

2.1 Descripción general del proceso de rectificado

2.1.1. NATURALEZA DEL PROCESO DE RECTIFICADO

El rectificado engloba una serie de procesos de mecanizado que utilizan partículas abrasivas como medio de corte. Se trata de partículas de extremada dureza que se emplean para modificar la forma o el acabado de una pieza mediante rozamiento. La principal particularidad del rectificado comparándolo con otros procesos de mecanizado radica precisamente en la herramienta utilizada, la muela.

En general, las muelas abrasivas están compuestas por dos elementos, granos abrasivos y material de unión. Atendiendo a estos dos parámetros existen una gran variedad de muelas. Una elección adecuada de la misma será indispensable para llevar a cabo el proceso de manera satisfactoria.

El proceso de arranque de material en el caso del rectificado lo llevan a cabo los granos de abrasivo, de tal manera que se puede plantear que cada grano es una herramienta de corte microscópica. Evidentemente, la cantidad de material eliminada por un solo grano es insignificante. Sin embargo, durante el proceso existen una gran cantidad de granos actuando simultáneamente.

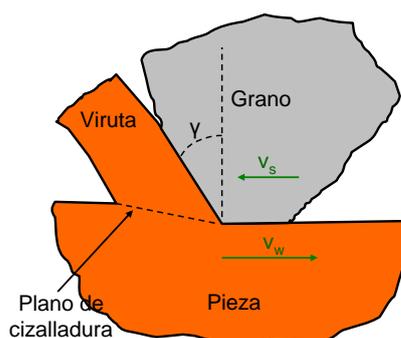


Figura 2.1. Corte ortogonal de una herramienta de grano abrasivo.

En la figura 2.1 se puede observar la acción de un solo grano sobre la pieza rectificada. Si se hace una analogía de lo que se muestra en esa figura con el mecanizado con herramienta con filo definido se puede constatar lo siguiente: que se trata de una herramienta con un ángulo de desprendimiento tremendamente negativo y que posee un ángulo de incidencia prácticamente nulo.

Esto se va a traducir en que será un proceso de mecanizado poco eficiente atendiendo a la energía consumida por volumen de material eliminado y a que las temperaturas que alcance la pieza tenderán a ser altas.

Comparación entre herramienta de corte convencional y grano abrasivo.

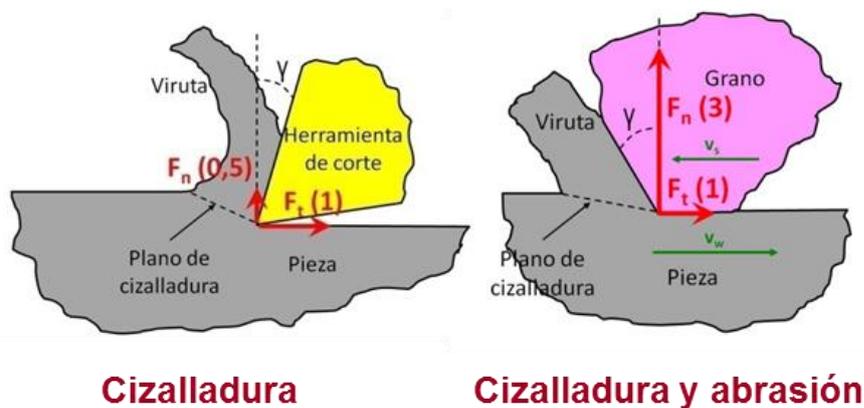


Figura 2.2. Corte ortogonal de una herramienta de corte y de un grano abrasivo.

Como se puede comprobar en la figura 2.2, el rectificado es un proceso de micro mecanizado (nivel de grano) que está caracterizado por un ángulo de desprendimiento muy negativo y un ángulo de incidencia prácticamente nulo, lo que genera gran rozamiento entre pieza y muela, siendo la abrasión el principal mecanismo de arranque de material.

Se trata de un proceso poco eficiente desde el punto de vista de la energía necesaria para el arranque de una unidad volumétrica de material. En la figura 2.3 se puede observar gráficamente la eficiencia energética del rectificado frente a otros procesos convencionales de mecanizado como el torneado o el fresado.

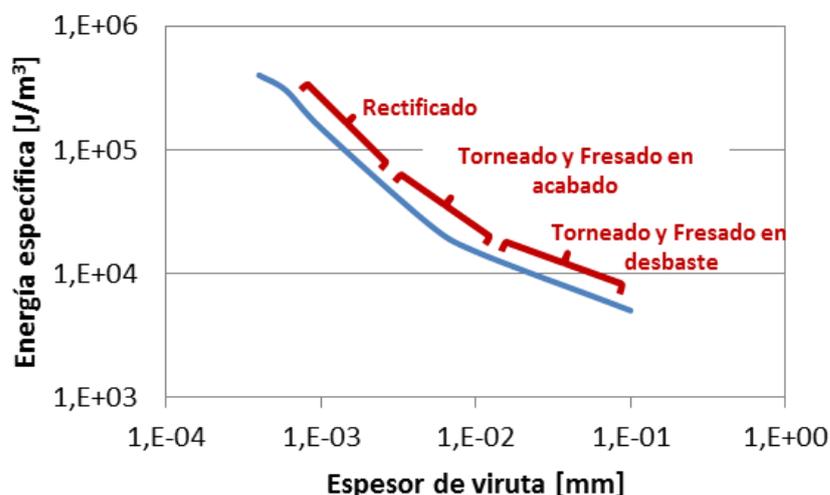


Figura 2.3. Relación entre energía específica de corte y espesor de viruta para distintos procesos de mecanizado.

Aunque la cantidad volumétrica de material arrancado por cada grano sea muy pequeña, la acción simultánea de un gran número de granos provoca que el arranque de material en el nivel macrogeométrico sea apreciable.

Por otra parte, tal y como se muestra en el gráfico de la figura 2.4, las temperaturas que se generan son altas con respecto a tipo de procesos por mecanizado, llegándose incluso a producirse procesos térmicos de templado en la capa superficial de la pieza según las condiciones de corte.

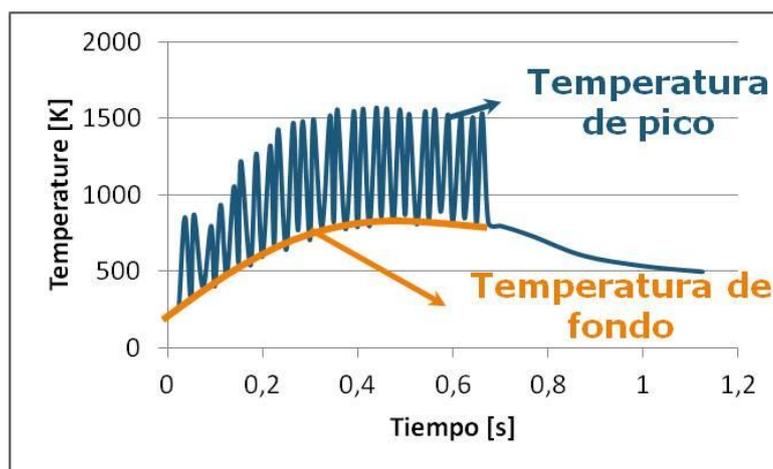


Figura 3.4. Temperatura generada en procesos de rectificado.

De siempre el rectificado ha sido considerado como un proceso óptimo para aquellos casos en los que las piezas obtenidas tienen unas altas exigencias en cuanto a tolerancias dimensionales y acabados superficiales. Así, dentro del proceso global de fabricación de una pieza determinada siempre se situará en una de las últimas etapas del mismo.

También se puede emplear el proceso de rectificado en el mecanizado de materiales que debido a su extrema dureza o a su fragilidad (metal duro, cerámicas...) no pueden ser mecanizados por otro tipo de procesos como le fresado o el torneado.

A partir de lo expuesto hasta ahora se puede ver que el rectificado es un proceso de una alta importancia a nivel industrial debido a las prestaciones que presenta con respecto a otros procesos de mecanizado y al alto valor añadido de las piezas obtenidas. Tanto es así que llega a suponer el 25% del total de los gastos de mecanizado en los países industrializados.

Sin embargo, las últimas tendencias en mecanizado, como el mecanizado a alta velocidad (HSM) han obligado a que se lleven a cabo nuevos desarrollos del proceso para que este no pierda competitividad.

De esta manera en los últimos años han surgido nuevos procesos de rectificado como pueden ser el rectificado Creep-Feed, el High Efficiency Deep Grinding o el rectificado Quick-Point.

Ejemplos de piezas rectificadas se pueden encontrar en prácticamente todos los sectores industriales, desde la aeronáutica hasta la electrónica, pasando por la automoción, herramientas de corte, matricería y troquelaría o en el campo de la óptica (acabado de las superficies de las lentes).

En la figura 2.5 se pueden observar una serie de piezas representativas que pretender dar una idea de las potencialidades del proceso.

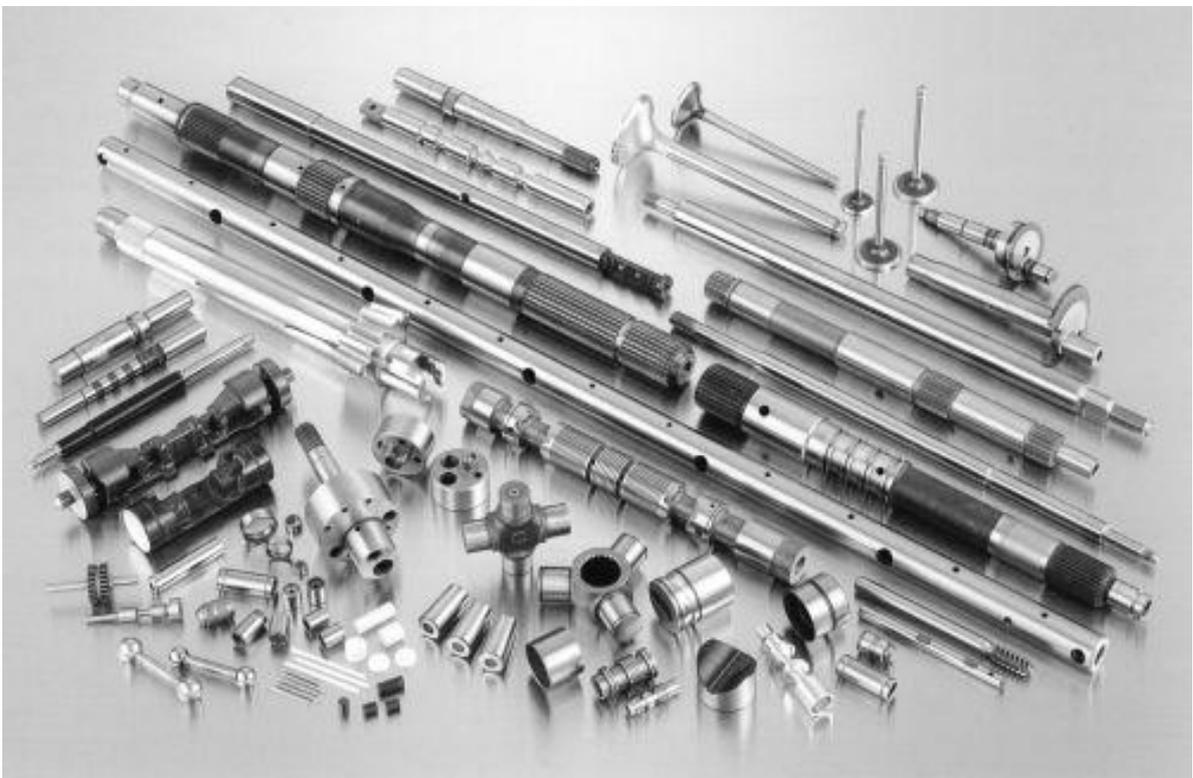


Figura 4.5. Piezas mecanizadas mediante procesos de rectificado



2.1.2. TIPOS DE RECTIFICADO

A partir de las geometrías de las piezas obtenidas y de la posición constructiva de las máquinas empleadas los tipos de rectificado convencional que existen en la industria son los siguientes: rectificado plano, rectificado cilíndrico y rectificado sin centros. A continuación se hará una breve descripción de cada uno de ellos especificando los parámetros de operación más importantes así como su nomenclatura.

2.1.2.1. RECTIFICADO PLANO

En primer lugar, se analizará el rectificado plano. Este tipo de rectificado se emplea fundamentalmente para planear piezas. En la figura 2.6 se puede ver un esquema del proceso. En él se observa cómo la muela gira alrededor del eje z con una velocidad periférica V_s y la mesa avanza en una dirección perpendicular al eje y con una velocidad de avance V_w . Por último, cabe destacar la profundidad de pasada (a_e) que es la que determinará la cantidad de material eliminado por la muela en una pasada.

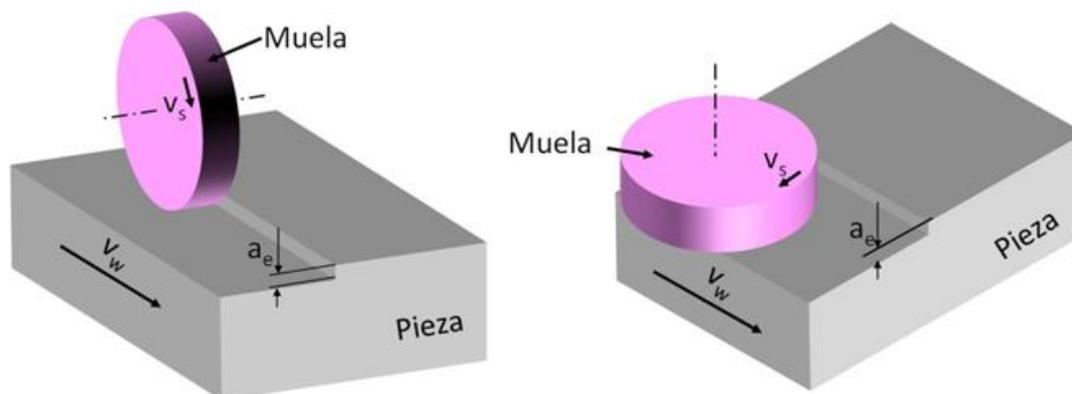


Figura 5.6. Parámetros característicos del rectificado plano

La velocidad de corte del proceso viene determinada por la siguiente expresión:

$$V_C = V_S \pm V_W$$

Donde V_C se corresponde con la velocidad de corte. En este caso, el signo de V_W dependerá de si el rectificado se realiza en concordancia o en oposición. Siendo éste sumando cuando vaya en oposición al sentido de corte y restándose cuando la pieza vaya en dirección favorable a la velocidad periférica de la muela.



Figura 6.7. Ejemplo de rectificadora plana CNC de Chevalier

Para el caso del rectificado convencional, la velocidad periférica de la muela es mucho mayor que la velocidad de avance y por lo tanto, se asume que la velocidad de corte del proceso es igual a la velocidad periférica de la muela. En la figura 2.7 se muestra una rectificadora plana de control numérico.

2.1.2.2. RECTIFICADO CILÍNDRICO

En segundo lugar, se analizará el rectificado cilíndrico. Este tipo de rectificado se emplea fundamentalmente para hacer el acabado de pieza de revolución que por ejemplo hayan sufrido un proceso de torneado anterior.

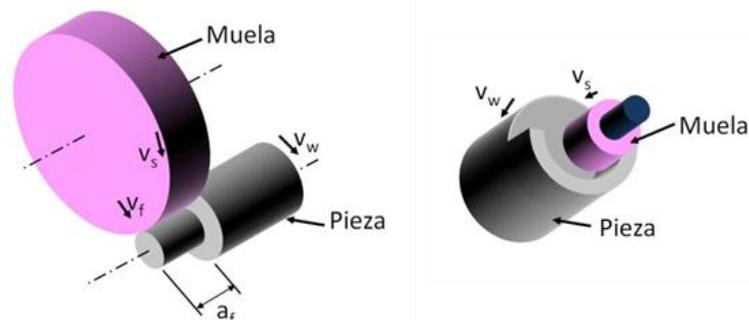


Figura 7.8. Parámetros característicos del rectificado cilíndrico exterior.

En la figura 2.8 se puede ver un esquema del proceso en el que se aprecia que la principal diferencia con respecto al rectificado plano radica en la geometría de la pieza. Así se introduce una nueva velocidad de avance (v_f). En el ejemplo de la figura se puede ver un rectificado cilíndrico a través y a dicha velocidad se le denominará velocidad de avance axial.

En el caso del rectificado en plongeé, dicha velocidad será paralela al radio de la pieza y se le denominará velocidad de avance radial. En la figura 2.9 se muestra una rectificadora cilíndrica.



Figura 8.9. Rectificadora cilíndrica CNC de Danobat.

2.1.2.3. RECTIFICADO SIN CENTROS

En el tercer y último lugar se comentará brevemente el rectificado sin centros. Este es un tipo de rectificado claramente diferente a los demás. Se utiliza para el rectificado de piezas de revolución de pequeño tamaño que no pueden ser sujetadas por los utillajes disponibles en una máquina de rectificado cilíndrico convencional. Con respecto a los anteriores tipos de rectificado se añaden dos elementos nuevos como son la muela reguladora y la regla de apoyo.

Un esquema del proceso se puede ver en la figura 2.10. La muela rectificadora es la encargada de eliminar el material de la pieza, la muela reguladora controla la velocidad de avance y de rotación de la pieza y la regla de apoyo coloca la pieza de manera adecuada.

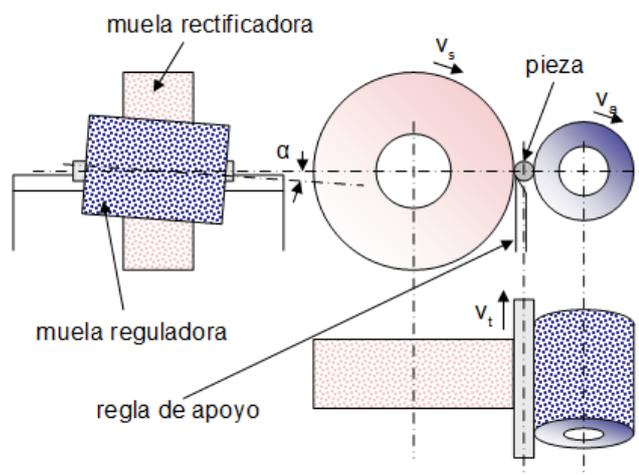


Figura 9.10. Esquema de rectificado sin centros.

Los parámetros principales del proceso se pueden ver en la figura 2.10. Así, al ya mencionado V_s se le suman el ángulo de inclinación del eje de la muela reguladora (ALFA), la velocidad periférica de la muela de arrastre (V_A) y la velocidad de avance transversal de la pieza (V_T). La velocidad periférica de la pieza será igual a la de la muela reguladora.

En la Figura 2.11 se muestra una rectificadora sin centros y un detalle del proceso de mecanizado para este tipo de piezas.



Figura 10.11. Rectificadora sin centros CNC de Danobat y un ejemplo del proceso.

2.1.3. MUELAS ABRASIVAS

Las muelas son las herramientas características del proceso de mecanizado por abrasión. Habitualmente tienen forma de disco con un perfil plano, pero atendiendo a las distintas necesidades tecnológicas de cada pieza concreta se pueden encontrar en diversas formas, por ejemplo las mostradas en la figura 10.

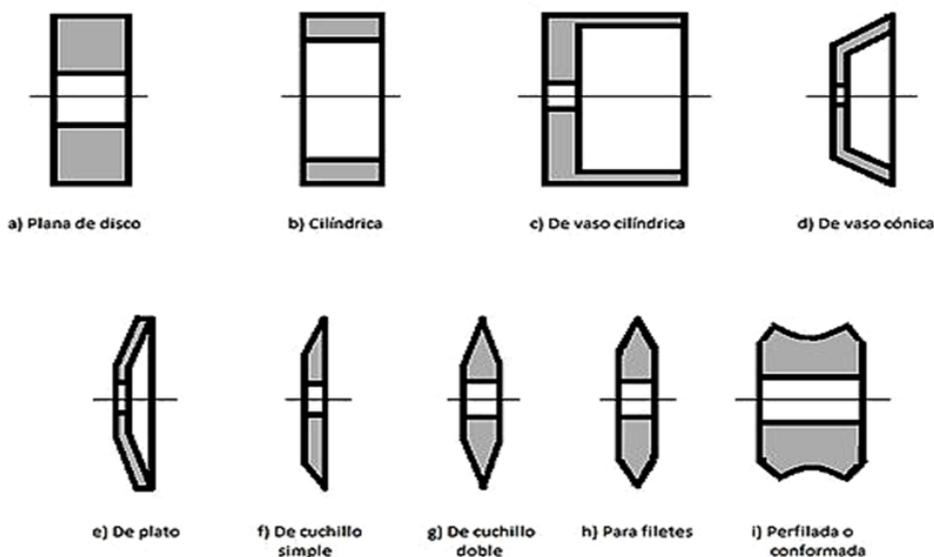


Figura 2.12. Formas más habituales de las muelas en rectificado.

La muela se compone de partículas abrasivas, aglomerante y poros. Un esquema de una fracción de muela se puede ver en la figura 2.12. Sus características serán específicas para cada aplicación concreta en que se vaya a usar y habrá que tener en cuenta el material a mecanizar, el tipo de proceso, características de la refrigeración, etc. Una correcta definición de las muelas es fundamental para llevar a cabo el proceso de manera correcta.

