

**EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD SUPERFICIAL DEL ACERO AISI-12L14  
PARA MAQUINARIA, SOMETIDO A PROCESOS DE MAQUINADO**

**Por**

**JORGE ENRIQUE POSADA RAMÍREZ**

**Tesis sometida ante la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de  
Colombia sede Medellín en parcial cumplimiento de los requisitos para el  
grado de Magíster en Ingeniería Área Materiales y Procesos**

**Director del Proyecto**

**JUAN MANUEL VÉLEZ RESTREPO**

**Ingeniero Mecánico MSc. PhD.**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE MINAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE MATERIALES  
SEDE MEDELLÍN  
MEDELLÍN  
2009**

**EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD SUPERFICIAL DEL ACERO AISI-12L14  
PARA MAQUINARIA, SOMETIDO A PROCESOS DE MAQUINADO**

**Por**

**JORGE ENRIQUE POSADA RAMÍREZ**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE MINAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE MATERIALES  
SEDE MEDELLÍN  
MEDELLÍN  
2009**

**EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD SUPERFICIAL DEL ACERO AISI-12L14  
PARA MAQUINARIA, SOMETIDO A PROCESOS DE MAQUINADO**

Nota de aceptación

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

\_\_\_\_\_  
Firma del Presidente del Jurado

\_\_\_\_\_  
Firma del Jurado

\_\_\_\_\_  
Firma del Jurado

Medellín (27, 02, 2009)

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>14</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.2 IMPACTOS ESPERADOS.....	16
1.3 RESULTADOS ESPERADOS.....	16
<b>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>40</b>
3.1 MATERIAL UTILIZADO: ACERO AISI – 12L14.....	40
3.1.1 Propiedades mecánicas.....	41
3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	42
3.2.1 Geometría de las Probetas.....	42
3.2.2 Selección de las herramientas a utilizar en el proceso de torneado cilíndrico.....	43
3.2.3 Selección de la máquina herramienta para la realización del proceso.....	43
3.2.4 Etapas del Proceso.....	44
3.2.5 Selección de los parámetros del proceso.....	44
3.3 DISEÑO ESTADÍSTICO.....	46
3.4 MEDICIÓN DE LA RUGOSIDAD.....	49
3.5 EVALUACIÓN CUALITATIVA DE LAS SUPERFICIES.....	49
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>50</b>
4.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	50
4.2 EVALUACIÓN DE LA SUPERFICIE.....	70
4.3 ANÁLISIS DE VARIANZA MULTIFACTORIAL ANOVA PARA Ra.....	81
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>91</b>
<b>6. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>95</b>
<b>7. REFERENCIAS.....</b>	<b>96</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Espina de pescado parámetros que afectan la rugosidad, tomado de Bernardos y Vosniakos <sup>2</sup> .....	19
Figura 2. Variación de la rugosidad para el torneado de aceros bajo la acción combinada de velocidad y avance variables .....	20
Figura 3. Variación de la rugosidad de los aceros OLC25 y OLC45 sometidos a proceso de torno, variando la velocidad y el avance.....	21
Figura 4. Influencia de la velocidad y el avance sobre la rugosidad en el maquinado del acero OLC10 .....	21
Figura 5. Variación de la rugosidad con la velocidad .....	23
Figura 6. Variación de la rugosidad con la velocidad .....	23
Figura 7. Efecto del avance sobre la rugosidad, comparación entre la curva ideal, de valores predichos y los datos obtenidos experimentalmente .....	24
Figura 8. Comportamiento de la rugosidad para el acero AISI-1045, torneado a diferentes velocidades, avances y profundidad de corte.....	28
Figura 9. Superficies de respuesta para Ra con base en los factores velocidad y avance.....	30
Figura 10. Variación de la rugosidad con los parámetros de corte, de acuerdo con los modelos de Kopac y Bahor.....	32
Figura 11. Diagrama esquemático de una red neuronal artificial para la predicción de la rugosidad superficial.....	34
Figura 12. Efecto de las condiciones del proceso sobre la rugosidad y la precisión dimensional .....	36
Figura 13. Contornos de rugosidad en planos velocidad avance.....	37
Figura 14. Estructura metalográfica del acero AISI- 12L14. Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Minas – Universidad Nacional Sede Medellín.....	40
Figura 15. Puntos de evaluación de la dureza .....	41

Figura 16. Esquema general del diseño del experimento a realizar para evaluar la respuesta del acero AISI – 12L14 frente a procesos de torneado .....	47
Figura 17. Variación de la Rugosidad con la velocidad de corte.....	55
Figura 18. Variación del parámetro de espaciamiento Rs con la velocidad de corte .....	56
Figura 19. Variación de la Rugosidad con el avance .....	57
Figura 20. Variación del parámetro de espaciamiento Rs con el avance.....	57
Figura 21. Variación de Ra – velocidad para los datos de Davim <sup>46</sup> publicados en Elsevier. ....	61
Figura 22. Relación Rugosidad – tiempo .....	63
Figura 23. Relación Potencia - avance.....	64
Figura 24. Relación Potencia – Velocidad.....	65
Figura 25. Relación entre la potencia consumida y el tiempo de procesamiento. ....	66
Figura 26. Relación entre la Rugosidad promedio Ra y la potencia consumida en el proceso .....	68
Figura 27. Gráficas de variación de Ra intervalos para velocidad y avance .....	84
Figura 28. Gráfica de interacción de los factores Velocidad y Avance.....	86
Figura 29. Superficie de respuesta para Ra, de acuerdo con el modelo de regresión obtenido .....	90

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de las pruebas de resistencia mecánica aplicadas a las probetas de acero AISI-12L14 en el laboratorio de resistencia de Materiales de la U. de Antioquia.....	41
Tabla 2. De referencia para velocidad, avance, profundidad de corte y grado de carburo para la herramienta, en procesos de torneado cilíndrico, tomado de Machining Data Handbook .....	45
Tabla 3. De referencia para velocidad, avance, profundidad de corte y grado de carburo la herramienta, en procesos de torneado cilíndrico, tomado de Machining Data Handbook .....	45
Tabla 4. Matriz de eventos del experimento de torneado cilíndrico del acero AISI – 12L14 .....	48
Tabla 5. Valores experimentales del proceso de torneado cilíndrico de probetas de acero AISI-12L14, de 25.4 mm de Diámetro .....	52
Tabla 6. Comparación entre probetas maquinadas con el mismo avance: 0.51 mm/rev, la misma profundidad de corte: 1mm, y diferente velocidad .....	71
Tabla 7. Comparación entre probetas maquinadas con el mismo avance: 0.21 mm/rev, la misma profundidad de corte: 1mm, y diferente velocidad .....	73
Tabla 8. Comparación entre probetas maquinadas con el mismo avance: 0.06 mm/rev, la misma profundidad de corte: 1mm, y diferente velocidad .....	74
Tabla 9. Comparación entre probetas maquinadas con la misma velocidad: 36.70 m/min, la misma profundidad de corte: 1mm, y diferente avance .....	76
Tabla 10. Comparación entre probetas maquinadas con la misma velocidad: 159.59 m/min, la misma profundidad de corte: 1mm, y diferente avance .....	78
Tabla 11. Tabla ANOVA. Análisis de Varianza para Ra - Tipo III Sumas de Cuadrados.....	82
Tabla 12. Tabla de valores medios mínimos cuadrados para Ra en intervalos con 95% de confiabilidad (confianza) .....	82

Tabla 13. Chequeos de rangos múltiples de la velocidad para Ra. ....	85
Tabla 14. Valores de los parámetros del modelo de regresión lineal.....	88
Tabla 15. Análisis de Varianza.....	88
Tabla 16. Tabla de ecuaciones modelo estadístico para las variables de rugosidad .....	93



## **DEDICATORIA**

A mi esposa Esther Alicia, a mis hijos Alejandra y Andrés Felipe, a mis hermanos Victoria, Miryam Sonia, Martha Helena Y Juan Guillermo, a mi amigo y compañero Freddy Chacón, por su acompañamiento y solidaridad.

## **AGRADECIMIENTOS**

A las Universidades Nacional de Colombia y de Antioquia por brindarme la oportunidad de estudiar.

A mi director de tesis y profesor Doctor Juan Manuel Vélez Restrepo, por su sabiduría y por los conocimientos que me entregó, por la luz que me ayudó a encontrar, por su dirección siempre acertada, por su apoyo incondicional, por su paciencia, comprensión y solidaridad.

A la empresa Aceros Industriales y a su gerente Ingeniero Francisco Javier Hernández Z. por su interés y apoyo incondicional al proyecto de investigación desarrollado, por sus aportes conceptuales y el suministro de los materiales para la realización de las pruebas.

A los profesores de la Escuela de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Oscar Jaime Restrepo Baena, Alejandro Octavio Toro, Marco Antonio Márquez, Jorge Enrique Giraldo, ejemplos de trabajo, responsabilidad y compromiso.

A mis amigos de la Universidad de Antioquia, Horacio Giraldo, Elkin Urrego, Freddy Chacón, Hernando Restrepo, Henry Colorado, Carlos Andrés Trujillo, John Miller, que siempre me empujaron hacia la superación del reto que supone estudiar y llegar más lejos en el conocimiento.

Al Ingeniero Luis Javier Madrid, profesor de la Universidad Nacional por su acompañamiento, apoyo y aportes en la esencia de este trabajo.

A Adrián Gómez, Medardo Pérez y Mery Arrubla, expertos del laboratorio de metalografía de la Facultad de Minas, por facilitarme la parte experimental.

Al técnico del laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de Antioquia Elkin Urrego por su ayuda incondicional en la realización de las pruebas y ensayos y su aporte en el análisis de los resultados.

A mis amigos y compañeros de estudio, Isabel Cristina Cardona, Adrián Gómez, Juan Carlos Baena, John Jairo Hoyos, Juan Felipe Santa, Hernando Pacheco, María Isabel Giraldo, Carolina Giraldo, Daniel Ribero, Daniel Mármol, Leyla Jaramillo, Ekaterina Castañeda, por contagiarme de su espíritu juvenil y ávido de conocimientos.

## **RESUMEN**

Existe una creciente demanda, en todos los sectores de la economía, por la fabricación de máquinas, equipos y elementos componentes con altas especificaciones técnicas, confiabilidad y desempeño sobresalientes, a precios razonables. La calidad de las superficies de los componentes que se fabrican en materiales metálicos, mediante procesos con arranque de viruta, como el torneado, depende de una adecuada combinación de las variables que gobiernan el proceso. Una manera de calificar las superficies obtenidas, se basa en la caracterización de la rugosidad y en la derivación de patrones que permitan controlar los procesos, soportados en el conocimiento de la influencia de las variables más determinantes. Este trabajo presenta el comportamiento de la rugosidad obtenida en la superficie de un acero AISI 12L14, sometido al proceso de torneado cilíndrico.

