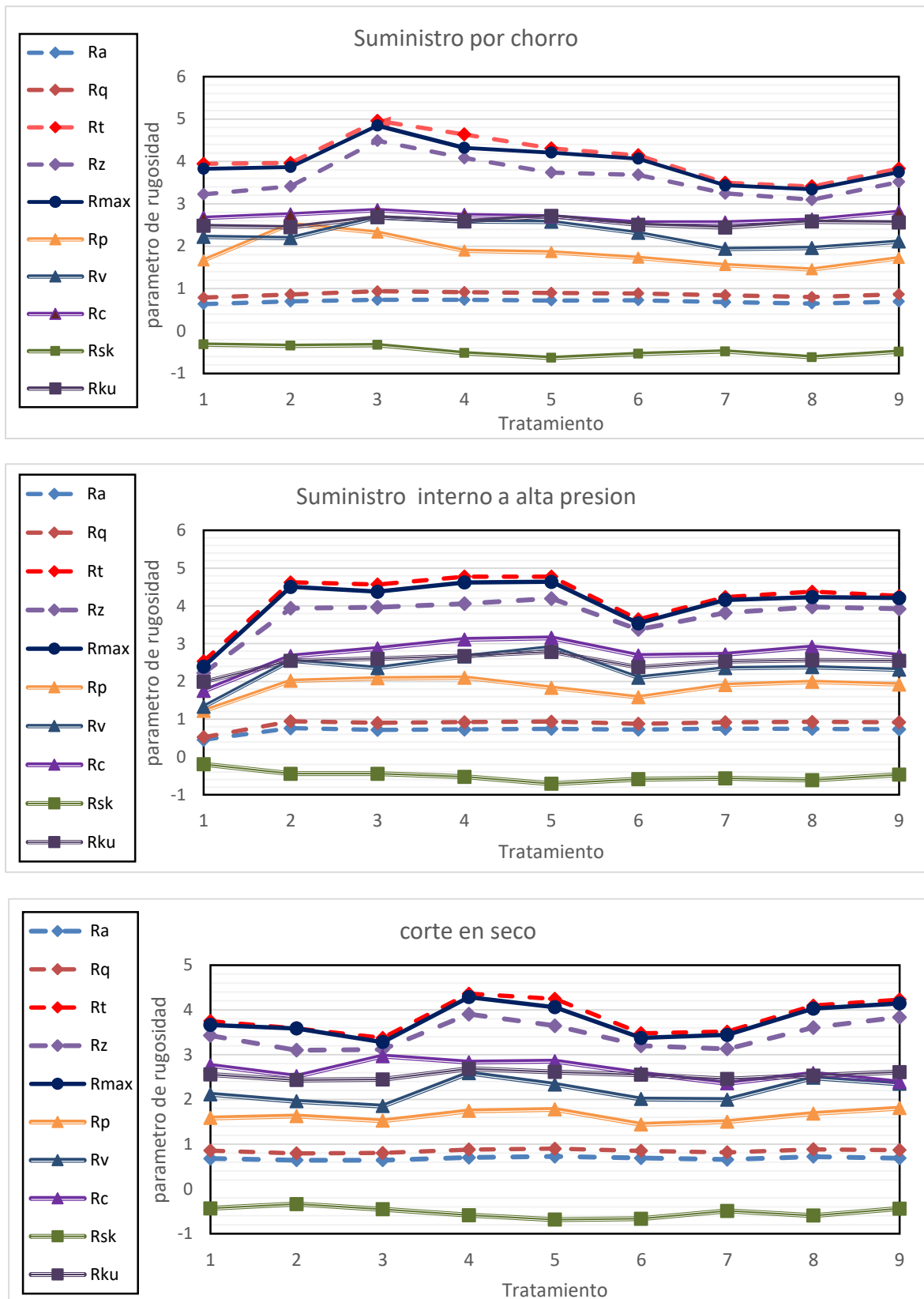
De acuerdo con el perfil de rugosidad 2D se observan varias características. En la longitud de corte (0.8 mm) se muestra un comportamiento periódico de la rugosidad superficial, por ejemplo, cada 400 micras se observan un comportamiento periódico del perfil de rugosidad entre picos y valles, sin entrar en detalle en los parámetros de rugosidad. Esta característica es resultado del avance por diente empleado (0.1 mm/diente) y el número de insertos de corte de la herramienta (cuatro). Esto indica que este parámetro posiblemente tiene mayor influencia en la rugosidad superficial en las condiciones de corte probadas. De acuerdo con Bernardos et al, mostraron experimentalmente como el avance (y la profundidad de corte), son los parámetros más relevantes en la rugosidad superficial para operaciones de fresado [4]. En **Figura 3-10** se muestra como el avance influye en la rugosidad ya que éste parámetro define la altura de la huella dejada por la herramienta, sobre el material de trabajo a través de la dirección del avance que la herramienta de corte realiza. A mayores avances, se genera una mayor huella sobre la superficie del material, lo que se traduce en una mayor rugosidad superficial, mientras que ésta se ve disminuida cuando disminuye el avance.

Figura 3-10: Influencia del avance sobre la rugosidad superficial, en el fresado frontal con insertos de punta esférica [86]. (a) influencia de parametro de avance por diente en la rugosidad superficial (b) influencia del numero de insertos en la rugosidad superficial.



Los resultados experimentales para todos los parámetros de rugosidad investigados, se graficaron en las **Figura 3-11**, las imágenes ilustran el comportamiento de cada parámetro de rugosidad para cada tratamiento sometido a un diferente método de suministro de fluido de corte. Se puede observar que los parámetros tienen un comportamiento normal y las lecturas no presentan grandes variaciones entre experimentos.

Figura 3-11: Variación experimental para los parámetros, a de los perfiles de rugosidad 2D.



En este sentido, se observa que algunos parámetros muestran mayor sensibilidad a las condiciones de corte propuestas, por ejemplo, los parámetros R_t , R_z y R_{max} son los que revelan cierta variación entre experimentos, por el contrario, los parámetros medios de rugosidad R_a y R_q muestran mínima sensibilidad a las variaciones entre los perfiles de rugosidad para cada experimento.

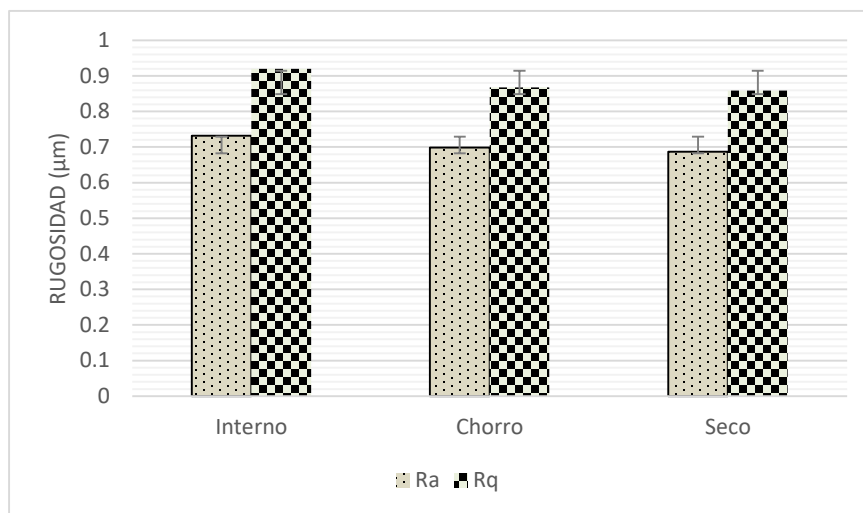
Previo al estudio del análisis estadístico de los valores obtenidos para todos los parámetros de rugosidad, primero fueron examinados y discutidos en un análisis semicuantitativo, este análisis tiene como objetivo estudiar las medias generales de cada parámetro de rugosidad para poder compáralos entre sí; a continuación, se procede con el análisis de comportamiento de cada parámetro de rugosidad de la superficie en general. Importa precisar que el orden de los experimentos fue de forma aleatoria siguiendo los principios del diseño experimental. Los valores medios resultantes para todos los parámetros de rugosidad superficial en el estudio, se presentan en la **Tabla 3.2**.

Tabla 3-2: Valores medios de la rugosidad superficial.

	método de suministro de fluido de corte		
	<i>Interno</i>	<i>Chorro</i>	<i>Seco</i>
Ra	0.731805	0.69859	0.686965
Rq	0.91961	0.867615	0.858725
Rt	4.37579	3.961175	3.749275
Rz	3.939955	3.517195	3.4277
Rmax	4.2328	3.869045	3.66469
Rp	1.91897	1.727875	1.628105
Rv	2.355225	2.22084	2.11425
Rc	2.718345	2.703735	2.585525
Rsk	-0.525115	-0.485935	-0.491145
Rku	2.54971	2.560455	2.55159

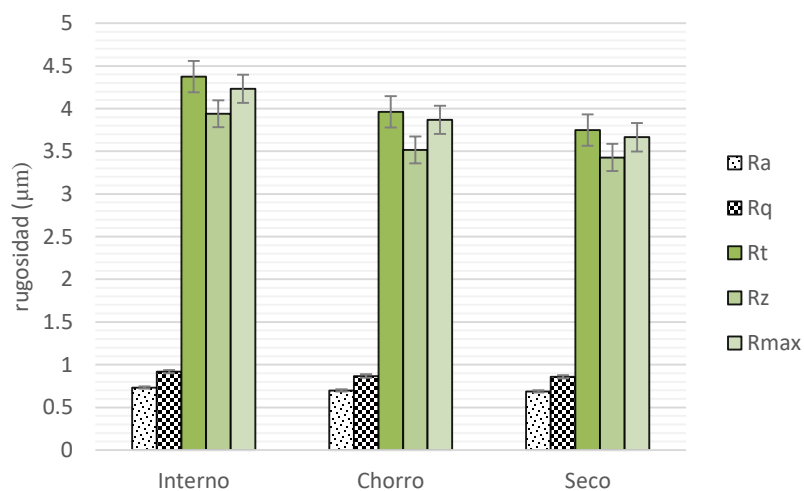
El comportamiento de los parámetros concurrentes en las **Figura 3-11**, se someten al análisis semicuantitativo de rugosidad por medio de la herramienta denominada "estadística descriptiva", (aplicación de hoja de cálculo de Excel). El procedimiento aplicado consiste en hallar la media general de cada parámetro de rugosidad. La **Figura 3-11** muestra los parámetros de rugosidad promedio para R_a y R_q ; a la vista se puede ver mínimas diferencias entre los 3 métodos de suministro de fluido de corte.

Figura 3-12: Comparación de los parámetros promedio de rugosidad, , influencia del método de suministro de fluido de corte que se utilice



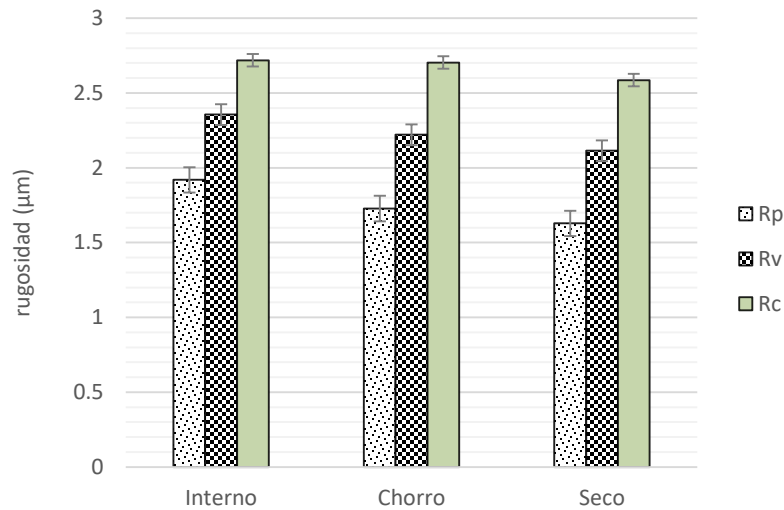
La **Figura 3-12** expone una comparación entre los parámetros de amplitud máximos y los parámetros promedio de rugosidad, en la gráfica se explica cómo los parámetros R_t , R_z , R_{max} muestran mayor sensibilidad con respecto al método de suministro empleado, a diferencia de los parámetros R_a y R_q , que exhiben un ligero cambio en las condiciones de corte probadas. Resultado que coinciden con los análisis obtenidos por Walid Jomaa [71] que realizó una comparación de siete (7) parámetros de rugosidad y encontró que los parámetros de mayor sensibilidad que presentan cambios en las condiciones de corte propuestas son R_t , R_z y R_{pm} .

Figura 3-13: Comparación de los parámetros de altura parámetros de amplitud máximos y los parámetros promedio de rugosidad



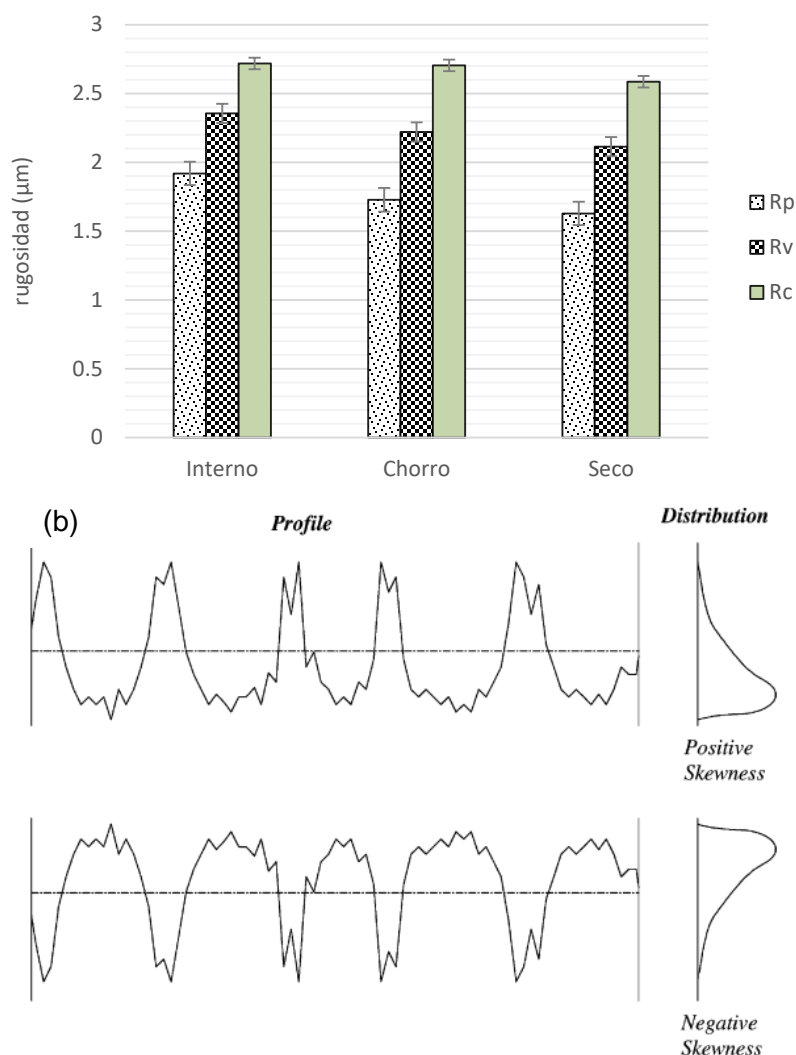
La **Figura 3-13** muestra los parámetros de amplitud R_p , R_v y R_c estos parámetros describen la altura del pico y el valle máximo en el perfil 2D, se puede ver que estos parámetros muestran pequeñas variaciones al cambio del método de suministro empleado. Se observa que la altura de los valles es mayor a la altura de los picos para cada método, lo que indica la presencia de cierto defecto superficial; el parámetro de rugosidad aumenta con el método de fluido de corte a alta presión y disminuye sin la presencia de fluido de corte.

Figura 3-14: Comparación de parámetros de amplitud



La **Figura 3.14** muestra los parámetros adimensionales de rugosidad. La asimetría (R_{sk}) fue negativa y osciló entre -0.52 y -0.49, lo que mostraría una simetría cercana a cero, esto indica que las alturas están distribuidas simétricamente alrededor de la línea media y, por lo tanto, los perfiles de la superficie fueron aleatorios, sin embargo, al observar la **figura 3-14 (B)**, un valor negativo muestra que la mayor parte del material está por debajo de la línea media, esto explica en el perfil la presencia de defectos como desgarros y rallones representado un sesgo negativo [87]. La curtosis R_{ku} se mantiene igual para los tres métodos y los valores registrados fueron inferiores a 3; la curva de distribución presenta comparativamente pocos picos altos y valles bajos.

Figura 3-15: (a) Comparación de parámetros de rugosidad estadísticos. (b) definición de la asimetría (R_{sk}) [88].



En los análisis gráficos, resalta el método de suministro interno a alta presión, debido a que es la técnica que presentó los mayores resultados en todos los parámetros de rugosidad estudiados, este resultado tiene correlación con el análisis topográfico de la superficie, **Apartado 3.1**, donde se logró evidenciar la presencia de diferentes defectos superficiales, en comparación, los parámetros R_t , R_z , R_p y R_c , descritos en el **apartado 1.5.1**, describen dentro del perfil la presencia de diferentes defectos superficiales tales como vacíos, desgarros o material adherido, tal y como los observados en las imágenes SEM, por tal motivo, este parámetro presenta los mayores valores en comparación a las otra técnicas de suministro empleadas.

De otro lado, los valores de rugosidad obtenidos de la muestra maquinada en seco son los menores, este resultado también tiene correlación con el análisis topográfico de la

superficie donde se observó una superficie más homogénea y con menor cantidad de defectos superficiales encantados.

3.2.1 Análisis de varianza

Para corroborar los resultados del análisis semicuantitativo de los parámetros de rugosidad superficial, se realizó un análisis de varianza con intervalos del 95% de confiabilidad, para conocer la variación de las medias de rugosidad entre los métodos de suministro de fluido de corte.

Se definió el modelo estadístico propuesto en el **apartado 2.1**, (Diseño experimental, orientado en examinar la rugosidad superficial como la variable respuesta del sistema); el modelo lineal planteado se muestra en la ecuación 3.1.

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ij} \text{ para } i = 1,2, \dots, 9 \text{ } j = 1,2,3 \quad (3.1)$$

μ : Media general del experimento

τ_i : Efecto producido por tratamiento i-ésimo.

β_j : Efecto producido por j-ésimo bloque.

ϵ_{ij} : Error experimental en el i-ésimo tratamiento y j-ésimo bloque.