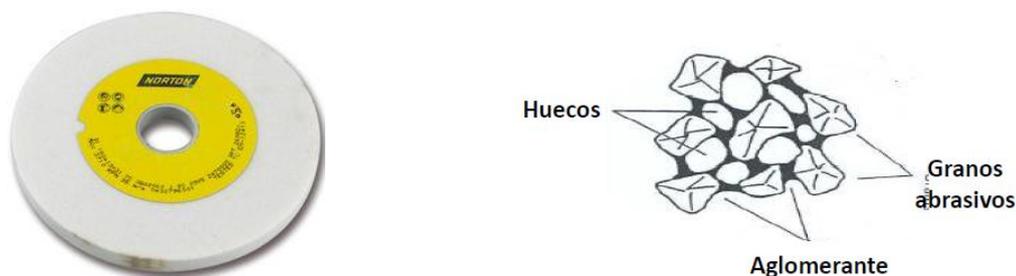


Figura 2.13. Ejemplo de muela y partícula de abrasión

A la hora de definir una muela hay que considerar los siguientes aspectos: el material abrasivo, tamaño de grano, el aglomerante utilizado, estructura y dureza de la muela.

2.1.3.1. MATERIAL ABRASIVO

Los granos de material abrasivo son los encargados de arrancar el material mecanizado y su composición depende del material a rectificar y de las condiciones del proceso. Se distinguen dos categorías en función de las condiciones de mecanizado, los abrasivos convencionales y los superabrasivos; siendo estos últimos los que encuentran su aplicación en el rectificado de alta velocidad donde las condiciones del proceso son muy exigentes.

ABRASIVOS CONVENCIONALES

Dentro de los convencionales están los granos de carburo de silicio y los de óxido de aluminio. Los abrasivos convencionales se caracterizan por ser tenaces, resistentes a impactos y poco resistentes al desgaste.

ÓXIDO DE ALUMINIO

- Se conoce comercialmente como corindón
- Según el grado de aleación los hay de muchos tipos de colores varios
- Es dúctil y tiene gran resistencia al impacto
- Es más blando que el carburo de Silicio
- Su afinidad química respecto de los materiales férricos es prácticamente nula
- Es especialmente adecuado para mecanizar materiales férricos de alta resistencia a tracción y a cortante, normalmente aceros



Figura 2.14. Ejemplo de muela de óxido de aluminio o alúmina.

CARBURO DE SILICIO

- Tiene mejores propiedades mecánicas que el óxido de aluminio
- Presenta una gran afinidad química con el acero, por lo que no se usa para rectificar ese material
- Se usa comúnmente para mecanizar materiales no férricos y cerámicos
- Se usa en ocasiones con algunas fundiciones de alta dureza
- En este caso el alto contenido en carbono minimiza el efecto de la afinidad química de la muela



Figura 2.15. Ejemplo de muela de carburo de silicio.

Como conclusión, el carburo de silicio es más duro que el óxido de aluminio y se emplea habitualmente en el rectificado de carburos, cerámicas, metales no férricos y fundiciones. No suele emplearse en metales férricos por la tendencia que tiene el carbono a combinarse con el hierro, reduciendo notablemente la vida útil de la muela. Para materiales férricos se emplea el óxido de aluminio. En la figura 2.15 se puede ver un ejemplo de una muela de carburo de silicio.

SUPERABRASIVOS

Entre las partículas de superabrasivo se pueden encontrar las de diamante y las de nitruro de boro cúbico (CBN). Los granos de diamante son los más resistentes y se emplean en el rectificado de cerámicas y piezas de metal duro, pero siempre bajo unas condiciones de temperatura muy controladas, puesto que la pérdida de dureza del diamante es muy acusada a partir de los 700°C. Por otro lado, los granos de CBN tienen su aplicación en el rectificado de materiales férricos de alta dureza y en aleaciones termorresistentes puesto que sus propiedades son más estables a altas temperaturas que en el diamante.

En las muelas de abrasivo convencional, la velocidad periférica máxima no suele superar los 60 m/s, siendo la velocidad recomendada entre 30 y 40 m/s; mientras que en las de superabrasivo pueden superarse los 150 m/s. Además, las muelas de superabrasivo son capaces de soportar mayores tasas de arranque de material, lo que las hace más eficientes que las convencionales. Sin embargo, el coste económico que supone el empleo de muelas superabrasivas es mucho mayor que con las convencionales, lo que solo puede ser rentable para determinados procesos muy exigentes y de alta producción. El coste añadido se debe al propio coste de las muelas (del orden de 50 veces más) y a la necesidad de emplear máquinas preparadas para los procesos de alta velocidad.



Figura 2.16. Ejemplo de varias muelas de CBN.

La designación normalizada empleada para cada tipo de abrasivo es: A para el óxido de aluminio o alúmina; C para el carburo de silicio; D para el diamante policristalino y B para el CBN. Se puede ver un ejemplo de este tipo de muelas en la figura 2.17.

2.1.3.2. TAMAÑO DE GRANO

Otro aspecto a considerar, y que tiene una gran influencia en el proceso, es el tamaño de grano, ya que va a determinar en gran medida el acabado superficial obtenido en las piezas rectificadas.

El tamaño de grano determina en gran medida el acabado superficial que se puede obtener en el proceso de rectificado. Al ser de forma irregular, determinar el tamaño de un grano es complicado, por lo tanto a la hora de asignarle un valor a dicho tamaño se utiliza un número que representa la densidad de rendijas del tamiz utilizado para clasificarlo.

Los tamaños de grano son siempre números pares que se ajustan a una serie de números normalizada.

Todos los tamaños superiores a 60 terminan en 0. Así un tamaño 462 representa una mezcla de granos de tamaño medio 46. Algunos fabricantes añaden un dígito tras el tamaño de grano para indicar que la muela contiene una mezcla de granos de diferentes tamaños. Estas mezclas son comunes, aunque no hay forma normalizada de designarlo.

Otra manera de determinar el grano, aunque sea poco habitual, es el concepto de diámetro medio, siendo el número del tamaño de grano (S) y el diámetro medio de los granos (d) vienen aproximadamente relacionados por la expresión:

$$d = \frac{16,5}{S} \quad [\text{mm}]$$

Número normalizado	Diámetro medio de grano en μm			
	DIN ISO 6344	JIS	ANSI	
8	2600			Macrograno
14	1559			
20	1100	950	950	
24	780	780	780	
36	550	550	550	
60	270	270	270	
90	160		160	
150	95	95	95	
220	70			
600	9	20	9	Micrograno

Tabla 2.1. Tamaño de grano según normas DIN, JIS y ANSI.

En la tabla 2.1 se muestran las equivalencias entre el tamaño del tamiz y el diámetro medio y como se puede comprobar, la designación del tamaño de grano esta normalizado y es diferente dependiendo de la norma (DIN, ISO, JIS, ANSI) de la que se trate.

Por lo tanto, las partículas de mayor tamaño se emplean en procesos de desbaste con un acabado superficial relativamente pobre. Esto se debe a que cada grano podrá arrancar una cantidad relativamente alta de material, pero a costa de dejar surcos y marcas más grandes en la pieza.

Por el contrario, las partículas más pequeñas podrán conseguir mejores acabados superficiales aunque no son muy eficaces eliminando grandes cantidades de material y por eso solo se emplean en procesos de acabado.

En la tabla 2.2 se puede ver la relación entre la rugosidad requerida y el tamaño de grano recomendado.

LEYENDA DE USO ■ Altamente recomendado		ACABADO SUPERFICIAL Y TAMAÑO DE GRANO							
SUPERFICIE μ in CLA	ACABADO μ m Ra	TAMAÑO DE GRANO							
		46	60	80	100	120	150	180	220
42	1,10	■							
32	0,80	■							
26	0,70	■							
21	0,50		■						
16	0,40		■						
14	0,35		■	■					
11	0,25		■	■					
8	0,20			■	■				
7	0,17			■	■	■			
6	0,14				■	■	■		
5	0,12					■	■	■	
4	0,10						■	■	■
3	0,08							■	■
2	0,05								■

Tabla 2.2. Acabado superficial y tamaño de grano recomendado.

En la tabla 2.3 se listan los distintos tamaños de grano y su diámetro nominal dependiendo del tamiz al que pertenecen.

CLASIFICACION DE GRANOS PARA OXIDO DE ALUMINIO Y CARBURO DE SILICIO		
Grano / Tamiz Tamaño	Pulgada / milímetros (Promedio)	Micrones (Promedio)
12	0.063 / 1.600	1600
16	0.043 / 1.092	1092
20	0.037 / 0.939	940
24	0.027 / 0.685	686
30	0.022 / 0.558	559
36	0.019 / 0.482	483
46	0.014 / 0.355	356
54	0.012 / 0.304	305
60	0.010 / 0.254	254
70	0.008 / 0.203	203
80	0.0065 / 0.165	165
90	0.0057 / 0.144	145
100	0.0048 / 0.121	122
120	0.0040 / 0.101	102
150	0.0035 / 0.088	89
180	0.0030 / 0.076	76
220	0.0025 / 0.063	63
240	0.0020 / 0.050	50

Tabla 2.3. Tamaño de grano según el tamiz.

2.1.3.3. GRADO

El grado, o también denominado dureza de la muela, da una indicación de la resistencia de la muela y de la medida de la fuerza con la que el aglutinante sujeta a los granos.

La manera de indicarlo es mediante una letra mostrada en la tabla 2.4:

Designación	Característica
A-E	Muelas muy blandas
F-K	Muelas blandas
L-Q	Muelas de dureza media
R-T	Muelas duras
U-Z	Muelas muy duras

Tabla 2.4. Tamaño de grano según el tamiz.

Por lo tanto, es fundamental escoger un valor adecuado para cada proceso concreto. Una muela demasiado blanda presentara muy poca resistencia a soltar las partículas abrasivas durante el proceso, lo que acorta notablemente su vida útil. Por el contrario, si el grado es demasiado elevado puede retener granos que han perdido su capacidad de corte, aumentando la fricción y pudiendo dar lugar a fenómenos vibratorios o daños térmicos en la pieza.

2.1.3.4. MATERIAL DE UNIÓN

El material de unión o también llamado aglomerante, es el elemento que mantiene juntos los granos de abrasivo. Estos granos deben de ser capaces de soportar las fuerzas que se producen en los procesos de rectificado, así como las altas temperaturas que se generan en el mecanizado, por ello es conveniente que sean resistentes y que puedan disipar el calor generado de forma efectiva. También debe de resistir las elevadas fuerzas centrífugas debidas a las altas velocidades de rotación de la muela. El aglomerante debe ser resistente y soportar también los ataques químicos.

El material de unión debe ser capaz de retener el abrasivo durante el corte, evitando una pérdida prematura de los granos y a la vez debe liberar los granos ya desafilados de la muela que han perdido su capacidad de corte.

Los tipos de aglomerante empleados mayoritariamente son: vítreos, resinosos y metálicos. De entre estos, los más comunes son de tipo vítreo que representan aproximadamente el 50% del mercado convencional. Se emplean en rectificado de precisión y tienen una porosidad controlable. Los de tipo resinoso tienen un arranque más suave que los anteriores, además de una baja porosidad, su principal desventaja es que son menos resistentes a las altas temperaturas y que no se pueden emplear junto con fluidos alcalinos. Por último los de tipo metálico son los empleados en las muelas de superabrasivo por su bajo desgaste y elevada retención de granos. No son porosos. En general, los aglutinantes orgánicos son más flexibles y dúctiles que los inorgánicos

Los principales tipos de materiales de unión son: vítreos (V), resinas (B), caucho (R), shellac (E), silicato sódico (S), oxi-cloruros (O) o metálicos.

a. AGLUTINANTES VITREOS (V):

- Son muelas frágiles y rígidas
- Insensibles al agua, aceite o las altas temperaturas
- Se aplican en rectificado de precisión a velocidades inferiores a 35 m/s

b. AGLUTINANTES RESINOSOS (B):

- Son muelas dúctiles de alta resistencia
- Son apropiadas para trabajos a alta velocidad (45-100 m/s)
- Son adecuadas en desbaste en los que la precisión no es fundamental

2.1.3.5. ESTRUCTURA

La estructura de la muela tiene que ver con la porosidad de la misma e indica la concentración volumétrica de granos en la misma. Así, se podrán tener muelas más abiertas o cerradas en función de su porosidad.

Las muelas con estructura abierta contienen granos muy espaciados, proporcionando lugar para la eliminación de la viruta y minimizar así la posibilidad de embotamiento de la muela. De dicho factor depende la capacidad de la muela para expulsar viruta de la pieza mecanizada. También se relaciona con el área de contacto del grano que está libre de aglomerante. Cuanto más porosa sea una muela, más área de contacto tendremos entre el grano y la pieza, se emplean muelas abiertas para materiales blandos y dúctiles que producen virutas “rizadas” y cuando el volumen de viruta generado es grande. Por el contrario, una baja porosidad implica una menor área de contacto, es decir, las muelas con estructura cerrada contienen granos muy empaquetados,

Se emplean para materiales muy frágiles y cuando las áreas de contacto son pequeñas, lo que favorece el mecanizado de materiales frágiles y los procesos de acabado y precisión. Las muelas de formas intrincadas suelen ser de estructura cerrada por lo que también se suelen usar estructuras cerradas para acabados finos.

Esta propiedad de la muela también se conoce como porosidad o grado de apertura de la muela y se designa con un número. Empezando por el 1 cuando la porosidad es mínima y aumentando el número a medida que aumenta el grado de apertura.

En la siguiente figura 2.17 se puede observar una imagen con las diferencias entre una estructura abierta o porosa y una estructura cerrada o de grano compacto.

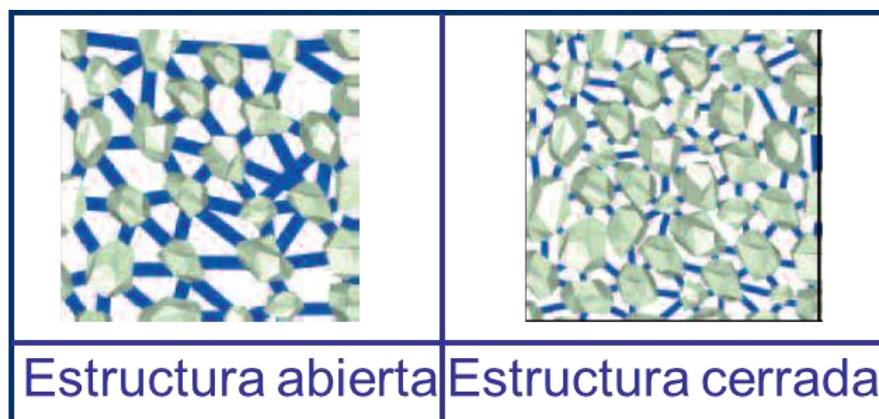


Figura 2.17. Diferencia gráfica entre estructura abierta y cerrada.

Se puede ver de forma gráfica como varía el grado de apertura en el gráfico 2.18, siendo de izquierda a derecha de más densa a mas porosa.

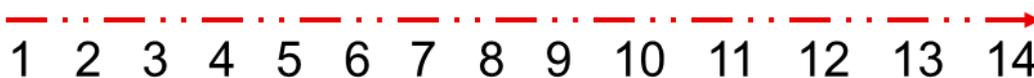


Figura 2.18. Diferencia gráfica entre estructura abierta y cerrada.

La indicación para la estructura de la muela es opcional y se hace por uno o dos números que se puede observar en la tabla 2.5.

Grado	Tipo de muela	Espaciado de grano
1-4	Densa	Cerrado
5-7	Normal	Medio
8-11	Abierta	Separado
12-14	Muy abierta	Muy separado

Tabla 2.5. Clasificación de la orosidad de la muela.

2.1.4. EXPECIFICACIÓN NORMALIZADA DE LA MUELA

No existe una especificación normalizada completa debido al gran número de variantes que hay en las muelas, aun así, sí que existe una especificación básica normalizada sobre la cual los fabricantes realizan las modificaciones que estiman oportunas.

Para poder identificar fácilmente las propiedades de los tres elementos que componen una muela convencional, se emplea pues, una designación normalizada en la que se describen las siguientes propiedades: naturaleza del material abrasivo y su tamaño de grano, grado de la muela o resistencia del aglomerante y por último la naturaleza del aglutinante, porosidad o estructura y material aglomerante. En la práctica suelen aparecer codificaciones más complejas con elementos opcionales.

En la tabla 2.6 se puede ver una tabla con los distintos elementos normalizados. Además de esto, también se incluyen las dimensiones principales de la muela en milímetros y la velocidad periférica máxima recomendada por el fabricante en metros por segundo.

Abrasivo	Tamaño de grano		Grado	Estructura	Aglutinante
A-Alúmina	Grosero 10, 12, 14, 16, 20, 24	Medio	A-I Blanda	1 a 15	V-Vitreo
C-Carburo de Silicio		30,36, 46, 54, 60	J-P Media		Densa a abierta
	Fino 70, 80, 90,100, 120, 150, 180	Muy Fino 220, 240, 280, 320, 400, 500, 600			

Tabla 2.6. Designación de muelas convencionales.

Un ejemplo:

PREFIJO A 60 I 5 V SUFIJO

Dónde:

Prefijo: Calidad no química del abrasivo. No está normalizado

Sufijo: proceso de fabricación de muela o aglutinante. No está normalizado

5: estructura de la muela

Una especificación básica de una muela típica sería la siguiente:

A 60 L V

- A se corresponde con el material del grano (alúmina).
- 60 con el tamaño de grano, L con el grado de la muela.
- V con el tipo de aglutinante (vítreo).

El primer elemento es una letra que indica el material de los granos abrasivos. Se emplea la A para designar al óxido de aluminio (alúmina), la C para el carburo de silicio, D para el diamante policristalino y B para el CBN. Esta letra puede estar acompañada por un prefijo numérico que añade más información sobre el abrasivo, como puede ser la inclusión de otros elementos para variar sus propiedades.

El segundo término es un número de dos o tres cifras que indica el tamaño de grano, que esta normalizado y es diferente dependiendo de la norma (DIN ISO, JIS, ANSI) de la que se trate.

Después del tamaño de grano está el grado de la muela que indica la resistencia que tiene el aglomerante para mantener los granos unidos entre sí. Esta se designa con una letra del abecedario. Se emplean las primeras letras para designar las muelas menos resistentes y las finales para las más resistentes.

El anteúltimo elemento es un número que indica el grado de apertura de la muela. Se emplea el 1 para las muelas más densas y aumenta la apertura a medida que aumenta el número.

Por último se designa con una letra el material empleado como aglomerante, vítreos [V] o resinosos [B]. Este término suele incorporar algún sufijo que aporta información extra sobre las distintas características del aglomerante.

Tanto los sufijos y prefijos añadidos a la designación de las muelas convencionales, o como en el caso de las muelas de superabrasivo, Las especificaciones de las muelas de superabrasivo no están normalizadas, es decir, dependen completamente del diseño del fabricante y por tanto no hay una designación estandarizada, y depende totalmente del criterio del fabricante.

Un ejemplo de designación normalizada es el de la muela de la figura 2.18:

-82AA 36 k 6 VW

- En él se puede ver que el material del abrasivo es el óxido de aluminio (AA) y el prefijo 82 indica se le han añadido algunos elementos para alterar sus propiedades.
- A continuación se indica el tamaño de grano, en este caso 36, lo que corresponde con un diámetro nominal de $483\mu\text{m}$.
- La k indica una dureza media de la muela, para este caso se estaría hablando de una dureza media.
- 6 hace referencia a un grado de apertura que sería correspondiente a un grado de apertura medio.
- Por último, la V del final designa el aglomerante como de tipo vítreo y el sufijo que lo acompaña (W) aporta información extra sobre él, y depende del fabricante.



Figura 2.18. Un ejemplo de muela disponible en el taller.

2.1.5. CONSIDERACIONES ENERGÉTICAS DEL PROCESO

Estudiar y analizar las fuerzas que aparecen en el proceso de rectificado es un tema de gran importancia debido al papel que estas desempeñan en la deformación de la muela y la pieza, así como, en la cuantificación de la energía puesta en juego durante el proceso.

Si se compararan cuantitativamente las fuerzas que existen en rectificado con las fuerzas existentes en otros tipos de mecanizado (fresado o torneado) se observa que dichas fuerzas son de un valor apreciablemente menor. Así mismo, la relación de fuerzas existentes es diferente, mientras que en torneado o fresado la fuerza tangencial es mayor que la normal, en rectificado sucede lo contrario por tratarse de un mecanizado abrasivo. Un mecanizado de este tipo se caracteriza por la existencia por un rozamiento grande entre herramienta y pieza, por lo que, se genera una gran cantidad de energía por fricción. Unido a esto, la baja tasa de arranque de material implica que desde el punto de vista energético el proceso resulta poco eficiente.

Las fuerzas existentes en el proceso aplicadas sobre la muela se pueden descomponer en fuerza normal (F_N), fuerza axial (F_A) y fuerza tangencial (F_T). La fuerza axial es la responsable de la deformación lateral, de todas maneras, es muy pequeña en módulo por lo que no suele tomarse en consideración en los estudios del proceso. De esta forma, la descomposición de fuerzas queda como se puede observar en la figura 2.19. El valor de cada una de ellas viene determinado por la suma vectorial de las fuerzas que cada grano individualmente ejerce sobre la pieza durante el mecanizado.