**PALABRAS CLAVE:** Corte de metales, calidad superficial, rugosidad, torneado, aceros de libre maquinado

## **ABSTRACT**

There is a growing demand in every economical field, to produce components, equipments and machinery with high technical specifications, excellent reliability and performance with reasonable prices. The quality of the surface of metallic components elaborated by chip cutting process like turning, depends on a suitable combination of principal process parameters. A practical way to qualify the surfaces is to characterize roughness and derive standards to process control supported by more influent process variables knowledge. This work present the roughness behavior for a cylindrical turned AISI 12L14 steel.

**KEYWORDS:** Metal cutting, surface quality, roughness, turning, free machining steel.

## 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo que orienta la realización y presentación de este proyecto consiste en estudiar y profundizar en el conocimiento del comportamiento del acero AISI-12L14, acero de libre maquinado, frente a los procesos de transformación por arranque de viruta; sus características funcionales y de calidad, una vez se han obtenido piezas específicas que constituyen partes integrales de máquinas y equipos.

El acero AISI-12L14 es un acero de bajo contenido de carbono, aleado con elementos como el Azufre (S), Manganeso (Mn), Plomo (Pb) y Fósforo (P) que cumplen la función de mejorar su maquinabilidad, lo que lo hace apto para ser utilizado en la producción de grandes volúmenes de piezas que requieren un acabado superficial fino, una resistencia mecánica relativamente baja, mediante procesos de maquinado en los cuales el costo constituye un parámetro determinante.

Se ha diseñado un proceso de torneado en el cual se pretenden establecer las características básicas que alcanzan las piezas, en su aspecto superficial, su rugosidad y topografía frente a las combinaciones moderadas de avance y velocidad de corte.

Finalmente se ha llegado a unas curvas de comportamiento, muy parciales por la magnitud del proceso de investigación, que están de acuerdo con las logradas por otros autores.

## **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La utilidad de una máquina y de sus componentes se establece cuando son capaces de cumplir con la función para la cual se diseñó, bajo los criterios de desempeño establecidos y con un alto índice de confiabilidad.

Una posición de equilibrio entre la calidad, el desempeño y el costo constituye el objetivo de los diseñadores y fabricantes de máquinas, y se basa en la selección previa de los procesos de fabricación y de las combinaciones adecuadas de los parámetros de operación, para los cuales se puede predecir el comportamiento y la respuesta de los materiales procesados.

Un alto porcentaje de los componentes mecánicos se fabrican mediante procesos de transformación física, siendo los más utilizados los de maquinado por arranque de viruta, por consiguiente es fundamental tener en cuenta la influencia del proceso de fabricación sobre las condiciones de servicio de la pieza.

En los procesos de corte de metales intervienen una serie de variables, tales como: el tipo y condición de suministro del material de trabajo, las especificaciones técnicas del componente a fabricar, los requerimientos de calidad, el material, la geometría y los recubrimientos de la herramienta de trabajo, la geometría del corte, entre otras, todas ellas afectan el resultado final.

El manejo adecuado de esas variables permitirá obtener componentes de alta calidad a costos razonables, por esta razón desarrollar proyectos que permitan seleccionar las condiciones óptimas de trabajo, para diferentes procesos, constituye un aporte en herramientas tecnológicas de orientación y beneficio para el desempeño de las empresas del sector.

En Medellín, de acuerdo con la información suministrada por la Empresa Aceros Industriales, el acero AISI-12L14 es de muy alto consumo y para él se pretende desarrollar un estudio que relacione las condiciones de operación con la calidad de las superficies especificadas en los diseños de los componentes, y las que realmente se obtienen en la práctica.

## **1.2 IMPACTOS ESPERADOS**

Se pretende desarrollar y dar a conocer información y conocimientos relativos a los procesos de torneado del acero AISI 12L14, muy utilizado por los empresarios, ingenieros y técnicos que trabajan en el sector metal-mecánico del Valle de Aburrá, incrementando su nivel de capacitación y desempeño.

Con la incorporación de parámetros de operación adecuados y la verificación de los niveles de Integridad Superficial obtenidos en los componentes fabricados se generará, el mejoramiento de su desempeño real, lo que se traducirá en dinero para el país por un mayor rendimiento de su infraestructura.

## **1.3 RESULTADOS ESPERADOS**

En esta investigación se pretenden obtener como resultados, Gráficos que muestren la variación de la rugosidad superficial, obtenida en las probetas de acero, sometidas a operaciones de torneado cilíndrico, con diferentes combinaciones de parámetros de corte (velocidad de corte, avance y profundidad de corte.)

De igual manera se pretende lograr el conocimiento de los fenómenos o mecanismos, desarrollados durante el proceso de corte, que afectan la obtención de una integridad superficial en los aceros estudiados.



Gracias al conocimiento derivado del análisis de los resultados obtenidos en los procesos experimentales, se pretende elaborar una metodología para la selección de parámetros de operación, para uso en empresas dedicadas a procesar el acero estudiado. Estandarizar la metodología de experimentación y evaluación del acero AISI-12L14 con el fin de aplicarla a la evaluación de otros aceros.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La calidad de las superficies, logradas mediante procesos de maquinado, ha sido objeto de estudio por muchos investigadores, entre ellos se puede referenciar el trabajo de Fiel y Kahles<sup>1</sup> quienes introdujeron el término “Integridad Superficial” para describir la condición de la capa superficial de un material.

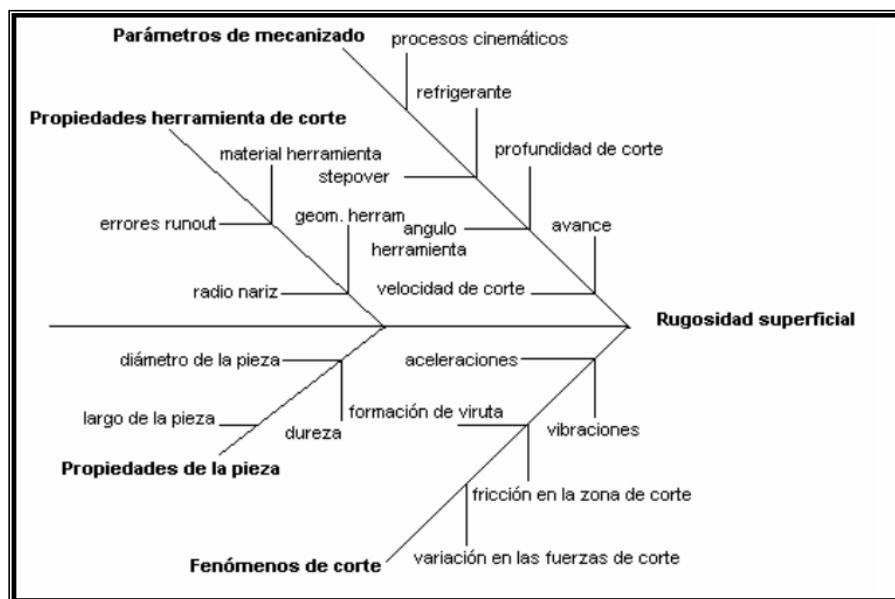
Se podría entender la Integridad Superficial (IS), como un estado característico de las superficies, en el cual tienen vigencia elementos que determinan la apariencia, funcionalidad y vida útil de un componente fabricado.

Los factores señalados para tal caracterización presentan diferentes aspectos tales como:

- Visuales: decoloraciones, quemaduras, grietas, oxidación y corrosión, elementos de presentación estética.
- Dimensionales: el acabado superficial, perfil geométrico, tolerancias y ajustes dimensionales, tolerancias y ajustes geométricos, textura superficial, rugosidad, ondulación, deformaciones, torceduras y dobleces, arrugas y plegamientos.
- Los relacionados con esfuerzos residuales de tensión y compresión, magnitud, dirección, perfil de esfuerzos, gradientes y flujos de esfuerzos.
- Los relacionados con mecanismos de desgaste como la dureza, abrasión, adhesión, erosión, arado.
- Los relacionados con las características metalúrgicas como la micro estructura, las transformaciones de fase.
- Los relacionados con otras propiedades del material: químicas, eléctricas, magnéticas, ópticas.

La rugosidad superficial, ha sido el parámetro de mayor importancia y aplicación al momento de calificar una superficie obtenida a través de diferentes procesos de fabricación. La rugosidad se expresa mediante una serie de parámetros numéricos dimensionales, que permiten evaluar el estado de una superficie.

En los procesos de fabricación intervienen muchos factores que inciden sobre la calidad de la superficie obtenida, Benardos y Vosniakos<sup>2</sup>, presentan una apreciación de tales factores, (Ver Figura 1), y desarrollan una revisión de diferentes procesos, metodologías e investigaciones realizadas con el objetivo de predecir las condiciones de operación óptimas para lograr las calidades superficiales especificadas.



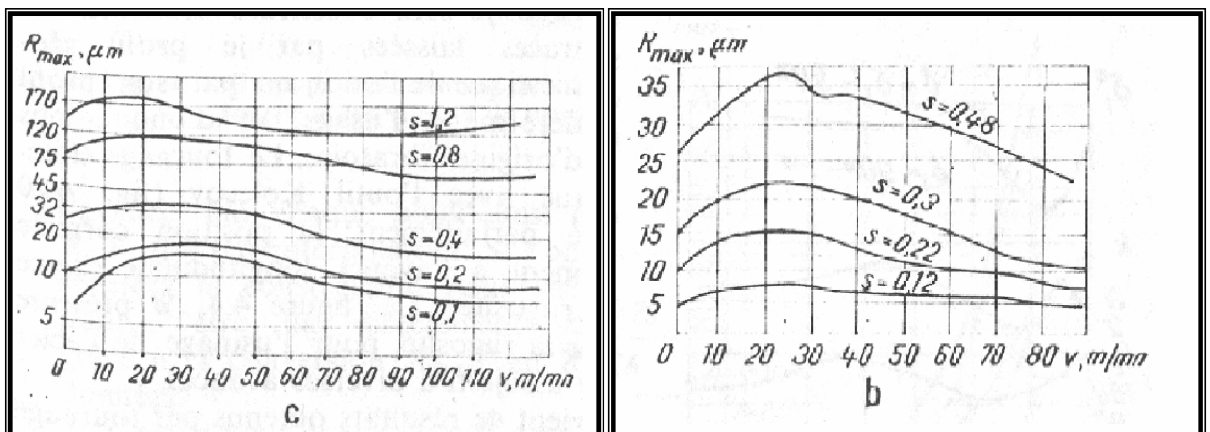
**Figura 1. Espina de pescado parámetros que afectan la rugosidad, tomado de Bernardos y Vosniakos<sup>2</sup>**

La tendencia en el desarrollo del conocimiento está orientada a la predicción de los parámetros de proceso que dan como resultado las condiciones de calidad superficial especificada; se han desarrollado diferentes metodologías que involucran elementos de modelación matemática cada vez más complejas para lograr mejores aproximaciones a los parámetros óptimos.

Los primeros estudios se han basado en la teoría y conceptos del proceso de maquinado, la cinemática del proceso, las características de las herramientas, el mecanismo de formación de la viruta y han dado lugar a la formulación de los modelos geométricos que relacionan la rugosidad superficial con las condiciones de corte, en todos los casos los experimentos se realizan con el objeto de comparar los resultados logrados con valores establecidos previamente y generalmente se ha encontrado que no son precisos.