La hipótesis de interés para cada uno de los parámetros de estudio será:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a \quad (3.2)$$

$$H_1: \text{Al menos un par de } \mu_i \neq \mu_j \text{ } \forall i \neq j \text{ con } i = 1,2, \dots, 9 \text{ } j = 1,2,3 \quad (3.3)$$

El análisis de varianza (ANOVA) se realizó a los factores más representativos usados en diferentes investigaciones, R_a y R_q , y a los valores que mostraron mayor sensibilidad al cambio del método de suministro de fluido de corte R_t , R_z , R_{max} .

La tabla ANOVA (**Tabla 3-3**) descompone la variabilidad de R_a en las contribuciones correspondientes a la aplicación de un método de suministro de fluido de corte. Los valores P verifican la significancia estadística del factor método de suministro. Puesto que los valores P de tratamiento y bloque están por encima del alpha: 0.05 se acepta la hipótesis nula que postula que la media de los valores de rugosidad R_a es estadísticamente igual. Este factor no tiene un efecto estadísticamente significativo sobre R_a con un nivel de significancia alfa de 5%.

Tabla 3-3: Tabla ANOVA. Análisis de Varianza para R_a .

Tabla de ANOVA						
F.D.V	GL	Sc	Cm	Fc	Fcritico	Pvalor
Tratamientos	8	0.040295	0.005037	1.597218	2.591096	0.202282
Bloque (método)	2	0.002442	0.001221	0.387115	3.633723	0.685203

Error	16	0.050456	0.003154
Total	26	0.093192	

A continuación, se realiza la validación de los supuestos estadísticos al modelo seleccionado sobre los residuales.

Los residuos constituyen la principal herramienta para el diagnóstico del modelo puesto que son los estimadores de las perturbaciones; al examinar las gráficas de residuos y otros estadísticos de diagnóstico se determina si el modelo es adecuado y si cumplen los supuestos de la regresión. Si el modelo no es adecuado, representará incorrectamente los datos.

Los supuestos plantean exigencias acerca de los términos de error aleatorio y se pueden identificar como:

- a) Independencia entre términos de error aleatorio.
- b) Distribución normal de los términos de error aleatorio, con expectación cero.
- c) Varianza de los términos de error constante para todo i, j (homogeneidad de varianzas). Este punto supone que la variabilidad de las observaciones bajo los distintos tratamientos es la misma o no difiere significativamente.

Como es sabido, las formas gráficas y las medidas descriptivas, son los métodos tradicionalmente usados para detectar problemas en la validez de los supuestos del modelo lineal planteado.

Se procedió a realizar el análisis estadístico a los demás parámetros de forma similar al parámetro R_a y a verificar los supuestos de normalidad, homogeneidad de varianza en los residuales, se empleó algunas gráficas descriptivas y pruebas estadísticas como el test de Shapiro Wilk y el test de Barlett. Estos resultados y su correspondiente análisis son presentados en el **Anexo D**: Análisis de varianza y validación de supuestos.

Este procedimiento de verificación llevado a cabo a los parámetros R_a, R_q, R_t, R_z y R_{max} dio como resultado la validación de estos. mediante este procedimiento se confirmó la validación y correcto manejo de los datos durante el experimento, confirmando la idoneidad del modelo estadístico utilizado. En consecuencia, del análisis estadístico planteado se puede decir que al maquinar la aleación de aluminio 7075 empleado diferentes métodos de suministro de fluido de corte estadísticamente no hay diferencia entre métodos. Este resultado se puede explicar observando los valores obtenidos, al ser las diferencias tan pequeñas entre los resultados de rugosidad para cada método de suministro de fluido de corte el modelo estadístico seleccionado no tiene la suficiente potencia para detectar las variaciones entre experimentos.

3.3 Análisis de difracción de rayos X (DRX)

En este acápite se estudió experimentalmente el estado de fase y la respuesta de transformación de fase de la superficie y la subsuperficie de la aleación de aluminio 7075 maquinada. El análisis de difracción de rayos X (DRX-P) y la técnica de medición de esfuerzos residuales por DRX se utilizaron para medir el estado de fase y la respuesta de transformación de las muestras mecanizadas y los esfuerzos residuales superficiales inducidos por el método de suministro de fluido de corte.

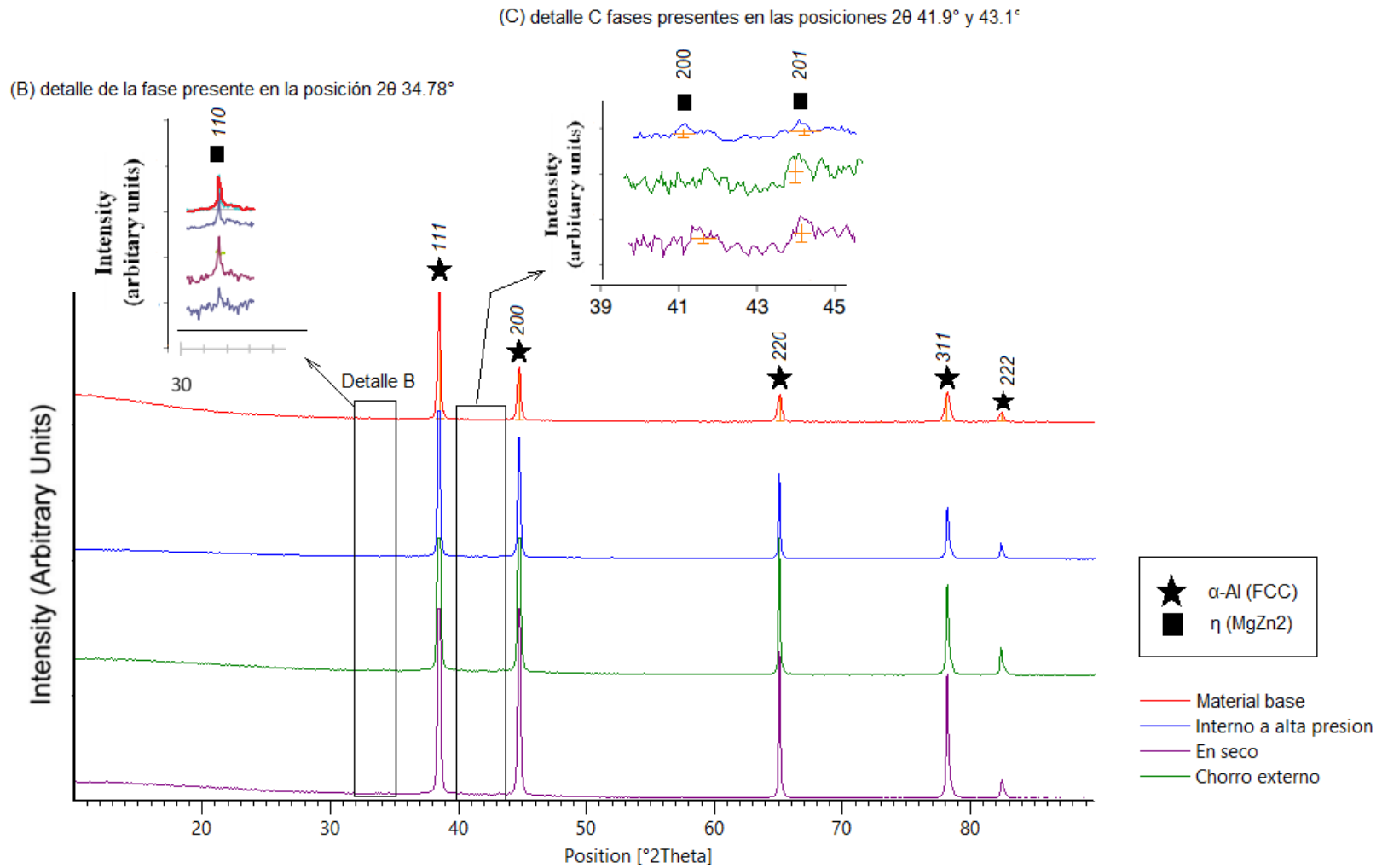
3.3.1 Difracción de rayos X (DRX) y análisis de transformación de fases

Un medio importante para alterar la respuesta mecánica de los metales es la transformación de fase [89]. La transformación inducida por la deformación es de particular interés ya que proporciona un medio para desarrollar combinaciones excepcionalmente útiles de resistencia y ductilidad [90]. Field et al [42] consideraron la transformación de fase como una de las características de integridad de la superficie resultante del proceso de maquinado. En diferentes estudios e investigaciones sobre maquinado, la transformación de fase se ha considerado como uno de los fenómenos importantes que resultan en cambios microestructurales en la superficie y en la subsuperficie del material de trabajo [91].

El análisis de fases a las muestras maquinadas empleado diferentes técnicas de suministro de fluido de corte fue realizado mediante un análisis de difracción de rayos X en configuración Bragg-Brentano, donde se empleó como fuente de radiación un tubo de cobre con una radiación Cu-K α ($\lambda = 1.54184 \text{ \AA}$, K α_1 / K $\alpha_2 = 0.5$) desde una fuente operada a 40 kV y 40 mA. Las muestras se barrieron entre la posición 2θ 0° y 90° con tamaño de paso de 0.01° y tiempo de conteo de 0.25 s por paso. La identificación de fases se realizó empleado el software "HighScore Plus" en donde se ejecutó la búsqueda de picos y la comparación contra las bases de datos PDF (Power Diffraction Files) en donde se identificaron las fases presentes en las muestras maquinadas y el material en bruto.

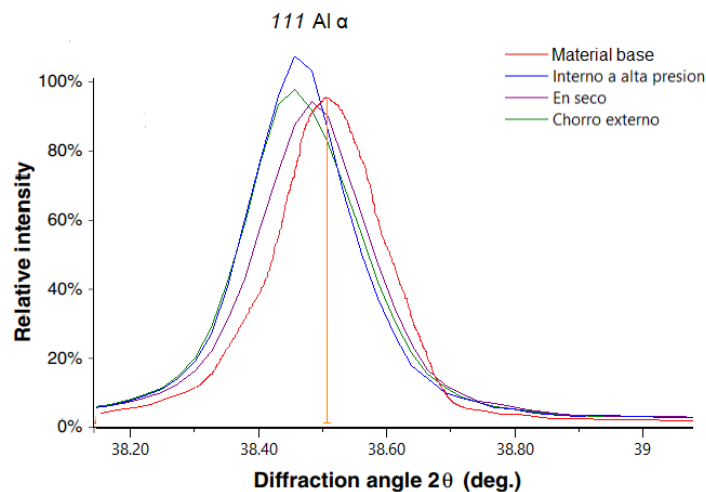
La Figura 3-17, muestra los difractogramas obtenidos de las 3 muestras maquinadas empleado las diferentes técnicas de suministro de fluido de corte y del material base, se observa que las muestras presentan las mismas reflexiones o picos, donde las fases halladas corresponden a una fase de aluminio α (Al α) referentes a los picos de mayor intensidad, y una fase η (MgZn $_2$) pertenecientes a las reflexiones de menor intensidad mostrados en detalle en **las Figuras 3-17 (B) y (C)**.

Figura 3-16: difractogramas de las muestras maquinadas, Análisis de fases.



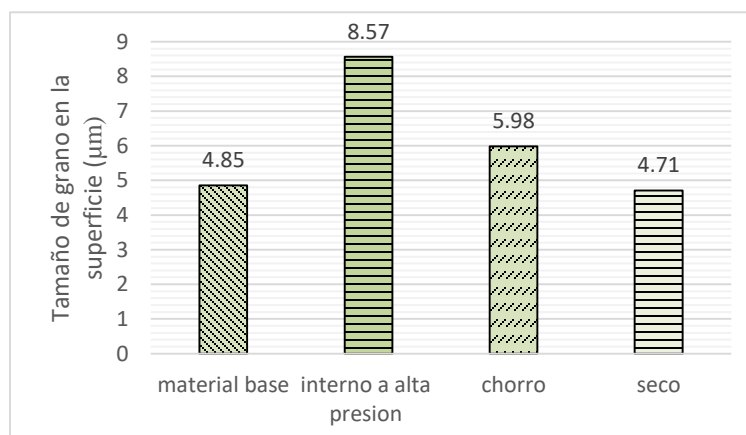
No obstante, estos resultados revelan una característica y es el valor de las intensidades de los picos que presentó cada muestra, para estudiar este fenómeno las investigaciones sugieren estudiar los picos principales entre los ángulos de 2θ comprendidos entre 20° y 70° , el pico principal corresponde a la fase de Al α (111) en el ángulo de 2θ 38.51° , **Figura 3-18**.

Figura 3-17: difractogramas DRX de la muestras maquinadas, en el pico principal Al α (111).



Como se puede observar en la **Figura 3-18**, las reflexiones del pico principal de cada muestra presentan diferencias entre sí con respecto a la intensidad y ancho del pico, de acuerdo con Herbert et al [92] estas diferencias son causadas por el tamaño de grano. Los efectos del tamaño de grano pueden apreciarse en los difractogramas, según la ecuación de Scherrer, el ancho del pico se puede relacionar con los tamaños de grano; si la muestra desarrolla tamaños de grano más grandes, es posible que en el difractograma tenga un pico menos ancho [93]. Siendo así, se procedió a realizar la medición del tamaño de grano de forma indirecta mediante las mediciones de difracción de rayos X, el cálculo se realizó en el software "HighScore Plus" empleado la ecuación de Scherrer y el refinamiento de los datos experimentales. Cabe aclarar que esta medición es una aproximación del tamaño real debido a los múltiples factores que afecta la medición por este método como la incertidumbre experimental [94].

Figura 3-18: comparación del tamaño de grano inferido por DRX en las muestras maquinadas empleado diferentes condiciones de suministro de fluido de corte



De acuerdo con la **Figura 3-19**, la muestra maquinada empleando el método de suministro interno a alta presión mostro un tamaño de grano mayor con respecto al material base, de otro lado, las muestras maquinada empleado el método de suministro por choro externo desarrollo un tamaño de grano un poco mayor con respecto al material base, en contraste, la muestra maquinada sin la presencia de fluido de corte mostro un tamaño de grano menor con respecto al material base. Los cambios de tamaño de grano tienen origen en la reducción mecánica de los granos provocada por la severa deformación plástica, los efectos mecánicos y térmicos del proceso de maquinado [95]. Como se observa en la Figura, todas las muestras presentaron cambio con respecto a el tamaño de grano, lo que indicaría que durante el maquinado ocurre una recrystalización en la superficie maquinada debido a la disolución de los granos y a la re-precipitación causada por el enfriamiento [96].

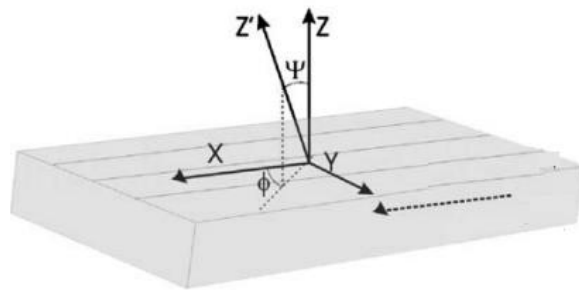
Aunque el aspecto mecánico del proceso de maquinado (tensión y velocidad de deformación) podría ser la fuerza motriz dominante de los cambios microestructurales en la superficie, la temperatura podría afectar inevitablemente la microestructura en la superficie maquinada dependiendo de la técnica de suministro de fluido de corte empleada. Por lo tanto, en algunos procesos termomecánicos, se observa crecimiento de grano. Estudios recientes destacaron este hecho a través de la investigación del crecimiento del grano basado en difusión, generalmente considerado como un fenómeno activado térmicamente [97]. Como se observó, las técnicas de suministro que emplean fluido de corte la carga termomecánica es eliminada debido al efecto refrigerante, por tanto, el efecto mecánico es dominante, esto mostraría, que durante el maquinado empleando el método de suministro interno a alta presión probablemente se tiene mayor deformación de la superficie maquinada generando granos alargados, aparentemente de mayor tamaño. De otro lado, cuando la aleación de aluminio 7075 es maquinado sin fluido de corte, existe un efecto mecánico y térmico, debido al calor generado durante el proceso de maquinado la pieza de trabajo absorbe calor debido a su alto nivel de conductividad térmica, en consecuencia, probablemente la temperatura alcanzada durante el proceso ocasiona la recrystalización dinámica en la superficie del material, esto se puede atribuir a la buena conductividad térmica del aluminio, en consecuencia, el gradiente de temperatura sería estable, por lo que se generan condiciones óptimas que ayuda a generar tamaños de granos en la superficie de menor tamaño después de la fase de recrystalización que el tamaño de grano inicial.

3.3.2 Medición de esfuerzos residuales

Esta sección se centra en el efecto de la técnica de suministro de fluido de corte sobre la distribución de las tensiones residuales superficial en el maquinado de la aleación aluminio 7075.

Se empleó la técnica de difracción de rayos X y el método clásico $\sin^2\Psi$ para la medición de los esfuerzos residuales superficiales. En este procedimiento se decidió realizar las mediciones en la dirección paralela a la dirección de avance. El sistema coordenado asumido se muestra en la **Figura 3-19**, El eje X se coloca longitudinalmente en la dirección de avance en el plano de la superficie, el eje Y está en la dirección transversal a la dirección de avance y el eje Z es vertical al plano de la muestra. La profundidad de atenuación del haz del rayo-X de laboratorio en un metal o aleación suele ser del orden de unos pocos micrómetros. Por ejemplo, el 66% de absorción de $\text{CuK}\alpha$ en esta aleación de aluminio 7075 se produce por debajo de una profundidad de $10\ \mu\text{m}$ para el plano reticular 333 en aluminio con tubo de Cu [98]. Dado que el volumen analizado corresponde a una capa superficial definida por el área irradiada y la profundidad de penetración, la técnica $\sin^2\psi$ supone que la superficie está en un estado de esfuerzo biaxial con esfuerzo cortante.