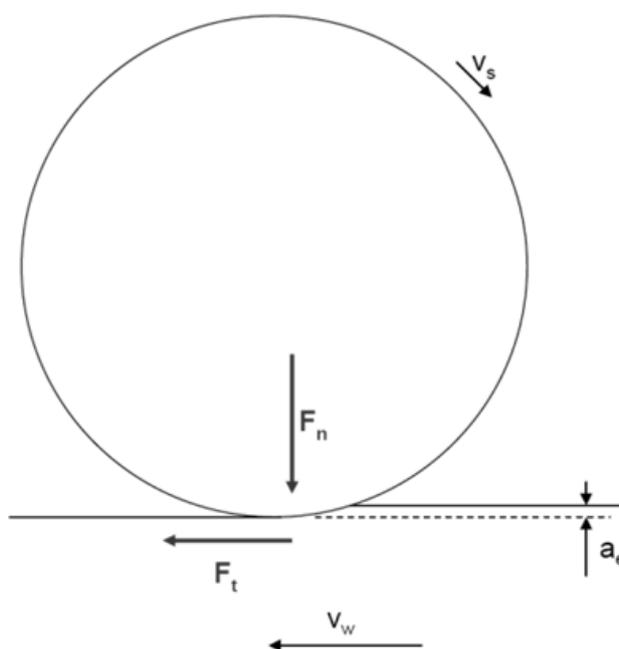


Figura 2.19. Descomposición de fuerzas en rectificado cilíndrico.

La fuerza normal, F_N , va a influir en la longitud de contacto entre muela y pieza, debido a esto, conocerla es importante. Así mismo, la fuerza tangencial, F_T , va a influir en la energía puesta en juego y, de esta manera indirecta, en las temperaturas alcanzadas en la pieza.

Tomando la definición, según la ecuación 1, de potencia consumida en el proceso P, para el caso del rectificado se obtiene:

$$P = F_C \cdot V_C = F_T \cdot V_S$$

Ecuación 1. Obtención de la potencia.

Donde F_C y V_C se corresponden con la fuerza y velocidad de corte respectivamente para un proceso de mecanizado genérico. En esta ecuación se puede ver como la generación de energía depende directamente de la componente tangencial de la fuerza obtenida en el proceso.

A partir de esto, cabe comentar que, cuando las muelas se encuentran recién diamantadas o en buen estado, presentaran unas fuerzas relativamente bajas (junto con un consumo de energía relativamente reducido) y buena calidad de pieza. Cuando la muela presenta un desgaste excesivo, aparte de generarse unas fuerzas altas (junto con un elevado consumo de potencia), pueden aparecer problemas vibratorios, pérdida de la calidad de la pieza, aparición de daño térmico, etc.

Un parámetro importante a la hora de definir energéticamente el proceso de rectificado es la energía específica de rectificado (e_c). La definición de este parámetro es la siguiente: es la energía empleada en el arranque de una unidad volumétrica de material. Esto es, equivalente al valor inverso de la eficiencia del proceso, entendida esta como la cantidad de material mecanizado por consumo de potencia unitario, mostrada en la ecuación 2.

Matemáticamente queda representado así:

$$e_c = \frac{P}{Q_w} = \frac{F_t \cdot v_s}{b_s \cdot a_e \cdot v_w}$$

Ecuación 2. Obtención de la energía específica de corte.

En dicha ecuación Q_w se corresponde con el caudal de viruta obtenido y B_s con la anchura de muela empleada.

Mediante la energía específica de rectificado por tanto, se puede determinar la eficiencia del proceso.

A modo de ejemplo se presenta la figura 2.20, en la cual se pueden observar los resultados de energía específica de corte frente a espesor de viruta equivalente obtenidos en ensayos de rectificado de acero de herramientas AISI D2 de 58HRC de dureza con una muela de rectificado convencional cuya especificación es 88A46J7V217. La velocidad e avance de la mesa V_w es de 10 m/min. En dicha figura se puede ver que a menor h_{eq} , mayor energía específica de rectificado. Este es el denominado efecto tamaño, que consiste en que a menor arranque de material, mayor e_c , y menor eficiencia presenta el proceso.

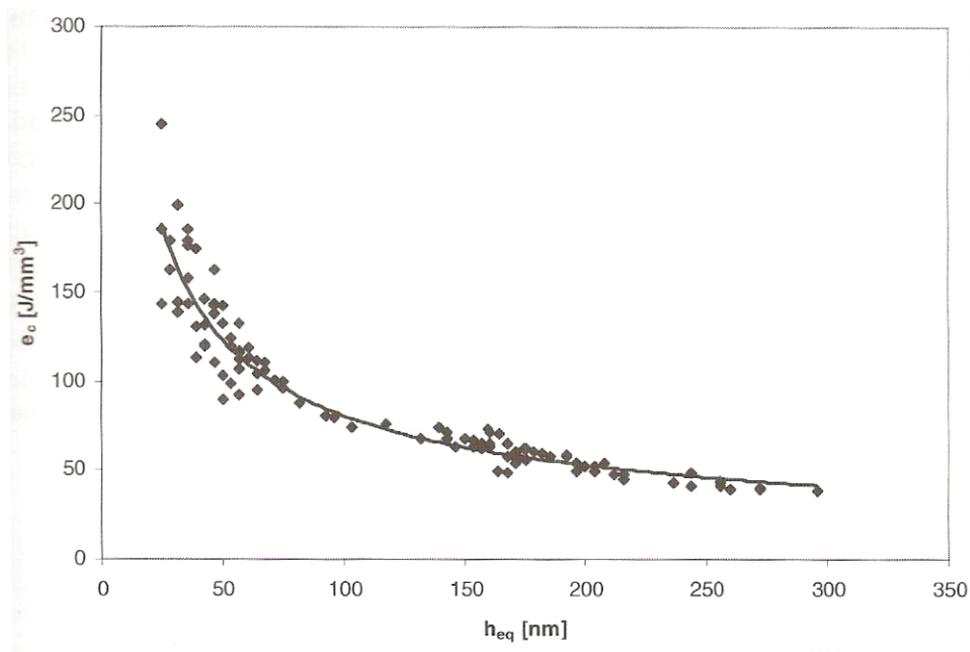


Figura 2.20. Variación de la energía específica de corte en función del tamaño de viruta.

Analizando la energía específica de corte a partir de las teorías de Kannappan y Malkin, ésta se puede dividir entre sumando tal y como se ve en la ecuación 3:

$$E_c = E_{ch} + E_{pl} + E_{sl}$$

Ecuación 3. Obtención de la energía específica total de corte.

Dichos sumando provienen de los tres mecanismo de arranque aceptados en rectificado y propuestos por vez primera por Hahn, formación de viruta, rozamiento o deslizamiento y deformación. Así coma, E_{ch} se corresponde con la energía específica de formación de viruta, E_{pl} se corresponde con la energía específica de deformación y E_{sl} se corresponde con la energía específica de rozamiento.

Malkin hace un análisis exhaustivo de la energía específica de formación de viruta. Así como, dicha energía está referida a la energía específica empleada en cizallar el material. El proceso de cizalladura se da de una manera adiabática y a una gran rapidez. Bajo estas condiciones, la energía específica de cizalladura será constante para cualquier condición de rectificado. Por lo tanto, en este caso, toda variación en la energía específica de corte se va a deber a variaciones sufridas por la energía específica de deformación para cada caso. En esta línea el autor hace un análisis de las temperaturas alcanzadas por la viruta y su influencia en el proceso. Predice de esta manera que las temperaturas alcanzadas por dichas virutas son próximas al punto de fusión del acero. Esto provoca que la cizalladura del material se pueda realizar por la poca resistencia mecánica que presentaran las zonas próximas. Mediante ensayos experimentales utilizando microscopia electrónica, el autor observa que las virutas obtenidas no se han fundido durante el proceso de rectificado. Partiendo de esto, se sugiere que la energía de formación de viruta estaría limitada por la energía de fusión del material rectificado y dependería fundamentalmente del material del que se tratara.

En cuanto a la energía específica de deformación, esta depende fundamentalmente de los parámetros propios del proceso. Así, según Kannappan y Malkin, dicha energía específica es independiente del tamaño de grano de la muela y generalmente su valor es menor a medida que aumentan la velocidad de corte o la profundidad de pasada. De acuerdo con este planteamiento, esta energía está asociada al efecto tamaño previamente mencionado.

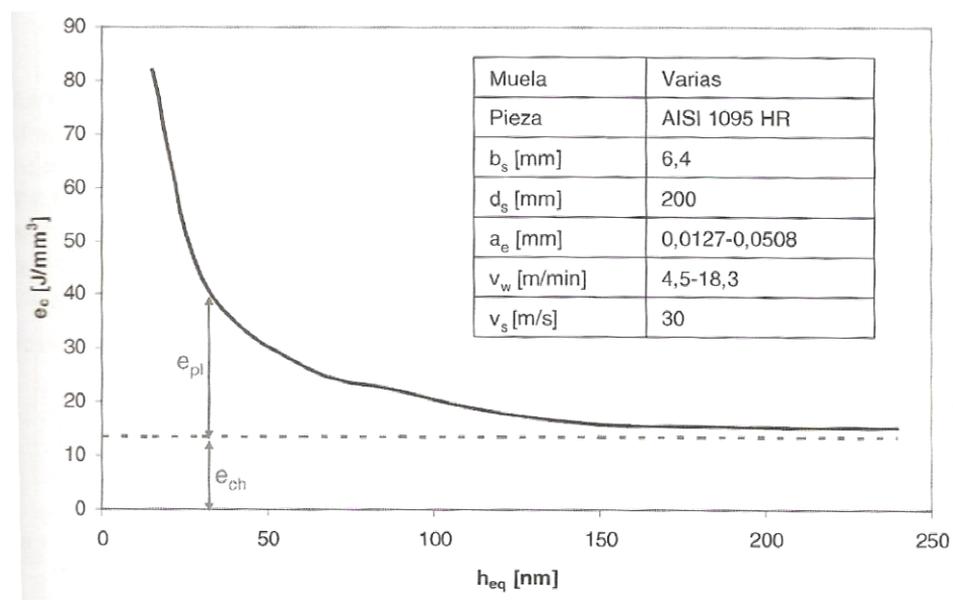


Figura 2.21. Variación de la energía específica de corte en función del tamaño de viruta.

En el caso de tener la muela recién diamantada, se puede suponer que la energía específica debido al rozamiento es nula. Teniendo esto en cuenta, la energía específica total se corresponde con la energía específica de cizalladura más la energía específica de rozamiento.

Si se toma una gráfica similar a la mostrada en la figura 2.21, teniendo en cuenta que la muela esta recién diamantada y que, según lo visto hasta ahora, la energía específica de cizalladura es constante se obtiene lo siguiente:

Por otra parte, y en lo que se refiere a la energía específica de rozamiento, su valor no es constante y es directamente proporcional al desgaste del grano (wear flat área) [Kan72]. De esto se deduce de que a mayor desgaste de grano, menor filo tendrá este, y en consecuencia, aumentará el rozamiento entre muela y pieza. Este efecto se puede ver claramente en los resultados obtenidos por kannappan y malkin [Kan72] en la figura 2.22, en la cual se representa la energía específica de corte con respecto al porcentaje de are de wear flat en la superficie de la muela.

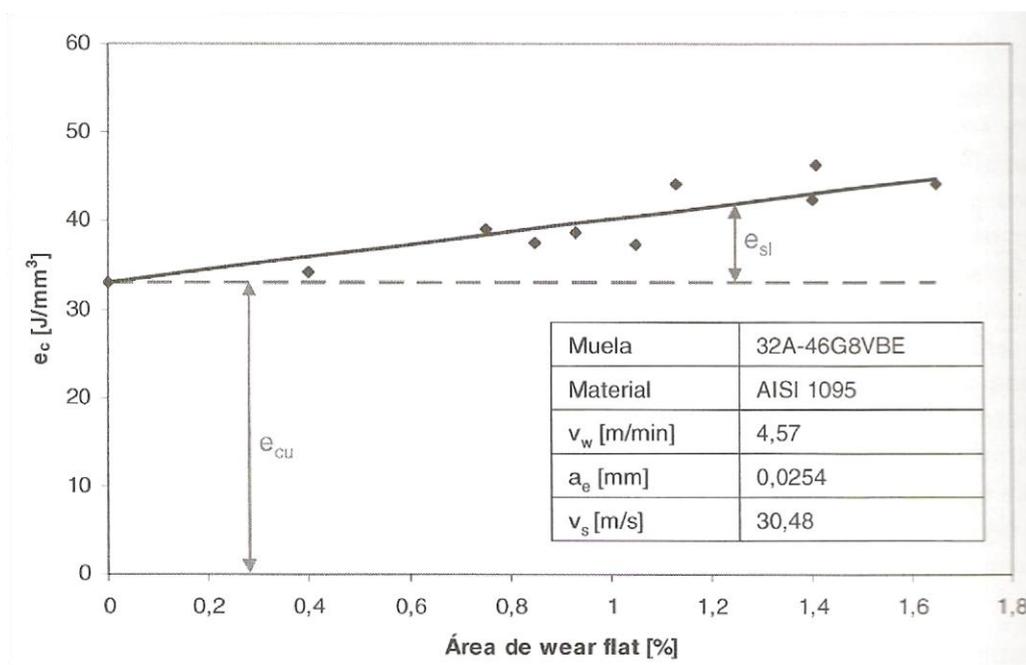


Figura 2.22. Variación de la energía específica de corte en función del wear flat.

2.1.6. DESGASTE DE MUELAS EN RECTIFICADO

A medida que avanza el proceso de rectificado la muela utilizada para llevarlo a cabo sufre un cierto desgaste. Dicho desgaste se debe fundamentalmente a las fuerzas implicadas en el proceso. Un desgaste excesivo de la muela puede llevar a una variación de las condiciones del proceso, así como a un empeoramiento de la calidad superficial de la pieza rectificada.

Los tipos de desgaste que puede sufrir una muela son tres: Una variación en la superficie de la muela a nivel macrogeométrico, una pérdida de redondez o aparición de un cierto salto radial y una pérdida de la capacidad de corte.

Atendiendo al tipo de rectificado que se esté llevando a cabo (cilíndrico o plano con muelas planas o con muelas de forma, etc.) las consecuencias pueden ir desde un daño térmico superficial hasta un fallo en la geometría de la pieza rectificada o a la aparición de efectos vibratorios durante el proceso. Como ya se ha comentado, el rectificado es un proceso de precisión en el que las piezas tienen un alto valor añadido, por lo tanto, los defectos que se derivan de un desgaste excesivo de la muela no son en ningún caso admisibles.

Cuando se detecte que la muela ha sufrido un desgaste por encima de lo admisible es necesario diamantarla. Los signos que indican cuando es necesario hacer el ciclo de diamantado pueden ser o bien que las piezas que se están fabricando empiezan a aparecer defectos o bien que se detecte en el cabezal un consumo excesivo de potencia.

Definir de manera correcta los intervalos de diamantado es de vital importancia de cara a obtener el máximo rendimiento de una muela.

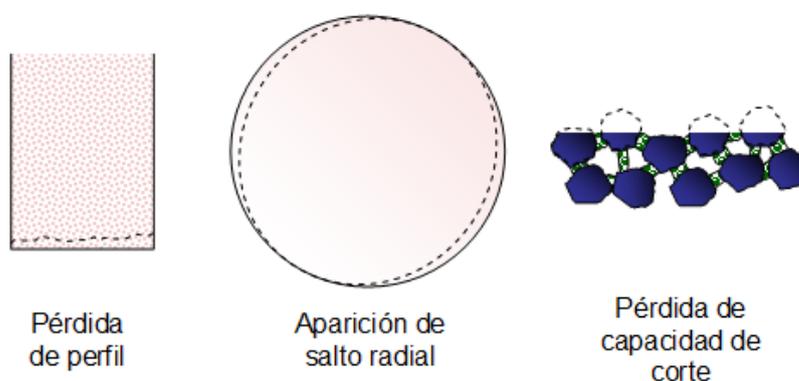


Figura 2.23. Ejemplos de problemas comunes en muelas abrasivas.

En la figura 2.23 se puede observar los problemas más comunes en una muela, dichos problemas frecuentes son solucionados mediante procesos de diamantado.

El diamantado consiste básicamente en eliminar una capa superficial de la muela “torneándola” con una punta de diamante como se puede ver en la figura 2.24. Es el proceso de recuperar una muela cuando ha llegado al final de su vida útil. Mediante este proceso se elimina la capa de granos desgastados y se sacan a la superficie granos nuevos con capacidad de corte.

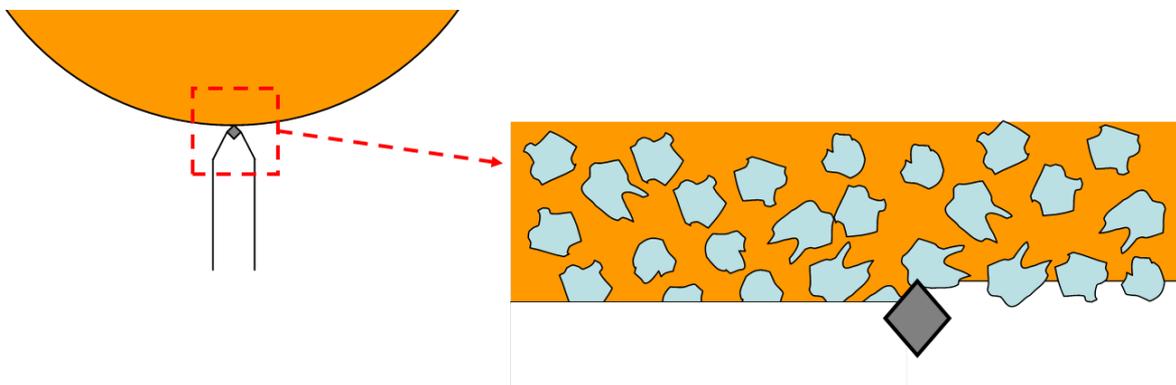


Figura 2.24. Esquema de diamantado de muela.

Para ello normalmente se utilizan herramientas de diamante porque poseen una dureza mayor que las del abrasivo y el aglutinante de la muela. La elección de uno u otro dependerá fundamentalmente de las características del proceso que se esté llevando a cabo.

Existen varios tipos de diamantes: monopunta, multipunta y moletas. Un ejemplo de cada uno de ellos se puede ver en la figura 2.26.

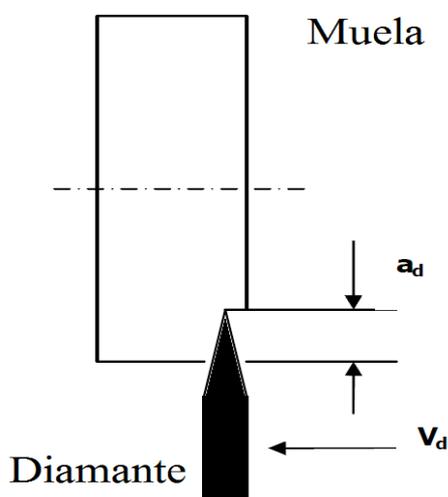


Figura 2.25. Proceso de diamantado de muela.



Figura 2.26. Distintos tipos de diamantadores.

Elegir correctamente el tiempo entre diamantados es de suma importancia a la hora de maximizar el rendimiento de la muela. Un intervalo demasiado largo, puede implicar la aparición de defectos en las piezas o un consumo elevado de potencia en el eje de la muela. Por el contrario, un intervalo corto implica acortar la vida de la muela de forma innecesaria.

El mecanismo de desgaste más habitual en el rectificado convencional con muelas de perfil plano es la pérdida de capacidad de corte de la muela. Esto puede darse a causa de tres fenómenos distintos: el desgaste de grano, el desgaste del aglomerante y el embotamiento de la muela.

2.1.7. EL DESGASTE DE GRANO

El desgaste sufrido por el grano durante el proceso es en gran medida el causante de la pérdida de capacidad de corte de la muela. Así, a la hora de caracterizar el desgaste de grano hay que tener en cuenta que dicho desgaste se puede dar de cuatro formas diferentes: pérdida de filo, astillado microcristalino de grano, desprendimiento parcial de grano y desprendimiento total de grano.

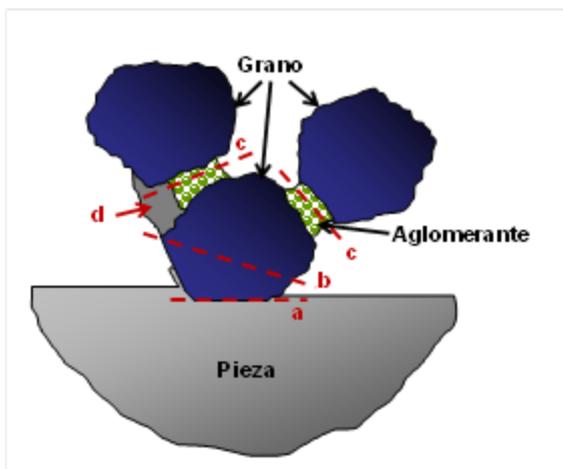


Figura 2.27. Esquema de grano abrasivo.

La pérdida de filo en los granos abrasivos se da fundamentalmente por las temperaturas alcanzadas en la intercara grano-pieza, se puede observar en la figura 2.28. Como es sabido, la mayoría de los materiales pierden sus características mecánicas a altas temperaturas, los abrasivos no son una excepción. Se estima que el óxido de aluminio, por encima de los 977K puede tener una dureza que se sitúa en torno al 25% de la dureza que posee el mismo material a temperatura ambiente.

Esta pérdida de dureza se traduce en que el desgaste producido por el rozamiento entre grano y pieza aumenta considerablemente. De esta manera, se producen en el grano de abrasivo wear flats.