Stefanuta Enache<sup>3</sup>, desarrolló una evaluación de los factores que producen y afectan la calidad de la superficie de un componente maquinado.

En el torneado de aceros, presenta la influencia de factores como: el avance, la velocidad y la profundidad de corte, en relación con la rugosidad obtenida; de igual manera analiza la influencia de la geometría y material de la herramienta, el régimen de refrigeración o lubricación y la rigidez de la máquina sobre el acabado superficial; y presenta sus conclusiones a través de las Figura 2, Figura 3 y Figura 4 siguientes:



**Figura 2. Variación de la rugosidad para el torneado de aceros bajo la acción combinada de velocidad y avance variables**

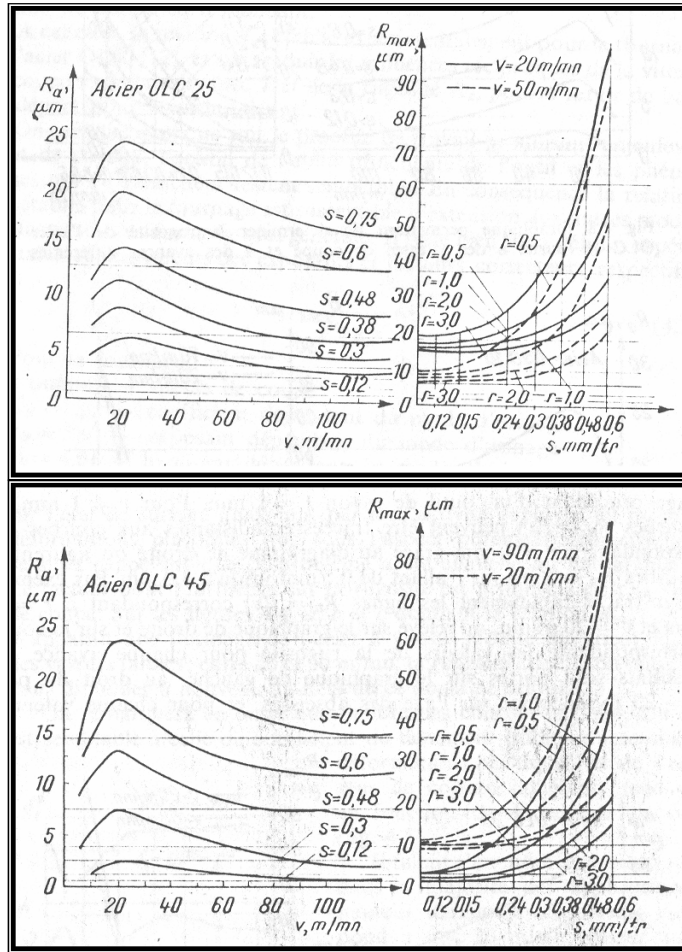


Figura 3. Variación de la rugosidad de los aceros OLC25 y OLC45 sometidos a proceso de torno, variando la velocidad y el avance

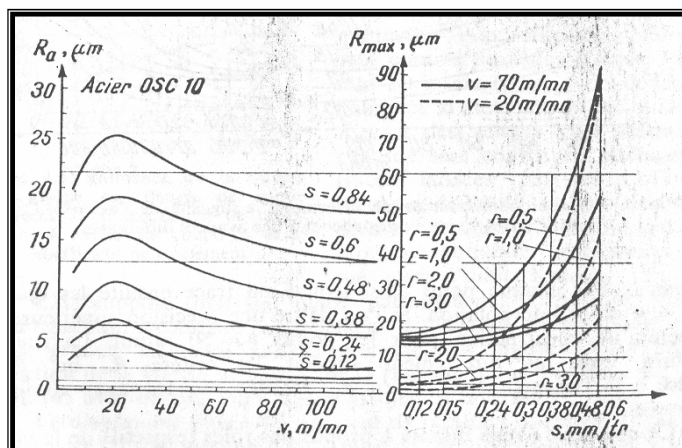


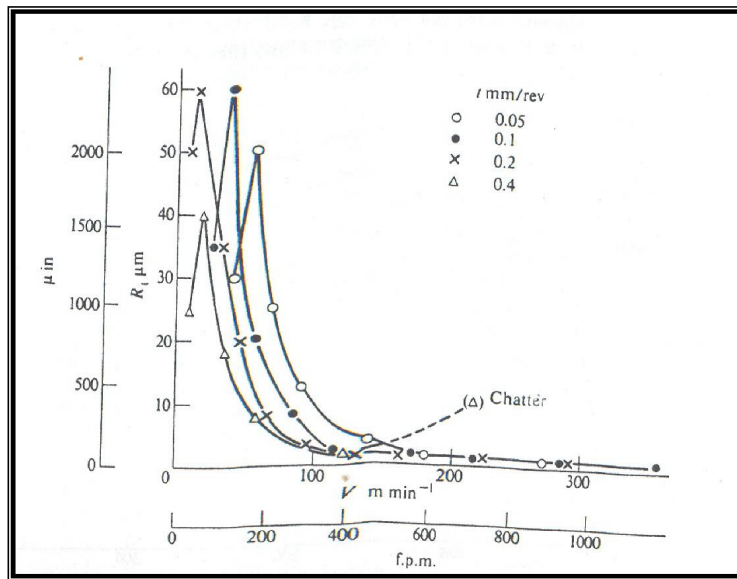
Figura 4. Influencia de la velocidad y el avance sobre la rugosidad en el maquinado del acero OLC10

Figura 2, Figura 3 y Figura 4, se advierten tres zonas que reflejan el comportamiento de los materiales con el cambio de la velocidad de corte: a bajas velocidades se obtienen rugosidades bajas que crecen proporcionalmente con el crecimiento de la velocidad, hasta valores intermedios en los cuales se presenta, generalmente, el fenómeno de recrecimiento del filo cortante, BUE, zona en la cual se detectan los mayores valores de rugosidad y baja calidad superficial; al incrementar la velocidad, por encima de éstos valores, se advierte un mejoramiento en el acabado superficial y se obtienen valores bajos de rugosidad, con tendencia al mejoramiento a mayores velocidades.

La influencia del avance es notable y permanece invariante: bajos avances significan bajos valores de rugosidad y buenos acabados superficiales, en tanto que valores altos de avance dan lugar a valores altos de rugosidad y pobres acabados superficiales.

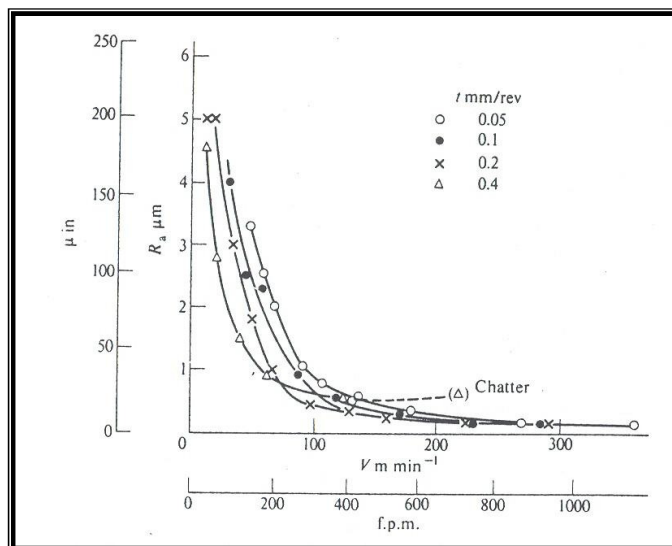
El profesor Milton C. Shaw<sup>4</sup>, presentó una evaluación del comportamiento de los contenidos de azufre, manganeso y plomo en los aceros de libre maquinado, en la cual concluye que el sulfuro de manganeso, además de prevenir la formación de sulfuro de hierro, FeS, en el material, desempeña dos papeles durante el proceso de corte: la tendencia a reducir la deformación en el plano cortante y a aumentar la fricción de la viruta sobre la cara de la herramienta; mientras que el contenido de plomo pareciera tener un comportamiento contrario: reduce la fricción viruta-herramienta y propicia el enroscamiento y rotura de la viruta.

Al evaluar los factores que afectan la integridad superficial del acero AISI-1045 torneado, presenta las curvas siguientes, (Ver Figura 5 y Figura 6)



**Figura 5. Variación de la rugosidad con la velocidad**

En la cual se puede advertir la tendencia al mejoramiento del acabado superficial con incrementos en la velocidad, además la influencia del avance que también se percibe como relación de proporcionalidad directa.



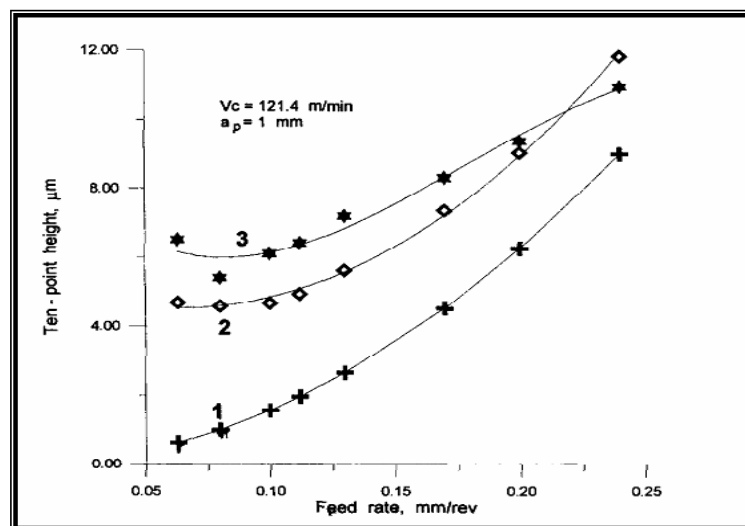
**Figura 6. Variación de la rugosidad con la velocidad**

En ambas curvas no se advierten zonas en las cuales se presente la acción del filo recreado, ni se observa el crecimiento de la rugosidad en una primera zona de

bajas velocidades como lo presentó en su momento Stefanuta Enache<sup>5</sup>, situación que puede obedecer al comportamiento diferente de dos aceros distintos. Pero si se advierte que se puede obtener una rugosidad determinada mediante la combinación de condiciones de avance y velocidad diferentes, presentando en las gráficas el efecto conjunto de estos factores.

Boothroyd<sup>6</sup>, trabajó principalmente en la evaluación del comportamiento de la rugosidad en procesos de maquinado bajo diferentes condiciones de corte, como modelos experimentales básicos, que resultan ser los menos precisos.

Grzesik<sup>7</sup>, utilizó el mínimo espesor de viruta para su modelo de predicción de la rugosidad superficial apoyado en las teorías de fricción y de plasticidad; explicó que la diferencia entre los valores teóricos y los experimentales medidos, para la rugosidad superficial, se deben al fenómeno de adhesión que sucede durante el proceso. También concluyó que la mínima profundidad de corte constituye la transición entre los mecanismos de arado y microcorte. Algunos de sus resultados se pueden observar en la Figura 7 en la que compara resultados teóricos, experimentales y predeterminados en su modelo.