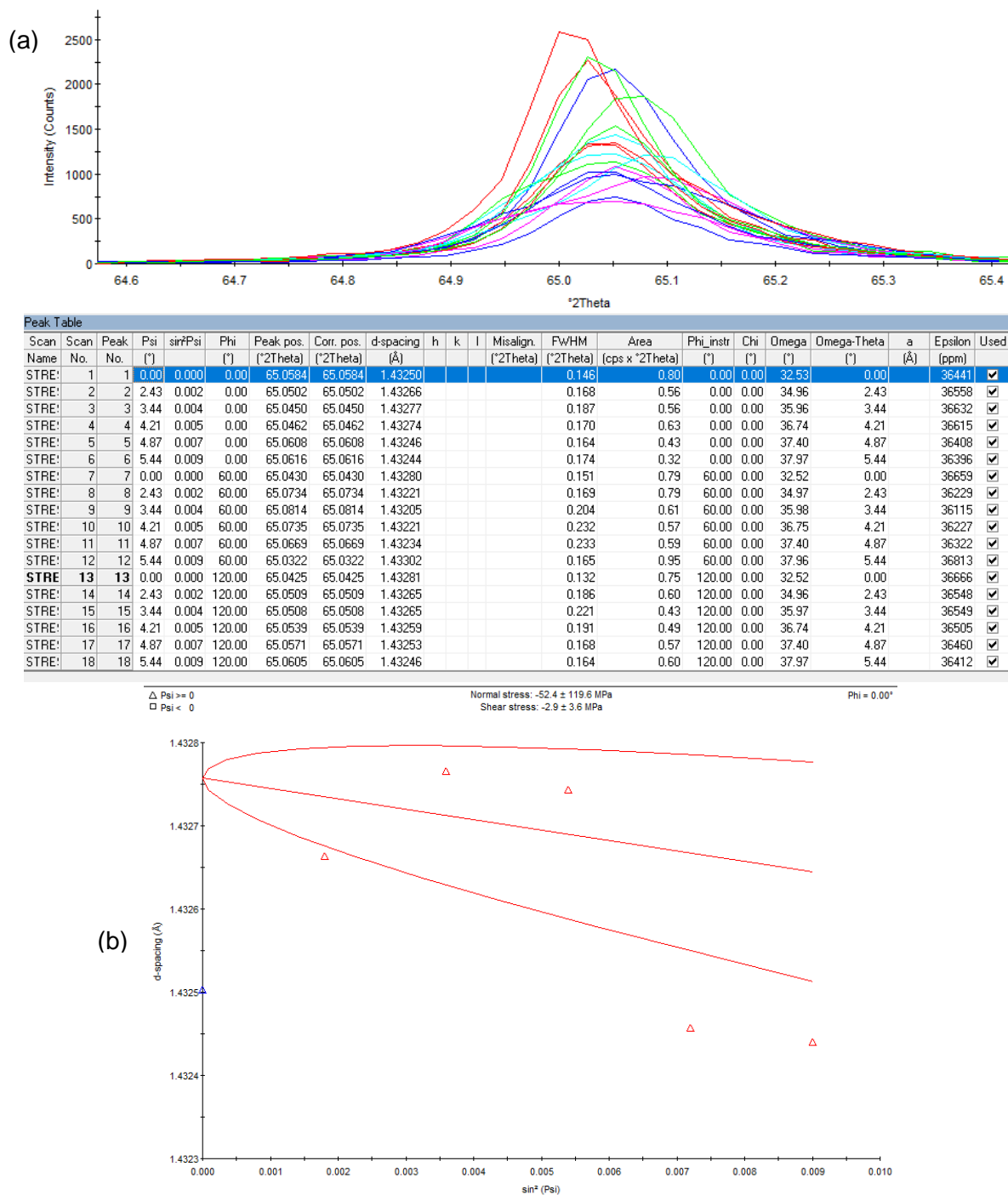
Figura 3-19: esquema de la geometría de las muestras maquinadas durante la medición de esfuerzo residuales. Definición del sistema de ejes de referencia.



La medición se llevó a cabo en el pico $\text{N}^\circ 7$ (ángulo 2θ : 65° , $\text{hkl } 220$) $\alpha\text{-Al}$. Por lo tanto, se realizó la medición entre las posiciones de 2θ de 64.50° y 65.58° , utilizando seis (6) ángulos Ψ (Psi) y tres (3) ángulos Φ (phi) = 0° , 60° , 120° , el tamaño de paso fue de 0.1° y 20 segundos. Para los cálculos se emplearon 2 propiedades del material como el módulo de Young de $E = 71,1\ \text{MPa}$ y la relación de Poisson $\nu = 0,33$

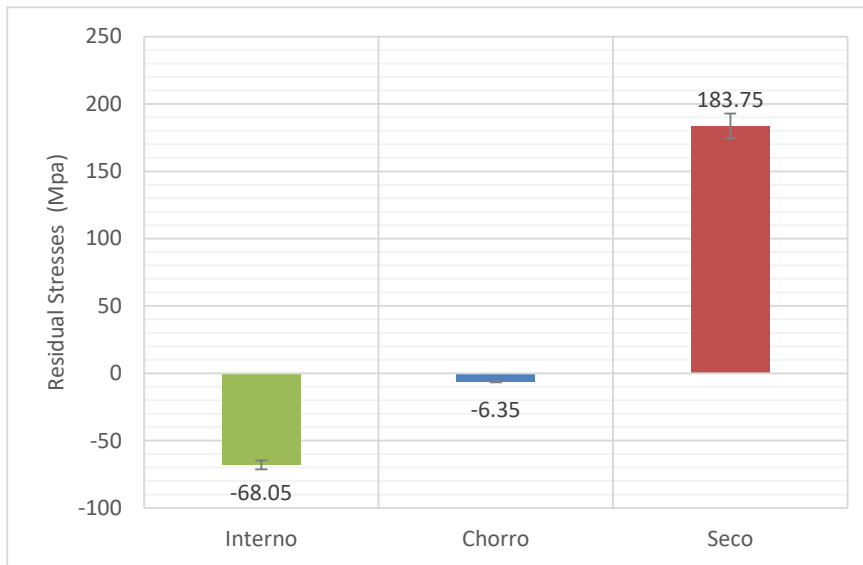
Los resultados obtenidos durante la medición son presentados en el Anexo E: Esfuerzos Residuales. En la **Figura 3-20** se muestra alguno de los resultados obtenidos, se realizó un total de dieciocho (18) mediciones por posición en cada muestra. Además, se muestra la gráfica d vs. $\sin^2\psi$ a lo largo de las líneas de $250\ \text{nm}$ de ancho. Los triángulos (Δ) representan los 6 ángulos Ψ (Psi) en la gráfica.

Figura 3-20: Patrones de difracción en las posiciones de 2θ de 64.50° y 65.58° . (a) patrones de difracción y tabla describirían de los ángulos (b) grafica de d vs $\sin^2\psi$ obtenidos para la muestra maquinada por el método de suministro por chorro.



Las tensiones residuales de la superficie maquinada a lo largo de la dirección de avance y bajo diferentes condiciones de fluido de corte se muestran en la **Figura 3-21**. Se analizaron 2 posiciones diferentes en cada muestra.

Figura 3-21: esfuerzos residuales en maquinado debidas al efecto de la técnica de suministro de fluido de corte.



La muestra maquinada empleado el método de suministro interno a través de la herramienta presentó un esfuerzo residual a compresión, tal y como se ha discutido en diferentes investigaciones [99]. Por otro lado, la muestra maquinada empleando el método de suministro por chorro presentó un esfuerzo residual a compresión muy bajo, cercano a 0. Por último, la muestra maquina en seco presentó un esfuerzo residual a tensión, no deseable en componentes maquinados. Cabe destacar, que las muestras que fueron maquinadas con fluido de corte son la que presentaron esfuerzos a compresión.

Los resultados obtenidos tienen explicación en la manera como son generados los esfuerzos residuales en maquinado. según Griffins [2] uno de los mecanismos de generación de esfuerzos residuales es el mecanismo de deformación plástica y térmica, De acuerdo con la mecánica de corte, cuando la herramienta pasa, genera un esfuerzo normal aplicado sobre la superficie del material, adicionalmente, en la acción de corte un volumen de material deformado se extiende, durante la formación de viruta, debido a las restricciones de la masa, estas inducen tensiones en la superficie del material. Por otra parte, la fricción y cizallamiento de las virutas genera un aumento de la temperatura, causando esfuerzos residuales [100].

Dicho lo anterior, se entiende que las muestras maquinadas empleando las técnicas con fluido de corte tienden a desarrollar esfuerzos compresivos, debido a la disminución del

gradiente temperatura en la interfase de corte gracias al efecto lubricante que disminuye la fricción, debido a la eliminación del efecto térmico, la superficie maquinada desarrolla esfuerzos residuales a compresión debido al efecto térmico limitado y al efecto mecánico dominante [101]. De otra parte. La muestra maquinada en seco, desarrollo esfuerzos residuales a tensión debido a al efecto mecánico y térmico, de acuerdo a Gunnberg et al. [102] el calor en la interfase de corte causa la expansión de la capa superficial que se equilibra mediante el flujo plástico, cuando el calor es retirado, esta capa se contrae, dando como resultado un esfuerzo residual a tensión.

4. Conclusiones

Con base en los resultados para las condiciones particulares de los experimentos realizados en el presente trabajo se concluye con respecto al efecto del método de suministro de fluido de corte en la integridad de superficie en el proceso de fresado frontal de la aleación de aluminio 7075 lo siguiente:

En la caracterización superficial los defectos hallados fueron: grietas, desgarros, vacíos, material adherido y deformación plástica. En los análisis realizados a las imágenes de microscopia electrónica de barrido, se identificó la presencia de partículas duras sobre la superficie maquinada, estas partículas presentes en la matriz del material, generan los defectos anteriormente nombrados en todas las superficies, independientemente del método empleado durante el proceso de maquinado.

Como resultado de estos análisis topográficos, se distinguió en la superficie maquinada bajo el método de suministro interno a alta presión, una relación entre los defectos de material adherido y desgarros que tienen como característica la proximidad entre estos, esta característica surge por la combinación de dos factores. El primer factor ha sido un tema de estudio en diferentes investigaciones, las cuales apuntan que este método de suministro de fluido de corte pierde eficacia al emplear velocidades de corte altas, en consecuencia, ante la imposibilidad de evacuar adecuadamente el calor generado, propicia la formación de BUE o de BUL, provocando la adherencia de material sobre la superficie maquinada y desgarros de material adherido y luego removido.

La muestra maquinada en seco presentó algunos defectos como: desgarros, vacíos y deformación plástica. La topografía superficial obtenida sin la presencia de fluido de corte tiene origen de la siguiente forma: durante el proceso de maquinado en seco el gradiente de temperatura es mínimo, la temperatura global es elevada pero estable dada la buena conductividad térmica del aluminio, en consecuencia, se producen condiciones de fricción adecuadas en la interfaz de corte entre la herramienta y la viruta, lo que no produciría la formación de material adherido a la superficie.

Los defectos observados en la superficie maquinada empleado el método de suministro externo por chorro, fueron los desgarros, rayones, deformación plástica y material adherido. En esta superficie se encontraron una combinación de los defectos observados

en la superficie en seco y en la superficie maquinada empleado fluido interno a alta presión. En particular se observaron los desgarros acompañados de material adherido y material deformado, similar a los defectos observados en la superficie maquinada empleando método de alta presión. Al parecer con este método de suministro se genera una combinación de los factores que provocan los defectos en las dos técnicas de suministro en seco e interna a alta presión. Como se ha reportado en varios estudios, este tipo de método de suministro de fluido ha resultado poco efectivo, debido a cuando el fluido de corte entra en contacto en la interfase de corte este se evapora originando fluctuaciones de la temperatura, además, los fluidos tienden a enfriar solo las áreas circundantes que antes eran cálidas intensificando las tensiones térmicas.

En el análisis de rugosidad se consideraron 10 parámetros de rugosidad (R_a , R_q , R_t , R_z , R_{max} , R_v , R_p , R_c , R_{sk} , R_{ku}). en los resultados experimentales, se observó en los perfiles de rugosidad 2D medidos en la dirección paralela a la dirección de avance un comportamiento periódico de la rugosidad superficial, por ejemplo, cada 400 micras se observan un comportamiento periódico del perfil de rugosidad entre picos y valles. Es característica es impórtela, por ejemplo, indica que este parámetro posiblemente tiene mayor influencia en la rugosidad superficial en las condiciones de corte probadas. De acuerdo a algunas investigaciones se ha mostrado experimentalmente como el avance (y la profundidad de corte), son los parámetros más relevantes en la rugosidad superficial para operaciones de fresado.

Con el fin de realizar un estudio más amplio para caracterizar las superficies maquinadas. Inicialmente, se desarrolló un análisis comparativo, con el objeto de observar el comportamiento de las medias generales de cada parámetro de rugosidad y compáralos entre sí. Este análisis arrojó como mayor particularidad la capacidad de algunos de los parámetros de rugosidad para detectar dentro del perfil de rugosidad 2D alguno de los defectos vistos en los análisis morfológicos.

En ese mismo sentido, se realizó el análisis cuantitativo estadístico o análisis de varianza, para estudiar los parámetros de rugosidad bajo el modelo estadístico seleccionado. En este análisis se pudo concluir que al maquinar la aleación de aluminio 7075 bajo los tres métodos de suministro de fluido de corte estudiados, estadísticamente los parámetros de rugosidad son iguales. Para confirmar este hallazgo, se realizó la validación de los supuestos estadísticos lo cual arrojó como resultado la validación de estos, confirmando la idoneidad del modelo seleccionado. En efecto, este resultado se puede explicar observando los valores de rugosidad obtenidos, tal como se observa, los valores presentan pequeñas diferencias entre los resultados de rugosidad para cada método de suministro de fluido de corte, como consecuencia de esto, el modelo estadístico no tiene la suficiente potencia para detectar las variaciones entre experimentos.

El análisis semicuantitativo de fases a partir de los resultados DRX, se observó que los tres métodos de suministro de fluido de corte no ocasionan cambios en las fases presentes en la subsuperficie del material, sin embargo, se observó cambios en la microestructura superficial a partir del análisis de los picos principales de las muestras maquinadas, se

observó cambios en las intensidades o alturas de los picos y en los anchos de estos. Diferentes investigaciones señalan que estos cambios en las reflexiones de los picos en los difractograma son causados debido variaciones en el tamaño de grano. Dichas variaciones se deben posiblemente a la deformación direccional se la superficie maquinada (aumento) en el caso del maquinado empleado los métodos con fluido de corte. En el caso del maquinado en seco se presenta posiblemente recristalización, por temperatura, originado tamaños de grano similares al material base.

Para la medición de los esfuerzos residuales en la subsuperficie del material se utilizó la técnica DRX-P. se logró observar en este análisis que la técnica de suministro de fluido de corte tiene influencia sobre los esfuerzos residuales en la superficie maquinada. Se observó que las muestras maquinadas empleando fluido de corte por chorro externo o a alta presión presentaron esfuerzos compresivos, esto se puede atribuir al efecto de lubricación el cual disminuye las tensiones provocadas por el maquinado. De otro lado, la muestra maquinada en seco presentó esfuerzos residuales de tensión. Tal y como se constató en la literatura examinada, el maquinado en seco tiende a desarrollar esfuerzos residuales a tensión debido a la fricción. Adicionalmente, en las imágenes SEM se observó material deformado, la presencia de este defecto señala que la superficie presenta endurecimiento por deformación en la capa superficial, induciendo los esfuerzos residuales a tensión.

El análisis semicuantitativo de fases a partir de los resultados DRX, se observó que los tres métodos de suministro de fluido de corte no ocasionan cambios en las fases presentes en la subsuperficie del material, sin embargo, se observó cambios en la microestructura superficial a partir del análisis de los picos principales de las muestras maquinadas, se observó cambios en las intensidades o alturas de los picos y en los anchos de estos. Diferentes investigaciones señalan que estos cambios en las reflexiones de los picos en los difractograma son causados debido variaciones en el tamaño de grano. Dichas variaciones se deben posiblemente a la deformación direccional se la superficie maquinada (aumento) en el caso del maquinado empleado los métodos con fluido de corte. En el caso del maquinado en seco se presenta posiblemente recristalización, por temperatura, originado tamaños de grano similares al material base.

4.1 Recomendaciones para trabajos futuros

Para la construcción y realización de trabajos futuros e investigaciones que permitan desarrollar un conocimiento completo e integral acerca de la integridad de superficie en las aleaciones de aluminio o en diferentes tipos de materiales, se presenta a continuación, algunas sugerencias y recomendaciones que permitan y consoliden la construcción de bibliografía especializada en este tema:

Se recomienda durante el proceso de ejecución experimental, tener un control mayor acerca de variables no controladas en este experimento, como, por ejemplo, las vibraciones y el control del filo de corte de los insertos durante el experimento. Con el fin, de tener mayor control local sobre las fuentes de variación en el experimento.

Se recomienda realizar un estudio multifactorial en donde se incluyan los demás factores que están involucrados dentro del proceso de maquinado, como son: velocidad de corte, velocidad de avance, profundidad de corte además del método de suministro de fluido de corte con el fin de encontrar la combinación de factores óptimos.

Se recomienda caracterizar la presencia de carburos sobre la superficie y un estudio de cómo se generan estos carburos. También, se recomienda comprobar la eficiencia del método de suministro interno a alta presión, como se mostró este método que no ofrece las mejores condiciones para el maquinado de la aleación de aluminio 7075, por tal motivo se plantea la investigación en otros materiales de difícil maquinado.

En cuanto a la caracterización por medio de difracción de rayos-X, se recomienda que, durante el análisis a la materia prima o material en bruto, encontrar una forma óptima de extracción de esta para el análisis semi-cuantitativo de fases. En esta investigación se empleó la extracción del material por medio de virutas de un proceso de maquinado y se trituró para obtener un polvo empleado para el análisis de fases. Sin embargo, este procedimiento ocasiona lecturas erróneas debido a la inducción de deformaciones a la estructura del material. Se recomienda un estudio sobre la forma de extracción óptima de esta para un análisis adecuado.

Por último, se recomienda realizar un estudio de integridad superficial que incluya el método MQL.

Bibliografía

- [1] Javidi A., Rieger U., Eichseder W. The effect of machining on the surface integrity and fatigue life. *International Journal of Fatigue*, 30: pp. 2050-2055, 2008.
- [2] Griffiths, B. *Manufacturing surface technology – Surface integrity and functional performance*. Taylor and Francis Books, pp 1-67, 2001.
- [3] Davim P. *Surface Integrity in Machining*, Springer, 2010, Portugal.
- [4] Bernardos PG, Vosniakos GC. Predicting surface roughness in machining: a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 43 pp. 833–844, 2003.
- [5] Inasaki, I., Sutherland, J.W. and Wakabayashi, T. Dry machining and minimum quantity lubrication,” *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 53(2): pp. 511-537, 2004.
- [6] Fuh KH, Chang HY. An accuracy model for the peripheral milling of aluminum alloys using response surface design. *Journal of Materials Processing Technology*, 72(1): pp. 42–47, 1997.
- [7] Axinte, D.A., Belluco, W. and De Chiffre, L. Reliable tool life measurements in turning — an application to cutting fluid efficiency evaluation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41 (7), pp. 1003-1014, 2001.
- [8] Cock T. *Aluminum—a light metal: a brief introduction to aluminum*. European Aluminum Association (1999), Oslo, Noruega.
- [9] Demir H, Gündüz S. The effects of aging on machinability of 6061 aluminium alloy. *J Materials & Design*, 30(5): pp.1480–1483, 2009.
- [10] Huda Z, Taib NI, Zaharinie T. Characterization of 2024- T3: an aerospace aluminum alloy. *Mater Chem Phys*, 113(2–3): pp. 515–517, 2009.

