

Departamento de Ingeniería
Mecánica

Optimización de rectificado de ADI con MQL



UNIVERSIDAD NACIONAL
de MAR DEL PLATA



FACULTAD DE
INGENIERIA

Autor: Cristian Hernán Tealdi

Director: Dr. Amadeo Daniel Sosa





RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

1 CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	4
RESUMEN	5
CAPÍTULO 1: PROBLEMÁTICA	6
CAPÍTULO 2: INTRODUCCIÓN.....	8
2.1. Fundición de hierro	8
2.2. ADI.....	12
2.3. Composición química.....	13
2.4. Tratamiento térmico.....	13
2.5. Propiedades mecánicas.....	15
2.6. Aplicaciones.....	16
2.7. Rectificado	17
2.7.1. Rectificado plano tangencial.....	18
2.7.2. Longitud de contacto	21
2.7.3. Principios tribológicos.....	22
2.7.4. Fuerzas y potencia	33
2.8. Lubricación y refrigeración.....	34
2.8.1. Fluidos de corte	35
2.8.2. Clasificación	36
2.8.3. Fluidos de corte en rectificado.....	37
2.8.4. Caudal útil a través de la zona de contacto.....	38
2.8.5. Inconvenientes del uso de fluido de corte.....	40
2.8.6. Tratamiento de los fluidos de corte.....	41
2.9. Alternativas a la utilización de fluido de corte convencional.....	42
2.9.1. Mecanizado en seco.....	42
2.9.2. Mecanizado con mínima cantidad de lubricante (MQL).....	44
2.10. MQL.....	46
2.10.1. Cuando conviene usar MQL.....	47
2.10.2. La “niebla”.....	47
2.10.3. MQL y los micro mecanismos tribológicos.....	48
2.10.4. Disipación de calor	49

2.10.5.	MQL y las fuerzas de corte	51
2.11.	Aceites para MQL	52
2.11.1.	Ésteres sintéticos	52
2.11.2.	Alcoholes grasos	52
2.11.3.	Características fisicoquímicas	53
2.11.4.	Identificación de aceites desconocidos.....	54
2.12.	Aplicaciones	55
CAPÍTULO 3: OBJETIVOS		56
CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA		57
4.1.	Evaluación del equipo MQL.....	57
4.2.	Preparación de probetas para pruebas de funcionamiento.....	57
4.3.	Tratamiento térmico.....	59
4.4.	Ensayos de Rectificado.....	62
4.4.1.	Determinación de las condiciones de corte	64
4.4.2.	Selección del lubricante.....	65
4.5.	Medición de dureza.....	67
4.5.1.	Micro dureza Knoop	68
4.6.	Medición de Rugosidad superficial.....	68
4.7.	Análisis metalográfico.....	70
CAPÍTULO 5: PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL MQL.....		72
5.1.	Rediseño de la caja de comandos.....	72
5.2.	Control de electroválvula	74
5.3.	Perillas y suplementos.....	75
5.4.	Ensayos de caudal.....	78
5.5.	Reconexión del tablero de control de la rectificadora.	79
5.6.	Banco de pruebas.....	80
CAPÍTULO 6: MANUAL DE OPERACIONES DE EQUIPO MQL.....		85
6.1.	Maniobras preparativas.....	85
6.2.	Operación en régimen permanente	86
CAPÍTULO 7: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		88
7.1.	Seteo del MQL para obtener caudales.....	88
7.2.	Tratamiento térmico.....	88

7.3.	Comparación de las características de los lubricantes.....	89
7.4.	Micro dureza de las superficies rectificadas.....	92
7.4.1.	Velocidad de corte constante.....	92
7.4.2.	Velocidad de avance constante.....	95
7.5.	Rugosidad superficial.....	98
7.5.1.	Velocidad de corte constante.....	99
7.5.2.	Velocidad de avance constante.....	102
7.5.3.	Singularidades observadas.....	105
7.5.4.	Comparación con sistemas inundados.....	106
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES.....		109
CAPÍTULO 9: TRABAJOS FUTUROS.....		110

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, especialmente a mi madre, por su apoyo a lo largo de estos años.

A mis amigos y compañeros con quienes compartí estos años de crecimiento.

A mi tutor Dr. Amadeo Daniel Sosa por su guía en este proyecto.

RESUMEN

Los procesos de mecanizado utilizan fluidos de corte con fines de lubricación y refrigeración. Dichos fluidos, al finalizar su vida útil, se convierten en residuos especiales y, por su elevado costo y cantidades, se constituyen en una parte considerable del costo final de producción. Adicionalmente la tendencia mundial hacia métodos de producción sostenibles viene impulsando el desarrollo de métodos cuyo impacto ambiental resulte menor. Una de estas técnicas es la denominada MQL.

El rectificado es una de las operaciones de mecanizado que emplea mayor cantidad de fluido de corte, no obstante, no se encuentran investigaciones que aborden el impacto del empleo de la técnica MQL sobre operaciones de esta naturaleza.

El presente proyecto busca estudiar como la técnica MQL y la variación de sus parámetros principales impactan sobre las propiedades mecánicas obtenidas en procesos de rectificado tradicional. Se evalúa el empleo de 2 aceites: uno importado especialmente diseñado para sistemas MQL (Fresado y torneado) y otro nacional para uso en maquinaria alimenticia, no tóxico y apto para contacto con humanos. Se emplean diferentes velocidades de corte y avance dentro del rango usualmente empleado en la industria.

Para ello se emplea un equipo MQL especialmente diseñado y construido para uso en rectificado en trabajos finales previos. Se reevalúa el diseño y su funcionamiento, y confecciona un manual de procedimientos.

Se realizan ensayos en Fundición nodular austemperada (ADI), del cual se cuenta con una base de datos relevada en trabajos previos realizados con sistema convencional inundado.

CAPÍTULO 1: PROBLEMÁTICA

La búsqueda constante de competitividad conduce a la reducción de costos y mejora de la eficiencia en los productos y procesos empleados. De este modo la industria tiende a utilizar procesos con menores consumos de potencia, menores costos y baja producción de emisiones y desechos perjudiciales para las personas y el medio ambiente.

Tradicionalmente los procesos de mecanizados utilizan aceites solubles como fluido de corte. Éste cumple diversas funciones: extraer calor, lubricar la zona de trabajo, retirar las virutas, disminuir la degradación por corrosión, etc. Sin embargo, el uso de fluidos es oneroso, y pueden ser contaminantes y dañinos para los operarios.

Gracias al desarrollo de nuevas herramientas de corte, el uso de fluidos de corte está siendo dejado de lado en las operaciones de mecanizado por arranque de viruta (torneado, fresado, etc.). Otra solución adoptada es el uso de sistemas con lubricación por cantidades mínimas, o MQL por sus siglas en inglés, en los cuales solo una mínima porción de aceite es utilizada para lubricar eficientemente la zona de corte, disminuyendo así la generación de calor.

Dado que el proceso de rectificado presenta mayor complejidad en cuanto a la generación de virutas y mayor compromiso en cuanto a las características de las superficies generadas, este sistema de lubricación no ha sido difundido. Actualmente existen solo algunas referencias bibliográficas de estudios sobre el efecto de las condiciones de MQL sobre las superficies generadas. Por este motivo se ve justificada la realización de un proyecto que implique el diseño de un sistema MQL que pueda ser utilizado en el proceso de rectificado.

En trabajos finales previos se diseñó, simuló y construyó un prototipo para que cumpla con las funciones planteadas. En el presente proyecto se busca dar continuidad a los trabajos ya realizados al corregir contingencias

observadas durante las pruebas de funcionamiento anteriores y desarrollar nuevas pruebas con otras condiciones.

Las pruebas de funcionamiento se desarrollarán sobre muestras de fundición nodular austemperada o ADI por ser el mismo un material ampliamente utilizado ya que permite obtener formas complejas y de dimensiones similares a las finales con un costo significativamente menor que el proceso de manufactura del acero convencional. En suma, ningún trabajo de los relevados hasta la fecha aborda los efectos sobre fundiciones de este tipo que surgen al aplicar la técnica MQL en procesos de rectificado.

CAPÍTULO 2: INTRODUCCIÓN

Este capítulo constituye una revisión bibliográfica de los temas y conceptos necesarios para abordar la problemática planteada. La revisión abarca aspectos tanto del material como de los procesos analizados en este proyecto final.

2.1. Fundición de hierro

La fundición de hierro es uno de los materiales metálicos más antiguos utilizados por el hombre. Entre 1620 y 1850 se convirtió en el material ingenieril dominante, siendo posteriormente desplazado por el acero. En el último siglo, las fundiciones de hierro fueron desarrolladas industrialmente. En la actualidad, gracias a los avances en las técnicas de producción y control de las microestructuras, su uso es masivo y constituye un material competitivo frente a otros de aparición más reciente.

Las fundiciones de hierro son aleaciones multicomponentes de alta complejidad metalúrgica cuyos principales elementos componentes, después del hierro (Fe), son el carbono (C) y el silicio (Si).

Para simplificar su estudio es común utilizar un diagrama de fases Fe-C. Dependiendo de la composición química y de la velocidad de enfriamiento durante la colada, las aleaciones pueden solidificar de acuerdo al diagrama de equilibrio estable o metaestable. Cuando se trata de aleaciones Fe-C-Si, con tenores de Si superiores al 2%, si el régimen de extracción de calor es bajo, la solidificación ocurre de acuerdo al diagrama estable, por lo tanto, el eutéctico que se forma será austenita-grafito, y al material se lo denomina "Fundición con grafito libre". Este grafito puede presentarse en diferentes morfologías como se verá más adelante. Con subenfriamientos muy altos, la solidificación puede ocurrir siguiendo el diagrama metaestable, en cuyo caso el eutéctico que se

forma será austenita-cementita, y el material resultante se conoce como “Fundición Blanca”.

A su vez, existe la posibilidad de que la solidificación ocurra en parte de acuerdo con el diagrama de equilibrio estable y en parte de acuerdo con el diagrama metaestable. En este caso el tipo de fundición obtenido se conoce como “Fundición Atruchada”.

La “Fundición Blanca” es el único tipo de fundición en la cual el C está solamente presente como carburo de hierro (Fe_3C , “Cementita”). Tal como se menciona en DuctileIron Data, la presencia de carburos le confiere a este tipo de fundición una elevada dureza y resistencia a la abrasión, pero también muy alta fragilidad y dificultad para el mecanizado. Mediante la aplicación de un tratamiento térmico es posible transformar parte de esos carburos en grafito flocular (nódulos de forma muy irregular, Figura 2.1 d) y obtener “Fundición maleable”. Esta variedad presenta resistencias y ductilidades del orden de las de aceros colados de bajo C. Por otra parte, si las aleaciones Fe-C solidifican según el diagrama de equilibrio estable, el grafito puede presentarse con distintas morfologías, a saber: laminar, vermicular (o compacto) esferoidal (o nodular), Figuras 2.1 a,b y c, respectivamente.

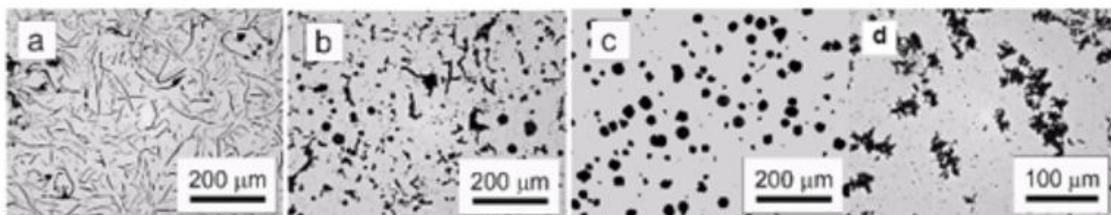


Figura 2.1 Morfología del grafito a) Laminar, b) Vermicular, c) Nodular y d) Flocular

La morfología laminar del grafito caracteriza a la “fundición gris”, cuya utilización es de antigua data y actualmente es todavía el tipo de fundición de mayor volumen de producción. A pesar de poseer baja resistencia mecánica,

sus buenas características de maquinabilidad, colabilidad y atenuación de vibraciones, lo hacen un material muy apto en diversas aplicaciones, como: blocks de motores y otros ejemplos descritos en [3].

En la fundición vermicular el grafito se presenta con una geometría en forma de vermes o gusanos. Originalmente se consideró a esta morfología como una deformación de la esferoidal, pero posteriormente el estudio profundo de sus propiedades físicas y mecánicas le otorgó un espacio propio dentro de la familia de las fundiciones de hierro. La fundición vermicular presenta una resistencia a la tracción, ductilidad, resistencia a la fatiga, resistencia al impacto y propiedades térmicas superiores a las de una fundición laminar, para una matriz similar. En Ductile Iron Data [3] se mencionan algunas de las aplicaciones posibles de esta variedad de fundición, como: campanas y discos de freno de automóviles, moldes para aluminio, cilindros, válvulas de escape y aros de pistón.

En la fundición de hierro con grafito esferoidal (FE) el grafito se presenta en forma de esferoides, llamados comúnmente nódulos. Su importancia tecnológica radica en que la forma esferoidal del grafito es la más adecuada para disminuir los efectos de concentración de tensiones y la discontinuidad de la matriz metálica. Dado que la microestructura final, y por ende las propiedades mecánicas de las FE, están significativamente relacionadas con los procesos de colada y tratamiento térmico, es necesario un conocimiento profundo de las variables que afectan a dichos procesos. Dentro de la amplia gama de las FE se puede establecer una clasificación según el tipo de matriz metálica:

- Fundición Esferoidal Ferrítica: Posee nódulos de grafito en una matriz ferrítica. Se caracteriza por tener muy buena ductilidad y resistencia al impacto, con baja tensión de fluencia y similar a la de un acero de bajo C
- Fundición Esferoidal Perlítica: Los esferoides de grafito se encuentran inmersos en una matriz de perlita, esto es una mezcla laminar de cementita y ferrita. Es una fundición de alta resistencia mecánica, buena resistencia al

desgaste y moderada ductilidad y resistencia al impacto. La maquinabilidad es superior a la de los aceros de propiedades mecánicas similares.

- Fundición Esferoidal Ferrítico-Perlítica: Es el tipo más común de FE. Las propiedades mecánicas son intermedias entre los grados ferríticos perlíticos. Tiene buena maquinabilidad y bajo costo de producción.
- Fundición Esferoidal Martensítica: Se logra mediante un tratamiento térmico de temple y revenido, empleando generalmente coladas a las que se agregan aleantes para aumentar la templabilidad y evitar la formación de microconstituyentes no deseados, como la perlita. La matriz resultante tiene muy alta resistencia a la tracción y al desgaste, pero baja ductilidad y tenacidad.
- Fundición Esferoidal Austenítica: Esta FE, comúnmente aleada con altos tenores de Ni que estabilizan la austenita hasta la temperatura ambiente, ofrece buena resistencia a la corrosión. No se encuentra comprendida dentro de los materiales ferromagnéticos. Posee buena estabilidad dimensional y buena resistencia a la tracción a elevadas temperaturas.
- Fundición Esferoidal Austemperada (ADI): Es la variante más moderna de las FE. Se logra sometiendo una FE convencional a un tratamiento térmico de austenizado seguido de una etapa de austemperado a una temperatura preestablecida en el intervalo 250-400 °C para ser posteriormente enfriada en aire hasta la temperatura ambiente. El ADI presenta una resistencia a la tracción significativamente superior a las FE perlíticas en adición a una notable ductilidad y tenacidad. Es además un material con muy buena resistencia a la fatiga y al desgaste.
- Fundición Esferoidal Austemperada con carburos libres (CADI): Es una variante del ADI de reciente introducción al mercado mundial. La presencia de carburos libres en una matriz ausferrítica le confiere notables mejoras en la resistencia a la abrasión y al desgaste. Este tipo de matriz hace también que la resistencia al impacto de CADI resulte superior a las de otras variantes de fundición con carburos.
- Fundición ADI "Dual Phase": Comprende la variante más moderna de las ADI y presenta diferentes cantidades de ferrita libre (alotromórfica) y

ausferrita. Es obtenida mediante un tratamiento de austenizado incompleto, seguido de una etapa final de austemperado. Las diferentes combinaciones de las fases presentes permiten ampliar aún más el rango de propiedades obtenibles, siendo destacable el grado de la fractoténacidad para algunas microestructuras.

2.2. ADI

El ADI tiene una microestructura que contiene grafito esferoidal en una matriz que es en general una mezcla de fases. De estas, la ferrita bainítica y la austenita son las fases más deseables, pero en muchos casos pequeñas cantidades de martensita y/o carburos también pueden estar presentes en la microestructura. La ferrita bainítica se genera durante la transformación isotérmica de la austenita a temperaturas por debajo de la temperatura de inicio de la bainita. Este tratamiento térmico se conoce como austemperado. Una combinación óptima de austenita de alto carbono y ferrita bainítica confiere excelentes propiedades mecánicas a estas fundiciones. Las proporciones de las fases cambian con la composición química y el tratamiento térmico por lo que es posible producir una familia de ADI. Esto a su vez permite una amplia gama de aplicaciones con ADI compitiendo favorablemente con las piezas forjadas de acero y aleaciones de aluminio en términos de propiedades mecánicas, costos de fabricación, propiedades físicas y ahorro de peso.

Las grandes concentraciones de silicio típicamente presentes en las fundiciones de grafito tienen un rol clave en el desarrollo de la microestructura de fundiciones austemperadas. El silicio obstaculiza la precipitación de carburos durante la transformación bainítica [1]. El tiempo de austemperado debe asegurar que la formación de ferrita bainítica enriquezca adecuadamente la austenita residual con carbono permitiendo que gran parte de esta sea retenida a temperatura ambiente. Desafortunadamente el austemperado prolongado causa la descomposición de la austenita residual en una mezcla de

carburos y ferrita lo cual tiene un efecto negativo en las propiedades mecánicas [2].

2.3. Composición química

El ADI nominalmente tiene la composición química Fe-3.6 C-2.5 Si-0.5 Mn-0.05Mg. Es común adiciones de elementos tales como Mo, Ni y Cu. Una de las razones para la aleación es la de suprimir la reacción de perlita para que la austenita pueda transformarse en bainita. Otros elementos como el cromo y el vanadio se pueden añadir también para mejorar su dureza. Sin embargo, esto no es común, ya que estos son elementos formadores de carburos.

Hay tres puntos importantes a considerar cuando se selecciona la composición química del ADI:

- La fundición debe ser lo suficientemente aleada para evitar la transformación a perlita, pero no aleada en exceso para evitar el retraso de la transformación bainítica.
- La microestructura debe estar libre de carburos intercelulares y fosfuros.
- La tendencia a la segregación química debe ser minimizada para favorecer la uniformidad del componente colado.

2.4. Tratamiento térmico.

El proceso de austemperado consta de dos etapas:

1. Austenización: el componente colado se calienta a temperaturas entre 850 °C y 950 °C durante un intervalo que va de 15 minutos a 2 horas. A diferencia de los aceros, la temperatura de austenización determina el contenido de carbono de la matriz debido a que los nódulos de grafito sirven como fuente o sumidero de carbono, y, debido a que la solubilidad del grafito en austenita

aumenta con la temperatura. No obstante, debe tenerse en cuenta que largos periodos a elevadas temperaturas provocarían el crecimiento del grano austenítico.

2. Austemperado: Después de la austenización el componente colado se enfría en un baño de sales a una temperatura en el rango de 450-250 °C, seguido por un enfriamiento a temperatura ambiente.

El enfriamiento hasta la temperatura de austemperado reviste vital importancia sobre el resultado final. De dicha temperatura dependerá la morfología de la ausferrita resultante. Austemperados en el rango de temperatura superior dan lugar a estructuras con forma de placas o agujas de ferrita relativamente gruesas en una matriz enriquecida de C. Cuando el austemperado se realiza en los rangos inferiores, la movilidad del carbono se ve restringida, por lo que los productos de la reacción se afinan progresivamente, asemejándose a la bainita obtenida en los aceros. Por otra parte, las condiciones de enfriamiento deben ser tales que permitan evitar la formación de perlita y alcanzar la temperatura de austemperado en todo el volumen de la pieza antes del inicio de la transformación (curva 1, figura 2.4.1). De no ser lo suficientemente veloz la extracción de calor la pendiente de la curva aumentaría hasta entrar en la zona de inicio de transformación de otras fases (curvas dos y 3, figura 3.1)

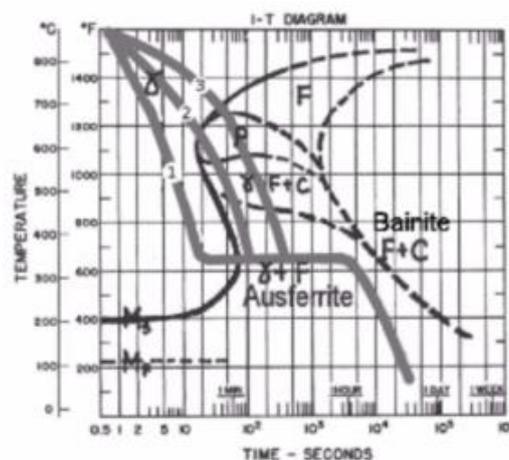


Figura 2.4.1: Condiciones de enfriamiento

Dado que el objetivo es conseguir una matriz totalmente ausferrítica, el tiempo de mantención a la temperatura de transformación isotérmica debe ser suficiente para completar la primera etapa de la transformación y a la vez no permitir el comienzo de la segunda.

Si el tiempo empleado es muy corto, el grado de avance de la transformación no llegara al 100% dejando un porcentaje indeseable de austenita retenida. Por el contrario, un tiempo muy largo iniciara la segunda etapa del proceso precipitando C en forma de carburos de hierro bainíticos.

2.5. Propiedades mecánicas

El ADI puede tener una resistencia a la tracción de hasta 1600 MPa con una elongación de alrededor de 1.1% y alta dureza para aplicaciones en las que la resistencia al desgaste es de primordial importancia. Materiales menos duros con resistencias a la tracción de entre 900 y 1200 MPa y una elongación de hasta un 16% pueden ser producidos para aplicaciones ingenieriles donde la ductilidad es vital.

Estas propiedades son consecuencia de su microestructura característica que consiste en grafito esferoidal en una matriz de ferrita acicular y austenita sobresaturada de carbono [3], a lo que comúnmente se refiere como microestructura “ausferrítica”, pudiendo quedar también austenita.

La temperatura y el tiempo de austemperado ejercen el mayor efecto sobre la microestructura de la matriz y las propiedades finales. La morfología y las cantidades relativas de ferrita y austenita enriquecida, formadas durante la primera etapa de la transformación, están principalmente determinadas por la temperatura. Los austemperados a temperaturas del rango superior (330-380°C), dan lugar a la producción de una estructura ausferrítica consistente en placas, o agujas de ferrita relativamente gruesas, en una matriz de austenita enriquecida en carbono, confiriendo ductilidad. Cuando el austemperado se

realiza a temperaturas inferiores, la movilidad del carbono se ve restringida, por lo que los productos de reacción se afinan progresivamente, es decir, se obtienen una microestructura con agujas de ferrita más angostas, promoviendo alta resistencia y dureza.

A efectos prácticos, la norma ASTM A897/A897M-06, que se muestra en la figura, clasifica el amplio rango de propiedades mecánicas que se obtienen después del austemperado.

Tabla 2.1. Clasificación de las ADI según ASTM A897/A897M-06 [3]

GRADE	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Impact Energy (J)	Typical Hardness (HBW)
750-500-11	750	500	11	110	241-302
900-650-09	900	650	9	100	269-341
1050-750-07	1050	750	7	80	302-375
1200-850-04	1200	850	4	60	341-344
1400-1100-02	1400	1100	2	35	388-477
1600-1300-01	1600	1300	1	20	402-512

2.6. Aplicaciones

Antes de indicar algunas aplicaciones del ADI es importante recordar algunas características físicas que, combinadas con sus propiedades mecánicas abren el mercado de este material en diferentes industrias, pero sobre todo de componentes automotores.

1. Buena colabilidad y producción de partes cercana a su forma final.
2. Densidad 10% menor que la del acero.
3. Mayor capacidad de amortiguación que el acero lo que hace que las piezas absorban energía 2-5 más energía. Esto reduce el nivel de ruido alrededor de 8 a 10 decibeles en cajas de engranajes [4,5]

La combinación de estas características con el proceso de austemperado crea una gran familia de ADI que puede competir con los aceros aleados y hasta con piezas de aluminio, no sólo en el rendimiento mecánico, sino también en el costo de producción. Algunos ejemplos de aplicaciones son:

- Automotriz: cigüeñales, árboles de levas, conjuntos piñón y corona y engranajes de distribución para los motores diésel.
- Camiones pesados: soporte de elásticos de amortiguación, soportes de U-bolt, bielas, soportes de motor y engranajes.
- Minería: rodamiento de tapas superiores, placas de pista, uñas, aparatos de ferrocarril, componentes de suspensión, piñones, cadenas, guías de cadena, placas de desgaste
- Bombas y compresores: impellers, cuerpos de válvulas, carcasas de compresores, engranajes y cabezales de perforación
- Equipos de construcción: cilindros hidráulicos, zapatas, levas de ajuste.

2.7. Rectificado

El rectificado es una operación de mecanizado abrasivo utilizado para operaciones de acabado y/o cuando el material a mecanizar presenta elevada dureza. En dicho proceso la herramienta (muela) arranca virutas cortas y delgadas, obteniendo superficies con un grado de terminación superficial, exactitud de forma geométrica y precisión dimensional elevadas. La muela está compuesta por granos abrasivos distribuidos uniformemente y unidos mediante un material ligante o aglomerante. Al mismo tiempo, los poros o espacios vacíos cumplen un rol importante en el proceso global. Los granos que componen la muela son de material abrasivo de forma irregular, de múltiples puntas y aristas. Cada grano constituye uno de los numerosos filos que actúan en forma simultánea. Este proceso también se caracteriza por la elevada

velocidad de corte, muy bajo espesor de viruta, filos de formas irregulares y distribuidos al azar y ángulos de ataque muy negativos. Esto último produce elevada deformación en las virutas y en las superficies generadas.

2.7.1. Rectificado plano tangencial

El rectificado plano tangencial es una operación de mecanizado abrasivo en la cual la muela actúa en forma tangencial para generar una superficie plana. La pieza se fija a una mesa que posee un movimiento longitudinal alternativo (avance) y uno transversal progresivo (a_p , Figura 2.7.1). Usualmente a_p no supera el tercio del ancho de la muela, por lo que el corte se realiza en franjas hasta cubrir todo el ancho de la pieza a rectificar. La muela gira a una velocidad constante, generando una velocidad relativa en la interfaz muela–pieza llamada velocidad de corte (V_c), que usualmente es 60 a 80 veces mayor que (a_p). El husillo de la muela posee un movimiento vertical de aproximación y reglaje con el cual se regula la profundidad de corte (h).