**Figura 7. Efecto del avance sobre la rugosidad, comparación entre la curva ideal, de valores predichos y los datos obtenidos experimentalmente**



Lin y Chang<sup>8</sup>, formularon un modelo basado en el efecto de las vibraciones de la máquina herramienta sobre la rugosidad superficial; consideraron las componentes en las direcciones axial, radial y tangencial en el proceso de torneado y encontraron que la componente axial determina la ondulación mientras la componente radial presenta un efecto más significativo, sobre la rugosidad, que la componente tangencial.

Baek y otros<sup>9</sup>, formularon un modelo geométrico basado en las diferencias de montaje entre los filos cortantes de una fresa y el avance; validaron el modelo con datos experimentales y lo optimizaron mediante un algoritmo matemático de bisección.

Nuevas herramientas de análisis se introducen con las metodologías basadas en la fortaleza gráfica computacional, Chen y Liu<sup>10</sup>, desarrollaron un modelo 3D basado en la evaluación y regeneración superficial, mediante el reconocimiento y comparación de una superficie real con una superficie de referencia, bajo determinadas reglas y filtros de configuración. Otro modelo computacional desarrollado por Ehmann y Hong<sup>11</sup> se basó en el análisis de vibraciones de la máquina herramienta y el modelo geométrico de las herramientas de corte; el Surface shaping system podía presentar una simulación 3D de la topografía de una superficie fresada periféricamente.

Kim y chu<sup>12</sup>, formularon un modelo basado en la superposición de una superficie teórica calculada con la información del proceso y la superficie real obtenida con sus alturas máximas y los efectos de las marcas de las herramientas.

Lee y otros<sup>13</sup>, trabajaron un modelo basado en señales de aceleración, el algoritmo computacional se desarrolló con base en las condiciones de operación, las geometrías de la herramienta y la pieza y los parámetros de posicionamiento de la herramienta para determinar una función de frecuencia de los picos y una

señal de aceleración, mediante los cuales podía calcularse la rugosidad superficial y graficar el perfil.

Otros autores han orientado sus esfuerzos e investigaciones hacia la formulación de modelos basados en sistemas experimentales que relacionan directamente las variables del proceso. Se efectuaron experimentos con factores considerados los más importantes y los resultados obtenidos se utilizaron para determinar el grado de influencia de cada factor en la calidad de la superficie.

Abouelatta Y Mádl<sup>14</sup>, trabajaron en modelos de regresión lineal para predecir la rugosidad superficial obtenida en piezas sometidas al proceso de torneado. Los cuatro modelos presentados tomaron como variables independientes la velocidad, el avance, la profundidad de corte, el radio de la herramienta, el ángulo de incidencia, el diámetro y la longitud de la pieza, de la misma manera se tomaron como variables dependientes las aceleraciones experimentadas y medidas en las direcciones radial y del avance.

Los modelos que involucraron un mayor número de variables lograron mejores resultados, más exactos y precisos, que aquellos cuya base de cálculo fueron sólo los parámetros de corte.

Por otro lado, Ghani y Choudhury<sup>15</sup>, trabajaron sobre fundición nodular un modelo de señales de vibración para determinar el desgaste de la herramienta y su incidencia en la rugosidad superficial.

Jang y otros<sup>16</sup>, se enfocaron en encontrar valores de rugosidad promedio, Ra, como resultado de la superposición de un perfil teórico y un perfil de oscilaciones logrado a partir de señales de vibración medidas durante el proceso, relacionando los valores de rugosidad con las frecuencias de vibración de la máquina.

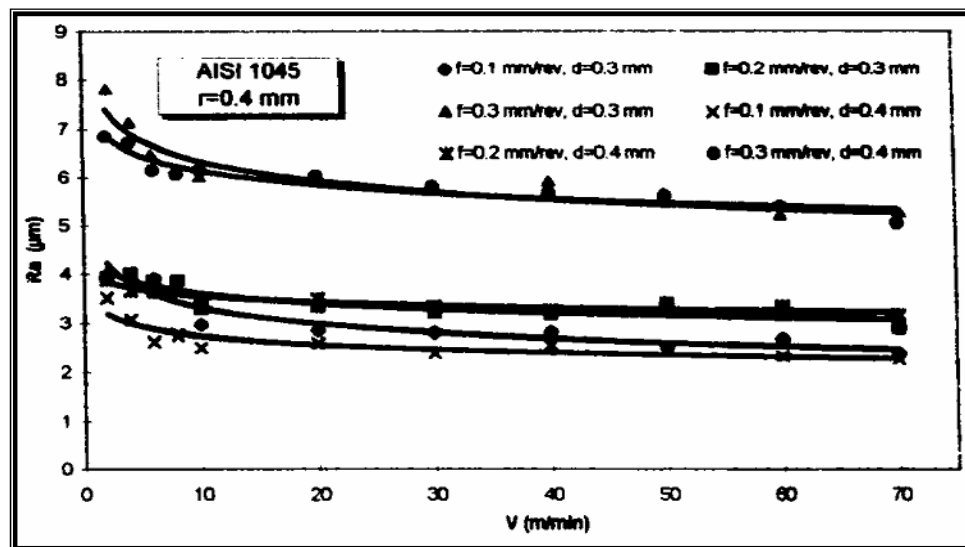
Beggan y otros<sup>17</sup>, utilizaron emisiones acústicas como fuente de información emitida durante el proceso, resultado de la formación de la viruta, la fricción entre ésta y la herramienta y la fricción entre el flanco de la herramienta y el material trabajado, y establecieron modelos de correlación con la rugosidad superficial obtenida.

Dhar y otros<sup>18</sup>, utilizaron una atmósfera criogénica para evaluar sus efectos sobre el proceso.

Muñoz Escalona y Cassier<sup>19</sup>, trabajaron en modelos que evaluaron la velocidad para la cual ocurría el recrecimiento del filo, BUE, y su efecto sobre la rugosidad superficial. Hallaron que el avance y el radio de la nariz de la herramienta eran los dos factores principales en la determinación de la rugosidad superficial; se concentran en un experimento que combina el chequeo de 4 tipos de acero, tres tipos de insertos como herramientas, variación del radio de nariz, variando la velocidad desde 2 hasta 70 m/min, el avance en tres niveles 0.1, 0.2 y 0.3 mm/rev y dos profundidades de corte diferentes; los modelos matemáticos que lograron se expresan mediante las siguientes expresiones:

<b>Acero</b>	<b>Modelo matemático de rugosidad</b>
<b>1020</b>	<b><math>Ra = 11.05 r^{-0.187} d^{0.095} f^{0.334} v^{-0.142}</math></b>
<b>1045</b>	<b><math>Ra = 7.78 r^{-0.301} d^{0.037} f^{0.385} v^{-0.088}</math></b>
<b>4140</b>	<b><math>Ra = 21.55 r^{-0.404} d^{0.036} f^{1.091} v^{-0.184}</math></b>
<b>D2</b>	<b><math>Ra = 12.08 r^{-0.598} d^{0.079} f^{0.425} v^{-0.274}</math></b>

Y la representación gráfica del comportamiento de la rugosidad con los diferentes factores, se ilustra en la Figura 8.



**Figura 8. Comportamiento de la rugosidad para el acero AISI-1045, torneado a diferentes velocidades, avances y profundidad de corte**

Thiele y Melkote<sup>20</sup>, evaluaron los efectos de la geometría del corte y la dureza del material sobre la rugosidad superficial.

Baptista y Simoes<sup>21</sup>, trabajaron en la evaluación de los efectos de las paradas y cambios de dirección en la calidad superficial de una superficie fresada en una máquina CNC de 5 ejes.

Coker y sin<sup>22</sup>, utilizaron un sistema de ultrasonido para monitorear y controlar la rugosidad superficial durante el proceso. Un sensor ultrasónico conectado a un computador registra las emisiones y retornos de pulsos dirigidos sobre la superficie, con los cuales se construyó una imagen de la rugosidad superficial calibrada y validada con los datos experimentales medidos de la rugosidad.

Algunos autores han utilizado el gran aporte de la estadística y el diseño de experimentos como la herramienta que constituye un método sistemático centrado en la planeación de experimentos, la obtención y análisis de datos y el uso óptimo de los recursos de investigación. Existen dos metodologías, las más utilizadas en el diseño de experimentos: La metodología de superficies de respuesta y las técnicas de arreglos ortogonales de Taguchi.

En la utilización de la metodología de superficies de respuesta, se evalúan los factores que se consideran los más importantes e influyentes en el proceso que se investiga, con ellos se construye un modelo matemático cuyas soluciones son la variable respuesta, luego se optimiza y se valida como algoritmo de predicción.

La técnica de Taguchi constituye una herramienta para la definición del marco experimental en el cual se obtiene la influencia de cada factor que se evalúa, de igual manera se obtiene una variable respuesta sin necesidad de formular ningún modelo matemático.

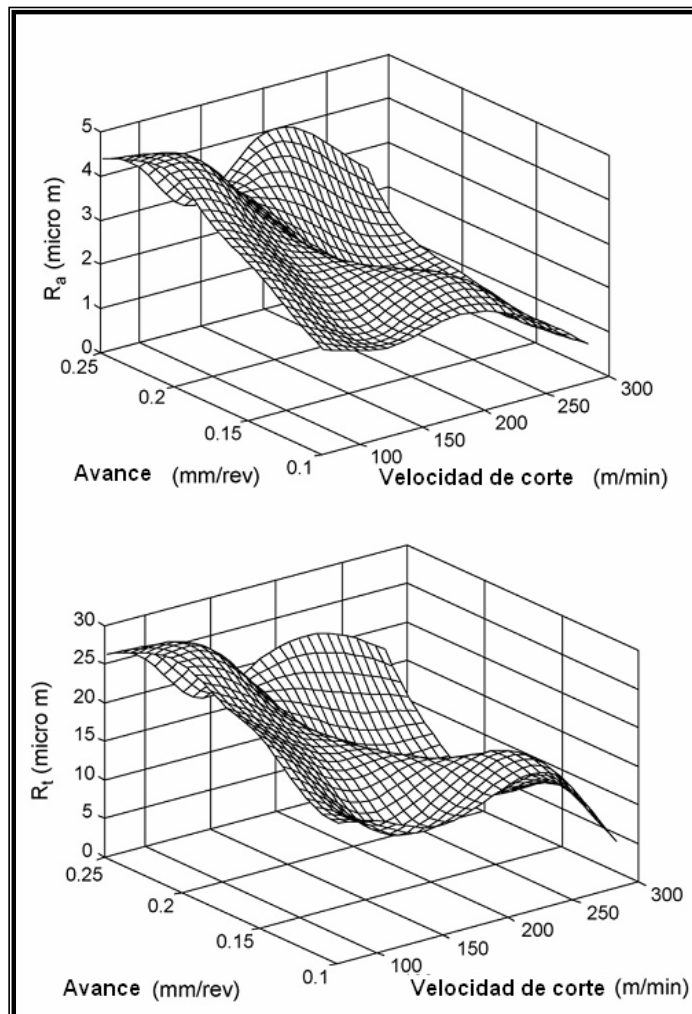
Algunos investigadores que han trabajado con estas metodologías son: Davim<sup>23</sup>, estudió la influencia de las condiciones de corte, en el proceso de torneado cilíndrico, sobre la rugosidad superficial, bajo un plan experimental ajustado a la técnica de Taguchi. El objetivo fue establecer una correlación entre la velocidad, el avance y la profundidad de corte con la rugosidad representada por los parámetros Ra y Rt. El material de experimentación fue el acero 9SMnPb28K (DIN), acero de libre maquinado con contenido de azufre, manganeso, plomo y fósforo. Los resultados obtenidos presentan una gran influencia de la velocidad de corte sobre la rugosidad, en menor escala se registra la influencia del avance y prácticamente sin influencia la profundidad de corte; de igual manera la interacción entre la velocidad y el avance ejerce influencia significativa sobre la rugosidad.