- [11] Hatch JE. Aluminum: properties and physical metallurgy. American Society for Metals, 6 pp. 424, 1984.
- [12] Gangopadhyay, S., Acharya, R., Chattopadhyay, A.K., Effect of cutting speed and surface chemistry of cutting tools on the formation of BUL or BUE and surface quality of the generated surface in dry turning of AA6005 aluminium alloy. Journal of Mechanical Science and Technology. 14 pp. 208–223, 2010.
- [13] Trent E.M, Wright P.K. Metal cutting, Butterworth–Heinemann, 4 (9) pp. 439.
- [14] Kannan S, Kishawy H.A. Tribological aspects of machining aluminium metal matrix composites. Journal of Materials Processing Technology, 198(1–3) pp. 399–406, 2008.
- [15] Ozcatalba Y. Chip and built-up edge formation in the machining of in situ Al₄C₃–Al, composite. J Materials & Design, 24(3) pp.215–221, 2003.
- [16] Roy P, Sarangi SK, Ghosh A. Machinability study of pure aluminum and Al–12% Si alloys against uncoated and coated carbide inserts. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 27(3) pp. 535–544, 2009.
- [17] Yousefi R, Ichida Y. A study on ultra–high-speed cutting of aluminium alloy: formation of welded metal on the secondary cutting edge of the tool and its effects on the quality of finished surface. Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 24(4) pp. 371–376, 2000.
- [18] Mondal C, Mukhopadhyay AK. On the nature of T (Al₂Mg₃Zn₃) and S(Al₂CuMg) phases present in as-cast and annealed 7055 aluminum alloy. Materials Science and Engineering, A 391 pp.367– 376, 2005.
- [19] ALUMINUM ASSOCIATION, et al. Aluminum: properties and physical metallurgy. ASM International, 1984.
- [20] Kuram E. Ozcelik B. Demirbas E. Environmentally friendly machining: Vegetable based cutting fluids. In Green Manufacturing Processes and Systems; Davim, J.P. Ed.; Springer: Berlin, Germany, 2013; 23–47.
- [21] Sreejith P.S. Machining of 6061 aluminum alloy with MQL, dry and flooded lubricant conditions. Materials Letters, 62(2) pp.276–278, 2008.
- [22] Rao, D.N. Srikant, R.R. Influence of emulsifier content on cutting fluid properties. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 220 pp.1803–1806, 2006.
- [23] Jayal A.D, Balaji A.K, Gaul A. Machining performance and health effects of cutting fluid application in drilling of A390.0 cast aluminum alloy. Journal of Materials Processing and Manufacturing Science, 9(2) pp137–146, 2007.

- [24] Machado A. R, Wallbank J. The effect of extremely low lubricant volumes in machining. *Wear*, 210(2) pp. 76–82, 1997.
- [25] [1] Kress. D.. 1974: Reiben mit hohen Schnittgeschwindigkeiten. Dissertation Universitdt Stuttgart. 1974
- [26] Geoffrey Boothroyd, Winston A. Knight, *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, CRC Taylor & Francis, third ed, 2005.
- [27] Senthil Kumar A., Rahman M. Effect of High-Pressure Coolant on Machining Performance”, *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, 20 pp. 83–91, 2002.
- [28] Sandvik Coromant (2010), High pressure coolant machining, recuperado de: <https://www.metaalmagazine.nl/wp-content/uploads/2012/06/C-1040-091.pdf>
- [29] Inasaki, I., Sutherland, J.W. and Wakabayashi, T., 2004, “Dry machining and minimum quantity lubrication,” *Annals of the CIRP*, 53(2) pp. 511-537.
- [30] Baradie, M.A.E. Cutting fluid: Part-I characterization. *Journal of Materials Processing Technol.* 56, 786-797, 1996.
- [31] Tosun, N., Huseyinoglu, M., Effect of MQL on surface roughness in milling of AA7075-T6. *Journal of Materials Processing and Manufacturing Science*. 25 pp. 793-798, 2010.
- [32] Sreejith, P.S. and Ngoi, B.K.A. Dry machining: Machining of the future,” *Journal of Materials Processing Technology*. 101 pp. 287-291, 2000.
- [33] G. Byrne, E. Scholta, Environmentally clean machining processes Dry a strategic approach, *CIRP Annals Manufacturing Technology*. 42 (1) pp. 471-474, (1993).
- [34] R. Komanduri, J. Desai, *Tool Mater. Encyclopaedia Chem. Technol.* 23 (1983) 273-309.
- [35] Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J.W. Dry machining and minimum quantity lubrication,” *Annals of the CIRP*. 53(2) pp. 511-537, 2004.
- [36] Ulutan, D., Ozel, T., Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 51 (3) pp. 250–280, 2011.
- [37] El-Khabeery, M.M. and Bailey, J.A., Surface integrity in machining solution-treated and aged 2024-aluminum alloy, using natural and controlled contact length tools. Part I – Unlubricated conditions,” *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 106 pp. 152-160, 1984.

- [38] Sadat, A.B, Reddy, M.Y. Surface integrity of Inconel-718 Nickel base super alloy using controlled and natural contact length tools. Part I: Lubricated," *Experimental mechanics*, 32(3) pp. 282-288, 1992.
- [39] Tosun, N., Huseyinoglu, M. Effect of MQL on surface roughness in milling of AA7075-T6. *Advanced Materials and Manufacturing Processes*, 25 pp. 793-798, 2010.
- [40] Sharman, A.R.C., Hughes, J.I. and Ridgway, K. Surface integrity and tool life when turning Inconel 718 using ultra-high pressure and flood coolant systems," *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222 pp. 653-664, 2008.
- [41] Li, A., Zhao, J., Luo, H., Zheng, W., Machined Surface Analysis in High-Speed Dry Milling of Ti-6Al-4V Alloy with Coated Carbide Inserts, *Advanced Materials Research*, 325 pp. 412–417, 2011.
- [42] Field, M., Kahles, J.F. and Cammett, J.T. A review of measuring methods for surface integrity," *Annals of the CIRP*, 21(2) pp. 219-238, 1972.
- [43] Eyring H, Ree T, and Harai N, Metal machining and surface effects, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 44 pp. 683–687, 1958.
- [44] Whitehouse D.J. *Handbook of Surface Metrology*, Institute of Physics Publishing (1994), Bristol, U.K.
- [45] *Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices*, 2nd edition, Springer, New York.
- [46] Thomas, T.R. *Rough Surfaces*, (1999) 2nd ed., Imperial College Press, London, U.K.
- [47] Anonymous, *Surface Texture (Surface Roughness, Waviness and Lay)*, ANSI/ASME B46.1 (1985), ASME, New York.
- [48] Anonymous, *Instruments for the Measurement of Surface Roughness by Profile Methods*, ISO3274 (1975), International Standardization Organization.
- [49] Bell, T. Surface engineering: past, present and future. *Surface Engineering*. 6(1) pp. 31-40, 1990.
- [50] Vitex (2015). Perfil de simetria Rsk. [image] Available at: http://www.aias.es/JornadasTecnicas-ponencias-pdf/2015-SESSIO%20INFORMATIVA-PARAMETRES%20RUGOSITAT-16-12-15/Rugosidad-CONFERENCIA-openoffice_a_pptDEF.pdf [Accessed 4 Sep. 2017].

- [51] Predev (2016). SURFACE ROUGHNESS TERMINOLOGY AND PARAMETERS. [image] Available at: http://www.predev.com/pdf/files/surface_roughness_terminology_and_parameters.pdf [Accessed 11 Oct. 2017].
- [52] Bhushan B, Wyant J.C. Measurement of surface topography of magnetic tapes by Mirau interferometry, *Appl. Opt.* 24 pp.1489-1497, 1985.
- [53] Stedman M., "Basis for comparing the performance of surface-measuring machine", *Precision Engineering*, 9 pp.149-152, 1987.
- [54] Anonymous, Dektak 800 Surface Profile Measuring System, Veeco/Sloan Technology (1996a), Santa Barbara, CA.
- [55] Danzl, R., Helml, F.: Form measurement of engineering parts using an optical measurement system based on focus variation. In: *Proc. 7th Int. euspen Conf.*, Bremen, pp. 270– 273, 2007.
- [56] Outeiro J.C, Dias A.M., Lebrun J.L. Residual stresses induced by machining of a plain carbon steel using coated and uncoated commercial tungsten carbide tools," *Key Engineering Materials*, 230 pp.118-121, 2002.
- [57] M'Saoubi, R., Outeiro, J.C. Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels," *Journal of Materials processing Technology*, 96 pp. 225-233, 1999.
- [58] P. Vomacka, H. Walburger, *European Conference on residual Stress, ECRS5 Master, Sci, Forum (2000)* 347-349
- [59] G.Parris, *Heat Treat, Met*, 4 pp.107-116, 1977.
- [60] I.C. Noyan and J.B. Cohen, "Residual Stress – Measurement by Diffraction and Interpretation", *Materials Research and Engineering*, Springer-Verlag, New York Inc., 1987.
- [61] *Introduction to X-Ray Powder Diffractometry*, Ron Jenkins & Robert L Snyder, John Wiley & Sons, 1996.
- [62] SAE International. *Residual Stress Measurement by X-ray Diffraction, HS-784*; SAE International (2003): Warrendale, PA, USA, 2003.
- [63] *Structural and Residual Stress Analysis by Non-destructive Methods, Evaluation, Application, Assessment*. Viktor Hauk, Elsevier, 1997.
- [64] Von Turkovich, B.F., Field, M., 1981, "Survey on material behavior in machining". *Annals of the CIRP*, Vol. 30 (2):533-540.

- [65] Sato, M., Kato, Y., Apki, S., Ikoma, A., May 1983, "Effects of Crystal Orientation on the Cutting Mechanism of the Aluminum Single Crystal" Bull. of the JSME, Vol.26(215):890-896.
- [66] Liu, J.J., Dornfeld, D.A., 1996, "Modeling and Analysis of Acoustic Emission in Diamond Turning", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol.116(2):199-207.
- [67] American Society for Metals, Casting, Vol. 15, 1992.
- [68] Martin, F. G. Statistical Design and Analysis of Experiments, Technical report, University of Florida Gainesville (1989), Florida.
- [69] Oscar O.M, Luis A.L, Sandra E.M. Diseño de experimentos (Métodos y aplicaciones), Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2000, p.p 288-300.
- [70] Fang N, Wu Q. The effects of chamfered and honed tool edge geometry in machining of three aluminum alloys. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45 pp.1178–87, 2005.
- [71] Walid J, Victor S. Surface Finish and Residual Stresses Induced by Orthogonal Dry Machining of AA7075-T651. International Journal of materials (2014)
- [72] S. Ranganath, C. Guo and S. Holt, Experimental investigations into the carbide cracking phenomenon on Inconel 718 superalloy material, ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering Conference, West Lafayette, Indiana, USA. 33-39
- [73] MACHADO, A. R.; WALLBANK, J. The effects of a high-pressure coolant jet on machining. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 1994, vol. 208, no 1, p. 29-38.
- [74] Zorev, N. interrelationship between shear processes occurring along the tool face and on the shear plane in metal cutting. Proceeding of international conference on Production engineering research Pittsburgh, Pennsylvania, Szeptember 2963, pp 42-49
- [75] Senthil Kumar A., Rahman M., Ng. S. L.; "Effect of high-pressure coolant on machining performance", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 20 pp. 83–91, 2002.
- [76] Kamruzzaman M., "Effect of high pressure coolant on machinability of steel", Ph.D. dissertation (continuing), Bangladesh University of Engineering & Technology, (2008).
- [77] Kamruzzaman M, Dhar N, "Effect of High-Pressure Coolant on Temperature, Chip, Force, Tool Wear, Tool Life and Surface Roughness in Turning AISI 1060 Steel",), Bangladesh University of Engineering & Technology, Int. J. of Science (2009).

[78] Trent, E. Conditions of seizure at the tool work interface, ISI special report 94, pp 11-18, Iron Steel institute, London, 1967

[79] Kamel M, Michel M. Influence of Milling on the Fatigue Lifetime of a Ti6Al4V Titanium Alloy. *Materials-Metals*, 5 pp. 1148-1162, 2015.

[80] König. W.. Erinski. D.. 1983, Machining and Machinability of Aluminium Cast Alloys, *Annals of th CIRP*, Vol. 32/2: 207-21 2.

[81] JUTURU, Raga Madhuri, Surface integrity in machined aluminum alloys: Effects of cutting tool coatings and cooling/lubrication (Master dissertation). The University of Utah, 2010.

[82] Ezugwu, E.O.; Bonney, J.; Da Silva, R.B.; Cakir, O. Surface integrity of finished turned Ti-6Al-4V alloy with PCD tools using conventional and high pressure coolant supplies. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 47 pp 884–891, 2007.

[83] Kamel M, Michel M. Influence of Milling on the Fatigue Lifetime of a Ti6Al4V Titanium Alloy. *Materials-Metals*, 5 (2015): 1148-1162.

[84] PETROPOULOS, P., PANDAZARAS, C.N., DAVIM, J.P., Surface Texture Characterization and Evaluation Related to Machining, in *Surface Integrity in Machining*, Springer, Ed. J.P. Davim, 4 pp. 37-66, 2010.

[85] PETROPOULOS, G.P., PANDAZARAS, C.N., VAXEVANIDIS, N.M., ANTONIADIS, A., Multiparameter identification and control of turned surface textures, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29 (1- 2) pp. 118-128, 2006.

[86] FELHŐ, Csaba; KUNDRÁK, János. Effects of Setting Errors (Insert Run-Outs) on Surface Roughness in Face Milling When Using Circular Inserts. *Machines*, 2018, vol. 6, no 2, p. 14.

[87] Grzesik W, Wanat T. Comparative assessment of surface roughness produced by hard machining with mixed ceramic tools including 2D and 3D analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 16 pp. 364–371, 2005.

[88] Gadelmawla E.S. Koura M.M. Maksoud T.M.A. Roughness parameters, *Journal of Materials Processing Technology*, 123 pp. 133-145, 2002.

[89] Meyers, M.A. Chawla, K.K. *Mechanical Behavior of Materials*. Cambridge University Press (2009), Cambridge, UK.

[90] Goodchild, D.; Roberts, W.; Wilson, D. Plastic deformation and phase transformation in textured austenitic stainless steel. *Acta Metallurgica*, 18 pp. 1137–1145, 1970.

-
- [91] Akcan, S.; Shah, W.S.; Moylan, S. Formation of white layers in steels by machining and their characteristics. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33 pp.1245–1254, 2002.
- [92] Herbert C, Axinte D, Hardy M, Brown PD. Investigation into the characteristics on the white layers produced in a nickel-based superalloy from drilling operations. *Materials Science and Technology*. 16(1) pp. 40–52, 2012.
- [93] Scardi P, Leoni M. Diffraction line profiles from polydisperse crystalline systems. *Acta Crystallographica Section a Foundations of Crystallograph*, A57 pp. 604-613, 2001.
- [94] Zhong Y, Ping D, Song X. Determination of grain size by XRD profile analysis and TEM counting in nano-structured Cu. *Journal of Alloys and Compounds*. 476 pp. 113-117, 2009.
- [95] Chen Y, Yang Y, Feng Z. Grain refinement and texture evolution during high precision machining of a Ni-based superalloy. *Philosophical Magazine* 97 pp. 28-42, 2017.
- [96] Barry, J.; Byrne, G. (2002) TEM study on the surface white layer in two turned hardened steels. *Materials Science and Engineering*, 324: 356–364.
- [97] Fergani O, Shao Y, Liang SY (2014) Effect of temperature on the subsurface microstructure and mechanical properties of AA7075-T6 in machining. *Procedia CIRP* 13:181–185
- [98] SAE International. *Residual Stress Measurement by X-ray Diffraction*, HS-784; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2003.
- [99] Ezugwu E, Machado A, Pashby R, Wallbank J (1991) The effect of high-pressure coolant supply when machining a heat-resistant nickel-based superalloy. *Lubr Eng* 47:751–757
- [100] Brinksmeier E, Cammet J.J. Residual Stresses-measurements and Causes in Machining Processes, *Annals of CIRP*, 31-2 (1982): 491-510

[101] GRIFFITHS, Brian. Manufacturing surface technology: surface integrity and functional performance, Sub-surface Altered Material Layers, Elsevier, 2001.

[102] GUNNBERG, F., ESCURSELL, M., JACOBSON, M., "The influence of cutting parameters on residual stresses and surface topography during hard turning of 18MnCr5 case carburized steel", Journal of Materials Processing Technology, v.174, pp.82-90, 2006.

[103] Bowman, K. & Kastenbaum, M. A. Sample Size Requirement: Single and Double Classification Experiments', In Selected Tables in Mathematical Statistics (1975) (Harter, H. L. and Owen, I. B. eds.) III, 111–232.

[104] Hricova, J, Kovac M. Sugar, P. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HIGH SPEED MILLING OF ALUMINIUM ALLOY, Scientific journal of Croatia, 14 pp. 773-777, 2016.

A. Anexo A: Procedimiento para el cálculo de las replicas

Para determinar el número de tratamientos o repeticiones necesarios que le permitan al diseño experimental detectar diferencias significativas entre los bloques, es decir determinar si hay o no evidencia estadística, mediante la prueba de análisis de varianza, para rechazar o aceptar la hipótesis nula propuesta.

El número de réplicas para un experimento se determina con base en:

1. El grado de precisión deseada,
2. Cantidad de Variabilidad presente en el material experimental
3. Recursos disponibles, incluyendo personal y equipo.
4. Tamaño y forma de la unidad experimental.

El grado de precisión deseado depende de la naturaleza y características de los tratamientos y de la magnitud de la diferencia esperada entre los tratamientos. Si la diferencia es pequeña mayor será el número de repeticiones. El grado de precisión es definido como la variabilidad asociada con la media de tratamiento (la varianza de una media de tratamientos).

Si la variabilidad del material experimental es pequeña se requieren menos réplicas por tratamiento.

Para determinar el número de réplicas usualmente se emplean unas tablas construidas por Bowman y Kastenbaun [103]. Para utilizarlas se deben especificar tres variables: α , β , Δ^* , donde:

α , es la probabilidad de cometer error tipo I.