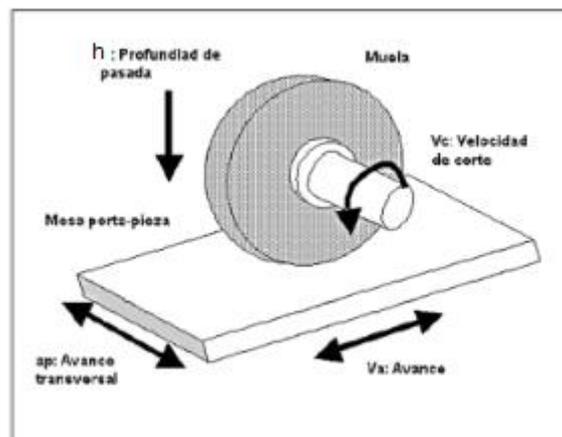


Figura 2.7.1 Proceso de rectificado

La figura 2.7.2 ilustra un proceso típico de rectificado tangencial plano. Los 5 elementos principales son la muela, la pieza de trabajo, el fluido de corte, las virutas y el ambiente.

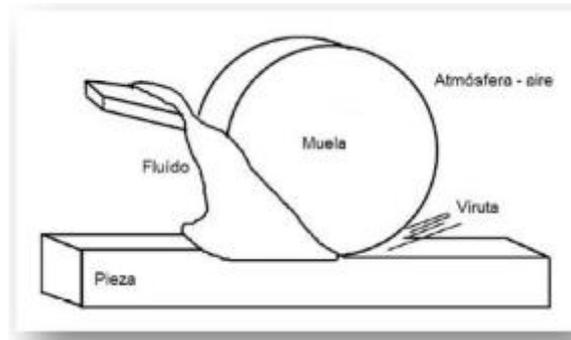


Figura 2.7.2 esquema ilustrativo

La muela realiza el mecanizado de la pieza, aunque hay un proceso de reacción inevitable, la pieza desgasta la muela. El grano del abrasivo debe ser más duro que el material a mecanizar en el punto de interacción, es decir a la temperatura de la interacción. Como estas temperaturas de corta duración pueden ser muy altas, el grano abrasivo debe conservar su dureza aún caliente. Si la pieza es más dura que el grano, es éste quien sufrirá el mayor desgaste.

La dureza del abrasivo es sustancialmente reducida a temperaturas típicas de contacto entre el grano y la pieza. Afortunadamente, la dureza de la pieza también lo es.

La viruta incluye escamas cortadas de la pieza mezcladas con residuos de corte y partículas desgastadas de los granos abrasivos de la muela.

El fluido de corte, por su parte, cumple tres objetivos principales:

- Lubricar y reducir la fricción entre los granos abrasivos, la viruta y la pieza en la zona de contacto
- Refrigerar la pieza y reducir las temperaturas alcanzadas en el bulk de la pieza dentro y fuera de la zona de contacto
- Remover las virutas para disminuir la abrasión de 3 cuerpos.

La atmósfera también juega un rol importante. La mayoría de los metales, cuando son mecanizados, experimentan un aumento de la reactividad química debido a dos efectos:

- Las nuevas superficies creadas durante el mecanizado son mucho más reactivas que una superficie ya oxidada.
- Las altas temperaturas en la interface grano-pieza, y grano-viruta también incrementa la velocidad de reacción.

El resultado es la formación de óxidos y otros componentes muy rápido. Los óxidos de baja resistencia asisten a la lubricación y reducen la fricción a velocidades de rectificado normales. Este efecto de lubricación disminuye a medida que aumenta la velocidad de rectificado.

Durante el proceso de mecanizado la muela corta el material de la pieza a medida que esta pasa por debajo. Fuerzas normales y tangenciales son generadas entre la muela y la pieza que hacen que los granos de abrasivos de la muela penetren en el material.

Se pueden presentar tres casos de acuerdo con la penetración del grano abrasivo en el material

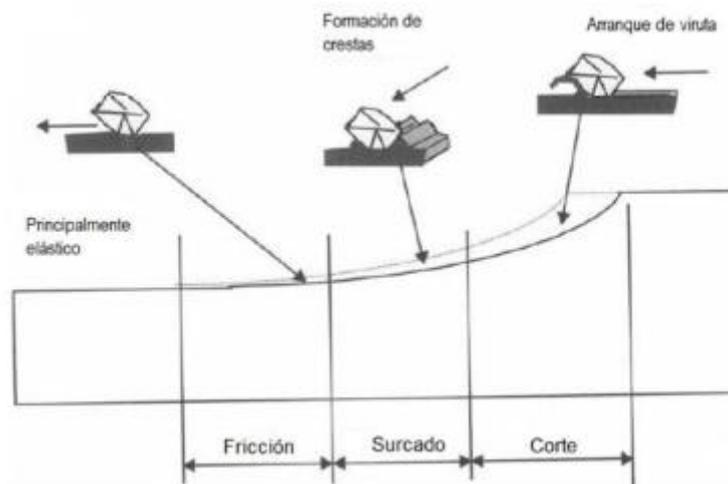


Figura 2.7.3 interacciones grano-pieza

Un grano que corta profundamente la pieza genera un chip mientras que un grano que la fricciona muy ligeramente puede no penetrar la superficie. Un

grano que fricciona sin penetración provoca un desgaste leve de la superficie que puede ser difícilmente detectable. Y la tercera situación en la que el grano penetra y surca la superficie causando crestas sin eliminar necesariamente material.

Fricción, surcado y corte son tres etapas de remoción de material. Algunos granos rozan sin generar surcos. Algunos crean surcos sin cortar y algunos experimentan los tres estados. [6].

La transición de la fricción a la generación de surcos y de este al corte depende del incremento de la penetración del grano en la superficie. Muchos aspectos del comportamiento del rectificado dependen de la extensión de cada una de estas tres etapas.

Los granos abrasivos que principalmente rozan desgastan de una manera diferente que los granos involucrados principalmente en una profunda remoción de chispas.

2.7.2. Longitud de contacto

Tanto el comportamiento de la muela como la conformación de virutas tienen una estrecha relación con la naturaleza del proceso aplicado, es decir, según se trate de un rectificado interior, exterior, plano etc. Dicha correlación reside en la dependencia existente entre la longitud de contacto y el tipo de proceso

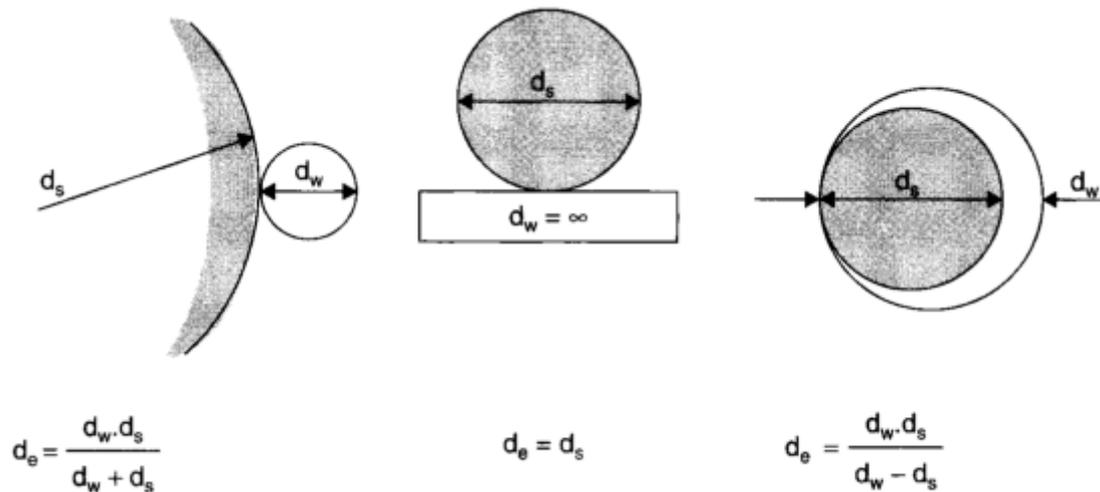


Figura 2.7.4: Tipos de contacto

Como se puede apreciar en la figura 2.7.4 en rectificado externo la longitud de contacto resulta menor que en rectificado plano y, a su vez, es última menor a la del rectificado interior para una misma muela. Quitar virutas largas finas requiere menores esfuerzos que quitar virutas más cortas y gruesas, por lo que la muela tenderá a un comportamiento más duro frente a la pieza. En cuanto a la estructura de la muela se debe considerar que las virutas más largas requieren más espacio para ser evacuadas [12].

2.7.3. Principios tribológicos

Los tres tipos de interacción descritos anteriormente se encuentran bajo la órbita de estudio de la tribología, dentro del campo de la abrasión, que, según la norma ASTM G40 se debe a la acción de partículas o protuberancias duras que son forzadas contra una superficie sólida, y se mueven dejando un surco y removiendo material.

2.7.3.1. Micro mecanismos de remoción

Al estudiar el mecanismo de remoción se puede establecer una clasificación según el mecanismo de remoción actuante a nivel microscópico. Ellos son micro surcado, micro corte, micro fisuración y micro fatiga.

En el micro surcado ideal (figura 2.7.5 a), el volumen de material correspondiente al surco es desplazado por deformación plástica hacia los bordes sin producir pérdida de material. La remoción de material tiene lugar por el solapamiento de surcos sucesivos, produciéndose micro fatiga de las protuberancias formadas sobre los bordes del surco (figura 2.7.5 b). En el micro corte ideal (figura 2.7.5 c) se observa una pérdida de volumen, por la formación de virutas, que poseen igual volumen que el surco de desgaste. La micro fisuración (figura 2.7.5 d) ocurre cuando la tensión concentrada que impone que impone una partícula abrasiva, es aplicada sobre la superficie de un material frágil. En este caso, al deslizar se desprenden partículas de desgaste, cuyo volumen puede ser superior al de surco.

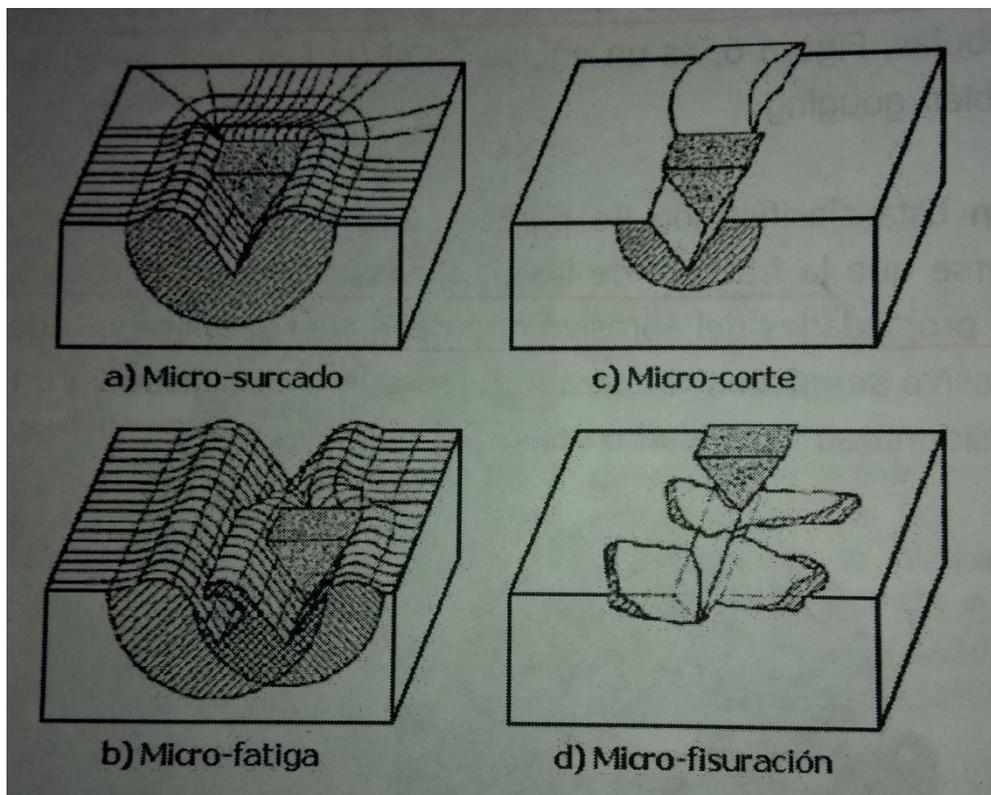


Figura 2.7.5: Micro mecanismos de remoción

2.7.3.2. Cuantificación

Cuando una superficie sufre abrasión, se generan huellas de desgaste en forma de surcos, cuyo volumen está relacionado con el desgaste producido. Por lo tanto, el cálculo del volumen de un surco es una forma sencilla de evaluar el desgaste. El mismo se hace a partir del largo del surco y el área transversal, la cual depende de la geometría del abrasivo y la profundidad. Esta última tiene una relación directa con la carga normal P y la dureza del material.

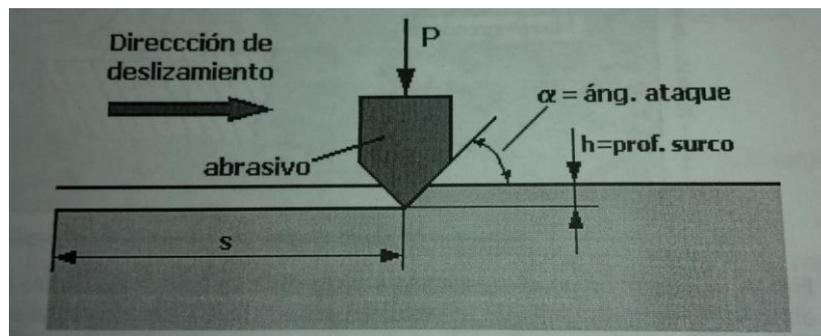


Figura 2.7.6: Variables que influyen en el surcado

No obstante, se ha observado que la remoción de material está fuertemente ligada al ángulo de ataque α (figura 2.7.5), tal y como sucede con las herramientas de corte. La penetración y deslizamiento de una partícula abrasiva sobre una superficie metálica resulta en micro surcado o micro corte dependiendo del ángulo α . Por debajo de un ángulo crítico (α_c) el material sufre principalmente deformación plástica, fluyendo alrededor y por debajo del abrasivo y con baja pérdida de masa. Cuando el ángulo de ataque es superior α_c se produce una transición de micro surcado a micro corte y, en este caso, es mayor la cantidad de material removido que el deformado (figura 2.7.6).

A través de observaciones realizadas con microscopía SEM se ha observado que al deslizar una aspereza sobre una superficie metálica el desgaste producido no es solo del tipo micro corte y micro surcado, sino que también se produce daño por la formación de una cuña delante de la aspereza.

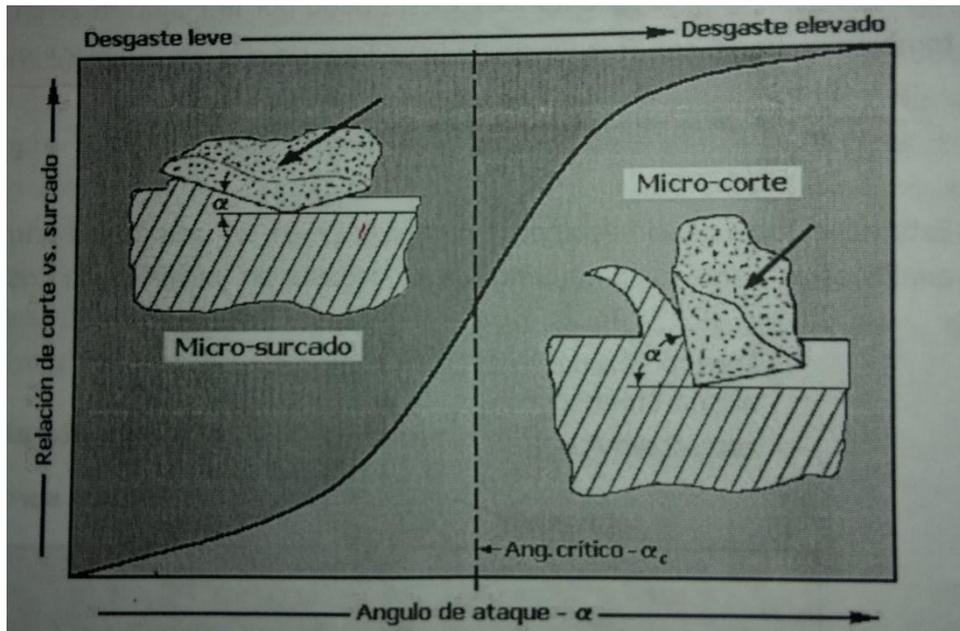


Figura 2.7.7: Transición micro-surcado a micro-corte

2.7.3.3. Grado de penetración D_p

El criterio del ángulo de ataque α puede ser reemplazado por uno de grado de penetración, D_p . Este describe la severidad del contacto y se expresa como el cociente entre la profundidad de penetración, h , y el radio de la impronta proyectada (figura 2.7.8)

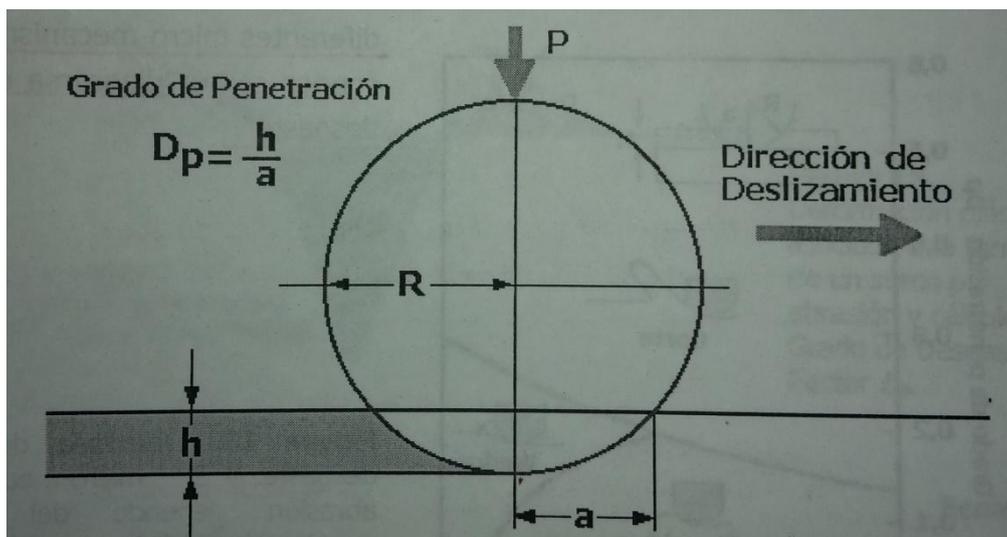


Figura 2.7.8: Esquema grado de penetración

Hokkirigama y Kato (1998), midieron el coeficiente de fricción, μ , a la vez que observaron el micro mecanismo de abrasión producido para diferentes valores de carga.

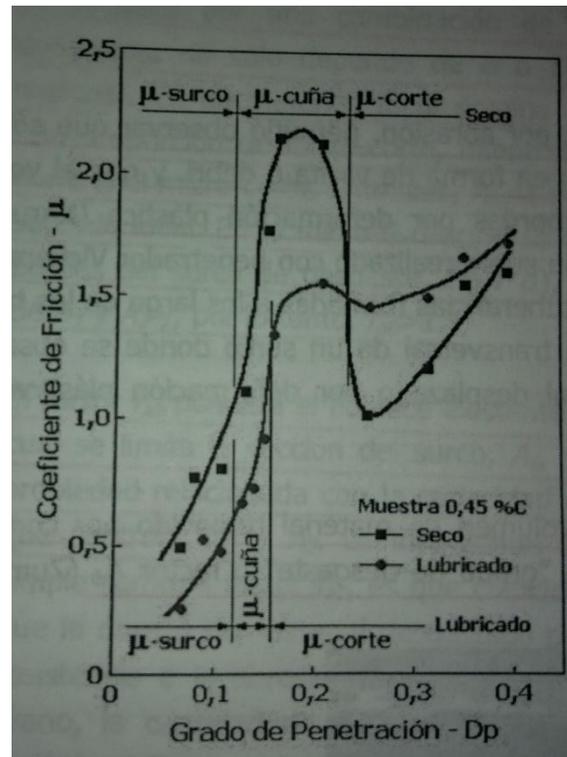


Figura 2.7.9 Coeficiente de fricción vs Dp

El valor de resistencia al corte, f , definido como la relación entre la resistencia al corte de la interfaz abrasivo/superficie y la resistencia al corte del material abradido fue calculado utilizando los datos de la figura 2.7.9.

La figura 2.7.10 muestra la relación entre Dp y f , observando que pueden definirse regiones del diagrama en las cuales el daño superficial se produce según diferentes micro mecanismos.

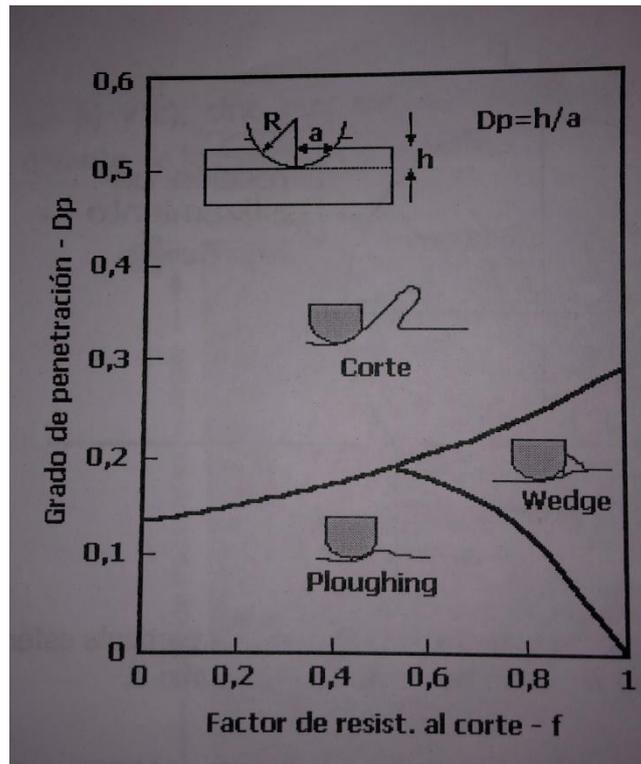


Figura 2.7.10: D_p vs resistencia al corte

El Estudio de los surcos producidos por la abrasión ha permitido observar que, en realidad, solo una porción de el volumen es removido en forma de viruta, mientras que el restante es desplazado hacia los laterales en forma de deformación plástica.

El daño por abrasión se produce por una combinación de micro mecanismos, entre los cuales el dominante no solo depende de α y D_p , sino también, de las propiedades del material. En un material dúctil domina el micro surcado, aunque también existe una porción de micro corte, mientras que en un material con baja ductilidad domina el micro corte. [Catedra Tribología]

2.7.3.4. Micro mecanismos de fricción

Los eventos de interacción microscópicos entre superficies, que dan origen a la fricción, son denominados mecanismos de fricción. Estos son:

- Adhesión producida por la soldadura fría de micro asperezas, figura 2.7.11 a
- Interacción mecánica producido por la interacción de micro asperezas o partículas atrapadas. Por ejemplo, rayado o surcado de una superficie por asperezas de otra, figura 2.7.11 b
- Deformación y/o fractura de capas superficiales (por ejemplo, óxidos), figura 2.7.11 c
- Deformación plástica por un tercer cuerpo, por ejemplo, abrasivo o partículas de desgaste, figura 2.7.11 d

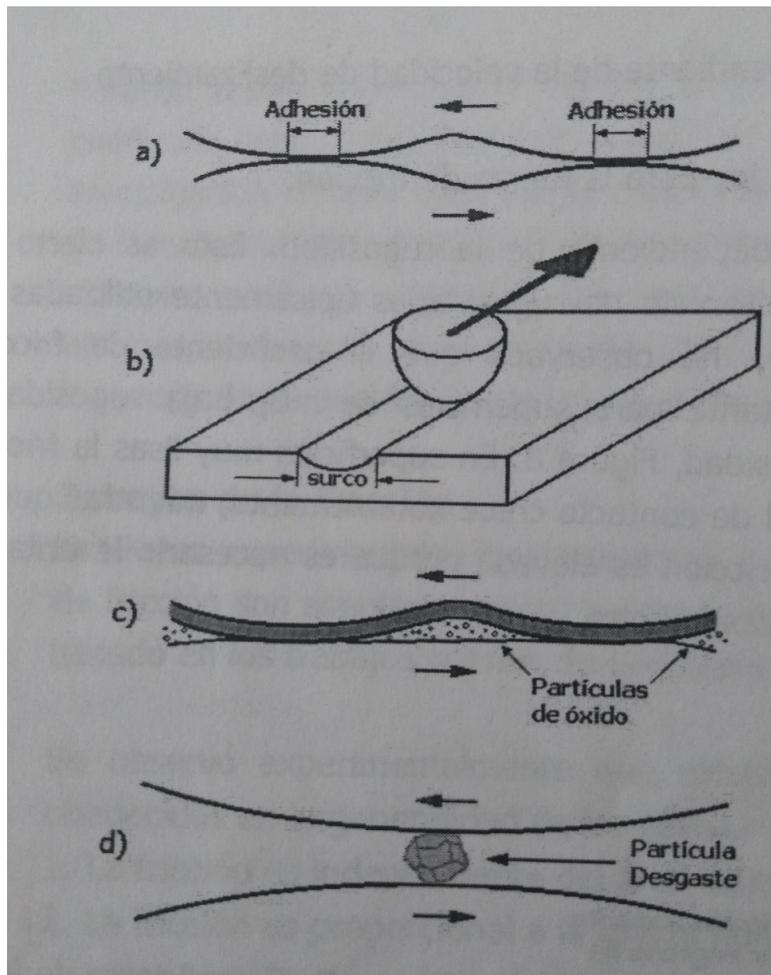


Figura 2.7.11: Micro mecanismos de fricción

Estos mecanismos son los responsables de la fuerza de fricción, cuyo valor dependerá del mecanismo dominante y, en consecuencia, de cada tribosistema. Por lo tanto, la fricción dependerá de la naturaleza de las superficies en contacto, de la terminación superficial, del medio y de las condiciones de funcionamiento. A continuación, se abordarán sus principales aspectos.

2.7.3.4.1. Mecanismo de adhesión

Se produce por la soldadura en frío de las asperezas. Suele ser el mecanismo dominante cuando las superficies están limpias y en medios inertes. El grado de adhesión depende de la naturaleza de las superficies, de la afinidad entre ellas y de cualquier otro elemento presente. También depende de la tensión de fluencia del material próximo a la superficie ya que, durante el deslizamiento, se produce deformación plástica de las crestas en contacto. Sin embargo, es discutible la influencia de la adhesión para condiciones ambientales corrientes ya que no ha sido probada.