En el caso de astillado microcristalino de filos y desprendimiento parcial de granos, el desgaste se produce por las tensiones térmicas y mecánicas que se dan en cada grano a lo largo del proceso. Desde el punto de vista del grano, el rectificado es un proceso interrumpido. Así, durante un breve instante de tiempo el citado grano se encuentra en contacto con la pieza sometido a altas temperaturas y a unas fuerzas considerablemente grandes.

Pasado ese instante, las fuerzas desaparecen y se produce una refrigeración del mismo gracias al fluido de corte quedándose a temperatura ambiente.

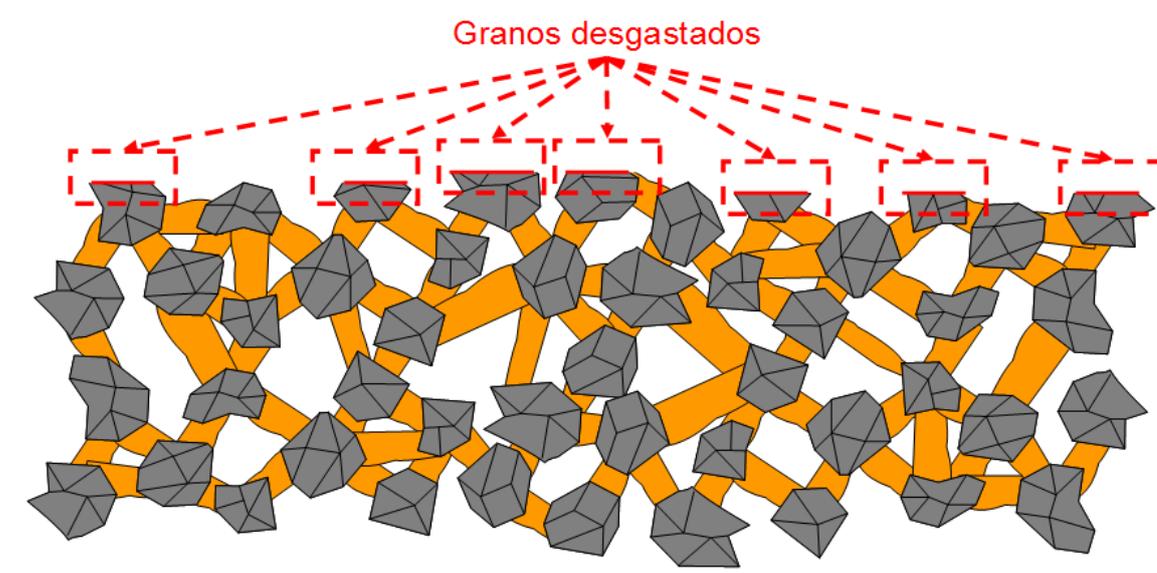


Figura 2.28. Detalle de desgaste de grano abrasivo.

Este ciclo termo-mecánico es muy rápido y tiene unos gradientes muy acusados, así, las tensiones generadas en el grano dan pie a que se formen microgrietas que deriven en desprendimientos parciales de grano. Estos desprendimientos se clasificaran en función de su tamaño, así para el caso de que sean pequeños se dirá que se ha producido un desprendimiento microcristalino del grano abrasivo, a media que su tamaño aumente se pasara a denominar desprendimiento parcial de grano, del cual se observa un ejemplo en la figura 2.29.

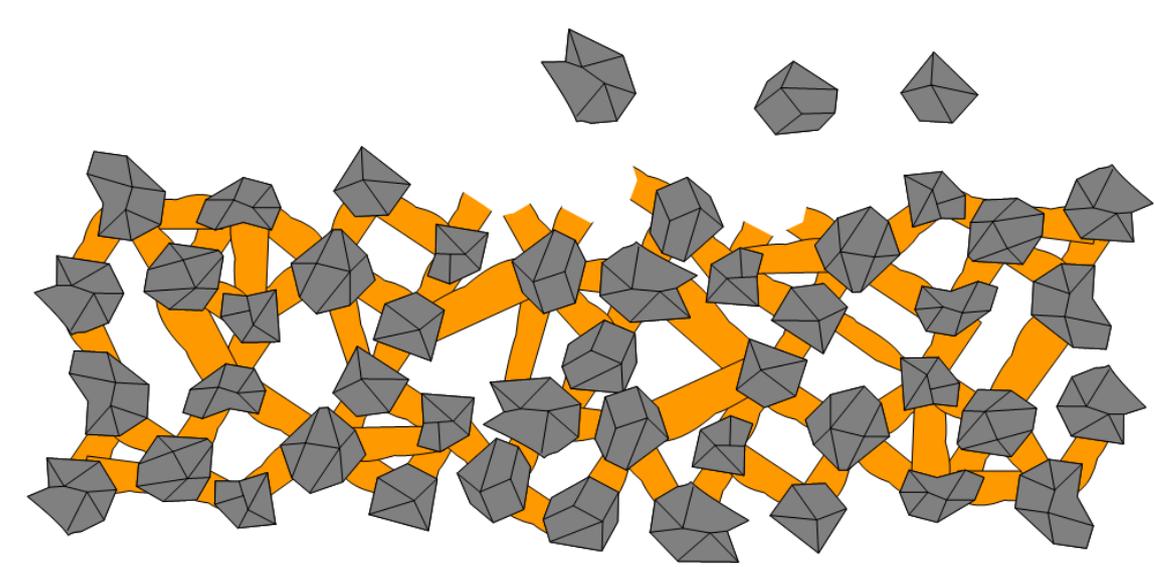


Figura 2.29. Detalle de desprendimiento de grano abrasivo.

Lo que sucede en el caso del desprendimiento de un grano es que las fuerzas que sufren los granos durante el proceso son mayores que la fuerza de retención que realiza el aglomerante sobre los mismos. Este hecho se puede deber a dos factores fundamentalmente: que la exposición del grano sea excesiva y el aglomerante no tenga suficiente superficie de contacto o a que el tipo de muela no esté preparada para soportar las fuerzas que se van a dar durante el proceso.

2.1.8. EL DESGASTE DE AGLOMERANTE

En rectificado la pérdida de la capacidad de corte de la muela no se debe únicamente al desgaste de los granos, sino que también se debe al desgaste del aglomerante. Este se produce fundamentalmente debido a la acción de las virutas de material rectificado que impactan con esa zona de la muela. Evidentemente dependiendo de las características mecánicas del material rectificado (la ductilidad por ejemplo) el tipo de desgaste sufrido por el aglomerante variara.

De cara a llevar a cabo el proceso, lo óptimo es que la exposición de los granos sea constante en toda la superficie. Para que esto se produzca, es necesario un desgaste uniforme de aglomerante y granos de tal manera que se dé el fenómeno de auto diamantado de la muela. El auto diamantado de la muela se origina cuando a medida que los granos se van desgastando se desprenden debido a las propias fuerzas del proceso y dejan paso a una nueva capa de granos con su capacidad de corte intacta.

Si este desgaste uniforme no sucede, se pueden observar dos situaciones: la primera, se produce cuando el desgaste de grano es mucho mayor que el desgaste de aglomerante y la segunda, se produce cuando el desgaste de grano es mucho menor que el del aglomerante.

En el primer caso, al desgastarse los granos, estos pierden su capacidad de corte sin ser desprendidos de la muela y aparece de nuevo el wear flat. El comportamiento del sistema está caracterizado por un aumento de las fuerzas de rectificado acompañado por un aumento de las tensiones mecánicas y térmicas. El resultado será la obtención de piezas con marcas superficiales debidos a efectos dinámicos así como la aparición de dañado de origen térmico.

En el segundo caso, lo que se produce es un “exceso” de diamantado, la exposición de los granos a medida que avanza el proceso es mayor. De esta manera, disminuyen las fuerzas de rectificado apreciablemente, sin embargo también desciende la capacidad de retención del grano por parte del aglomerante. Debido a ellos, y a pesar de la disminución de la fuerza. El grano tiende a desprenderse. El resultado es un proceso que, si bien obtiene piezas de calidad, presenta un desgaste de muela excesivo, lo que lo hace económicamente inviable.

2.1.9. EMBOTAMIENTO DE LA MUELA

El embotamiento de la muela no es un fenómeno de desgaste propiamente dicho, sin embargo, se va a realizar una breve mención al mismo debido a que en última instancia la consecuencia directa es una pérdida en la capacidad de corte de la muela.

El fenómeno de embotamiento aparece cuando debido a la imposibilidad de evacuar la viruta de forma adecuada, esta se queda alojada en los huecos que hay entre los granos de la superficie de la muela. La consecuencia de este hecho es que los granos abrasivos pierden su capacidad de corte.

El efecto por tanto es el mismo que cuando se produce un desgaste excesivo de los granos de abrasivo, esto es, un aumento de las fuerzas implicadas en el proceso y una mayor tendencia a que la pieza resulte dañada térmicamente. Se puede observar un detalle de embotamiento en la figura 2.30.

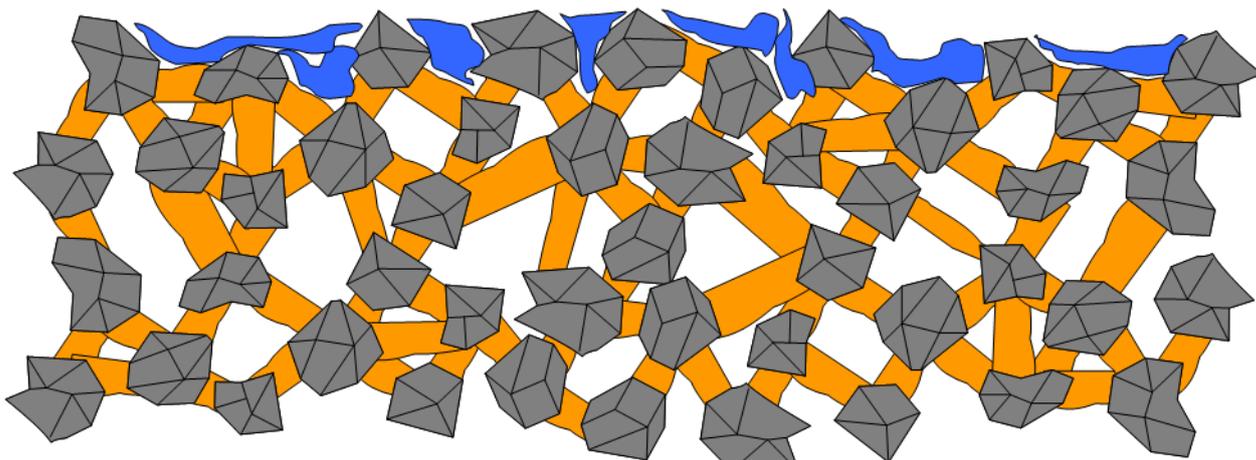


Figura 2.30. Detalle de embotamiento de grano abrasivo.

Evidentemente, el embotamiento de la muela será más notorio cuando se rectifiquen materiales dúctiles o para procesos de altas tasas de arranque en los cuales las virutas serán mayores. Así, será necesario utilizar la muela y la refrigeración adecuadas atendiendo a las características del material rectificado de cara a conseguir que la muela no se embote.

2.1.10. CARACTERIZACIÓN DEL DESGASTE. G RATIO.

Es frecuente presentar el desgaste en una gráfica cuyas ordenadas se corresponda con el desgaste radial (o en su defecto volumen de muela eliminado, v_s), y sus abscisas con la cantidad de material eliminado, V_w . En la figura 2.31 se muestra una figura típica del desgaste de una muela.

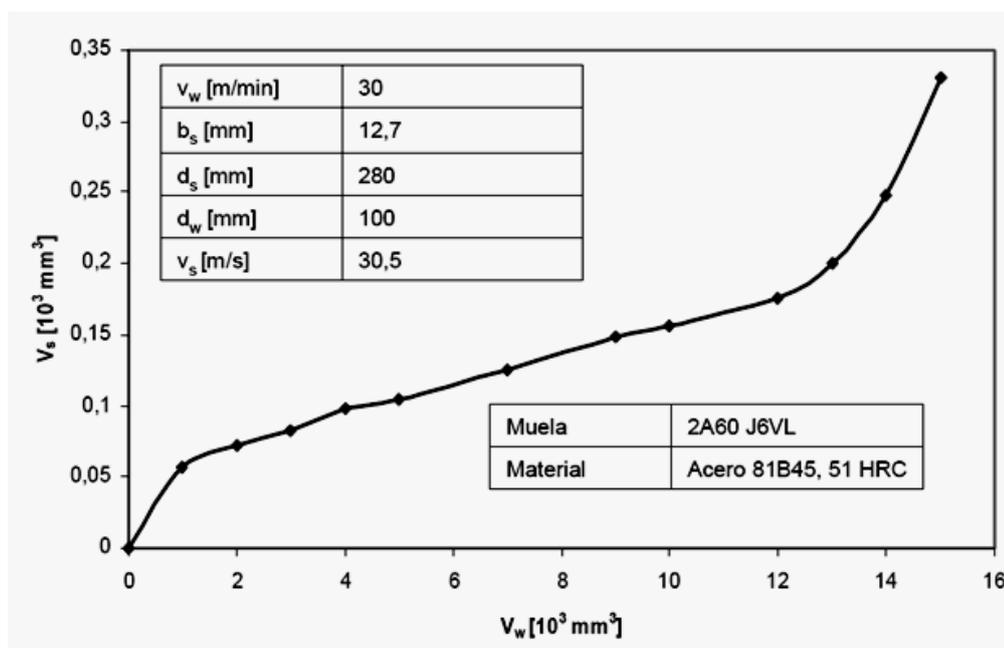


Figura 2.31. Detalle de curva característica de desgaste en rectificado.

En la curva de desgaste se pueden observar tres zonas diferenciadas apreciables más esquemáticamente en la figura 2.32.

La primera se corresponde con un rápido despuntado inicial de los granos al empezar el proceso. Esa primera zona de desgaste estará influenciada principalmente por los parámetros de diamantado que se ha llevado a cabo y no es representativa del desgaste que sufre la muela en su vida útil.

La segunda zona se corresponde con un desgaste lineal de pendiente cuasi-constante. La pendiente de dicha zona dependerá del tipo de muela y de los parámetros del proceso. Los parámetros de diamantado apenas tendrán influencia en el desgaste. Es la zona más grande las tres, y por lo tanto, la zona en la que mayoritariamente trabajara la muela. Debido a ello, esta será la zona que habrá que caracterizar para analiza el desgaste de la muela.

Esta caracterización se realiza hallando la razón de rectificado, G , que se halla mediante la ecuación 4:

$$G = \frac{\Delta V_w}{\Delta V_s}$$

Ecuación 4. Obtención del G ratio.

Donde ΔV_w y ΔV_s son el material eliminado en la zona 2 de la gráfica y el desgaste sufrido por la muela entre esos dos mismos puntos respectivamente, medidos en mm^3 de material. Si se analiza esta expresión se verá que se corresponde con el la inversa de la pendiente de la recta de la zona 2 de la gráfica de desgaste.

La tercera zona de desgaste es una zona de un desgaste muy alto que puede finalizar en una rotura catastrófica de la muela. En la práctica, lo ideal es que esa zona nunca se alcance. En el caso de un proceso de rectificado plenamente optimizado los ciclos de diamantado se situaran al final de la zona 2 de la curva de desgaste.

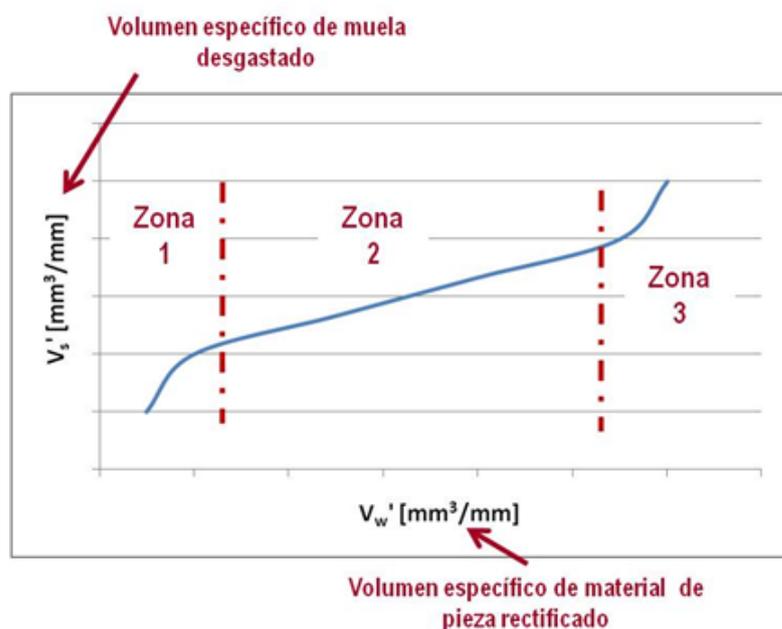


Figura 2.32. Detalle de las tres zonas de desgaste en rectificado.

El valor de G varía mucho de un tipo de muelas a otras. Cuando mayor sea G menor será el desgaste de muela, y en principio, esto será beneficioso. Sin embargo, a partir de los comentado en el apartado anterior, esto puede implicar una descompensación entre el desgaste de grano y el desgaste de aglomerante que conllevaría la pérdida de capacidad de corte de la muela.

2.1.11. EL BALANCE ENERGETICO DEL PROCESO

Como ya se ha comentado, en rectificado se pone en juego una gran cantidad de energía pero el problema térmico consiste básicamente en determinar cuanta de esa energía se evacua por la pieza y en consecuencia cuales son las temperaturas alcanzadas en la misma. Para ello, y a partir de todas las consideraciones hechas hasta el momento, es interesante hacer un balance térmico del proceso y analizar cuáles son los caminos principales de evacuación de calor.

La energía puesta en juego por unidad de tiempo se obtiene mediante la recogida de fuerzas y la utilización de la siguiente ecuación. Así mismo, midiendo la potencia consumida por la maquina durante el rectificado y teniendo en cuenta el rendimiento del cabezal es posible obtener dicho valor. De cara a manejar dicho valor de energía se suele tomar el flujo de energía por unidad de área (Q_t) según la ecuación 5.

$$G = \frac{F_c \cdot v_c}{b_s \cdot l_c}$$

Ecuación 5. Obtención de la energía del proceso.

La energía que toma parte en el proceso se puede llegar a evacuar por cuatro caminos diferentes: por la pieza rectificada (Q_w), por la viruta (Q_{ch}), por el fluido refrigerante (Q_f) y por la propia muela (Q_s). La siguiente ecuación muestra dichos caminos de evacuación de la energía según la ecuación 6.

$$Q_t = Q_w + Q_{ch} + Q_f + Q_s$$

Ecuación 6. Obtención de la energía calorífica del proceso.

Si se asignara un porcentaje (en tanto por 1) a cada fracción de energía, se obtendría una ecuación con la siguiente formula, mostrada en la ecuación 7:

$$Q_t = R_w \cdot Q_t + R_{ch} \cdot Q_t + R_f \cdot Q_t + R_s \cdot Q_t$$

Ecuación 7. Obtención de la las energías caloríficas evacuadas.

Donde los parámetros R_i indican el porcentaje de energía en tanto por uno evacuado por cada uno de los cuatro caminos.

De esta manera de cara a hacer un análisis térmico riguroso del proceso es preciso conocer todos los sumando presentes en la ecuaciones del balance energético del proceso. Esto, sin embargo, puede resultar difícil debido a la complejidad teórica de cálculo que pueden presentar los diferentes sumando de dicha ecuación. Es por ello, que la mayoría de autores se centran simplemente en estudiar R_w , que se corresponde con la fracción de energía evacuada a través de la pieza. Se puede observar un detalle de los parámetros en la figura 2.33.

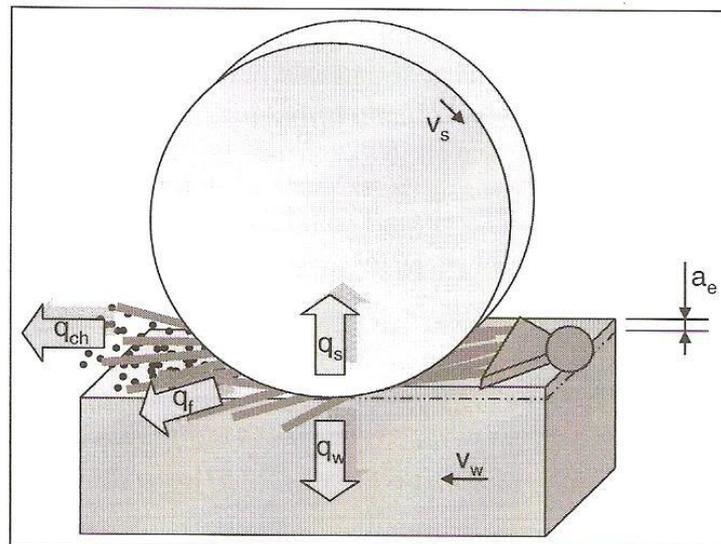


Figura 2.33. Esquema de fuerzas en rectificado cilíndrico.

De cara a estudiar y cuantificar el valor de R_w se han hallado dos posibles maneras: mediante una estimación puramente teórica partiendo de ciertas hipótesis simplificadoras, o mediante cálculo inverso, es decir tomando temperaturas en el proceso e igualando a las temperaturas conseguidas por los modelos matemáticos.

