



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE CORTE Y LA  
GEOMETRÍA DE LA HERRAMIENTA EN LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL  
EN EL TORNEADO DE LA ALEACIÓN AA A356-T6**

Profesor Tutor:  
Ing. Pereira, Juan C.

Realizado por:  
Dos Santos, Reinaldo  
Laurentin, Manuel

Valencia, Febrero de 2007

ÍNDICE UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
COORDINACION DE PROYECTOS DE GRADO

### SINOPSIS DEL PROYECTO DE GRADO

TITULO DEL TRABAJO:

**Influencia de los parámetros de corte y la geometría de la herramienta en la rugosidad superficial en el torneado de la aleación AA A356-T6.**

FECHA DE INICIO DEL TRABAJO: \_\_\_\_\_

FECHA DE EX. FINAL: \_\_\_\_\_

FECHA DE ENTREGA DE EJEMPLARES DEFINITIVOS A DIRECCION DE ESCUELA: \_\_\_\_\_

SINOPSIS:

La rugosidad superficial juega un papel muy importante en el proceso de manufactura de piezas mecanizadas ya que uno de los requerimientos más específicos del consumidor es la calidad superficial de la pieza. Este trabajo tiene como objetivo general analizar la influencia de los parámetros de corte y la geometría de la herramienta en la rugosidad superficial obtenida en el torneado de la aleación de aluminio AA A356-T6. Esta aleación de aluminio fue debidamente ensayada siguiendo las normas internacionales, y torneada sin el uso de refrigerante con dos insertos con diferentes radios de punta (0.4, y 0.8 mm) de la herramienta de corte. Para estudiar el efecto de la geometría de la herramienta y de los parámetros de corte en operaciones de torneado en la rugosidad superficial se diseñó un plan de ensayos el cual se siguió estrictamente y donde se trabajó con tres niveles de avance de la herramienta (0.09, 0.15, y 0.3 mm/rev), tres niveles de profundidad de corte (0.5, 1.0, y 1.5 mm) y tres niveles de velocidad de corte de la herramienta (47, 75, y 104 m/min). Este estudio mostró que los efectos del avance de la herramienta y el radio de punta de la herramienta de corte son relevantes estadísticamente para la rugosidad superficial con un porcentaje de influencia de 78% y 9% respectivamente, mientras que la velocidad de corte y la profundidad de corte no resultaron relevantes. El efecto de la interacción de los parámetros avance de la herramienta y radio de punta de la herramienta de corte también mostró ser importante. Finalmente en este trabajo se señalan los parámetros de corte mas recomendados para realizar una operación de torneado óptima cuando se utilice este tipo de aleación, para obtener un acabado superficial determinado.

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero y antes que nada, dar gracias a Dios, por estar con nosotros en cada paso que damos, por fortalecer nuestro corazón e iluminar nuestra mente y por haber puesto en nuestro camino a aquellas personas que han sido soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A la Universidad De Carabobo y en especial a la Facultad de Ingeniería que nos dieron la oportunidad de formar parte de ellas.

A nuestro tutor Juan Carlos Pereira por su ayuda incondicional y constante a lo largo de nuestra tesis, por sus consejos y por compartir desinteresadamente sus amplios conocimientos y experiencia.

A nuestros profesores, porque ellos sembraron la semilla y fertilizaron nuestra inquietud de conocer.

A nuestras novias que han vivido con nosotros la realización de este trabajo especial de grado, con sus altos y bajos desde lo más profundo de nuestro corazón les agradecemos el habernos brindado todo el apoyo, colaboración, ánimo y motivación.

## **DEDICATORIA**

### ***A Dios.***

Por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida. Por los triunfos y los momentos difíciles que me han enseñado a valorarte cada día más.

### ***A ti Madre.***

Por haberme educado, soportar mis errores, por apoyarme en todo momento, por sus consejos, sus valores, por cultivar e inculcar ese sabio don de la responsabilidad, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

### ***A ti Padre.***

A quien le debo todo en la vida, le agradezco el cariño, la comprensión, la paciencia y el apoyo que me brindó para culminar mi carrera profesional. Por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

### ***A mis Hermanos***

Porque siempre he contado con ellos para todo, gracias por el apoyo y amistad.

Reinaldo Dos Santos.

## **GENERAL**

Índice de figuras.....	IV
Índice de tablas.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	1

## **CAPÍTULO I. EL PROBLEMA**

1.1.- Planteamiento del problema.....	4
1.2.- Objetivos.....	5
1.3.- Justificación de la investigación.....	5
1.4.- Limitaciones.....	6
1.5.- Delimitaciones y/o alcances.....	6

## **CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

2.1.- Antecedentes de la investigación.....	8
2.2.- Bases teóricas.....	10
2.2.1.- Historia del aluminio.....	10

2.2.2.- Aleaciones de aluminio.....	12
2.2.3.- Designaciones de las aleaciones de aluminio.....	14
2.2.4.- Designación de tratamiento térmico básico.....	19
2.2.5.- Mecanizado.....	21
2.2.6.- Proceso de torneado.....	21
2.2.6.1.- Operaciones de torneado.....	23
2.2.6.2.- Movimientos de trabajo en la operación de torneado.....	26
2.2.6.3.- Características principales de los tornos.....	27
2.2.7. Herramientas de corte para tornos.....	27
2.2.8.- Parámetros de corte en torneado.....	29
2.2.9.- Ecuaciones básicas en el torneado.....	31
2.2.10.- Rugosidad.....	33
2.2.10.1.- Conceptos básicos.....	33
2.2.10.2.- Factores que influyen en la rugosidad superficial.....	37
2.2.10.3.- Modelos teóricos.....	38
2.2.10.4.- Parámetros y variables.....	42
2.2.10.5.- Medida de la rugosidad.....	48

### **CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO**

3.1.- Nivel de la investigación.....	52
3.2.- Diseño de la investigación.....	52
3.3.- Población y muestra.....	54
3.4.- Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	56
3.5.- Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	63
3.6.- Aspectos Administrativos.....	65

### **CAPÍTULO IV. RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN**

4.1.- Composición química de la barra de AA356.....	67
4.2.- Resultados ensayo de tracción.....	67

4.3.- Resultados micrografía.....	69
4.4.- Resultados obtenidos en el torneado.....	70
4.5.- Cálculos Rugosidad Ideal ( $Ra_i$ ) y Rugosidad Teórica ( $Ra_{teórica}$ ) .....	76
4.6.- Análisis de varianza (ANOVA).....	82
4.7.- Análisis de resultados.....	83

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.- Conclusiones.....	92
5.2.- Recomendaciones.....	95
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96

### ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1	Partes de un torno paralelo.....	23
Fig. 2.2	Operaciones de mecanizado.....	26
Fig. 2.3	Parámetros de corte en el torneado.....	30
Fig. 2.4	Superficie geométrica.....	33
Fig. 2.5	Superficie real.....	34
Fig. 2.6	Perfil real.....	34
Fig. 2.7	Longitudes básica y de evaluación.....	35
Fig. 2.8	Línea media de los mínimos cuadrados.....	35
Fig. 2.9	Línea media aritmética.....	36
Fig. 2.10	Cresta local del perfil.....	36
Fig. 2.11	Valle local del perfil.....	36
Fig. 2.12	Cresta del perfil.....	37
Fig. 2.13	Valle del perfil.....	37
Fig. 2.14	Rugosidad generada por a) Herramienta de corte con filo y b) Herramienta con radio de punta.....	39
Fig. 2.15	Rugosidad con herramienta de corte de filo pronunciado.....	40
Fig. 2.16	Relación entre la rugosidad real y la rugosidad natural ( $ra_i$ ).....	41
Fig. 2.17	Altura de una cresta del perfil, $y_p$ .....	42

Fig. 2.18	Profundidad de un valle del perfil, $y_v$ .....	42
Fig. 2.19	Altura de una irregularidad del perfil.....	43
Fig. 2.20	Altura máxima de una cresta ( $R_p$ ), Profundidad máxima de un valle ( $R_m$ ) y Altura máxima del perfil ( $R_y$ ).....	43
Fig. 2.21	Altura de las irregularidades en diez puntos ( $R_z$ ).....	44
Fig. 2.22	Desviación media aritmética del perfil ( $R_a$ ).....	45
Fig. 2.23	Paso de las irregularidades del perfil.....	45
Fig. 2.24	Paso de las crestas locales del perfil.....	46
Fig. 2.25	Relación de longitud del perfil.....	46
Fig. 2.26	Longitud portante del perfil ( $\mu_p$ ).....	47
Fig. 2.27	Gráfico de tasa de longitud portante del perfil ( $tp$ ).....	48
Fig. 2.28	Rugosímetro.....	49
Fig. 2.29	Esquema Rugosímetro (Configuración Clásica).....	49
Fig. 2.30	Esquema Rugosímetro de Palpador inductivo.....	50
Fig. 3.1	Dimensiones de la barra a utilizar (en milímetros).....	55
Fig. 3.2	Torno Misal KN18.....	56
Fig. 3.3	Maquina ensayo tracción Galdabini.....	57
Fig. 3.4	Horno.....	57
Fig. 3.5	Lijadora de Bandas.....	58
Fig. 3.6	Hoja de Lijas.....	58
Fig. 3.7	Pulidora Metalográfica.....	59
Fig. 3.8	Campana extractora de gases químicos.....	59
Fig. 3.9	Microscopio óptico.....	59
Fig. 3.10	Rugosímetro Modelo SJ-201P Marca Mitutoyo.....	60
Fig. 3.11	Herramienta de corte modelo CCGX 12 04 04-AL 1810.....	61
Fig. 3.12	Herramienta de corte modelo CCGX 12 04 08-AL 1810.....	61
Fig. 3.13	Barra porta herramienta modelo SCLCR 2020K 12.....	62
Fig. 3.14	Curva de Rugosidad Superficial en función del avance de la herramienta y la profundidad para una determinada velocidad de corte y radio de nariz.....	64

Fig. 3.15	Curva de Rugosidad Superficial en función del avance de la herramienta y la velocidad de corte para una determinada profundidad y radio de nariz.....	64
Fig. 4.1	Curva carga en función de la elongación de la muestra estudiada.....	68
Fig. 4.2	Microestructura AA356 T6 50x. a) Borde de la barra b) Centro de la barra.....	69
Fig. 4.3	Microestructura AA356 T6 100x. a) Borde de la barra b) Centro de la barra.....	69
Fig. 4.4	Microestructura AA356 T6 200x. a) Borde de la barra b) Centro de la barra.....	70
Fig. 4.5	Gráfica comparativa $f$ (mm/rev) vs $V_c$ (m/min) para $d= 0,5$ mm..	73
Fig. 4.6	Gráfica comparativa $f$ (mm/rev) vs $V_c$ (m/min) para $d= 1$ mm.....	74
Fig. 4.7	Gráfica comparativa $f$ (mm/rev) vs $V_c$ (m/min) para $d= 1,5$ mm.....	74
Fig. 4.8	Gráfica comparativa $f$ (mm/rev) vs $d$ (mm) para $V_c= 47$ m/min.....	75
Fig. 4.9	Gráfica comparativa $f$ (mm/rev) vs $d$ (mm) para $V_c= 75$ m/min.....	75
Fig. 4.10	Gráfica comparativa $f$ (mm/rev) vs $d$ (mm) para $V_c= 104$ m/min.....	76
Fig. 4.11	Gráfica comparativa entre rugosidad real y rugosidad ideal con $r_e=0,4$ mm , $d=0,5$ mm .....	78
Fig. 4.12	Gráfica comparativa entre rugosidad real y rugosidad ideal con $r_e=0,8$ mm , $d=0,5$ mm .....	78
Fig. 4.13	Gráfica comparativa entre rugosidad real y rugosidad teórica con $r_e= 0,4$ mm y $d=0,5$ mm .....	79
Fig. 4.14	Gráfica comparativa entre rugosidad real y rugosidad teórica con $r_e= 0,8$ mm y $d=0,5$ mm .....	79

Fig. 4.15	Factor $ra_i$ con un avance de 0,30 (mm/rev).....	80
Fig. 4.16	Factor $ra_i$ con un avance de 0,15 (mm/rev).....	81
Fig. 4.17	Factor $ra_i$ con un avance de 0,09 (mm/rev).....	81
Fig. 5.1	Influencia del avance de la herramienta sobre la rugosidad superficial, para un proceso de torneado con el mismo ángulo de posición, radio de punta, profundidad y material. a) avance bajo y b) avance alto (el doble).....	85
Fig. 5.2	Influencia de la profundidad de corte sobre la rugosidad superficial, para un proceso de torneado con el mismo ángulo de posición, radio de punta, avance y material. a) profundidad alta (el doble) y b) profundidad baja.....	87
Fig. 5.3	Influencia del radio de punta de la herramienta sobre la rugosidad superficial, para un proceso de torneado con el mismo ángulo de posición, profundidad, avance y material. a) radio de punta bajo (0,8 mm) y b) radio de punta alto (1,2 mm).....	89

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Principales grupos de familias de aleaciones de aluminio (Asociación de Aluminio).....	19
Tabla 2.2	Avances recomendados con herramientas de acero rápido.....	31
Tabla 3.1	Diseño del experimento.....	54
Tabla 3.2	Especificaciones del rugosímetro.....	60
Tabla 3.3	Especificaciones del inserto CCGX 12 04 04-AL 1810.....	60
Tabla 3.4	Especificaciones del inserto CCGX 12 04 08-AL 1810.....	61
Tabla 3.5	Especificaciones Barra porta herramientas SCLCR 2020K 12.....	61
Tabla 3.6	Composición química de la aleación de aluminio AA A356.....	62
Tabla 3.7	Requerimientos tensiles de la aleación de aluminio AA A356-T6.....	63
Tabla 3.8	Presupuesto estimado.....	65
Tabla 4.1	Composición química de la barra de AA356 ensayada.....	67
Tabla 4.2	Propiedades tensiles obtenidas.....	68
Tabla 4.3	Medidas de la rugosidad superficial (Ra) obtenida en las operaciones de torneado para una velocidad de 104 m/min.....	71
Tabla 4.4	Medidas de la rugosidad superficial (Ra) obtenida en las	

	operaciones de torneado para una velocidad de 75 m/min.....	71
Tabla 4.5	Medidas de la rugosidad superficial (Ra) obtenida en las operaciones de torneado para una velocidad de 47 m/min.....	72
Tabla 4.6	Rugosidad superficial (Ra) promedio obtenida en las operaciones de torneado.....	72
Tabla 4.7	Comparativa entre rugosidad ideal, teórica y experimental con las distintas combinaciones de parámetros.....	77
Tabla 4.8	Factores Inter-sujetos empleados en el Análisis de Varianza Factorial para cada material.....	82
Tabla 4.9	Tabla de resultados del Análisis de Varianza para el ALUMINIO AA356 T6.....	83

## INTRODUCCIÓN

Dentro del mundo de la tecnología, se observan gran cantidad de piezas las cuales están constantemente en contacto con otras, produciéndose roce entre ellas a altas velocidades. El acabado final y la textura de una superficie son de gran importancia e influencia para definir la capacidad de desgaste, lubricación, resistencia a la fatiga y aspecto externo de una pieza o material, por lo que la rugosidad es un factor importante a tener en cuenta.

Una buena combinación de los parámetros de corte involucrados en la operación de mecanizado nos asegura la obtención de valores de rugosidad superficial deseados.

Los procesos de mecanizado como el torneado tienen como objetivo producir piezas o partes con distintos tipos de superficies, buscando siempre maximizar la calidad del producto y minimizar los costos operativos. Esto depende de las variables seleccionadas por el operador tales como, el avance de la herramienta, la velocidad de corte, profundidad de corte y el radio de punta de la herramienta, todas estas variables afectan la rugosidad superficial.

Si se requiere de una calidad superficial dada, es importante que al momento de realizar un torneado todos estos parámetros sean adecuadamente estudiados, de lo contrario se pueden obtener superficies no deseadas y generar pérdidas cuantiosas en tiempo y recursos.

El presente estudio tiene como finalidad analizar la influencia de los parámetros de corte y la geometría de la herramienta en la rugosidad superficial obtenida en el torneado de la aleación AA A356-T6. Para ello se realizaron ensayos de cilindrado externo en las barras de aluminio utilizando un torno paralelo, variando los parámetros de corte y registrando la medición de la rugosidad de superficie con un rugosímetro digital. Con esta serie de datos obtenidos se realizarán gráficas, las cuales permitirán visualizar las relaciones existentes entre los diferentes parámetros y la rugosidad superficial medida, además de permitir comparar los valores de rugosidad obtenidos con los valores teóricos y así establecer las conclusiones.

En el capítulo I, se detalla el problema, los objetivos a alcanzar, la justificación de estudio, así como la limitación y delimitación de la investigación.

El capítulo II, presenta los antecedentes de la investigación, así como las bases teóricas necesarias para el desarrollo de la misma.

El capítulo III, comprende el marco metodológico en el cual se estudia el tipo y nivel de investigación, los equipos, instrumentos y materiales necesarios para la realización de los ensayos, y los métodos utilizados para la obtención de resultados.



**CAPÍTULO I.  
EL PROBLEMA**

---

---

## **CAPÍTULO I**

---

---

### **EL PROBLEMA**

#### **1.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

La rugosidad superficial es uno de los parámetros de calidad más críticos en muchos productos o piezas mecánicas. Con el crecimiento de los mercados, los consumidores demandan ahora más calidad en los productos, haciendo que la rugosidad superficial se convierta en uno de los más importantes aspectos a tomar en cuenta en la industria manufacturera.

Las aleaciones de aluminio como la A356, A356.2 y F352 son ampliamente utilizadas en empresas metalmecánicas como: Rualca, Danaven, Madeal, Aluminios Reynolds, Sural; para la fabricación de elementos mecánicos, tales como: pistones, rines, carcazas de cajas, distintos componentes de la suspensión y dirección de automóviles, entre otros, donde el acabado superficial final es obtenido directamente en los procesos de torneado, este acabado podría

influir en el funcionamiento de estas piezas mecánicas y en los costos de producción. Muchos defectos como ralladuras en la superficie del producto, micro grietas, que ocasionan a su vez fallas, algunas de estas catastróficas, han sido atribuidas al acabado superficial de estos componentes mecánicos.

Con este trabajo se pretende brindar información relevante acerca de la predicción de la rugosidad superficial de la aleación de aluminio A356-T6 obtenida en el proceso de torneado a fin de determinar cuál es la influencia de los parámetros de corte y la geometría de la herramienta para así obtener las condiciones más favorables para garantizar un mejor acabado sobre el producto terminado.

## **1.2.- OBJETIVOS.**

### **1.2.1.- GENERAL.**

Analizar la influencia de los parámetros de corte y la geometría de la herramienta en la rugosidad superficial obtenida en el torneado de la aleación AA A356-T6.

### **1.2.2.- ESPECÍFICOS.**

- Analizar la influencia del avance en la rugosidad superficial.
- Analizar la influencia de la profundidad de corte en la rugosidad superficial.
- Analizar la influencia de la velocidad de corte en la rugosidad superficial.
- Analizar la influencia del radio de punta de la herramienta de corte en la rugosidad superficial.
- Analizar la relación entre la rugosidad real e ideal.

## **1.3.- JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.**

En la industria metalmecánica y manufacturera se está utilizando la aleación de aluminio A356 para la fabricación de una amplia variedad de piezas automotrices como rines y brazos de suspensión.

La importancia de este trabajo está en obtener datos experimentales sobre la influencia de los parámetros de corte y la geometría de la herramienta que ayuden a determinar las condiciones y parámetros más favorables en el proceso

de torneado, para garantizar que el producto terminado cumpla con las especificaciones técnicas requeridas de rugosidad superficial.

#### **1.4.- LIMITACIONES**

- Se utilizaron las máquinas-herramientas del Laboratorio de Procesos de Fabricación, lo cual restringió los valores de velocidad de corte y avance, ya que se aplicaron los permitidos en estas máquinas.

#### **1.5.- DELIMITACIONES Y/O ALCANCES.**

- La aleación de aluminio que se utilizara será la A356-T6.
- Se estudiarán algunas variables operacionales que afectan de forma directa al acabado superficial, estas son la velocidad de corte, el avance, la profundidad de corte, y el radio de punta de la herramienta.
- El estudio se realizará con tres niveles de: velocidad de corte, avance y profundidad de corte.
- El estudio se realizará con dos variaciones del radio de punta de la herramienta.
- El estudio se realizará sólo en una máquina –herramienta (torno).



**CAPÍTULO II.  
MARCO TEÓRICO**

---

---

## CAPÍTULO II

---

---

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1.- ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.

2.1.1.- Alvarez D., Antonio J. (2003). *Determinación de los parámetros óptimos de mecanizado de aleaciones de aluminio en operaciones de fresado*. Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Este trabajo tenía como objetivo general determinar los parámetros óptimos de corte que permitirían obtener un mejor acabado superficial en mecanizado de fresadora, para aleaciones de aluminios comerciales. Entre sus objetivos específicos se destacan los siguientes: Determinar la velocidad de corte, avance, número de filos cortantes de la herramienta, profundidad y fluido de corte para obtener excelente acabado superficial al mecanizar aleación de aluminio 62.S en fresadora; indicar los parámetros de corte de la aleación de aluminio que produce el mejor acabado superficial en mecanizado con maquina fresadora. Como conclusión más importante se destaca que para la aleación de aluminio 62.S se obtuvieron valores de rugosidad de  $0.3 \mu\text{m}$  , utilizando velocidad de corte de 82.46 m/min, velocidad de avance de 35mm/min, herramienta con 2 filos cortantes, profundidad de corte 0.5 mm y fluido de corte kerosene.

2.1.2.- College of Engineering and technology. (2001). *Estudio experimental del impacto de los parámetros de torneado en la rugosidad superficial*. (Reference Number: 03/2001/150001). Bradley University. Peoria, USA. Chang-Xue Feng.: Autor.

El objetivo general de este trabajo constaba en realizar un estudio experimental de distintos parámetros de torneado en la rugosidad superficial. Entre sus objetivos específicos se destacan los siguientes: Determinar el impacto o influencia del avance, la profundidad de corte, la dureza del material a trabajar, la velocidad de rotación y el ángulo de corte de la herramienta en la rugosidad. Las conclusiones más importantes obtenidas fueron que la profundidad de corte no influye en la rugosidad superficial como para considerarlo como un parámetro relevante; el avance, radio de la herramienta, material a trabajar y la velocidad de rotación si tienen un significativo impacto en la rugosidad superficial. Los parámetros que más interacción mostraron fueron el material a trabajar, la velocidad de rotación y el ángulo de corte de la herramienta.

**2.1.3.-** Cordoba Charles, Surmay Jean. (2005). *Influencia de las variables de mecanizado en el torneado de piezas automotrices (discos de frenos)*. Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Este trabajo tenía como objetivo general estudiar la influencia de las variables de mecanizado en el torneado y acabado superficial de las pistas de discos de frenos. Entre sus objetivos específicos se destacan los siguientes: Establecer las variables que influyen en el acabado de las piezas mecanizadas (discos de frenos); optimizar las variables de mecanizado para un adecuado acabado superficial de las piezas (pistas de los discos de freno), de acuerdo a los rangos de dureza de las piezas. Como conclusión más importante se obtuvo que los parámetros óptimos de mecanizado de los discos de freno son: el avance  $f=0,2540$  mm/rev, ya que según la rugosidad es la condición donde es más uniforme por cada cara y por más cantidad de discos mecanizados, manteniendo una velocidad de giro mayor para garantizar también una rugosidad uniforme, siendo óptimo a  $N=622$  rpm, ya que a  $N=1058$  rpm, representa un trabajo forzado por parte de la máquina a bajos avances y mayor desgaste de la herramienta. Según desgaste, este avance garantiza una mayor duración útil de la herramienta.

**2.1.4.-** Garmendia Edgar, Eduardo Marrero. (2002). *Determinación de los parámetros óptimos de mecanizado de aleaciones de aluminio en operaciones de torneado.* Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

En este trabajo se realizó un estudio basado en la Determinación de los parámetros óptimos de mecanizado de aleaciones de aluminio en operaciones de torneado. El objetivo principal fue determinar los valores de los parámetros de corte que permitan obtener un mejor acabado superficial del mecanizado en torno, de las aleaciones de aluminio 62S, 6261, 6063 y Ezcute. Finalmente el estudio permitió concluir que a medida que se aumentan los valores de profundidad de corte y avance de la herramienta aumenta la rugosidad superficial de la pieza maquinada, y a medida que aumentaba el radio de nariz y la velocidad de corte, el acabado superficial mejoraba.