2.7.3.4.2. Mecanismo de interacción mecánica

La interacción de asperezas superficiales siempre está presente y junto con la adhesión dará origen a la mayor parte de la fuerza de fricción. Bowden y Tabor (1950) propusieron que la fuerza de fricción está compuesta por dos componentes, una de surcado F_s y otra de adhesión F_a

$$F_f = F_a + F_s$$

La contribución por surcado puede o no ser significativa y su magnitud dependerá de la rugosidad superficial, la dureza relativa de las dos superficies y del tamaño y forma de las partículas atrapadas.

Durante el movimiento relativo se produce deformación y desplazamiento de material de dos tipos. El primero es del tipo macroscópico, cuando se produce la deformación de micro asperezas. El segundo es de tipo macroscópico cuando las asperezas de la superficie más dura producen surcos en el material más blando.

Johnson (1981) realizó el análisis mediante el modelado numérico en 2D del proceso de deformación producido por una aspereza en forma de cuña, que penetra en una superficie metálica. El volumen de material afectado por la indentación depende de la fricción entre la cara de la cuña y la superficie del metal, figura 2.7.12. Si esta fricción es elevada, por debajo de la cuña se produce un estado triaxial de tensiones, y la componente desviadora de la tensión se vuelve muy baja como para promover la deformación plástica del material (región sombreada, figura 2.7.12 a). Esto actúa como una prolongación de la cuña y, por lo tanto, la penetración afecta un volumen de material mayor. Por el contrario, la fricción entre la aspereza y la cuña es baja, la deformación plástica afecta un volumen de material menor

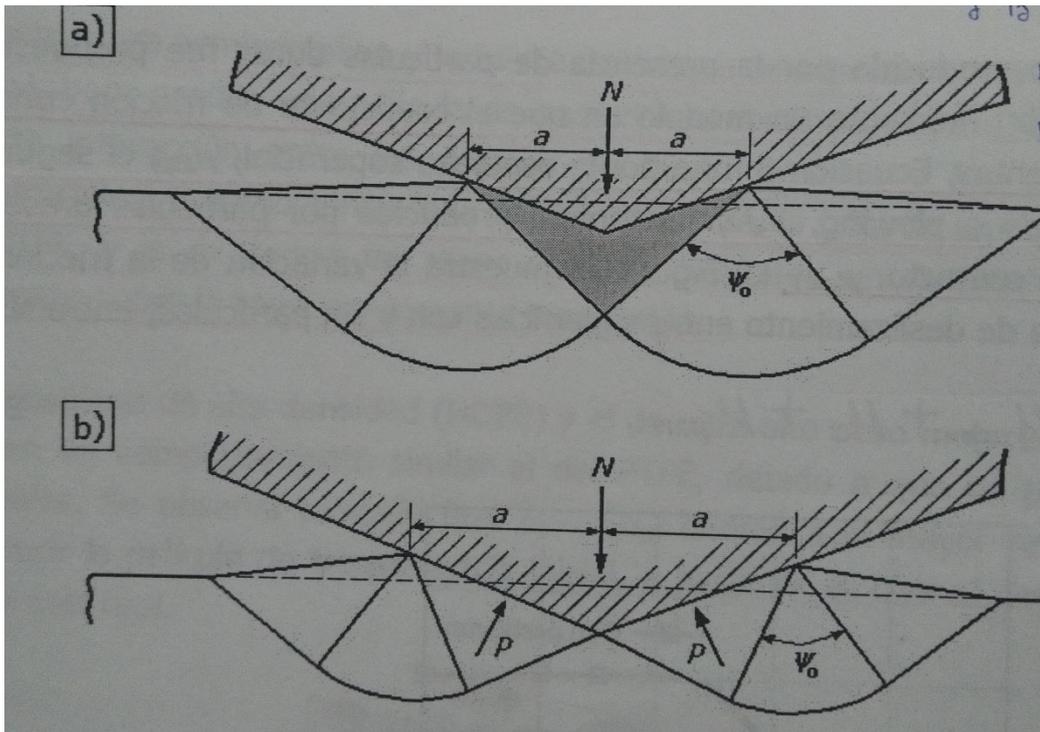


Figura 2.7.12: Cuña estática

Si la cuña desliza, la penetración será mayor porque la carga es soportada por un solo lado de la cuña, figura 2.7.13. Cuando la fricción interfacial es baja, la adhesión tiende a cero y solo existe surcado, como consecuencia, la cuña no penetra tan profundamente y la onda frontal de material afectado es menor (daño por micro cuña), figura 2.7.13 b.

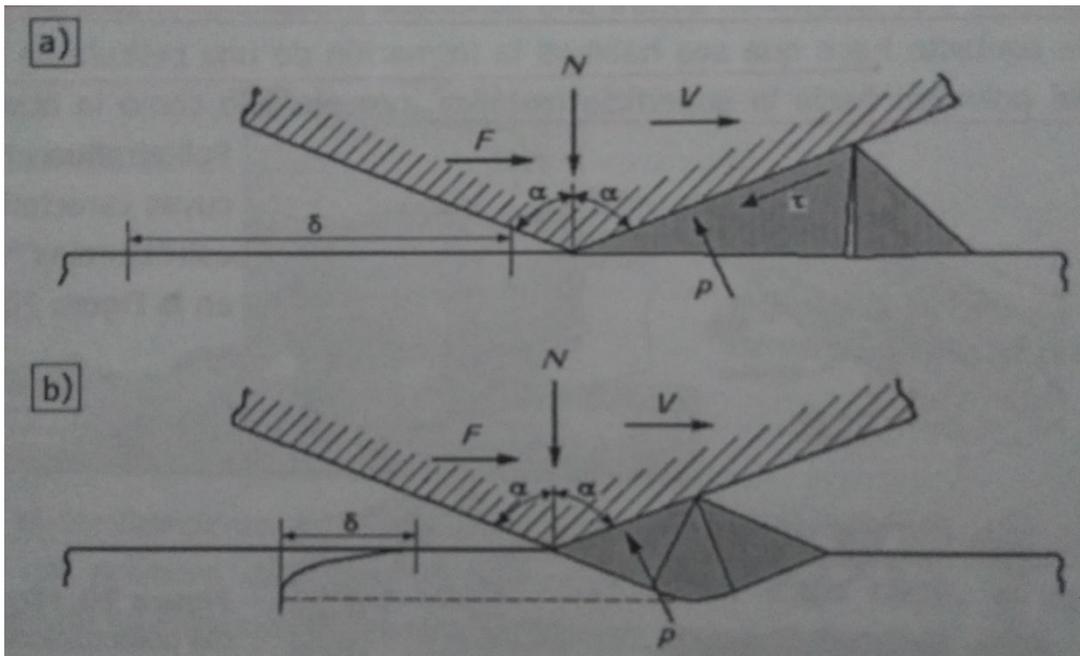


Figura 2.7.13: Cuña deslizante

Con o sin adhesión, la energía disipada se debe al trabajo entregado en producir la deformación plástica. Si la fricción entre la cuña y la superficie es baja, la deformación plástica es relativamente pequeña. Por el contrario, si es elevada, la cantidad de deformación plástica aumenta debido al arrastre de material en el frente de la cuña aumentando el coeficiente de fricción a valores por encima de la unidad [catedra Tribología].

En resumen, y extrapolando estos conceptos al rectificado, luego del primer contacto entre el filo cortante y la pieza sobreviene una etapa de compresión del material seguida por una de deformación plástica en la cual se conforman surcos y un flujo del material base al rededor del flanco del filo. Solo cuando el filo penetra lo suficiente da comienzo la formación de la viruta. Dicha distancia depende de tres parámetros:

1. Condiciones de fricción en derredor del filo cortante.
2. El radio del filo: este parámetro engloba, además de las condiciones de dureza y tamaño de grano de la muela, las condiciones de rectificado

que impactan en forma directa sobre el espesor de viruta, como la longitud de contacto, velocidad de muela, avance por vuelta, etc.

3. Las propiedades de fluencia y maleabilidad del material [11].

2.7.4. Fuerzas y potencia

Las fuerzas generadas durante el rectificado presentan ligeras variaciones periódicas debidas principalmente a variaciones de las secciones de virutas, el número de granos abrasivos en contacto con la pieza, estado de los filos, temperaturas locales, etc.

La fuerza F resultante puede descomponerse en: fuerza tangencial o de corte (F_t), fuerza normal (F_n) y fuerza axial (F_a).

La fuerza F_t determina la cantidad de trabajo requerido para desplazar el grano una distancia dada. Una parte de F_t se emplea en la remoción de material mediante el mecanismo de micro corte. La parte restante, que es disipada en forma de calor y deformación plástica, tiene como origen la fuerza de roce. Al estudiar los micro mecanismos de fricción y tratarse de materiales disimiles, y en movimiento relativo, la adhesión tendrá poca influencia y el mecanismo dominante será la interacción mecánica por surcado. Como la fuerza de roce se disipa en forma de calor el cual representa una potencial amenaza para la integridad de la pieza resulta de suma importancia lubricar correctamente la interfaz pieza/abrasivo para disminuir la contribución por surcado a la fuerza de roce y, de esta manera, mermar la cantidad de calor generado. Además, una correcta lubricación disminuirá el arrastre de material por micro cuña, produciendo superficies de menor irregularidad.

Por otro lado, la F_n no produce trabajo, aunque debe recordarse la incidencia directa que tiene sobre la magnitud de la fuerza de roce. Suele tener una magnitud mayor que la F_t y su valor aumenta con el desgaste de los filos de abrasivos.

La fuerza axial, F_a , surge cuando hay un desplazamiento lateral de la pieza. La fuerza total de rectificado, F , resulta de la suma vectorial de las 3 componentes, que pueden observarse en la figura 2.7.14:

$$F = \sqrt{F_t^2 + F_n^2 + F_a^2}$$

Si bien las fuerzas específicas involucradas son muy altas, las fuerzas netas son mucho menores que en otros procesos de mecanizado dado que el caudal de viruta removido es muy bajo

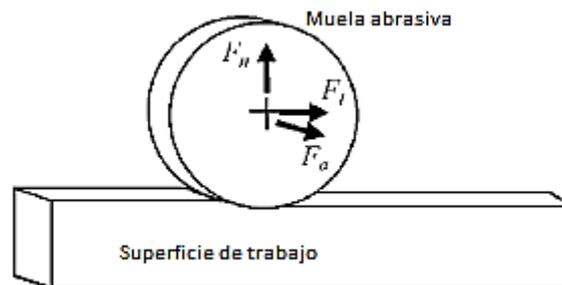


Figura 2.7.14: Descomposición de fuerzas

2.8. Lubricación y refrigeración

En los procesos de mecanizado por arranque de viruta se genera gran cantidad de calor, debido a la intensa deformación plástica del metal producida en la zona de cizallamiento, y principalmente al rozamiento entre la herramienta y la pieza. Cuando estos factores no se controlan adecuadamente puede producirse crecimiento de grano, pérdida de dureza, precipitados,

transformaciones de fase, expansión térmica excesiva, grietas y reacciones químicas [12].

Para reducir estos efectos negativos, puede actuarse sobre los parámetros operativos para reducir la generación de calor o aplicar fluido de corte. De esta forma, parte del calor generado se disipa a través del ambiente y del fluido de corte, pero la mayor parte es evacuada por las virutas, la herramienta y la pieza.

2.8.1. Fluidos de corte

Los fluidos de corte se utilizan en la mayoría de las operaciones de mecanizado por arranque de viruta. Tradicionalmente estos fluidos son líquidos con aditivos que mejoran o agregan ciertas propiedades necesarias para el mecanizado. Actualmente también es usual utilizar aire, gases y nieblas, principalmente en los procesos de mecanizado denominados HSM (del inglés High Speed Machining). Sus principales funciones son:

- Evacuación de viruta: el fluido debe retirar eficazmente la viruta lejos de la zona de operación para evitar que interfiera en el proceso, permitiendo que se alcance la calidad superficial requerida. En rectificado debe retener el polvo abrasivo y los vapores del proceso.
- Lubricación: consiste en reducir la fricción entre la herramienta, la pieza y la viruta que está siendo arrancada. De esta manera se consigue disminuir la generación de calor, mayor vida de la herramienta, mejor acabado superficial y disminución en el consumo de energía.
- Refrigeración: el fluido de corte puede evacuar parte del calor generado en la operación de mecanizado, protegiendo así a la pieza y a la herramienta de temperaturas excesivamente altas. Para ello, el fluido debe poseer un elevado calor específico y una elevada conductividad térmica. Asimismo, en rectificado no constituye una fuente de extracción calórica importante.

- Protección frente a la corrosión: para evitar la oxidación de la pieza los fluidos de corte llevan aditivos que la protegen frente a la corrosión.

La forma de aplicación del fluido de corte más utilizada en la actualidad es un chorro líquido abundante y continuo dirigido hacia el punto de contacto entre la herramienta y la pieza, lo que se conoce como refrigeración por inundación. En algunos tipos de mecanizado es posible conducir el fluido por el interior de las herramientas y aplicarlo directamente en la zona de contacto, lo que aumenta significativamente su efectividad.

Con una lubricación y refrigeración eficientes se consigue:

- Aumentar la productividad, al poder aumentar las velocidades de corte y avance.
- Alargar la vida de herramienta, al reducir su desgaste.
- Un mejor acabado y exactitud dimensional de la superficie mecanizada.

2.8.2. Clasificación

Los principales tipos de fluidos de corte utilizados para mecanizado son: Aceites de corte y taladras.

Los primeros son fluidos de corte no acuosos, constituidos principalmente por aceites minerales a los que se les aportan aditivos que les proporcionan ciertas propiedades, siendo los más utilizados los aditivos de extrema presión. Estos lubricantes presentan bajo poder de refrigeración, pero son muy efectivos en la reducción de la fricción y el desgaste.

Con el nombre genérico de taladras se hace referencia a diferentes tipos de soluciones acuosas con aditivos de extrema presión, emulsionantes, antioxidantes, inhibidores de corrosión, bactericidas, humectantes, antiespumantes, colorantes, etc. Se pueden dividir en 3 grupos:

- A. Emulsiones de aceite: Una emulsión es una mezcla de dos líquidos inmiscibles, en este caso agua y aceite. El concentrado se diluye frecuentemente al 4% aunque puede oscilar entre 2,5% y 15%. Contiene como base un 60% de aceites minerales, aproximadamente un 20% de emulgentes, un 10% de agua y un 10% de aditivos varios (anticorrosivos, bactericidas y aditivos de extrema presión). Este tipo de fluido de corte presenta un aspecto lechoso, es el más empleado y es especialmente adecuado para operaciones de mecanizado medio y ligero.
- B. Taladrinas semisintéticas: El concentrado se diluye al a menudo 4% pero puede oscilar entre el 1,5% y 5%. Contiene como base cerca de 20% de aceite mineral o sintético, un 30% de emulgentes, un 40% de agua y un 10% de aditivos varios (humectantes, inhibidores de oxidación y bactericidas). Son traslúcidas volviéndose con el tiempo opacas.
- C. Taladrinas sintéticas: El concentrado se diluye ordinariamente al 2,5%, sin embargo, en ocasiones la concentración puede variar entre el 1,5 y el 12% en agua y contiene 15% de anticorrosivos, hasta un 25% de humectantes, un 10% de aditivos varios y un 50% de agua. A diferencia de las semisintéticas no incluyen aceite. Forman disoluciones traslúcidas. Sus funciones principalmente son la refrigeración y la protección antioxidante.

2.8.3. Fluidos de corte en rectificado

Los fluidos de corte convencionales contribuyen al control de la temperatura en la pieza por 2 vías:

- Reduciendo la generación de calor actuando como lubricante, reduciendo la fricción entre la pieza, muela y viruta.

- Extrayendo calor por convección en la superficie de la pieza adyacente a la zona de corte, para lo cual es necesario un elevado coeficiente convectivo.

Un abundante caudal de refrigerante, sobre y alrededor de la pieza de trabajo, logra mayor refrigeración y lavado de las virutas. Sin embargo, la lubricación depende de la cantidad de líquido que realmente accede a la región de contacto entre la muela y la pieza. La lubricación no requiere necesariamente un gran volumen para lograr una significativa reducción de la fricción, pero será ineficaz si no hay flujo en la zona de contacto.

2.8.4. Caudal útil a través de la zona de contacto.

Desde el punto de vista térmico, el caudal útil se define como el caudal que entra realmente en el arco de contacto del rectificado. Generalmente, gran parte del caudal suministrado es desviado hacia los laterales de la muela y no entra en la zona de contacto. Engineer, et al. [7], reportaron que, dependiendo de la posición de la boquilla y la porosidad de la muela, el caudal útil oscila entre el 5-30% del caudal total cuando se utiliza una boquilla de inundación convencional. El caudal en exceso cumple la función de arrastrar las virutas y refrigerar el volumen total de la pieza.

El caudal útil máximo que se puede lograr depende de la porosidad de la muela ϕ_{poros} , y la profundidad media de los poros, h_{poros} . Se puede calcular mediante la ecuación

$$Q_{fu} = \phi_{poros} \cdot h_{poros} \cdot b_s \cdot v_s$$

Donde b_s es el ancho del contacto de rectificado, v_s es la velocidad periférica de la muela. El espesor medio de la capa de líquido útil, h_{fu} , puede estimarse empleando:

$$h_{fu} = \frac{Q_{fu}}{b_s v_s} = \phi_{poros} \cdot h_{poros}$$

Los poros en la superficie de la muela arrastran y bombean el fluido a través de la zona de contacto en una acción similar a la del flujo en una bomba rotatoria. Cuando los poros superficiales de la muela están llenos de líquido, es muy difícil aumentar el caudal útil.



Figura 2.8.1. Efecto de bombeo que generan los poros de la superficie.

Guo and Malkin [7] reportan que el caudal útil máximo es mayor para las muelas de gran tamaño de grano y estructura más abierta, que tienen mayor porosidad, es decir aquellas que poseen mayor volumen de espacios vacíos. En estos casos los granos pueden sobresalir más fácilmente de la superficie, lo que aumenta aún más la porosidad efectiva.

Si todo este caudal se pudiera hacer entrar en la zona de contacto, tendría poco sentido suministrar líquido adicional, dado que el excedente no cumpliría su función específica al no poder acceder a la zona de contacto. Se sugiere que el caudal útil aumenta con el caudal total hasta alcanzar un valor máximo. Para mayores caudales totales, el caudal útil continúa aproximadamente constante por lo que el porcentaje de utilización efectiva disminuye.

Las presiones hidrodinámicas pueden ayudar a presurizar fluido en los poros de la muela y aumentar el caudal útil. Por supuesto, si el fluido puede ser presurizado en los poros subsuperficiales, es posible lograr un mayor caudal útil y un mayor espesor medio de la película. [8]

Por otra parte, en la práctica industrial es usual inyectar de 2 a 20 veces el máximo caudal útil en operaciones de rectificado [7]. El caudal extra suministrado se aporta para cumplir otras funciones como disminuir la

temperatura general de la pieza y arrastrar las virutas o granos abrasivos desprendidos.

2.8.5. Inconvenientes del uso de fluido de corte

Los fluidos de corte actualmente tienen un uso extenso en la industria, sin embargo, con la introducción de nuevos materiales de corte y el desarrollo de nuevas tecnologías de corte, están siendo dejados de lado. La causa principal por la que están siendo remplazados es que generan ciertos inconvenientes, entre ellos:

- Potenciales efectos muy negativos sobre el medio ambiente, debido fundamentalmente a la problemática que plantean las emisiones a la atmósfera de productos agresivos. Estos proceden de la incineración de residuos aceitosos conteniendo cloro orgánico (lluvia ácida, deterioro de la capa de ozono, etc.) y los vertidos de aguas residuales conteniendo restos de derivados fenólicos que pueden contaminar un ecosistema.
- Pueden ser causa de riesgo para la salud del operario, ya que la manipulación inadecuada de aceites y taladrinas provoca afecciones cutáneas, respiratorias y cáncer. Las afecciones cutáneas son el riesgo más extendido, y se deben a la naturaleza irritante de muchas de las sustancias que integran su formulación. La descomposición térmica de estos fluidos durante el mecanizado origina la formación de aerosoles y nieblas, cuya inhalación puede ocasionar irritación de las vías respiratorias, neumonía lipóide, fibrosis pulmonar, asma bronquial, etc. Además, ciertas sustancias que componen estos fluidos, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y las Nitrosaminas provocan que los fluidos de corte tengan cierto potencial cancerígeno. [9]
- En ciertas condiciones pueden ocasionar efectos negativos en la producción. Esto se debe a que la composición de dichos fluidos puede sufrir alteraciones por el estrés mecánico y térmico, así como por

sustancias contaminantes que afecten a los aditivos del fluido de corte. De esta manera se modifican las propiedades iniciales del fluido, provocando una disminución de la calidad superficial de las piezas mecanizadas, elevado desgaste de la herramienta, corrosión, etc.

- Generan costos elevados como consecuencia de la adquisición, almacenamiento, mantenimiento y eliminación de residuos. De acuerdo con diferentes estudios realizados en la industria del automóvil, los costos asociados a los fluidos de corte rondan entre el 15 y el 30% del costo final de mecanizado, siendo varias veces superior al costo de las herramientas, Yui and Terashima [10]
- En algunos casos dificultan el reciclado de los residuos de mecanizado a causa de la contaminación por retención, absorción o formación de jabones o barros, principalmente en rectificado.

2.8.6. Tratamiento de los fluidos de corte

Con el uso, los fluidos de corte se agotan y pasan a ser un residuo potencialmente peligroso para el medioambiente. Se lo considera agotado cuando su composición inicial ha sufrido alteraciones, principalmente una disminución de la concentración de los aditivos, por lo que pierde sus propiedades iniciales. Ello se refleja en una disminución de la calidad superficial de las piezas mecanizadas, pérdida de precisión, corrosión, etc. Cuando esto ocurre, es necesario reemplazar el fluido de corte por otro nuevo.

El proceso de agotamiento se produce principalmente por el estrés mecánico y térmico de las taladrinas debido al mecanizado, y por la acumulación de sustancias contaminantes. Estos contaminantes suelen ser aceites parásitos, como por ejemplo fluidos hidráulicos perdidos a través de fugas, restos de otros fluidos de corte, etc. Aunque también pueden ser bacterias o virutas presentes en el fluido de corte.

Debido a su posible toxicidad y escasa biodegradabilidad, los fluidos de corte agotados son clasificados como residuos peligrosos, y por ello requieren

un tratamiento adecuado, que realizan empresas especializadas. La recuperación y el reciclado son los métodos más apropiados para su gestión, aunque se aumentan considerablemente los costos de producción.

Además de su agotamiento, debe considerarse el impacto ambiental producido por fugas en el sistema de suministro del fluido de corte, arrastres en piezas y virutas, salpicaduras debido a la elevada velocidad de corte y nieblas generadas durante el mecanizado. Esto, además de la problemática medioambiental directa, supone un desperdicio de fluido de corte y por lo tanto un problema económico.

La creciente demanda y el creciente costo de los fluidos de corte sumado a los aspectos ambientales en la deposición del fluido son los factores clave que impulsan la investigación en técnicas alternativas de lubricación.

2.9. Alternativas a la utilización de fluido de corte convencional

Debido a los problemas ambientales y los potenciales riesgos de salud al contacto con los fluidos de corte tradicionales, sumado a sus elevados costos operativos resulta de suma importancia el desarrollo de nuevas técnicas que logren mitigar el calor y sus consecuentes efectos, así como las desventajas mencionadas de los fluidos. Actualmente existen dos alternativas. Ellas son:

- Mecanizado en seco
- Mecanizado con mínima cantidad de lubricante (MQL)

2.9.1. Mecanizado en seco

El mecanizado en seco supone la eliminación completa del fluido de corte, presentando por ello ciertas ventajas frente al mecanizado con fluido de corte.

Estas ventajas consisten en la eliminación de costos relacionados con la adquisición, mantenimiento y reciclaje del fluido de corte, además de eliminar los problemas ambientales y de salud producidos por dicho fluido.

Pero también conlleva una serie de inconvenientes, ya que la ausencia de lubricante aumenta la fricción generándose más calor, el cual deberá ser absorbido por las virutas, la pieza y la herramienta. El incremento en la temperatura de trabajo afecta negativamente a la vida de la herramienta, la precisión dimensional y calidad superficial de la pieza. Además, la ausencia de fluido de corte provoca problemas con la evacuación de viruta, por lo que es necesario implementar un sistema de chorros de aire a presión para que cumplan esta función.

Para implementar el mecanizado en seco, es necesario un profundo análisis de las condiciones límites de la operación, teniendo en cuenta las temperaturas máximas admisibles en la pieza para que ésta no sufra alteraciones microestructurales. Además, es necesario contar con herramientas de corte aptas para este tipo de mecanizado. A velocidades de corte bajas, la herramienta sufre desgaste por adhesión y abrasión, mientras que a altas velocidades de corte se ve afectada por la difusión y la oxidación. En consecuencia, el material de la herramienta debe presentar baja tendencia a la adhesión con el material de la pieza, así como elevada dureza y resistencia al desgaste a altas temperaturas. Los materiales de herramientas actualmente disponibles responden de distinta manera a las características mencionadas, por eso es común el uso de herramientas con recubrimientos específicos para cada caso.

Resulta esencial diseñar el proceso de corte de forma que se minimice la cantidad de calor transferido a la pieza, ya que de esto depende la precisión alcanzable en condiciones de mecanizado en seco. Esto es más fácil de realizar en procesos de mecanizado convencional, donde a diferencia de procesos abrasivos la geometría de corte es uniforme y conocida. Sin embargo, en muchos casos, por las condiciones de trabajo o las herramientas disponibles es inevitable el uso de algún tipo de sistema de lubricación.

2.9.2. Mecanizado con mínima cantidad de lubricante (MQL)

A pesar de los avances obtenidos en el campo del mecanizado en seco, los fluidos de corte resultan todavía esenciales en muchas operaciones de mecanizado para garantizar la vida de la herramienta y la calidad superficial requerida. De esta manera, se plantea la utilización de sistemas alternativos de mínima lubricación con fluidos de corte no contaminantes.

MQL es un método de maquinado casi seco, en el cual una niebla con un aerosol de aceite puro reemplaza al refrigerante que emplea agua como base. En MQL el aceite se consume en el proceso, en vez de ser colectado, filtrado y reusado. La unidad de medida de caudal es el ml/h en vez del l/h empleado en sistemas tradicionales. MQL fue desarrollado en la década de los 90 en Alemania y Japón. En el transcurso de la década los altos costos y potenciales riesgos de exposición que presentan los lubricantes tradicionales fueron fortaleciendo el interés en reducir la cantidad de lubricante empleado, y las primeras incursiones en el mecanizado en seco habían demostrado la dificultad que este presentaba para alcanzar buenos resultados prescindiendo totalmente de lubricantes. Desde entonces MQL ha sido ampliamente utilizado en la fabricación aeronáutica (sobre todo en grandes partes estructurales) y ferroviaria. Los materiales típicos para los cuales se emplea MQL son el aluminio y sus aleaciones, fundiciones grises y nodulares y aceros de baja aleación [13]. Principalmente existen tres tipos de sistemas MQL [9] en función del tipo de fluido de corte utilizado, caudal suministrado y tecnología empleada en el suministro:

- Sistemas de pulverizado a baja presión, en los que el fluido de corte se introduce en una corriente de aire a baja presión, y se transmite a la zona de contacto entre herramienta y pieza en forma de mezcla. Normalmente se utilizan emulsiones acuosas de escasa viscosidad con caudales en el

rango de 10 y 1000 ml/h. Estos sistemas se caracterizan por una tendencia a la formación de nieblas y por escasa precisión en el grado de dosificación.