2.1.12. EL PAPEL DEL FLUIDO DE CORTE

El fluido de corte es un elemento muy importante en general para todos los procesos de mecanizado. El rectificado no es una excepción, así, se trata de un elemento fundamental a la hora de llevar a cabo el proceso de una manera adecuada.

2.1.12.1. FUNCIONES

Las funciones que debe cumplir un fluido de corte en el proceso de rectificado son las siguientes: refrigeración, lubricación, limpieza, mejorar la superficie obtenida y producir unas condiciones ambientales óptimas.

REFRIGERACIÓN

Las temperaturas que alcanza la pieza a medida que se lleva a cabo el proceso tenderán a ser altas. Unas temperaturas excesivas en la pieza pueden generar daños de diversa índole como se explicará en el apartado 1. Así, se antoja necesario que en la medida de lo posible se puedan reducir dichas temperaturas. Para ello se opta por introducir en el proceso un fluido de corte ya que éste evacuará parte del calor generado en la zona de contacto. Así mismo, será importante la acción refrigeradora del fluido de corte en la zona de no contacto para evitar que se produzca un calentamiento general de la pieza a medida que se van sucediendo las diferentes pasadas de rectificado.

El fluido de corte, por tanto, deberá presentar una capacidad refrigeradora óptima para poder llevar a cabo el proceso de manera correcta.

LUBRICACIÓN

Durante el rectificado, y debido a que se trata de un proceso de mecanizado abrasivo, se genera un gran rozamiento entre muela y pieza. La consecuencia directa es que se trata de un proceso poco eficiente en término de energía consumida por volumen de material rectificado. Este exceso de energía que se produce durante el rectificado se traduce en un aumento de la energía evacuada a través de la pieza y su consiguiente aumento de temperatura. Así mismo, el aumento de lubricación en la intercara grano-pieza deriva en una disminución de la rugosidad superficial en la pieza rectificada.

Desde este punto de vista, reducir en la medida de lo posible el rozamiento entre muela y pieza va a conseguir reducir de manera directa el ratio de fuerzas y de manera indirecta las temperaturas alcanzadas por la pieza. Es por ello, que el fluido de corte debe tener gran capacidad lubricante de cara optimizar el proceso.

LIMPIEZA

A partir de lo explicado en el apartado 1.7, uno de los fenómenos que hay que evitar es el embotamiento de la muela. De cara a evitar este fenómeno es importante que el fluido de corte evacue la viruta generada durante el proceso. Para ello es importante que el fluido de corte se aplique de forma adecuada. Queda patente por tanto, que no es solamente importante el tipo de fluido de corte que se utilice, sino que también es sumamente importante cómo se aplique dicho fluido (diseño de la tobera, caudal, presión,...)

MEJORAR LA SUPERFICIE OBTENIDA

Uno de los problemas más graves que pueden aparecer en rectificado y es necesario evitar son los problemas de vibraciones. En rectificado plano es poco habitual que aparezcan este tipo de problemas, no así en rectificado cilíndrico y en rectificado sin centros.

En este sentido la presencia del fluido de corte en la zona de contacto puede amortiguar pequeñas vibraciones u oscilaciones que se den en la muela debido a posibles choques o inestabilidades que se puedan originar en el proceso. Esto redundará en una mejora del acabado superficial obtenido.

GENERAR UNAS CONDICIONES AMBIENTALES ÓPTIMAS

Por último, cabe comentar que durante el proceso y debido a las temperaturas alcanzadas por la superficie de la pieza se puede producir una oxidación acelerada que decolore la pieza. Este fenómeno se comentará de manera más extensa en el apartado 1. Por el momento, baste decir que la presencia del fluido de corte en la superficie de la pieza reducirá el contacto de ésta con la atmósfera y por lo tanto, reducirá la oxidación de la superficie.

2.1.12.2. COMPOSICIÓN Y TIPOS

Atendiendo a la norma DIN 51 385 los fluidos de corte en rectificado siuen la siguiente clasificación:

- Fluidos no solubles en agua: no se mezclan con agua en prácticamente ninguna ocasión.
- Fluidos solubles en agua: son emulsiones y miscibles en agua, que se añade previamente a su uso.
- WFC (*Water Composite Fluids*): son compuestos que vienen de fábrica listos para usarse. Normalmente son fluidos solubles en agua ya preparados.

FLUÍDOS NO SOLUBLES EN AGUA

Están compuestos en un 80-95% por un hidrocarburo natural o sintético que puede ser aceite mineral procedente del refinado de combustibles fósiles, poli-alfa-olefinas o éster sintético.

Este tipo de fluidos genera una fina película en las zonas de corte entre la muela y la pieza. Su acción predominante es la de lubricación. Así, en general, la utilización de este tipo de fluido de corte frente a los solubles en agua disminuirá las fuerzas tangenciales obtenidas, si bien no se obtendrá una tendencia clara en cuanto a las fuerzas normales. Así mismo, disminuirán la rugosidad obtenida en la pieza rectificada y el desgaste de la muela.

Sin embargo, estos fluidos presentan un cierto grado de peligrosidad debido a su alta inflamabilidad. Durante el proceso, normalmente se genera una neblina a partir del fluido de corte que rebota contra la pieza. Si se tienen en cuenta las virutas incandescentes que se generan durante el proceso, dicha neblina de aceite puede ser potencialmente cauda de accidentes. Con el fin de evitar es problema la tendencia es usar aceites viscosos. Esto no es beneficioso para el proceso, ya que a medida que el fluido de corte sea más viscoso, más le costará penetrar en la zona de corte.

A partir de lo explicado hasta el momento, se deduce que se trata de un tipo de fluido de rectificado especialmente adecuado para conseguir unos buenos acabados superficiales pero posee una baja capacidad de refrigeración.

FLUIDOS SOLUBLES EN AGUA Y WFC-S

Este tipo de fluidos están compuestos por un aceite especial disuelto en agua. La concentración oscila entre el 2 y el 6% para aplicaciones de rectificado convencional pudiendo llegar a ser de un 20% para desarrollos específicos del proceso.

El aceite disuelto en el agua a su vez no tiene una composición estándar. Así, contiene entre un 20 y un 70% de aceite mineral al que se le añaden diversos aditivos para mejorar tanto sus propiedades como su solubilidad.

Las propiedades de este tipo de fluidos dependen por un lado de las características del aceite que se disuelva en el agua y por el otro lado de las características del agua utilizada para realizar la disolución.

En general y comparándolos con los fluidos de rectificado no soluble en agua presentan una mayor capacidad de refrigeración y una menor capacidad de lubricación. Así mismo, presentan un grado de peligrosidad menor que los anteriores debido a que tienen un grado de inflamabilidad prácticamente nulo.

Por otra parte, este tipo de fluidos presenta una gran dificultad para su tratamiento y reciclaje. Así mismo, presentan un impacto ambiental relativamente alto.

ADITIVOS

Los aditivos son elementos que se les añaden a los diferentes fluidos de corte existentes para mejorar alguna de sus propiedades físico-químicas como pueden ser solubilidad, resistencia a la corrosión, viscosidad o capacidad lubricante. La tipología es muy variada y específica para cada caso.

2.1.12.3. EQUIPAMIENTO

El sistema que se utiliza para el mantenimiento y aplicación del fluido de corte en rectificado tiene que cumplir una serie de funciones importantes para llevar a cabo el proceso de forma adecuada como son las siguientes: proveer de fluido al proceso de forma ininterrumpida, reducir el impacto ambiental del fluido de corte y reducir los costos de mantenimiento y tratamiento de los fluidos de corte. Así, deberá tener unas características específicas atendiendo a las particularidades del proceso.

Para el rectificado, el equipamiento necesario consta de dos partes diferenciadas, el sistema de aplicación y el sistema de filtrado.

2.1.12.4. SISTEMAS DE APLICACIÓN

El sistema de aplicación está compuesto por la bomba y la tobera de aplicación las cuales se definirán por separado a continuación.

La principal misión de la bomba consiste en suministrar el fluido de corte a una presión suficiente para que este consiga acceder a la zona de contacto. Dependiendo de las características del proceso se pueden utilizar una gran variedad de bombas que se ajusten a las necesidades de dicho proceso. De cara a su correcto funcionamiento hay que tener en cuenta un aspecto importante que está relacionado con el sistema de filtrado que se analizará en el siguiente apartado. Éste consiste en la importancia de que el fluido esté libre de impurezas al pasar por la bomba. La presencia en el mismo de partículas abrasivas de la muela así como de virutas de la pieza rectificada puede acelerar el desgaste de los álabes de la bomba acortando su tiempo de funcionamiento e incrementando los costos de mantenimiento del sistema.

En cuanto a la tobera, la principal misión consiste en orientar el flujo de tal manera que éste penetre en la zona de contacto. La principal dificultad para conseguir esto consiste en romper la barrera de aire generada alrededor de la muela, fenómeno que merece la pena ser comentado.

Inasaki plantea que dicha barrera está constituida por dos flujos de aire. El primero es un flujo que se sitúa en la periferia de la muela y gira solidariamente con ella y el segundo es un flujo de aire en la dirección normal a la superficie de la muela generado por la fuerza centrífuga derivada de su movimiento de rotación.

Para corroborar esto Brinksmeier et al. Llevaron a cabo un ensayo consistente en hacer girar una muela sumergida parcialmente en un fluido a velocidades de rectificado ($v_s = 33\text{m/s}$). Los resultados muestran cómo alrededor de la muela se genera una capa de aire de $80\mu\text{m}$ de espesor.

En el centro tecnológico IDEKO, se ha reproducido el experimento en un banco de ensayos específicamente preparado para ello y se ha corroborado la existencia de dicha capa de aire. La muela utilizada es una muela de óxido de aluminio convencional cuya referencia es UNESA CBL46I6V489. La velocidad de giro fue de 35 m/s .

Los propios Brinksmeier et al. hacen un recorrido por los diferentes estudios realizados sobre la influencia de la capa de aire en la aplicación de fluido en la zona de contacto y no obtienen una conclusión clara. Hay autores que minimizan su efecto mientras otros sostienen que tiene una gran importancia.

En esta línea, cabe comentar que se pueden encontrar en la bibliografía numerosos trabajos que plantean diversas alternativas que resumen Brinksmeier et al.

La clasificación de los tipos de toberas se puede realizar atendiendo a los siguientes criterios: cantidad de fluido que suministran, forma de aplicación (chorro, neblina,...) y geometría. Todas ellas presentan ventajas e inconvenientes y su uso quedará supeditado a las necesidades del proceso que se esté llevando a cabo.

La importancia que tiene el correcto diseño de las toberas así como la determinación de los parámetros adecuados (presión y caudal) para llevar a cabo una correcta aplicación de los fluidos de corte ha sido objeto de numerosos estudios desde 1979, con el propósito de obtener los valores óptimos que garanticen que el fluido penetra correctamente en la muela. El primero, desarrollado por Powell et al., es un modelo que determina la profundidad con que penetra un fluido en una muela porosa. Los parámetros fundamentales de este modelo empírico que calcula el caudal mínimo como función de la energía consumida por el eje durante el rectificado, modelo que es ampliado a otras aplicaciones por Schumack. Otros modelos han sido desarrollados, y llevan a cabo un análisis del coeficiente de convección del fluido rectificado, que modeliza el comportamiento del fluido en condiciones de turbulencia o que hace un análisis del flujo de fluido mediante técnicas de elementos finitos.

2.1.12.5. SISTEMA DE FILTRADO

El principal cometido del sistema de filtrado consiste en mantener el fluido de corte en condiciones adecuadas para su uso durante el mayor tiempo posible, Para ello, es necesario que se consiga retirar de dicho fluido todas la impurezas que se evacúan de a zona de trabajo durante la ejecución del proceso. Así, en un fluido de corte se pueden encontrar fundamentalmente os tipos de residuos: viruta proveniente de la pieza rectificada y fragmentos abrasivos de muela desprendidos bien por desgaste de la propi muela al rectificar, o bien desprendidos durante los ciclos de diamantado.

Mantener limpio el fluido se antoja necesario para alargar la vida de la bomba que conduce al fluido de corte hacia la tobera. Así mismo, hay que tener en cuenta que si el fluido de corte se aplica sin estar correctamente filtrado se introducirán en la zona de contacto elementos que contribuirán a empeorar la calidad superficial de la pieza rectificada. Por último, cabe mencionar que si no se lleva a cabo un mantenimiento adecuado del fluido de corte, su vida útil disminuirá sensiblemente. Como se verá en el siguiente apartado, esto acarreará una doble problemática, por un lado de índole económica, y por otro lado de índole medioambiental.

La base de los primeros sistemas de filtrado era la decantación de las impurezas en depósito específico para ello. Las principales ventajas de este sistema son su sencillez y poco espacio ocupado en planta. Sin embargo, se trata de un sistema poco adecuado para procesos de alta productividad.

Hoy en día, en los sistemas de filtrado se incorporan sistemas mecánicos, electromagnéticos y biológicos para llevar a cabo el mantenimiento del fluido de corte. Esto ha derivado en un incremento de la complejidad del sistema así como en un incremento del espacio ocupado en planta por el mismo. Por ejemplo, para una rectificadora convencional HidroPrecis fabricada en los años 70 el porcentaje de espacio ocupado por el sistema de filtrado se corresponde con el 10% para una rectificadora Danobat nueva, el sistema de filtrado puede llegar a ocupar el 70% de la máquina.

Esto, evidentemente, genera un problema en cuanto al espacio ocupado en planta por la rectificadora. Debido a ello, en ocasiones se plantea el tener un sistema de filtrado común para una serie de máquinas que utilicen un mismo fluido de corte. No obstante, esto no es siempre posible y sigue siendo una problemática de difícil solución.

2.1.13. SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE CORTE

De la correcta selección de los parámetros de corte del proceso depende en gran medida la obtención de unas piezas aceptables y de la rentabilidad económica del proceso. Esto no puede conseguirse solo con el empleo de una muela adecuada y la correcta aplicación de un fluido de corte, sino que es necesario encontrar un equilibrio entre los distintos parámetros. De ello debemos saber qué es lo que ocurre al seleccionar unos parámetros más agresivos o de desbaste y unos parámetros más suaves o de acabado.

Por ejemplo, un mecanizado muy agresivo ofrece un ahorro de tiempo considerable, lo que se traduce en una mayor capacidad de producción; sin embargo podría también ser la causa de un desgaste prematuro de la muela o de piezas fuera de tolerancia o con daños.

Por otro lado, un mecanizado excesivamente suave puede conseguir piezas que estén dentro de las tolerancias aceptables, pero a costa de un incremento muy notable en el tiempo de mecanizado, materiales de corte y mano de obra.

Por eso es necesario mantener un equilibrio entre los parámetros de corte que nos permita obtener piezas válidas en el menor tiempo posible.

Por desgracia la falta de tablas o información específica a cada proceso hace que esta labor sea muy complicada y dependa en gran medida de la experiencia de cada empresa y de sus técnicos de rectificadora.

2.2 Objeto del proyecto

El rectificado es un proceso de mecanizado por abrasión con el que se busca obtener piezas con una alta precisión dimensional y una buena calidad superficial. Para ello se emplean las muelas, que son herramientas de corte compuestas de duras partículas abrasivas unidas entre sí por un material aglomerante. Estas pequeñas partículas, que actúan como microscópicos filos de corte, son las encargadas de eliminar el material en pequeñas cantidades. El aglomerante tiene como misión mantener los granos abrasivos unidos y arrancando material hasta que pierdan el filo, momento en el que la fuerza de arranque aumenta y es conveniente que el elemento abrasivo se desprenda del aglomerante, dejando paso a una nueva capa de partículas listas para continuar con el arranque del material.

Además, este proceso también es ideal para el mecanizado de materiales que no pueden ser mecanizados por otros procesos a causa su baja maquinabilidad. Dentro de estos materiales se encuentran principalmente los que presentan una excesiva dureza como las cerámicas o aceros especiales.

De esto se puede deducir que el rectificado es un proceso de alto valor industrial que nos permite obtener piezas muy precisas y de alto valor añadido. Representa un importante porcentaje de la inversión económica de las empresas del sector. Por eso resulta fundamental la optimización de este tipo de procesos.

El rectificado es un proceso muy complejo donde actúan un número muy elevado de micro herramientas de corte llamados granos, que se comportan cada uno de manera independiente. Se trata, en general, de un proceso de mecanizado sobre el cual se tiene muy poco conocimiento científico a nivel industrial. Este hecho lleva a que la única manera de ajustar el proceso de manera adecuada sea mediante ensayos de prueba y error. Esto conlleva un elevado gasto económico en instrumentación, tiempo y en recursos.

Una puesta a punto de este tipo conduce a la elección de parámetros de rectificado, en general, conservadores alejados del punto de máximo rendimiento del proceso.

El objetivo principal de este proyecto consiste en presentar una metodología experimental, que permita caracterizar el comportamiento de un conjunto de muelas en el rectificado cilíndrico exterior en penetración, para un acero especial típico de sistemas de transmisión (AISI 52100), utilizado especialmente en el sector de la automoción, empleándose en elementos como rodamientos.

Éste tipo de acero, debido a su composición química y propiedades mecánicas, obligará a seguir una metodología determinada y precisa, adaptada al comportamiento particular de éste tipo de acero especial para obtener los resultados de la manera más exacta y precisa posible.

Según lo expuesto hasta el momento, los objetivos que se persiguen con el presente proyecto son los siguientes:

- Definir una batería de ensayos adecuada que permita realizar el trabajo de experimentación, cuyo procedimiento haya sido estudiada e ideada con precisión y exactitud para la obtención de datos de forma efectiva.
- Definir un sistema de monitorización del proceso que permita obtener los parámetros más importantes del proceso: Potencias, Rugosidades, desgastes de muela, diámetros y profundidades de pasada.
- Determinar la influencia de las características de la muela empleada en la pieza mecanizada atendiendo a los resultados obtenidos en el trabajo experimental.

2.3 Planteamiento del trabajo experimental

2.3.1. EQUIPAMIENTO Y METODOLOGÍA

A continuación se presenta el equipamiento industrial empleado para llevar a cabo el trabajo experimental. En el primer apartado se detallan los elementos empleados para la realización del proceso de rectificado, y a continuación se explican los aparatos de medida y monitorización de datos empleados durante los ensayos e indispensables para el análisis de resultados.

2.3.1.1. EQUIPAMIENTO GENERAL

MÁQUINA

La rectificadora empleada en los ensayos es una rectificadora cilíndrica de exteriores Danobat modelo FG 600-S de precisión y compatible con mecanizado de alta velocidad, ésta se muestra en la figura 2.34:



Figura 2.34. Rectificadora cilíndrica CNC de Danobat FG 600 S.

De entre todas las especificaciones de la máquina hay que destacar:

- Diámetro máximo de pieza: 300mm.
- Longitud máxima de pieza: 600 mm.
- Revoluciones del cabezal pieza: entre 30 y 6000 rpm.
- Amarre de la pieza: entre puntos.
- Potencia máxima del cabezal de la muela: 15 kW.
- Dimensiones de la muela (alúmina): Ø450x25xØ203,2 (diámetro exterior x anchura x diámetro interior).

MUELAS

Las muelas empleadas son las siguientes:

82AA70G6VW

82AA100G6VW

Todas ellas son de óxido de aluminio (alúmina), aglomerante vítreo y con un grado de apertura medio (porosidad media). Los parámetros que varían de una muela a otra son el tamaño de grano y la dureza de los granos (grado). Todas tienen un distinto tamaño de grano, pudiendo tomarse la de '70' como un tamaño de grano medio, y siendo la de '100' de grano fino.

En cuanto a la dureza, las dos muelas presentan una dureza media puesto que comparten el mismo grado o dureza siendo éste G.

PIEZA

Las piezas sobre las que se han realizado los ensayos son discos de acero para rodamientos 52100 templado a 50-54 HRC, como la que se ve en la figura 18. Tienen un diámetro exterior de aproximadamente 91mm y han sido previamente rectificadas hasta 90mm de diámetro, para asegurar que los ensayos se realizan sobre una superficie limpia y con un salto radial en pieza suficientemente pequeño o prácticamente nulo.

El espesor de las piezas es de 20mm, al igual que el espesor de la muela. Se realizarán dos ensayos completos de desgaste por pieza, es decir, en el primer ensayo se mecanizará únicamente la mitad del perfil de la pieza (10mm).

Una vez finalizado el ensayo pertinente en la primera mitad se procederá al cambio de posición de la pieza, mecanizando así los otros 10mm restantes de la pieza.

Una vez diamantada la muela y eliminado el salto radial producido por dicho cambio de posición de la pieza.



Figura 2.35. Pieza utilizada para los ensayos y detalle del perfil de la pieza.

El material utilizado en los ensayos será del mismo material que el empleado en elementos de transmisión como engranajes, cigüeñales y ejes de transmisión. El tamaño de las probetas empleadas será el adecuado para una correcta obtención de resultados en máquina.

- Clasificación

El denominado AISI 52100 es un acero al cromo, de alta aleación de carbono, que se utiliza en una variedad de aplicaciones mecánicas. En el acero recocido se proporciona esta dureza relativamente fácil de mecanizar, todavía con muy alta resistencia a la abrasión.

Puede ser desarrollado por el tratamiento térmico para hacer que el material sea particularmente adecuado para aplicaciones que requieren resistencia al desgaste extrema. Además, el acero 52 100, puede ser tratado con calor a altos niveles de resistencia a la tracción y resistencia a la fatiga.