β , es la probabilidad de cometer error tipo II o la seguridad con que se desea detectar la diferencia entre el mejor y el peor tratamiento.

Δ^* , es la diferencia mínima estandarizada a considerar entre el tratamiento de mayor efecto y el de menor para considerarse significativamente diferente. Este es el valor en el caso por ejemplo de comparar dos medicamentos, uno estándar A y uno nuevo B, será la

diferencia mínima que se tolera que tenga el medicamento B del A para considerarse mejor y así poder ser desarrollada y comercializada. El valor de Δ^* puede ser calculado por la expresión:

$$\Delta^* = \frac{\tau_{m\acute{a}x} - \tau_{m\acute{i}n}}{\sigma_e} = \frac{\tau_{m\acute{a}x} - \tau_{m\acute{i}n}}{\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_\eta^2}} \quad (0.1)$$

Para calcular Δ^* se requiere tener una estimación de σ_e^2 . Algunas veces esta información se puede obtener de algún experimento previo similar. En otros casos se deberá hacer una estimación preliminar o piloto y obtener como estimador de σ_e^2 el CME de la tabla de ANOVA de éste estudio o la varianza de un tratamiento, por ejemplo el tratamiento de control. Por ello, se recomienda que los estudios preliminares deben ser lo suficientemente grandes para obtener un buen estimador de σ_e^2 , es decir, un estimado basado sobre un número suficiente de grados de libertad. Otra manera es dar el valor de Δ^* como un múltiplo de σ_e . Si se toma un valor pequeño para Δ^* es porque se quiere determinar si el mejor y el peor efecto del tratamiento difieren aun cuando sus efectos sean muy cercanos. Es lógico que en este caso se requiere tener buenos estimados de los efectos y por consiguiente mayor número de réplicas por tratamiento.

Bajo el principio anteriormente explicado, se tomó la decisión de hallar el número de réplicas en base a un estudio de similares características y principios de diseños ya descritos. El principal motivo, es debido a la limitación en recursos tanto tecnológicos como económicos que limitan la posibilidad de realizar un estudio previo. Para seleccionar la investigación, se realizó una búsqueda bajo los siguientes criterios: (1) comparación entre métodos de suministro de fluido de corte en el maquinado de las aleaciones de aluminio (2) estudio de este efecto sobre la rugosidad superficial (3) tamaño de experimento mediano.

En la revisión bibliográfica sobre las investigaciones que abordan un tema de estudio similar, se encontró, como se explicó en el apartado 1.3, que las investigaciones dirigidas al estudio del efecto específico de la aplicación del método de suministro de fluido de corte en la integridad de superficie en aleaciones de aluminio son escasas, centrandose las investigaciones en optimizaciones sobre todos los parámetros involucrados en el proceso de maquinado de estas aleaciones y no solamente en la técnica de suministro de fluido de corte. Por tal motivo la investigación seleccionada no es similar en cuanto al estudio específico de la técnica de suministro sino se plantea un análisis multifactorial relacionando las diferentes variables de corte para realizar un estudio de optimización [104].

La investigación seleccionada aborda el estudio de la rugosidad superficial, comparando 3 métodos de suministro de fluido de corte. Adicionalmente trata sobre la influencia de la geometría de la herramienta (ángulo de hélice) y las condiciones de corte (velocidad de corte y velocidad de avance) en el acabado superficial producido durante el fresado de la aleación de aluminio. Se analizan los parámetros de corte con respecto a los índices de rendimiento de la rugosidad superficial y se discuten y evalúan los hallazgos en un análisis de varianza. Dentro del análisis estadístico llevado a cabo por la investigación titulada

“EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HIGH SPEED MILLING OF ALUMINIUM ALLOY” los datos se tomaron de la tabla de análisis de varianza, **Tabla 2-7**.

Tabla 0-1 :Tabla de ANOVA del estudio base [104].

Factor	DF	SS	MS	F-ratio	P %
Cutting speed (m/min)	2	0.525	0.262	3.3407	0.0682
Feed rate (mm/rev)	2	3.571	1.786	22.7731	0.4642
Depth of cut (mm)	2	1.092	0.546	6.9620	0.1419
Error	18	1.412	0.078		0.1835
Total	26	7.694			

Se realizó los cálculos de del número de tratamientos con los siguientes valores: $\alpha=0.05$, $1-\beta=0.90$, $t=3$ tratamientos (bloques) y $\sigma_e^2=1.412$, estos datos se requieren para resolver Δ^* (2.1)

$$\Delta^* = \frac{\alpha_{max} - \alpha_{min}}{\sigma_e^2} = \frac{3.571 - 0.525}{1.412} = 1.75$$

Resolviendo la ecuación (2.1) y por medio de la potencia seleccionada para el diseño, se emplean una tabla reproducidas por K.O Bowman y M. A. *Kastenbaum* " *Sample size requirement: Single and double classification experiments*" en *Selected Tables in Mathematical Statistics, Vol. 3 (1975)* .

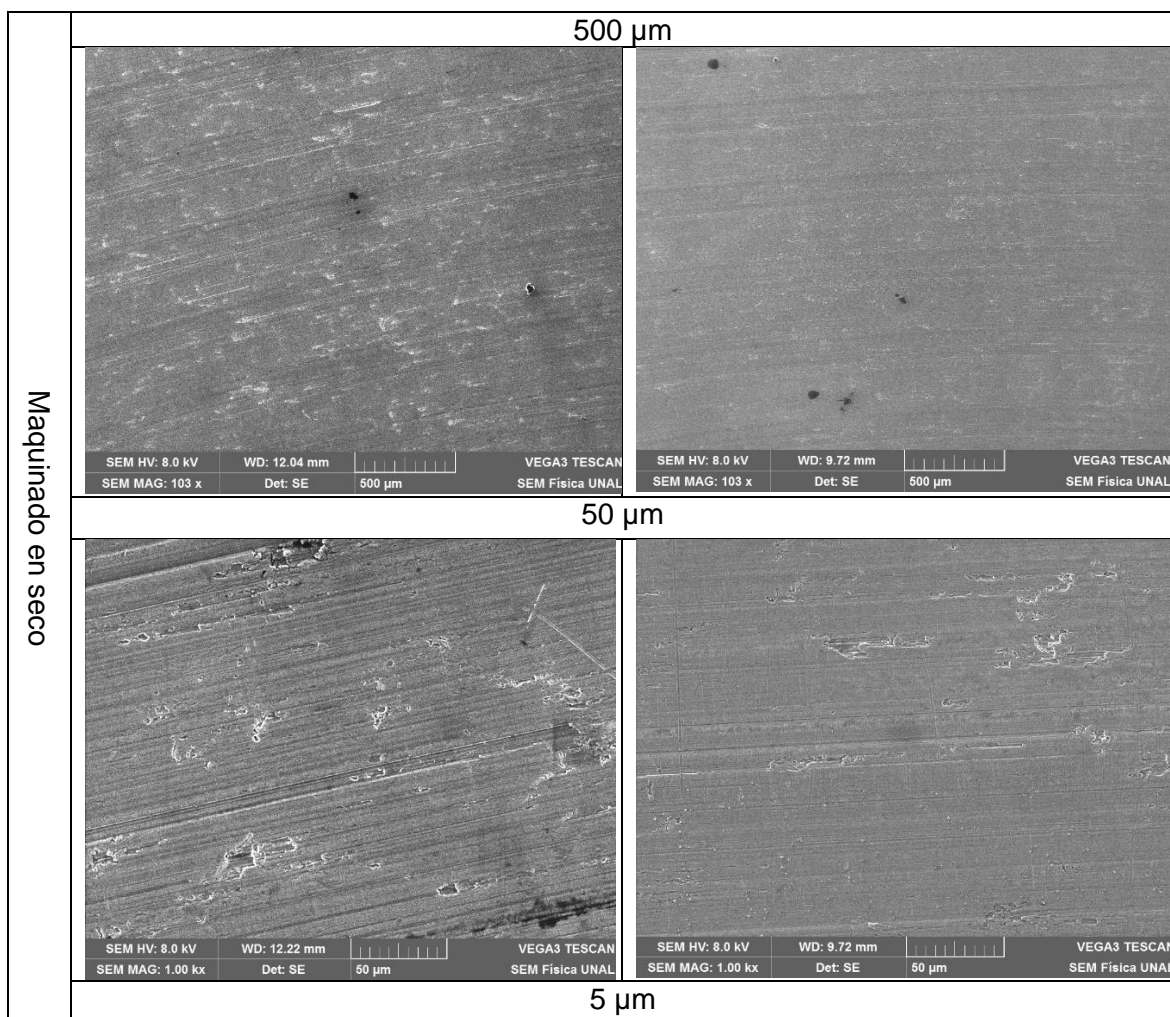
Tabla 0-2 :valores de Δ^* para determinar el número de replicaciones [88]

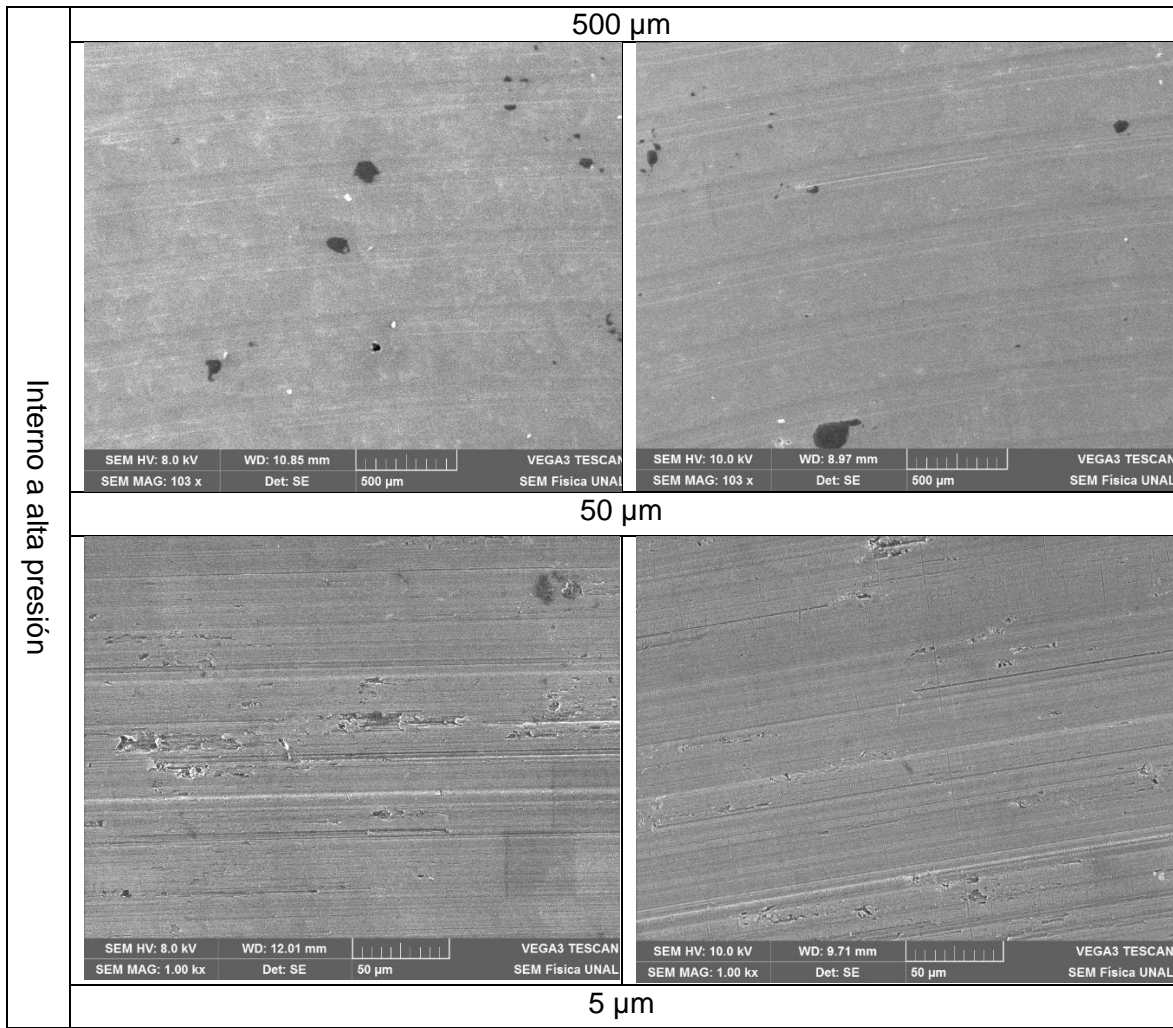
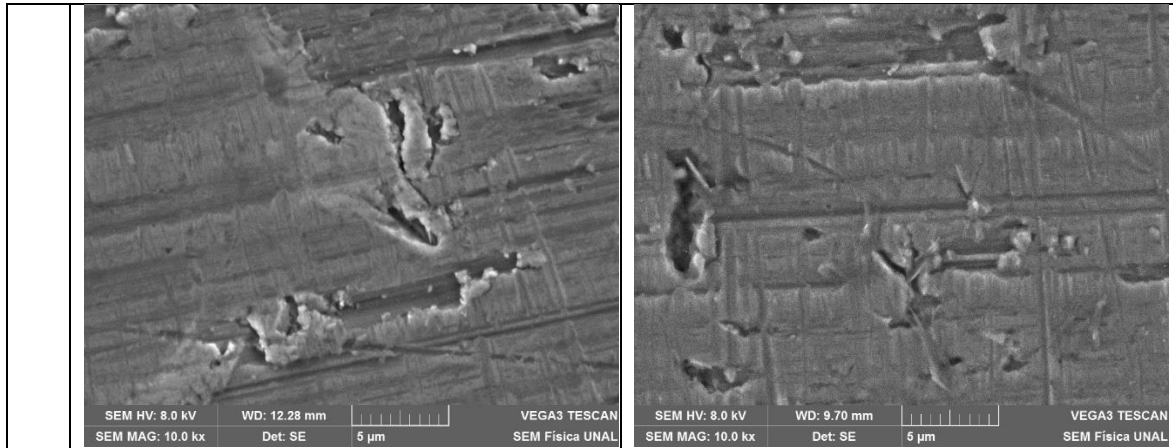
r	$\frac{t-2}{1-\beta}$			$\frac{t-3}{1-\beta}$			$\frac{t-4}{1-\beta}$		
	.7	.8	.9	.7	.8	.9	.7	.8	.9
2	4.863	5.653	6.796	4.883	5.570	6.548	4.872	5.504	6.395
3	2.703	3.071	3.589	2.957	3.325	3.838	3.904	3.460	3.967
4	2.104	2.381	2.767	2.335	2.618	3.010	2.468	2.754	3.148
5	1.792	2.024	2.348	1.997	2.236	2.568	2.119	2.362	2.698
6	1.590	1.796	2.081	1.775	1.987	2.280	1.888	2.104	2.401
7	1.446	1.632	1.890	1.615	1.808	2.073	1.719	1.916	2.186
8	1.335	1.507	1.745	1.492	1.670	1.915	1.590	1.771	2.020
9	1.247	1.407	1.629	1.394	1.560	1.788	1.486	1.655	1.888
10	1.175	1.325	1.534	1.313	1.469	1.684	1.400	1.559	1.778
11	1.113	1.256	1.454	1.245	1.393	1.596	1.328	1.479	1.686
12	1.061	1.197	1.385	1.186	1.327	1.521	1.266	1.409	1.607
13	1.016	1.145	1.326	1.135	1.270	1.456	1.211	1.349	1.538
14	0.975	1.100	1.273	1.090	1.220	1.398	1.164	1.296	1.478
15	0.940	1.060	1.226	1.050	1.175	1.347	1.121	1.249	1.424
16	0.908	1.024	1.185	1.015	1.135	1.301	1.083	1.206	1.375
17	0.879	0.991	1.147	0.982	1.099	1.259	1.049	1.168	1.331
18	0.852	0.961	1.112	0.953	1.066	1.222	1.017	1.133	1.292
19	0.828	0.934	1.081	0.926	1.036	1.187	0.988	1.101	1.255
20	0.806	0.909	1.052	0.901	1.008	1.155	0.962	1.071	1.222
21	0.786	0.886	1.025	0.878	0.982	1.126	0.938	1.044	1.191
22	0.767	0.865	1.000	0.857	0.959	1.099	0.915	1.019	1.162
23	0.749	0.845	0.977	0.837	0.936	1.073	0.894	0.996	1.135
24	0.733	0.826	0.956	0.819	0.916	1.050	0.874	0.974	1.110
25	0.717	0.809	0.936	0.802	0.897	1.028	0.856	0.953	1.087