Los modelos de regresión obtenidos por Davim fueron:

$$Ra = 3.179 + 9.826 f - 0.009 v - 0.922 d$$

$$Rt = 25.547 + 41.633 f - 0.067 v - 5.946 d$$

Y la representación de los modelos logrados, considerando la velocidad y el avance, se encuentran en la Figura 9.



**Figura 9. Superficies de respuesta para Ra con base en los factores velocidad y avance**

Choudhury y otros<sup>24</sup>, trabajaron en un modelo de predicción de la rugosidad superficial en el torneado de aceros de alta resistencia, concluyendo que el efecto del avance es mucho más significativo que el de la velocidad y la profundidad de corte.

Feng y wang<sup>25</sup>, desarrollaron modelos empíricos para predecir la rugosidad superficial en procesos de torneado de finalización o acabado, con base en parámetros de operación como avance, profundidad de corte, velocidad del

husillo, ángulo de la punta del buril, dureza del material y tiempo de corte. Aplicaron como técnica de análisis la regresión no lineal con transformación logarítmica y presentaron modelos que permiten evaluar la influencia de los factores mencionados y la de sus interacciones combinadas. Además realizaron procesos de verificación y chequeo a las desviaciones obtenidas de la comparación de valores calculados con valores experimentales, logrando confirmación para sus modelos propuestos. Los modelos de regresión que utilizaron para 6 y 5 variables y las interacciones significativas, fueron:

$$\begin{aligned}
 Y &= -46415 + 23980 X_2 + 11780 X_3 + 9847 X_4 + 24131 X_5 + 23939 X_6 + 1.62X_1X_3 \\
 &+ 18.9X_1X_4 - 6089X_2X_3 - 2523X_3X_4 - 6127X_3X_5 - 6079X_3X_6 + 1.95X_4X_5 \\
 Y &= 27.6 - 6.26 X_1 - 8.75 X_3 - 8.93 X_4 + 2.05 X_5 + 1.62 X_1X_3 - 0.946 X_2X_3 + \\
 &1.07 X_2X_5 + 1.95 X_4X_5
 \end{aligned}$$

Kopac y Bahor<sup>26</sup>, han estudiado la influencia de los procesos previos que ha sufrido un material sobre la rugosidad superficial que se obtiene en las superficies maquinadas. Los hallazgos indican cuales combinaciones de los parámetros de corte se deben utilizar para obtener una determinada rugosidad.

En la Figura 10 se presentan las gráficas correspondientes a los modelos logrados, en ellas se muestran regiones en las cuales se obtienen rugosidades superficiales similares para determinadas condiciones de operación:

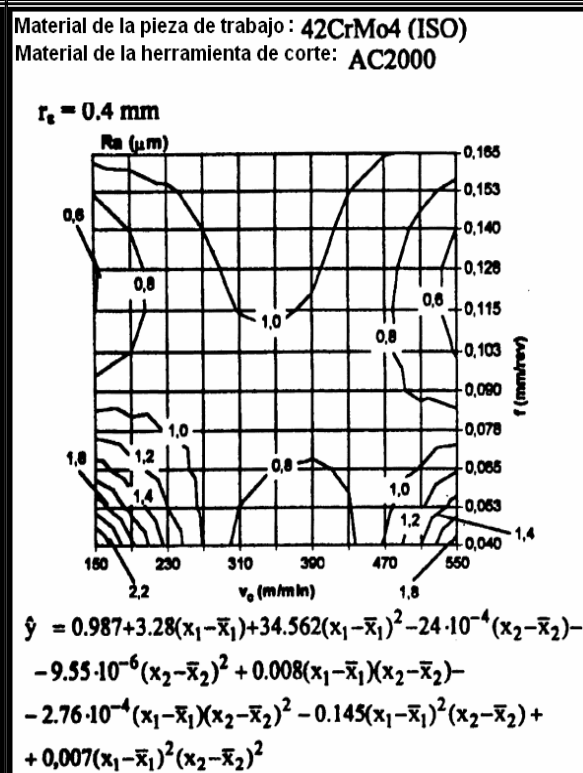
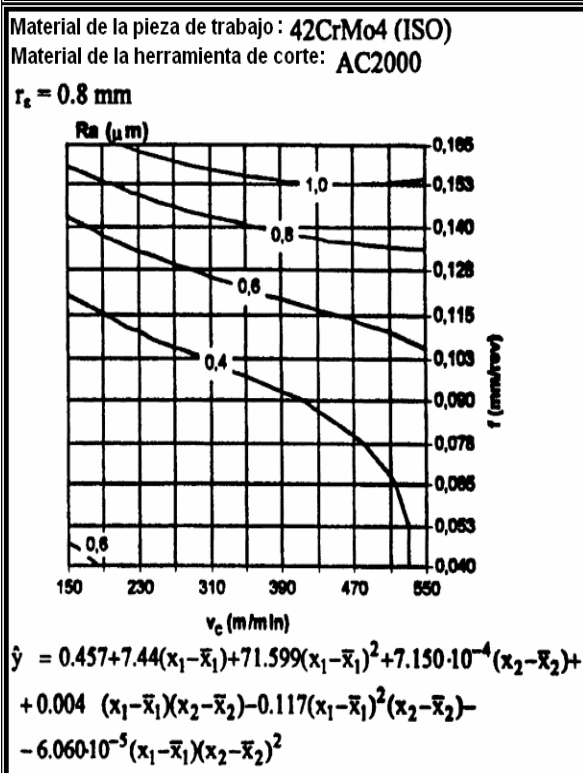
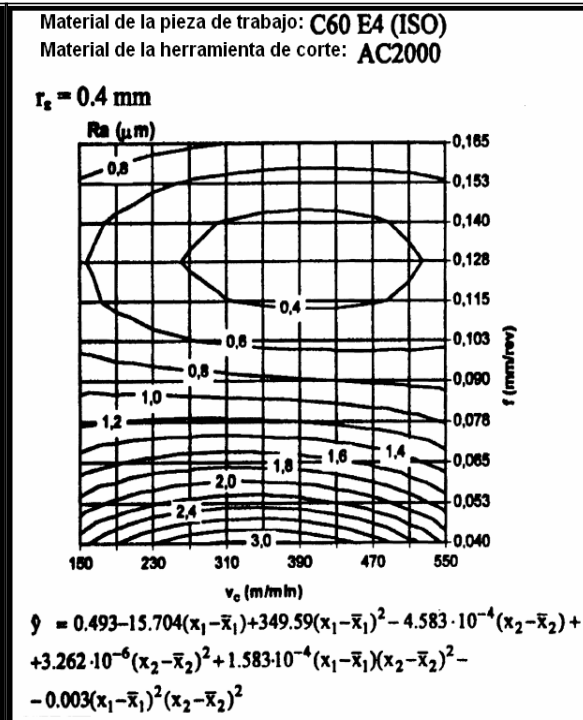
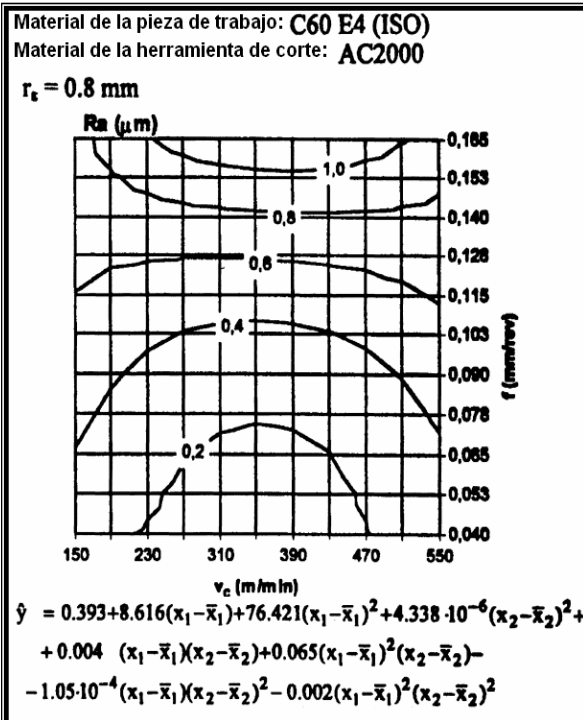


Figura 10. Variación de la rugosidad con los parámetros de corte, de acuerdo con los modelos de Kopac y Bahor



Thomas y otros<sup>27</sup>, desarrollaron un modelo centrado en las vibraciones de la herramienta de corte y su efecto sobre la rugosidad superficial; consideraron 6 variables como factores a monitorear y encontraron que la mejor calidad superficial se obtenía combinando bajas ratas de avance, altas velocidades y grandes radios de nariz en la herramienta.

Muchos otros investigadores han trabajado en proyectos basados en materiales diferentes, procesos de corte diferentes, partiendo de modelos físicos definidos sobre la estructura del proceso y sus variables principales y tratados bajo el dominio de las herramientas estadísticas señaladas, para obtener modelos de predicción.

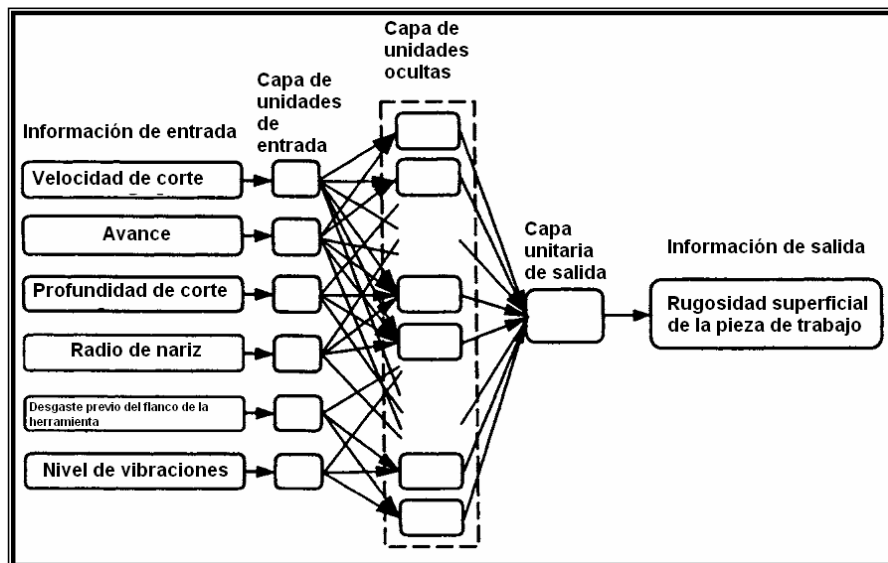
Los desarrollos tecnológicos basados en las fortalezas que aportan las ciencias informáticas han permitido explorar un nuevo campo lleno de opciones y alternativas, denominado Inteligencia Artificial, Tres son los caminos que ofrece: **Las redes neuronales artificiales; Los sistemas neuro-difusos y los algoritmos genéticos.**

Una red neuronal artificial, RNA, es un sistema de procesamiento de información que funciona de manera similar a su análogo biológico. Es esencialmente un modelo matemático que imita el razonamiento neurobiológico humano y está basado en los siguientes postulados:

El proceso de información ocurre en un número de elementos simples llamados neuronas. Las señales son transmitidas entre las neuronas a través de vínculos o eslabones de conexión. Cada vínculo tiene asociado un peso que multiplica la señal transmitida. Cada neurona aplica una función de activación a la señal de entrada para determinar la señal de salida.