- Sistemas de inyección sin aire. Utilizan bombas dosificadoras que suministran una cantidad determinada de fluido de corte mediante pulsos. La cantidad suministrada varía entre 0,01 y 1 ml/ciclo, siendo la dosificación precisa. Además, al no usar aire se evita la formación de nieblas. Suelen utilizarse en procesos discontinuos como el taladrado.
- Sistemas de pulverizado a alta presión. El aire comprimido presuriza el depósito del lubricante, como consecuencia de lo cual se transporta aire y lubricante. Esto se hace por tubos separados hasta una boquilla donde se produce la mezcla, o bien a través de un único conducto. El primer caso suele utilizarse para lubricación externa de herramientas, mientras que el segundo caso tiene mayor aplicación en la lubricación interna de las mismas (por ejemplo, brocas y herramientas de torneado interior). La mezcla de aire y lubricante se puede ajustar de forma independiente para optimizar el proceso de mecanizado, alcanzándose un grado de dosificación de elevada precisión. La cantidad suministrada de lubricante es extremadamente baja, estando comprendida entre 5 y 200 ml/h. Pueden emplearse emulsiones acuosas, pero se recomienda utilizar aceites de elevada viscosidad.

Éste último tipo de MQL es el que presenta mayores ventajas, por tener el menor consumo de lubricante, representando un paso intermedio entre el mecanizado en seco y la lubricación convencional. Además, se pueden utilizar aceites de corte biodegradables. Es por esto que, de aquí en adelante, al hablar de sistema MQL se estará haciendo referencia a esta clase de dispositivo.

2.10. MQL

MQL es exactamente lo que sus siglas (en inglés) indican, mínima cantidad de lubricante. El sistema de lubricación emplea una cantidad muy pequeña de fluido para reducir la fricción entre la pieza y la herramienta.

Se pueden obtener numerosas ventajas al reducir la cantidad de fluido empleado [15].

- Desde una perspectiva económica operativa MQL es más barato que los sistemas de lubricación tradicionalmente empleados. Aunque el fluido empleado en MQL es más caro por unidad, se emplea, en comparación, una cantidad menor al 0,01 % lo que hace el costo por pieza mecanizada sea mucho menor.
- Debido a que no se reutiliza el fluido, no es necesario el equipamiento de recirculado, lo cual elimina las inversiones en bateas, filtros, bombas, contenedores, etc. Y aún más, no hay necesidad de escurrir las virutas, ni de limpiar la pieza para procesos posteriores, ya que el excedente se evapora.

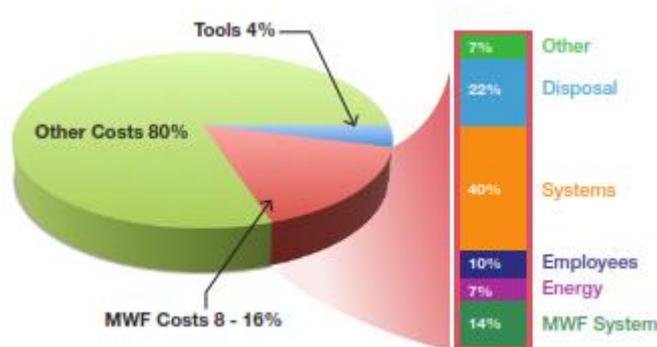


Figura 2.10.1: Estructura de costos [15]

- La extrema reducción en las cantidades de fluido empleadas reduce los riesgos a la salud causados por la exposición al mismo.

- Aunque parezca contradictorio aumenta la vida útil de la herramienta de corte.
- Comparado con los sistemas tradicionales es mucho más ameno con el medio ambiente.

Estudios realizados en el centro general de investigación de ingeniería, de la universidad John Moores, Liverpool observaron, para iguales tasas de remoción de material que en sistemas inundados, iguales o menores fuerzas, menores temperaturas y menor rugosidad superficial [16].

2.10.1. Cuando conviene usar MQL

La aplicación de MQL será más provechosa en ciertos procesos que en otros. Algunos de esos procesos son:

- Maquinas abiertas, para evitar que el fluido fluya y termine en el suelo
- Máquinas de uso intermitente, para eliminar las emulsiones que dejan de estar en su punto óptimo y actúan como fuente bacteriológica.
- Máquinas de alta velocidad. Estudios han demostrado que en este tipo de máquinas MQL obtiene mejores resultados que los sistemas inundados y el mecanizado en seco.

2.10.2. La “niebla”

Aunque tradicionalmente se lo suele nombrar como “sistemas de lubricación por niebla” el mecanizado con lubricación MQL produce menos emisiones al aire que los sistemas inundados. Un estudio desarrollado por el gobierno alemán encontró que los niveles de emisión nunca llegaron a ser tan altos como para ser considerados aerosoles, y que las concentraciones de las emisiones en el 95% de las zonas medidas eran menores a la mitad de las registradas con sistemas tradicionales.

La figura 2.10.2 muestra la comparación desarrollada en una operación de torneado de acero. La concentración de las emisiones se midió sobre el operario, sobre la máquina y dentro de la máquina [15].

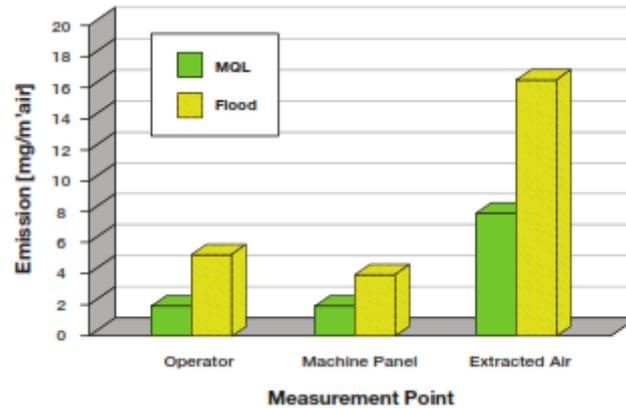


Figura 2.10.2: concentración de emisiones [15]

MQL ofrece muchas ventajas en lo que a salubridad respecta al comparar con las tradicionales emulsiones, en especial, cuando emplea aceites de base vegetal los cuales resultan de naturaleza casi inocua para los empleados. No solo se ven reducidas las emisiones, sino que además los aceites vegetales son removidos en forma natural de los pulmones en días, en lugar de meses como sucede con los aceites derivados de hidrocarburos. Los estudios, además, demuestran que no causan daños a largo plazo a los pulmones y/o a la piel [15].

2.10.3. MQL y los micro mecanismos tribológicos

Debido a que las gotas logran penetrar profundamente en la interfaz abrasivo-pieza la lubricación proporcionada al proceso de corte resulta más eficiente. Como resultado se observa una disminución en la tendencia a la adhesión y el factor de resistencia al corte, el cual tiene en cuenta la resistencia al corte entre superficies. La sinergia de estos dos factores disminuye la probabilidad de entrar en el rango de valores en los cuales se hace presente el daño por micro cuña (figura 2.7.10).

2.10.4. Disipación de calor

Durante el mecanizado, el metal es removido por el filo cortante de la herramienta, por medio del cizallamiento o micro corte si hablamos de rectificado. La energía usada para deformar el metal se libera mayormente como en forma de calor, en las zonas primaria y secundaria (figura 2.10.3)

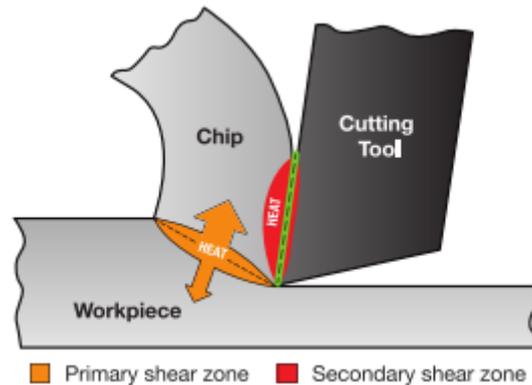


Figura 2.10.3: Distribución de calor en la zona de corte

La energía liberada dentro de la zona primaria no puede ser evitada, es el producto de la rotura de enlaces moleculares. Una parte del calor se disipa en la pieza y el resto es absorbido por las virutas. Por otro lado, la fricción, léase el calor, entre la herramienta y la pieza en la zona secundaria produce incremento de temperatura en ambos. Este calor es el principal responsable de la salida de servicio prematura de las herramientas. MQL ejecutado en forma apropiada garantiza una gran reducción de este calor ya que la pequeña cantidad de fluido es suficiente para reducir la fricción, al disminuir la tendencia a la adhesión lubricando la interfaz viruta- herramienta [14].

Los sistemas de refrigeración están diseñados para extraer la mayor cantidad de calor que sea posible ya que, como se muestra en la figura 2.10.3 menor temperatura en la herramienta, mayor es la vida útil de la herramienta.

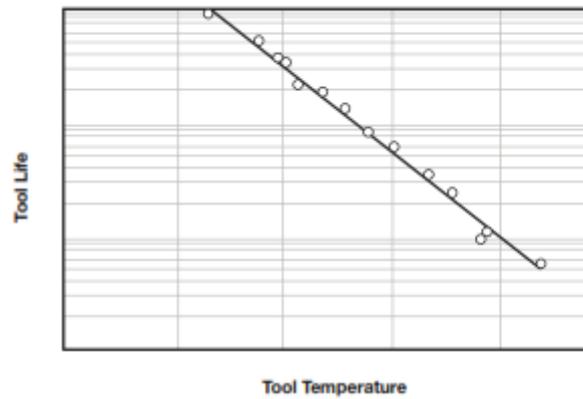


Figura 2.10.3: temperatura de trabajo vs vida de herramienta (escala logarítmica) [15]

Los refrigerantes que utilizan agua entre sus componentes para remover el calor son extremadamente efectivos para tal fin. El filo cortante de la herramienta alcanza gran temperatura durante el corte e inmediatamente experimenta una disminución en la misma a consecuencia de la eficacia del refrigerante. La exposición reiterada a este ciclo térmico provoca la fragilización y rotura del filo. Una solución a este problema es evitar la generación de calor para así no tener que eliminarlo a través del refrigerante posteriormente. En MQL dado que el jet de aire transporta las gotas de aceite directo a la zona de corte se provee una más eficiente lubricación. Aunque en contraposición al sistema de refrigeración tradicional se deben tomar recaudos especiales para permitir que el fluido de corte penetre en la zona de corte de manera eficaz.

En los sistemas tradicionales cantidades desmesuradas de fluido se inyectan en el área de corte. Una pequeña parte del fluido logra llegar a la interfaz herramienta-pieza y, ayudado por los aditivos, mejora la lubricación, aunque la misma resulta ser muy pobre.

La técnica MQL no solo reduce significativamente la cantidad de fluido de corte, sino que, también reduce el coeficiente de fricción. Esto es debido a un contacto más íntimo del lubricante con la zona secundaria, permitiendo la formación de una tribo película más durable la cual disminuye la tensión de corte superficial y reduce el coeficiente de roce μ [11]. MQL se centra en la reducción

del calor generado a través de la reducción de la fricción. Una pequeña parte del calor es eliminada por medio de la evaporación del fluido y, la mayor parte, a través de convección con el chorro de aire. El calor global evacuado resulta un 50% menor que en sistemas inundados debido a la reducción en la fricción.

En algunos casos el calor puede resultar favorable. Generalmente el proceso de corte se lleva a cabo con mayor facilidad a medida que la pieza se calienta, siempre y cuando esta no se distorsione ni la herramienta sobrepase su temperatura de diseño. Esto se debe a que el calor favorece algunas reacciones químicas de descomposición de esteres, presentes en los fluidos de corte utilizados por sistemas MQL, que forman óxidos dando lugar a la formación de una capa protectora alrededor de la herramienta. Para la formación de esta capa protectora existe una velocidad de corte óptima. Operar por debajo de dicha velocidad tendrá, como consecuencia, a una capa protectora empobrecida, lo que reducirá la vida útil de la herramienta, mientras que operar por encima del punto óptimo implicara un tiempo insuficiente para completar la cinética de la transformación, es decir, la capa protectora estará completamente ausente lo que aumentara el riesgo de fisuras por fatiga térmica en el filo de la herramienta. En algunos casos las reacciones pueden producirse a partir de los materiales a mecanizar.

2.10.5. MQL y las fuerzas de corte

Como ya se ha dicho MQL mejora la lubricación en la interfaz pieza herramienta al proveer mejores condiciones tribológicas al rededor del grano. Cuando se mejora la lubricación disminuye la resistencia al corte entre superficies y la tendencia a la formación de micro cuña. Esto reduce considerablemente las fuerzas tangenciales [11].

En cuanto a las fuerzas normales se ha encontrado que al aplicar MQL las mismas aumentan. Este fenómeno aumenta el auto afilado y a consecuencia el número de filos cortantes, lo que incrementa la profundidad de corte de los granos disminuyendo el tamaño de las virutas [11].

2.11. Aceites para MQL

MQL es un método de lubricación por pérdida total a diferencia de los métodos que emplean emulsiones. Esto implica únicamente el empleo de lubricantes limpios. Biocidas, funguicidas y otros aditivos son eliminados. Un buen fluido MQL posee muy alta lubricidad y calificación térmica para soportar las altas temperaturas y presiones. Estas consideraciones hacen de los aceites vegetales los más adecuados [13]. Estos aceites son biodegradables por naturaleza y poseen un peso molecular mayor que los aceites minerales, lo que les da mejores propiedades lubricantes. Debido a los procesos naturales de hidrólisis y oxidación los aceites vegetales para uso comercial son modificados para incrementar su estabilidad y duración. Los hay de dos tipos: Aceites de ésteres sintéticos y alcoholes grasos formulados específicamente para el rango de vaporización y punto de inflamación [15].

2.11.1. Ésteres sintéticos

Los ésteres sintéticos poseen baja viscosidad y un relativamente alto punto de inflamación y estabilidad térmica. Son los de más amplia aplicación. Su principal objetivo es producir una buena lubricación para disminuir la fricción y el desgaste de la herramienta. Estos aceites no tienen como objetivo evacuar el calor generado durante el proceso de corte. Son diseñados con baja viscosidad y alto punto de evaporación e inflamación, por lo que son de lenta evaporación y dejan una fina capa residual, la cual mejora las propiedades de resistencia a la corrosión, pero dificulta operaciones posteriores de lavado y ensamble. Además, presentan baja toxicidad y son biodegradables.

2.11.2. Alcoholes grasos

Los alcoholes grasos presentan menor lubricidad debido a su bajo punto de inflamación, en su lugar presentan mayor capacidad de enfriamiento. Teniendo

en cuenta lo anterior resultan útiles en materiales que presentan lubricidad natural, sobre todo si tienen tendencia al filo recocado. Son biodegradables y amenos para la salud y el medio ambiente. Se consumen durante la operación por lo que la pieza saldrá prácticamente seca de la operación.

2.11.3. Características fisicoquímicas

Independientemente de la composición química los rangos de propiedades físicas para los aceites de MQL son:

- Viscosidad $> 10 \text{ mm}^2 / \text{s}$ a 40°
- Punto de inflamabilidad $> 150^\circ$
- Pérdidas por evaporación $< 65\%$ a 250°

Cuanto mejor sean las propiedades de mojado, mejor resultará el desempeño del lubricante. Un fluido que se propaga en la superficie de corte resultará superior al penetrar en la interfaz herramienta pieza (figura 2.10.4). El mojado debe ocurrir tanto en la herramienta como en la pieza. Generalmente a menor viscosidad mejor mojado.



Figura 2.10.4 comportamiento de una gota con diferentes propiedades de mojado [15]

Desgraciadamente cuando la viscosidad es menor la tendencia a la formación de nieblas aumenta. El tamaño de las gotitas depende de la tensión superficial, la cual está directamente relacionada con la viscosidad, por tal motivo, viscosidades muy bajas pueden generar una niebla demasiado fina la cual genera excesiva dispersión.

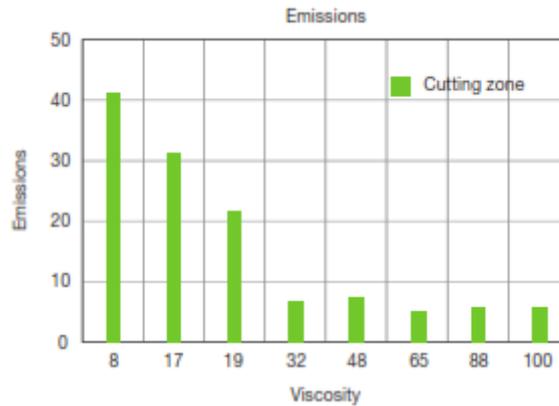


Figura 9.2: Emisiones (ppm) vs Viscosidad [15]

La selección de un fluido MQL resultará de una solución de compromiso entre viscosidad y emisiones, que contemplará otros factores incidentes en dichas variables tales como máquinas abiertas o cerradas, dispositivos de control de emisiones, etc.

2.11.4. Identificación de aceites desconocidos

Debido a que los fabricantes proporcionan información reducida sobre su oferta de aceites, si se desea conocer información detallada sobre su composición se deberá recurrir a algún método de identificación adecuado.

2.11.4.1. Espectroscopía Raman

La espectroscopia Raman es una técnica fotónica de alta resolución que proporciona en unos pocos segundos información química y estructural de casi cualquier material o compuesto orgánico y/o inorgánico permitiendo así su identificación. El análisis mediante esta técnica se basa en el examen de la luz dispersada por un material al incidir sobre un haz de luz monocromático. Una pequeña porción de la luz es dispersada inelásticamente experimentando ligeros cambios de frecuencia que son característicos del material analizado e independientemente de la frecuencia de luz incidente. Se trata de una técnica de análisis que se realiza directamente sobre el material a analizar sin necesitar

éste ninguna preparación especial y que no conlleva ninguna alteración de la superficie sobre la que se realiza.

2.12. Aplicaciones

Si bien existen motivos para implementar la técnica MQL en procesos de rectificado no existen desarrollos muy extensos en la actualidad. Los trabajos relevados se centran exclusivamente en aceros. Los mismos encuentran que en materiales duros la rugosidad superficial mejora. Esto se debe a una menor fricción y mayor fuerza normal en comparación a otros sistemas. Este fenómeno aumenta el auto afilado y la número de filos cortantes y, a consecuencia, incrementa la profundidad de corte de los granos lo que disminuye el tamaño de las virutas. Adicionalmente el mecanismo de fractura frágil de materiales endurecidos promueve que el daño superficial resulte menor, sobre todo el que se presenta en forma de deformación plástica y micro surcado. También se encontró que puede reducir las fuerzas tangenciales en materiales duros, mientras que en los blandos puede aumentar las fuerzas normales en comparación con sistemas de lubricación inundados [11] al mismo tiempo que no presenta obstrucciones significativas de la muela ni alteraciones subsuperficiales de la microestructura [17]. Da Silva et al, 2005 realizó ensayos empleando MQL, sistema inundado y en seco en una rectificadora cilíndrica. Tensiones residuales de compresión se obtuvieron tanto en seco como con sistemas inundados y MQL. Sin embargo, las tensiones obtenidas con MQL fueron las de mayor magnitud [17]. Sin embargo, se ha comprobado que la rugosidad superficial es una limitación para la técnica MQL en el mecanizado de materiales blandos [11].

CAPÍTULO 3: OBJETIVOS

El objetivo general del trabajo es obtener una base de datos que relacione estados de material, condiciones de rectificado, lubricación e integridad superficial obtenidas al emplear MQL. Para ello se utilizará el prototipo diseñado por el Ingeniero Buñes y construido por los Ingenieros Eiras y Viale para el área de Tecnología del departamento de Ingeniería Mecánica FI-UNMDP.

Se plantean los siguientes objetivos particulares:

- Evaluar el diseño previo y rediseñar el prototipo de modo tal que desaparezcan los problemas de goteo observados durante las pruebas de funcionamiento previas.
- Diseñar y fabricar un banco de pruebas que permita ensayar el equipo sin necesidad de que este montado en la rectificadora.
- Elaborar una secuencia de operaciones óptima y plasmarla en un manual de operación y mantenimiento del equipo.
- Diseñar un set up experimental que permita realizar ensayos de rectificado sobre muestras austemperadas en condiciones controlables y repetitivas.
- Determinar las características particulares de integridad superficial (rugosidad, variación de la dureza, etc) en muestras de ADI rectificadas bajo diferentes condiciones operativas.
- Analizar los resultados obtenidos para obtener conclusiones y recomendaciones sobre los parámetros operativos.

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA

4.1. Evaluación del equipo MQL

Como primera etapa experimental se procedió a analizar y evaluar el funcionamiento del dispositivo MQL disponible. En el capítulo 5 se detallan las tareas y determinaciones realizadas para obtener un funcionamiento predecible y repetible del equipo, mientras que en el capítulo 6 se presenta el manual de procedimientos elaborado.

4.2. Preparación de probetas para pruebas de funcionamiento.

El material elegido para confeccionar las probetas fue fundición de hierro con grafito esferoidal (o nodular). Dicha elección se realizó porque en proyectos finales previos se obtuvieron datos empleando lubricación inundada que pueden emplearse como punto de comparación [19]. La misma fue provista por la División Metalurgia del INTEMA.

Partiendo de un Bloque “Y” de fundición nodular se procedió a fraccionar el mismo mediante el empleo de un serrucho mecánico.

Posteriormente se empleó para las operaciones de desbaste una limadora (Figura 4.1), donde se logró planear las superficies y llevar las probetas a medidas cercanas a las finales con un paralelismo ($\pm 0,10\text{mm}$) adecuado para la siguiente etapa: rectificado. En esta etapa se utilizó un dispositivo especial para la sujeción y posicionado de las muestras, el cual fijaba las mismas desde abajo con tornillos.



Figura 4.1: Desbaste de probetas en limadora

Una vez que las probetas estaban próximas a sus medidas finales (5x20x80 mm) se procedió a rectificarlas para llevarlas a las dimensiones previas al tratamiento térmico de austemperado, con el cual se obtendrían las propiedades mecánicas finales. Se obtuvieron 18 probetas (Figura 4.2) de las cuales dos se descartaron por su excesiva esbeltez y dos se seleccionaron como testigos para verificar metalográficamente que la microestructura obtenida en los tratamientos térmicos sea la deseada.



Figura 4.2: Probetas seccionadas de bloque Y, antes del mecanizado.

4.3. Tratamiento térmico

Con las probetas en sus dimensiones finales se procedió a realizar los tratamientos térmicos. Se las separó en dos grupos de 9 unidades cada uno. En ambos casos el tratamiento térmico elegido fue austenizado seguido de austemperado, pero con diferencias en la temperatura del baño de sales. Previo al tratamiento térmico se empaquetó ambos lotes en malla metálica correctamente sellada y con un agarre firme para asegurar una correcta manipulación a la hora de realizar el traspaso del lote desde la mufla al baño de sales (Figura 4.3).



Figura 4.3: Preparado de probetas para el tratamiento térmico

Como primer paso se programó la mufla para que encendiera en forma automática a las 6 am con el fin de que al llegar la misma se encontrara a los 910 °C elegidos para iniciar el austenizado, y poder completar los 2 ciclos en una mañana. Una vez estabilizada la temperatura se colocó en su interior el primer lote de muestras, contenidas en una caja con carbonilla y viruta de hierro (necesaria para que no se descarbure la superficie) (Figura 4.4).



Figura 4.4: Caja con carbonilla, virutas de hierro y paquete de muestras

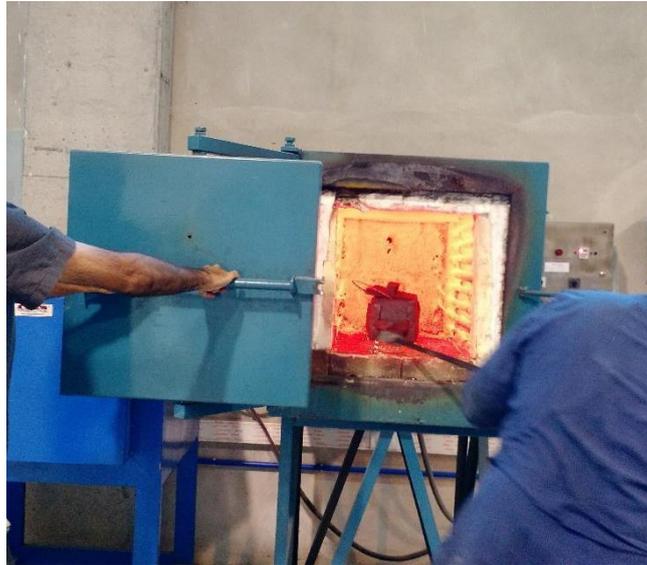


Figura 4.5: Caja con muestras dentro de la mufla

Cuando se produce la apertura de la mufla para cargar las muestras se produce renovación del aire interior. Al mismo tiempo es necesario apagar las resistencias calefactoras por cuestiones de seguridad. Por estos motivos la temperatura de la mufla desciende algunos grados, siendo necesario que pasen algunos minutos hasta que el sistema vuelva a alcanzar la temperatura seteadada. Cuando esto sucede se da comienzo a la cuenta del tiempo para evitar sobrepasar el período de mantenimiento a temperatura necesario, ya que esto podría favorecer el crecimiento del grano austenítico. Una vez transcurrida una hora y media a temperatura, la caja se saca de la mufla (Figura 4.5) e inmediatamente se pasan las muestras al baño de sales a 280°C (Figura 4.6), donde permanecen durante 45 minutos. Finalmente son enfriadas al aire para luego ser lavadas con el fin de retirar los restos de sales adheridas al paquete de muestras.

Una vez retirado el lote del baño de sales la temperatura del mismo se incrementa a 360° y el proceso se repite para el otro conjunto de muestras.