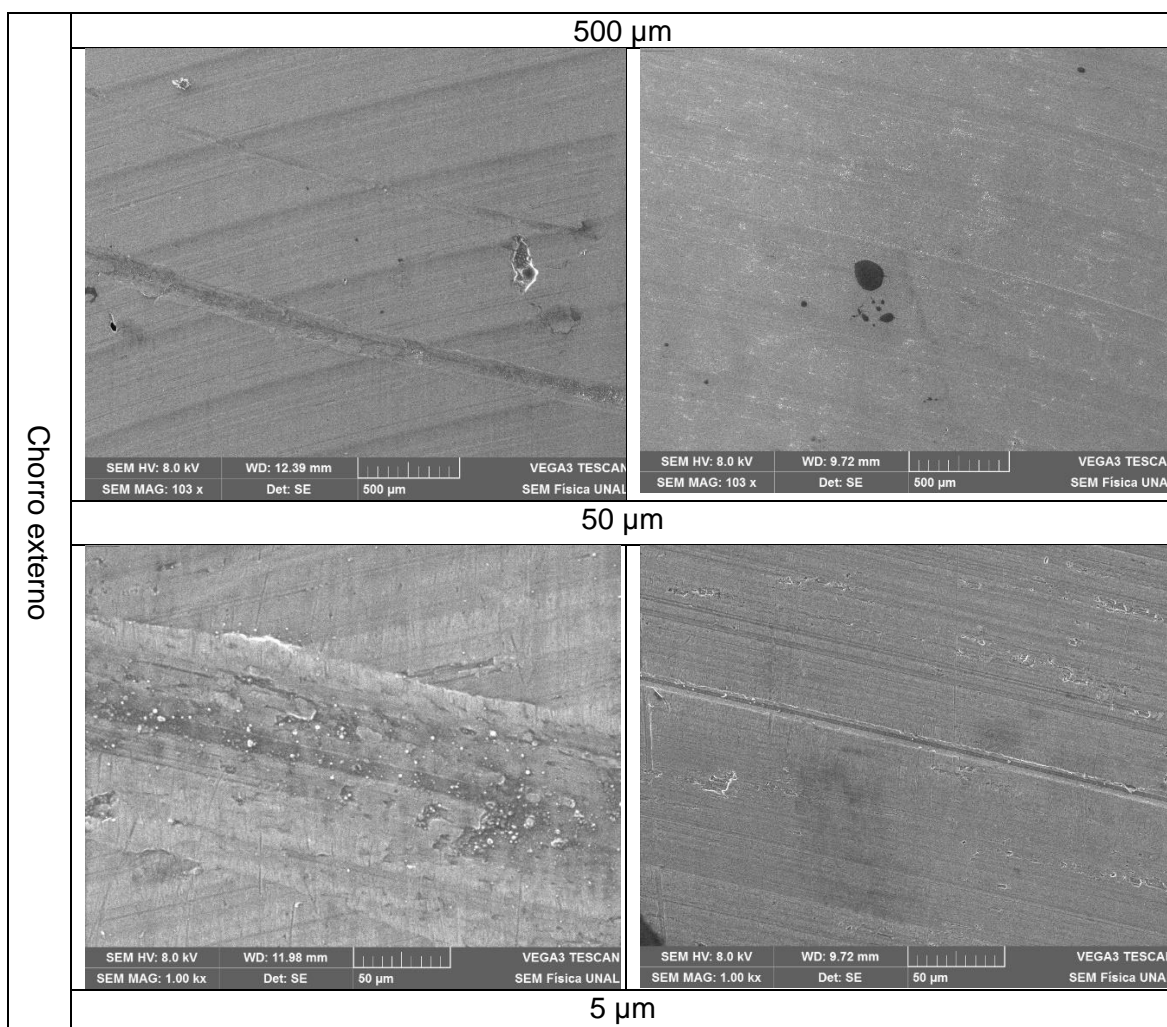
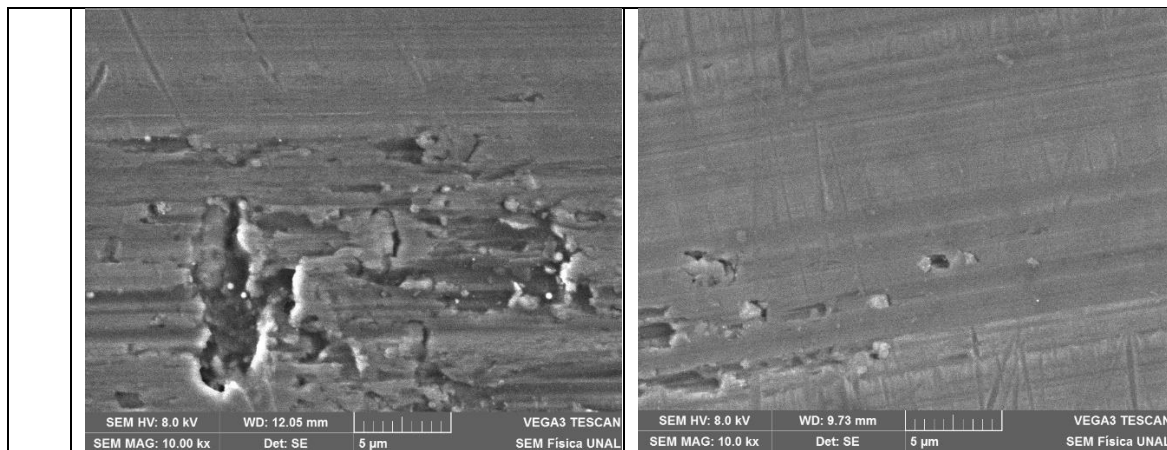
De la anterior tabla se selecciona el valor de r de acuerdo al resultado de Δ^* y la potencia seleccionada. Para esta investigación el resultado es de un $r=9$ para cada uno de los bloques, es decir, el tamaño del experimento de 27 réplicas.

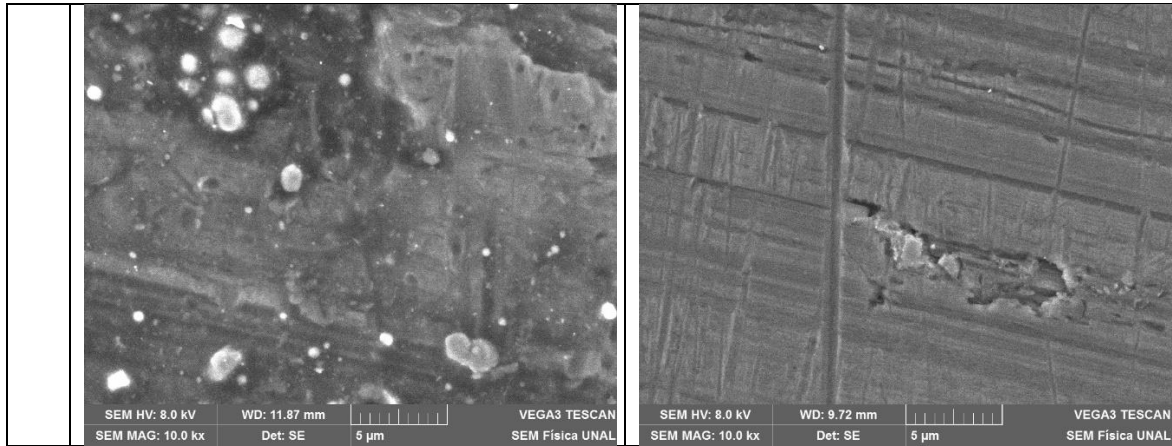
B. Anexo B: Microscopia electrónica de barrido-SEM

Se muestra las imágenes obtenidas por medio de microscopia electrónica de barrido para las superficies probadas.









C. Anexo C: Análisis de rugosidad

Las siguientes tablas contienen los valores de rugosidad explicados en la sesión 3.2, estos resultados se emplearon para el análisis semicuantitativo con ayuda de la estadística descriptiva.

B1. Media general para cada parámetro de rugosidad superficial, método de suministro por chorro externo.

Suministro externo por chorro											
Replica										Media	S
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Ra	0.637355	0.69859	0.73569	0.7361	0.721045	0.72745	0.680485	0.647265	0.697655	0.699	0.036793
Rq	0.788855	0.86445	0.93768	0.91757	0.89862	0.886565	0.84618	0.79973	0.867615	0.868	0.050007
Rt	3.942505	3.961175	4.9562	4.63485	4.307135	4.14238	3.496295	3.41037	3.83099	3.961	0.501878
Rz	3.22346	3.411935	4.48849	4.08143	3.737355	3.684625	3.24479	3.098155	3.517195	3.517	0.448386
Rmax	3.827285	3.869045	4.8465	4.322695	4.208855	4.064595	3.43569	3.342705	3.74941	3.869	0.463196
Rp	1.664655	2.52439	2.32113	1.894755	1.86033	1.727875	1.555455	1.452455	1.72151	1.728	0.35158
Rv	2.22084	2.189025	2.68253	2.584035	2.574855	2.31252	1.93801	1.958915	2.109485	2.221	0.274565
Rc	2.669915	2.7495	2.851715	2.737275	2.703735	2.55991	2.56117	2.627875	2.80933	2.704	0.102307
Rsk	-0.31799	-0.34576	-0.3301	-0.51902	-0.63463	-0.53891	-0.48245	-0.61958	-0.48594	-0.486	0.11986
Rku	2.4808	2.447565	2.68747	2.58971	2.71271	2.50757	2.44213	2.580045	2.560455	2.56	0.09766

B2. Estadística descriptiva para cada parámetro de rugosidad superficial, método de suministro por chorro externo.

valor	Ra	Rq	Rt	Rz	Rmax	Rp	Rv	Rc	Rsk	Rku
Media	0.697959	0.867474	4.075767	3.609715	3.962976	1.858062	2.285579	2.696714	-0.47493	2.556495
Error típico	0.012264	0.016669	0.167293	0.149462	0.154399	0.117193	0.091522	0.034102	0.039953	0.032553
Mediana	0.69859	0.867615	3.961175	3.517195	3.869045	1.727875	2.22084	2.703735	-0.48594	2.560455
Moda	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Desviación estándar	0.036793	0.050007	0.501878	0.448386	0.463196	0.35158	0.274565	0.102307	0.11986	0.09766
Varianza de la muestra	0.001354	0.002501	0.251881	0.20105	0.214551	0.123608	0.075386	0.010467	0.014366	0.009537
Curtosis	-0.86293	-0.66784	-0.28901	0.44002	0.419374	0.34776	-1.42239	-1.00334	-1.41292	-0.9149
Coefficiente de asimetría	-0.68106	-0.38244	0.460468	0.958193	0.572232	1.067895	0.232009	-0.00445	0.150226	0.477872
Rango	0.098745	0.148825	1.54583	1.390335	1.503795	1.071935	0.74452	0.291805	0.31664	0.27058
Mínimo	0.637355	0.788855	3.41037	3.098155	3.342705	1.452455	1.93801	2.55991	-0.63463	2.44213
Maximo	0.7361	0.93768	4.9562	4.48849	4.8465	2.52439	2.68253	2.851715	-0.31799	2.71271
Suma	6.281635	7.807265	36.6819	32.48744	35.66678	16.72256	20.57022	24.27043	-4.27436	23.00846
Cuenta	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Nivel de confianza	0.7361	0.93768	4.9562	4.48849	4.8465	2.52439	2.68253	2.851715	-0.31799	2.71271

B3. Media general para cada parámetro de rugosidad superficial, método de suministro interno a alta presión.

Método de suministro interno a alta presión												
Replica											Media	S
	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
Ra	0.45544	0.76199	0.71896	0.728485	0.744095	0.724135	0.7473	0.744995	0.731805	0.732	0.095039	
Rq	0.524085	0.94614	0.90108	0.922665	0.93443	0.880165	0.91875	0.928805	0.91961	0.92	0.133	
Rt	2.536245	4.626145	4.566225	4.77407	4.774015	3.642335	4.234135	4.37579	4.26291	4.376	0.715005	
Rz	2.224645	3.939955	3.966155	4.060265	4.197	3.375125	3.81708	3.97046	3.9228	3.94	0.604213	

Rmax	2.395895	4.50403	4.37595	4.620745	4.636815	3.538545	4.15782	4.2328	4.21065	4.233	0.711113
Rp	1.2206	2.017985	2.084615	2.101025	1.83391	1.581025	1.905345	1.99058	1.91897	1.919	0.283418
Rv	1.33168	2.553615	2.355225	2.66267	2.90668	2.10099	2.35296	2.379865	2.31064	2.355	0.439647
Rc	1.750055	2.67229	2.873945	3.113045	3.1539	2.68782	2.718345	2.91174	2.68923	2.718	0.410391
Rsk	-0.19272	-0.44193	-0.4425	-0.52512	-0.70695	-0.58852	-0.56424	-0.61242	-0.46782	-0.525	0.145773
Rku	1.99079	2.54971	2.603605	2.67675	2.78414	2.379015	2.53141	2.56676	2.549425	2.55	0.225021

B4. Estadística descriptiva para cada parámetro de rugosidad superficial, método de suministro interno a alta presión.

valor	Ra	Rq	Rt	Rz	Rmax	Rp	Rv	Rc	Rsk	Rku
Media	0.706356	0.875081	4.199097	3.719276	4.074806	1.850451	2.328258	2.730041	-0.50469	2.514623
Error típico	0.03168	0.044333	0.238335	0.201404	0.237038	0.094473	0.146549	0.136797	0.048591	0.075007
Mediana	0.731805	0.91961	4.37579	3.939955	4.2328	1.91897	2.355225	2.718345	-0.52512	2.54971
Moda	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Desviación estándar	0.095039	0.133	0.715005	0.604213	0.711113	0.283418	0.439647	0.410391	0.145773	0.225021
Varianza de la muestra	0.009032	0.017689	0.511232	0.365073	0.505681	0.080326	0.19329	0.168421	0.02125	0.050634
Curtosis	8.499561	8.472304	3.640502	5.641984	4.080597	2.519222	3.43026	4.660559	2.176217	3.961505
Coefficiente de asimetría	-2.88504	-2.8843	-1.87177	-2.3169	-1.98123	-1.64426	-1.43539	-1.86058	1.067115	-1.71322
Rango	0.30655	0.422055	2.237825	1.972355	2.24092	0.880425	1.575	1.403845	0.51423	0.79335
Mínimo	0.45544	0.524085	2.536245	2.224645	2.395895	1.2206	1.33168	1.750055	-0.70695	1.99079
Maximo	0.76199	0.94614	4.77407	4.197	4.636815	2.101025	2.90668	3.1539	-0.19272	2.78414
Suma	6.357205	7.87573	37.79187	33.47349	36.67325	16.65406	20.95433	24.57037	-4.54218	22.63161
Cuenta	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Nivel de confianza	0.76199	0.94614	4.77407	4.197	4.636815	2.101025	2.90668	3.1539	-0.19272	2.78414

B5. Media general para cada parámetro de rugosidad superficial, maquinado en seco.

Maquinado en Seco											
Replica										Media	S
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Ra	0.67997	0.64167	0.643345	0.7018	0.72569	0.691335	0.657845	0.721455	0.686965	0.687	0.030946
Rq	0.858725	0.79514	0.80399	0.88116	0.89917	0.85029	0.81697	0.8854	0.868565	0.859	0.037534
Rt	3.749275	3.58674	3.372535	4.362835	4.247405	3.47705	3.514115	4.096185	4.23042	3.749	0.384963
Rz	3.4277	3.1004	3.115845	3.905735	3.646	3.199045	3.128545	3.606335	3.835495	3.428	0.31997
Rmax	3.66469	3.58674	3.280345	4.287185	4.058665	3.374935	3.44171	4.029225	4.14374	3.665	0.371742
Rp	1.586015	1.628105	1.52264	1.74407	1.77907	1.44319	1.505205	1.684225	1.80736	1.628	0.129165
Rv	2.11425	1.958635	1.85008	2.589355	2.333075	2.008775	1.99606	2.48435	2.34821	2.114	0.25904
Rc	2.759925	2.516855	2.96743	2.830585	2.854405	2.585525	2.360615	2.58547	2.38799	2.586	0.213799
Rsk	-0.43293	-0.33823	-0.45398	-0.58582	-0.68477	-0.6655	-0.49115	-0.59497	-0.43919	-0.491	0.117585
Rku	2.557715	2.43338	2.44837	2.68513	2.61347	2.55159	2.45634	2.530835	2.61068	2.552	0.085635

B6. Estadística descriptiva para cada parámetro de rugosidad superficial, maquinado en seco.

valor	Ra	Rq	Rt	Rz	Rmax	Rp	Rv	Rc	Rsk	Rku
Media	0.683342	0.851046	3.848507	3.440567	3.763026	1.63332	2.186977	2.649867	-0.52072	2.543057
Error típico	0.010315	0.012511	0.128321	0.106657	0.123914	0.043055	0.086347	0.071266	0.039195	0.028545
Mediana	0.686965	0.858725	3.749275	3.4277	3.66469	1.628105	2.11425	2.585525	-0.49115	2.55159
Moda	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Desviación estándar	0.030946	0.037534	0.384963	0.31997	0.371742	0.129165	0.25904	0.213799	0.117585	0.085635
Varianza de la muestra	0.000958	0.001409	0.148196	0.102381	0.138192	0.016683	0.067102	0.04571	0.013826	0.007333
Curtosis	-1.22915	-1.37338	-2.03468	-1.73302	-1.79656	-1.43692	-1.4107	-1.34286	-1.14518	-0.91249
Coefficiente de asimetría	-0.08027	-0.40529	0.155049	0.281629	0.104435	-0.04323	0.329247	0.045565	-0.05076	0.181115

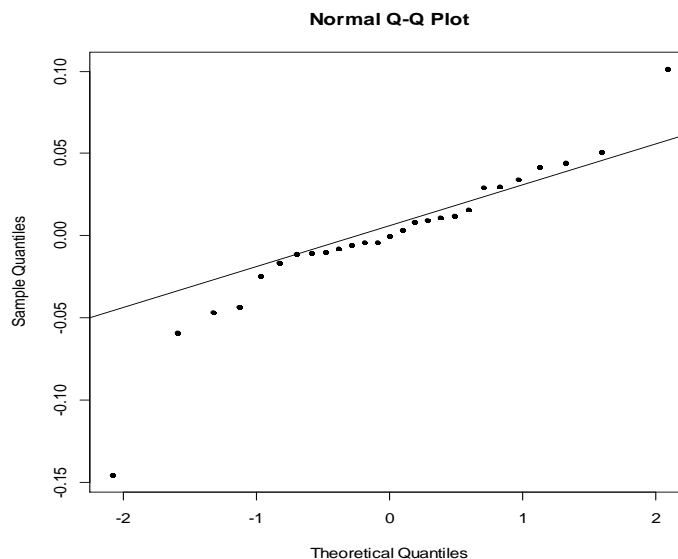
Rango	0.08402	0.10403	0.9903	0.805335	1.00684	0.36417	0.739275	0.606815	0.34654	0.25175
Mínimo	0.64167	0.79514	3.372535	3.1004	3.280345	1.44319	1.85008	2.360615	-0.68477	2.43338
Maximo	0.72569	0.89917	4.362835	3.905735	4.287185	1.80736	2.589355	2.96743	-0.33823	2.68513
Suma	6.150075	7.65941	34.63656	30.9651	33.86724	14.69988	19.68279	23.8488	-4.68652	22.88751
Cuenta	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Nivel de confianza	0.72569	0.89917	4.362835	3.905735	4.287185	1.80736	2.589355	2.96743	-0.33823	2.68513

D. Anexo D: Análisis de varianza y validación de supuestos

A continuación, se presenta las tablas de ANOVA para los parámetros de rugosidad R_a , R_q , R_t , R_z , R_{max} con intervalos del 95% de confiabilidad. Así mismo como los supuestos estadísticos.

La **Figura 3-15** representa la probabilidad normal (Q-Q *plot*), en la gráfica se observan que los valores de rugosidad R_a en su mayoría se distribuyen de forma normal, en los extremos se ven valores atípicos alejados de la línea de tendencia. Podemos así afirmar que los valores de R_a tienen una aparente distribución normal.

Figura 0-1 : grafico de probabilidad normal.