- Equivalencias

China	ISO	USA	Japan	Germany	France	Sweden
GB		AISI	JIS	DIN	NF	
Gcr15	683/xv11	52100	SUJ2	100Cr6	100C6	SKF3

Tabla 2.7. Designación de equivalencias.

- Composición química

Steel No.	Symbol	Chemical Composition (Wt%)					
		C	Cr	Si	Mn	P	S
Gcr15	AISI 52100	0.95-1.05	1.30-1.65	0.15-0.35	0.25-0.45	<0.027	<0.025

Tabla 2.8. Designación de composiciones químicas.

- Propiedades mecánicas

MECHANICAL PROPERTIES		Conditions	
		T (°C)	Treatment
Density ($\times 1000 \text{ kg/m}^3$)	7.7-8.03	25	
Poisson's Ratio	0.27-0.30	25	
Elastic Modulus (GPa)	190-210	25	
Hardness	60 – 67 HRC / 700 -900HV		
Density	0.283 lbs/in ³		
Tensile Strength	325,000 psi		
Yield Strength	295,000 psi		

Tabla 2.9. Designación de propiedades mecánicas.

- Propiedades térmicas

THERMAL PROPERTIES		Conditions	
		T (°C)	Treatment
Thermal Expansion ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	11.9	0-100	annealed

Tabla 2.10. Designación de propiedades térmicas.

2.3.1.2. EQUIPO DE MEDICIÓN

En este apartado se detalla cuáles son los aparatos utilizados para medir los distintos parámetros de potencias, desgastes, geometrías y rugosidades de los ensayos. Además se mencionaran brevemente las especificaciones técnicas más relevantes de los instrumentos de metrología utilizados para los ensayos realizados.

MEDICIÓN DE DIÁMETROS EXTERIORES

Para llevar a cabo las mediciones del diámetro exterior de la pieza se ha utilizado un micrómetro de exteriores. El micrómetro empleado para medir el diámetro de la pieza es un micrómetro digital de la marca Mitutoyo, como el mostrado en la figura 19. Tiene un rango de medida comprendido entre 100 y 75 milímetros, con una apreciación de una micra. Galgado y calibrado para cada ensayo.



Figura 2.36. Micrómetro de exteriores digital Mitutoyo.

MEDICIÓN DE RUGOSIDADES

El elemento empleado para la captación de rugosidades es un elemento denominado rugosímetro. Dicho elemento se trata de un rugosímetro portátil modelo Surtronic 25 de la casa Taylor-Hobson.

Con éste se ha medido la Ra (rugosidad promedio) y la Rz (distancia entre el valor medio de los 5 picos más altos y los 5 valles más bajos) necesarias para el estudio del desgaste de las muelas.

La resolución del aparato es de 0'01 micras y con una longitud de medida de 4mm. En la figura 20 puede verse una foto del rugosímetro empleado.



Figura 2.37. Rugosímetro Taylor-Hobson Surtronic 25.

MEDICIÓN DE DESGASTES

La medición de desgastes es fundamental en este proyecto de caracterización de muelas de rectificado. Se lleva a cabo mediante plaquitas de aluminio sobre las cuales, finalizados los pertinentes procesos de mecanizado se realizarán muescas con la muela. De esta forma, se podrán analizar posteriormente mediante un proyector de perfiles, observando el escalón provocado por el desgaste de la parte de la muela que se a utilizado para el mecanizado.

El proyector de perfiles empleado para la medición de las marcas de desgaste de la muela en las probetas de aluminio es un proyector de perfiles Mitutoyo modelo PJ-H30 Series 303, mostrado en la figura 2.38. Su característica más importante es que cuenta con un zoom óptico 100x, es decir, la focal proporciona 100 aumentos.

Con este instrumento de medición se obtienen resoluciones máximas de una micra, por lo que es preciso y eficaz, lo que nos permite realizar las medidas de desgaste con suficiente precisión. Además, este aparato ha sido equipado con un dispositivo de procesamiento de datos QM DATA 200, figura 2.39, que facilita la obtención de las medidas mediante un sistema de coordenadas.

Este sistema de coordenadas se encarga automáticamente de procesar y calcular las distancias entre los escalones de los desgastes de la muela que se encuentran en cada probeta de aluminio.



Figura 2.38. Proyector de perfiles Mitutoyo Series 303.

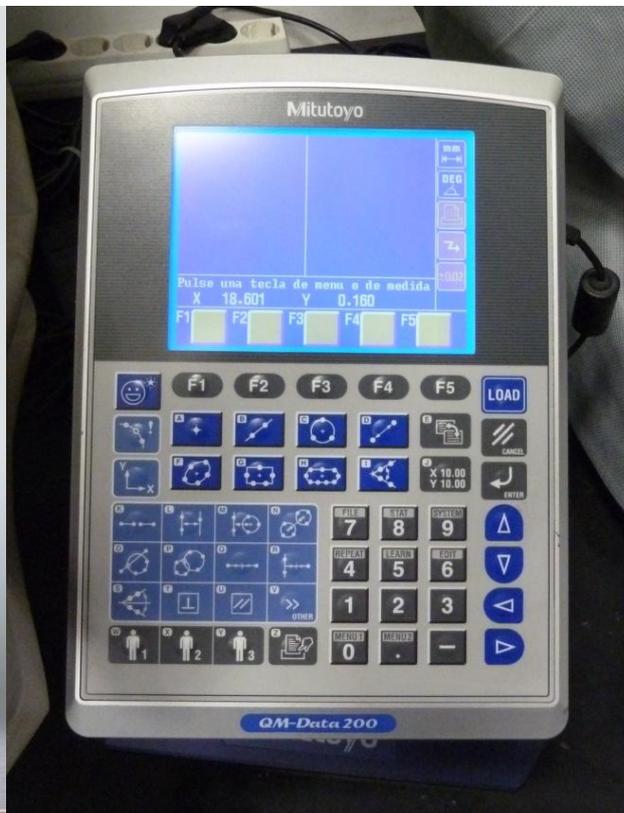


Figura 2.39. Procesador de coordenadas 2D QMDATA 200.

MEDICIÓN DE POTENCIAS

La potencia consumida por la muela se captura con un elemento denominado potenciómetro incorporado de serie en la máquina, dicha tarjeta de potencia procesa con una tarjeta de adquisición de datos de la casa National Instruments, que da una señal en forma de diferencial de voltaje.

Dicha tarjeta de potencia es un instrumento de medida adicional que se ha incorporado posteriormente a la máquina para facilitar una obtención de datos más eficaz.

Dicha señal es transmitida por USB hacia un ordenador. En este, un programa de medición y procesamiento de señales denominado Labview se encarga de transformar esa señal en un valor de potencia en kW a la razón de 100 muestras por segundo.

En la figura 2.39 se puede ver en la tarjeta de potencia empleada para la obtención de datos en el proyecto.



Figura 2.39. Potenciómetro instalado en el cuadro de luces de la máquina.

2.3.2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

En este apartado se detalla cual ha sido la metodología seguida a la hora de realizar cada ensayo de desgaste. Por otro lado, también se explicara cómo se dividen los ensayos según los parámetros de corte elegidos, y como se han transformado matemáticamente los valores.

2.3.2.1. ESQUEMA DE METODOLOGÍA A SEGUIR

1. Puesta a punto de la muela.
 - a. Equilibrado estático de muela.
 - b. Diamantado de muela.
2. Puesta a punto de la probeta.
 - a. Rectificado previo de la probeta.
3. Programación del ciclo.
 - a. Introducción de parámetros en el control numérico
4. Metodología a seguir del ensayo
 - a. El ensayo constará de 30 ciclos de desbaste principales.
 - b. Se realizarán 5 primeros ciclos de desbaste y mediremos la potencia en cada ciclo.
 - c. Finalizados los 5 ciclos de desbaste se le aplican 3 ciclos de acabado, durante estos ciclos de acabado no mediremos potencias.
 - d. Tras realizar los ciclos de acabado se miden rugosidades en la probeta.
 - e. Se efectuará una marca en una placa plana de aluminio previamente rectificadas para medir las rugosidades.
 - f. Una vez finalizados los 30 ciclos se procederá a medir los desgastes en un proyector de perfiles con las placas planas de aluminio.
 - g. Administración y procesamiento de toda la información recogida.
5. Repetiremos este proceso cuantas veces sean oportunas hasta completar el ensayo.

2.3.3. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ENSAYOS

A continuación se listan los pasos seguidos para la realización de los ensayos. Además se incluye una breve descripción para cada paso.

2.3.3.1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

PREPARACIÓN DE LA MUELA

1º-Equilibrado estático de la muela:

Primero se equilibra la muela en un banco de equilibrado estático ajustando el centro de masas mediante contrapesos dispuestos a 120° con el fin de minimizar las vibraciones en el cabezal.

2º-Comprobación del salto radial:

Mediante un reloj comparado se obtiene el salto radial de la muela y se observa su excentricidad.

3º-Diamantado de muela:

Se diamanta la muela hasta obtener un perfil completamente cilíndrico y con el acabado superficial de la muela lo más homogéneo posible, esto se comprueba mediante un programa instalado de serie la máquina denominado GAP, calculando el acabado de la muela por señales acústicas.

COLOCACIÓN DE LA PIEZA

La pieza se coloca en un utillaje cilíndrico de ajuste H7h7 y amarrada la pieza con dos tornillos. Se coloca un perro de arrastre en uno de los extremos del utillaje para evitar el deslizamiento del mismo. Dicho utillaje se amarra entre el punto y el contrapunto que dispone la bancada de la máquina.

PREPARACIÓN DE LA PIEZA

Antes de comenzar con cada ensayo se rectifica la pieza hasta un diámetro de 90 mm para asegurar una superficie óptima y ausencia de salto radial en pieza en los primeros ciclos del ensayo.

La pieza sobre la cual se realiza el ensayo de desgaste en “plongee”, se le aplica un proceso de preacabado mediante un método de rectificado en trasverse, que consiste en aplicar continuas pasadas de vaivén longitudinal con distintos parámetros de mecanizado que en el refrentado convencional o “plongee”, con el fin de asegurar un completo rectificado de la superficie y evitar rebabas en los extremos del perfil de la pieza, tal y como se puede ver en la figura 2.40.

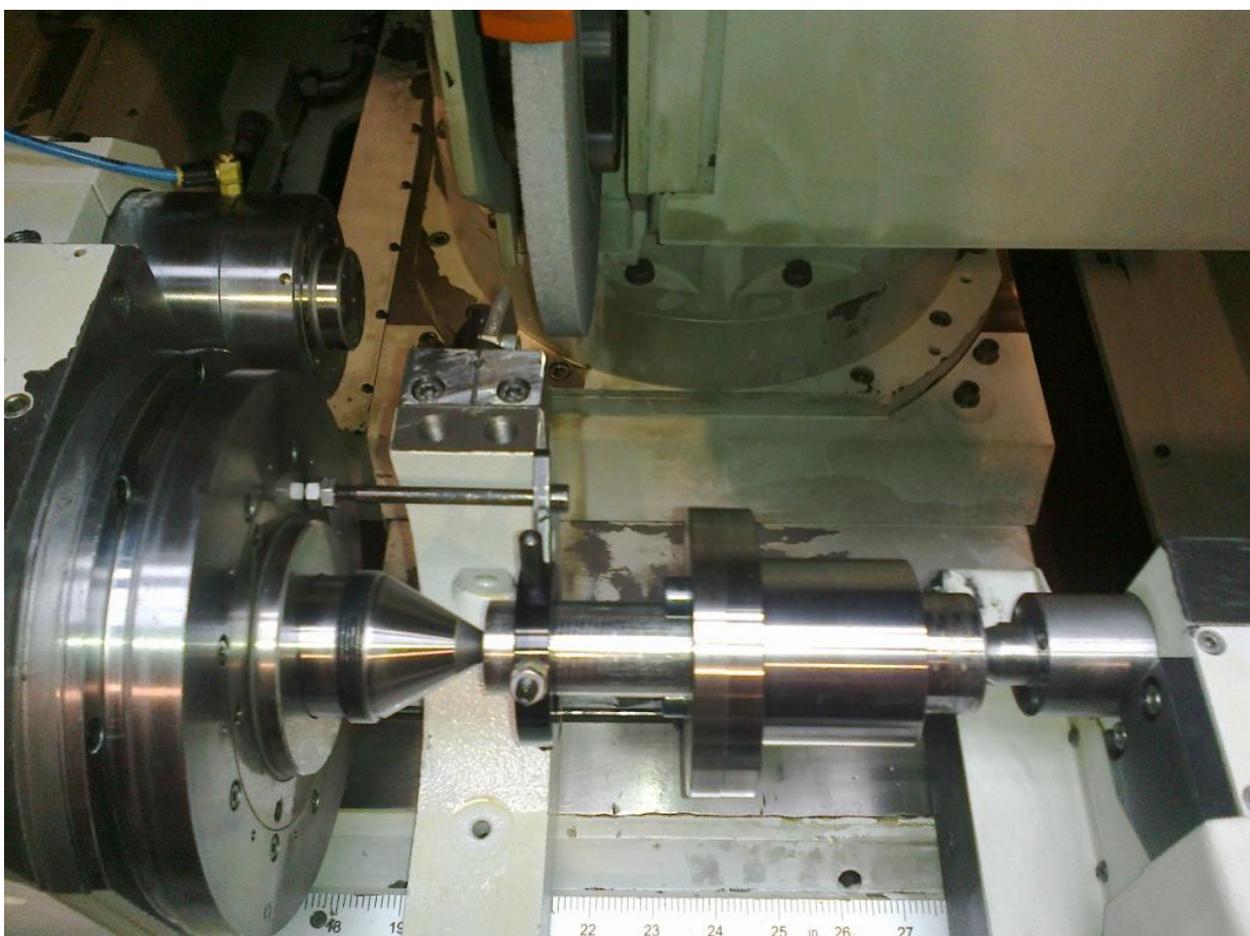


Figura 2.40. Pieza preparada para comenzar un ensayo.

DIAMANTADO

Antes de comenzar cada ensayo, se diamanta la muela para asegurar unas condiciones de mecanizado óptimas en lo referente al acabado superficial de la muela y concentricidad del perfil de la muela.

EJECUCIÓN

Se introducen los parámetros correspondientes del proceso en el control numérico de la máquina y se ejecuta el ciclo de forma automática. Paralelamente a los ciclos se inicia la adquisición del consumo de potencia consumida en el eje de la muela. Al acabar el ciclo se mide el diámetro final de la pieza y la potencia consumida en cada proceso de desbaste.

DESGASTE Y RUGOSIDAD

Cada cinco de estos ciclos de desbaste de $500\mu\text{m}$ de profundidad de pasada cada una en “plongee”, se realizan tres pequeños ciclos de acabado, de $10\mu\text{m}$ cada uno, con $Q'=0'15$, con el fin de conseguir un buen acabado superficial de la pieza. Después se mide la rugosidad de ésta y se hacen las marcas en la plaquita de aluminio de 1mm de profundidad para medir el desgaste de la muela cada 5 ciclos. En la figura 2.41 podemos ver el rugosímetro realizando una medición sobre la pieza.

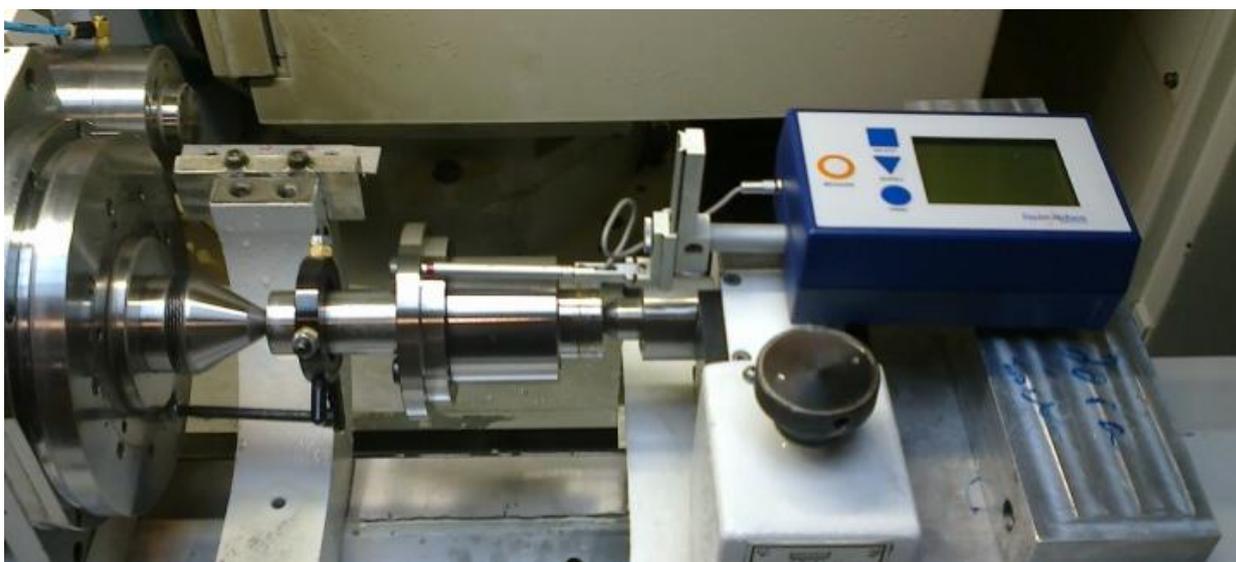


Figura 2.41. Detalle de rugosímetro tomando medidas.

Los ensayos se han terminado al alcanzar los 2000mm^3 de volumen de material eliminado. En algunos ensayos se ha tenido que analizar más afondo por la aparición de marcas de debidas a fenómenos vibratorios en la pieza, quemados o rugosidad excesiva.

Este proceso se repetirá para todos los distintos parámetros a ensayar y para cada una de las muelas, con lo que se obtiene una importante serie de datos para contrastar diferentes muelas y parámetros de mecanizado.

2.3.3.2. BATERÍA DE ENSAYOS

Para cada muela ensayada son dos los parámetros de proceso: el caudal de viruta arrancado de la pieza (Q') y el ratio de velocidades periféricas entre la muela y la pieza a mecanizar (q). De cada parámetro de caudal de viruta (Q') se han tomado tres valores distintos de ratio de velocidades (q) y se han realizado ensayos con cada combinación posible. Como puede verse en la tabla 4, son nueve ensayos por cada muela los que se han realizado. Los valores de Q' empleados son 1, 2,5 y $4\text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ y para el parámetro q , los valores ensayados son 60, 80 y 100.

Muela 1 (82AA70G6VW)		Muela 2 (82AA100G6VW)	
Q' [$\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{seg}$]	Q (v_s/v_w)	Q' [$\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{seg}$]	q (v_s/v_w)
1	60	1	60
2,5	60	2,5	60
4	60	4	60
1	80	1	80
2,5	80	2,5	80
4	80	4	80
1	100	1	100
2,5	100	2,5	100
4	100	4	100

Tabla 2.11. Combinación de parámetros ensayados para cada muela.

El tipo de ciclo empleado para estos ensayos es el de *plongee* o refrentado. Sin embargo, los parámetros introducidos en la máquina no son Q' y q , si no que de estos dos se tienen que calcular los parámetros característicos del ciclo empleado. Estos son: velocidad periférica de la muela (v_s), revoluciones de la pieza (N_w) y velocidad de avance radial (v_r). Para el cálculo de los parámetros máquina se han empleado las siguientes fórmulas:

VELOCIDAD PERIFÉRICA DE LA MUELA

Este valor se ha tomado como constante y se ha empleado el valor recomendado por el fabricante de 35 m/s. en todos los ensayos.

REVOLUCIONES DE LA PIEZA

Como el ratio entre velocidades periféricas de la muela y de la pieza es igual al valor de q , y teniendo en cuenta que v_s es igual a 35 m/s, podemos obtener la velocidad periférica de la pieza (v_w). Una vez obtenido este valor se divide entre el radio de la pieza el cual lo obtenemos en cada ciclo de mecanizado, pues se mide al final de cada pasada de desbaste, lo que nos da como resultado la velocidad angular de la pieza en rad/s. Para calcular el valor a introducir en la máquina simplemente tiene que hacerse un cambio de unidades de rad/s a rpm. Se puede comprobar en la ecuación 8.

$$q = \frac{v_s}{v_w}$$

Ecuación 8. Ratio de velocidades periféricas.

VELOCIDAD DE AVANCE RADIAL

El parámetro Q' se calcula multiplicando la velocidad de avance radial, el diámetro de la pieza (d_w) y el número π , por lo que obtener el valor de v_f es inmediato una vez conocido el diámetro de la pieza como se muestra en la ecuación 9.

$$Q' = \pi \cdot d_w \cdot v_f \rightarrow v_f = \frac{Q'}{\pi \cdot d_w}$$

Ecuación 9. Obtención de la velocidad de corte radial.

2.4. RESULTADOS

A continuación se pasará a presentar y comentar los resultados obtenidos en el trabajo experimental expuesto en el apartado anterior. Como ya se ha comentado, para cada ensayo propuesto se va a analizar la energía específica de corte, la rugosidad y el desgaste en función de la cantidad de material específico de pieza eliminado.

Para llevar a cabo el análisis de los resultados obtenidos, y debido a la gran cantidad de datos disponibles, se ha procedido analizando cada muela de manera individual, comentándose al final aspectos más generales que se correspondan con un análisis más global de todos los resultados.

2.4.1. MUELA 1 (82AA70G6VW)

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para la primera muela de estudio siendo su designación normalizada la siguiente: 82AA70G6VW.