Figura 4.6: Baño de sales fundidas

4.4. Ensayos de Rectificado

Para llevar a cabo los ensayos de rectificado de las probetas se empleó una rectificadora plana tangencial Maqchin TH-M2046A, que se encuentra emplazada en el Taller de máquinas-herramienta de la Facultad de Ingeniería de la UNMDP (Figura 4.7). Las principales características y capacidades de la máquina son:

Planedad obtenible.....	0,005 mm
Máximo recorrido longitudinal.....	520 mm
Máxima velocidad de avance (Va).....	28 m/min
Avance transversal.....	0,02-4 mm/pas
Velocidad de rotación máxima de la muela.....	2850 rpm
Graduación de avance vertical (p).....	0,01 mm



Figura 4.7: Rectificadora plana tangencial

Los cuatro movimientos principales (rotación, avance longitudinal, avance transversal, penetración) son impulsados por sistemas independientes. Las características de estos sistemas son las siguientes:

Potencia del husillo:..... 2 HP

Potencia del sistema hidráulico (avance longitudinal):..... 1HP

Torque servo eléctrico (avance transversal):..... 6Nm

Torque servo avance rápido vertical:..... 6Nm

Una vez que las velocidades de corte y avance deseadas están ajustadas, y el lubricante cargado en el reservorio se procede a reafilar la muela quitando dos centésimas de la misma con un diamante. Esto se repetirá ante cada eventual modificación de las condiciones de corte. Después de posicionar la probeta sobre la mesa de trabajo se enciende el equipo de extracción de aire se acerca la muela hasta hacer contacto. A dicha profundidad se realiza una primera pasada en la que prácticamente no hay arranque de viruta. En ese momento se acciona el equipo MQL, para luego hacer descender la muela 0,030 mm y realizar la primera pasada. Este procedimiento se repite tres (3) veces para remover un total de 0,090 mm.

4.4.1. Determinación de las condiciones de corte

A fin de disponer de una base de datos contra la cual contrastar los resultados que se obtendrán se optó por reproducir las condiciones de corte empleadas por los Ingenieros Tania Reynoso y Luis López Neira en su trabajo final [19]. Los valores que adoptan las velocidades de corte y avance se muestran en la figura 4.8:

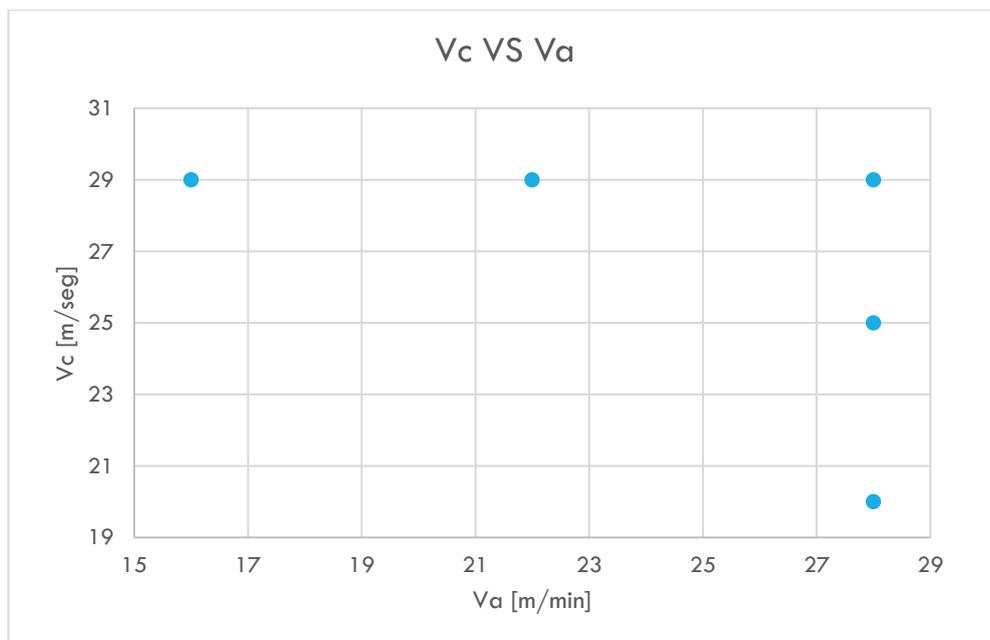


Figura 4.8: Condiciones de corte empleadas

Para determinar la velocidad de corte (V_c) se realizan mediciones sobre la velocidad angular de la muela (rpm) con un tacómetro láser. Conociendo adicionalmente el diámetro de la muela (D) la velocidad tangencial se calcula en forma inmediata con la expresión:

$$V_c \left[\frac{m}{seg} \right] = \frac{\pi * D * rpm}{60000}$$

En cuanto al seteo de la velocidad de avance se toma el tiempo requerido para la realización de diez pasadas en un sector de velocidad constante. Como la longitud de pasada (d) es conocida podemos calcular fácilmente la velocidad de avance empleando la expresión:

$$V_a \left[\frac{m}{min} \right] = \frac{10 * d * 60}{t}$$

4.4.2. Selección del lubricante

Dado que uno de los objetivos de este trabajo es comparar el efecto del lubricante empleado sobre los parámetros de integridad superficial (rugosidad superficial, dureza, etc.), se optó por comparar 2 tipos de aceite (Figura 4.9). Uno de tipo éster de poliol, cuya concepción original es como lubricante de componentes mecánico destinados a industrias alimenticias, de la firma Emkarate denominado RL32H. El otro específicamente diseñado para MQL por la compañía UNIST denominado Coolube 2210EP. Cabe destacar que el último carece de disponibilidad en el mercado local, por lo que se debió importar desde EEUU. Las principales características físicas de los aceites se muestran en la tabla VI.I:



Figura 4.9: Lubricantes empleados en el equipo MQL

Tabla VI.I: Propiedades físicas de los lubricantes empleados.

Propiedades físicas	Coolube 2210EP	Emkarate RL 32H
Olor	Sulfuroso	inoloro
Apariencia	amarilla	inoloro
Solubilidad	insoluble	insoluble
Punto de inflamación	>200°C	258°C
Propiedades Oxidantes	ninguna	ninguna
Viscosidad (40°C)	16 cSt (40°C)	18.5 cSt
Peligrosidad	no	baja
Biodegradable	si	si

4.5. Medición de dureza

Se realizaron distintas determinaciones de dureza en diferentes etapas del estudio con el fin de establecer el estado del material de estudio y las modificaciones producidas durante los ensayos de rectificado.

Para corroborar que el tratamiento térmico haya resultado exitoso se realizaron sobre los testigos mediciones de dureza Rockwell C. Para ello se empleó el durómetro IBERTEST del laboratorio de metalografía de la División Metalurgia del INTEMA (figura 4.10).



Figura 4.10 Durómetro

4.5.1. Micro dureza Knoop

Dado que resulta de interés conocer las modificaciones sobre esta propiedad que la técnica MQL puede producir y que la misma puede variar significativamente en unos pocos micrones debido a la alta energía involucrada, se optó por realizar mediciones de micro dureza Knoop sobre la superficie. Ello se debió a que la misma produce con una menor profundidad de penetración en comparación con las determinaciones Vickers.

4.6. Medición de Rugosidad superficial

La microtopografía se relevó empleando técnicas 2D con perfilómetro de contacto y 3D con interferómetro de luz blanca (WLI). Si bien existe una gran variedad de parámetros que nos permiten analizar la rugosidad de una superficie, la desviación media aritmética del perfil (R_a) es la más empleada.

Para la primera se empleó un perfilómetro portátil Taylor-Hobson Surtronic+3, **Figura 4.11**. Este equipo consta de un captador que se suspende sobre la superficie que se desea medir por medio de un patín. A medida que el captador se desplaza a través de la superficie, los movimientos del palpador relativos al patín son detectados y convertidos en señal eléctrica.



Figura 4.11: Perfilómetro de contacto Taylor-Hubson

La medición se realiza con la probeta y el instrumento en una superficie plana y consiste en un escaneo por palpado sobre la superficie rectificada en dirección normal a las huellas de rectificado. Antes de realizar la medición es necesario definir el cut-off y la longitud de palpado. Para este caso se adopta un

módulo de cut-off de 0,8 mm y una longitud de medida de 4mm según recomendaciones del manual del equipo para superficies rectificadas. En cada probeta se realizan tres mediciones, una en la zona central y una cerca de cada extremo de la muestra.

Para la otra forma se empleó un WLI ZYGO New View 7300 para obtener escaneo superficial con resolución nanométrica (Figura 4.12). Estas últimas fueron realizadas en Saarbrücken, Alemania.

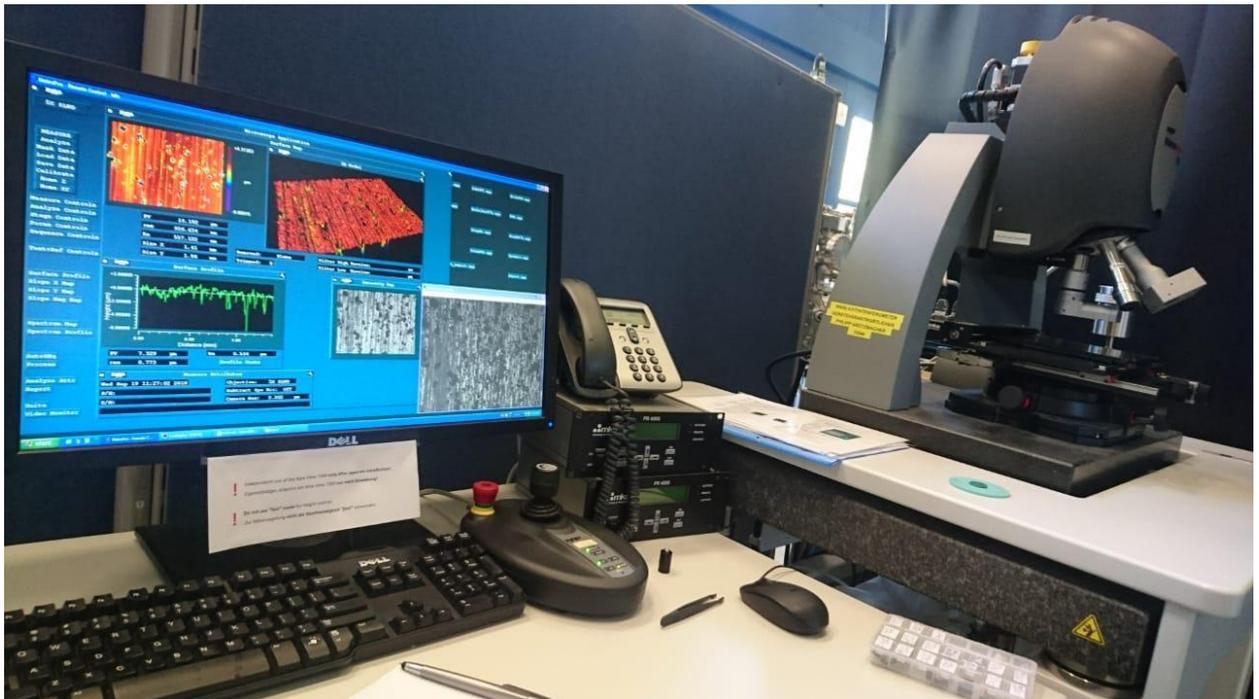


Figura 4.12: Interferómetro de luz blanca (WLI)

Las imágenes obtenidas fueron postprocesadas empleando el software MetroPro, el cual permite calcular los parámetros de rugosidad tridimensional y para cualquier camino trazado sobre la imagen topográfica de la muestra. La interfaz del software se muestra en la Figura 4.13. En la parte inferior derecha se observa una imagen óptica de la superficie a analizar y junto a ella el mapa de intensidades de interferencia con el que se ajusta la orientación de la superficie y el campo de medición. Éstas se emplean en el equipo al momento de adquirir la imagen. En la parte superior izquierda se observa el mapa de alturas y una representación 3D de la superficie así como los parámetros de rugosidad tridimensional. En la parte inferior izquierda se observa el perfil

bidimensional extraído para un camino recto transversal a las huellas de rectificado, y los parámetros de rugosidad calculados.

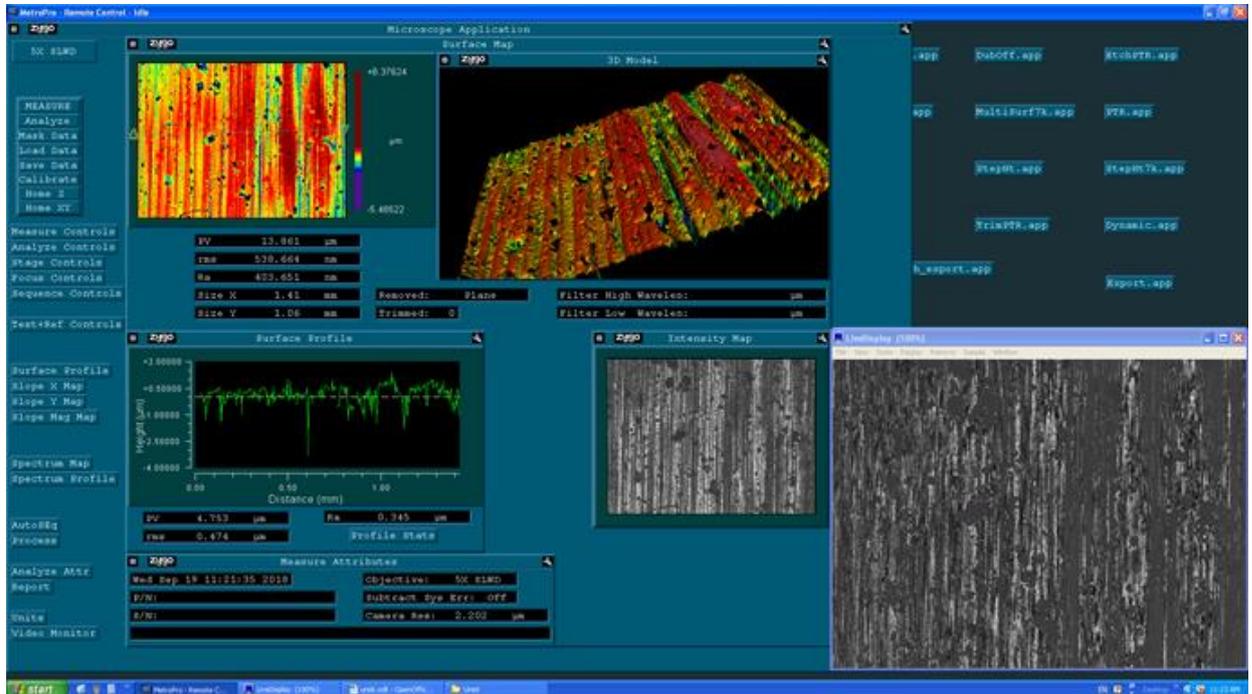


Figura 4.13: Captura de pantalla del software de procesamiento MetroPro

4.7. Análisis metalográfico

Para corroborar que la microestructura obtenida mediante tratamiento térmico sea la deseada se procedió a realizar análisis metalográfico. Para ello se seccionan las muestras testigo con una cortadora metalográfica (figura 4.14), disponible en la planta piloto del área metalurgia de la UNMDP. Esta última realiza un corte abrasivo al tiempo que lubrica y refrigera el área, para evitar así, que el calor degrade la microestructura. Posteriormente se realiza pulido a espejo finalmente se revela la microestructura mediante un ataque químico con nital. Se obtuvieron micrografías a distintos aumentos antes del ataque para observar la nodularidad de las muestras (Figura 4.15).

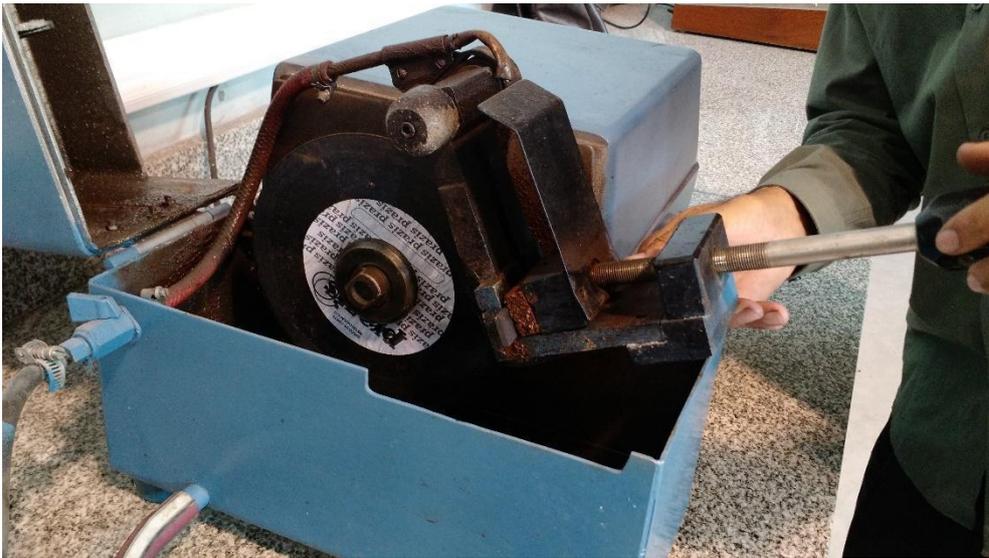


Figura 4.14: Cortadora metalográfica

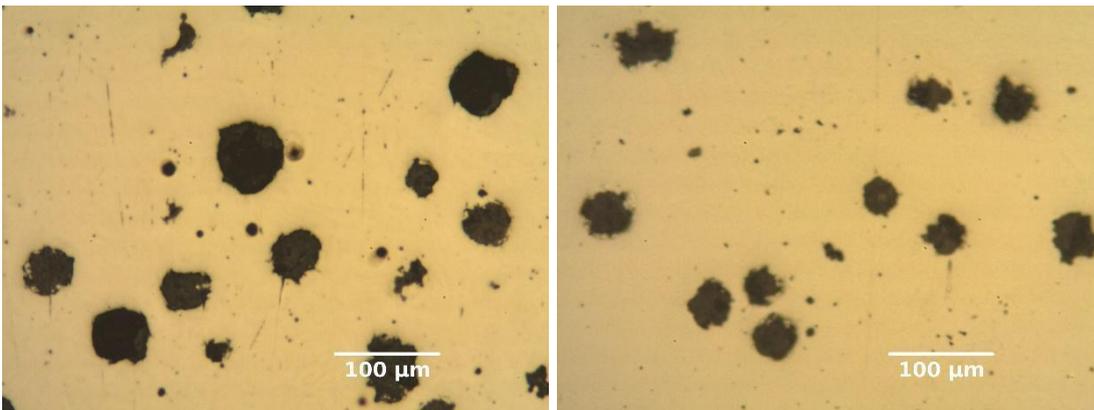


Figura 4.15. Imágenes metalográficas tomadas con microscopio óptico a 10x.

CAPÍTULO 5: PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL MQL

5.1. Rediseño de la caja de comandos

El diseño previo presentaba algunas dificultades en su funcionamiento, siendo el principal inconveniente la acumulación de aceite en las líneas de conducción. Esto originaba goteos indeseados y variaciones en la dosificación de aceite al encender el equipo. Para evitarlo el dispositivo contaba con un sistema de purga con aire para limpiar parte del trayecto, pero aun así no era posible eliminar completamente el defecto. La disposición de los componentes puede observarse en la figura 5.1.

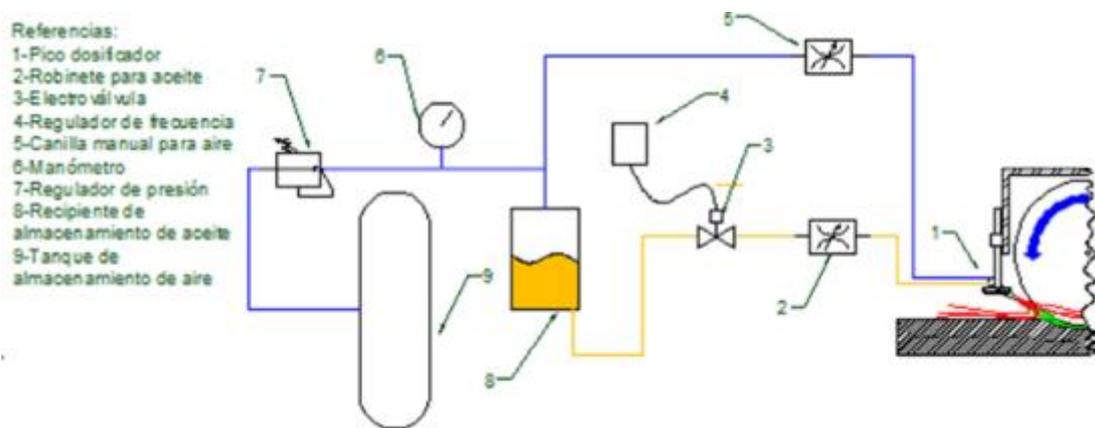


Figura 5.1: Diagrama de componentes

El análisis del diseño y las pruebas de funcionamiento permitieron determinar que el origen yacía en una inadecuada pendiente de los conductos (Figura 5.2). La principal razón por la que sucedía esto era el tamaño reducido de la caja donde se emplazaron los componentes. Para solucionarlo se procedió a cambiar la disposición de los mismos, optando por la utilización de una caja más amplia.



Figura 5.2: Antigua caja de comandos

El mayor espacio permitió una mejor disposición de los conductos en el interior de la unidad de control (Figura 5.3). Adicionalmente a este cambio, teniendo presente el objetivo de eliminar el goteo, cuyo origen subyacía principalmente en la pendiente de los conductos presurizados de apertura intermitente, se optó por cambiar la unidad de control de posición. Originalmente la misma se encontraba yuxtapuesta al origen de la viga en voladizo que sostiene al husillo. Con el cambio propuesto la unidad dosificadora se sitúa, ahora, por encima del husillo, eliminando la pendiente de los conductos posteriores a la electroválvula de aguja, cuya apertura no es constante. Con este cambio se consiguió pendiente prácticamente vertical en dirección a la boquilla dosificadora.

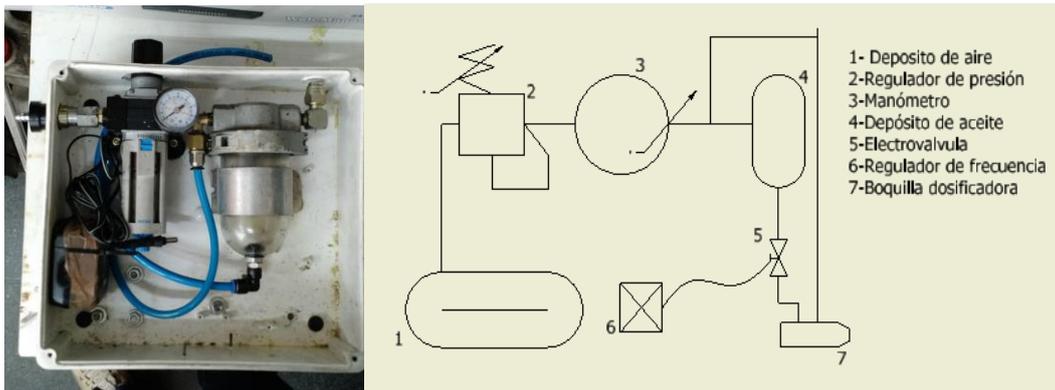


Figura 5.3: Nueva disposición

5.2. Control de electroválvula

La forma en que se regula el caudal de aceite que se envía a la boquilla dosificadora es mediante un sistema múltiple en serie. En principio la presurización del depósito de aceite genera la fuerza impulsora para inyectar el lubricante. A continuación, el caudal es regulado por dos válvulas en serie: primero una válvula aguja, que hace las veces de regulación gruesa, y luego la regulación fina realizada mediante una electroválvula. La misma es accionada por una señal cuadrada generada por un circuito integrado LM 555, el cual cuenta con dos potenciómetros mediante los cuales se puede regular tanto el ancho como la frecuencia del tren de pulsos. El inconveniente surge a la hora de intentar repetir las condiciones del ensayo una vez desplazado de su lugar alguno de los potenciómetros. El desconocimiento de las curvas de calibración de los mismos sumado al tamaño reducido de las perillas dificultaba el poder repetir las condiciones de funcionamiento. Para socavar este inconveniente se relevó una escala, la cual indica a lazo cerrado, la resistencia de cada potenciómetro de acuerdo con su posición. Al repetir la posición de los potenciómetros se puede replicar el tren de pulsos. Esta hipótesis tiene validez dentro de una ventana temporal de unos meses. Pasado dicho lapso el envejecimiento de los capacitores podría alterar el tren de pulsos resultante. Adicionalmente se confeccionó una escala amplificada de 100 posiciones para cubrir los 360° de la válvula aguja, posición en la cual la misma está completamente abierta.

5.3. Perillas y suplementos.

Para completar el armado de la caja se compró un juego de perillas comerciales. Para complementar las mismas se procedió a diseñar y fabricar 3 bases de perilla del máximo diámetro posible en función de la distribución, dos destinadas a regular los potenciómetros (Figura 5.4) y la restante para la válvula de aguja (Figura 5.5). Adicionalmente se fabricó un suplemento para facilitar la extracción de la manguera de alimentación de aire comprimido. Para la fabricación de estos componentes se optó por utilizar polietileno de alto peso molecular, de nombre comercial APM, por tratarse de un material altamente mecanizable y por permitir obtener además una terminación excelente. Las secuencias de operaciones ejecutadas en torno paralelo fueron las siguientes:

Bases de perilla suplementarias para potenciómetros.

Material de partida: Redondo macizo de diámetro 60 mm

1. Colocación en plato de 3 mordazas y verificación de centrado.
2. Taladrado longitudinal, diámetro 10 mm, profundidad 25mm.
3. Frentado, para generar una superficie de referencia.
4. Cilindrado recto con diámetro 40 mm, extensión 24 mm
5. Cilindrado recto con diámetro 8,5 mm, a partir del origen, extensión 7 mm
6. Torneado cónico a 47°, a partir de los 7 mm del origen.
7. Tronzado
8. Inversión de la sujeción.
9. Frentado
10. Cilindrado interno, diámetro 34 mm, profundidad 7 mm



Figura 5.4: Potenciómetros con sus correspondientes escalas y perillas

Perilla para la válvula de aguja.

Material de partida: Redondo macizo de diámetro 100 mm

1. Colocación en plato de 3 mordazas y verificación de centrado.
2. Taladrado longitudinal, diámetro 10 mm, profundidad 25mm.
3. Frentado, para generar superficie de referencia.
4. Cilindrado recto de diámetro 60 mm, profundidad 35 mm
5. Cilindrado recto de diámetro 38 mm, profundidad 6 mm
6. Cilindrado interior, diámetro 34 mm, profundidad 10 mm.
7. Tronzado
8. Inversión de la sujeción.
9. Frentado
10. Cilindrado recto de diámetro 14 mm, profundidad 12 mm
11. Torneado cónico a 45°, a partir de los 12 mm hasta 29 mm pasado el origen.



Figura 5.5: Válvula aguja con su escala y perilla

Suplemento para racord de aire.