Para validar el supuesto de normalidad se tiene el test de shapiro-Wilk (más potente respecto a Kolmogorov-Smirnoff por el tamaño del experimento),

Shapiro-Wilk normality test

```
data: dbca$residuals
W = 0.9732, p-value = 0.6877
```

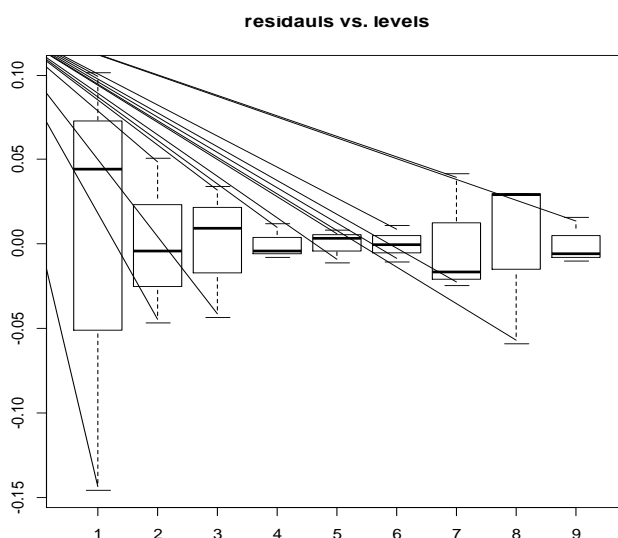
Con un p-valor de 0.6877 mayor a $\alpha:0.05$, no se rechaza la hipótesis nula, ecuación 3.4, que postula que los residuos se ajustan a una distribución normal, se concluye el supuesto de normalidad en los residuos se cumple.

$$H_0 : \text{los residuos se ajustan una distribución normal.} \quad (0.4)$$

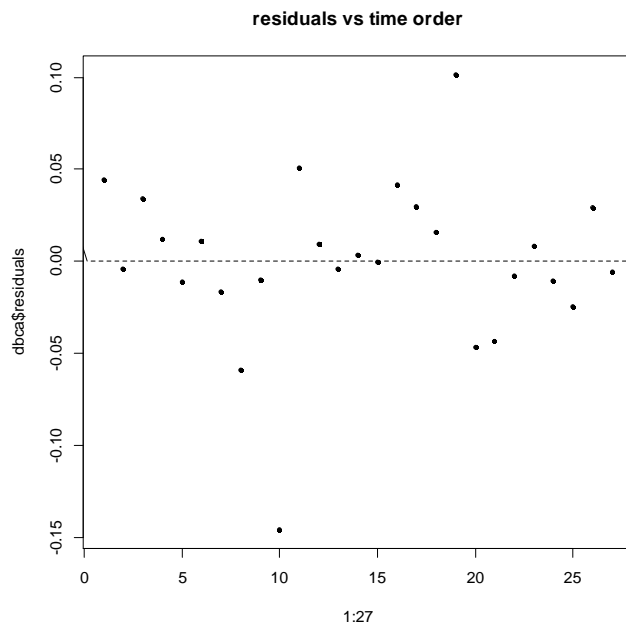
$$H_1 : \text{los residuos NO se ajustan a una distribución normal.}$$

La gráfica (**Figura 3-16**), muestra la distribución normal de los residuales estandarizados vs predichos, en el histograma, los residuales parecen seguir una distribución normal y no tiene tendencia hacia ninguno de los costados (no hay forma de embudo).

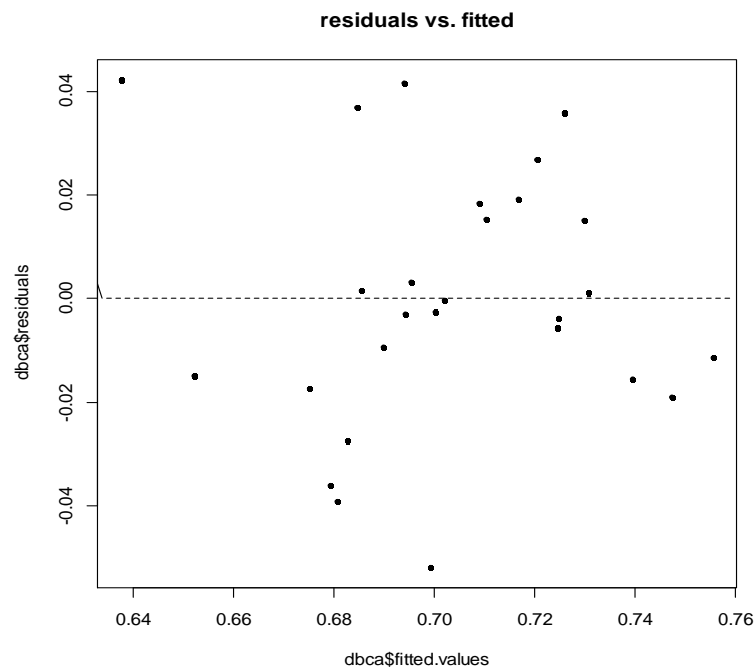
Figura 0-2 : grafico de histogramas



En la **Figura 3-17**, se grafica el supuesto de independencia de los términos del error, con el fin de conocer si existe correlación serial y si los datos se obtuvieron en una secuencia de tiempo (o espacio), la gráfica de residuos vs orden permite observar si existe alguna correlación entre los valores que están cerca uno del otro en la secuencia; en la gráfica los residuos se distribuyen de forma aleatoria alrededor de la línea residual = 0 como es de esperar. En general, los residuos que muestran ruido aleatorio normal alrededor de la línea residual = 0 sugieren que no hay una correlación serial.

Figura 0-3 : grafico de residuos vs orden de tiempo

Para validar el supuesto de homogeneidad de varianzas, **Figura 3.18**, se gráfica la dispersión de residuos vs. Predichos, en el esquema se presenta una nube de puntos sin patrón alguno por lo que se puede afirmar que las variancias no son iguales gráficamente.

Figura 0-4 : gráfico de residuos vs. Predichos

Para validar este supuesto se realizó el test de Bartlett (supuesto de homocedasticidad)

Bartlett test of homogeneity of variances

```
data:  produccion and suelo
Bartlett's K-squared = 12.995, df = 8, p-value = 0.112
```

Como el p-valor 0.112 es mayor a $\alpha=0.05$, por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula, ecuación 3.6, de varianza constante en los residuos. Se concluye que el supuesto de homocedasticidad se cumple.

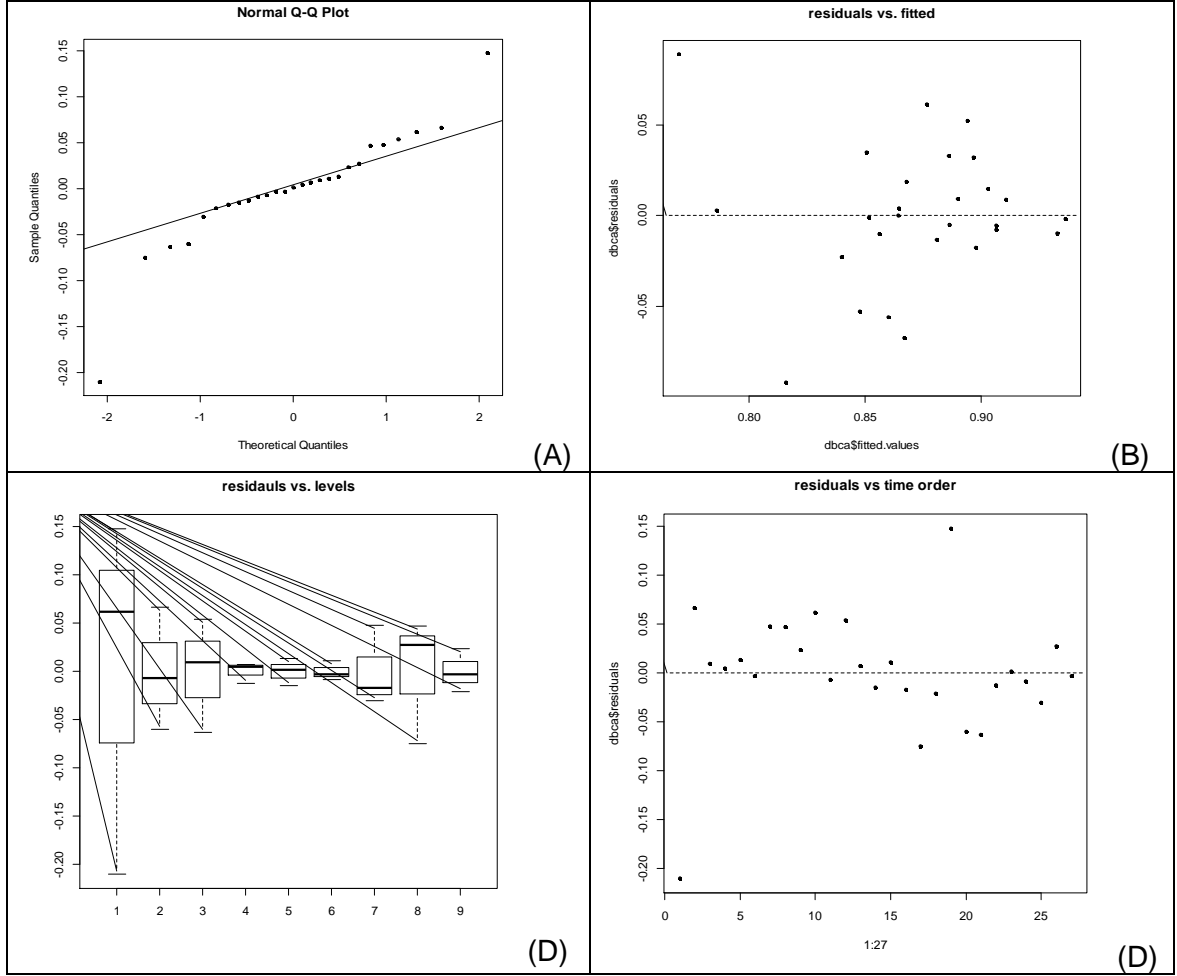
$$\left. \begin{array}{l} H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_k^2 \\ H_1 : \text{al menos un par de } \sigma_i^2 \neq \sigma_j^2 \forall i \neq j \end{array} \right| \quad (0.6)$$

La tabla ANOVA (Anexo C1) muestra el análisis de varianza para el parámetro de rugosidad Rq. Puesto que los valores P de tratamiento y bloque están por encima del alpha: 0.05 se acepta la hipótesis nula que postula que la media de los valores de rugosidad Rq es estadísticamente igual. Este factor no tiene un efecto estadísticamente significativo sobre Rq con 95.0% de nivel de confiabilidad. se comprobaron los supuestos estadísticos para los datos obtenidos del parámetro Rq, en el Anexo C2 se encuentra los gráficos descriptivos, validando los supuestos de normalidad y de homocedasticidad también se ve en el histograma los residuales parecen seguir una distribución normal y los datos no tiene tendencia hacia ninguno de los costados (no hay forma de embudo), adicionalmente los datos no presentan una correlación serial.

C1. Tabla ANOVA. Análisis de Varianza para Rq.

Tabla de ANOVA						
F.D.V	GL	Sc	Cm	Fc	Fcritico	Pvalor
tratamientos	8	0.073702	0.009213	1.487629	2.591096	0.237113
bloque	2	0.002716	0.001358	0.219316	3.633723	0.805442
error	16	0.099086	0.006193			
total	26	0.175505				

C2: gráficos de validación de supuestos Rq (a) probabilidad normal (b) dispersión de residuos vs. Predichos (c) histograma de distribución normal (d) grafico de residuos vs orden de tiempo



En el anexo C3 se realizó el test de shapiro-Wilk, se concluye que con un p-valor de 0.00478 mayor a $\alpha:0.05$, no se rechaza la hipótesis nula, se concluye el supuesto de normalidad en los residuos se cumple. Con el test de Barlett se concluye que con un p-valor de 0.0551 mayor a $\alpha=0.05$, por lo tanto no se rechaza la hipótesis nula, y se concluye que el supuesto de homocedasticidad se cumple.

C3: pruebas estadísticas (A) test de shapiro-Wilk (B) test de Barlett para el parámetro Rq

(A)
Shapiro-Wilk normality test

```
data: dbca$residuals
W = 0.87992, p-value = 0.004784
```

(B)
Bartlett test of homogeneity of variances

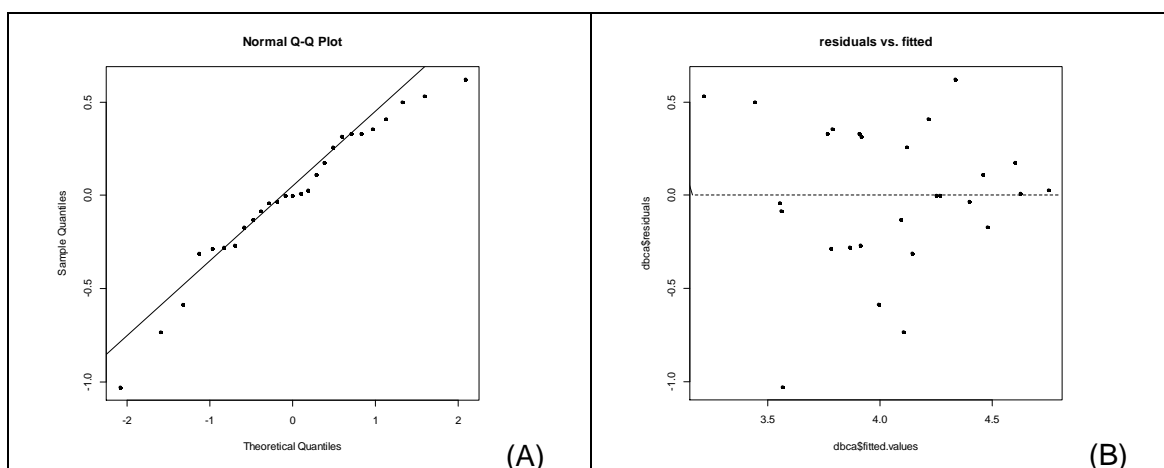
```
data: produccion and suelo
Bartlett's K-squared = 15.211, df = 8, p-value = 0.05517
```

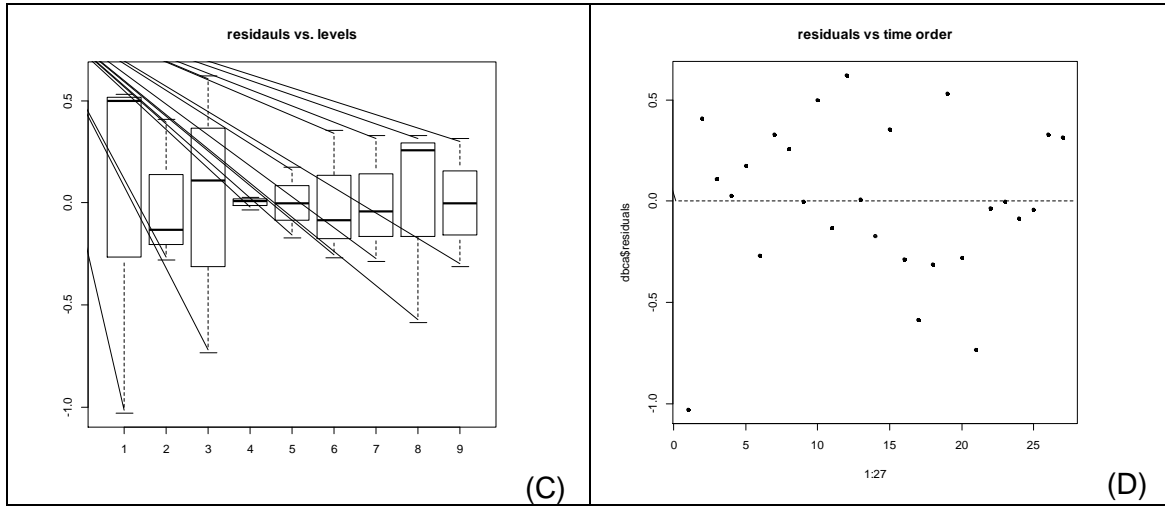

La tabla ANOVA (Anexo C4) muestra el análisis de varianza para el parámetro de rugosidad R_t . Puesto que los valores P de tratamiento y bloque están por encima del α : 0.05 se acepta la hipótesis nula, ecuación 3.2, que postula que la media de los valores de rugosidad R_t es estadísticamente igual, el factor bloque, que representa el método de suministro de fluido de corte, no tiene un efecto estadísticamente significativo sobre R_t con 95.0% de nivel de confiabilidad. Se compraban los supuestos estadísticos para los datos obtenidos del parámetro R_t , en la Anexo C5 se encuentra los gráficos descriptivos, validando los supuestos de normalidad y de homocedasticidad, también se observa en el histograma, los residuales parecen seguir una distribución normal y no tiene tendencia hacia ninguno de los costados (no hay forma de embudo), se puede ver que en cada experimento la variabilidad es amplia y tienen sesgo en sus datos., adicionalmente los datos no presentan una correlación serial.

C4: Tabla ANOVA. Análisis de Varianza para R_t .

Tabla de ANOVA						
F.D.V	GL	Sc	Cm	Fc	Fcritico	Pvalor
tratamientos	8	3.324356	0.415544	1.676375	2.591096	0.18036
bloque	2	0.569312	0.284656	1.148349	3.633723	0.341962
error	16	3.966125	0.247883			
total	26	7.859794				

C5: gráficos de validación de supuestos R_t (a) probabilidad normal (b) dispersión de residuos vs. Predichos (c) histograma de distribución normal (d) grafico de residuos vs orden de tiempo





Como se puede ver con el test de Shapiro-Wilk, Anexo C6, con un p valor de 0.3137 mayor a $\alpha:0.05$, no se rechaza la hipótesis nula, ecuación 3.4, que postula que los residuos se ajustan a una distribución normal, se concluye el supuesto de normalidad en los residuos se cumple. En el test de de Barlett como el p valor es 0.6538 es mayor a $\alpha=0.05$, por lo tanto no se rechaza la hipótesis nula, ecuación 3.6, de varianza constante en los residuos y se concluye que el supuesto de homocedasticidad se cumple.