## **2.2.- BASES TEÓRICAS.**

### **2.2.1.- Historia del Aluminio**

En las últimas décadas se han descubierto algunos metales de gran utilidad, que eran prácticamente desconocidos hace aproximadamente un siglo y algunos de los cuales no se han desarrollado hasta nuestra generación. El ejemplo más sorprendente es el aluminio, el cual es el elemento metálico más abundante de la corteza terrestre; superado sólo por los no metales oxígeno y silicio.

En 1807, Humphrey Davy propuso el nombre *aluminum* para este metal aún no descubierto, pero más tarde decidió cambiarlo por *aluminium* por coherencia con la mayoría de los nombres de elementos, que usan el sufijo *-ium*. De éste derivaron los nombres actuales en otros idiomas; no obstante, en los

EE.UU. con el tiempo se popularizó el uso de la primera forma, hoy también admitida por la IUPAC aunque prefiere la otra.

El aluminio, de símbolo Al, cuyo número atómico es 13, se encuentra en el grupo 13 de la tabla periódica. El químico danés Hans Christian Oersted aisló el aluminio por primera vez en 1825, por medio de un proceso químico que utilizaba una amalgama de potasio y cloruro de aluminio.

Entre 1827 y 1845, el químico alemán Friedrich Wöhler mejoró el proceso de Oersted utilizando potasio metálico y cloruro de aluminio. Wöhler fue el primero en medir la densidad del aluminio y demostrar su ligereza. En 1854, Henri Sainte-Claire Deville obtuvo el metal en Francia reduciendo cloruro de aluminio con sodio. Con el apoyo financiero de Napoleón III, Deville estableció una planta experimental a gran escala, y en la exposición de París de 1855 exhibió el aluminio.

El proceso que se utiliza en la actualidad para la obtención del aluminio fue inventado por un joven estadounidense cuando todavía era un estudiante del “Oberlin Collage” en 1886. Una singular coincidencia hizo que Paul Héroult, de la misma edad que Hall, realizara el mismo descubrimiento, de modo independiente, en Francia y, aproximadamente, de forma simultánea. Ambos descubrieron que el aluminio o alúmina se disuelve en criolina fundida ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), pudiendo ser descompuesta electróliticamente y obtener metal fundido en bruto. Como resultado del descubrimiento de Hall y Héroult se hizo económicamente practicable la producción de aluminio a gran escala por primera vez. Ello posibilitó que el aluminio pasara a ser un metal común y familiar.

El aluminio tiene dos grandes ventajas sobre el acero. Primero es muy liviano, un volumen dado de aluminio pesa menos de 1/3 del mismo volumen de acero. Los únicos metales más ligeros son el litio, el berilio y el magnesio. Debido a su elevada proporción resistencia-peso es muy útil para construir aviones, vagones ferroviarios, cohetes, automóviles, entre otros. En segundo lugar, su

corrosión se presenta en forma de una capa delgada y transparente, que protege las capas más profundas, sin afectar el aspecto del metal.

Las aleaciones de aluminio pueden ser mecanizadas fácilmente y económicamente. Debido a su compleja estructura metalográfica, las características de mecanizado son superiores a las del aluminio puro. Los micro constituyentes presentes en las aleaciones de aluminio tienen importantes efectos en las características de mecanizado. Aleaciones que contienen más del 10% Si, son las más difíciles de mecanizar porque las partículas duras libres del silicio causan desgaste rápido de la herramienta.

### **2.2.2.- Aleaciones de Aluminio.**

El aluminio y sus aleaciones se caracterizan por la relativamente baja densidad (2.7 g/cc comparada con 7.9 g/cc del acero), elevadas conductividades eléctrica y térmica y resistencia a la corrosión en algunos medios, incluyendo el atmosférico. A muchas de estas aleaciones se les puede dar formas diferentes con facilidad debido a su elevada ductilidad; esto es evidente en el aluminio puro, que se puede convertir en papel y enrollar.

El aluminio tiene una estructura cúbica centrada en las caras y es dúctil incluso a temperatura ambiente. La principal limitación del aluminio es la baja temperatura de fusión (660°C), que restringe su campo de aplicación. La resistencia mecánica del aluminio se logra por acritud y por aleación; sin embargo ambos procesos disminuyen la resistencia a la corrosión. Los principales elementos de aleación son cobre, magnesio, silicio, manganeso y zinc. Algunas de las aplicaciones más comunes de las aleaciones de aluminio son: partes estructurales de los aviones, latas para bebidas refrescantes, partes de las carrocerías de autobuses y de los automóviles (culatas, pistones y colectores de escape).

Actualmente se presta mucha atención a las aleaciones de aluminio y de otros metales de baja densidad (Mg,Ti) como materiales utilizados en los transportes, debido al efecto de ahorro de combustible. Una importante característica de estos materiales es la resistencia específica, cuantificada como la relación entre resistencia a la tracción y densidad. Aunque una aleación de estos metales tenga una resistencia a la tracción inferior a la de un material más denso (acero), para un peso determinado puede aguantar una carga mucho mayor.

El aluminio se utiliza principalmente en forma de aleaciones de aluminio puro combinado con otros elementos, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas del metal, aumentando en especial la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión.

### **Aleaciones en aluminio para fundición en arena.**

La mayor parte de las aleaciones están basadas en sistemas de aluminio-cobre o aluminio-silicio, con adiciones para mejorar las características de fundición o de servicio. Entre las aleaciones aluminio-cobre, la que contiene 8% de cobre ha sido usada por mucho tiempo como la aleación para fines generales, aunque las adiciones de silicio y hierro, mejoran las características de la fundición por que la hacen menos quebradiza en caliente; la adición de zinc, mejora su maquinabilidad. Las aleaciones con 12% de cobre son ligeramente más resistentes que las de 8%, pero considerablemente menos tenaces.

Las aleaciones de aluminio- silicio son de gran aplicación por sus excelentes cualidades para la fundición y su resistencia a la corrosión; no son quebradizas en caliente y es fácil obtener con ellas fundiciones sólidas en secciones gruesas o delgadas, la más comúnmente utilizada es la que contiene 5% de silicio, se solidifica normalmente con una gruesa estructura hipereutéctica que se modifica antes de fundirse por la adición de una pequeña cantidad de sodio

para darle una estructura fina eutéctica de mayor resistencia mecánica y tenacidad, el contenido de hierro debe ser bajo para evitar la fragilidad. Las aleaciones de aluminio-magnesio son superiores a casi todas las otras aleaciones de fundición de aluminio en cuanto a resistencia, corrosión y maquinabilidad; además de excelentes condiciones de resistencia mecánica y ductilidad.

### **Aleaciones para fundición en moldes permanentes.**

El empleo mayor se encuentra en los émbolos para motores de combustión; es conveniente que sean ligeros, de baja dilatación térmica y de buenas propiedades a temperaturas elevadas.

### **Aleaciones para fundición a presión.**

Deben poseer una fluidez considerable y no deben ser quebradizas en caliente, debe conservarse baja la absorción de hierro.

### **2.2.3.- Designaciones de las aleaciones de aluminio.**

Se designan con un número de 4 dígitos de acuerdo con el sistema adoptado por la Aluminium Association. El primer dígito indica el tipo de aleación, de acuerdo con el elemento principal. El segundo indica las aleaciones específicas en la aleación, los dos últimos indican la aleación específica de aluminio o la pureza de éste. La designación del temple indica el tratamiento que ha recibido la aleación para llegar a su condición y propiedades actuales. El temple se indica con las letras: O(recocidas), F(tal como fue fabricada),

H(trabajada en frío) o T. Las aleaciones de aluminio forjado se dividen en dos clases: endurecidas y reforzadas solo con trabajo en frío y las que deben sus propiedades mejoradas al tratamiento térmico.

Las aleaciones más importantes endurecibles al trabajarlas son el aluminio comercialmente puro (1100) o la aleación con 1.25% de manganeso (3003); las cuales pueden endurecerse con trabajo en frío, pero no se someten a tratamiento térmico.

Las aleaciones del tipo duraluminio son de alta resistencia mecánica, se trabajan con facilidad en caliente. Se debe someter a trabajo en frío prolongado después de transcurridas unas cuantas horas del temple por inmersión, donde la resistencia a la corrosión es máxima.

La mayoría de las aleaciones tratables térmicamente son menos resistentes a la corrosión.

Muchas de las aleaciones susceptibles de tratamiento térmico se encuentran en forma de lámina o con un recubrimiento de aluminio de gran pureza o de aleación resistente a la corrosión en cada lado; estos productos se conocen como aleaciones alclad con excelente resistencia a la corrosión.

Un nuevo tipo de producto de aluminio forjado, denominado APM, tienen resistencia mecánica a temperaturas elevadas, estabilidad y resistencia al escurrimiento plástico, superiores a las de cualquier aleación conocida de aluminio. Es un cuerpo compacto de polvo fino de aluminio de alta pureza con óxido de aluminio.

- **Productos laminados.**

**Aleaciones 1050 y 1070**

Máxima resistencia a la corrosión, fácil de soldar al arco en atmósfera inerte o por soldadura fuerte, excelente formabilidad.

USOS: En forma de lámina o papel (foil) se usa en la industria química y en la de preparación de alimentos principalmente.

**Otras aleaciones del 1000 y Grupo 3000.**

Muy resistentes a la corrosión, excelentes características para soldarse al arco o soldadura fuerte, permiten ser formadas, dobladas o estampadas con facilidad

USOS: En forma de lámina son ideales para la fabricación de utensilios de uso doméstico, ductos, envases y en general para cualquier aplicación de láminas metálicas donde no se requiera una resistencia estructural. Las aleaciones del grupo 1000 son ideales para la fabricación de papel de aluminio (foil) para empaquetadoras de alimentos, cigarrillos, regalos, etc.

**Aleaciones del grupo 5000.**

Alta resistencia a la corrosión, pueden soldarse fácilmente con equipo de arco en atmósfera de gas inerte, tienen mayor resistencia mecánica que las aleaciones de los 1000 y 3000.

USOS: En forma de placa o lámina se usan en la industria del transporte en carrocerías, tanques o escaleras; son ideales para cuerpos de embarcaciones marítimas (Aleación 5052) para la fabricación de carros de ferrocarril o de trenes urbanos; fabricación de envases abre fácil para bebidas gaseosas y en general para aplicaciones estructurales.

- **Productos extruidos :**

**Aleación 1050**

Alta resistencia a la corrosión, buena formabilidad fácil de soldar al arco en atmósfera inerte.

USOS: Como tubería en la industria química y alimenticia.

**Aleación 6063**

Resistencia mecánica moderada, fácil de soldar al arco en atmósfera inerte o por soldadura fuerte, excelente resistencia a la corrosión, buena formabilidad, excelentes características para ser anodinada.

USOS: Es la aleación por excelencia para la fabricación de perfiles arquitectónicos, tubería y en general para aplicaciones industriales donde la resistencia mecánica requerida es moderada.

**Aleación 6061**

Buena resistencia mecánica, buena conductividad eléctrica (55% mínima IACS).

USOS: Alambre para conductores eléctricos, perfiles para uso arquitectónico e industrial donde se requiere una resistencia mecánica superior a la de aleación 6063.

**Aleación 6101**

Mayor resistencia mecánica, facilidad para soldarse al arco, excelente resistencia a la corrosión, formabilidad regular (dependiendo del temple) y buenas características para ser maquinada.

USOS: Perfiles para usos estructurales, barras para maquinado de piezas, elementos de carga en vehículos automotores.

▪ **Productos fundidos :**

**Aleaciones del grupo 100.**

Alta conductividad eléctrica, buena apariencia al anodizar las piezas. Puede usarse en procesos de Die Casting, moldeado en arena y molde permanente.

USOS: Pistones, válvulas, cabezas de cilindros, engranes, partes automotrices de tipo estructural en general.

**Aleaciones del grupo 300.**

Propiedades mecánicas moderadas, muy buena fluidez, fácil de soldar. Se usa en cualquier proceso de fundición pero su mejor aprovechamiento es en el proceso de inyección a presión.

USOS: Sus usos van desde reflectores y parrillas decorativas hasta aplicaciones en la industria aeroespacial.

En términos generales podemos asegurar que el aluminio puede ser usado en un sinnúmero de aplicaciones y que la información antes proporcionada es solo con la idea de dar algunas aplicaciones muy generales.

Al alear el aluminio con otros metales, en proporciones muy pequeñas, pueden cambiarse radicalmente las propiedades y características del metal original con esta ventaja se podrá obtener la pieza, parte o elemento que requiera.

**Tabla 2.1** Principales grupos de familias de aleaciones de Aluminio.

<i>Aleaciones con sus principales elementos</i>	<i>Series</i>
Aluminio sin alear mínimo 99% o superior.	1XXX
Aleaciones de aluminio agrupadas por los principales elementos de aleación:	
Cobre	2XXX
Manganeso	3XXX
Silicio	4XXX
Magnesio	5XXX
Magnesio y silicio	6XXX
Zinc	7XXX
Otros elementos	8XXX
<b>Series no usuales</b>	9XXX

**Fuente:** Aluminium Association

#### 2.2.4.- Designación de tratamiento térmico básico.

**F-** Tal como se fabricó. Sin control de la cantidad de endurecimiento por deformación, sin límites de propiedades mecánicas.

**O-** Recocido y recristalizado. Tratamiento con mínima resistencia y máxima ductilidad.

**H-** Endurecido por deformación (véanse las siguientes subsecciones para las subdivisiones).

**T-** Tratado térmicamente para producir tratamientos estables diferentes del F o del O (véanse los siguientes subapartados para las subdivisiones).

---

---

### **Subdivisiones del endurecimiento por deformación.**

**H1-** Solamente endurecido por deformación. El grado de endurecimiento por deformación se indica por un segundo dígito y varía desde  $\frac{1}{4}$  de endurecimiento (H12) hasta endurecimiento total (H18), que se obtiene con aproximadamente una reducción de área del 75 %.

**H2-** Endurecido por deformación y recocido parcialmente. Tratamiento entre un endurecimiento de  $\frac{1}{4}$  y endurecimiento total obtenido por recocido parcial de los materiales deformados en frío, con resistencias iniciales superiores a las deseadas. Los tratamientos son H22, H24, H26 y H28.

**H3-** Endurecido por deformación y estabilizado. Los tratamientos para aleaciones de aluminio-magnesio sobremaduradas que se endurecen por deformación y se calientan a baja temperatura para incrementar la ductilidad y estabilizar las propiedades mecánicas. Tratamientos H32, H34, H36 y H38.

### **Subdivisiones del tratamiento térmico.**

**T1-** Maduración natural. Se enfría el producto desde un proceso de moldeado a alta temperatura y se madura de modo natural hasta una condición estable.

**T3-** Tratamiento térmico de solubilización, trabajado en frío y maduración natural hasta condición estable.

**T4-** Tratamiento térmico de solubilización y maduración natural hasta condición estable.

**T5-** Enfriado desde el proceso de conformado a temperaturas elevadas y a continuación maduración artificial.

**T6-** Tratamiento térmico de solubilización y maduración artificial.

**T7-** Tratamiento térmico de solubilización y estabilización.

**T8-** Tratamiento térmico de solubilización, trabajado en frío y maduración artificial.

### **2.2.5- Mecanizado**

El proceso de fabricación mediante mecanizado consiste en arrancar en forma de virutas o partículas, el exceso de material de un semiproducto previamente concebido, utilizando las máquinas y herramientas cortantes adecuadas, para conseguir la geometría de la pieza deseada y las especificaciones planteadas.

La obtención de las dimensiones y geometría definitiva de una pieza mediante el arranque de viruta, se realiza partiendo de semiproductos fabricados por fundición, forja, laminación o por pulvimetalurgia, a los que, en algunos casos, se les han efectuado operaciones previas de doblado, soldadura u otras.

### **2.2.6.- Proceso de Torneado**

El torneado es una operación de mecanizado en el cual una herramienta de punta sencilla remueve material de una superficie de trabajo cilíndrica en rotación. El torneado se lleva a cabo en una máquina herramienta llamada *torno*, la cual operan haciendo girar la pieza a mecanizar sujeta en el cabezal o fijada entre los puntos de centraje, mientras que una o varias herramientas cuyo filo de corte es empujado contra la superficie de la pieza, arrancando la viruta, en una serie de operaciones de torneado diferentes.

El torno es una máquina que trabaja en el plano, porque solo tiene dos ejes de trabajo, (Z y X) de una parte el carro que desplaza las herramientas a lo largo de la pieza y produce torneados cilíndricos, y de otra el carro transversal que se

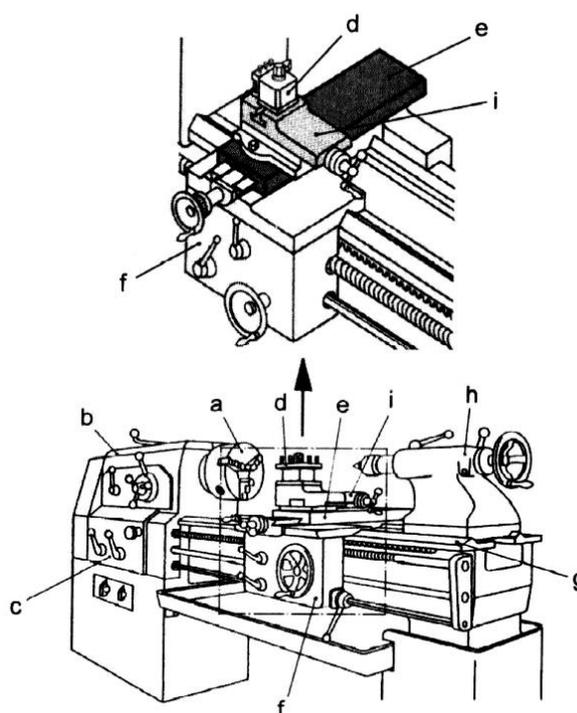
desplaza de forma perpendicular al eje de simetría de la pieza, con este carro se realiza la operación denominada refrentado.

Los tornos copiadores, automáticos y de Control Numérico llevan sistemas que permiten trabajar los dos carros de forma simultánea, consiguiendo cilindrados cónicos y esféricos. Los tornos paralelos llevan montado un tercer carro, de accionamiento manual y giratorio, llamado Charriot, montado sobre el carro transversal, con el Charriot, inclinado a los grados necesarios es posible mecanizar conos. Encima del charriot, va fijado la torreta portaherramientas.

Actualmente se utilizan en las industrias de mecanizados los siguientes tipos de tornos que dependen de la cantidad de pieza a mecanizar por serie de la complejidad de la pieza y de la envergadura de las piezas.

- Torno Paralelo
- Torno Revolver
- Torno Horizontal (torno de mandril)
- Torno Vertical
- Tornos Controlados Numéricamente (CNC)

El torno paralelo es una de las maquina herramientas más comunes, las partes que componen un torno paralelo se muestra en la figura 2.1.



a – Plato de sujeción de garras.  
 b – Cabezal.  
 c – Caja de Engranajes.  
 d - Torre porta-herramienta.  
 e - Carro transversal

g – Bancada.  
 f - Carro principal.  
 h - Cabezal móvil (Contrapunto).  
 i - Carro porta-herramientas.

**Figura 2.1** Partes de un torno paralelo.

### 2.2.6.1.- Operaciones de torneado

#### **Torneado exterior:**

Cilindrado, refrentado, ranurado, roscado, moleteado, cilindrado cónico, cilindrado esférico, segado, chaflanado, excéntricas, espirales.

#### **Torneado interior:**

Taladrado, mandrinado ranurado, mandrinado cónico, mandrinado esférico, roscado, refrentado interior, chaflanado interior.

No todos los tornos pueden realizar todas estas operaciones que se indican, eso depende del tipo de torno que se utilice y de los accesorios o equipamientos que tenga.

Los tornos se utilizan para modelar superficies cónicas, cilíndricas y esféricas de diversos objetos y materiales diferentes. El tamaño y potencia de los tornos se refleja en las dimensiones máximas que pueden tener las piezas que se quieran mecanizar y la cantidad de viruta que se puede sacar en cada pasada.

Entre las operaciones de torneado más comunes tenemos:

**a) Refrentado:** La herramienta se mueve radialmente sobre el extremo de la pieza de trabajo con la finalidad de generar una superficie plana. (Figura 2.2 a)

**b) Torneado cónico:** la herramienta se mueve con cierto ángulo en línea recta (no paralela a la superficie) para generar una forma cónica. (Figura 2.2 b)

**c) Torneado de contornos:** La herramienta se mueve siguiendo un contorno diferente a la línea recta, para crear una forma contorneada. (Ver figura 2.2 c)

**d) Torneado de formas:** en esta operación una herramienta que tiene una forma definida se pone en contacto con el material y al darle un movimiento de penetración se obtiene la forma deseada en la pieza de trabajo. (Ver figura 2.2 d)

**e) Achaflanado:** La herramienta se utiliza para cortar un ángulo en la esquina del cilindro y formar lo que se llama “chaflán”. (Ver figura 2.2 e)

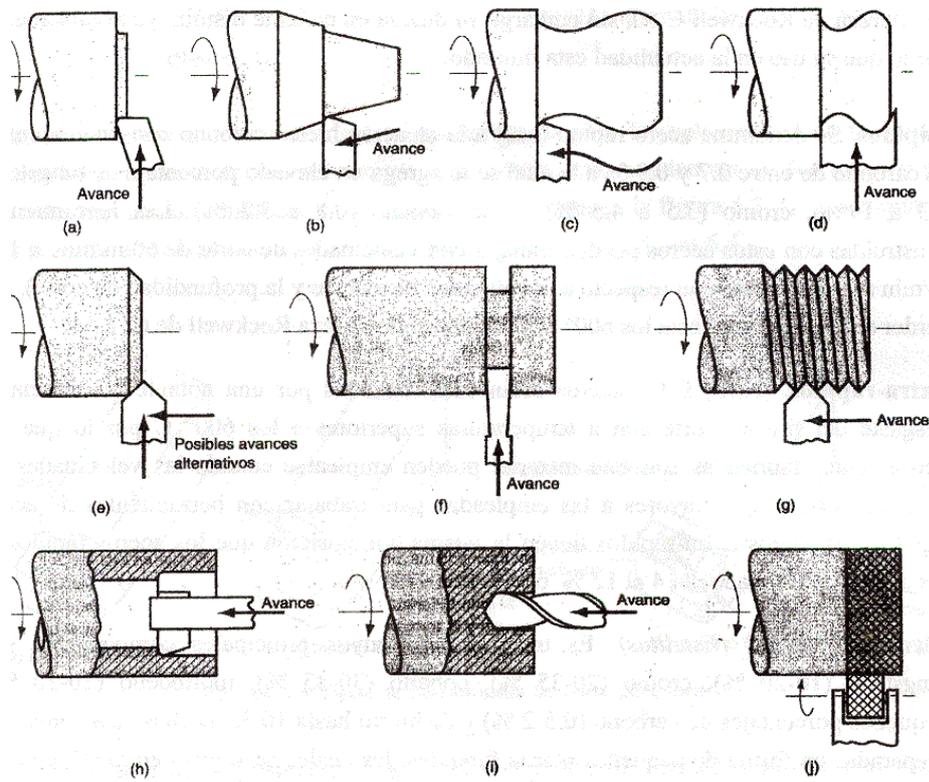
**f) Tronzado:** Esta operación se utiliza para cortar el material en dos partes, se le da movimiento de penetración a la herramienta especial para seccionar el extremo de la pieza de trabajo. (Ver figura 2.2 f)

**g) Roscado:** Esta operación puede llevarse a cabo de forma interna o externa, para ello se utiliza una herramienta puntiaguda que avanza linealmente a través de la superficie de la pieza de trabajo en rotación y en dirección paralela al eje de rotación, a una velocidad de avance suficiente para crear las hélices de la rosca, el paso de la rosca se obtiene por medio de la velocidad de avance seleccionada. (Ver figura 2.2 g)

**h) Perforado:** Esta operación también es conocida como mandrilado, permite agrandar un agujero utilizando una herramienta especial que avanza en línea recta paralela al eje de rotación, dentro del agujero inicial. Se utiliza para dar mejor acabado y tolerancias adecuadas al agujero interno. (Ver figura 2.2 h)

**i) Taladrado:** Esta operación se realiza colocando un mandril en el cabezal móvil y ajustando una broca en el mandril, se hace penetrar la broca en el material generándose el agujero concéntrico al eje de rotación del material. (Ver figura 2.2 i)

**j) Moletado:** Esta no es una operación de mecanizado porque no se remueve material. Es una operación de formado de metal (deformación plástica) que se usa para generar un rayado regular o patrón en la superficie de trabajo. Para ejecutar el grabado es necesario que la pieza gire lentamente a medida que se ejerce presión con el moleteador sobre la superficie. (Ver figura 2.2 j)



**Figura 2.2** Operaciones de mecanizado.

**Fuente:** Procesos de fabricación por arranque de viruta. Universidad de Carabobo.

### 2.2.6.2.- Movimientos de trabajo en la operación de torneado

- **Movimiento de corte:** por lo general se imparte a la pieza que gira rotacional mente sobre su eje principal. Este movimiento lo imprime un motor eléctrico que transmite su giro al husillo principal mediante un sistema de poleas o engranajes. El husillo principal tiene acoplado a su extremo distintos sistemas de sujeción (platos de garras, pinzas, mandrinos auxiliares u otros), los cuales sujetan la pieza a mecanizar.