Material de partida: Redondo de diámetro 100 mm

1. Colocación en plato de 3 mordazas y verificación de centrado.
2. Taladrado longitudinal, diámetro 10 mm, profundidad 40mm.
3. Frentado, para generar superficie de referencia.
4. Cilindrado recto de diámetro 30 mm, profundidad 40 mm
5. Cilindrado recto de diámetro 26 mm, profundidad 20 mm
6. Tronzado
7. Inversión de la sujeción y Verificación de centrado.
8. Frentado
9. Taladrado longitudinal, diámetro 15 mm, profundidad 40mm.
10. Cilindrado interno, diámetro 17 mm, profundidad 40
11. Cilindrado interno, diámetro 22 mm, profundidad 26

5.4. Ensayos de caudal

Construidos los diales y con la nueva caja de comandos en funcionamiento se debió proceder a validar la hipótesis que fundamentaba dichos cambios en la práctica. Para ello se desarrollaron una serie de ensayos de medición de caudal en el banco de pruebas cuya construcción se detalla posteriormente. Para minimizar los errores aleatorios y mantener constantes los errores sistemáticos se confeccionó un procedimiento estándar para realizar los ensayos. El mismo se detalla a continuación:

Procedimiento de ensayo

1. Verificar que el depósito de aceite tiene suficiente cantidad para realizar el ensayo, en su defecto agregar aceite, colocar el tapón y presurizar el sistema.
2. Colocar los potenciómetros en la posición deseada.
3. Abrir válvula aguja en sentido antihorario 4,5 puntos por encima de su punto de operación (la escala va decreciendo de 9 a 0 en ese sentido) y luego volverla al mismo. Esto atenuará el régimen transitorio.
4. Encender la alimentación del monoestable (botón on/off)
5. Abrir válvula globo e iniciar el cronómetro.
6. Transcurrido el tiempo estipulado para el ensayo cerrar válvula aguja
7. Apagar monoestable y reiniciar cronómetro
8. Transcurridos 30 segundos cerrar el aire desde la válvula globo
9. Esperar 5 minutos a que escurra el aceite adherido a las paredes del decantador.
10. Medir el contenido de aceite recolectado en la pipeta graduada
11. Vaciar pipeta

Recomendaciones a tener en cuenta que surgieron al realizar estos ensayos:

1. Antes del primer ensayo del día es conveniente poner el equipo en funcionamiento algunos minutos para que se carguen los conductos de

aceite y entre en régimen. Ello evita la necesidad de descartar la primera corrida.

2. No conviene reutilizar el aceite más de dos veces ya que el mismo varía su viscosidad al mezclarse con el agua presente en los conductos de aire. Cuando esto sucede, es posible observar un pulsado en el flujo del dosificador y un incremento notable del caudal. Como resultado, los valores obtenidos se vuelven erráticos.

5.5. Reconexión del tablero de control de la rectificadora.

En la entrada del taller de la facultad se encuentra instalado un variador de frecuencia, el cual permite modificar la frecuencia entregada por la red (50 Hz) a voluntad dentro de un rango acotado. Esta virtud resulta de suma utilidad ya que al estar la rectificadora equipada con un motor eléctrico sincrónico hay una relación proporcional entre la frecuencia de la energía eléctrica recibida y la velocidad angular entregada por el motor, lo que significa que al variar la frecuencia entregada al mismo se podrá variar la velocidad angular a voluntad dentro de ciertos límites, variando así las condiciones de corte. Dado que la rectificadora y el variador están situados a una distancia moderadamente amplia, y que el variador se emplea adicionalmente para alimentar un torno, existe una bornera, la cual se emplea para cambiar el destino de la alimentación y comando del tablero de maniobras. Debido a una modificación hecha en el tablero, la llave selectora no se encontraba en correcto funcionamiento. Se debió proceder a relevar el conexionado de la bornera para corroborar que los destinos de las uniones sigan siendo los adecuados.

Utilizando como guía el conexionado del tablero de maniobras que comanda el husillo de la rectificadora se procedió a reemplazar la llave selectora por un sistema de fichas (Figura 5.6) y cables de tipo paralelo.



Figura 5.6: Fichas de conexión

Las conexiones entre cables se realizaron mediante soldaduras con estaño y aislación termo contraíble para asegurar una correcta aislación. En cuanto al armado de las fichas, tarea que involucraba mayor práctica por la reducida distancia entre contactos, se solicitó ayuda a personal técnico que desempeña tareas en el pañol de electrónica.

Una vez armados los cables se realizó una prueba para corroborar que la transmisión de información a través del cable, desde el variador hacia el tablero de maniobras en la rectificadora fuera correcto. La misma fue exitosa al primer intento.

5.6. Banco de pruebas

Una vez realizadas las modificaciones en el equipamiento se debían realizar una serie de pruebas para comprobar el correcto funcionamiento, calibrar y verificar la repetibilidad de los seteo elegidos. Se requeriría realizar una gran cantidad de ensayos para diferentes presiones de alimentación con diferentes combinaciones en las posiciones de los potenciómetros y válvula de aguja. Ello requeriría de bastante tiempo y cierta cantidad de aceite para MQL. Para no interferir con la disponibilidad de la rectificadora se propuso diseñar y construir un banco de pruebas que permita montar los componentes y a su vez que permita recuperar y reutilizar el aceite empleado.

La variable a cuantificar es el caudal de aceite, el cual se encuentra atomizado en el jet de aire. Para poder captarlo se debió diseñar un separador de líquido que permitiese desacelerar el fluido (aire + aceite) para que el lubricante se pegara en sus paredes para luego decantar hacia un recipiente

graduado (pipeta). Adicionalmente el equipo requerirá de un difusor para la salida a baja velocidad del aire seco hacia el ambiente.

Teniendo en cuenta las premisas anteriores se procedió a la etapa de diseño del decantador. Se propone partir de un recipiente cilíndrico con casquetes esféricos para poder redireccionar el flujo y facilitar la separación por fuerza centrífuga. El mismo se realizó a partir de un recipiente descartable de tereftalato de polietileno (PET) de 2000cm³ (Figura 5.7), aprovechando que las paredes de el mismo no presentan irregularidades que se constituyan en potenciales trampas de aceite que dificulten el drenaje.



Figura 5.7: Materiales empleados para la construcción del decantador

Se plantearon diferentes alternativas para probar, variando la posición de entrada del fluido y la dirección con la que se orientaría el jet. Llegado a una probable solución de diseño, se decidió simular el flujo de aire en el mismo mediante el complemento Flow simulation en SolidWorks antes de la construcción del prototipo. Mediante la simulación se pretende conocer tanto las trayectorias dentro el decantador para determinar el ángulo de incidencia del jet de aire que haría mínima la turbulencia para optimizar su funcionamiento. El modelo al que se llegó finalmente presenta entrada del jet de aire horizontal cerca de un extremo, perpendicular al eje de simetría del recipiente como puede observarse en la figura 5.8. La superficie superior del recipiente que cumple la función de desaceleración se encuentra abierta a la atmósfera, lo que en la imagen se indica con un contorno celeste.

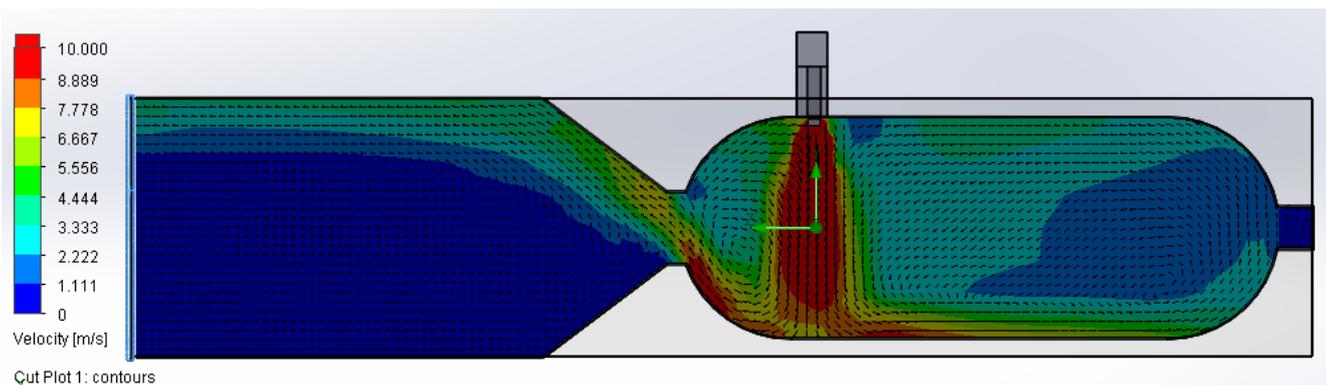


Figura 5.8: Resultado de la simulación: gráfica de velocidades. Gráfico rotado 90° antihorario (la gravedad actuaría de izquierda a derecha).

Con el diseño del decantador verificado se dio comienzo a la construcción. Para anexar al decantador la pipeta graduada, en la cual se debía coleccionar el aceite y garantizar un cierre hermético se torneó un adaptador de APM en uno de los tornos del taller de Máquinas herramientas de la Facultad. La pipeta graduada se monta en el mismo mediante un ajuste con aprieto mientras que en el recipiente se optó por encamisar la rosca hembra presente en la tapa del mismo. De este modo se asegura la fijación, se evitan pérdidas y discontinuidades o escalones donde pueda quedar retenido el lubricante.

Para el caso del difusor a la salida de aire se propuso ubicarlo con la corriente contra gravedad, y se decidió ensanchar la sección lo máximo posible

para desacelerar el flujo de aire y evitar que se arrastren gotas de aceite que no fueron separadas de manera centrífuga. Para construirlo se utilizó un recipiente de PET de 5000 cm³ de boca ancha, el cual se anexó al cuerpo principal aprovechando su rosca.

Para garantizar que el flujo de lubricante que ingresa al separador centrífugo no salga del mismo por efecto de la turbulencia interior se confeccionó una boquilla plástica para acoplar la boquilla del MQL. La misma se desarrolló a partir de una lámina plana de PET, la cual encaja en la geometría piramidal de la boquilla dosificadora (Figura 5.9).

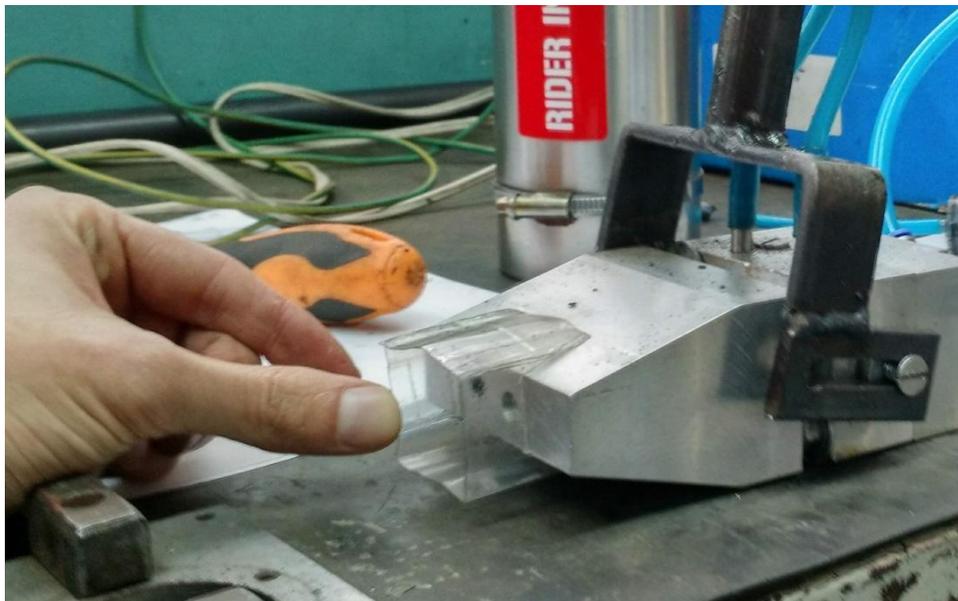


Figura 5.9: Adaptador de admisión

Finalizada la construcción del decantador se pasó a la del banco. El mismo debe permitir fijar y posicionar todos los componentes del sistema MQL y los accesorios para las pruebas de medición de caudal. No solo debe soportar el peso de los componentes sino que debe absorber las fuerzas de empuje que se generan con su uso, dado que se libera un caudal considerable de fluido a alta velocidad y se debe desacelerar y separar en una corta distancia.

Para realizar un primer prototipo (Figura 5.10) y evaluar su utilidad se decidió emplear materiales reciclados, para luego construir otro, de ser necesario. Para emplazar el separador de aceite se decidió utilizar como bastidor una silla de madera en desuso. Para montar la caja de comandos se utilizó una chapa reciclada, la cual se agujereó de forma tal que se pueda

montar el dispositivo correctamente. La chapa fue plegada con las dimensiones del respaldo y sujeta al mismo mediante los mismos tornillos pertenecientes a la silla. Una vez montada la caja de comandos se procedió a sujetar la boquilla dosificadora. Para ello se optó por sistema de sujeción con tornillo prisionero, tal como el que se emplea para la sujeción en la rectificadora. Para construir el sistema se empleó un tubo de pared gruesa al cual le fue practicado un agujero y posteriormente le fue soldada una tuerca para permitir la fijación de la boquilla mediante un tornillo. El conjunto fue soldado a un perfil en L de dos pulgadas el cual, mediante agujeros y tornillería, fue sujeta a la silla. Por último, se montó el decantador. El mismo se sujeta mediante dos abrazaderas en forma OMEGA las cuales disponen de tornillos para su ajuste. Para poder hacer ajustes luego del montaje y facilitar el mismo se montaron los soportes sobre correderas las cuales fueron fabricadas en la fresadora del taller con perfiles en L.



Figura 5.10: Prototipo del banco de pruebas

CAPÍTULO 6: MANUAL DE OPERACIONES DE EQUIPO MQL

A fin de garantizar un correcto funcionamiento del equipo MQL para rectificado se recomienda seguir la siguiente secuencia de operaciones:

6.1. Maniobras preparativas

1. Dado que la viscosidad del lubricante es de suma importancia para un correcto funcionamiento del dosificador MQL se debe asegurar que no haya agua condensada en el sistema de provisión de aire. Para ello se recomienda purgar el tanque del compresor al menos una vez a la semana antes de poner en marcha el equipo. El mismo cuenta con un tapón para vaciado y expulsión de agua en su parte inferior. Una vez purgado dejar cargar hasta que corte y purgar las cañerías desde la primera toma de aire (la ubicada a menor altura) varias veces. Es normal que el agua condensada demore unos segundos en salir. Por último, purgar la toma de aire de la cual se alimenta la unidad de control por si quedó algún vestigio en el recodo de salida. Vaciar el filtro que se encuentra aguas debajo de la toma y la trampa de agua del regulador de presión de ser necesario.
2. Purgados los conductos debe ponerse en régimen el dispositivo para minimizar efectos transitorios. Retirar, limpiar manualmente y secar el reservorio para eliminar residuos del aceite anterior si fuera necesario. Una vez seco se debe colocar y asegurar que quede bien sellado. Luego llenar el reservorio con la cantidad de aceite necesaria, teniendo en cuenta que el chupador se ubica a 10 mm por encima del fondo del recipiente. No olvidar colocar el tapón y ajustarlo ya que el reservorio trabaja presurizado.
3. Conectar la unidad a la red de alimentación eléctrica, a la red de aire y alimentar la unidad extractora. Abrir la válvula globo y luego la llave de paso de aire. Regule la presión a dos bares.
4. Abra la válvula aguja en dos etapas: primero hasta la posición 5 y luego llévela hasta 9, coloque ambos potenciómetros en la posición 4 y pulse el

botón ON para encender la electroválvula. Si la misma se encuentra vacía puede que escuche un sonido pulsante, el mismo lo causa la aguja al cerrar contra su asiento. La intensidad mermará a medida que se llene de aceite. Deje funcionar el equipo en estas condiciones durante dos minutos a partir del encendido de la electroválvula. Vigile que la presión no caiga por debajo de los dos bares. Transcurrido dicho tiempo cierre la válvula aguja (posición cero), luego apague la electroválvula. Deje pasar 30 segundos y cierre la válvula globo. La unidad debe mantenerse presurizada durante el tiempo que se use el equipo, esto evitará el pase de burbujas de aire hacia los conductos de aceite

Tenga en cuenta que de estar montado el equipo sobre la rectificadora deberá encender la muela y el extractor de aire antes de realizar esta secuencia y apagar los mismos 20 a 30 segundos después de cerrar la válvula globo para evitar daños en la muela y contaminación del ambiente de trabajo.

6.2. Operación en régimen permanente

Una vez puesto en marcha el equipo se puede operar sin inconvenientes. Debido a que el caudal de aire demandado por el equipo supera la capacidad de recuperación del compresor para la provisión constante de aire se dependerá principalmente de la capacidad del tanque acumulador. Es conveniente comenzar a operar cuando el mismo se encuentra cargado a su máxima capacidad. En dicho punto el mismo garantiza un periodo de trabajo de 3 minutos, sin bajar la presión en ningún momento por debajo de 2 bar. Si la secuencia se inicia justo antes de que el compresor se detenga la autonomía se extiende a 4.5 minutos. La secuencia a seguir es la siguiente:

- 1 Encender la unidad extractora.
- 2 Dar marcha a la muela y aproximar muy lentamente hasta hacer contacto. Dicho contacto debe ser en la parte de mayor altura de la pieza, de lo contrario al accionar la mesa hidráulica puede dañar la pieza e incluso destruir la muela.
- 3 Abrir la válvula aguja con un exceso de 4.5 puntos por encima de su nivel de operación e inmediatamente ubíquela en su posición, es decir, si va a operar

en 9.5 ábrala hasta 5 e inmediatamente llévela hasta 9.5. (La escala de apertura va en orden descendente al ser antihorario)

- 4 Seleccione los niveles de operación deseados para los potenciómetros y luego presione el botón on/off para encender la electroválvula.
- 5 Realice las pasadas correspondientes, siempre dentro de la ventana temporal de 3 minutos y vigilando que la presión no descienda por debajo del nivel deseado.
- 6 Concluidas las pasadas o el límite temporal apagar la electroválvula (on/off), cerrar la válvula aguja y dejar el pasaje de aire abierto durante 30 segundos para evitar la acumulación de aceite en los conductos. Transcurrido este tiempo cierre la válvula globo.
- 7 Luego de 20 a 30 segundos: Apague la muela y la unidad extractora.

CAPÍTULO 7: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Seteo del MQL para obtener caudales

Durante algunas semanas se relevaron las cantidades de lubricante obtenidas en tiempos de 2 y 3 minutos para así obtener las curvas de caudal. Se probaron distintas combinaciones de ancho, frecuencia y válvula aguja. Se cuantifico su variabilidad y las diferencias entre una posición y otra. Se seleccionaron 2 combinaciones que proporcionaran caudales dentro de los utilizados en la bibliografía consultada. Los valores promedio obtenidos se resumen en la tabla 7.1.

Tabla 7.1: Caudales

Q	dispersión	ancho	frecuencia	Valv. Aguja
60 ml/h	9 %	4	4	9,5
150 ml/h	5 %	4	4	9

Durante estas pruebas se observó una extrema sensibilidad de la válvula aguja. Puede observarse en la tabla que el caudal aumenta más del doble cuando para la misma posición de los potenciómetros la válvula se abre un veinteavo de vuelta.

7.2. Tratamiento térmico

En la tabla 7.2. se presentan los resultados de las mediciones de dureza Rockwell C obtenidos en las muestras testigo luego de ser sometidas a los ciclos térmicos de austenizado y austemperado.

Tabla 7.2: Dureza HRC de las muestras

medición	testigo 280°C	testigo 360°C
1	53	34
2	46	35
3	48	35
4	49	35
5	48	36
Promedio	49 HRC	35 HRC

Como se observa, las durezas relevadas se encuentran dentro del rango esperable para los grados ADI seleccionados: 1400-1100-02 y 900-650-09 (ASTM A897). Posteriormente se obtuvieron micrografías (Figura 7.1) para corroborar que las microestructuras correspondieran a las buscadas.

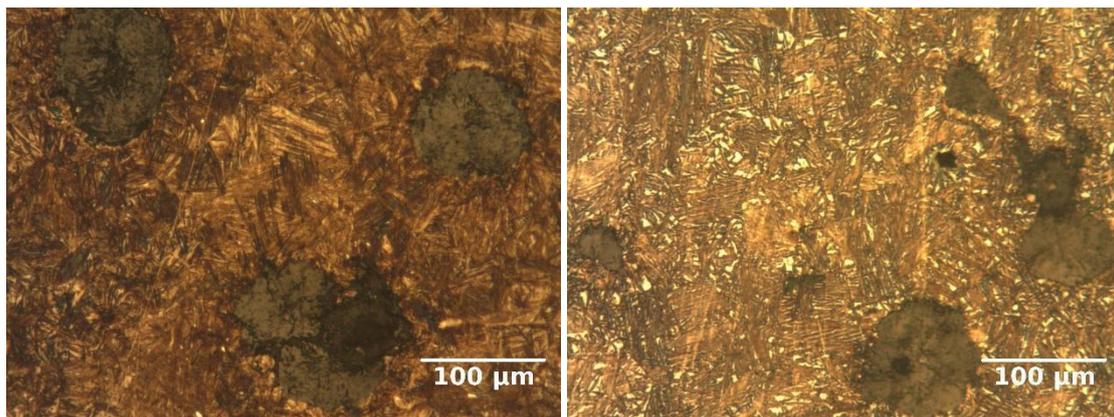
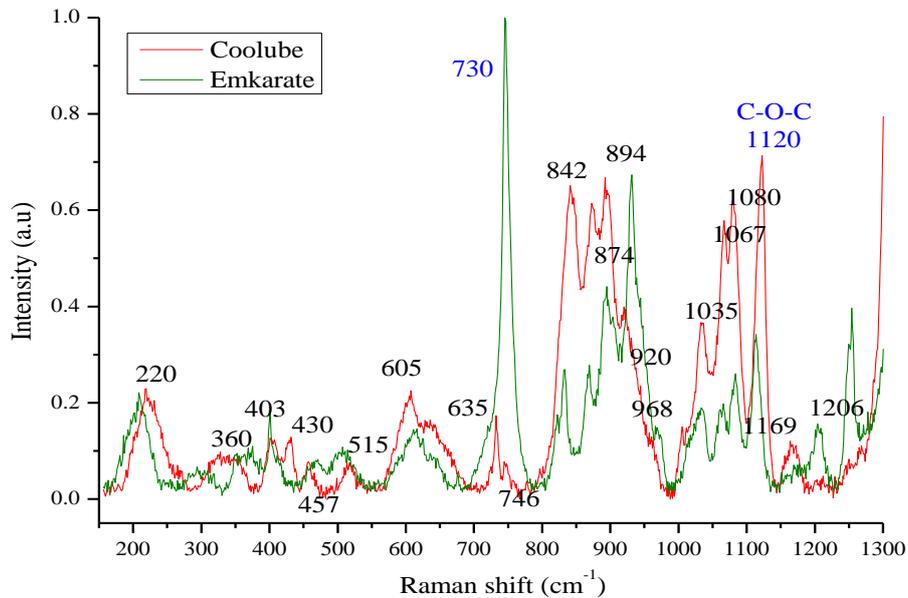


Figura 7.1. Imágenes metalográficas de ADI (revelado con Nital) tomadas con microscopio óptico a 20x, austemperadas a 360°C (izquierda) y 280°C (derecha).

7.3. Comparación de las características de los lubricantes

Al margen de que los lubricantes también son evaluados según su desempeño en el proceso de rectificado, también se deseaba conocer si existían diferencias notorias en la composición de los mismos. Para ello se solicitó ayuda a personal del área de química analítica quienes realizaron un análisis de espectroscopia Raman. Los resultados se muestran a continuación:

Las muestras rotuladas como “Coolube” y “Emkarate” tendrían composición química parecida debido a la similitud de los espectros Raman de cada uno (Figura 7.2). Son compuestos de cadena carbonada (grupos CH₂ y CH₃) cuya identidad química es compatible con la de un éster poliál. La identidad química puede identificarse por los picos característicos de color azul identificados en los espectros de los dos primeros gráficos y en las vibraciones que aparecen en la zona de 3000 cm⁻¹, característica de grupos CH₂ y CH₃.



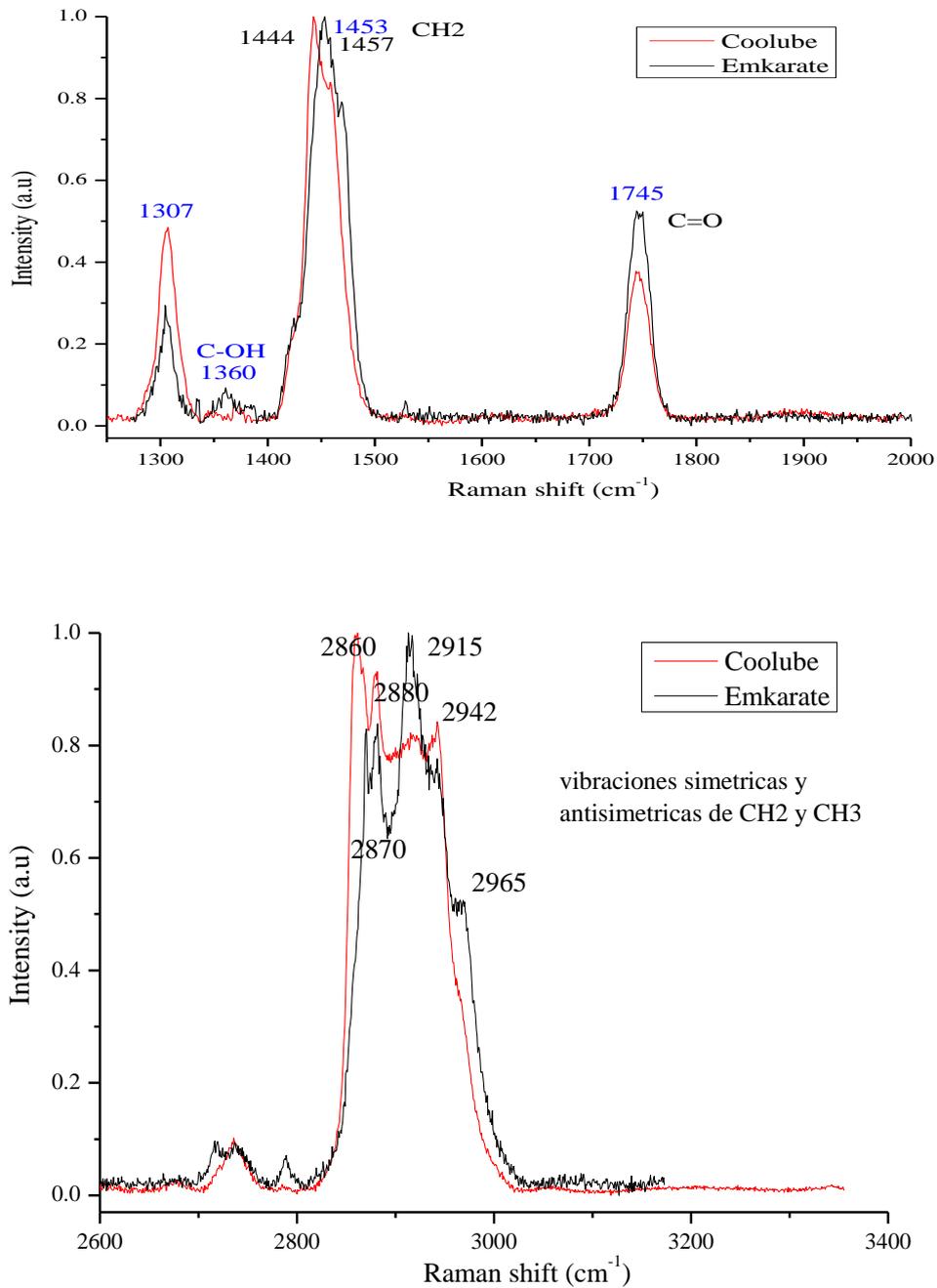


Figura 7.2. Espectros raman de las muestras de aceite

Dados estos resultados, se espera que el comportamiento de ambos lubricantes sea acorde a lo requerido y similar entre si. De esta manera podría emplearse un lubricante comercial de fácil accesibilidad en el mercado local como es el RL32H de Emkarate, en lugar de uno importado de alto costo.