C6: pruebas estadísticas (A) test de Shapiro-Wilk (B) test de Barlett para R_t

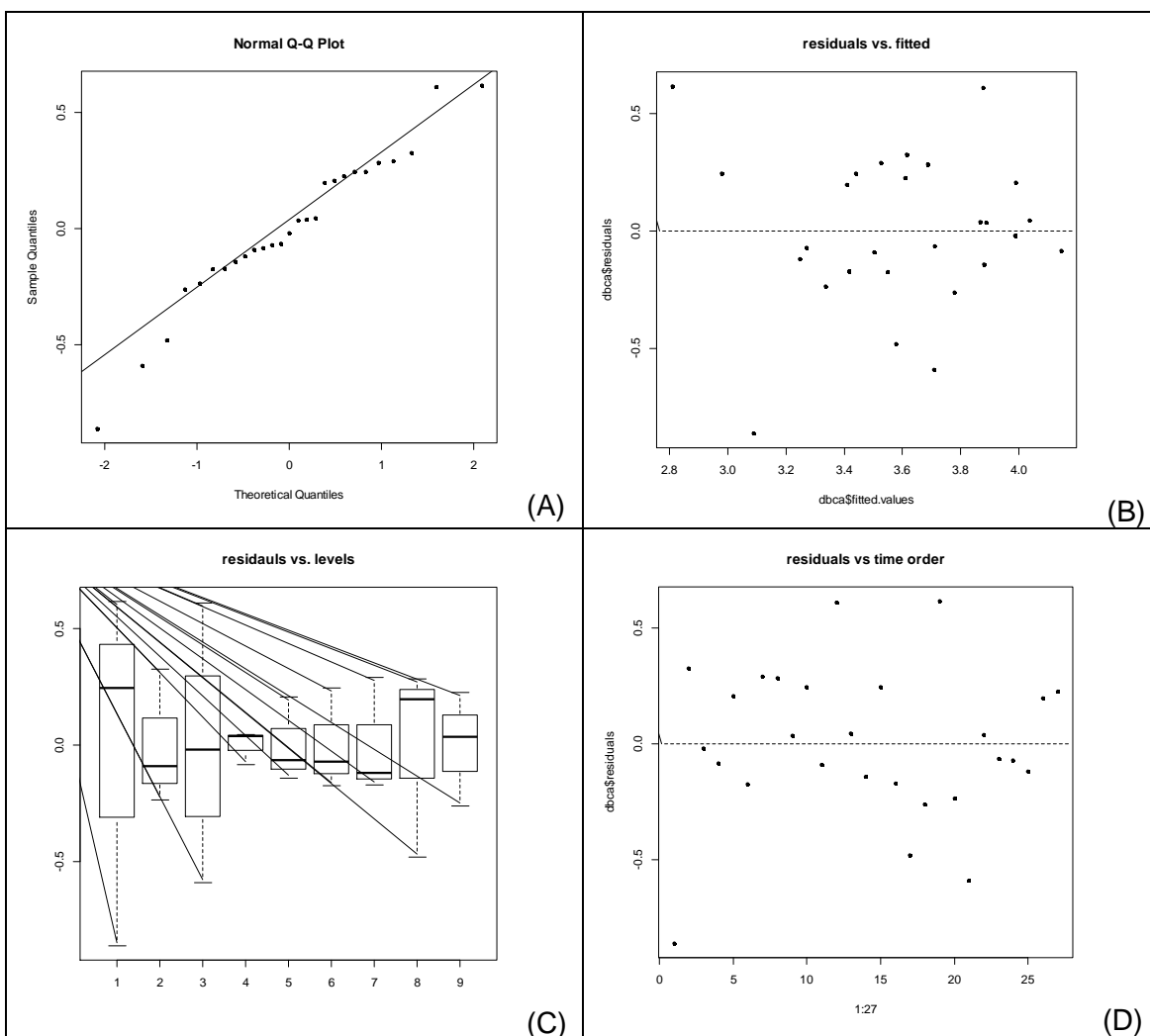
(A)	(B)
Shapiro-Wilk normality test	Bartlett test of homogeneity of variances
data: dbca\$residuals	data: produccion and suelo
W = 0.95692, p-value = 0.3137	Bartlett's K-squared = 5.9415, df = 8, p-value = 0.6538

La tabla ANOVA (Anexo C7) muestra el análisis de varianza para el parámetro de rugosidad R_z . Puesto que los valores P de tratamiento y bloque están por encima del $\alpha:0.05$ se acepta la hipótesis nula, ecuación 3.32, que postula que la media de los valores de rugosidad R_z es estadísticamente igual. Este factor bloque, que representa el método de suministro de fluido de corte, no tiene un efecto estadísticamente significativo sobre R_z con 95.0% de nivel de confiabilidad (Confianza). Se compraban los supuestos estadísticos para los datos obtenidos del parámetro R_z , en el Anexo C8 se encuentra los gráficos descriptivos, validando los supuestos de normalidad y de homocedasticidad, también se observa, en el histograma los residuales parecen seguir una distribución normal y no tiene tendencia hacia ninguno de los costados (no hay forma de embudo), se puede ver que los datos presentan menor variabilidad en los experimentos centrales en comparación con los primeros experimentos, adicionalmente los datos no presentan una correlación serial.

C7: Tabla ANOVA. Análisis de Varianza para Rz.

Tabla de ANOVA						
F.D.V	GL	Sc	Cm	Fc	Fcritico	Pvalor
tratamientos	8	2.493334	0.311667	1.746832	2.591096	0.162886
bloque	2	0.354881	0.177441	0.99452	3.633723	0.391648
error	16	2.854693	0.178418			
total	26	5.702909				

C8: gráficos de validación de supuestos Rz (a) probabilidad normal (b) dispersión de residuos vs. Predichos (c) histograma de distribución normal (d) grafico de residuos vs orden de tiempo



Como se puede ver con el test de Shapiro-Wilk, Anexo C9, con un p valor de 0.3888 mayor a $\alpha:0.05$, no se rechaza la hipótesis nula, ecuación 3.4, que postula que los residuos se ajustan a una distribución normal, se concluye el supuesto de normalidad en los residuos se cumple. En el test de de Barlett como el p valor es 0.4775 es mayor a $\alpha=0.05$, por lo tanto no se rechaza la hipótesis nula, ecuación 3.6, de varianza constante en los residuos y se concluye que el supuesto de homocedasticidad se cumple.

C9: pruebas estadísticas (A) test de Shapiro-Wilk (B) test de Barlett para Rz

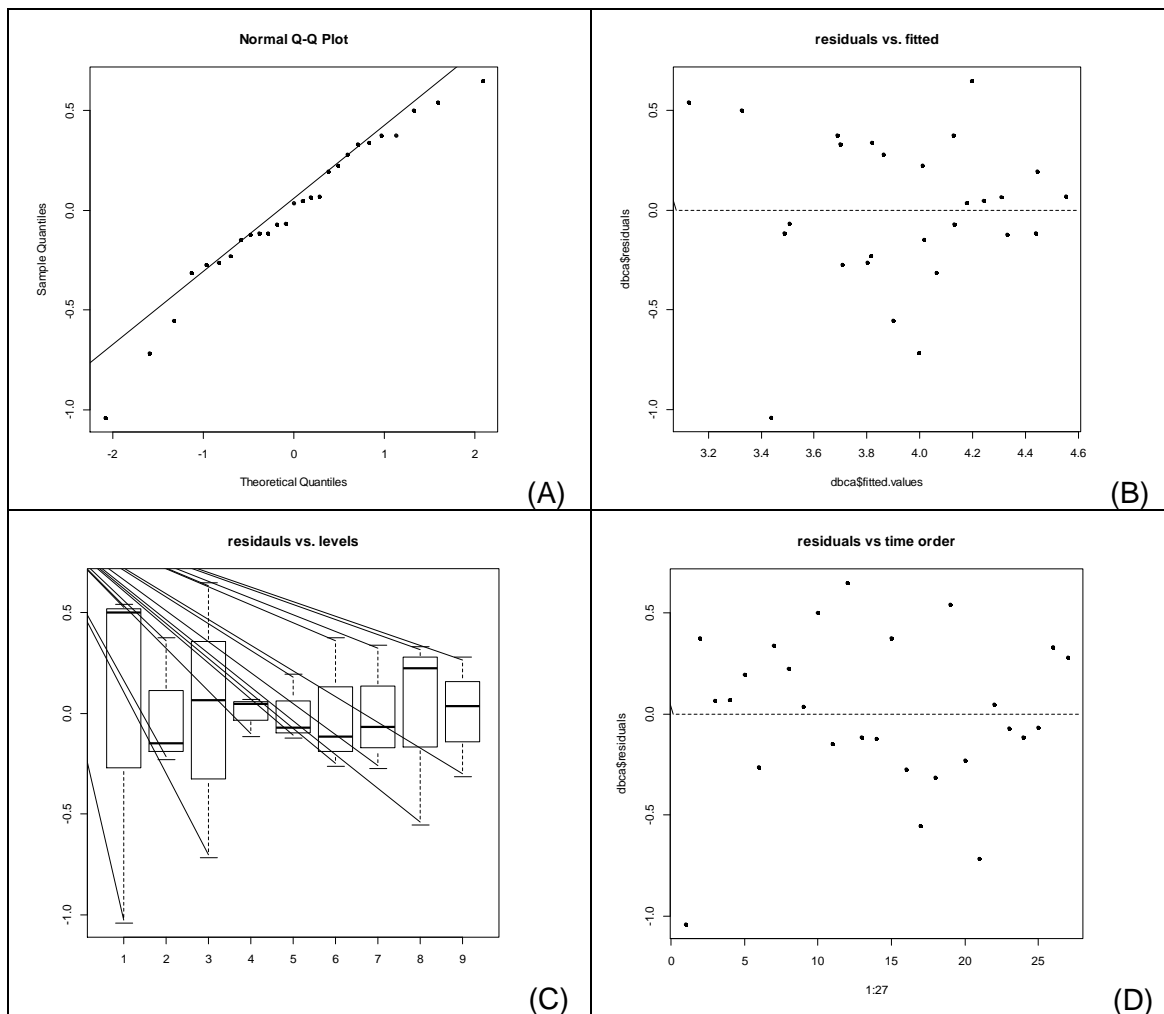
(A)	(B)
Shapiro-Wilk normality test	Bartlett test of homogeneity of variances
data: dbca\$residuals W = 0.96097, p-value = 0.3888	data: produccion and suelo Bartlett's K-squared = 7.5604, df = 8, p-value = 0.4775

La tabla ANOVA (Anexo C10) muestra el análisis de varianza para el parámetro de rugosidad Rmax. Puesto que los valores P de tratamiento y bloque están por encima del $\alpha: 0.05$ se acepta la hipótesis nula, ecuación 3.32, que postula que la media de los valores de rugosidad Rmax es estadísticamente igual. Este factor bloque, que representa el método de suministro de fluido de corte, no tiene un efecto estadísticamente significativo sobre Rmax con 95.0% de nivel de confiabilidad (Confianza). Se compraban los supuestos estadísticos para los datos obtenidos del parámetro Rz, en el Anexo C11 se encuentra los gráficos descriptivos, validando los supuestos de normalidad y de homocedasticidad también se ve en el en el histograma los residuales parecen seguir una distribución normal y no tiene tendencia hacia ninguno de los costados (no hay forma de embudo)., adicionalmente los datos no presentan una correlación serial.

C10 : Tabla ANOVA. Análisis de Varianza para Rz.

Tabla de ANOVA						
F.D.V	GL	Sc	Cm	Fc	Fcritico	Pvalor
tratamientos	8	2.944272	0.368034	1.500984	2.591096	0.232569
bloque	2	0.449076	0.224538	0.915753	3.633723	0.4202
error	16	3.923122	0.245195			
total	26	7.31647				

C11 : gráficos de validación de supuestos Rmax (a)probabilidad normal (b) dispersión de residuos vs. Predichos (c) histograma de distribución normal (d) grafico de residuos vs orden de tiempo



Como se puede ver en el anexo C12 con el test de shapiro-Wilk con un p valor de 0.4051 mayor a $\alpha:0.05$, no se rechaza la hipótesis nula, ecuación 3.4, que postula que los residuos se ajustan a una distribución normal, se concluye el supuesto de normalidad en los residuos se cumple. En el test de de Barlett como el p valor es 0.6378 es mayor a $\alpha=0.05$, por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula, ecuación 3.6, de varianza constante en los residuos y se concluye que el supuesto de homocedasticidad se cumple.

C12 : pruebas estadísticas (A) test de shapiro-Wilk (B) test de Barlett para Rmax

(A)

Shapiro-Wilk normality test

```
data: dbca$residuals
W = 0.96177, p-value = 0.4051
```

(B)

Bartlett test of homogeneity of variances

```
data: produccion and suelo
Bartlett's K-squared = 6.0846, df = 8, p-value = 0.6378
```

E. Anexo E: Esfuerzos Residuales

E1 . Reporte esfuerzo residual para las muestras maquinadas empleado el método en Seco Punto 1 y Punto 2.

Stresses in the specimen reference frame

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 207.3 & 0 & 0 \\ 0 & 207.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\Delta\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 112.92 & 0 & 0 \\ 0 & 112.92 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Rotation angle Phi: 0°

Stresses in the principal reference frame

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 207.3 & 0 & 0 \\ 0 & 207.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 207.3 & 0 & 0 \\ 0 & 207.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\Delta\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 112.92 & 0 & 0 \\ 0 & 112.92 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 112.92 & 0 & 0 \\ 0 & 112.92 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Trace(Sigma) = 718.1 ± 2.48 MPa

Weighted R-value: 0.783 %

Stresses in the specimen reference frame

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 160.6 & 0 & 0 \\ 0 & 160.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\Delta\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 147.20 & 0 & 0 \\ 0 & 147.20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Rotation angle Phi: 0°

Stresses in the principal reference frame

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 160.6 & 0 & 0 \\ 0 & 160.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 160.6 & 0 & 0 \\ 0 & 160.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\Delta\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 147.20 & 0 & 0 \\ 0 & 147.20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 147.20 & 0 & 0 \\ 0 & 147.20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Trace(Sigma) = -102.6 ± 3.23 MPa

Weighted R-value: 6.90 %

Parameters

Method	Multidirectional stress analysis
Material	AA-7075 (Al-Zn)
s1	-42.80 1/TPa
1/2 s2	172.50 1/TPa
Wavelength for calc.	KAlpha1+2
Strain-free d-spacing	1.47745 Å
Strain-free sin²(Psi)	0.400
Shear stress	No

Parameters

Method	Multidirectional stress analysis
Material	AA-7075 (Al-Zn)
s1	-42.80 1/TPa
1/2 s2	172.50 1/TPa
Wavelength for calc.	KAlpha1+2
Strain-free d-spacing	1.42665 Å
Strain-free sin²(Psi)	0.400
Shear stress	No

E2 . Reporte esfuerzo residual para las muestras maquinadas empleado el método interno a través de la herramienta a alta presión Punto 1 y Punto 2.

Stresses in the specimen reference frame

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 66.4 & 0 & 0 \\ 0 & 66.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\Delta\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 112.92 & 0 & 0 \\ 0 & 112.92 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Rotation angle Phi: 0°

Stresses in the principal reference frame

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 66.4 & 0 & 0 \\ 0 & 66.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 66.4 & 0 & 0 \\ 0 & 66.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\Delta\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 112.92 & 0 & 0 \\ 0 & 112.92 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 112.92 & 0 & 0 \\ 0 & 112.92 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Trace(Sigma) = 641.2 ± 2.48 MPa

Weighted R-value: 0.874 %

Stresses in the specimen reference frame

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} -202.2 & 0 & 0 \\ 0 & -202.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\Delta\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 58.74 & 0 & 0 \\ 0 & 58.74 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Rotation angle Phi: 0°

Stresses in the principal reference frame

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} -202.2 & 0 & 0 \\ 0 & -202.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -202.2 & 0 & 0 \\ 0 & -202.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\Delta\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 58.74 & 0 & 0 \\ 0 & 58.74 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 58.74 & 0 & 0 \\ 0 & 58.74 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Trace(Sigma) = -409.7 ± 1.29 MPa

Weighted R-value: 0.717 %

Parameters

Method	Multidirectional stress analysis
Material	AA-7075 (Al-Zn)
s1	-42.80 1/TPa
1/2 s2	172.50 1/TPa
Wavelength for calc.	KAlpha1+2
Strain-free d-spacing	1.47305 Å
Strain-free sin²(Psi)	0.400
Shear stress	No

Parameters

Method	Multidirectional stress analysis
Material	AA-7075 (Al-Zn)
s1	-42.80 1/TPa
1/2 s2	172.50 1/TPa
Wavelength for calc.	KAlpha1+2
Strain-free d-spacing	1.40994 Å
Strain-free sin²(Psi)	0.400
Shear stress	No

E3 . Reporte esfuerzo residual para las muestras maquinadas empleado el método por chorro externo Punto 1 y Punto 2.

Stresses in the specimen reference frame

Stress Tensor (MPa)	Standard Deviations (MPa)
$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} -33.2 & 0 & 0 \\ 0 & -33.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\Delta\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} 78.53 & 0 & 0 \\ 0 & 78.53 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

Rotation angle Phi: 0°

Stresses in the principal reference frame

Principal Stresses (MPa)	Deviatoric Tensor	Hydrostatic Tensor
$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} -33.2 & 0 & 0 \\ 0 & -33.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$= \begin{bmatrix} -33.2 & 0 & 0 \\ 0 & -33.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

Standard Deviations (MPa)	
$\Delta\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} 78.53 & 0 & 0 \\ 0 & 78.53 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$= \begin{bmatrix} 78.53 & 0 & 0 \\ 0 & 78.53 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

Trace(Sigma) = -98.0 ± 1.72 MPa

Weighted R-value: 3.99 %

Parameters

Method	Multidirectional stress analysis
Material	AA-7075 (Al-Zn)
s1	-42.80 1/TPa
1/2 s2	172.50 1/TPa
Wavelength for calc.	KAlpha1+2
Strain-free d-spacing	1.42660 Å
Strain-free sin²(Psi)	0.400
Shear stress	No

Stresses in the specimen reference frame

Stress Tensor (MPa)	Standard Deviations (MPa)
$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} 20.5 & 0 & 0 \\ 0 & 20.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\Delta\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} 21.89 & 0 & 0 \\ 0 & 21.89 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

Rotation angle Phi: 0°

Stresses in the principal reference frame

Principal Stresses (MPa)	Deviatoric Tensor	Hydrostatic Tensor
$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} 20.5 & 0 & 0 \\ 0 & 20.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$= \begin{bmatrix} 20.5 & 0 & 0 \\ 0 & 20.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

Standard Deviations (MPa)	
$\Delta\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} 21.89 & 0 & 0 \\ 0 & 21.89 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$= \begin{bmatrix} 21.89 & 0 & 0 \\ 0 & 21.89 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

Trace(Sigma) = 105.7 ± 1.74 MPa

Weighted R-value: 3.75 %

Parameters

Method	Multidirectional stress analysis
Material	AA-7075 (Al-Zn)
s1	-42.80 1/TPa
1/2 s2	172.50 1/TPa
Wavelength for calc.	KAlpha1+2
Strain-free d-spacing	1.43866 Å
Strain-free sin²(Psi)	0.400
Shear stress	No