- En primer lugar se analizarán los datos sobre la energía específica obtenida en cada ensayo, en los cuales, cada punto del gráfico corresponde con un ciclo del proceso.
- Después se muestran los resultados sobre la evolución de la rugosidad de la pieza. En esta gráfica se muestra la rugosidad obtenida cada 5 ciclos de desbaste sus tres ciclos de acabado correspondientes.
- Para terminar se verá la parte correspondiente al desgaste sufrido por la muela a lo largo de cada ensayo. El desgaste también corresponde a la marca que se realiza en la pieza de aluminio siendo esta cada cinco ciclos de desbaste y tres de acabado.

Hay que destacar la diferente duración de los ensayos. Así, se puede observar que para $Q'=1$, $Q'=2'5$ y $Q'=4$ se han alcanzado valores de Vw' de $2000 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$. Es decir, se ha podido cumplimentar el ensayo completo y no han aparecido problemas posibles de excesivo consumo de potencia, alto desgaste radial de la muela, aparición de efectos vibratorios ni aparición de marcas superficiales en la pieza. Ésta es una situación deseable desde un punto de vista industrial, ya que la muela está operando en los rangos de funcionamiento adecuados y desde el punto de vista de la investigación ha permitido cumplimentar todas las pruebas sin ningún tipo de problemática aparente.

2.4.1.1. ENERGÍA ESPECÍFICA DE CORTE

En las figuras 42, 43 y 44 se ven los gráficos de evolución de la energía específica de corte para los ensayos realizados en la muela 1. Los gráficos corresponden a los ensayos realizados con el parámetro q igual a 60, 80 y 100 respectivamente, y en cada uno de ellos se comparan los tres ensayos realizados con un caudal específico de viruta de Q' ; 1, 2'5 y 4 $\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$.

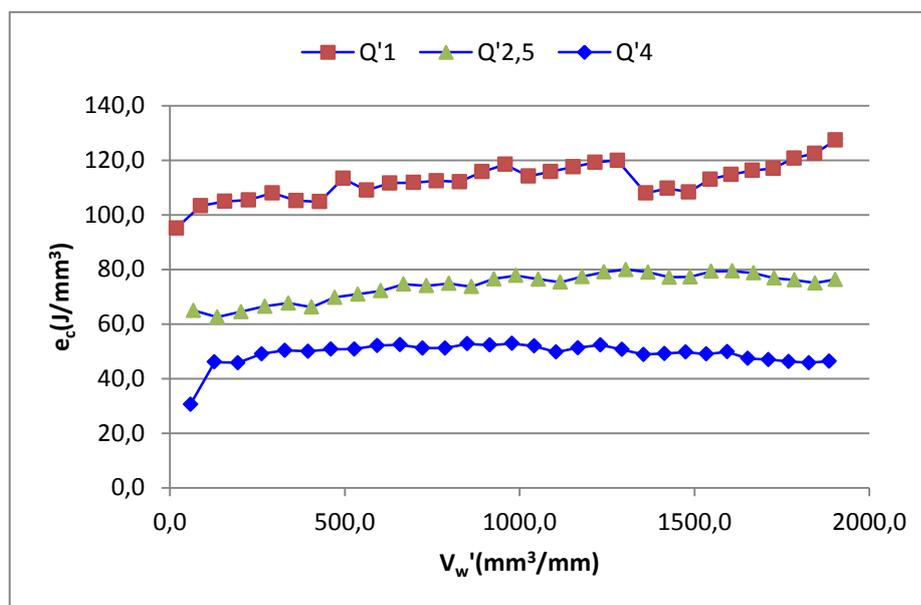


Figura 2.42. Energía específica para la muela 1 y $q=60$.

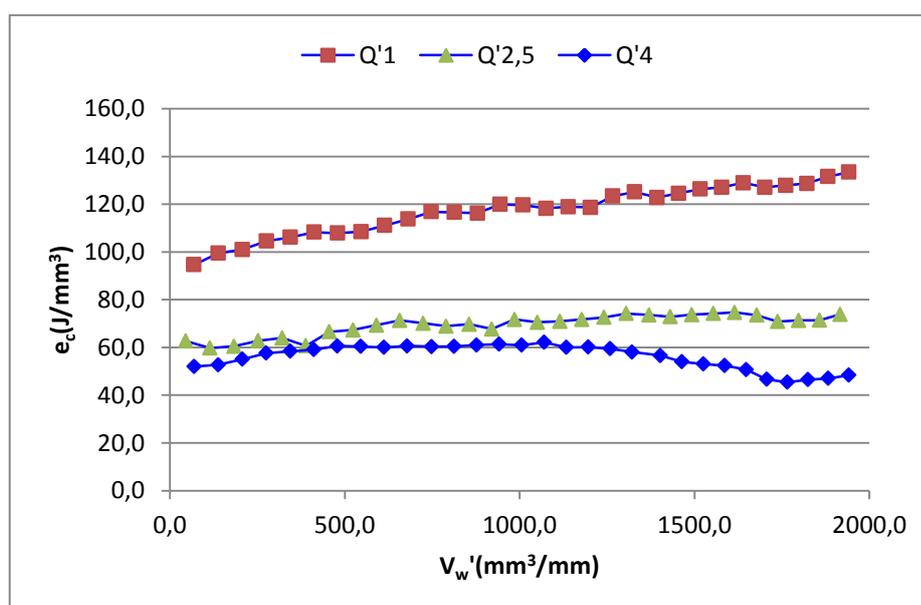


Figura 2.43. Energía específica para la muela 1 y $q=80$.

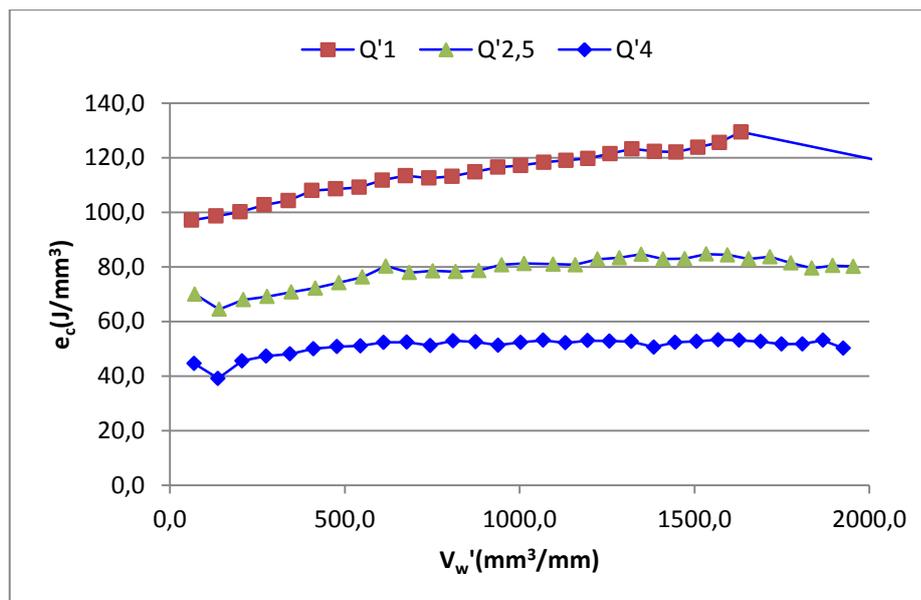


Figura 2.44. Energía específica para la muela 1 y q100.

Analizando los resultados, se puede ver que a medida que el caudal específico de viruta es mayor, disminuye e_c . Esto se debe al denominado efecto tamaño que se da en rectificado, que dice que al aumentar Q' , aumentamos el tamaño de la viruta arrancada por cada grano, lo que hace que el proceso sea más eficiente desde el punto de vista energético.

Por otra parte hay que destacar que a medida que aumenta el valor del parámetro V_w' , la energía específica de corte también crece ligeramente. Esto se debe indudablemente al desgaste de la muela. A medida que se mecaniza material, va aumentando el porcentaje de granos desgastados aumentando así la fricción entre muela y pieza y se produce un proceso de arranque de material menos eficiente. Esto se puede ver claramente en todos los ensayos con un valor de Q' igual a $1 \text{ mm}^3/\text{mm}$.

Para los caudales de viruta $Q'=2,5 \text{ mm}^3/\text{mm}$ y mayormente para $Q'4$ también puede verse este fenómeno hasta cierto punto, con la diferencia de que a partir de cierta cantidad de material mecanizado, la energía específica de corte comienza a descender. Esto es más notorio a partir de ratios de velocidad entre muela y pieza de q80 y sobre todo en q100 donde el proceso es más agresivo.

Éste fenómeno de pérdida de eficiencia se debe a que a medida que se mecaniza y se aumenta el desgaste de los granos, las fuerzas que aparecen sobre ellos crecen hasta tal punto que comienzan a desprenderse de la muela, produciéndose el fenómeno de auto diamantado.

Este efecto se podría considerar beneficioso, ya que hace que el proceso sea más eficiente desde el punto de vista energético, sin embargo el alto desgaste de la muela y la consiguiente pérdida de precisión en la operación hace que sea una situación, en este caso, no deseable.

Este proceso se dará con más rapidez cuanto más agresivo sean los parámetros de corte, por lo que para $Q' = 4 \text{ mm}^3/\text{mm}$ esta bajada de potencia aparece mucho antes que para los otros casos.

2.4.1.2. RUGOSIDAD

Para medir la rugosidad se han tomado dos parámetros distintos, Ra (rugosidad promedio) y la Rz (distancia entre el valor medio de los 5 picos más altos y los 5 valles más bajos). Esto se debe a que la rugosidad es un parámetro con el que se pretende caracterizar la forma de una superficie y como Ra solo indica la rugosidad promedio de la pieza, se ha considerado necesario medir también Rz para tener una estimación sobre los picos máximos de rugosidad que pueden aparecer.

Los gráficos mostrados en las figuras 45, 46 y 47 representan la evolución de estos parámetros a lo largo del proceso.

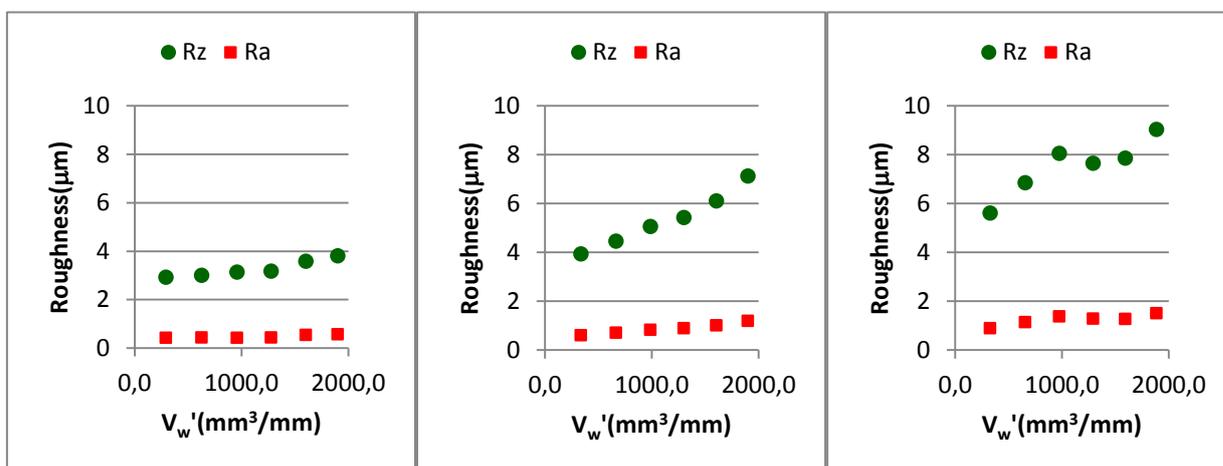


Figura 2.45. Evolución de Ra y Rz para la muela 1 y q60; con valores de Q' de 1, 2,5 y 4 mm³/mm·seg respectivamente.

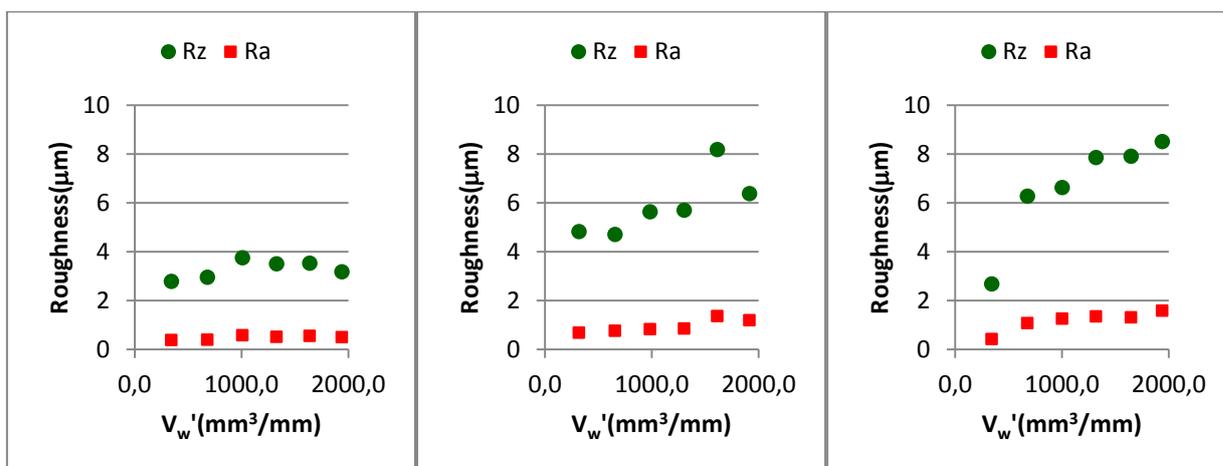


Figura 2.46. Evolución de Ra y Rz para la muela 1 y q80; con valores de Q' de 1, 2,5 y 4 mm³/mm·seg respectivamente.

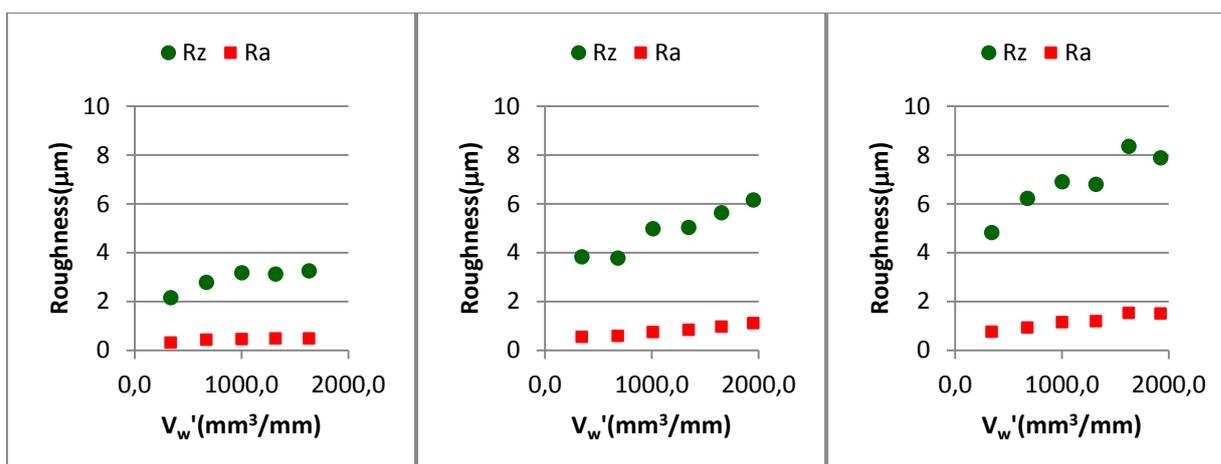


Figura 2.47. Evolución de Ra y Rz para la muela 1 y q100; con valores de Q' de 1, 2,5 y 4 mm³/mm·seg respectivamente.

En estas gráficas se puede ver como la rugosidad va en aumento a medida que mecanizamos más material. Esto se debe principalmente a la pérdida de capacidad de corte de la muela. Sin embargo, en algunos casos esta rugosidad puede permanecer estable o incluso disminuye ligeramente, como se puede comprobar para un ratio de velocidades de q80 y un caudal de viruta Q'2,5. Si el fenómeno de auto diamantado compensa en parte los efectos de la pérdida de capacidad de corte que va sufriendo la muela la rugosidad también mejora. Por lo tanto se intuye que en este caso ha ocurrido un autodiamantado de la muela.

Por otro lado, una mayor Q' empeora la rugosidad de forma muy notable; mientras que el ratio de velocidades periféricas entre la pieza y la muela lo hace de forma mucho menos acusada, resultando, en general, en una peor rugosidad a medida que aumenta q . Esto se debe a que un aumento en el ratio de velocidades hace que el espesor de viruta sea menor, lo que favorece un acabado con menor rugosidad.

2.4.1.3. DESGASTE DE LA MUELA

A continuación se presentan los resultados correspondientes al desgaste de la muela. Para ello se muestra un gráfico para cada valor del parámetro q y en cada uno de ellos se representan las curvas de desgaste para los tres valores de Q' ensayados (figuras 48, 49 y 50). El desgaste de las muelas se caracteriza con un gráfico que representa el volumen de material eliminado con el volumen de muela desgastada.

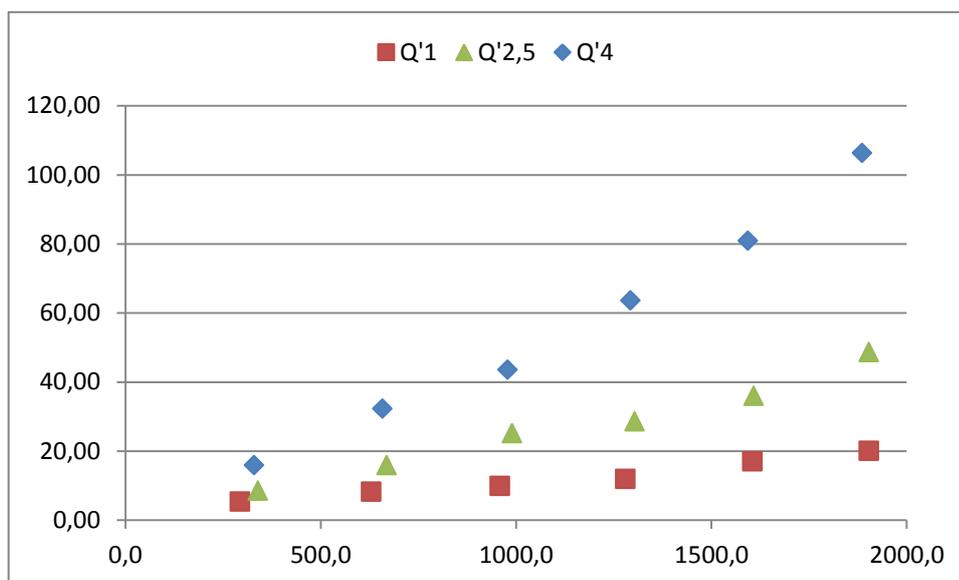


Figura 2.48. Desgaste de la muela 1 para $q60$.

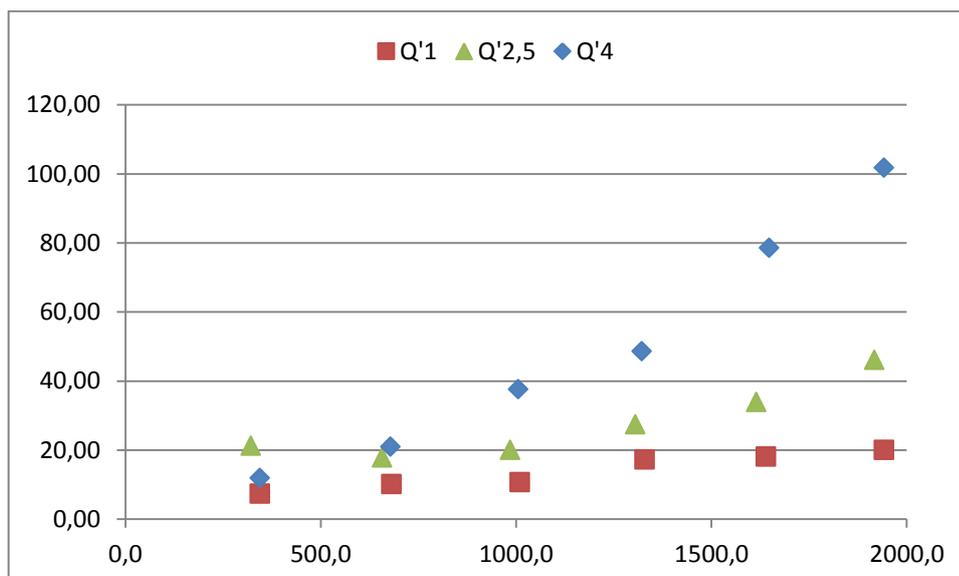


Figura 2.49. Desgaste de la muela 1 para $q80$.