7.4. Micro dureza de las superficies rectificadas

Para evaluar las alteraciones en la dureza superficial se comparan los valores de microdureza Knoop obtenidos en las superficies rectificadas con las del material antes del mecanizado. Los resultados de las mediciones de micro dureza superficial se presentan en forma de gráficos, en los cuales también se incluyó los valores del material antes de rectificar como referencia. A continuación, se analizan los resultados obtenidos en función de cada una de las variables analizadas.

7.4.1. Velocidad de corte constante

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos empleando diferentes velocidades de avance, para las 2 variantes de ADI empleadas (Figuras 7.3 a 7.6).

7.4.1.1. Austemperado a 280°C

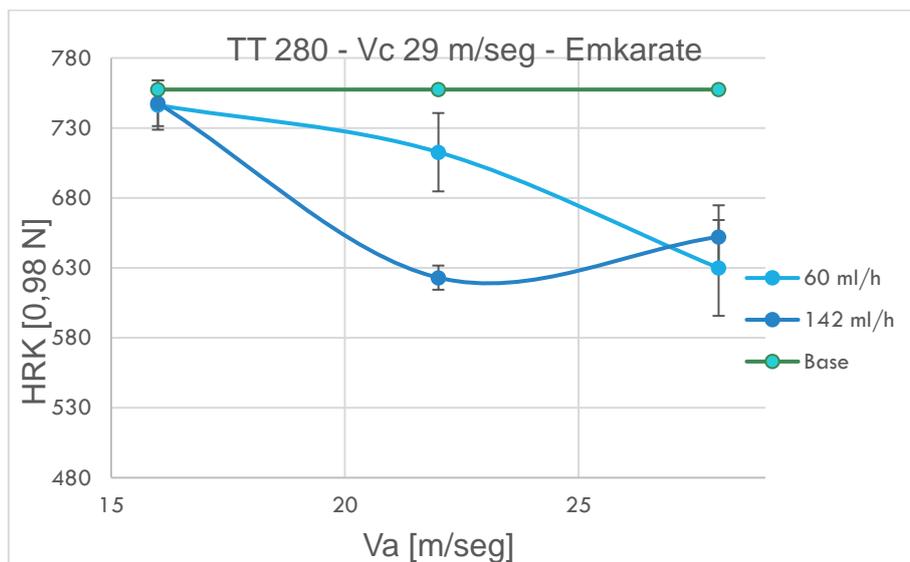


Figura 7.3: Variación de micro dureza en función de la velocidad de avance para distintos caudales empleando lubricante Emkarate

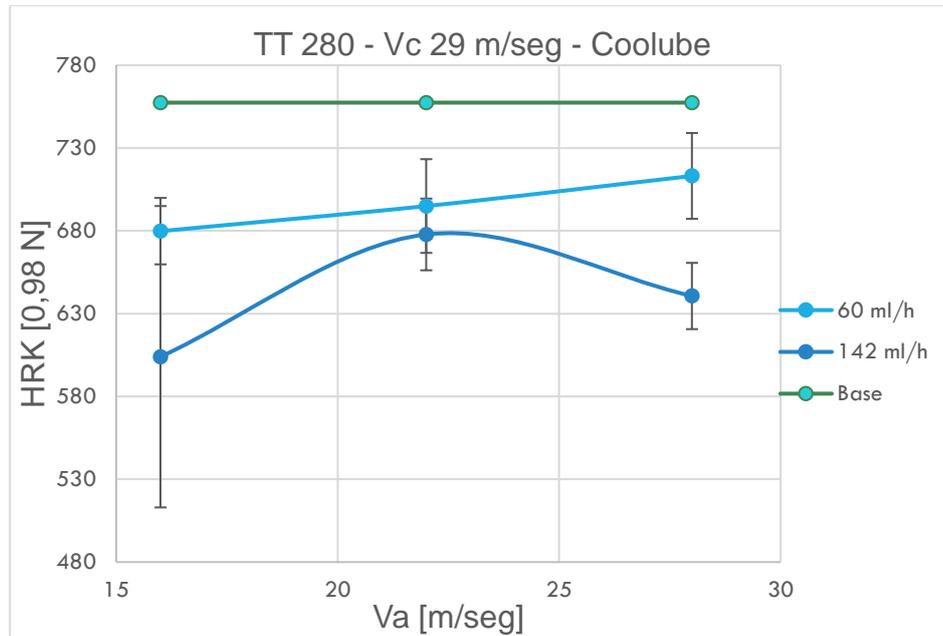


Figura 7.4: Variación de micro dureza en función de la velocidad de avance para distintos caudales empleando lubricante Coolube

Como puede observarse todas las muestras austemperadas a 280°C experimentaron pérdida de dureza superficial. En muchos casos esa pérdida es más importante cuando se emplea alto caudal de aceite, y la dependencia con la velocidad de avance es opuesta para los lubricantes empleados.

Al mismo tiempo, todas las muestras austemperadas a 360°C experimentaron endurecimiento en las superficies rectificadas. En estos casos no se aprecian diferencias significativas al variar el caudal y ambos lubricantes generan comportamientos similares.

7.4.1.2. Austemperado a 360°C

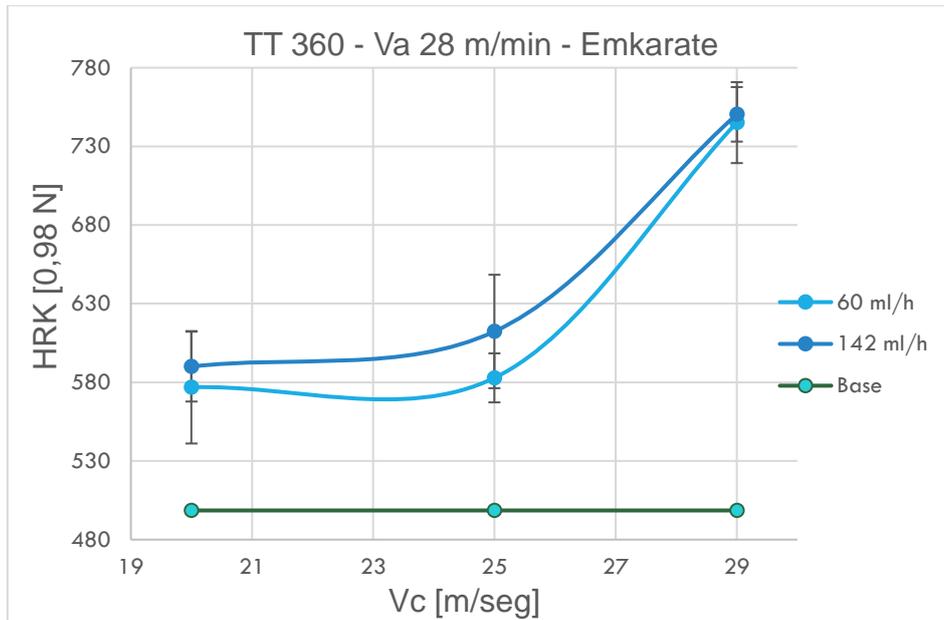


Figura 7.5: Variación de micro dureza en función de la velocidad de avance para distintos caudales empleando lubricante Emkarate

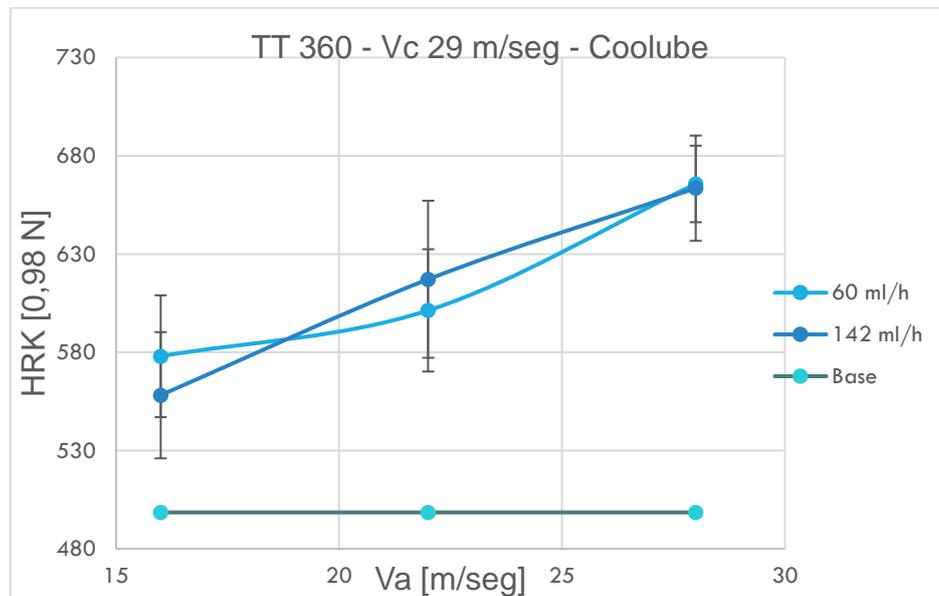


Figura 7.6: Variación de micro dureza en función de la velocidad de avance para distintos caudales empleando lubricante Coolube

Se puede observar en muestras de elevada dureza (austemperadas a 280°C), que si se desea tener mínima pérdida de dureza es conveniente trabajar con avance de 16 m/min y lubricante emkarate. El caudal no presenta influencia en

este punto, aunque por razones económicas convendría emplear la menor cantidad posible. Si la productividad resultase de mayor importancia entonces es recomendable operar con aceite Coolube a máximo avance. En dicho punto se registró un ablandamiento de un 6% (44 Knoop).

En cuanto a las muestras austemperadas a 360°C si se busca conseguir la menor variación de dureza posible lo recomendable sería trabajar con avance mínimo y aceite Coolube. Nuevamente el caudal presenta poca incidencia en este punto al estar solapados los puntos por sus bandas de error. Por otro lado, si lo que se busca es generar el mayor endurecimiento posible, se puede optar por utilizar máximo avance y lubricante Emkarate. Posiblemente en este punto la dureza se deba a acritud o transformación martensítica lo cual tiene lugar en menor medida cuando se utiliza aceite Coolube por su mayor mojabilidad [15].

7.4.2. Velocidad de avance constante

Para estas pruebas se utilizó la máxima velocidad de avance disponible dado que generaría la mayor tasa de remoción de material. Para ello se encendió la mesa y se la dejó funcionando durante 30 minutos para que entrará en régimen.

En las figuras 7.7 a 7.10 se presentan los valores promedio de microdureza obtenidos en superficies rectificadas empleando distintas velocidades de corte, caudales, lubricantes, etc. Con respecto a los ensayos con aceite Coolube al concluir los ensayos que contemplaban el segundo grupo de condiciones de corte el mismo se agotó. Al tener dos velocidades de corte distintas, y no 3, se optó por emplear gráficos de barras.

7.4.2.1. Austemperado a 280

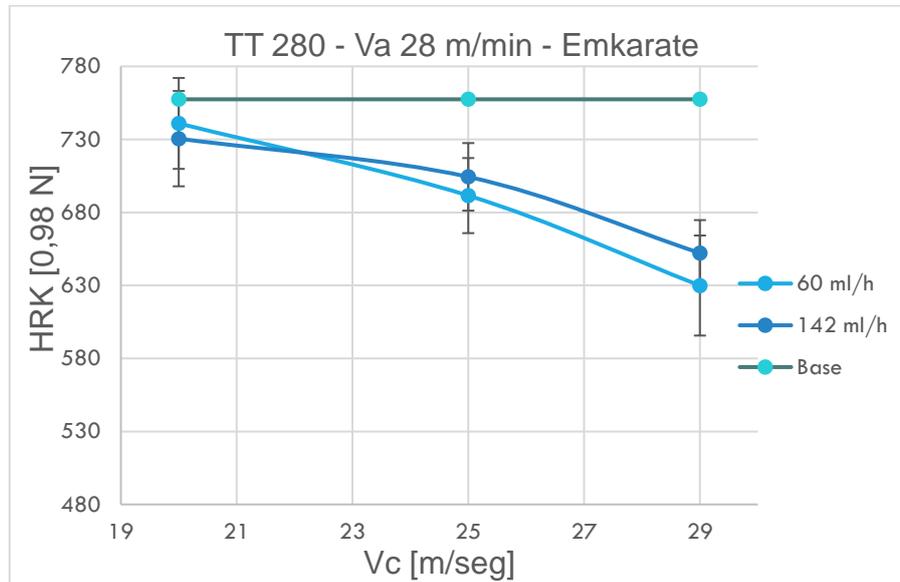


Figura 7.7: Variación de micro dureza en función de la velocidad de corte para distintos caudales empleando lubricante Emkarate

Como se observó previamente, en todos los casos las muestras austemperadas a 280°C experimentaron pérdida de dureza en la superficie rectificada mientras que las austemperadas a 360°C se endurecieron. Se evidencia una clara dependencia de la velocidad de corte, no así con el caudal empleado.

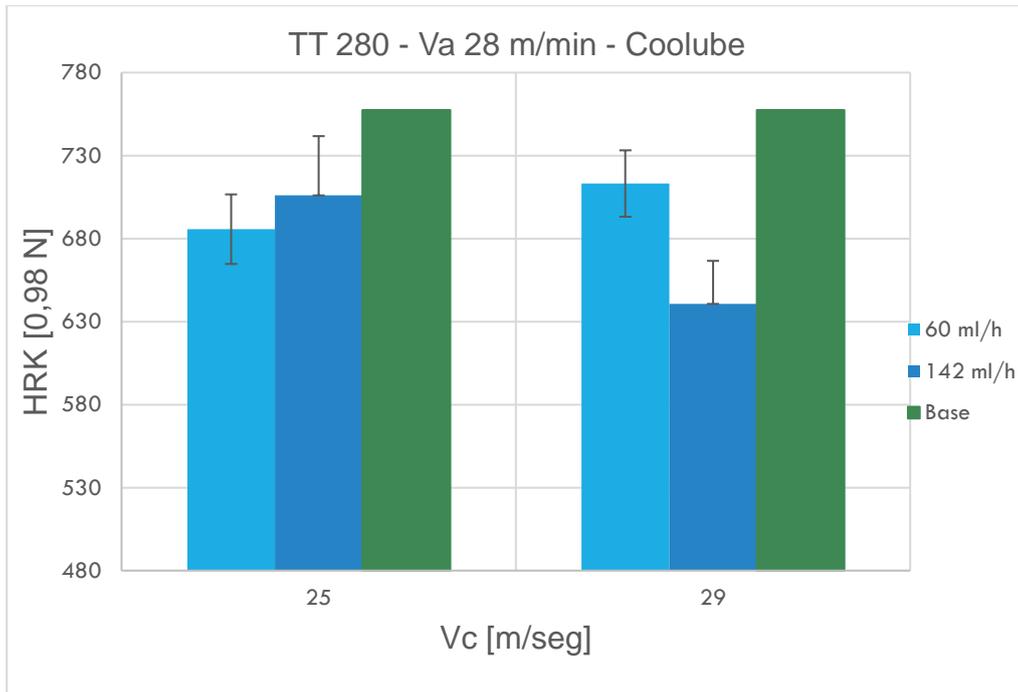


Figura 7.8: Variación de micro dureza en función de la velocidad de corte para distintos caudales empleando lubricante Coolube

7.4.2.2. Austemperado a 360°C

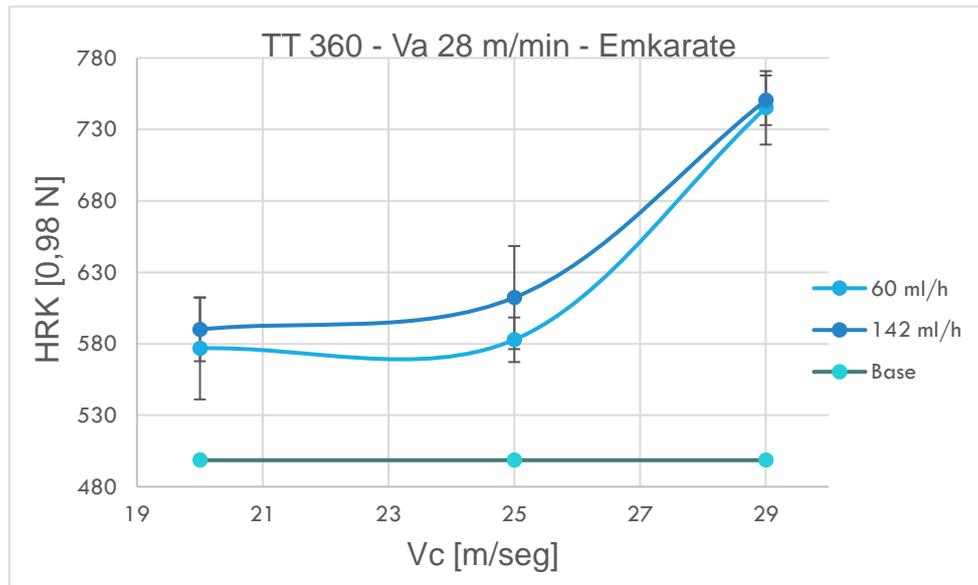


Figura 7.9: Variación de micro dureza en función de la velocidad de corte para distintos caudales y lubricante Emkarate

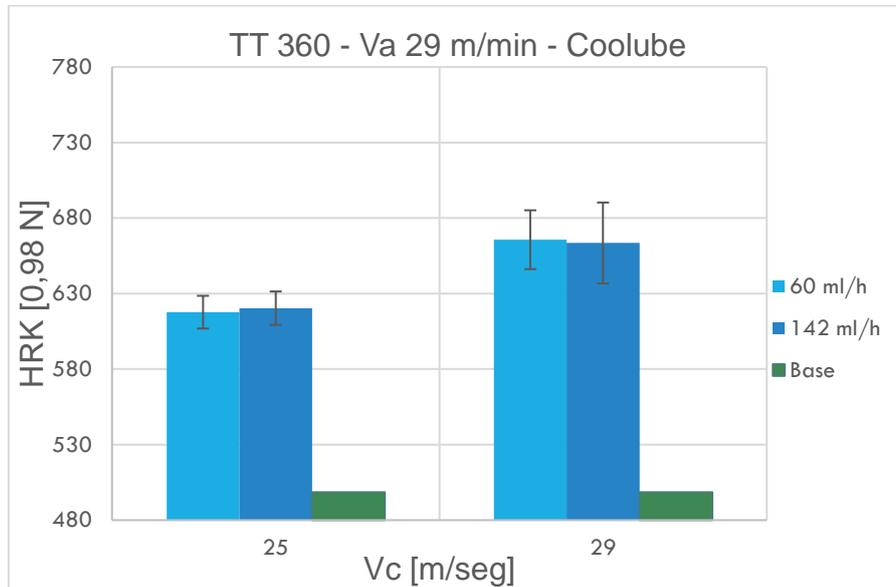


Figura 7.10: Variación de micro dureza en función de la velocidad de corte para distintos caudales empleando lubricante Coolube

Los resultados obtenidos al variar la velocidad de corte muestran una sensibilidad muy similar a la obtenida con el avance. En las muestras de mayor dureza la condición de menor pérdida es la que emplea lubricante Emkarate con baja velocidad de corte. No obstante, la disminución de dureza resulta menor en el resto de las condiciones al emplear Coolube posiblemente por su mayor mojabilidad [15]. En las muestras de menor dureza, si bien todas presentan endurecimiento por deformación las rectificadas con Coolube presentan una sensibilidad menor. Al emplear Emkarate y máxima velocidad de corte la dureza de la superficie se dispara por encima de los 700 HK. Se puede concluir que las alteraciones en la dureza se minimizan con baja velocidad de corte, siendo beneficioso usar lubricante Emkarate y bajo caudal.

7.5. Rugosidad superficial

Para cotejar esta variable, como se detalló en 4.6, se recurrió a dos tecnologías diferentes. Al realizar mediciones del parámetro Ra los resultados no presentaron diferencias significativas entre los métodos empleados. A

continuación, se presentan los datos obtenidos con WLI. Adicionalmente y, como complemento, se incluyen las representaciones 3D que presenten singularidades.

7.5.1. Velocidad de corte constante

En las **figuras 7.11 a 7.14** se presentan los resultados obtenidos en los ensayos con velocidad de corte constante y diferentes velocidades de avance, para los diferentes lubricantes.

7.5.1.1. Austemperado a 280°C

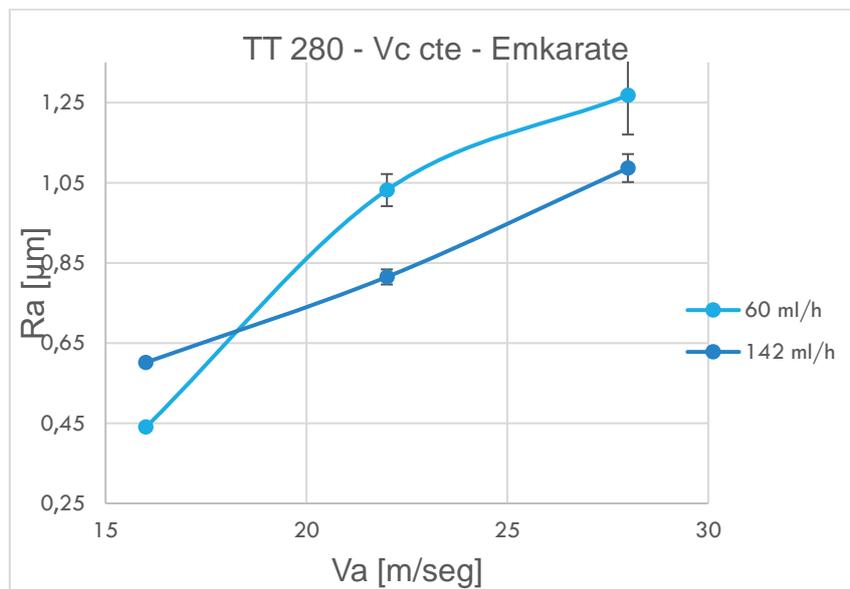


Figura 7.11: Variación de R_a en función de la velocidad de avance para distintos caudales y lubricante Emkarate

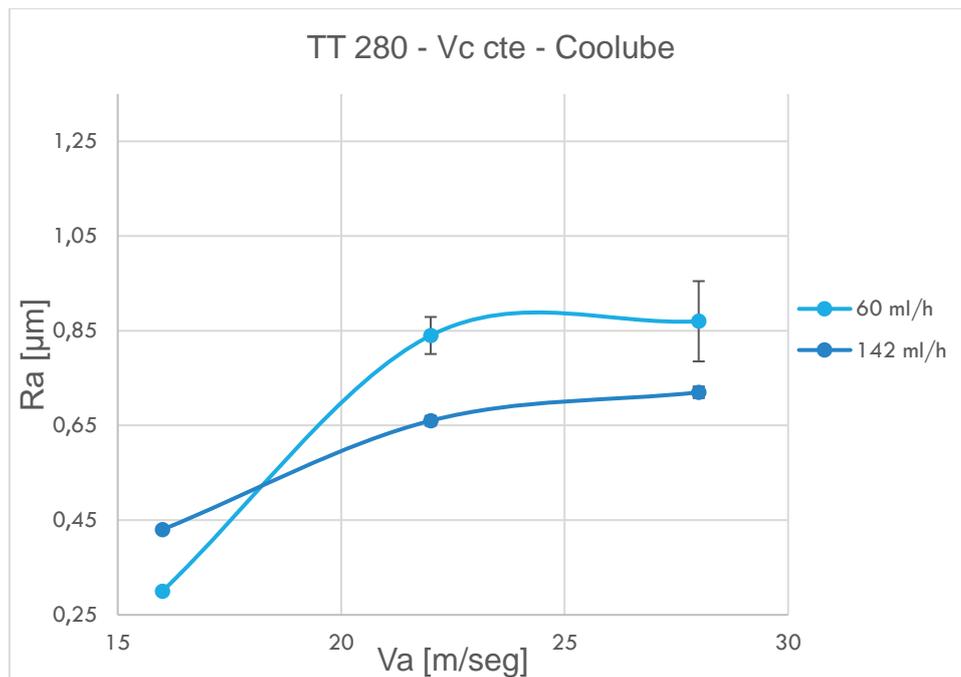


Figura 7.12: Variación de R_a en función de la velocidad de avance para distintos caudales y lubricante Coolube

Como puede observarse en las Figuras 7.11 y 7.12, para las muestras de mayor dureza (austemperadas a 280°C) la rugosidad R_a resultó en el rango 0,25-1,25 μm siendo creciente con el avance. Esto se relaciona directamente con la cantidad de material removido por unidad de tiempo y por ende con el espesor medio de viruta. El caudal de lubricante empleado no ejerce un efecto significativo, siendo más favorable el uso de alto caudal en la mayoría de los casos. Sin embargo los valores más bajos se obtuvieron empleado bajo caudal y baja velocidad de avance. Los resultados obtenidos con lubricante Emkarate presenta una relación creciente en todo el rango de velocidades de avance ensayadas, mientras que Coolube alcanza un plató cuando $V_a=22$ m/min. La causa probable de esto es su menor viscosidad, la cual permite llegar a la zona de corte con mayor efectividad [15].