Las características principales de una red neuronal artificial son: La arquitectura de la red, o patrón de organización de las neuronas y La forma de determinación del peso de cada vínculo o conexión, bien sea por el procedimiento de entrenamiento de la red o por asignación de valores sin entrenamiento.

En el caso que nos ocupa El-Sonbaty y Megahed, de la universidad Zagazig de Egipto, han trabajado en el diseño y entrenamiento de una red neuronal artificial para predecir la rugosidad superficial que se obtiene en un proceso de torneado de un acero de libre maquinado, con dureza vickers de 200, con condiciones de corte variando en cuatro niveles de velocidad, cuatro niveles de avance, dos niveles de profundidad de corte, tres radios de nariz de herramienta diferentes, y una condición de vibración del torno variable pero monitoreada durante el experimento, y se ilustra a continuación, Ver Figura 11:



**Figura 11. Diagrama esquemático de una red neuronal artificial para la predicción de la rugosidad superficial**

**Los sistemas neuro-difusos** son también modelos matemáticos lógicos basados en el concepto de los conjuntos difusos, éstos no tienen una frontera claramente definida, es decir, pueden contener términos o elementos con un grado parcial de

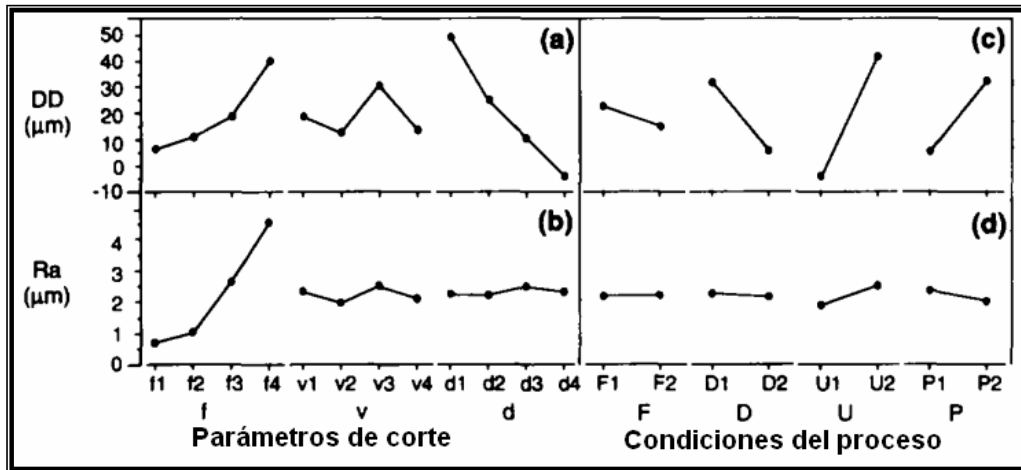
pertenencia; la definición de las reglas del conjunto se basan en contenidos de conocimiento lógicos; la salidas de todas las reglas definidas se “aclaran” para lograr una respuesta específica.

**Los algoritmos genéticos** son modelos de optimización de respuestas de investigación basados en la teoría de la evolución Darwiniana. La búsqueda de la mejor solución, se hace en la región del espacio de las soluciones en la cual se obtienen buenas soluciones, a través de la experimentación.

Se genera y evalúa un conjunto de estados de solución, luego se opera una función de ajuste sobre las soluciones con el objeto de optimizarlas, logrado esto se fracciona la solución y se reconstituye para una nueva iteración. Los operadores genéticos permiten seleccionar, combinar y mutar las soluciones dando lugar a la obtención de la mejor opción.

Algunos trabajos desarrollados para predecir la rugosidad superficial mediante la aplicación de modelos de Inteligencia Artificial son los siguientes:

Azouzi Y Guillot<sup>28</sup>, desarrollaron un modelo de red neural artificial para evaluar la rugosidad superficial y la precisión dimensional, durante el proceso de torneado; utilizaron la técnica de fusión de señales como fuente de información “on line”, las señales registradas fueron el sistema de fuerzas, tangencial, radial y axial; la vibración, emisión acústica, deflexión axial y tangencial, con ellas construyeron un modelo y a partir de él obtuvieron una respuesta del comportamiento de la rugosidad, la cual se presenta en la Figura 12:

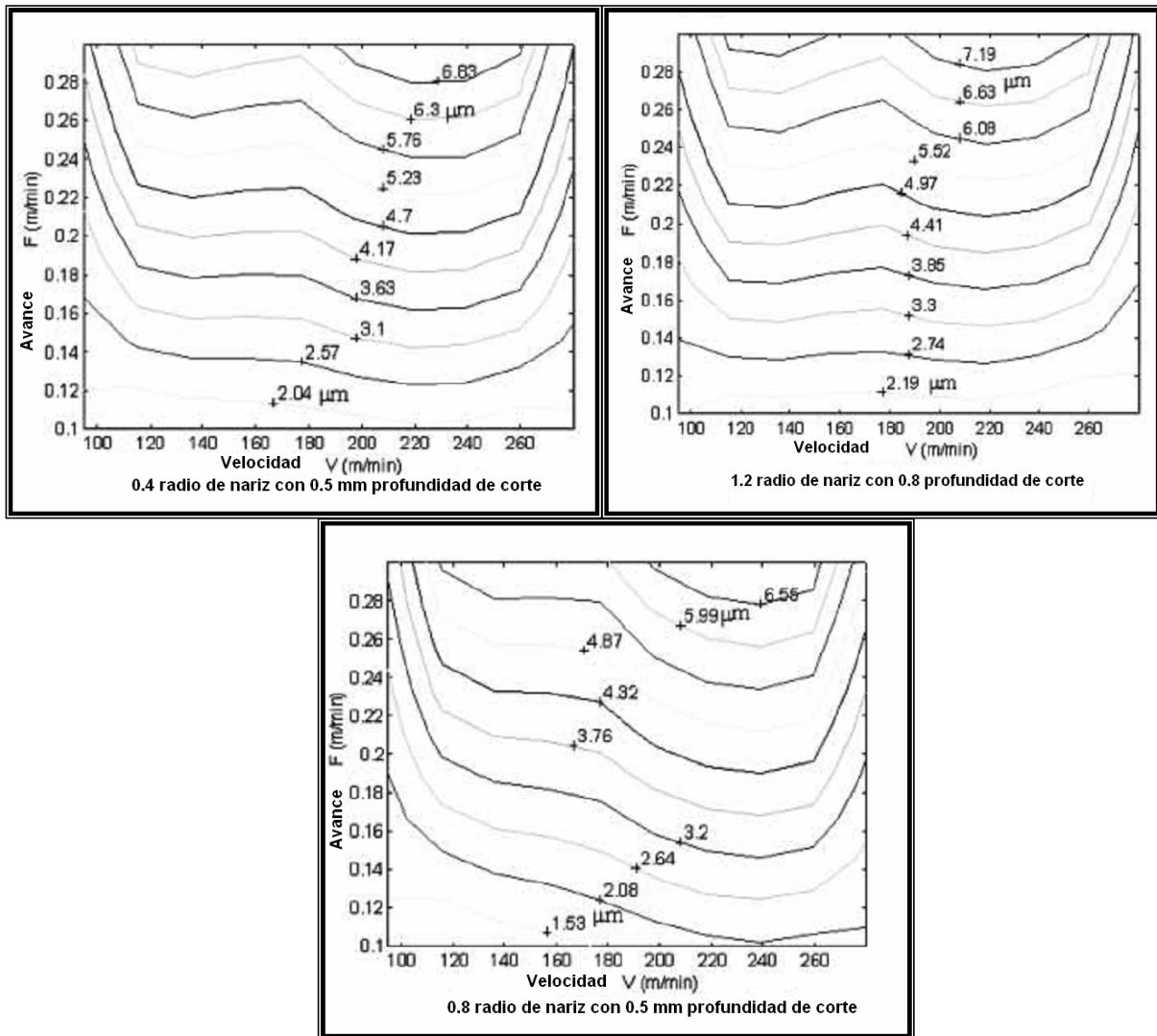


**Figura 12. Efecto de las condiciones del proceso sobre la rugosidad y la precisión dimensional**

Los resultados obtenidos mostraron mayor precisión que los modelos de regresión.

Chien y Chou<sup>29</sup>, formularon tres modelos de predicción utilizando redes de capas múltiples, para la rugosidad superficial, fuerzas de corte y vida útil de la herramienta; luego optimizaron las condiciones de operación combinando las redes neuronales para la rugosidad superficial y vida útil de la herramienta, con algoritmos genéticos.

Suresh y otros<sup>30</sup>, también trabajaron inicialmente dos modelos de predicción de la rugosidad superficial, mediante el método de regresión y la técnica de superficies de respuesta; luego aplicaron algoritmos genéticos para optimizar el modelo matemático obtenido y derivar las condiciones de operación óptimas para un acabado superficial específico.



**Figura 13. Contornos de rugosidad en planos velocidad avance**

La Figura 13 presenta curvas de contorno para la rugosidad obtenida para diferentes parámetros de operación, elaboradas a partir de los modelos formulados aplicando algoritmos genéticos.

Lee y Tarn<sup>31</sup>, utilizaron redes polinomiales para construir las relaciones entre los parámetros de operación y las variables de respuesta en el proceso de torneado y

posteriormente, aplicaron el algoritmo para sintetizar las redes y encontrar, a través de ellas, el conjunto de respuesta óptima.

Li y otros<sup>32</sup>, desarrollaron un modelo híbrido que permitía integrar modelos analíticos con redes neuronales para predecir todos los factores característicos del proceso.

Matsumura<sup>33</sup>, trabajó en un modelo que permitía evaluar la influencia de las características de la máquina herramienta sobre los procesos de corte mediante el uso de un sistema de predicción adaptativo.

Bernardos y Vosniakos<sup>34</sup>, aplicaron un modelo basado en redes neuronales artificiales, para evaluar operaciones complejas en el fresado plano del aluminio y encontraron que los resultados y las predicciones eran mucho más precisos en el tratamiento de problemas complejos.