- **Movimiento de avance:** es debido al movimiento de la herramienta de corte en la dirección del eje de la pieza que se está trabajando. En combinación con el giro impartido al husillo, determina el espacio recorrido por la herramienta por cada vuelta que da la pieza. Este movimiento también puede no ser paralelo al

eje, produciéndose así conos. En ese caso se gira el carro de debajo del transversal ajustando en una escala graduada el ángulo requerido, que será la mitad de la conicidad deseada.

- **Profundidad de pasada:** movimiento de la herramienta de corte que determina la profundidad de material arrancado en cada pasada. La cantidad de material factible de ser arrancada depende del perfil del útil de corte usado, el tipo de material mecanizado, la velocidad de corte, etc.

#### **2.2.6.3.- Características principales de los tornos.**

- Potencia en KW del motor eléctrico que tienen.
- Diámetro máximo de la pieza que permitan mecanizar (altura de puntos)
- Longitud máxima de la pieza que puedan mecaniza (longitud entre puntos)
- Gama de velocidades que tiene
- Gama de avances que tiene
- Características del manejo (manual, semiautomático o automático)

#### **2.2.7.- Herramientas de Corte para Tornos.**

Existe una amplia variedad de materiales utilizados para herramientas de corte, desarrollados desde el siglo 1800 hasta la fecha, la elección del material de la herramienta depende fundamentalmente de las propiedades mecánicas del material a mecanizar y de los requerimientos del proceso a realizar. En estas herramientas se requiere de elevada dureza y alta resistencia al desgaste, estas propiedades deben mantenerse a altas temperaturas debido a que en el proceso de mecanizado se alcanzan altas temperaturas. El desarrollo de nuevos materiales para herramientas ha logrado obtener materiales que cumplan con estos requerimientos por lo que en la actualidad e utilizan velocidades de corte más elevadas que en épocas anteriores. Entre los materiales utilizados para la fabricación de herramientas de corte están:

- **Aceros al Carbono y de baja aleación:** Fue el primer material utilizado como herramienta de corte, en el siglo 1800, se trataba térmicamente un acero al carbono para adquirir una dureza Rockwell C60, sin embargo su dureza en caliente disminuye notablemente por lo que su uso en la actualidad está limitado.
- **Rápidos (HS):** Se denomina acero rápido a la aleación hierro-carbono con un contenido de carbono de entre 0.7 y 0.9 % a la cual se le agrega un elevado porcentaje de tungsteno (13 a 19%), cromo (3.5 a 4.5 %), y de vanadio (0.8 a 3.2 %). Las herramientas construidas con estos aceros pueden trabajar con velocidades de corte de 60 m/min. a 100 m/min (variando esto con respecto a la velocidad de avance y la profundidad de corte), sin perder el filo de corte hasta, la temperatura de 600° C y conservando una dureza Rockwell de 62 a 64.
- **Extra-rápidos (HSS):** Estos aceros están caracterizados por una notable resistencia al desgaste del filo de corte aún a temperaturas superiores a los 600° C por lo que las herramientas fabricadas con este material pueden emplearse cuando las velocidades de corte requeridas son mayores a las empleadas para trabajar con herramientas de acero rápido. Los aceros extra-rápidos tienen la misma composición que los aceros rápidos, a los cuales se les añade del 4 al 12 % de cobalto.
- **Aleaciones duras (estelitas):** Es una aleación cuyos principales componentes son tungsteno (10-20 %), cromo (20-35 %), cobalto (30-35 %), molibdeno (10-20 %), pequeños porcentajes de carbono (0.5-2 %) y de hierro hasta 10 %. Dichas aleaciones son preparadas en forma de pequeñas placas fundidas, las cuales se sujetan en la extremidad maquina, de un mango de acero al carbono. Las herramientas construidas con estas aleaciones presentan las siguientes ventajas:

- a) Se pueden trabajar metales duros con altas velocidades de corte (de 5 a 10 veces superiores a las velocidades utilizadas con herramientas de acero rápido).
  - b) Conserva los filos de corte a temperaturas hasta de 800° C.
  - c) El afilado se realiza fácilmente a la muela como todas las herramientas de acero rápido y extra-rápido.
- **Carburos:** Son aleaciones en forma de pequeñas placas obtenidas por sinterización a temperaturas comprendidas entre 1400° C y 1700° C. Sus principales componentes son: carburo de tungsteno (WC), carburo - de titanio (TiC) o carburo de cobalto (CoC).
  - **Materiales cerámicos:** Es el producto obtenido por sinterización del óxido de aluminio combinado con óxido de sodio y óxido de potasio. Estos materiales aleados con óxido de silicio forman el compuesto para sinterizar a temperaturas próximas a 1800° C. Las placas de cerámica no resisten cargas de flexión superiores a los 40 kg/mm<sup>2</sup>, pero en cambio presentan una gran resistencia a la abrasión;, por. tal - motivo se emplean especialmente para el maquinado de metales no ferrosos, grafitos, etc.

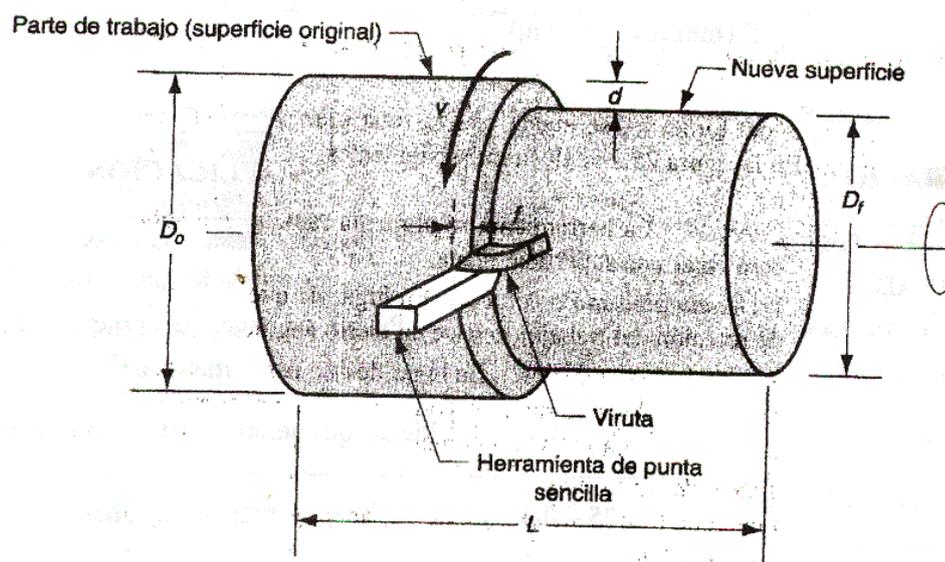
### 2.2.8.- Parámetros de corte en Torneado.

Los parámetros de corte utilizados en las operaciones de torneado son: la **velocidad de corte Vc**, es el movimiento principal y representa la velocidad tangencial del material, el **avance f**, es la velocidad lineal de la herramienta de corte, es un movimiento más lento que la velocidad de corte. Por ultimo la **profundidad de corte d**, es la profundidad de penetración de la herramienta dentro del material e indica la cantidad de material removido en la operación de mecanizado.

## Capítulo II: Marco Teórico

Estos parámetros de corte dependen básicamente del material de la herramienta de corte a utilizar, del material a ser mecanizado y de la operación a realizar. En todo proceso de mecanizado existe dos categorías: el mecanizado de desbaste primario (o burdo) en el cual se remueven grandes cantidades de material tan rápido como sea posible, con la finalidad de obtener una forma cercana a la requerida pero dejando algún material en la pieza para una operación posterior de acabado. Y el mecanizado de acabado en el cual se completa la forma requerida y se alcanzan las dimensiones finales, las tolerancias y el acabado superficial. En el acabado se utilizan bajos avances y velocidades de corte altas.

Los parámetros de corte recomendados se muestran en tablas y estos son obtenidos a partir de ensayos experimentales en los cuales se analiza el comportamiento de la herramienta y el material a mecanizar con diferentes profundidades de corte, avances y velocidades de corte.



**Figura 2.3** Parámetros de corte en el torneado.

**Fuente:** Procesos de fabricación por arranque de viruta. Universidad de Carabobo.

**Tabla 2.2** Avances recomendados con herramientas de acero rápido.

OPERACIÓN	AVANCE (mm/rev)	APLICACIÓN
DESBASTE A GRAN PASADA	1.0 - 1.5	Piezas con grandes aumentos de material procedente de forjado y fundición.
DESBASTE CON PASADA CORRIENTE PASADA ÚNICA	0.6 - 0.8	Piezas con aumentos prudentiales de material.
DESBASTE CON PASADA LIGERA	0.4 - 0.6	Piezas que serán rectificadas (sin afinado)
ACABADO	0.25 - 0.4	Piezas pequeñas.
TRONZADO	0.05 - 0.2	Piezas afinadas con cuchilla.
MOLETEADO	0.02 - 0.10	Utilizar el 75% de la velocidad de corte recomendada en la tabla 2.3
	0.02 - 0.10	Utilizar la velocidad de corte más baja que se pueda en el torno.

**Fuente:** Procesos de fabricación por arranque de viruta. Universidad de Carabobo.

### 2.2.9.- Ecuaciones básicas en el torneado.

**A) Velocidad de Corte:** 
$$V_c = \frac{\pi * D * N}{1000} \quad N = \frac{1000 * V_c}{\pi * D} \quad (\text{Ec. 2.1, 2.2})$$

Donde:

- $V_c$ : Velocidad de Corte (m/min)
- $N$ : Velocidad Angular (rpm)
- $D$ : Diámetro (mm)

Para Cilindrado y torneado Cónico: 
$$D = \frac{D_i + D_f}{2}$$

Para Tronzado y Refrentado: 
$$D = D_i$$

**B) Número de Pasadas:** 
$$N_p = \frac{D_i - D_f}{2 * d} \quad ; \quad d = \frac{D_i - D_f}{2 * N_p} \quad (\text{Ec. 2.3, 2.4})$$

Donde:

- $D_i$ : Diámetro inicial (mm)
- $D_f$ : Diámetro final (mm)
- $d$ : Profundidad de corte (mm)
- $N_p$ : Numero de pasadas

**C) Área de Corte (Sección de viruta):**  $A = f * d$  (Ec. 2.5)

- Donde:
- f: Avance (mm)
  - d: Profundidad de Corte (mm)
  - A: Área de Corte (mm<sup>2</sup>)

**D) Tasa de remoción de material:**  $V = f * d * Vc$  (Ec. 2.6)

- Donde:
- f: Avance (mm)
  - d: Profundidad de Corte (mm)
  - Vc: Velocidad de Corte (mm/min)
  - V: Velocidad de remoción de material (mm<sup>3</sup>/min)

**E) Velocidad de Avance Lineal:**  $fr = N * f$  (Ec. 2.7)

- Donde:
- f: Avance (mm)
  - N: Velocidad de Rotación (rpm)
  - fr: Velocidad de Avance lineal (mm/min)

**F) Tiempo de Mecanizado: (Cilindrado y torneado cónico)**

$$tc = \frac{L}{f * N} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

- Donde:
- L : Longitud total que recorre la herramienta de corte (mm)
  - f: Avance (mm)
  - N: Velocidad de Rotación (rpm)
  - tc: Tiempo de Corte (min)

**G) Tiempo de Mecanizado: (Tronzado y Refrentado)**

$$t_c = \frac{\theta_i}{2 * f * N} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

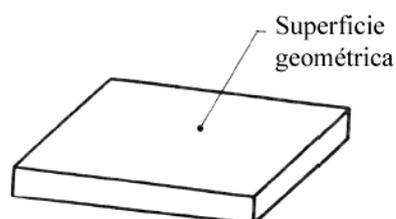
- Donde:
- $\theta_i$ : Diámetro inicial (mm)
  - f: Avance radial de la herramienta (mm)
  - N: Velocidad de Rotación (rpm)
  - $t_c$ : Tiempo de Corte (min)

**2.2.10.- Rugosidad****2.2.10.1.- Conceptos Básicos.**

La **rugosidad superficial** es el conjunto de irregularidades de la superficie real, definidas convencionalmente en una sección donde los errores de forma y las ondulaciones han sido eliminados.

**Superficie geométrica:**

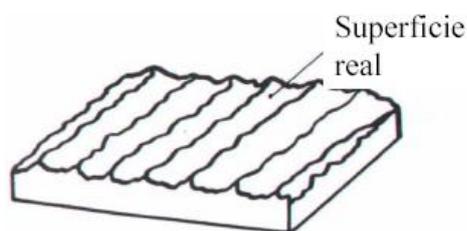
Superficie ideal cuya forma está especificada por el dibujo y/o todo documento técnico.



**Figura 2.4** Superficie geométrica.

**Superficie real:**

Superficie que limita el cuerpo y lo separa del medio que lo separa.

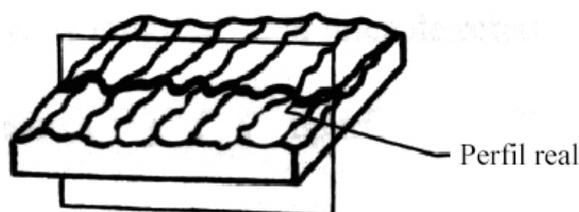


**Figura 2.5** Superficie real.

**Superficie de referencia:**

Superficie a partir de la cual se determinan los parámetros de rugosidad. Tiene la forma de la superficie geométrica. Se puede calcular por el método de mínimos cuadrados.

**Perfil real:** es la intersección de la superficie real con un plano normal.



**Figura 2.6** Perfil real.

**Longitud básica,  $l$ :**

Longitud de la línea de referencia utilizada para separar las irregularidades que forman la rugosidad superficial.

**Longitud de evaluación,  $l_n$ :**

Longitud utilizada para determinar los valores de los parámetros de rugosidad superficial. Puede comprender una o longitudes básicas.

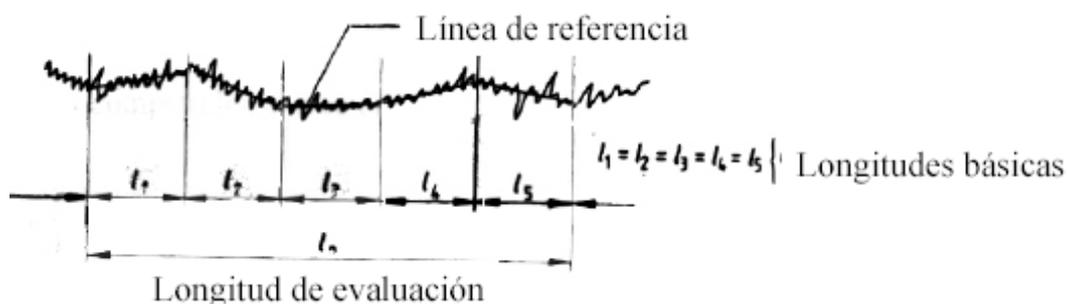


Figura 2.7 Longitudes básica y de evaluación.

**Línea media de los mínimos cuadrados:**

Línea de referencia cuya forma es la del perfil geométrico. Divide el perfil de modo que, en el interior de la longitud básica, la suma de los cuadrados de las desviaciones a partir de esta línea es mínima.

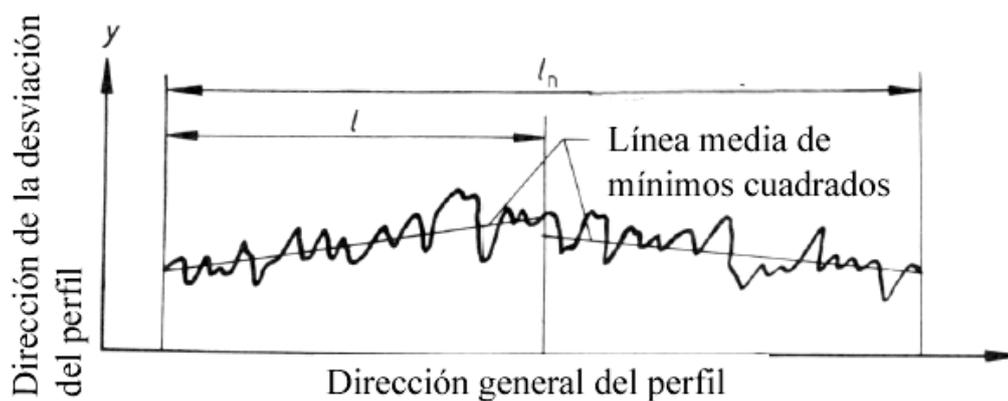


Figura 2.8 Línea media de los mínimos cuadrados.

**Línea media aritmética (o línea central):**

Línea de referencia con la forma del perfil geométrico, paralela a la dirección general del perfil en el interior de la longitud básica. Divide el perfil de modo que la suma de áreas comprendidas entre ella y el perfil es igual en la parte superior e inferior.

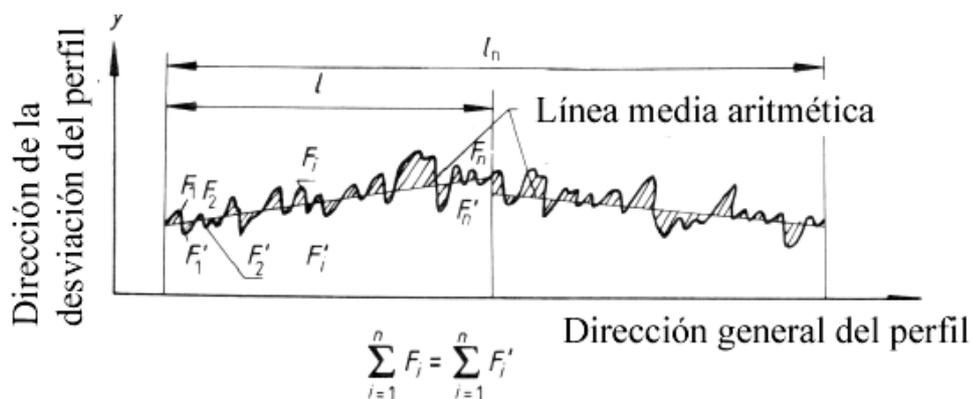


Figura 2.9 Línea media aritmética.

#### Cresta local del perfil:

Es la parte del perfil comprendida entre dos mínimos adyacentes del perfil.



Figura 2.10 Cresta local del perfil.

#### Valle local del perfil:

Parte del perfil comprendida entre dos máximos adyacentes del perfil.

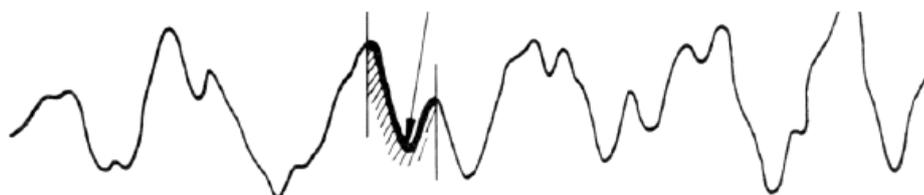


Figura 2.11 Valle local del perfil.

**Cresta del perfil:**

Parte del perfil dirigida hacia el exterior del cuerpo uniendo dos intersecciones consecutivas del perfil con la línea media.

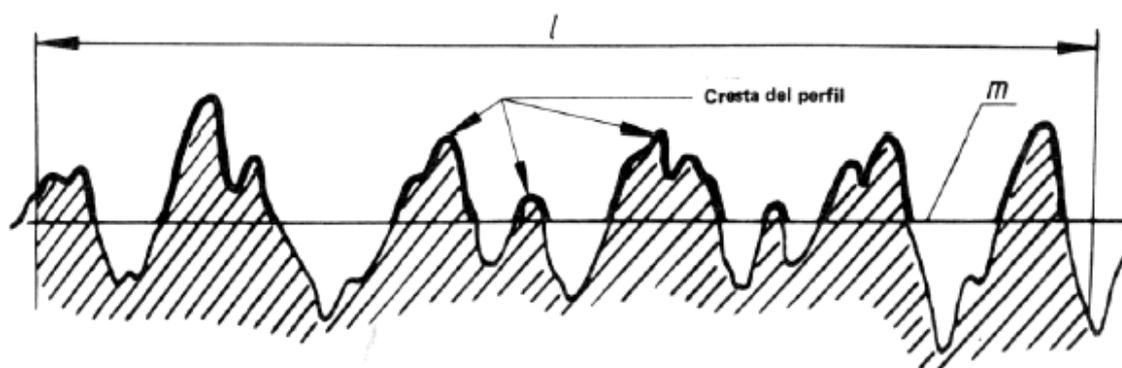


Figura 2.12 Cresta del perfil.

**Valle del perfil:**

Parte del perfil dirigida hacia el interior del cuerpo uniendo dos intersecciones consecutivas del perfil con la línea media.

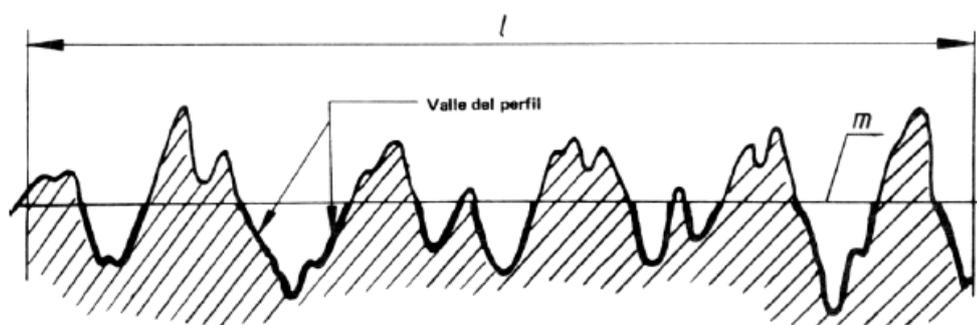


Figura 2.13 Valle del perfil.

### 2.2.10.2.- Factores que influyen en la rugosidad Superficial.

- A) Factores Geométricos:** son todos aquellos factores que determinan la geometría de la superficie de una pieza mecanizada, y entre ellos tenemos: tipo de operación de mecanizado, geometría de la herramienta de corte, avance de la herramienta o del material. Estos factores siempre van a estar

presente en la operación de mecanizado por lo que la rugosidad obtenida sería la mejor (Rugosidad ideal) si se controlan los factores que a continuación se detallan.

**B) Factores del material de trabajo:** son aquellos factores que surgen de la interacción entre el material y la herramienta de corte, y son los siguientes:

- Efectos de acumulación en el filo, debido a que se forma una acumulación en el filo que se rompe cíclicamente, las partículas se depositan en la superficie recién creada produciendo una textura rugosa como una lija.
- Daño causado a la superficie por la viruta enredada en el trabajo.
- Desgarramiento de la superficie cuando se trabaja con metales dúctiles
- Grietas por formación discontinua de viruta al mecanizar materiales frágiles.
- Fricción entre el flanco de la herramienta y la superficie recién generada.

**C) Factores de vibración y de la máquina herramienta:** estos factores se relacionan con la máquina herramienta, con la sujeción de la herramienta y con la instalación de la operación. Incluye la vibración de la maquina, la deflexión de los montajes, el juego en los mecanismos de avance, etc.

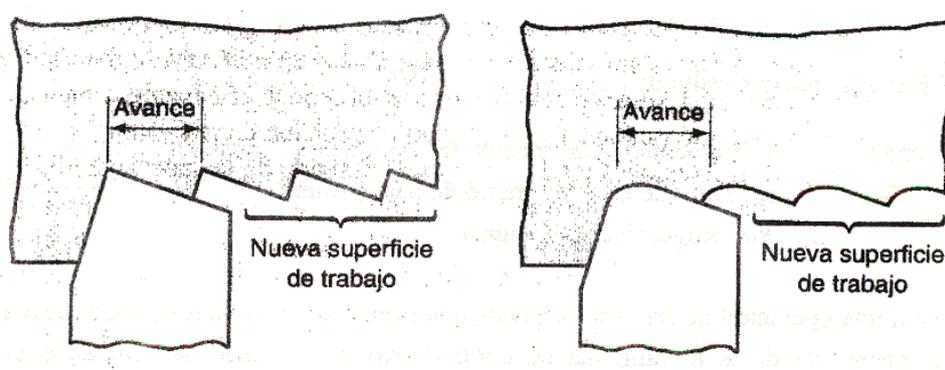
### 2.2.10.3.- Modelos Teóricos.