7.5.1.2. Austemperado a 360

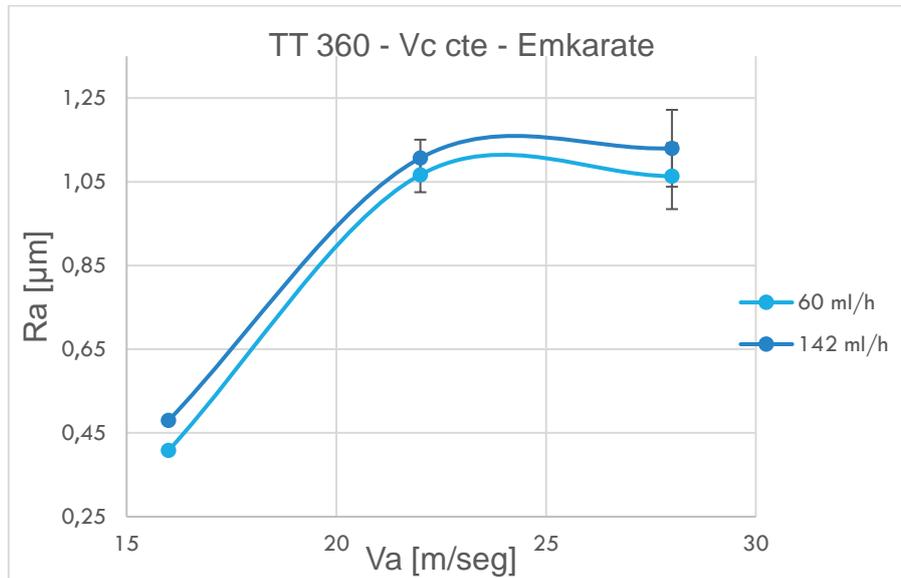


Figura 7.13: Variación de R_a en función de la velocidad de avance para distintos caudales y lubricante Emkarate

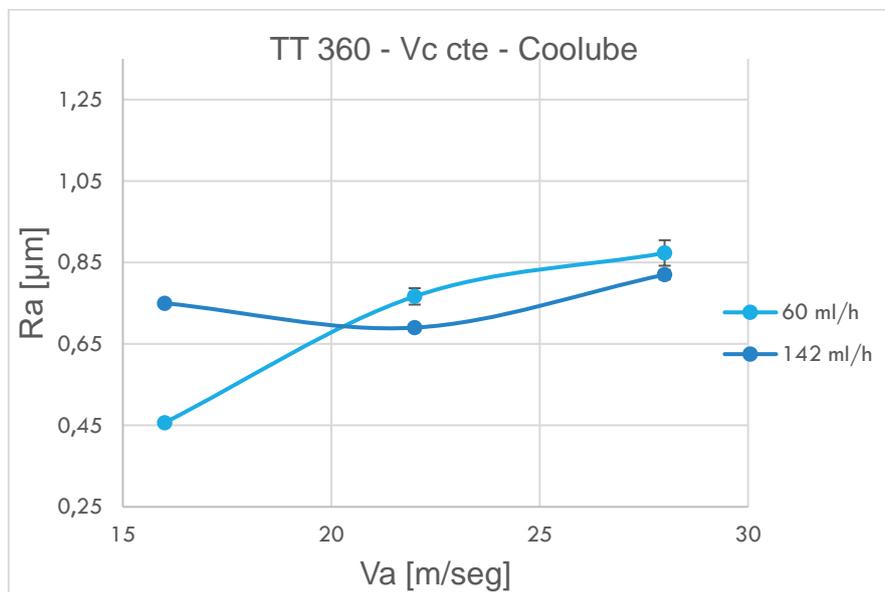


Figura 7.14: Variación de R_a en función de la velocidad de avance para distintos caudales y lubricante Coolube

En cuanto a las muestras más blandas (austemperadas a 360°C), la rugosidad relevada resultó mayor en varias de las condiciones ensayadas. Esto concuerda con las investigaciones de T. Tawakoli sobre aceros endurecidos [18] y se relaciona con la fuerza ejercida sobre los granos. Un material de menor resistencia ejerce menor fuerza sobre los granos abrasivos lo que produce menor reafilado de la muela. Adicionalmente al comparar los resultados de ambos lubricantes se observa que Coolube obtuvo mejores resultados en comparación al aceite Emkarate, el cual alcanza el plató a los 22 m/min. Se puede inferir que materiales de menor dureza no son tan aptos para esta técnica ya que su capacidad de deformar plásticamente sin fracturar aumenta la profundidad a la cual comienza el micro corte, promoviendo la extensión de la zona de surcado. Como consecuencia R_a aumenta.

7.5.2. Velocidad de avance constante

En las figuras 7.15 a 7.18 se presentan los resultados de los ensayos realizados con diferente velocidad de corte y velocidad de avance constante, para los distintos lubricantes.

7.5.2.1. Austemperado a 280°C

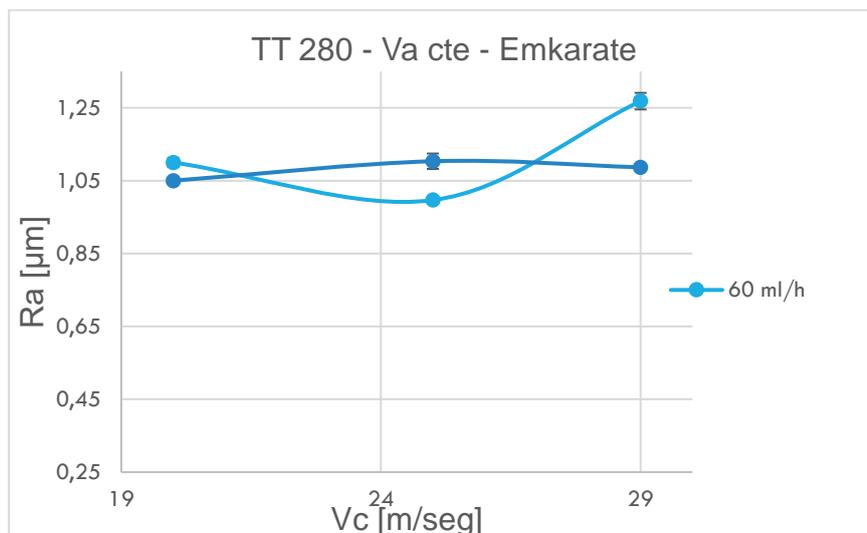


Figura 7.15: Variación de R_a en función de la velocidad de corte para distintos caudales y lubricante Emkarate

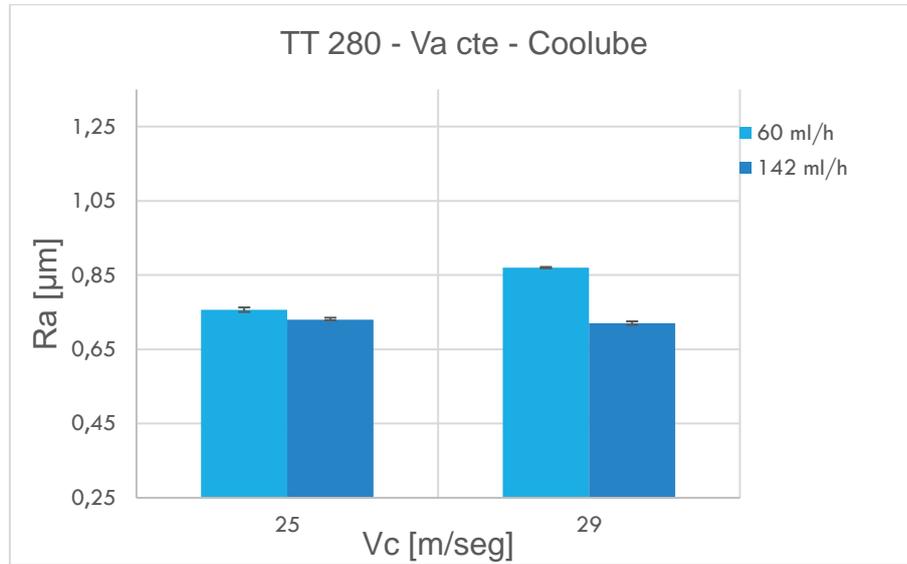


Figura 7.16: Variación de R_a en función de la velocidad de corte para distintos caudales y lubricante Coolube

Como puede observarse en las figuras 7.15 y 7.16 para las muestras de mayor dureza (austemperadas a 280°C), la variación en la velocidad de corte produce menor efecto sobre el cambio en la rugosidad R_a que el producido por la velocidad de avance. En la mayoría de los ensayos se obtuvo menor rugosidad al emplear alto caudal de aceite, siendo los mejores resultados para el aceite coolube (R_a 15% menor).

7.5.2.2. Austemperado a 360°C

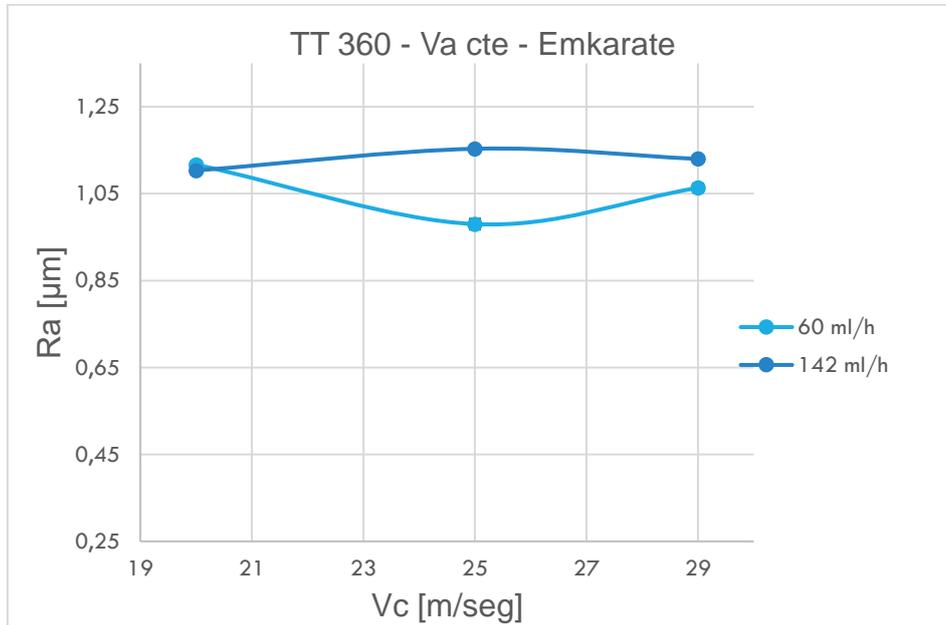


Figura 7.17: Variación de R_a en función de la velocidad de corte para distintos caudales y lubricante Emkarate

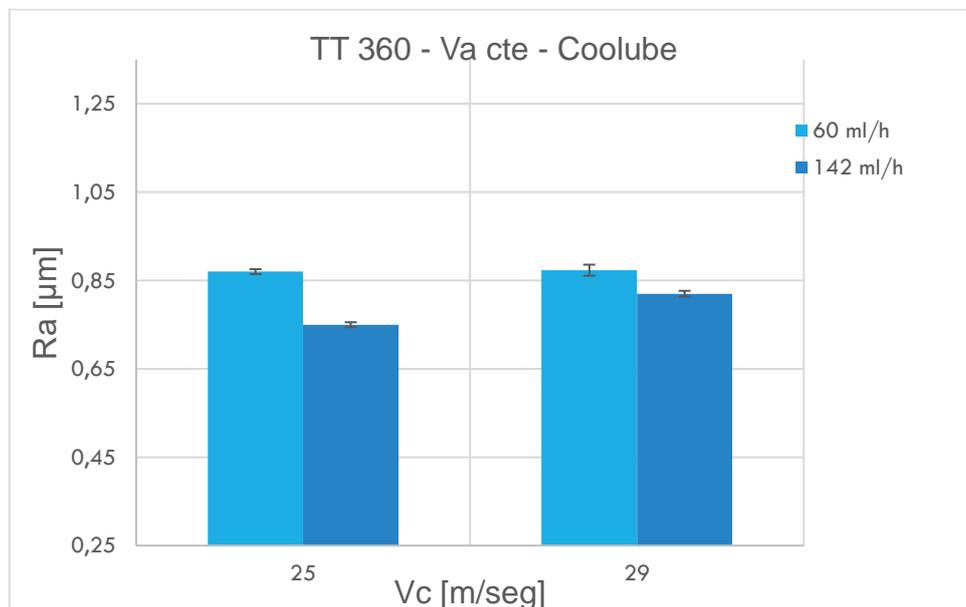
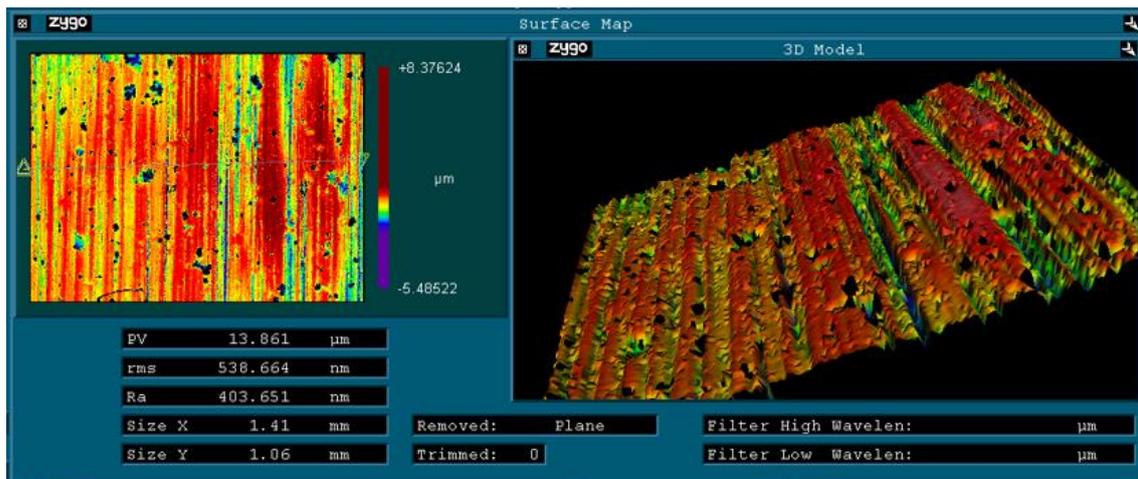


Figura 7.18: Variación de R_a en función de la velocidad de corte para distintos caudales y lubricante Coolube

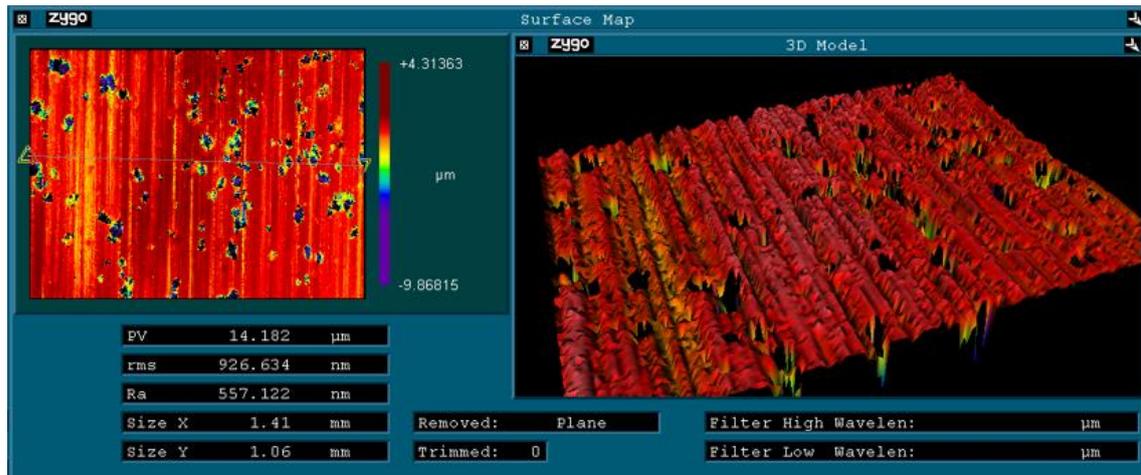
En las figuras 7.17 y 7.18 puede observarse que las muestras con menor dureza presentaron un comportamiento muy similar a las de alta dureza. La velocidad de corte ejerce un efecto poco significativo comparado con el ejercido por la velocidad de avance. Se puede observar similitud en los valores obtenidos con lubricante Coolube, el cual presenta nuevamente los mejores resultados.

7.5.3. Singularidades observadas

La muestra austemperada a 280 °C, rectificada con velocidad de corte 29 m/seg, avance 16m/min y lubricante Coolube presenta notorio desprendimiento nodular para ambos caudales empleados (Figura 7.19). Con estas condiciones de corte se obtiene el menor espesor de viruta generando mucho calor por fricción. La expansión térmica producida en la superficie podría favorecer el desprendimiento de los nódulos de la superficie si se genera un gradiente de temperaturas importante. Otra posibilidad es que la fuerza de contacto ejercida en la última pasada sea insuficiente para generar viruta metálica, pero remueva el grafito de la superficie. Se requiere de mayor estudio para comprobar estas hipótesis.



Caudal 65 ml/h



Caudal 142 ml/h

Figura 7.19. Mapa topográfico y representación 3D obtenidas con el WLI para muestras austemperada a 280 °C, $V_c = 29$ m/seg, $V_a = 16$ m/min y lubricante Coolube. Arriba: 60 ml/h, Abajo: 142 ml/h.

7.5.4. Comparación con sistemas inundados.

Al realizar la comparativa con los datos obtenidos por la Ingeniera Reynoso y el Ingeniero López Neira empleando lubricación inundada [19] se observa que MQL, empleando aceite Coolube, presenta rugosidades 30% menores para bajos avances y 40% superiores cuando se emplea avance máximo. Al variar la velocidad y emplear el mismo lubricante los resultados de R_a se encuentran, también, por encima. Al emplear MQL con aceite Emkarate los valores de R_a relevados se encuentran ampliamente por encima de los que se obtienen con lubricación inundada.

7.6. Alteraciones metalúrgicas producidas en el rectificado.

Se realizaron metalografías sobre cortes transversales de muestras ensayadas con lubricante Emkarate a máximo caudal, máxima velocidad de corte y máximo avance, es decir en las condiciones más desfavorables para ver si existía degradación de la microestructura (Figura 7,20). Adicionalmente se realizó una

metalografía sobre una muestra rectificada en seco para comparar los resultados (Figura 7.21).

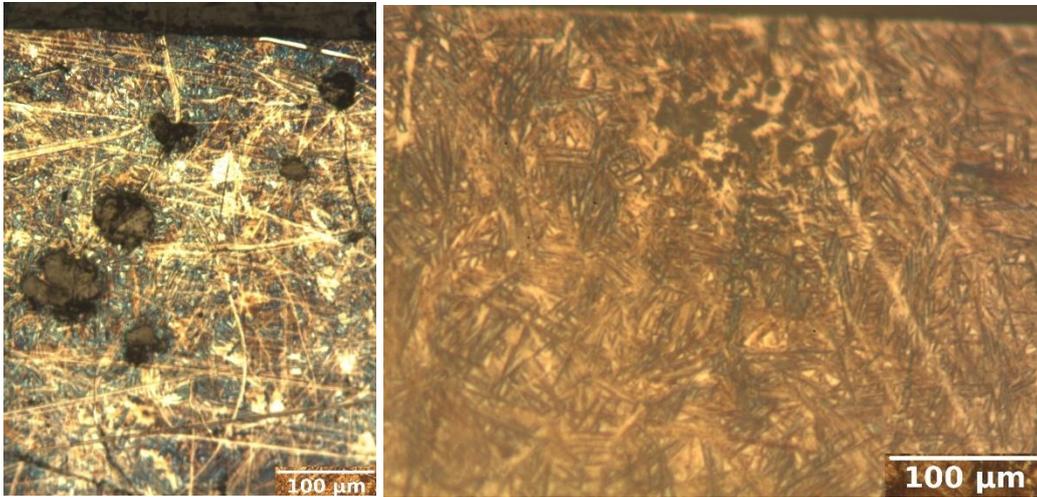


Figura 7.20: Metalografía de muestras rectificadas con MQL, austemperadas a 280°C (izquierda 10x) y a 360°C (derecha 20x)

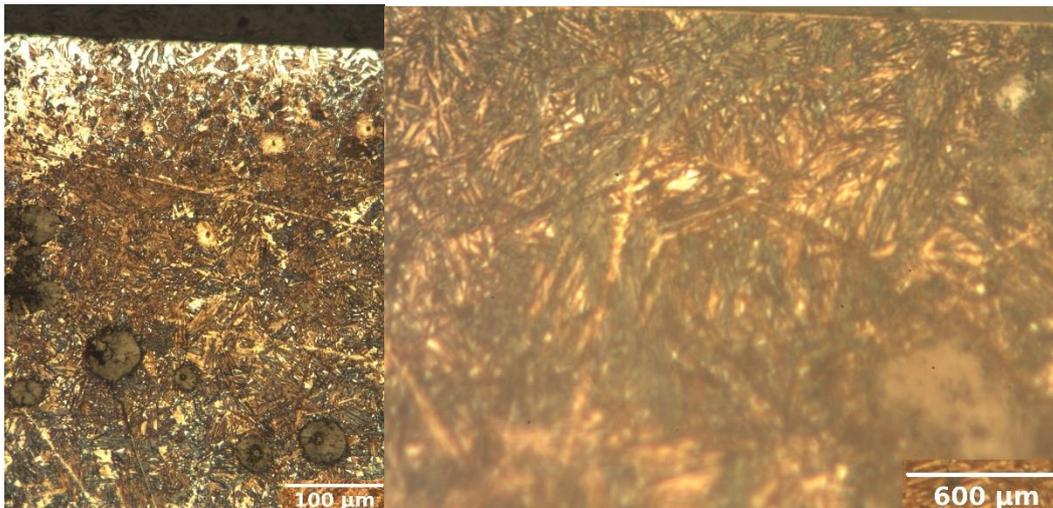


Figura 7.21: Metalografía de muestras rectificadas en seco, austemperadas a 280°C (izquierda 10x) y a 360°C (derecha 50x)

En las Figuras se observa un notorio daño térmico sobre la muestra austemperada a 280°C y rectificada en seco y en menor medida sobre la austemperada a 360°C. En cuanto a las rectificadas con MQL no se observa

daño térmico ni degradación microestructural, dando otra constancia de la efectividad del sistema de lubricación aplicado.

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES

Como resultado de este trabajo se obtuvo un rediseño del equipo MQL y un manual de procedimientos que permite utilizarlo de manera predecible y repetible.

Los ensayos realizados con el mismo permitieron crear una base de datos donde se relacionan el estado de material, condiciones de rectificado, parámetros de lubricación y de integridad superficial. A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que:

1. El control de caudal presenta excesiva sensibilidad ante la apertura de la válvula aguja.
2. Las muestras presentan alteraciones de la dureza, que dependen tanto ante la velocidad de avance como de corte. La mínima alteración de dureza se observa al trabajar con mínima velocidad de corte y/o mínimo avance.
3. Todas las muestras austemperadas a 360 °C presentan endurecimiento y las austemperadas a 280 °C pérdida de dureza.
4. La rugosidad superficial R_a aumenta con la velocidad de avance, la cual resulta la variable dominante respecto a la velocidad de corte.
5. Los aceites ensayados cumplen exitosamente la función de lubricación en el sistema MQL. El aceite Coolube presenta un desempeño ligeramente mejor que el aceite Emkarate, posiblemente por su menor viscosidad la cual confiere mayor mojabilidad, permitiéndole cubrir una zona más amplia.
6. Los materiales de menor dureza no son tan aptos para esta técnica ya que su capacidad de deformar plásticamente sin fracturar aumenta la profundidad a la cual comienza el micro corte, promoviendo la extensión de la zona de surcado. Como consecuencia R_a aumenta.

CAPÍTULO 9: TRABAJOS FUTUROS

A partir de los resultados del presente trabajo se observó la conveniencia de trabajar con aceite Coolube debido a su mayor desempeño, lo cual no resulta sorprendente ya es un aceite específicamente diseñado para este tipo de procesos, a pesar de que ambos son del tipo éster de poliol. Sin embargo, dada la escasa diferencia en los resultados obtenidos sería válido utilizar el aceite Emkarate dada su disponibilidad en el mercado y menor costo.

Al querer variar el caudal de aceite se encontró la dominancia de la válvula aguja sobre esta variable. Un posible eje de trabajo sería encontrar la forma de atenuar la sensibilidad del caudal a la apertura de la válvula.

Como se describe en el procedimiento de ensayo, todas las pasadas se hicieron con profundidad de 0,03 mm, es decir, en condición de desbaste. Al ser el rectificado una operación principalmente de acabado se puede encontrar otro eje de trabajo al emplear la profundidad de pasada como variable de ensayo.

REFERENCIAS

- [1] Owen W S;“The effect of silicon on the kinetics of tempering”;Transactions of the ASM, 46:812-829, 1954
- [2] Voigt R C;“Austempered ductile iron processing and properties Cast Metals”;2:72-93,1989
- [3] Ductile iron Society [<https://www.ductile.org/didata/Section4/4intro.htm>]
- [4]Salonen P,“The environmentally improved design of truck axle hub with austempered ductile iron kymenite adi”, International Conference on Engineering Design ICED, 97pages 637-640, Tampere, August 1997
- [5] Internal Report Selected case studies of austempered ductile iron components Technical report, British Cast Iron Research Asociation BCIRA
- [6]yStuart C. Salmon , “Modern grinding process technology”, 1992, Ed. McGraw-Hill, CapIV
- [7]. Engineer, F., Guo, C., and Malkin, S., Experimental Measurement of Fluid Flow Through the Grinding Zone, Trans. ASME, 114:61–66 (Feb. 1992)
- [8] Guo, C., and Malkin, S., Analysis of Fluid Flow Through the Grinding Zone, J. Engineering for Ind., 114:427–434 (1992)
- [9] CÉSAR GALÁN MARTÍNEZ, OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE TALLADO POR GENERACIÓN MEDIANTE SISTEMA MQL, Proyecto de fin de carrera Ingeniero Industrial Superior, Universidad Carlos III de Madrid, junio 2010
- [10] Yui and Terashima, Development of coolant-less grindding sistema, Word Scientific (1999)
- [11] Rabiei et al, Performance improvement of minimum quantity lubrication (MQL) technique in surface grinding by modeling and optimization, Journal of Cleaner Production, 2014

- [12] Rowe, Principles of Modern Grinding Technology
- [13] David A. Stephenson and John S Agapiou, Metal Cutting Theory and Practice, 2016
- [14] Pusavec et al. Transitioning to sustainable production – Part I: application on machining technologies, Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, Slovenia, 2010
- [15] The MQL HANDBOOK, Tim Walker
- [16] Barczak and Batako, Application of MQL in grinding, General Engineering Research Institute, Liverpool John Moores University, Liverpool, England, UK, 2012
- [17] da Silva et al, Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant—MQL in grinding, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005
- [18] Tawakoli et. Al. An experimental investigation of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication-MQL grinding, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009
- [19] Reynoso y Lopez Neira, “Optimización del rectificado sobre superficies ADI” Tesis de grado Carrera Ingeniería Mecánica UNMDP 2017