Tsai y otros<sup>35</sup>, procesaron la señal de un acelerómetro durante el proceso, obtuvieron una base de datos de vibraciones de la máquina y desarrollaron una red neuronal artificial que entrenaron con la misma base para predecir no solamente la rugosidad superficial sino el incremento de la tasa de producción y la calidad del producto. También desarrollaron un modelo estadístico de regresión que compararon con la red neuronal y encontraron que ésta era mejor mecanismo de predicción en todos los aspectos.

Lou y Chen<sup>36</sup>, trabajaron en una técnica que combinaba los sistemas neuro-difusos y los sistemas testigos de sensibilidad durante el proceso. Para una operación de fresado vertical, segmentaron el espacio de experimentación en regiones difusas; generaron las reglas de difusión a partir de pares obtenidos durante el proceso; evitaron el conflicto de reglas; desarrollaron una base de reglas difusas y determinaron un sistema de mapeado centrado en la base de

reglas; luego ajustaron y optimizaron los conjuntos miembros para lograr conocer los requerimientos para los parámetros de control del sistema de fresado.

Ho y otros<sup>37</sup>, trabajaron con un sistema adaptativo neuro-difuso de interferencia y la visión artificial para predecir la rugosidad superficial durante la operación de torneado. Las imágenes de luz reflejadas de la superficie configuraron una base de entrenamiento para la red neuronal que fue ajustada mediante reglas de comportamiento del conjunto difuso.

Las tendencias hoy en día se orientan hacia el diseño y aplicación de sistemas que permitan el monitoreo, medición y control automático de señales provenientes del proceso, su evaluación, análisis, ajustes y perfeccionamiento mediante sistemas de inteligencia artificial y el suministro de predicciones precisas y oportunas para la intervención sobre las condiciones de operación y el logro de las especificaciones técnicas de calidad y productividad requeridas.

En este trabajo se pretende, a través de la realización de un proceso experimental en el taller, contrastar algunos de los modelos mencionados y observarlos desde los resultados obtenidos.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAL UTILIZADO: ACERO AISI – 12L14

Se realizaron pruebas para evaluar la composición química del material utilizado en el espectrómetro de radiación óptica del laboratorio de materiales de la Universidad de Antioquia, empleando el método de requemas sucesivas, los resultados verifican el cumplimiento de las normas ASTM – A576 – 90b; ASTM – A29/A29M – 99 y ASTM – A108.

#### Evaluación Metalográfica

Se trabajaron 6 probetas para observar la micro estructura transversal y longitudinal del acero, (ver Figura 14), y se encontraron los siguientes resultados:

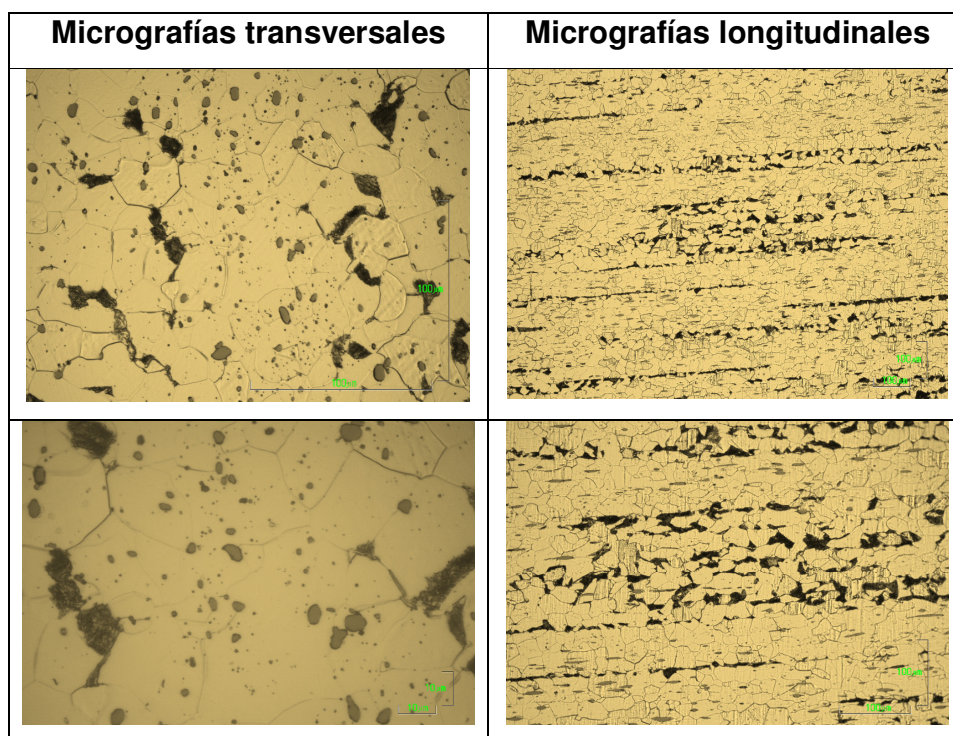
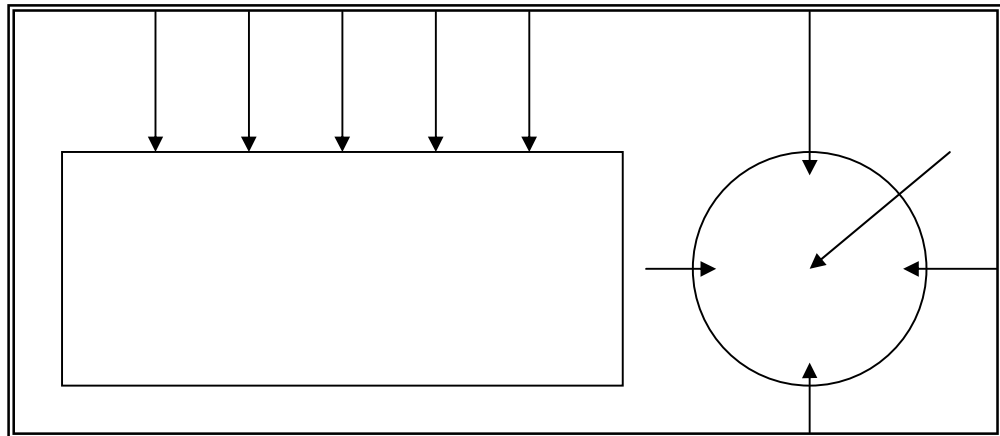


Figura 14. Estructura metalográfica del acero AISI- 12L14. Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Minas – Universidad Nacional Sede Medellín



### 3.1.1 Propiedades mecánicas

Se practicaron ensayos de dureza Vickers, a cinco probetas, en los puntos indicados en la Figura 15:



**Figura 15. Puntos de evaluación de la dureza**

Y el resultado promedio obtenido fue: **187.8 Vickers**.

Se practicaron test de resistencia mecánica sobre tres probetas que dieron lugar a los resultados: consignados en la Tabla 1.

**Tabla 1. Resumen de las pruebas de resistencia mecánica aplicadas a las probetas de acero AISI-12L14 en el laboratorio de resistencia de Materiales de la U. de Antioquia**

<b>TABLA RESUMEN DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA MECÁNICA</b>				
	<b>UNID.</b>	<b>PROBETA 1</b>	<b>PROBETA 2</b>	<b>PROBETA 3</b>
<b>LÍMITE ELÁSTICO</b>	[GPa]	254.301	238.143	201.647
<b>LÍM. DE PROPORCIONALIDAD</b>	[MPa]	326.254	327.375	337.161
<b>CARGA MÁXIMA</b>	[KN]	68.3000	68.5750	65.3250
<b>ELONG. PARA CARGA MÁXIMA</b>	[mm]	9.26900	9.70800	9.54900
<b>ESFUERZO MÁXIMO</b>	[MPa]	556.558	558.799	549.767

<b>TABLA RESUMEN DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA MECÁNICA</b>				
	<b>UNID.</b>	<b>PROBETA 1</b>	<b>PROBETA 2</b>	<b>PROBETA 3</b>
<b>CARGA DE ROTURA</b>	[KN]	52.7000	53.4750	50.4750
<b>ELONGACIÓN DE ROTURA</b>	[mm]	14.2210	14.4710	14.3200
<b>DEFORMACIÓN DE ROTURA</b>	[%]	28.4420	28.9420	28.6400
<b>% DE RESTITUCIÓN</b>	[%]	16.8000	17.4000	16.8000
<b>% DE REDUCCIÓN DE ÁREA</b>	[%]	47.3504	47.0015	48.8135
<b>% DE DEFORMACIÓN MÁXIMA</b>	[%]	18.5380	19.4160	19.0980

## **3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL**

### **3.2.1 Geometría de las Probetas**

Se decide utilizar una probeta de 25.4 mm de diámetro y 150 mm de longitud de acero AISI-12L14 laminado en frío suministrado por la Empresa Aceros Industriales, en las condiciones normales de suministro industrial.

Cada probeta se maquina en una extensión aproximada de 120 mm, con las mismas condiciones de operación para lograr una superficie lo más homogénea posible, que nos permita deducir una condición general aplicable a todo el proceso.

La sujeción de la probeta se realiza mediante mandril de tres mordazas auto-centrantes y un punto giratorio de apoyo en el extremo opuesto, con el fin de asegurar la estabilidad de la probeta y la eliminación de problemas en la calidad superficial debidos a vibraciones.

### **3.2.2 Selección de las herramientas a utilizar en el proceso de torneado cilíndrico**

En la experiencia que se realiza se han examinado herramientas en acero rápido, de pastillas de carburo de tungsteno soldadas, afiladas mediante máquinas afiladoras o manualmente y adecuadas para el corte, sin embargo éstas hacen que la geometría se convierta en elemento variable de gran incidencia en el proceso, afectando la repetibilidad de los experimentos.

Se eligen como herramientas estándar para el proceso de torneado cilíndrico de las probetas, las siguientes:

- Porta-herramienta CTGPR 2020K que tiene las siguientes características:
- Estructura de fijación del inserto: C (Clump on) fijación mediante chapeta.
- Forma del inserto: T triangular.
- Ángulo de posicionamiento: G que corresponde a 90° offset.
- Geometría del inserto: P 11° positiva.
- Orientación de la herramienta: R mano derecha.
- Tamaño de la sección del porta-herramientas: 2020 (20 mm de ancho x 20 mm de alto).
- Longitud del porta-herramientas: K que corresponde a 125 mm.

Los insertos intercambiables utilizados tienen la siguiente especificación técnica:  
Inserto **T N M G 20 04 12 F N**.

### **3.2.3 Selección de la máquina herramienta para la realización del proceso**

Se selecciona para el proceso el torno paralelo marca Zubal del taller de mecánica de la Universidad de Antioquia, con las siguientes características:

Distancia entre puntos: 1000 mm; Diámetro a tornear sobre la bancada: 360 mm; Diámetro a tornear sobre el carro: 310 mm; Diámetro a tornear sobre el carro transversal: 210 mm; Diámetro a tornear sobre el escote: 520 mm  
14 velocidades del cabezal por sistema patentado modelo C1

Eje del cabezal taladrado a: 32 mm

Paso del husillo de roscar en hilos por pulgada: 4

Paso del husillo de roscar en mm: 6 mm

Motor eléctrico adecuado a tornos modelo C1: 3.0 HP.