La rugosidad superficial obtenida en una operación de mecanizado puede considerarse como la suma de dos efectos independientes: la rugosidad “ideal” ( $Ra_i$ ) que es un resultado de la geometría de la herramienta y de la velocidad de avance, por lo que depende únicamente de los factores geométricos. Y la

rugosidad superficial “natural” ( $R_{an}$ ) que depende de las irregularidades en la operación y del material, por lo que depende de los factores asociados al material de trabajo, la vibración y la máquina en sí.

Por lo tanto la rugosidad superficial ( $R_a$ ) es:  $R_a = R_{a_i} + R_{an}$  (Ec. 2.10)

La rugosidad ideal representa el mejor acabado que se puede obtener de una forma de herramienta y avance seleccionado y sólo puede alcanzarse si se eliminan los otros factores que generan rugosidad natural. Dependiendo del tipo de herramienta de corte utilizada en el mecanizado se obtiene esta rugosidad que se observa en la figura 2.14.



**Figura 2.14** Rugosidad generada por a) Herramienta de corte con filo y b) Herramienta con radio de punta.

**Fuente:** Procesos de Fabricación por arranque de Viruta.

Para una operación de torneado se puede determinar la rugosidad ideal a partir de la geometría de la herramienta y el avance determinando el área del material removido:

- Herramienta de Filo pronunciado: 
$$Ra_i = \frac{f}{4(\cot(kr_e) + \cot(k're))} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Donde: f: Velocidad de avance de la herramienta  
 Kre: Angulo del filo principal (Angulo del filo de corte lateral)  
 K're: Angulo del filo secundario

Las variables utilizadas para la deducción de la rugosidad ideal en un proceso de torneado con herramienta de corte de filo pronunciado se observa en la figura. 2.15.

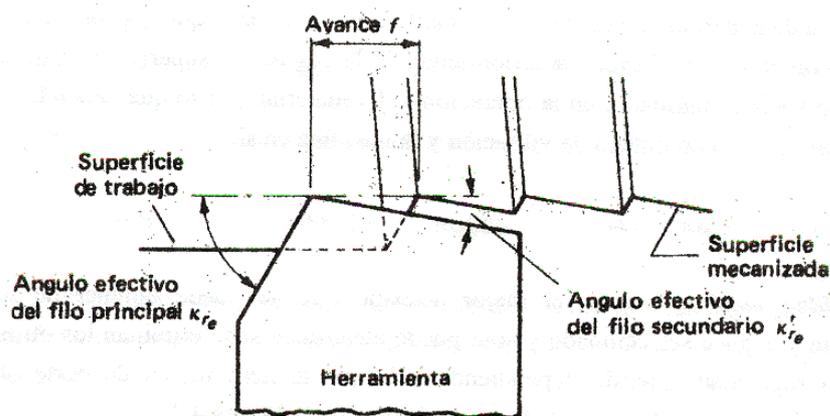


Figura 2.15 Rugosidad con herramienta de corte de filo pronunciado.

Fuente: Procesos de Fabricación por arranque de Viruta.

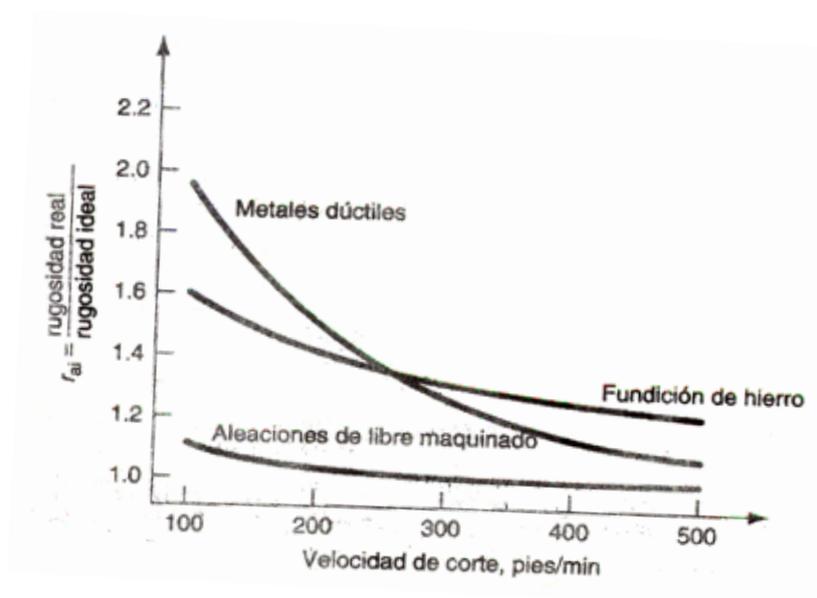
- Herramienta con radio de Punta: (Ec. 2.12)

$$Ra_i = \frac{f^2}{32 * re}$$

Donde: f: Velocidad de avance de la herramienta (mm/rev)  
 re: Radio de la punta (radio de nariz) (mm)  
 Ra<sub>i</sub>: Rugosidad ideal (mm)

## Capítulo II: Marco Teórico

La rugosidad natural es la rugosidad generada por los factores del material de trabajo y los factores dependientes de la maquina, esta rugosidad superficial no es posible determinarla teóricamente, sin embargo se han realizado ensayos que permiten obtener la rugosidad natural generada en la operación de mecanizado en función del tipo de material y la velocidad de corte. Este factor se obtiene de la gráfica mostrada en la figura 2.16.



**Figura 2.16** Relación entre la rugosidad real y la rugosidad natural ( $r_{ai}$ ).

**Fuente:** Ensayos de General Electric Co.

Por lo tanto es posible determinar la rugosidad real como:

$$Ra = Ra_i + Ra_n = r_{ai} \cdot Ra_i \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Donde:  $Ra_i$ : Es la rugosidad ideal

$Ra_n$ : Es la rugosidad natural

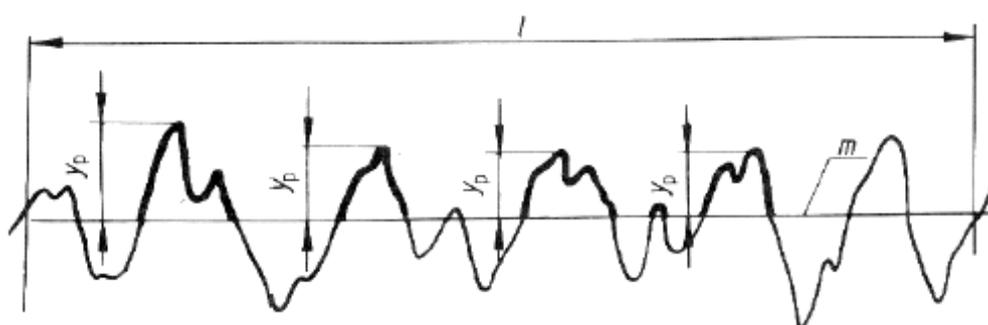
$r_{ai}$ : Relación entre rugosidad real y rugosidad ideal.

#### 2.2.10.4.- Parámetros y variables

- **Respecto a la dirección de las alturas**

##### **Altura de una cresta del perfil, $y_p$ :**

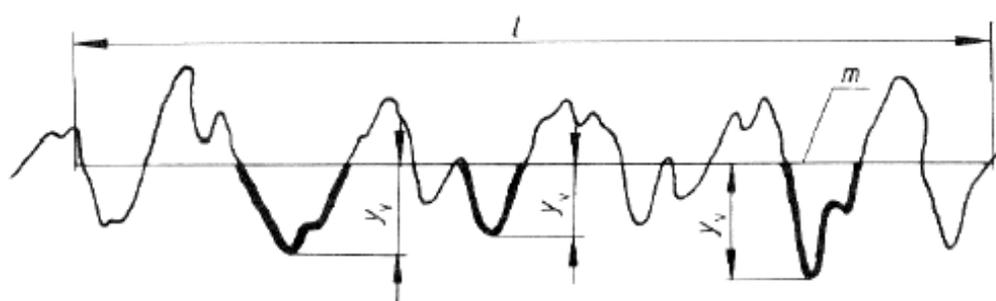
Distancia entre la línea media y el punto más alto de una cresta.



**Figura 2.17** Altura de una cresta del perfil,  $y_p$ .

##### **Profundidad de un valle del perfil, $y_v$ :**

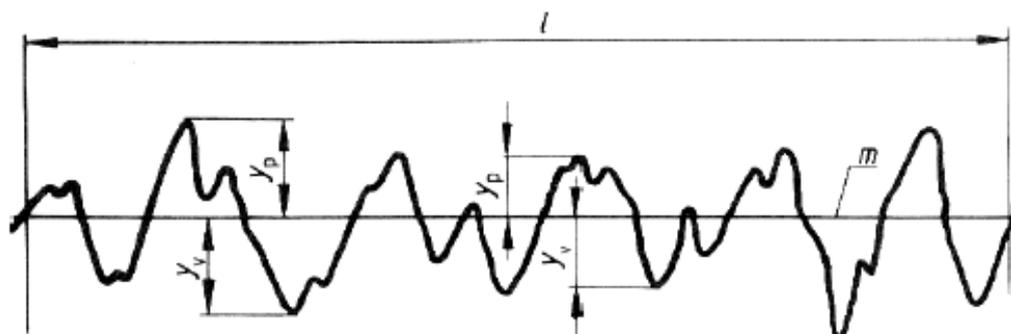
Distancia entre la línea media y el punto más bajo de un valle.



**Figura 2.18** Profundidad de un valle del perfil,  $y_v$ .

##### **Altura de una irregularidad del perfil:**

Suma de la altura de una cresta y de la profundidad de un valle adyacente.



**Figura 2.19** Altura de una irregularidad del perfil

**Altura máxima de una cresta,  $R_p$ :**

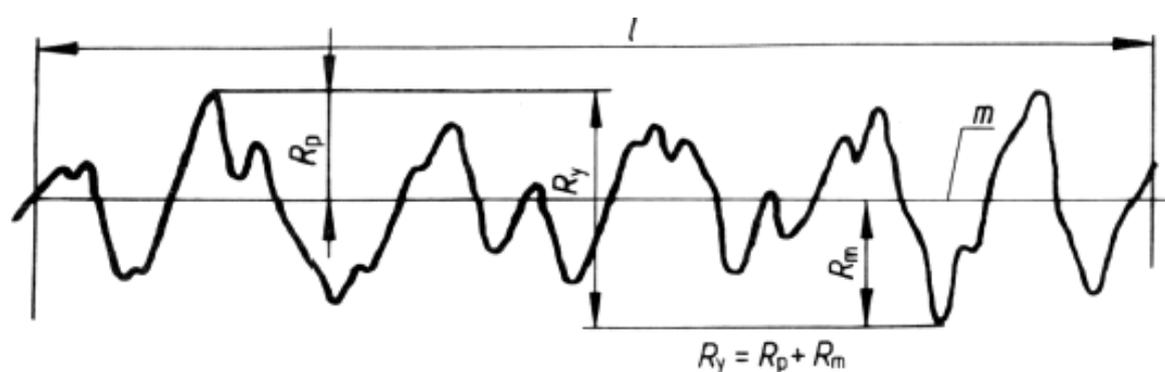
Distancia del punto más alto del perfil a la línea media, dentro de  $l$ .

**Profundidad máxima de un valle,  $R_m$ :**

Distancia del punto más bajo del perfil a la línea media, dentro de  $l$ .

**Altura máxima del perfil,  $R_y$ :**

Máxima distancia entre la cresta más alta ( $R_p$ ) y el valle más bajo ( $R_m$ ).

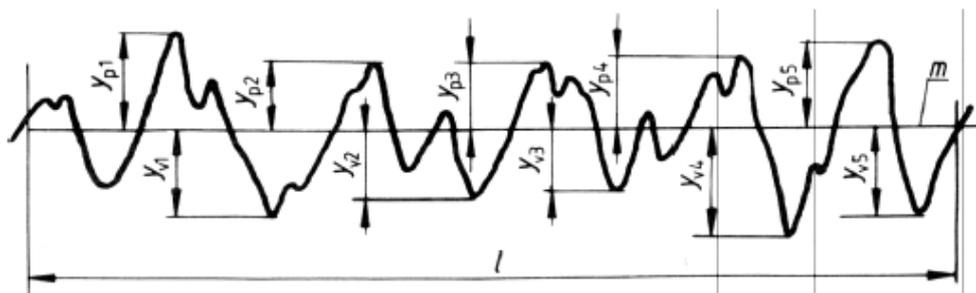


**Figura 2.20** Altura máxima de una cresta ( $R_p$ ), Profundidad máxima de un valle ( $R_m$ ) y Altura máxima del perfil ( $R_y$ )

**Altura de las irregularidades en diez puntos,  $R_z$ :**

Media de los valores absolutos de las alturas de las cinco crestas del perfil más altas y de las profundidades de los cinco valles del perfil más bajos, dentro de la longitud básica.

$$Rz = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}|}{5} \quad (\text{Ec. 2.14})$$



**Figura 2.21** Altura de las irregularidades en diez puntos (Rz).

### Altura media de las irregularidades del perfil, Rc:

Es la suma de los valores medios de las alturas de las crestas y de las profundidades de los valles, dentro de la longitud básica.

$$Rc = \frac{\sum_{i=1}^n |y_{pi}| + \sum_{i=1}^n |y_{vi}|}{n} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Donde:  $y_{pi}$  es la altura de la  $i$ ésima cresta más alta.

$y_{vi}$  es la profundidad del  $i$ ésimo valle más bajo.

$n$  es el  $n^{\circ}$  de crestas y de valles del perfil.

### Desviación media aritmética del perfil, Ra:

Es la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones del perfil, en los límites de la longitud básica  $l$ .

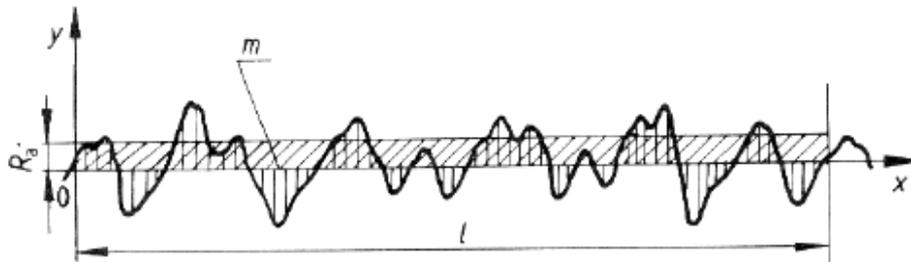


Figura 2.22 Desviación media aritmética del perfil (Ra).

- **Respecto a la dirección transversal**

**Paso de las irregularidades del perfil:**

Longitud de la línea media que contiene una cresta y un valle consecutivo.

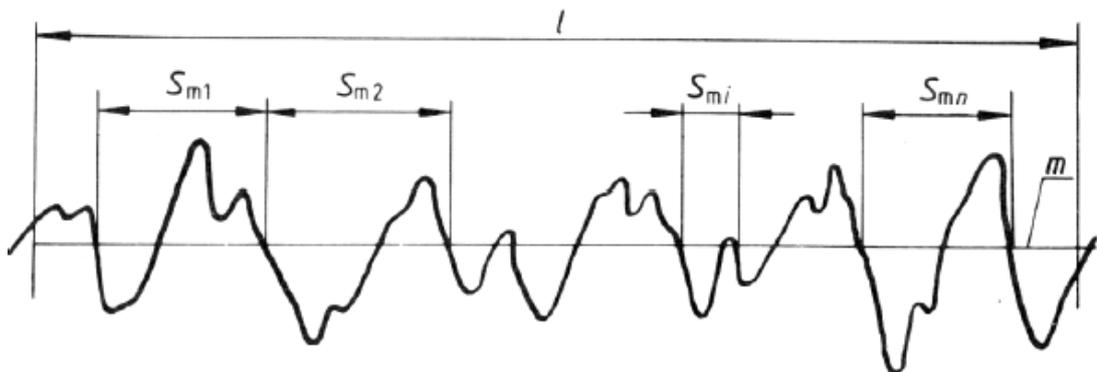
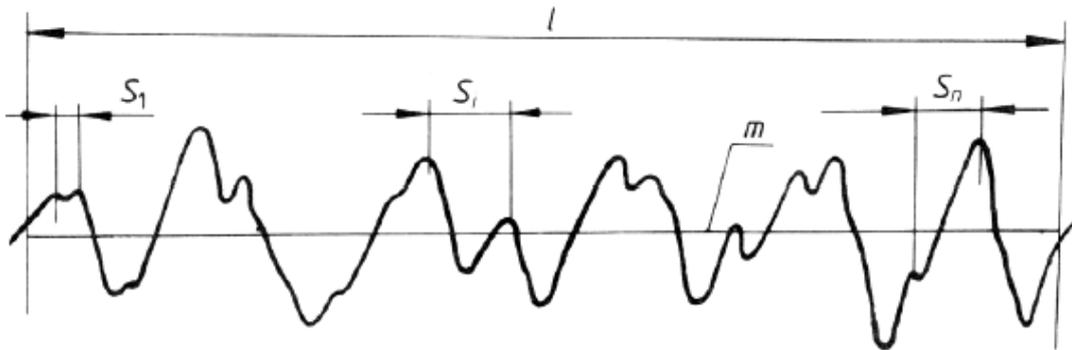


Figura 2.23 Paso de las irregularidades del perfil

Paso medio de las irregularidades del perfil: 
$$S_m = l/n \sum S_{mi} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

**Paso de las crestas locales del perfil:**

Longitud de una sección de la línea media delimitada por la proyección sobre esta línea de los dos puntos más altos de las crestas locales adyacentes del perfil.



**Figura 2.24** Paso de las crestas locales del perfil.

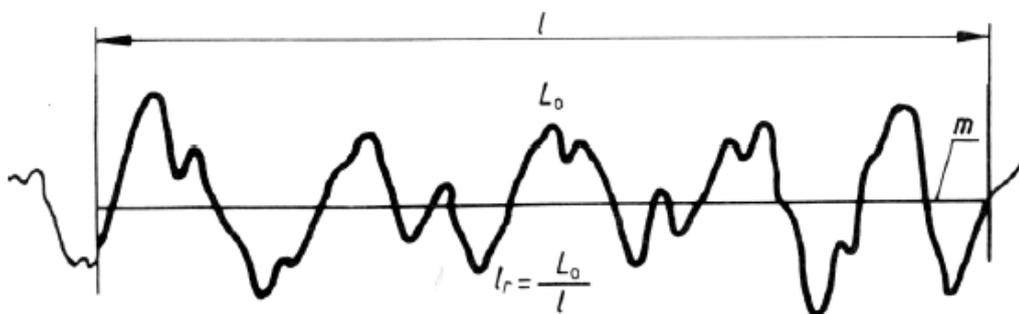
Paso medio de las crestas del perfil:  $S = l/n \sum Si$  (Ec. 2.17)

**Longitud desarrollada del perfil,  $L_0$ :**

Longitud que se obtendría al desarrollar el perfil en línea recta.

**Relación de longitud del perfil,  $l_r$  :**

Relación entre la longitud desarrollada y la longitud básica.



**Figura 2.25** Relación de longitud del perfil ( $l_r$ ).

**Densidad de las crestas del perfil,  $D$ :**

Número de crestas por unidad de longitud:  $D = l/S_m$  (Ec. 2.18)

- **Respecto a la forma de las irregularidades**

### Longitud portante del perfil, $\mu_p$ :

Suma de las longitudes de segmentos obtenidos cortando las crestas por una línea paralela a la línea media, dentro de la longitud básica, por un nivel de corte dado.

$$\mu_D = b_1 + b_2 + b_3 + \dots + b_n \quad (\text{Ec. 2.19})$$

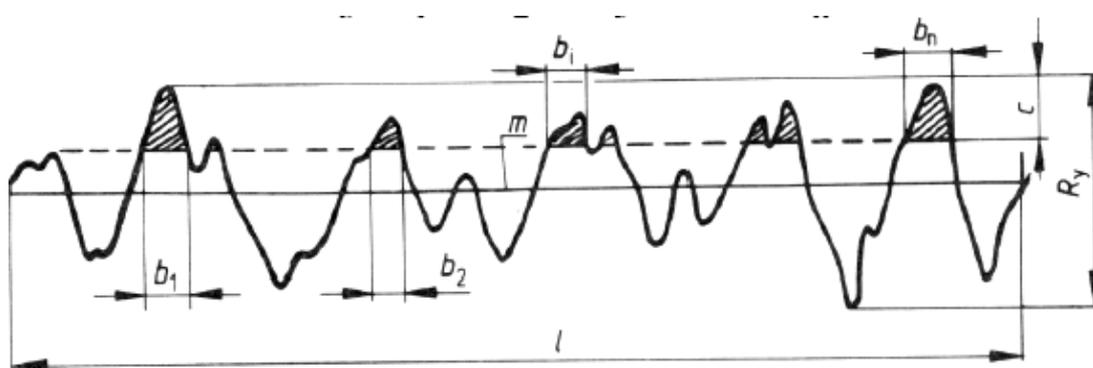


Figura 2.26 Longitud portante del perfil ( $\mu_p$ ).

### Tasa de longitud portante $t_p$ :

Relación de la longitud portante a la longitud básica:  $t_p = \mu_p / l$  (Ec. 2.20)

### Curva de la tasa de longitud portante del perfil:

Es el gráfico que representa la relación entre los valores de la tasa de longitud portante del perfil y el nivel de corte del perfil.

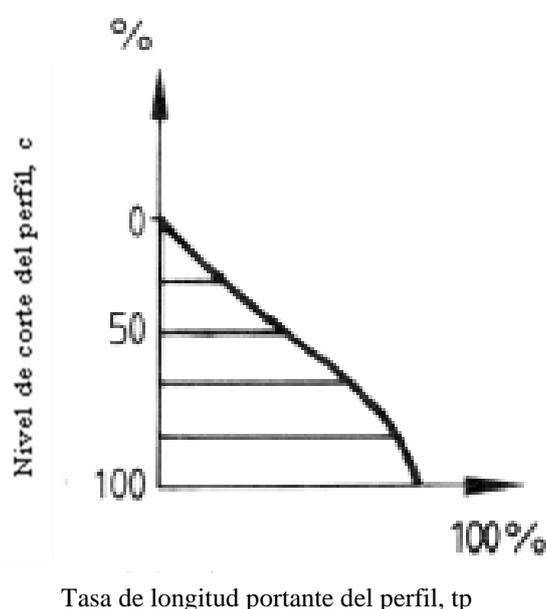


Figura 2.27 Gráfico de tasa de longitud portante del perfil (tp).

#### 2.2.10.5.- Medida de la rugosidad

- **Rugosímetros.**

Los rugosímetros sirven para determinar con rapidez la rugosidad de las superficies. Los rugosímetros muestran la profundidad de la rugosidad media  $R_z$  y el valor de rugosidad medio  $R_a$  en  $\mu\text{m}$ . Los rugosímetros facilitan la rápida determinación de la superficie de un componente, por otro lado la realización de la medición de la rugosidad es muy sencilla. Los rugosímetros entran en contacto con la superficie en cuestión de segundos y muestran la rugosidad directamente en  $R_a$  o en  $R_z$ . Las siguientes normas se ocupan del control de la rugosidad: DIN 4762, DIN 4768, DIN 4771, DIN 4775, el alcance de la rugosidad de superficies lo encontrará en DIN 4766-1.

**Rugosímetro de palpador mecánico:**

Instrumento para la medida de la calidad superficial basado en la amplificación eléctrica de la señal generada por un palpador que traduce las irregularidades del perfil de la sección de la pieza. Sus elementos principales son el palpador, el mecanismo de soporte y arrastre de éste, el amplificador electrónico, un calculador y un registrador.

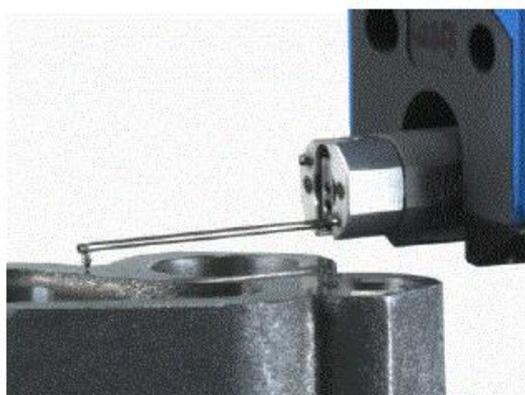


Figura 2.28 Rugosímetro.

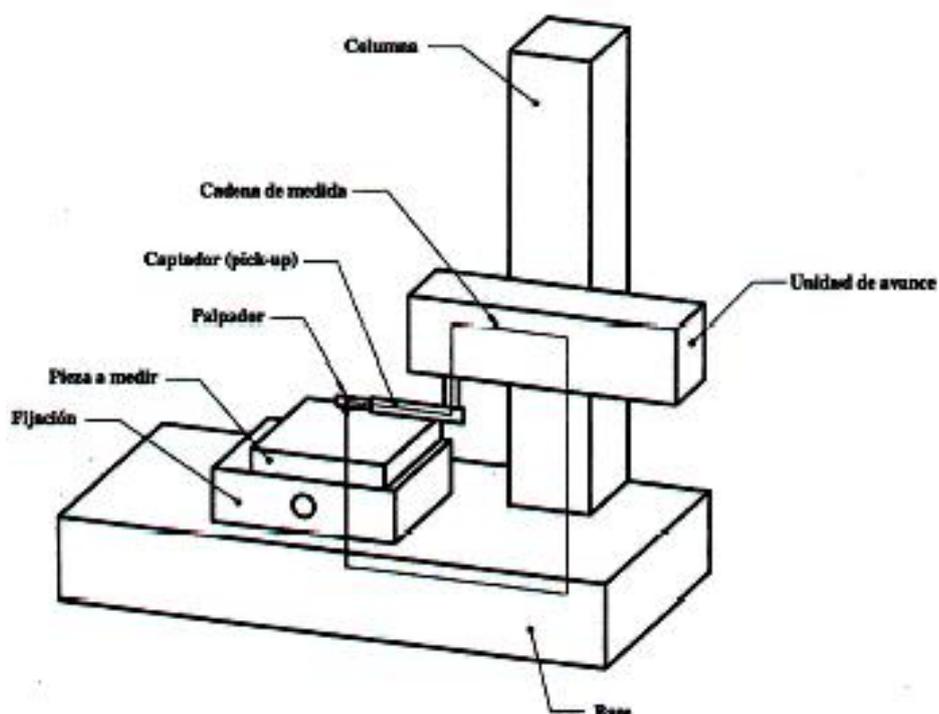
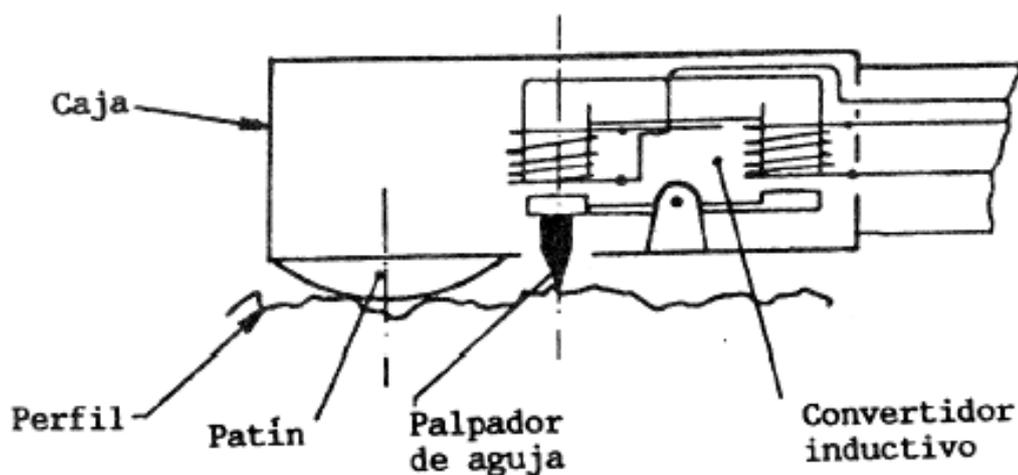


Figura 2.29 Esquema Rugosímetro (Configuración Clásica)

Actualmente los rugosímetros permiten calcular y tratar numerosos parámetros de rugosidad, compensar la forma de la pieza o programar la medida.

### **Rugosímetro de Palpador inductivo:**

El desplazamiento de la aguja al describir las irregularidades del perfil modifica la longitud del entrehierro del circuito magnético, y con ello el flujo de campo magnético que lo atraviesa, generando una señal eléctrica.



**Figura 2.30** Esquema Rugosímetro de Palpador inductivo.



**CAPÍTULO III.  
MARCO METODOLÓGICO.**

---

---

## **CAPÍTULO III**

---

---

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1.- NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN.**

La investigación es de tipo descriptivo, ya que busca describir las características del proceso de mecanizado de la aleación de aluminio AA A356-T6 en operaciones de torneado, con el objeto primordial de establecer cuáles son las mejores condiciones, parámetros de corte y geometría de la herramienta para obtener una rugosidad superficial óptima.

También se emplea la investigación experimental de laboratorio debido a que se realizan una serie de ensayos y experimentos con el objetivo de especificar o medir los efectos que producen las variaciones de los parámetros fundamentales de corte y los factores geométricos de la herramienta en la rugosidad superficial obtenida en operaciones de torneado.

#### **3.2.- DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.**

La investigación se inicia con la revisión de antecedentes, modelos teóricos para el cálculo de la rugosidad superficial, y otros conceptos relacionados con el tema. Se realiza el planteamiento del problema, se establecen los objetivos a alcanzar, se plantea la justificación así como las limitaciones y delimitaciones de la investigación.

Al tener completa toda esta información se procedió a elaborar el Marco Teórico, el cual sirvió de base teórica para el desarrollo de la investigación.

Posteriormente se procedió a realizar un tratamiento térmico T6 a la aleación de aluminio A356 según la norma ASTM B 917M [5], el cual consistió en una puesta en solución a 540°C /10h con enfriamiento en agua a 70 °C y un posterior envejecimiento artificial a 155°C durante 5h y enfriamiento a la temperatura ambiente.

Para verificar las condiciones del tratamiento térmico, se realizó un ensayo de tracción en la máquina de tracción (GALDABINI) que nos permitió conocer variables como: resistencia a la fluencia o cedencia (Yield strenght), resistencia a la ruptura, ductilidad, módulo de la elasticidad o módulo de Young, entre otros, para así comparar estos valores con los requerimientos tensíles según la norma ASTM B 108-03a [6] de un aluminio A356-T6 y comprobar si cumple con los parámetros establecidos.

Para verificar las condiciones del tratamiento térmico a nivel microestructural, se realizó un ataque químico a una probeta, el cuál consistió en frotar la probeta con algodón durante 15 s con una solución compuesta por 1 ml de ácido fluorhídrico (HF) y 200 ml de agua, siguiendo los procedimientos y especificaciones de la norma ASTM E407-99 [7].

Luego, mediante un modelo factorial simplificado como el método de Taguchi, de 3x3x3x2, se diseñaron los ensayos requeridos, combinando los niveles de velocidad de corte **Vc** (m/min), avance **f** (mm/rev), profundidad **d** (mm) y radio de punta de la herramienta de corte **re** (mm), obteniendo de esta forma una matriz como la que se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Diseño del experimento.

		re <sub>1</sub>			re <sub>2</sub>		
		f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>
Vc <sub>1</sub>	d <sub>1</sub>						
	d <sub>2</sub>						
	d <sub>3</sub>						
Vc <sub>2</sub>	d <sub>1</sub>						
	d <sub>2</sub>						
	d <sub>3</sub>						
Vc <sub>3</sub>	d <sub>1</sub>						
	d <sub>2</sub>						
	d <sub>3</sub>						

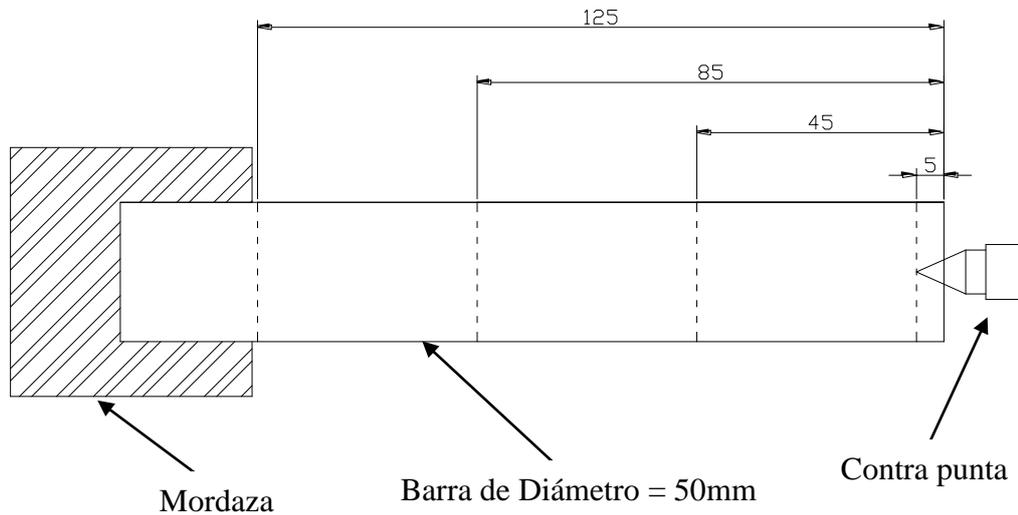
Se calcula el número de ensayos a realizar:

$$\text{Número de ensayos} = \frac{3 \times 3 \times 3 \times 2}{1 \text{Material} \cdot 1 \text{Torno}}$$

$$\text{Número de ensayos} = 54 \text{ Ensayos}$$

### 3.3.- POBLACIÓN Y MUESTRA

La población de este trabajo está conformada por una aleación de aluminio AA A356 T6 con los siguientes detalles en la figura 3.1.



**Figura 3.1** Dimensiones de la barra a utilizar (en milímetros).

Las muestras estuvieron compuestas por dos (2) barras, cuya longitud total fue de 150mm y 50mm de diámetro. Poseen 24mm en uno de sus extremos para la sujeción de las mordazas del torno, así como también 5mm para la realización de un centro punto en el lado opuesto.

Las operaciones de torneado se realizaron en secciones de la barra cuya longitud fue de 40mm. Se contó con tres (3) secciones de la misma longitud, para los tres avances respectivos, de manera tal de aprovechar al máximo el material de la barra.

También se utilizara una barra de 50mm de diámetro y 200mm de longitud, de la cual se obtuvo la probeta para el ensayo de tracción, siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM B557 [8].

### 3.4.- TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.

#### 3.4.1.- Torno.

Torno Marca Misal Modelo Heron KN18

Rango de RPM = (27-1110)

Rango de Avance (mm/rev) = (0.017-1.4)

Apreciación del Nonio = 0.05 mm



Figura 3.2 Torno Misal KN18

#### 3.4.2.- Máquina de ensayo de Tracción.

Marca Galdabini Modelo CTM 20

Apreciación : Celda de campo : 1 N

Desplazamiento : 0,01 mm

Rango = 0 – 200.000 N

Velocidad : 0 – 200 mm/min



**Figura 3.3** Maquina ensayo tracción Galdabini

### 3.4.3.- Horno.

Marca Thermolyne.

Modelo N° F48015.

Serial 1058990546424.



**Figura 3.4** Horno.

#### 3.4.4.- Instrumentos Micrografía.

Los equipos y herramientas utilizados en esta etapa fueron: Lijadora de banda, hojas de lija, pulidora metalográfica, campana extractora de gases químicos y microscopio óptico. Las imágenes observadas en el microscopio fueron fotografiadas por una computadora conectada al mismo.



**Figura 3.5** Lijadora de Banda.



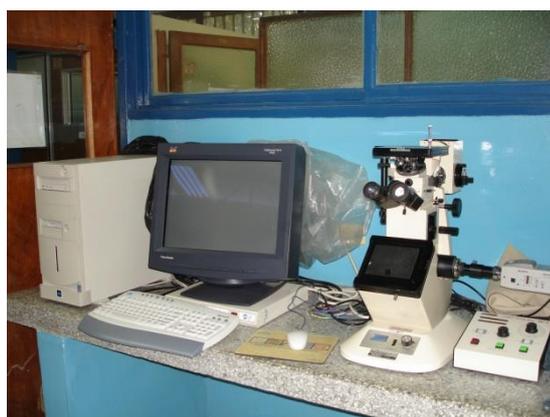
**Figura 3.6** Hojas de lija.



**Figura 3.7** Pulidora metalográfica.



**Figura 3.8** Campana extractora de gases químicos.



**Figura 3.9** Microscopio óptico.

Marca Unís. Modelo N° WV-CP230.

Cámara Panasonic 120v, 60 Hz. Aumento x 1000.

### 3.4.5.- Rugosímetro.

Marca: Mitutoyo

Modelo: SJ-201P

**Tabla 3.2** Especificaciones del rugosímetro.

<b>Rango de longitud de medición (L)</b>	2,5 mm
<b>Factor de multiplicación del rango de medición</b>	x1,x3,x5
<b>Rango de medición de rugosidad (Ra)</b>	100 $\mu m$
<b>Rango de medición de rugosidad (Rt)</b>	(0,02 – 350) $\mu m$
<b>Apreciación</b>	0,01 $\mu m$

Fuente: <http://www.mitutoyo.com>



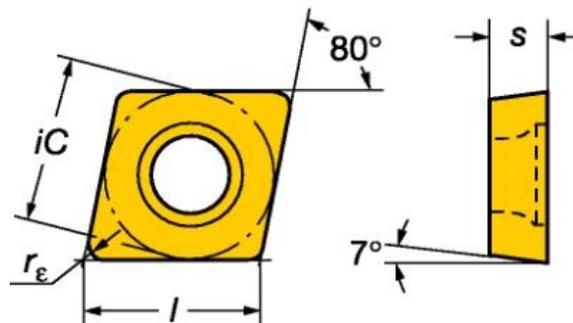
**Figura 3. 10** Rugosímetro Modelo SJ-201P Marca Mitutoyo.

### 3.4.6.- Herramientas de Corte.

#### Inserto CCGX 12 04 04-AL 1810

**Tabla 3.3** Especificaciones del inserto CCGX 12 04 04-AL 1810.

re(mm)	iC (mm)	I (mm)	s (mm)	d (mm)	f (mm/rev)	Vc (m/min)
0,4	12,7	12	4,76	1,5	0,2	2000

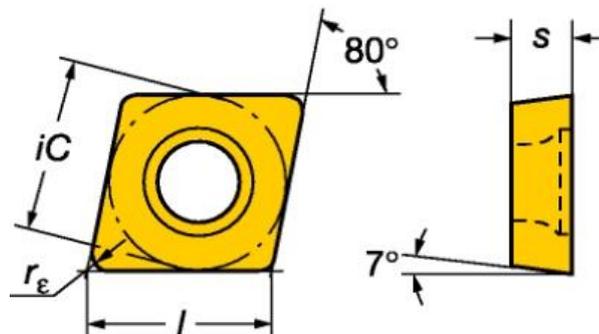


**Figura 3.11** Herramienta de corte modelo CCGX 12 04 04-AL 1810. Fuente Sandvik Coromant. (2007). [On-line]. Disponible en: <http://www.coroguide.com>.

### Inserto CCGX 12 04 08-AL 1810

**Tabla 3.4** Especificaciones del inserto CCGX 12 04 08-AL 1810

re(mm)	iC (mm)	I (mm)	s (mm)	d (mm)	f (mm/rev)	Vc (m/min)
0,8	12,7	12	4,76	1,5	0,3	2000

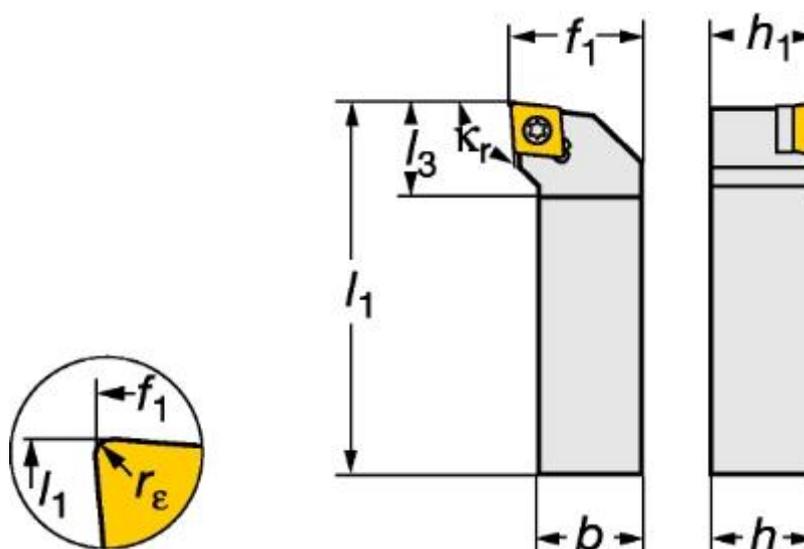


**Figura 3.12** Herramienta de corte modelo CCGX 12 04 08-AL 1810. Fuente Sandvik Coromant. (2007). [On-line]. Disponible en: <http://www.coroguide.com>.

### Barra porta herramientas SCLCR 2020K 12

**Tabla 3.5** Especificaciones Barra porta herramientas SCLCR 2020K 12

b (mm)	f <sub>1</sub> (mm)	h (mm)	h <sub>1</sub> (mm)	I <sub>1</sub> (mm)	I <sub>3</sub> (mm)
20	25	20	20	125	25



**Figura 3.13** Barra porta herramienta modelo SCLCR 2020K 12. Fuente Sandvik Coromant. (2007). [On-line]. Disponible en: <http://www.coroguide.com>.

### 3.4.7.- Materiales.

Para el desarrollo de la investigación se utilizó la aleación de aluminio AA A356-T6, cuyas propiedades se muestran en las tablas siguientes:

**Tabla 3.6** Composición química requerida de la aleación de aluminio AA A356.

<i>Composición, %</i>											
Aluminio	Silicón	Hierro	Cobre	Manganeso	Magnesio	Cromo	Níquel	Zinc	Estaño	Titanio	Otros Elementos
Restante	6,5-7,5	0,20	0,20	0,10	0,25-0,45	-----	-----	0,10	-----	0,20	0,05

**Fuente:** Aluminium Association

**Tabla 3.7** Requerimientos tensiles de la aleación de aluminio AA A356-T6.

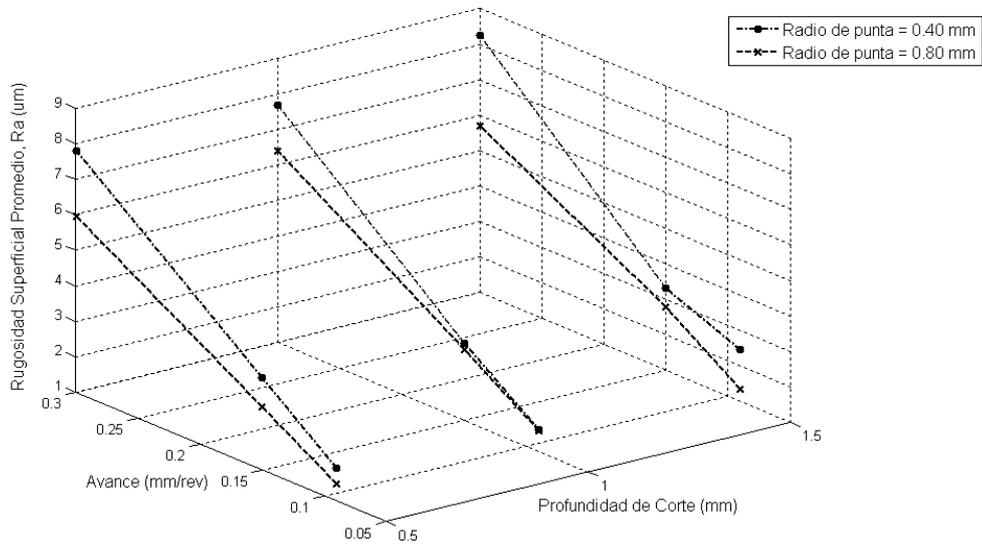
Aleación		Temperatura	Esfuerzo Ultimo, min, ksi (MPa)	Esfuerzo de Fluencia (0.2 % offset), min, ksi (MPa)	Elongación en 2 in. o 4 3 Diámetro, min, %	Dureza Brinell HardnessF 500-kgf carga, 10-mm bola.
ANSI	UNS					
A356.0	A03560	T6	33.0 (228)	22.0 (152)	3.0	85

**Fuente:** Norma ASTM B108-03a

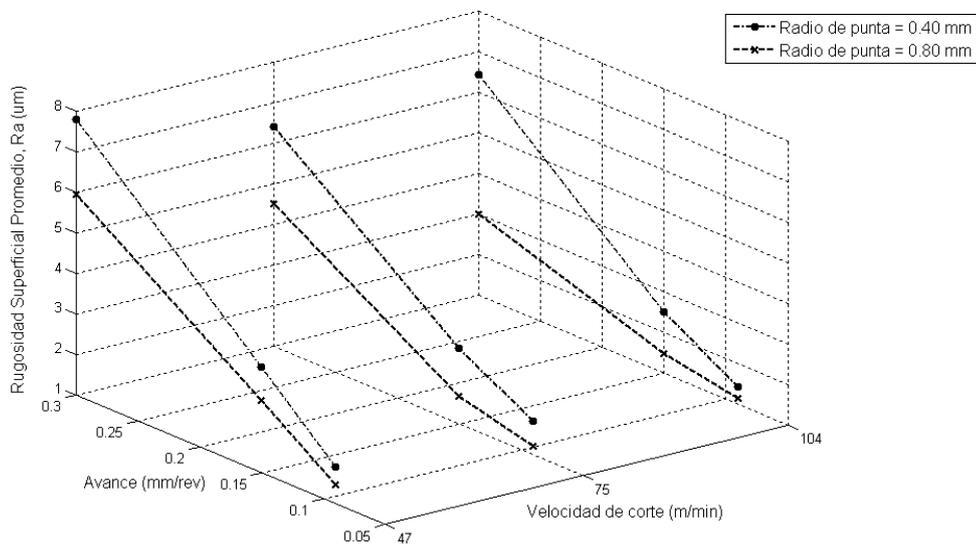
### 3.5.- TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.

La técnica empleada para la recolección de datos fue la de observación directa de los ensayos, de esta manera se obtuvo la información necesaria para su posterior análisis. Los instrumentos que se utilizaron para almacenar la información recolectada de la observación y medición en los ensayos, fueron formatos como el de la tabla 3.1, donde se relacionan todas las variables que intervienen en el proceso.

Para el procesamiento de los datos recolectados se emplearon tablas y gráficas de curvas con el fin de obtener la representación de los datos aportados, estas gráficas tienen cada valor de rugosidad obtenida en función del avance de la herramienta para cada ensayo, y para cada variación de los restantes parámetros de corte evaluados. Además de esto se conoció también el comportamiento de la rugosidad ideal y se realizaron posteriormente comparaciones entre ambas rugosidades. Todo esto fue con el fin de realizar el análisis y obtener las conclusiones del estudio.



**Figura 3.14** Curva de Rugosidad Superficial en función del avance de la herramienta y profundidad para una determinada velocidad de corte y radio de nariz.



**Figura 3.15** Curva de Rugosidad Superficial en función del avance de la herramienta y la velocidad de corte para una determinada profundidad y radio de nariz.

### 3.6.- ASPECTOS ADMINISTRATIVOS.

#### 3.6.1.- Recursos utilizados.

##### **Materiales y Equipos.**

- Aleación de Aluminio AA A356-T6.
- Equipos: Torno convencional, maquina ensayo de tracción, horno, lijadora de banda, pulidora metalográfica, campana extractora de gases químicos, microscopio óptico y rugosímetro.
- Herramientas de corte.
- Computador, papel, calculadora, impresora, entre otros.

##### **Humanos.**

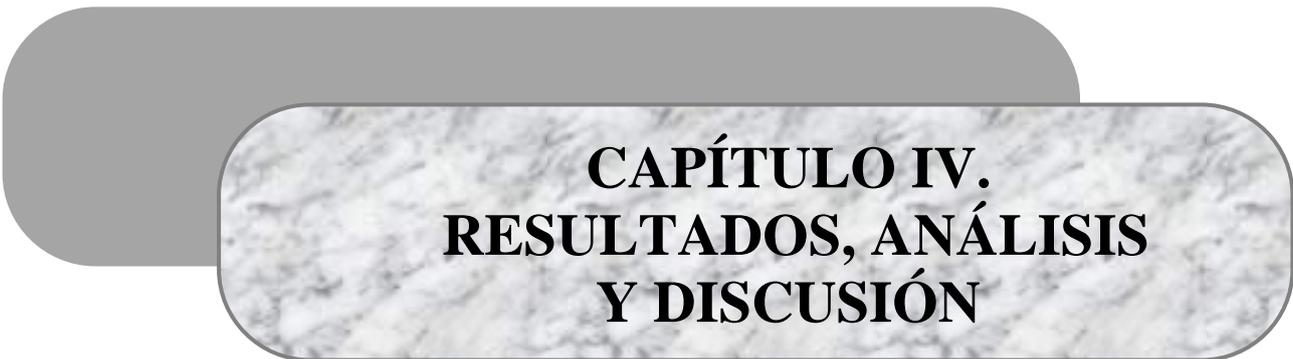
- Tutor: Ing. Juan Carlos Pereira.
- Técnicos del Laboratorio.
- Investigadores: Reinaldo Dos Santos, Manuel Laurentin.