Gama de avances de la máquina: desde 0.06 mm/rev hasta 2.07 mm/rev

### **3.2.4 Etapas del Proceso**

1. Suministro del material.
2. Caracterización del material.
3. Preparación de las probetas.
4. Torneado de las probetas
5. Medición de la rugosidad superficial obtenida.
6. Registro y elaboración de tablas de rugosidad, con los parámetros Ra, Rq, Rt, Lm y  $\lambda_c$ .
7. Registro de la topografía superficial obtenida.
8. Evaluación y tratamiento estadístico de la información.
9. Evaluación y tratamiento de la información gráfica.

### **3.2.5 Selección de los parámetros del proceso**

El Machining Data Handbook<sup>38</sup>, recomienda las siguientes condiciones de corte para las operaciones de torneado cilíndrico, con herramientas de un filo cortante, para el acero de libre maquinado AISI-12L14, con dureza comprendida entre 150 y 200 BHN, con las siguientes condiciones de suministro: Laminado en caliente, normalizado, recocido o estirado en frío, Para herramientas de pastillas o insertos intercambiables de carburo sin recubrimiento grados P10, P20, P30, P40: Ver Tabla 2.

**Tabla 2. De referencia para velocidad, avance, profundidad de corte y grado de carburo para la herramienta, en procesos de torneado cilíndrico, tomado de Machining Data Handbook**

PROFUNDIDAD DE CORTE EN MM	VELOCIDAD DE CORTE EN M / MIN	AVANCE EN MM / REV	GRADO DE MATERIAL
1	320	0.18	P10
4	255	0.50	P20
8	195	0.75	P30
16	145	1.00	P40

Para herramientas de pastillas o insertos intercambiables de carburo con recubrimientos, grados CP10, CP20, CP30: (Ver Tabla 3).

**Tabla 3. De referencia para velocidad, avance, profundidad de corte y grado de carburo la herramienta, en procesos de torneado cilíndrico, tomado de Machining Data Handbook**

PROFUNDIDAD DE CORTE EN MM	VELOCIDAD DE CORTE EN M / MIN	AVANCE EN MM / REV	GRADO DE MATERIAL
1	460	0.18	CP10
4	305	0.40	CP20
8	245	0.50	CP30

En la máquina de la cual se dispone para realizar las probetas se puede obtener la siguiente gama de velocidades: 60; 90; 115; 140; 190; 240; 300; 460; 600; 720; 920; 1180; 1580; y 2000 RPM.

Se hicieron pruebas preliminares sobre probetas similares y se tomaron los siguientes valores de velocidad representativos del proceso:

$$460 \text{ RPM} = V_c 36.70 \text{ m/min}$$

$$920 \text{ RPM} = V_c 57.45 \text{ m/min}$$

$$1180 \text{ RPM} = V_c 94.15 \text{ m/min}$$

1580 RPM =  $V_c$  126.07 m/min y

2000 RPM =  $V_c$  159.59 m/min.

Con la gama de avances, en mm/rev, que ofrece la máquina disponible, entre 0.06 mm/rev y 2.07 mm/rev, y Las combinaciones posibles recomendadas en el Machining Data Handbook<sup>39</sup>, en el Metals Handbook, y en manuales de herramientas, de máquinas y catálogos de suministro de materiales, relacionan altas velocidades y avances pequeños para lograr acabados superficiales finos y se deben utilizar en las pasadas de acabado; **se adoptaron como valores estándar para el proyecto los siguientes avances: 0.06 mm/rev; 0.21 mm/rev; 0.51 mm/rev.**

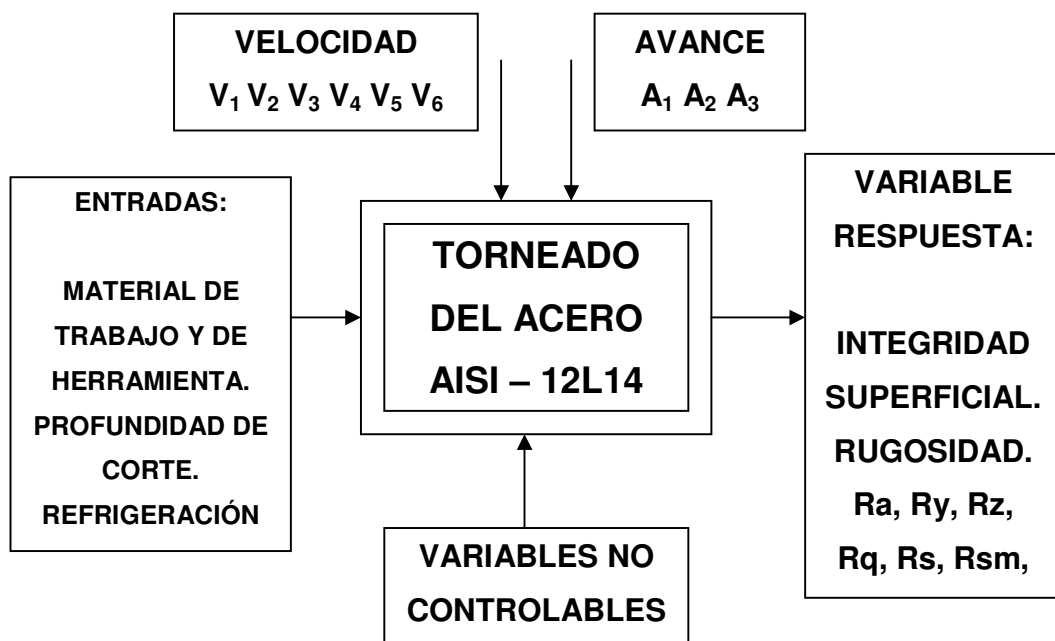
### 3.3 DISEÑO ESTADÍSTICO

Para analizar el proceso de maquinado del acero AISI – 12L14 y la respuesta que este material ofrece a las operaciones de corte, desde el punto de vista del acabado superficial, es necesario tomar en cuenta todas las variables que lo determinan, como por ejemplo: Proceso específico de corte, velocidad, avance, profundidad de corte, refrigeración y lubricación del proceso, geometría de la herramienta y de la interfase material – herramienta, material de trabajo y material de la herramienta, máquina en la que se efectúa el proceso, capacidad, ajuste, rigidez, nivelación, en fin, existen tantas variables que hacen en la práctica, muy difícil la definición de un experimento completo.

Sin embargo se pretende encontrar la influencia de dos de éstas variables en la obtención de superficies maquinadas mediante el proceso de torneado: la velocidad de corte y el avance, como parámetros más determinantes en la obtención de la calidad superficial.

Al seleccionar dos variables, el avance con tres niveles y la velocidad con seis niveles, se orienta la definición experimental hacia un modelo Bi-factorial, en el cual se pueden lograr conclusiones sobre la influencia que cada factor tiene sobre las variables de respuesta, así como su influencia de manera conjunta.

Para explicar en términos esquemáticos la formulación experimental se presenta la Figura 16:



**Figura 16. Esquema general del diseño del experimento a realizar para evaluar la respuesta del acero AISI – 12L14 frente a procesos de torneado**

Una combinación completa de las variables que se pretenden analizar, se presenta, en la Tabla 4, la matriz de 3 x 6 un total de 18 eventos o pruebas, que constituyen una réplica del experimento. (Ver Tabla 4).

**Tabla 4. Matriz de eventos del experimento de torneado cilíndrico del acero AISI – 12L14**

		VELOCIDADES					
		V1	V2	V3	V4	V5	V6
AVANCES	A1	A1V1	A1V2	A1V3	A1V4	A1V5	A1V6
	A2	A2V1	A2V2	A2V3	A2V4	A2V5	A2V6
	A3	A3V1	A3V2	A3V3	A3V4	A3V5	A3V6

Para el desarrollo del proyecto se adopta la decisión de realizar una réplica del proceso considerando:

1. Que el proceso de torneado de las probetas es suficientemente estable bajo las condiciones de trabajo previamente fijadas.
2. Que la longitud de cada probeta permite valorar la superficie, parámetros de rugosidad y topografía, en puntos aleatorios sin que se presenten variaciones que exijan realizar nuevas réplicas.
3. Que el número de mediciones de los parámetros de rugosidad, 16, en cada probeta, es suficientemente alto como para hacer confiable el proceso.
4. Que se realizó una muestra piloto para la cual se obtuvieron resultados con niveles de variación inferiores al 5%, lo cual justifica la decisión de realizar una sola réplica.

Se pretende obtener un concepto de la influencia de los factores analizados, y un modelo de regresión que permita realizar los pronósticos de valores a obtener para la variable respuesta cuando los factores varían dentro de un rango razonable.

En la evaluación estadística de la base de datos obtenida se utiliza el software Statgraphics Centurión XV.



### **3.4 MEDICIÓN DE LA RUGOSIDAD**

Una vez maquinadas las probetas, se procede a realizar la medición de su rugosidad superficial, como característica geométrica de la integridad superficial; se miden los parámetros de alturas Ra, Ry, Rz, Rq, y los parámetros de espaciamiento Rs y Rsm.

Se utiliza un rugosímetro Mitutoyo con las siguientes características:

- Equipo de evaluación de superficies marca Mitutoyo, modelo SJ – 201
- Longitud estándar de evaluación, (cutoff): entre  $\lambda_c = 0.08$  mm ; y  $\lambda_c = 8.0$  mm
- Longitud de evaluación: entre 0.4 mm y 40 mm
- Método de detección: Inductancia diferencial.
- Rango de medición: 350  $\mu\text{m}$  ( -200  $\mu\text{m}$  hasta 150  $\mu\text{m}$  )
- Material del indentador: Diamante.
- Radio de la punta del indentador: 5  $\mu\text{m}$
- Fuerza aplicada en la medición: 4 mN.
- Velocidad transversal: durante la medición 0.25 mm/s; de retorno 0.8 mm/s.
- Rango de medición y resolución: 350 $\mu\text{m}$  – 0.4 $\mu\text{m}$ ; 100 $\mu\text{m}$  – 0.1 $\mu\text{m}$ ; 50 $\mu\text{m}$  – 0.05  $\mu\text{m}$ ; 10 $\mu\text{m}$  – 0.01 $\mu\text{m}$ .
- Suministro de energía mediante adaptador: 9 V; 500mA.
- Rango de temperatura de operación: 5°C – 40°C.

### **3.5 EVALUACIÓN CUALITATIVA DE LAS SUPERFICIES**

Para determinar las características topográficas de las superficies obtenidas, se procede a observarlas, mediante microscopio óptico marca Nikkon, estereoscópico y electrónico de barrido (SEM), reseñar los detalles relevantes e interpretarlos a la luz de los conceptos de corte, arado, adhesión, como principales mecanismos que operan en la obtención de una nueva superficie.

Los aumentos utilizados se ubican entre 10X y 2000X, presentan una zona de observación adecuada para valorar los efectos de los mecanismos.