##### **Financieros.**

- Recursos propios de los investigadores.
- Presupuesto:

**Tabla 3.8** Presupuesto estimado.

<i>Descripción</i>	<i>Monto (Bs.)</i>
Barra de aleación de Aluminio AA A356	Disponible (0 Bs.)
Mecanizado de probetas para ensayo de tracción	180.000
Herramienta de corte	400.000
Artículos de oficina	200.000
<b><i>Total</i></b>	<b><i>780.000</i></b>



**CAPÍTULO IV.  
RESULTADOS, ANÁLISIS  
Y DISCUSIÓN**

---

---

## CAPÍTULO IV.

---

---

### RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

#### 4.1.- Composición Química de la barra de AA356.

La composición química de la aleación utilizada en esta investigación se obtuvo mediante un espectrómetro óptico, arrojando el porcentaje en peso de los componentes que la constituyen, en la tabla 4.1 se observan los valores obtenidos en la barra ensayada.

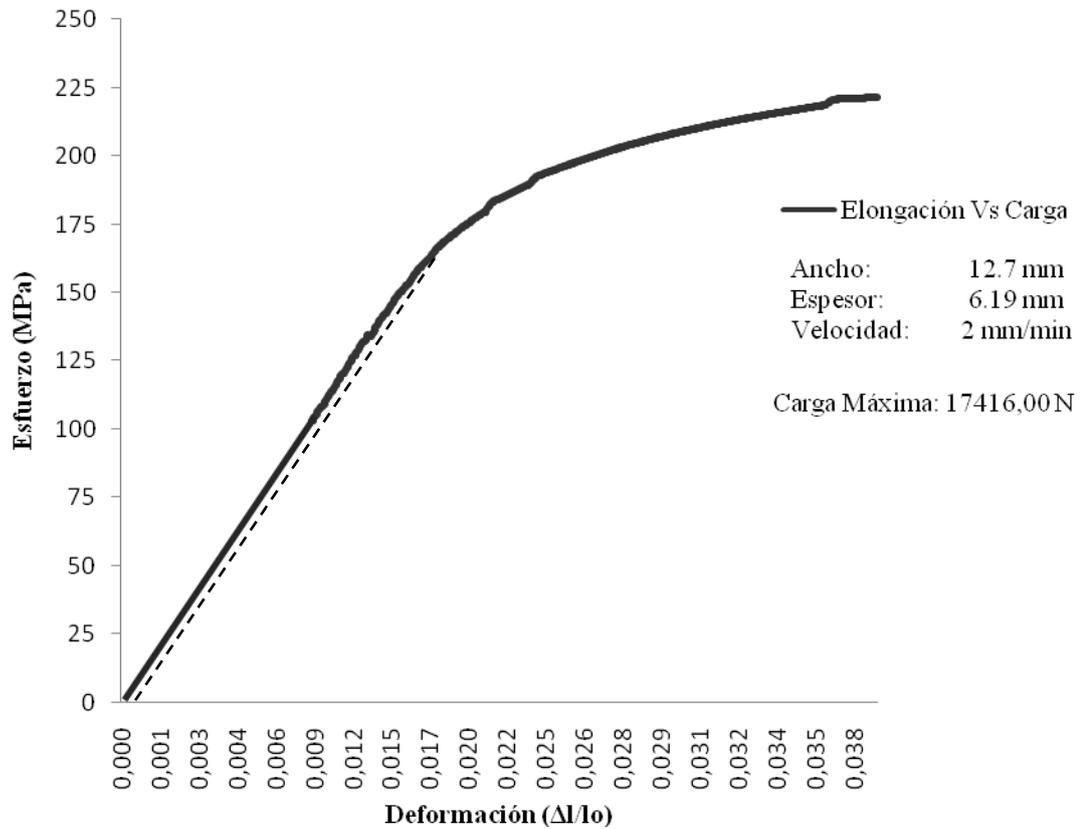
**Tabla 4.1** Composición química de la barra de AA356 ensayada.

Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Zn (%)	Ni (%)	Cr (%)	
7.0000	0.1755	0.0025	0.0034	0.3333	0.0028	0.0032	0.0063	
Pb (%)	Ti (%)	B (%)	Ca (%)	Na (%)	Sr (%)	Li (%)	V (%)	Al (%)
0.0007	0.0913	0.0004	0.0033	0.0002	0.0124	0.0000	0.0089	92.355

Fuente: Rualca C.A

#### 4.2.- Resultados Ensayo de Tracción.

Al culminar el tratamiento térmico se realizaron ensayos de tracción a las probetas como se estableció en la sección 3.2 del Capítulo III. La curva obtenida se muestra a continuación:



**Figura 4.1** Curva carga en función de la elongación de la muestra estudiada.

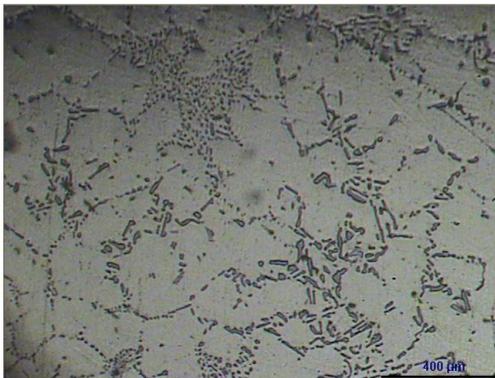
**Tabla 4.2** Propiedades tensiles obtenidas.

Área Transversal (mm <sup>2</sup> )	Carga Máxima (N)	Longitud Inicial (mm)	Longitud Final (mm)	Alargamiento a la ruptura (%)	Esfuerzo Ultimo (Su) (MPa)	Esfuerzo de Fluencia (0.2 % offset) (MPa)
81.2392	17416	50	52.03	4.06	214.3792652	162

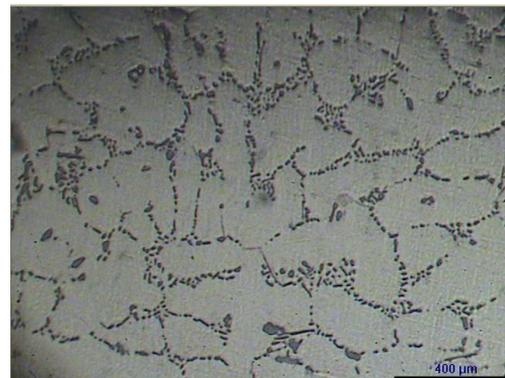
Al comparar las propiedades tensiles obtenidas en los ensayos con las exigidas por la norma ASTM B 108 – 03a como se muestra en la tabla 3.7 del Capítulo III, se observa que el material ensayado cumple con todas éstas.

### 4.3.- Resultados Micrografía.

Al finalizar el tratamiento térmico se procedió a realizar el ataque a la probeta destinada para tal fin de manera de revelar la microestructura del material como se estableció en la sección 3.2 del Capítulo III. Las imágenes obtenidas se muestran a continuación:



a)

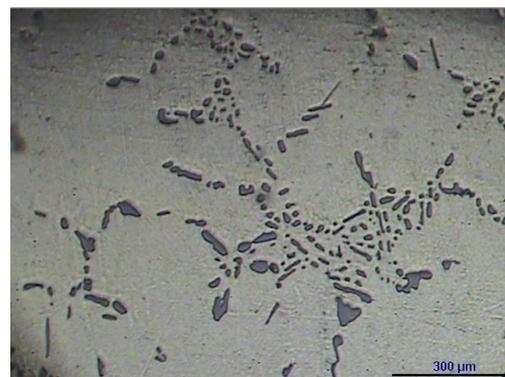


b)

**Figura 4.2** Microestructura AA356 T6 50x. a) Borde de la barra b) Centro de la barra.

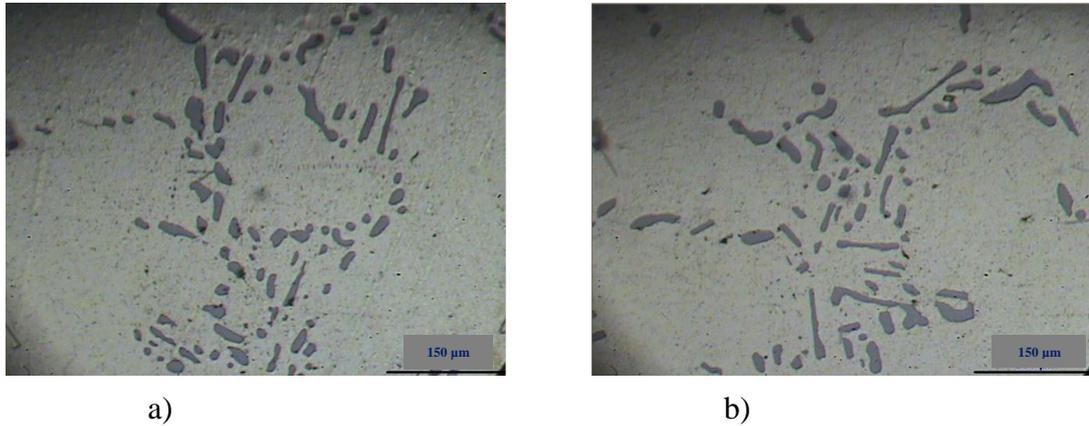


a)



b)

**Figura 4.3** Microestructura AA356 T6 100x. a) Borde de la barra b) Centro de la barra.



**Figura 4.4** Microestructura AA356 T6 200x. a) Borde de la barra b) Centro de la barra.

#### **4.4.- Resultados Obtenidos en el Torneado.**

Una vez culminados los ensayos previstos en la sección 3.2 del Capítulo III, se promedió las rugosidades (Ra) obtenidas a lo largo de los experimentos y de esta manera poder realizar las gráficas necesarias para analizar el comportamiento de la rugosidad superficial a los diferentes parámetros de corte estudiados y radio de punta de la herramienta.

Los resultados obtenidos tomando cuatro mediciones para cada combinación de parámetros o variables de estudio se presenta a continuación:

**Tabla 4.3** Medidas de la rugosidad superficial (Ra) obtenida en las operaciones de torneado para una velocidad de 104 m/min.

$V_{c1}=104\text{m/min}$	$re_1 = 0,8 \text{ mm}$			$re_2 = 0,4 \text{ mm}$		
	$f_1=0,09\text{mm/rev}$	$f_2=0,15\text{mm/rev}$	$f_3=0,3\text{mm/rev}$	$f_1=0,09\text{mm/rev}$	$f_2=0,15\text{mm/rev}$	$f_3=0,3\text{mm/rev}$
$d_1 = 0,5\text{mm}$	1.12	1.46	3.33	1.3	2.57	6.46
	1.11	1.52	2.85	1.46	2.54	6.5
	1.17	1.54	3.06	1.42	2.51	6.38
	1.19	1.46	2.79	1.54	2.47	6.42
$d_2 = 1\text{mm}$	1.4	1.62	3.92	1.89	2.55	6.69
	1.36	1.53	4.27	1.4	2.5	6.77
	1.26	1.71	4.02	1.36	2.54	6.67
	1.51	1.47	3.97	1.43	2.61	6.81
$d_3 = 1,5\text{mm}$	1.38	1.58	3.8	1.58	2.75	7.29
	1.32	1.49	3.63	1.54	2.89	7.26
	1.39	1.54	4.03	1.7	2.61	7.08
	1.36	1.53	3.9	1.71	2.64	7.36

**Tabla 4.4** Medidas de la rugosidad superficial (Ra) obtenida en las operaciones de torneado para una velocidad de 75 m/min.

$V_{c2} = 75 \text{ m/min}$	$re_1 = 0,8 \text{ mm}$			$re_2 = 0,4 \text{ mm}$		
	$f_1=0,09\text{mm/rev}$	$f_2=0,15\text{mm/rev}$	$f_3=0,3\text{mm/rev}$	$f_1=0,09\text{mm/rev}$	$f_2=0,15\text{mm/rev}$	$f_3=0,3\text{mm/rev}$
$d_1 = 0,5\text{mm}$	1.11	1.68	4.18	1.74	3.02	6.65
	1.29	1.63	4.58	1.94	3.22	6.8
	1.29	1.77	4.83	1.8	2.6	6.64
	1.21	1.69	4.43	1.9	2.65	5.57
$d_2 = 1\text{mm}$	1.19	1.98	4.06	1.54	2.67	6.85
	1.14	2.02	4.01	1.42	2.59	7.16
	1.08	2.08	4.72	1.65	2.4	7.03
	1.18	1.83	4.35	1.56	2.94	6.94
$d_3 = 1,5\text{mm}$	1.19	1.89	4.65	1.82	3.33	6.93
	1.35	1.61	4.42	1.99	3.26	7.18
	1.24	1.57	4.37	1.83	3.34	7.03
	1.44	1.65	4.46	1.96	3.41	7.11

**Tabla 4.5** Medidas de la rugosidad superficial (Ra) obtenida en las operaciones de torneado para una velocidad de 47 m/min.

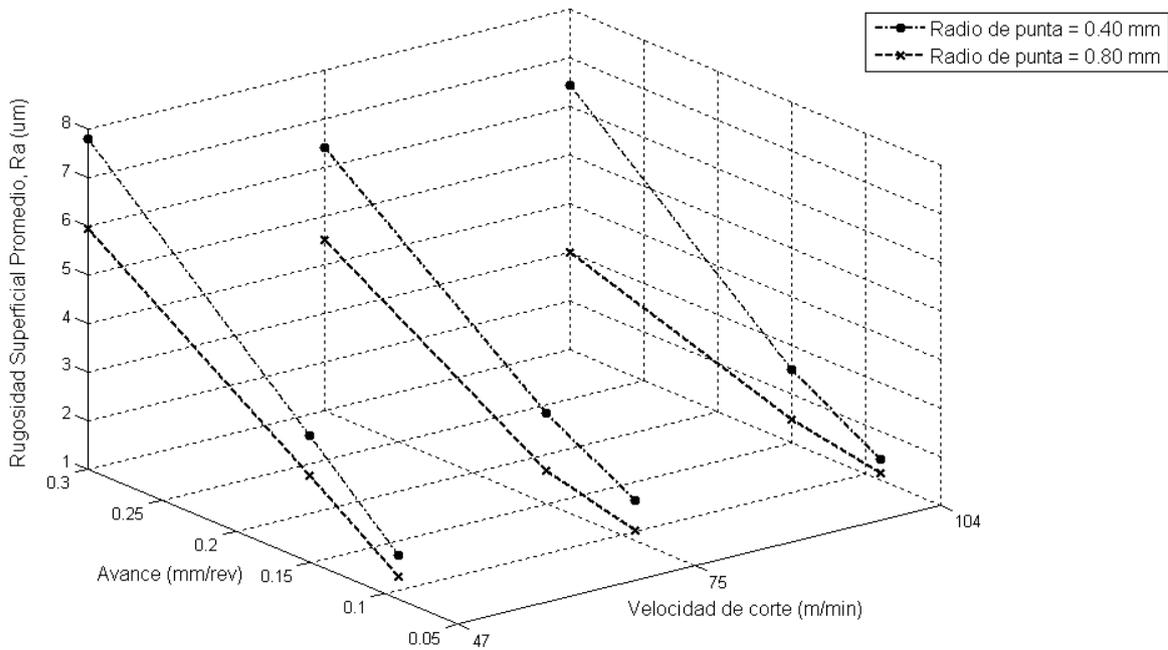
$V_{c3} = 47 \text{ m/min}$	$re_1 = 0,8 \text{ mm}$			$re_2 = 0,4 \text{ mm}$		
	$f_1=0,09\text{mm/rev}$	$f_2=0,15\text{mm/rev}$	$f_3=0,3\text{mm/rev}$	$f_1=0,09\text{mm/rev}$	$f_2=0,15\text{mm/rev}$	$f_3=0,3\text{mm/rev}$
$d_1 = 0,5\text{mm}$	1.47	2.54	5.81	1.98	3.78	7.92
	1.3	2.49	5.84	1.84	3.82	7.62
	1.56	3	6.22	1.91	3.48	7.83
	1.57	3.13	5.99	1.95	3.37	7.8
$d_2 = 1\text{mm}$	1.69	2.85	6.34	1.6	2.97	8.01
	1.44	2.98	6.53	1.74	3.16	7.62
	1.51	3.12	6.52	1.48	3.36	7.7
	1.65	2.97	6.15	1.57	3.15	7.42
$d_3 = 1,5\text{mm}$	1.2	3.05	5.7	2.33	3.34	8.64
	1.26	2.72	5.52	2.07	3.59	8.07
	1.4	2.86	6.06	2.85	3.14	8.27
	1.5	2.51	5.52	2.62	3.2	8.04

La media aritmética de los resultados obtenidos se presenta a continuación en la tabla 4.6:

**Tabla 4.6** Rugosidad superficial (Ra) promedio obtenida en las operaciones de torneado.

		$re_1 = 0,8 \text{ mm}$			$re_2 = 0,4 \text{ mm}$		
		$f_1=0,09 \text{ mm/rev}$	$f_2=0,15 \text{ mm/rev}$	$f_3=0,3 \text{ mm/rev}$	$f_1=0,09 \text{ mm/rev}$	$f_2=0,15 \text{ mm/rev}$	$f_3=0,3 \text{ mm/rev}$
$V_{c1}=104 \text{ m/min}$	$d_1 = 0,5 \text{ mm}$	1.15	1.50	3.01	1.43	2.52	6.44
	$d_2 = 1 \text{ mm}$	1.38	1.58	4.05	1.52	2.55	6.74
	$d_3 = 1,5 \text{ mm}$	1.36	1.54	3.84	1.63	2.72	7.25
$V_{c2}= 75 \text{ m/min}$	$d_1 = 0,5 \text{ mm}$	1.23	1.69	4.51	1.85	2.87	6.42
	$d_2 = 1 \text{ mm}$	1.15	1.98	4.29	1.54	2.65	7.00
	$d_3 = 1,5 \text{ mm}$	1.31	1.68	4.48	1.90	3.34	7.06
$V_{c3}= 47 \text{ m/min}$	$d_1 = 0,5 \text{ mm}$	1.46	2.79	5.97	1.92	3.61	7.79
	$d_2 = 1 \text{ mm}$	1.57	2.98	6.39	1.60	3.16	7.69
	$d_3 = 1,5 \text{ mm}$	1.34	2.79	5.70	2.47	3.32	8.26

Una vez conocidos los valores promedios de las rugosidades obtenidas en los ensayos realizados, se procedió a la construcción de las gráficas de rugosidad superficial en función del avance de la herramienta y la profundidad así como la velocidad, según lo descrito en la sección 3.5 del Capítulo III. Estas son mostradas en la figura 4.5 a 4.10.



**Figura 4.5** Gráfica comparativa  $f$  (mm/rev) vs  $V_c$  (m/min) para  $d=0,5$  mm.

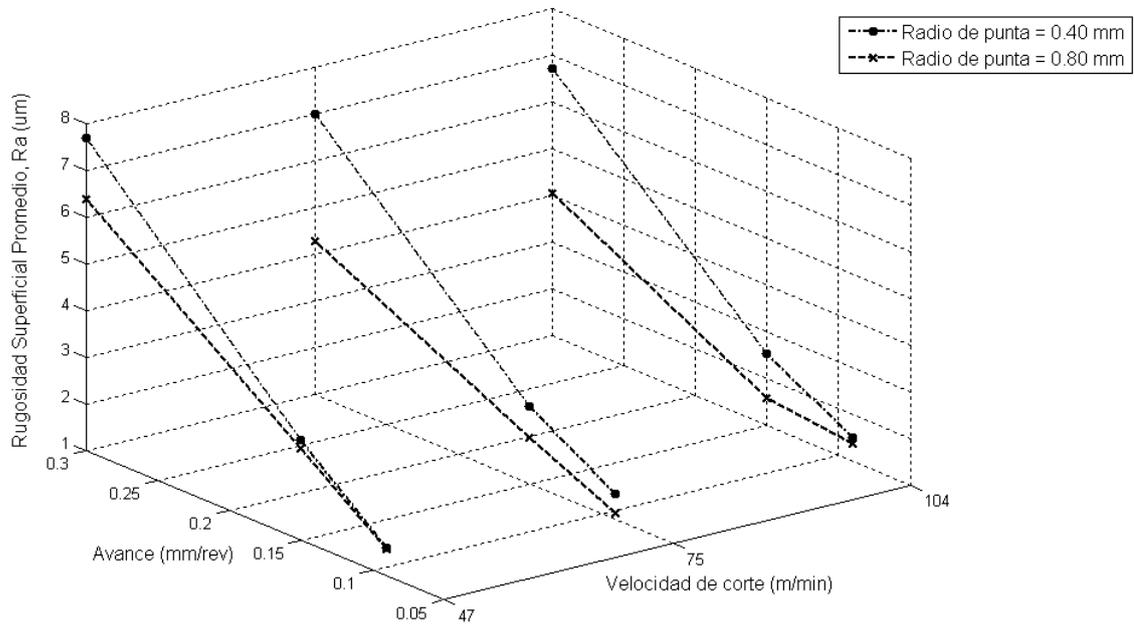


Figura 4.6 Gráfica comparativa f (mm/rev) vs Vc (m/min) para d= 1 mm.

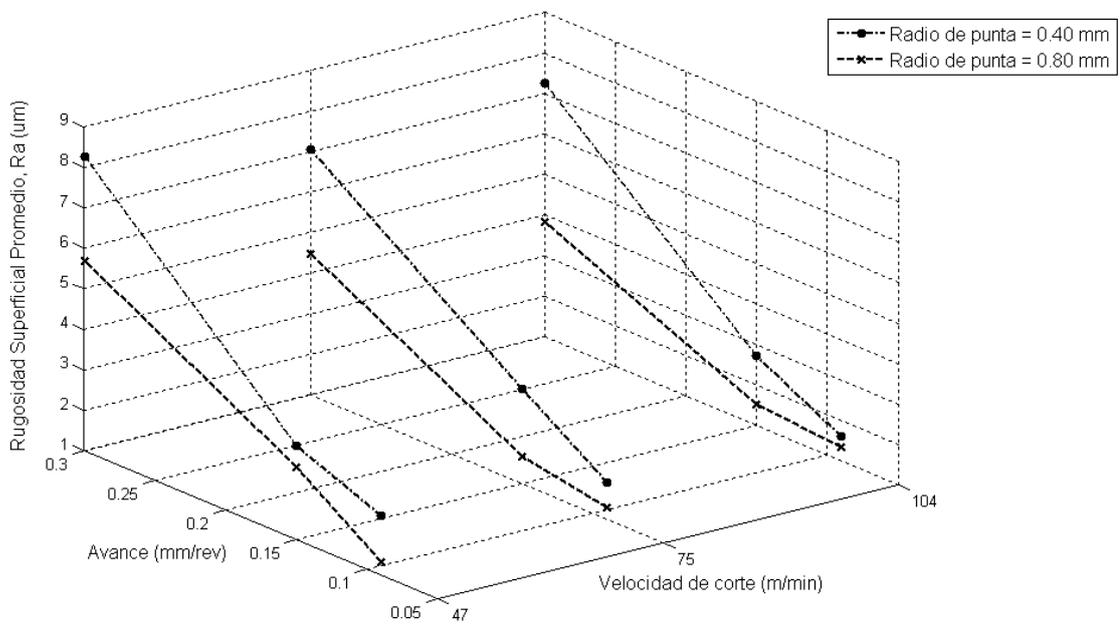


Figura 4.7 Gráfica comparativa f (mm/rev) vs Vc (m/min) para d= 1,5 mm.

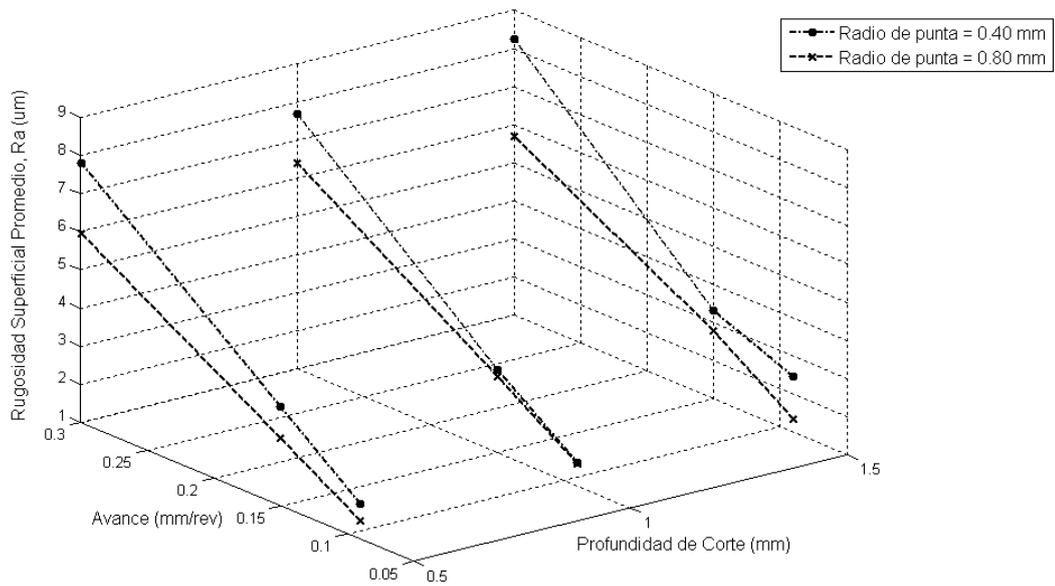


Figura 4.8 Gráfica comparativa f (mm/rev) vs d (mm) para  $V_c = 47$  m/min.

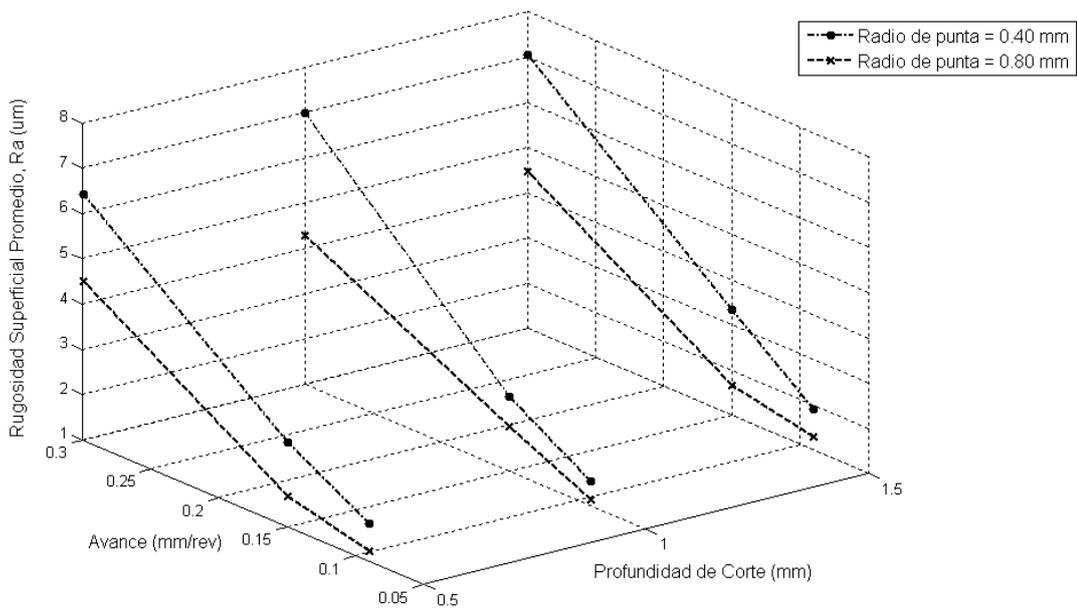


Figura 4.9 Gráfica comparativa f (mm/rev) vs d (mm) para  $V_c = 75$  m/min.

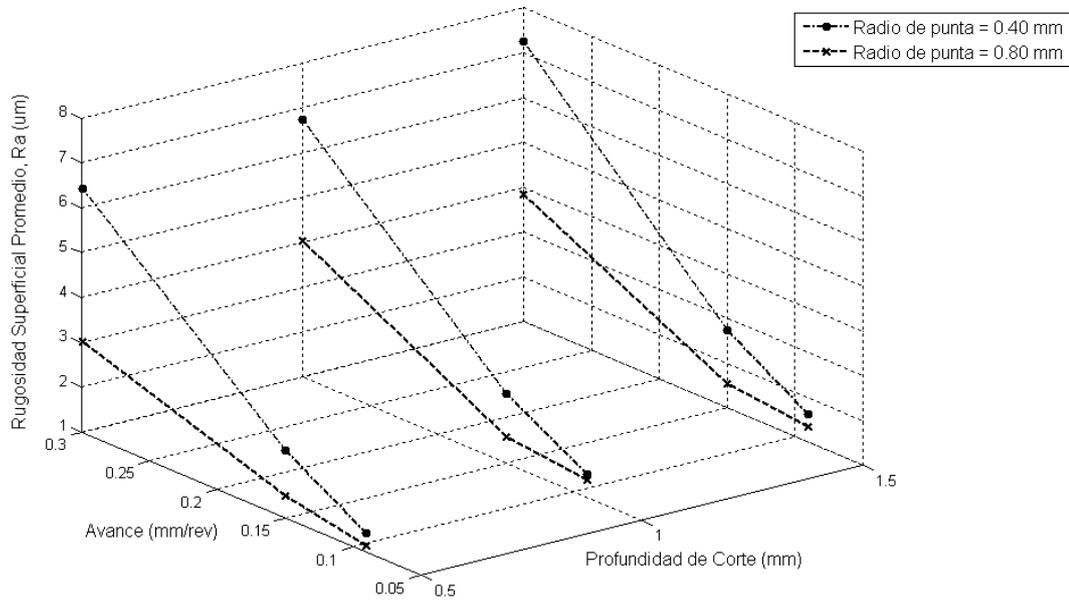


Figura 4.10 Gráfica comparativa f (mm/rev) vs d (mm) para Vc= 104 m/min.

#### 4.5.- Cálculo Rugosidad ideal ( $Ra_i$ ) y Rugosidad Teórica ( $Ra_{teórica}$ )

Empleando la ec. 2.12 de la sección 2.2.10.3 Capítulo II se procedió a realizar el cálculo de la rugosidad ideal tal como se muestra en el siguiente ejemplo:

$$f = 0,09 \text{ (mm/rev)}$$

$$re = 0,8 \text{ (mm)}$$

$$Ra_i = \frac{(0,09)^2}{32 \cdot 0,8} = \frac{0,0081}{25,6} = 0,3164 \text{ } \mu\text{m}$$

La rugosidad teórica se determinó utilizando la ec. 2.13 de la sección 2.2.10.3 Capítulo II, tal como sigue:

$$ra_i = 1.22$$

$$Ra_i = 0.316 \text{ (}\mu\text{m)}$$

$$Ra_{Teórica} = 1.22 * 0.316 = 0.386 \mu\text{m}$$

La  $ra_i$  es obtenida de la figura 2.16 de la sección 2.2.10.3 Capitulo II.

**Tabla 4.7** Comparación entre rugosidad ideal, teórica y experimental con las distintas combinaciones de parámetros.

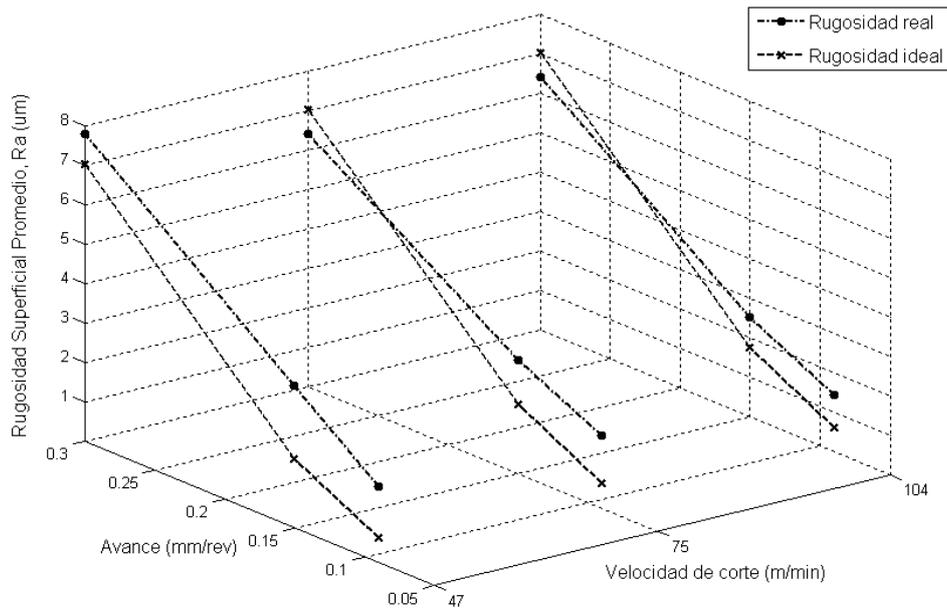
re (mm)	Vc (m/min)	f (mm/rev)	$Ra_i$ ( $\mu\text{m}$ )	$Ra_{Teórica}$ ( $\mu\text{m}$ )	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Error Relativo ideal (%)	Error Relativo teórico (%)
0,4	104	0.09	0.633	0.772	1.430	56	46
		0.15	1.758	2.145	2.523	30	15
		0.30	7.031	8.578	6.440	9	33
	75	0.09	0.633	0.892	1.845	66	52
		0.15	1.758	2.479	2.873	39	14
		0.30	7.031	9.914	6.415	10	55
	47	0.09	0.633	1.076	1.920	67	44
		0.15	1.758	2.988	3.613	51	17
		0.30	7.031	11.953	7.793	10	53
0,8	104	0.09	0.316	0.386	1.148	72	66
		0.15	0.879	1.072	1.495	41	28
		0.30	3.516	4.289	3.008	17	43
	75	0.09	0.316	0.446	1.225	74	64
		0.15	0.879	1.239	1.693	48	27
		0.30	3.516	4.957	4.505	22	10
	47	0.09	0.316	0.538	1.475	79	64
		0.15	0.879	1.494	2.790	68	46
		0.30	3.516	5.977	5.965	41	0

El error relativo se obtuvo de la siguiente manera:

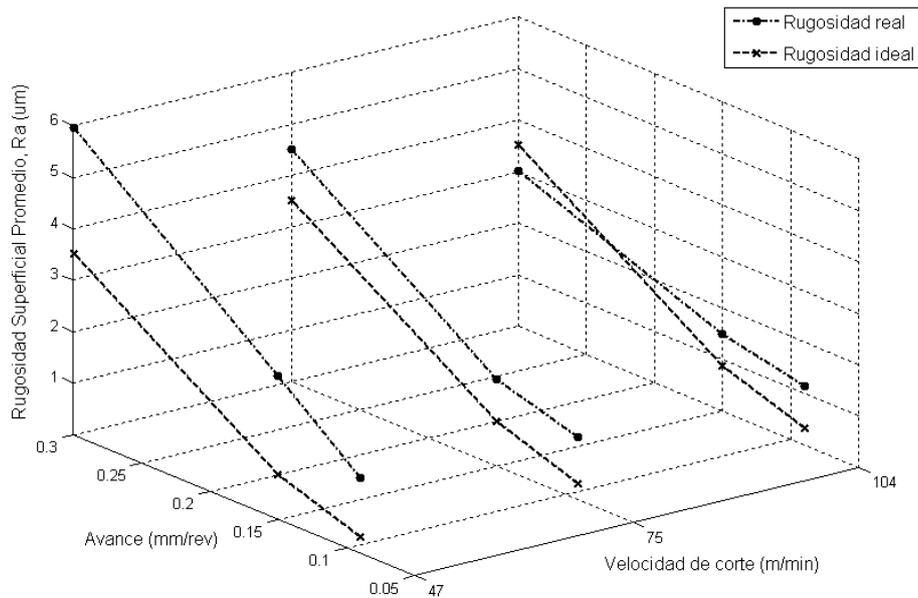
$$\text{Error Relativo ideal} = \frac{Ra - Ra_i}{Ra};$$

$$\text{Error Relativo teórico} = \frac{Ra - Ra_{Teórica}}{Ra}$$

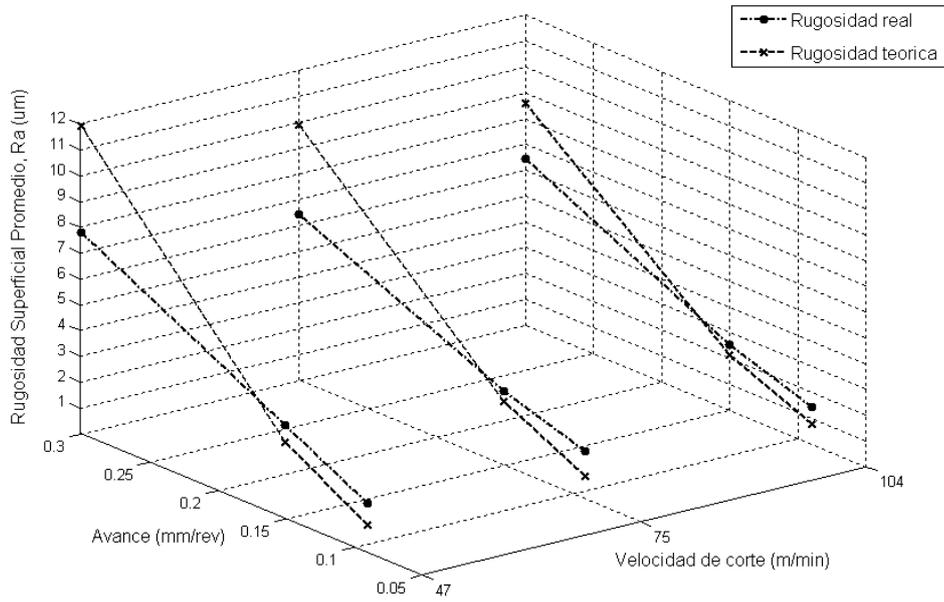
Luego de conocer los valores de la rugosidad ideal y la rugosidad teórica se procedió a graficarlas para facilitar la comprensión de su interacción con la rugosidad real. Estas gráficas se muestran a continuación:



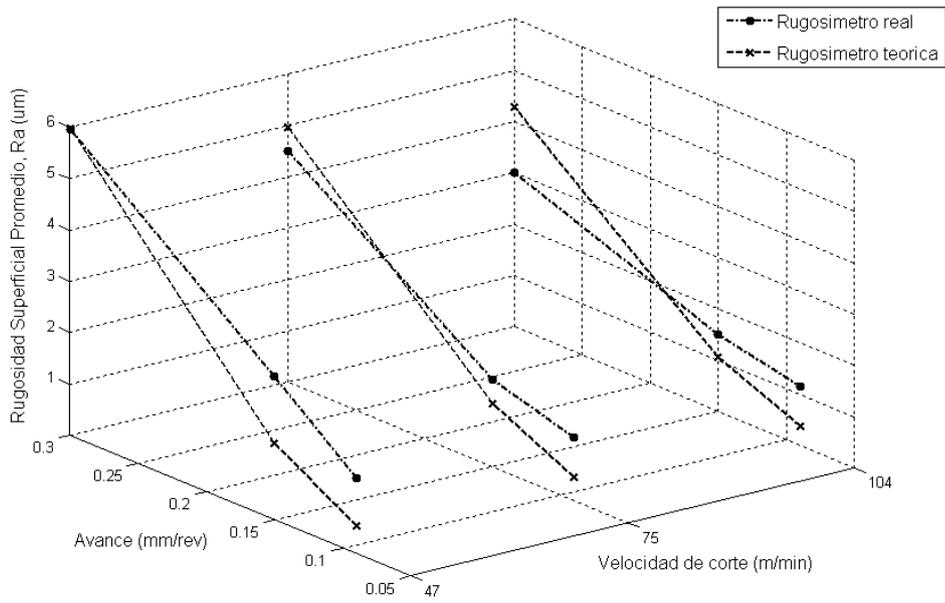
**Figura 4.11** Gráfica comparativa entre rugosidad real y rugosidad ideal con  $r_c=0,4\text{mm}$  ,  $d=0,5\text{mm}$



**Figura 4.12** Gráfica comparativa entre rugosidad real y rugosidad ideal con  $r_c=0,8\text{mm}$  ,  $d=0,5\text{mm}$



**Figura 4.13** Gráfica comparativa entre rugosidad real y rugosidad teórica con  $r_e=0,4\text{mm}$  y  $d=0,5\text{mm}$ .



**Figura 4.14** Gráfica comparativa entre rugosidad real y rugosidad teórica con  $r_e=0,8\text{mm}$  y  $d=0,5\text{mm}$ .

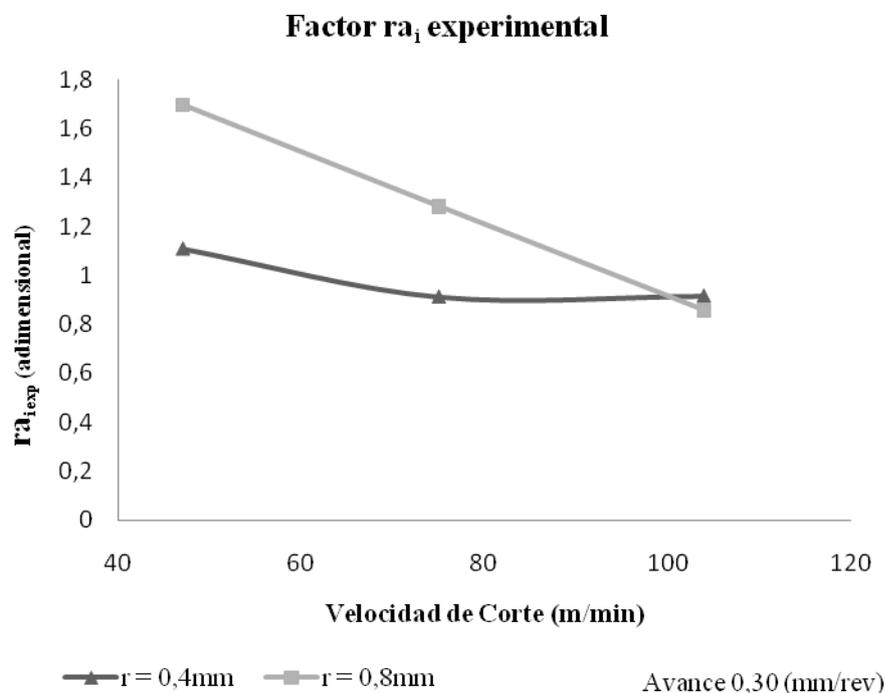
Luego se realizaron los cálculos para obtener el factor  $ra_{iexp}$ , tal como se muestra a continuación:

$$Ra = 1.43 \text{ (}\mu\text{m)}$$

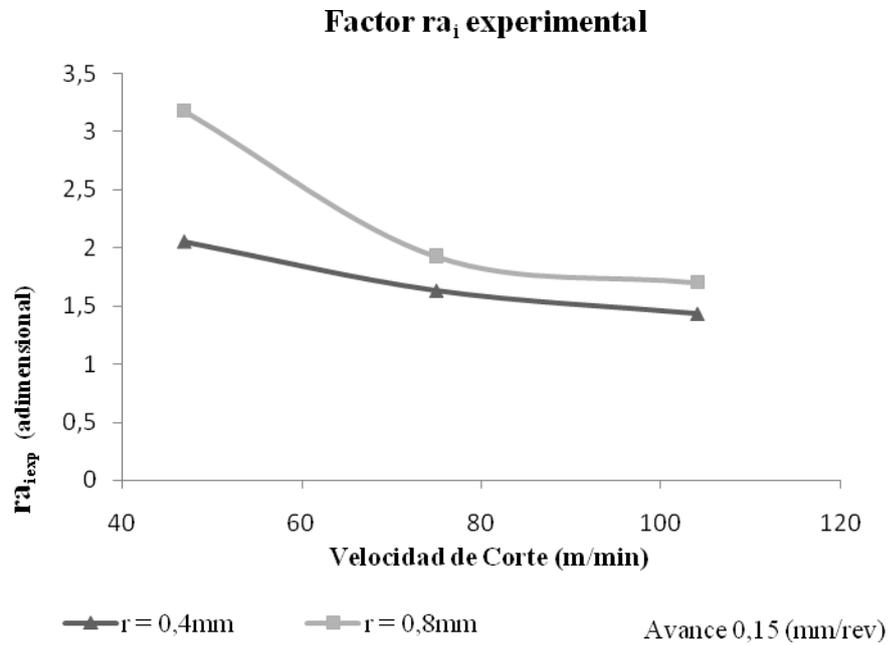
$$Ra_i = 0.633 \text{ (}\mu\text{m)}$$

$$ra_{iexp} = \frac{Ra}{Ra_i} = \frac{1.43}{0.633} = 2.260$$

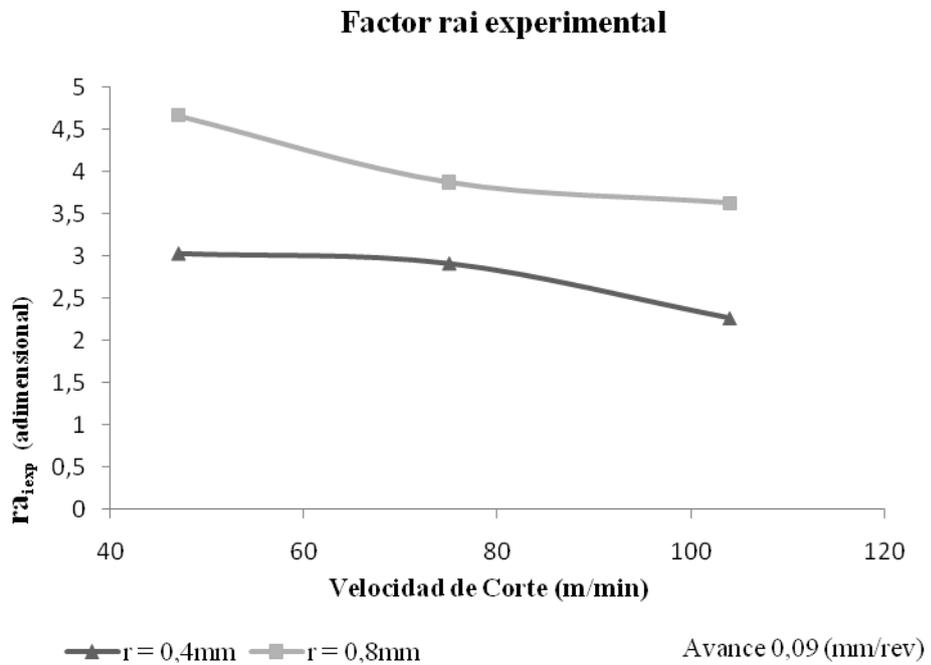
El factor  $ra_i$  permite corregir el valor de la rugosidad ideal ya que considera la rugosidad generada por los factores del material de trabajo y los factores dependientes de la máquina, los cuales no pueden ser determinados teóricamente a través de modelos matemáticos sencillos. Los ensayos realizados nos permitieron construir las gráficas de este factor para el aluminio A356 T6 en función de la velocidad de corte y para cada avance y radios estudiados. Las gráficas obtenidas son las siguientes:



**Figura 4.15** Factor  $ra_{iexp}$  con  $f = 0,30$  (mm/rev).



**Figura 4.16** Factor  $ra_{i,exp}$  con  $f = 0,15$  (mm/rev).



**Figura 4.17** Factor  $ra_{i,exp}$  con  $f = 0,09$  (mm/rev).

#### 4.6.- Análisis de Varianza (ANOVA)

Se realizaron análisis de varianza factorial utilizando el software estadístico SPSS ® para Windows Versión 15. Para el análisis, se desarrolló un modelo factorial en el cual se analizó no sólo el efecto principal de las variables involucradas (f, Vc, d y re), sino también el efecto generado por la interacción entre cada par de variables (f\*Vc, f\*d, f\*re, Vc\*d, Vc\*re y d\*re) sobre la rugosidad superficial generada, para el análisis se tomaron en cuenta todos los valores medidos experimentalmente, siendo 216 en total.

Los análisis fueron realizados para un nivel de significancia de 5%, para entonces tener un nivel de confianza del 95% (valores recomendados por el software SPSS), los resultados del análisis de varianza se muestran en la tabla 4.9, en dicha tabla se indica el grado de correlación obtenido en el modelo, la suma de cuadrados de las desviaciones, el factor F (*F test*) y el porcentaje de contribución (P) de cada factor en la rugosidad superficial obtenida. En la tabla 4.8 se muestra los niveles utilizados para los factores (Variables), de acuerdo a la metodología experimental detallada en la sección 3.2.

**Tabla 4.8** Factores Inter-sujetos empleados en el Análisis de Varianza Factorial

Variables		Etiqueta de la Variable	N <sup>d</sup>
Avance (mm/rev)	0,09	f1	72
	0,15	f2	72
	0,30	f3	72
Velocidad de Corte (m/min)	47,00	Vc1	72
	75,00	Vc2	72
	104,00	Vc3	72
Profundidad de Corte (mm)	0,50	d1	72
	1,00	d2	72
	1,50	d3	72
Radio de punta (µm)	0,40	re1	108
	0,80	re2	108
Total de ensayos experimentales			216

<sup>d</sup> Número de ensayos donde está involucrada la variable

**Tabla 4.9** Tabla de resultados del Análisis de Varianza para el ALUMINIO AA356 T6

<i>Variable dependiente: Rugosidad Ra (<math>\mu\text{m}</math>) Material: ALUMINIO AA356 T6</i>					
<b>Variable</b>	<b>Suma de cuadrados (tipo III)</b>	<b>GL<sup>a</sup></b>	<b>Media cuadrática (Varianza)</b>	<b>F</b>	<b>P (%)<sup>b</sup></b>
Vc	41,582	2	20,791	288,039	4,27
Re	88,397	1	88,397	1224,656	9,08
f	766,011	2	383,006	5306,189	78,64
d	1,623	2	0,812	11,243	0,17
Vc * re	2,555	2	1,277	17,695	0,26
Vc * f	13,509	4	3,377	46,790	1,39
Vc * d	1,010	4	0,252	3,497	0,10
re * f	41,739	2	20,869	289,125	4,29
re * d	2,601	2	1,300	18,014	0,27
f * d	1,311	4	0,328	4,539	0,13
Error	13,714	190	0,072		1,41
Total	974,0512	216			

Coefficiente de correlación del modelo:  $R^2 = 0,986$  ( $R^2$  corregido = 0,984)

<sup>a</sup> Grados de Libertad

<sup>b</sup> Porcentaje de Contribución

## 5.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para este trabajo, los valores experimentales obtenidos se analizaron en dos secciones, se realizaron gráficas en tres dimensiones con las variables involucradas del comportamiento de los valores promedio de la rugosidad superficial (Ra), y luego se realizó el análisis de varianza factorial (ANOVA) para obtener la correlación que existe entre las variables en estudio y la rugosidad superficial. De los resultados obtenidos se puede analizar lo siguiente:

### A) Microestructura

Como se observa en las imágenes, al realizar el tratamiento térmico T6 al aluminio A356 se produjo una fragmentación y un redondeo de las agujas de silicio. Esta esferoidización se produjo al calentar las muestras a temperaturas próximas a la temperatura eutéctica, 500-550 °C, En nuestro caso 540°C, durante 10 Horas. Así pues, este proceso de esferoidización potenció las características mecánicas de la aleación aumentando la plasticidad y el alargamiento, sin pérdida de la resistencia mecánica.

Por razones de orden termodinámico y cinético la solución sólida sobresaturada, obtenida por puesta en solución y temple, no da lugar a temperatura ambiente a la precipitación de la fase intermetálica de equilibrio. El endurecimiento del material por el envejecimiento artificial, manteniéndolo a 155°C por 5 Horas, resultó de una descomposición secuencial de la solución sólida  $\alpha$  y de un empobrecimiento progresivo en soluto de esta última.

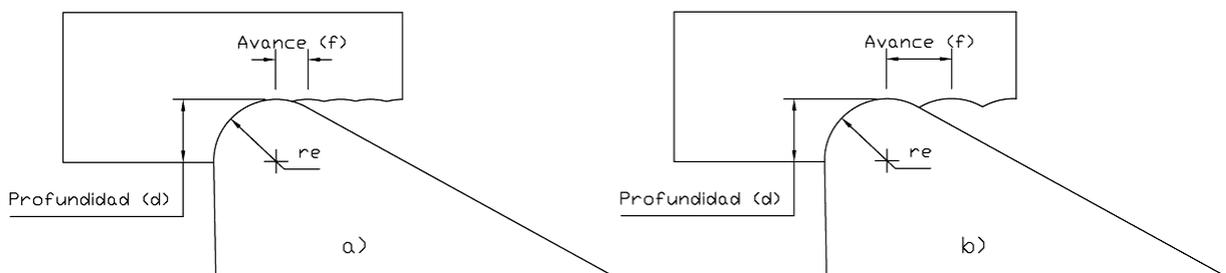
En las imágenes se puede observar claramente el precipitado del silicio, tendiendo éstos a una forma redondeada y agrupada, fuera de este precipitado lo que se observa es la matriz de aluminio y esos pequeños puntos negros vistos en las imágenes a 200x (fig. 4.4) son partículas del compuesto  $Mg_2Si$ , que no se disolvieron en la matriz por completo. Se puede apreciar que tanto en el centro como en los bordes de la muestra, la microestructura presenta el mismo patrón lo que nos permite afirmar que el tratamiento térmico se produjo de manera uniforme en todo el material.

En imágenes de otros estudios de la microestructura de un A356 T6 [9][10], se pudo observar una gran similitud con las imágenes tomadas en este estudio, lo que nos hace afirmar que el material con el tratamiento térmico hecho corresponde a un Aluminio A356 T6.

**B) Influencia del avance de la herramienta sobre la rugosidad superficial:**

La rugosidad superficial obtenida en cualquier nivel de profundidad de corte y para cualquier velocidad corte siempre fue mayor a medida que aumentó el avance, tal como se observa en las figuras 4.5 a 4.10, este comportamiento se evidenció, en general, para los ensayos de mecanizado realizados.

Esto se debe a la forma geométrica de la huella que deja la herramienta sobre la superficie de la pieza, de acuerdo a la velocidad de avance con que se mueve la herramienta de corte, la altura del perfil de la huella es mayor a medida que el avance es mayor, tal como se muestra en la figura 5.1, y también esto se debe, a que existe una mayor tasa de remoción de material que genera mayores fuerzas de corte sobre la herramienta, mayor consumo de potencia, y niveles de vibración mayores en la máquina.



**Figura 5.1** Influencia del avance de la herramienta sobre la rugosidad superficial, para un proceso de torneado con el mismo ángulo de posición, radio de punta, profundidad y material.

a) avance bajo y b) avance alto (el doble)

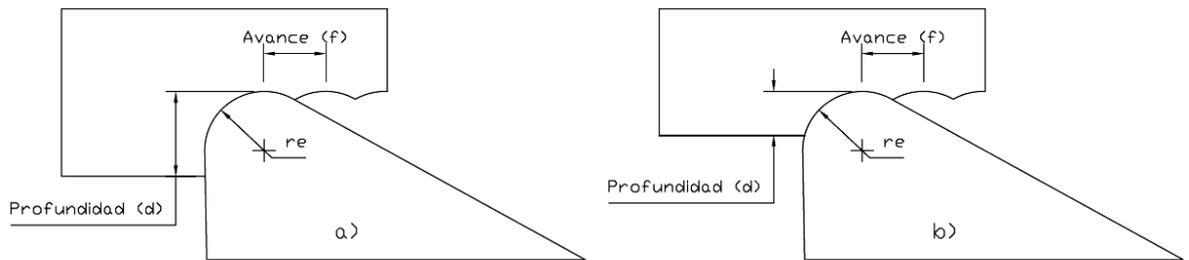
**Fuente:** Trabajo de Ascenso del Prof. Juan Carlos Pereira.

El comportamiento gráfico de la rugosidad superficial a medida que varía el avance de la herramienta, demuestra que este parámetro influye de manera notoria en la misma. Los análisis de varianza realizados corroboran esto. Se tiene

que el porcentaje de contribución o influencia del avance sobre la rugosidad superficial es de un 78,64%, mientras que la interacción del avance con el radio de punta tiene una ligera contribución del 4,29%, seguido con un porcentaje 1,39% la interacción del avance con la velocidad de corte.

### **C) Influencia de la profundidad de corte sobre la rugosidad superficial:**

El área de corte se ve afectada de manera proporcional por la profundidad de corte, mientras mayor sea la profundidad mayor será el área de corte y la cantidad de material a remover, sin embargo, la forma geométrica de la huella dejada por la herramienta de corte en el proceso de mecanizado no se ve influenciada por la profundidad de corte, tal como se muestra en la figura 5.2. Se puede observar que los valores de rugosidad superficial obtenidos en los ensayos a diferentes profundidades de corte, manteniendo constantes los parámetros restantes, son bastante similares mas no iguales, como se puede observar en las gráficas 4.5 a 4.10, pero estas diferencias no generan una modificación sustancial de la rugosidad superficial bajo la influencia de la profundidad de corte, aunque si se encontraron ligeras tendencias en el comportamiento de la rugosidad superficial, ya que cuando se trabajó con el radio de punta 0.4 mm los valores de rugosidad superficial fueron siempre mayores a profundidad 1.5mm que a la profundidad de 1mm y comparándolos con los valores de rugosidad a profundidad 0.5 mm, estos también resultaron mayores a excepción de un solo caso. También los valores de rugosidad superficial obtenidos con el radio de punta 0.8 mm fueron mayores a la profundidad de corte 1mm, luego a 1.5mm y los menores a 0.5 mm, aunque esto no se dio en todos los casos, sí se observó en el 80% de los ensayos.



**Figura 5.2** Influencia de la profundidad de corte sobre la rugosidad superficial, para un proceso de torneado con el mismo ángulo de posición, radio de punta, avance y material.

a) profundidad alta (el doble) y b) profundidad baja

**Fuente:** Trabajo de Ascenso del Prof. Juan Carlos Pereira.

El análisis de varianza realizado demuestra que la profundidad de corte no influye significativamente en la rugosidad superficial obtenida. Se tiene que el porcentaje de contribución o influencia de la profundidad de corte sobre la rugosidad superficial es de apenas un 0,17%, mientras que la interacción de la profundidad de corte con el radio de punta tiene una influencia del 0,27%.

#### **D) Influencia de la velocidad de corte sobre la rugosidad superficial:**

La velocidad de corte no es una variable que se toma en cuenta en los modelos teóricos que estiman la rugosidad “ideal” (como se detalló en la sección 2.2.10.3 del capítulo II). El área de corte y la forma geométrica de la huella dejada por la herramienta de corte no se ve modificada por este parámetro en el proceso de mecanizado. Sin embargo, si se observaron pequeñas variaciones en los valores de la rugosidad superficial obtenidos al variar la velocidad de corte diferentes niveles, dejando los demás parámetros constantes.

La tendencia general (salvo pocas combinaciones) fue de disminuir la rugosidad superficial ligeramente a medida que se incrementa la velocidad de corte, esto en correspondencia al modelo planteado para estimar la rugosidad “natural” (sección 2.2.10.3 Capítulo II), que obedece a las características de la máquina herramienta y al material, tales como vibraciones y montaje de la

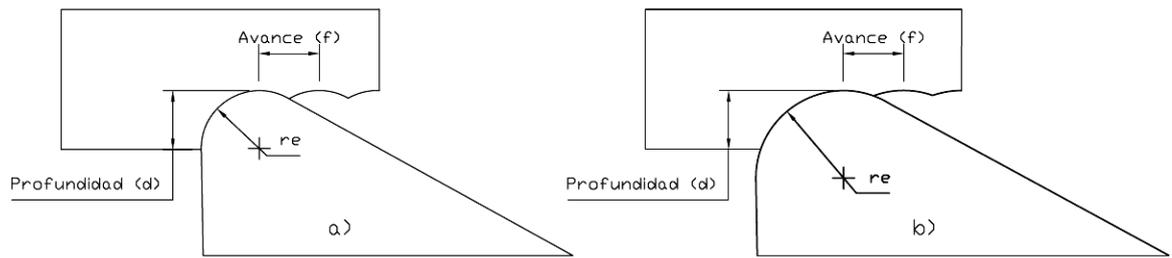
herramienta y pieza. Se pudo observar también, que para la misma profundidad de corte y avance los valores de rugosidad superficial a una velocidad de 104 m/min y de 75 m/min fueron cercanos entre sí mientras que los valores entre la velocidad de 75 m/min y de 47 m/min presentaron una diferencia más notable.

El análisis de varianza conducido demuestra que la velocidad de corte no es un parámetro que ejerza una influencia significativa sobre la rugosidad superficial. Se tiene que el porcentaje de contribución o influencia de la Velocidad de corte sobre la rugosidad superficial es de un 4,27%, mientras que la interacción del avance con la velocidad de corte tiene una ligera contribución del 1,39%.

#### **E) Influencia del radio de punta de la herramienta sobre la rugosidad superficial:**

Se puede observar que cuando se utilizó una herramienta cuyo radio de punta fue de 0.8 mm, la rugosidad superficial obtenida es menor, en comparación con la que se obtuvo al utilizar un radio de punta menor, que en nuestro caso fue de 0.4 mm, es decir, a medida que se incrementa el radio de punta se disminuye la rugosidad superficial obtenida, tal como se observa en las figuras 4.5 a 4.10. La causa de esto es la forma geométrica de la huella que deja la herramienta sobre la superficie de la pieza, según el radio de punta de la herramienta utilizada, a medida que el radio de punta es mayor la altura del perfil de la huella es menor, tal como se muestra en la figura 5.3.

Se observó que la rugosidad superficial disminuyó considerablemente con el aumento del radio de punta de la herramienta, aunque esta mejora no fue sustancial cuando se trabajó con el avance menor debido a que los valores obtenidos son cercanos para ambos radios de punta de la herramienta.



**Figura 5.3** Influencia del radio de punta de la herramienta de corte sobre la rugosidad superficial, para un proceso de torneado con el mismo ángulo de posición, profundidad, avance y material.

a) radio de punta bajo (0,8 mm) y b) radio de punta alto (1,2 mm)

**Fuente:** Trabajo de Ascenso del Prof. Juan Carlos Pereira.

El análisis de varianza realizado demuestra que el radio de punta de la herramienta es el segundo parámetro más influyente en la rugosidad superficial. Se tiene que el porcentaje de contribución o influencia del radio de punta sobre la rugosidad superficial es de un 9,08%, mientras que la interacción del radio de punta con el avance tiene una contribución del 4,29%.

#### **F) Relación entre la rugosidad experimental, la rugosidad ideal y la rugosidad teórica:**

En las gráficas 4.11 a la 4.14 se puede observar que a medida que aumenta el avance, el error relativo que existe entre la rugosidad real y la rugosidad ideal va disminuyendo, esto ocurre hasta cierto nivel de avance, donde cambia la tendencia y comienza a aumentar esta diferencia. Este comportamiento se debe a que los valores calculados de rugosidad ideal están por debajo de los valores reales de rugosidad pero a medida que aumenta el avance, los valores de rugosidad ideal aumentan en mayor proporción que los valores de rugosidad real lo que ocasiona que exista un punto en que esta diferencia entre ambas rugosidades se haga cero y luego comience a aumentar pero, esta vez con los valores de rugosidad ideal por encima de los de rugosidad real. La rugosidad teórica se comporta exactamente de la misma manera, la única diferencia es que el

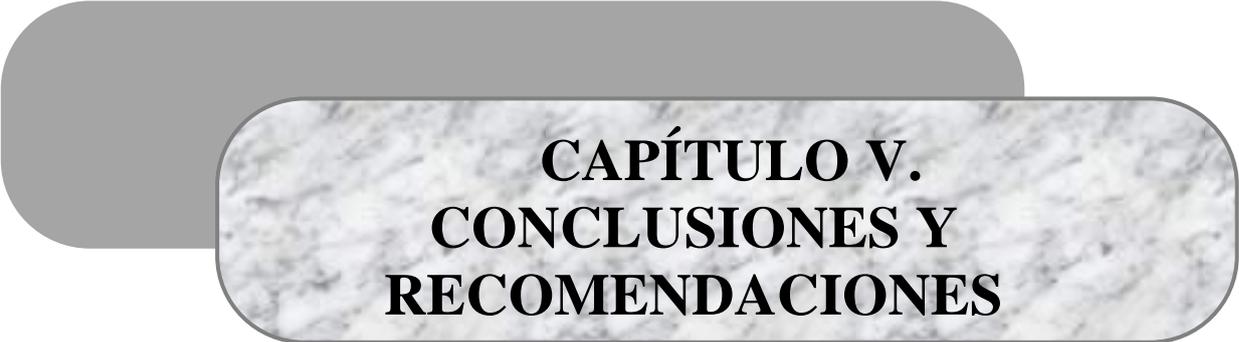
valor del avance donde se hace cero el error relativo es menor que en la rugosidad ideal.

Al comparar las gráficas de rugosidad real vs. rugosidad ideal con las gráficas rugosidad real vs. rugosidad teórica se observa que la menor diferencia entre los valores de rugosidad superficial está entre la rugosidad real y la rugosidad teórica, solo antes de la intersección de las curvas. Esta intersección se da entre los niveles de avance medio y alto, luego la rugosidad teórica es mucho mayor a la rugosidad real en comparación con la rugosidad ideal, por lo que después de esta intersección de las curvas, la menor diferencia entre los valores de rugosidad superficial es arrojada cuando se trabaja con la rugosidad ideal.

Se puede observar que a medida que aumenta la velocidad de corte disminuye el error relativo que existe entre la rugosidad ideal y la rugosidad real, esto se debe a que los valores de rugosidad real tienden a ser menores a mayor velocidad de corte, por lo que bajo las condiciones estudiadas, al aumentar la velocidad de corte la curva de rugosidad real se acerca más a la curva de rugosidad ideal. Este comportamiento se da dentro de los rangos estudiados, ya que si la tendencia se mantiene, a una velocidad de corte muy elevada, desde el inicio los valores de rugosidad ideal serán mayores a los reales, diferencia que ira haciéndose cada vez más marcada a medida que aumente el avance.

Se observa que la curva de rugosidad ideal se ajusta más a la curva de rugosidad real a medida que se trabaja con un radio de punta menor. Este comportamiento se da dentro de los rangos estudiados ya que si la tendencia se mantiene, para un radio de punta menor a los empleados, los valores de rugosidad ideal serán mayores a los reales desde el inicio.





**CAPÍTULO V.  
CONCLUSIONES Y  
RECOMENDACIONES**

---

---

## **CAPÍTULO V**

---

---

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **CONCLUSIONES**

Luego del análisis de resultados y discusión de este estudio se ha llegado a las siguientes conclusiones:

1. A medida que aumenta el avance, aumentan los valores de rugosidad superficial, este incremento no sigue una tendencia proporcional, obteniéndose casos donde se incremento hasta cinco veces más el valor de rugosidad superficial entre el menor y el mayor avance. La rugosidad superficial obtenida en una operación de torneado se ve significativamente afectada por el avance de la herramienta, es el parámetro de corte que más influye en el comportamiento de la rugosidad superficial, alcanzando un porcentaje de contribución de aproximadamente un 79%.
  
2. La profundidad de corte no ejerce un efecto significativo en la rugosidad superficial obtenida en el torneado, ya que el porcentaje de contribución fue de apenas 0,17%.
  
3. La velocidad de corte no influye significativamente en la rugosidad superficial obtenida en el torneado, ya que el porcentaje de contribución fue de apenas 4,27 %. Aunque si existe una tendencia a disminuir ligeramente los valores de rugosidad a medida que se incrementa la velocidad de corte.

4. Al incrementar el radio de punta de la herramienta disminuye de manera significativa la rugosidad superficial obtenida en el torneado, es el parámetro de corte que ejerce la segunda mayor influencia en el comportamiento de la rugosidad superficial, alcanzando porcentajes de contribución de 9,08%.
  
5. Las ecuaciones para calcular la rugosidad teórica y la rugosidad ideal se ajustan a los valores obtenidos en la medición de rugosidad superficial de manera experimental. Obteniéndose para un avance de 0.30mm/rev y radio de punta de la herramienta 0.4mm, un error relativo máximo entre la rugosidad ideal y rugosidad real de 10%, y para un avance de 0.15mm/rev y radio de punta de la herramienta 0.4mm, un error relativo máximo entre la rugosidad teórica y la rugosidad real de 17%.
  
6. Para las condiciones y parámetros de trabajo utilizados, tanto la ecuación para calcular la rugosidad ideal como la de rugosidad teórica subestima a la rugosidad real hasta un nivel de avance, y luego la sobreestima.  

Este nivel de avance, donde la rugosidad ideal y la teórica pasa de subestimar a la rugosidad real a sobreestimarla, no se puede obtener para ser utilizado de forma generalizada ya que para cada condición estudiada, el valor de este avance es distinto. Pero es posible obtenerlo para cada condición y estudiar la tendencia. Por ejemplo para la rugosidad teórica y el radio de punta de la herramienta 0.4 mm, este nivel de avance se encontró entre 0.15mm/rev y 0.2mm/rev, y para el radio de punta 0,8 mm el nivel de avance se encontró entre 0.2mm/rev y 0.3mm/rev.
  
7. El factor  $ra_i$  permite corregir y aproximar más el valor de la rugosidad ideal a la rugosidad real hasta un nivel de avance, que bajo las condiciones de trabajo establecidas estuvo comprendido para la mayoría

de los casos entre 0.09 mm/rev y 0.2 mm/rev, luego de este nivel de avance el factor  $ra_i$  aumenta la diferencia existente entre la rugosidad ideal y la rugosidad real.

8. A medida que disminuye el radio de punta de la herramienta de corte disminuye el error que existe entre la rugosidad ideal y la rugosidad real entre un 8% y un 30%, esto sucede dentro del rango de avances estudiados.
  
9. Los desajustes presentes en el torno, tales como: vibración de la torreta, desgaste de la bancada, entre otros, influyen de manera negativa en la rugosidad superficial.

---

---

## RECOMENDACIONES

Para obtener el mejor acabado superficial al mecanizar un aluminio AA356 T6, se debe mecanizar con bajos avances y un radio de punta grande. La profundidad de corte no influye significativamente sobre la rugosidad superficial.

Para un estudio posterior determinar el efecto de la utilización de un fluido refrigerante sobre la rugosidad obtenida en operaciones de torneado de aleaciones de aluminio.

Estudiar el efecto del desgaste de la herramienta y su consecuencia sobre la rugosidad superficial obtenida en el proceso de torneado.

También se plantea el estudio del efecto de las vibraciones presentes en la máquina-herramienta sobre la rugosidad superficial en operaciones de torneado.

Determinar la influencia de la adhesión de material en la herramienta de corte y su efecto sobre la rugosidad superficial.

Realizar un estudio basado en los mismos parámetros aquí planteados pero con tornos CNC.

Utilizar el factor  $ra_i$  <sub>exp.</sub> obtenido en este trabajo para futuros cálculos de la rugosidad teórica de la aleación de aluminio AA356 T6 dentro de los rangos estudiados ya que permite corregir la rugosidad ideal de manera más exacta que el factor  $ra_i$  generalizado para metales dúctiles.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Smith, William F. Ciencia e ingeniería de materiales (2004). Tercera edición. Editorial McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S.A.U. Pág. 295 a 297.
- [2] Pereira, Juan C. Procesos de Fabricación por Arranque de Viruta (2004). Universidad de Carabobo. Pág. 33 a 50.
- [3] Mitutoyo, manual de operación “Medidor de acabado superficial-Rugosímetro SJ 201P”. Pág. 17 a 40.
- [4] Mitutoyo, Parámetros de medición de rugosidad. Rugosímetro SJ 201P. Pág. 1 a 11.
- [5] ASTM B 917M, Standard Practice for Heat Treatment of Aluminum-Alloy Castings from All Processes.
- [6] ASTM B 108 – 03a, Standard Specification for Aluminum-Alloy Permanent Mold Castings.
- [7] ASTM E 407 - 99, Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.
- [8] ASTM B 557 - 06. Standard Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products.
- [9] Druschitz, Alan P., Prucha, Thomas E., Kopper, Adam E., Chadwick, Thomas A. Mechanical Properties of High Performance Aluminum Castings. SAE Technical Papers Series (2001). Pag. 9.

[10] Ma, Shuhui. A Methodology to Predict the Effects of Quench Rates on Mechanical Properties of Cast Aluminum Alloys. Worcester Polytechnic Institute (2006). Pag 98 a 99.

[11] Gokkaya, Hasan, Nalbant, Muammer. The effects of cutting tool geometry and processing parameters on the surface roughness of AISI 1030 steel. Zonguldak Karaelmas University, Karabuk, Turkey. (2005).

[12] Davim, J. Paulo. A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments. Department of Mechanical Engineering, University of Aveiro, Portugal. (2001).