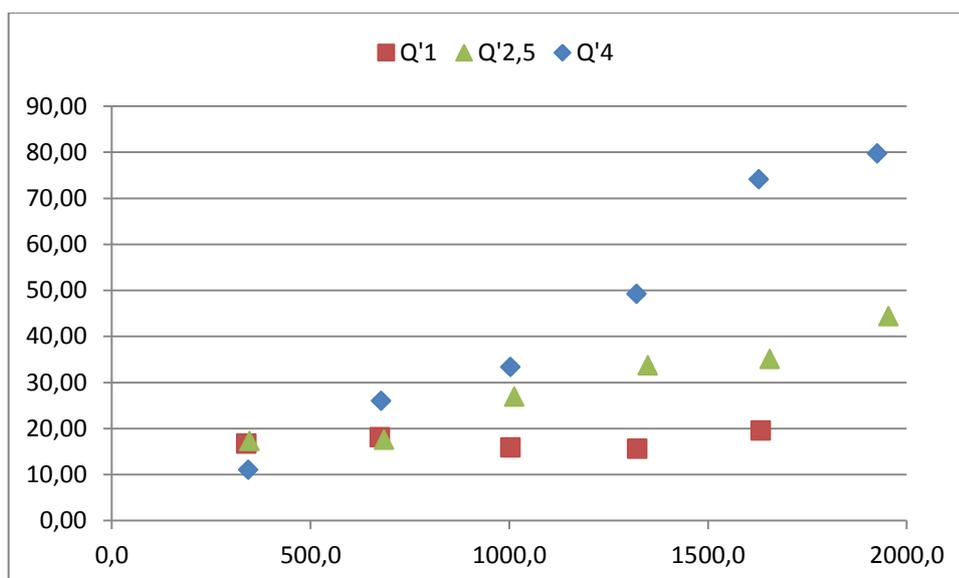


Figura 2.50. Desgaste de la muela 1 para q100.

Viendo los resultados, puede deducirse que, para esta muela en concreto, para una misma q , el aumento de Q' implica un desgaste mayor. Se puede destacar el elevado desgaste para $Q'4$ para un ratio de velocidades $q60$ y cómo va disminuyendo según aumentamos el ratio de velocidades. Así, para los tres ensayos con $Q'1$ el G ratio aumenta prácticamente de forma lineal y pasa de estar a 76 para una $q60$ a 293 para una $q100$ manteniéndose en 210 para una $q80$. Para los ensayos de $Q'2,5$ y $Q'4$ este valor es mucho más pequeño, alrededor de 20 para $q60$ y 80 y 100 para $Q'4$ y variando mínimamente 25 y 50 para un caudal de viruta $Q'2,5$. Tal y como se muestra en la figura 2.51.

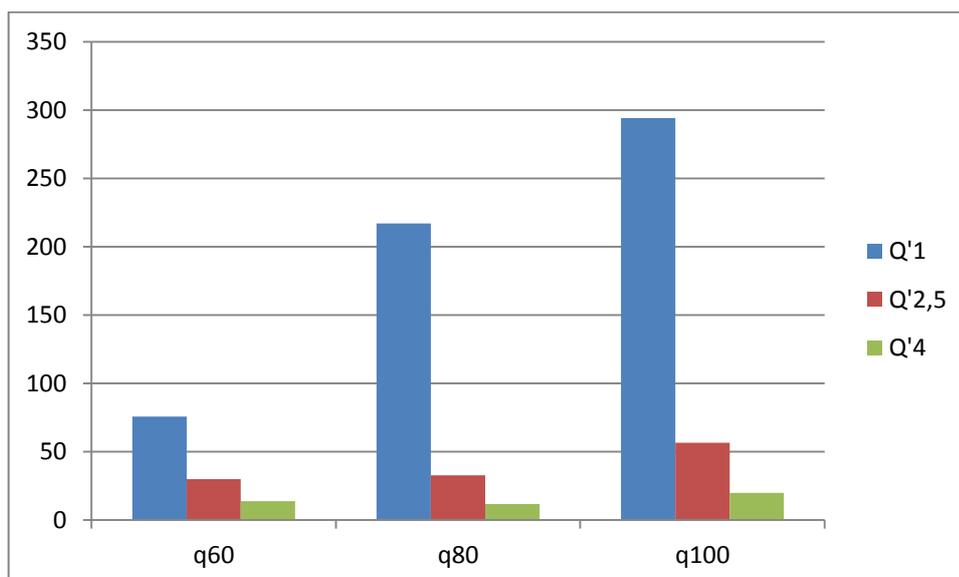


Figura 2.51. Variación del valor G en los ensayos realizados para la muela 1.

2.4.2. MUELA 2 (82AA100G6VW)

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para la primera muela de estudio siendo su designación normalizada la siguiente: 82AA100G6VW.

- En primer lugar se analizarán los datos sobre la energía específica obtenida en cada ensayo, en los cuales, cada punto del gráfico corresponde con un ciclo del proceso.
- Después se muestran los resultados sobre la evolución de la rugosidad de la pieza. En esta gráfica se muestra la rugosidad obtenida cada 5 ciclos de desbaste sus tres ciclos de acabado correspondientes.
- Para terminar se verá la parte correspondiente al desgaste sufrido por la muela a lo largo de cada ensayo. El desgaste también corresponde a la marca que se realiza en la pieza de aluminio siendo esta cada cinco ciclos de desbaste y tres de acabado.

Hay que destacar la diferente duración de los ensayos. Así, se puede observar que para $Q'=1$, $Q'=2'5$ y $Q'=4$ no se han podido alcanzar valores de V_w' de $2000 \text{ mm}^3/\text{mm}^*\text{s}$. Es decir, no se ha podido cumplimentar el ensayo completo puesto que han aparecido problemas posibles de excesivo consumo de potencia, alto desgaste radial de la muela, aparición de efectos vibratorios ni aparición de marcas superficiales en la pieza. Ésta es una situación no deseable desde un punto de vista industrial, ya que la muela está operando en los rangos de funcionamiento adecuados. Tampoco es deseable desde el punto de vista de la investigación ya que no ha permitido cumplimentar todas las pruebas pudiendo llegar a valores de caudal de viruta eliminados de V_w' de $1500 \text{ mm}^3/\text{mm}^*\text{s}$. aproximadamente.

2.4.2.1. ENERGÍA ESPECÍFICA DE CORTE

En las figuras 52, 53 y 54 se ven los gráficos de evolución de la energía específica de corte para los ensayos realizados en la muela 1. Los gráficos corresponden a los ensayos realizados con el parámetro q igual a 60, 80 y 100 respectivamente, y en cada uno de ellos se comparan los tres ensayos realizados con un caudal específico de viruta de 1, 2'5 y 4 $\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$.

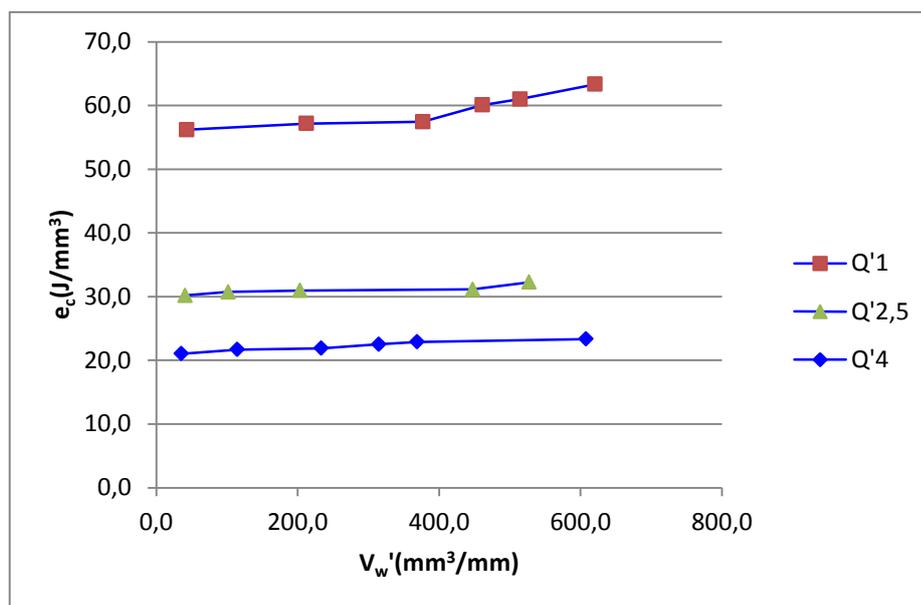


Figura 2.52. Energía específica para la muela 2 y q60.

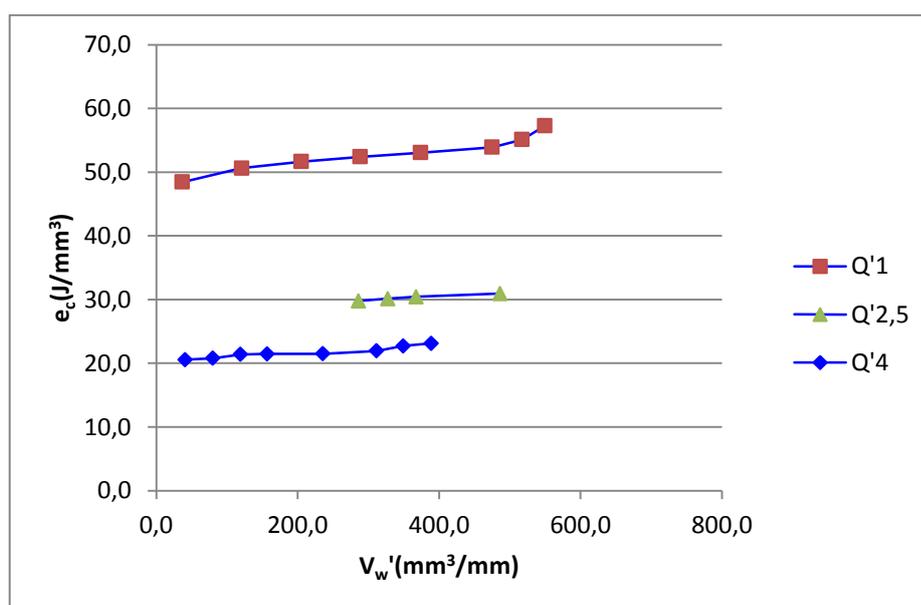


Figura 2.53. Energía específica para la muela 2 y q80.

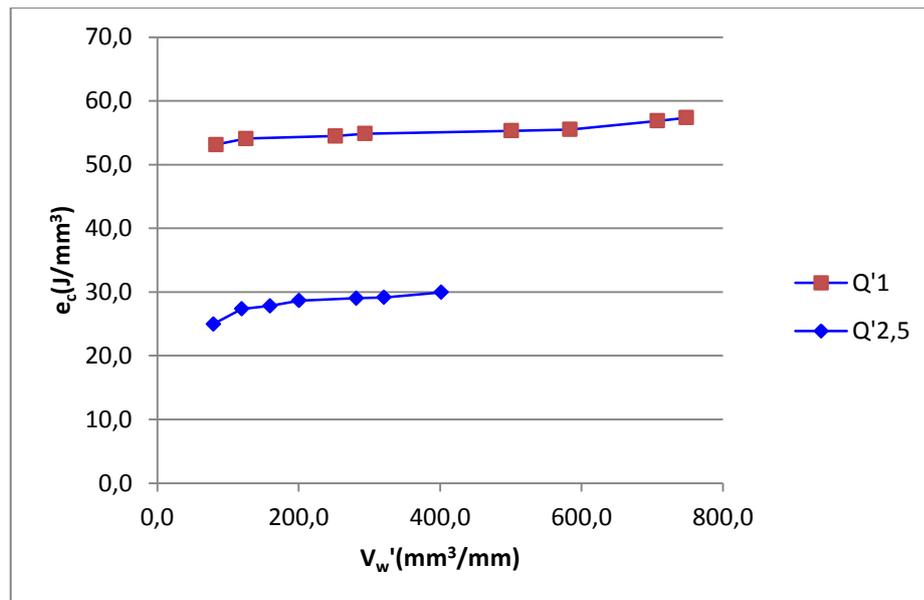


Figura 2.54. Energía específica para la muela 2 y q100.

Analizando los resultados, al igual que para la muela anterior, en este caso se cumple lo mismo. Se puede ver que a medida que el caudal específico de viruta es mayor, disminuye e_c . Esto se debe al denominado efecto tamaño que se da en rectificado, que dice que al aumentar Q' , aumentamos el tamaño de la viruta arrancada por cada grano, lo que hace que el proceso sea más eficiente desde el punto de vista energético.

Para esta muela puede verse como el comportamiento de la energía específica es similar, pero más constante que en la muela anterior. Si bien se ve como e_c tiende a subir a medida que mecanizamos más material, esta subida es menos pronunciada. Esto se debe a que al ser un grano más fino, el volumen de viruta arrancado por cada grano es menor y por lo tanto también lo es la fuerza total que se aplica en cada grano, reduciendo las probabilidades de que aparezca el fenómeno de auto diamantado con bajas tasas de arranque de material.

2.4.2.2. RUGOSIDAD

Para medir la rugosidad se han tomado dos parámetros distintos, Ra (rugosidad promedio) y la Rz (distancia entre el valor medio de los 5 picos más altos y los 5 valles más bajos). Esto se debe a que la rugosidad es un parámetro con el que se pretende caracterizar la forma de una superficie y como Ra solo indica la rugosidad promedio de la pieza, se ha considerado necesario medir también Rz para tener una estimación sobre los picos máximos de rugosidad que pueden aparecer.

Los gráficos mostrados en las figuras 55, 56 y 57 representan la evolución de estos parámetros a lo largo del proceso.

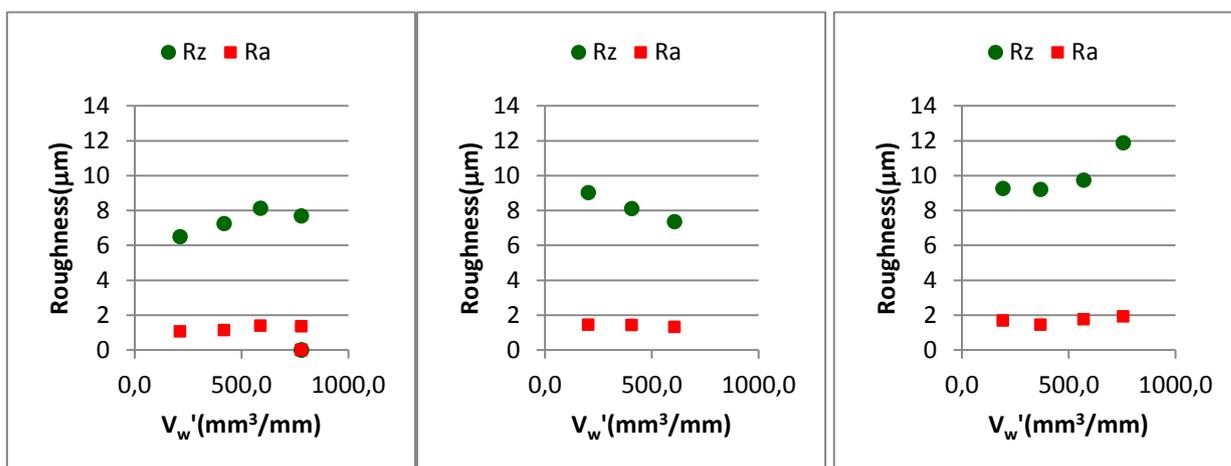


Figura 2.55. Evolución de Ra y Rz para la muela 2 y q60; con valores de Q' de 1, 2,5 y 4 mm³/mm·seg respectivamente.

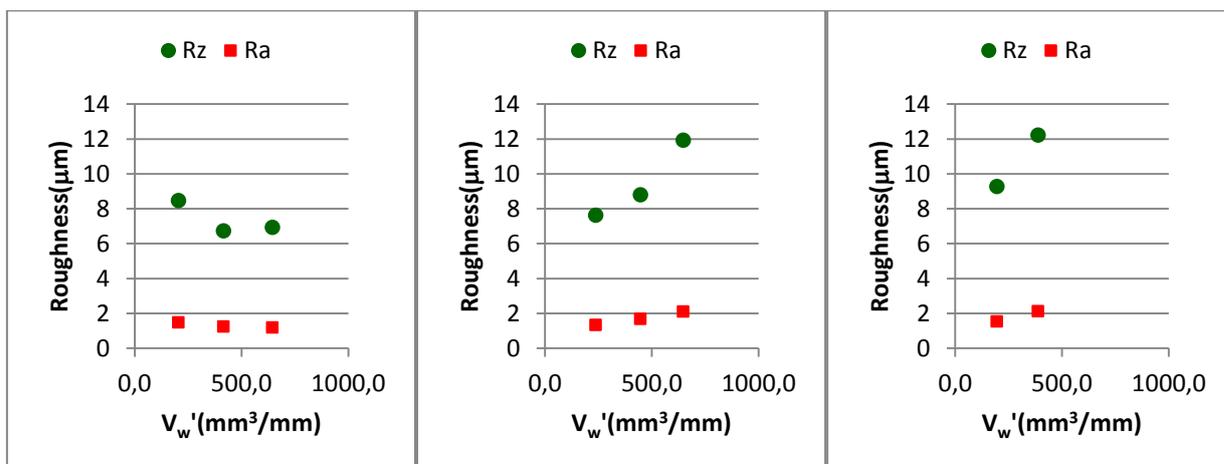


Figura 2.56. Evolución de Ra y Rz para la muela 2 y q80; con valores de Q' de 1, 2,5 y 4 mm³/mm·seg respectivamente.

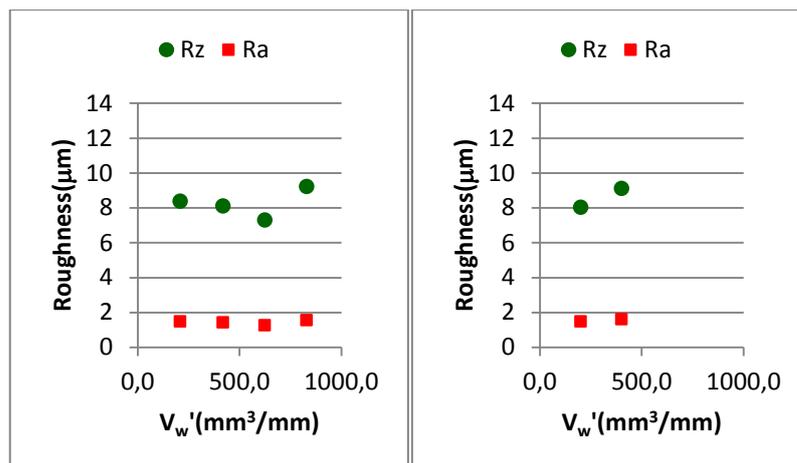


Figura 2.57. Evolución de Ra y Rz para la muela 2 y q100; con valores de Q' de 1 y 2,5 mm³/mm·seg respectivamente.

En estas gráficas se puede ver como la rugosidad va en aumento a medida que mecanizamos más material. Esto se debe principalmente a la pérdida de capacidad de corte de la muela. Sin embargo, en algunos casos esta rugosidad puede permanecer estable o incluso disminuye ligeramente si el fenómeno de auto diamantado compensa en parte los efectos de la pérdida de capacidad de corte que va sufriendo la muela, como puede verse efectamente en el caso de un ratio de velocidades q_{60} y un caudal de viruta $Q'_{2,5}$.

Por otro lado, una mayor Q' empeora la rugosidad de forma muy notable; mientras que el ratio de velocidades periféricas entre la pieza y la muela lo hace de forma mucho menos acusada, resultando, en general, en una peor rugosidad a medida que aumenta q .

A pesar de ser una muela de grano más fino, las rugosidades obtenidas son peores que para la muela anterior, siendo excesivas para Q'_{4} . Esto da pie a pensar que la muela pueda estar defectuosa.

2.4.2.3. DESGASTES

A continuación se presentan los resultados correspondientes al desgaste de la muela. Para ello se muestra un gráfico para cada valor del parámetro q y en cada uno de ellos se representan las curvas de desgaste para los tres valores de Q' ensayados (figuras 58, 59 y 60). El desgaste de las muelas se caracteriza con un gráfico que representa el volumen de material eliminado con el volumen de muela desgastada.

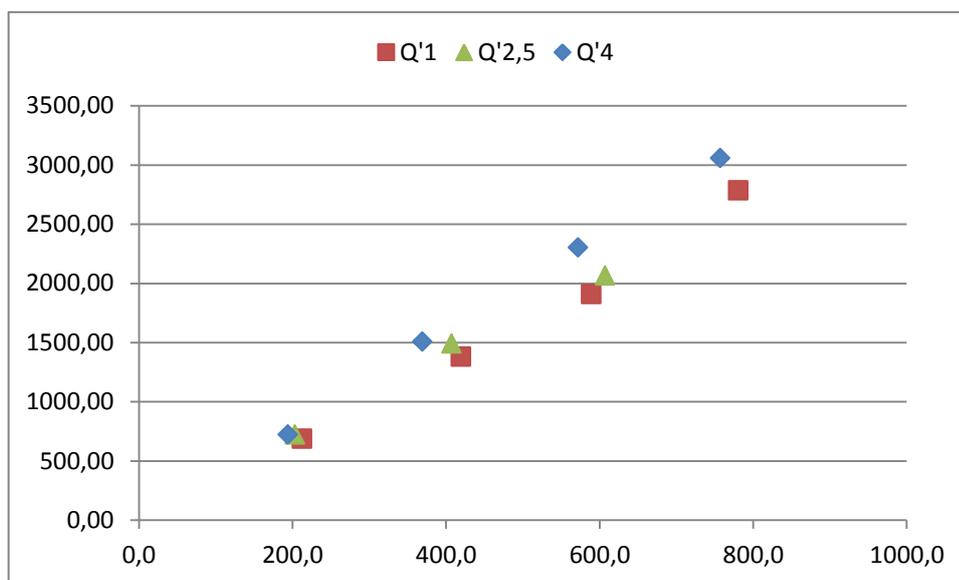


Figura 2.58. Desgaste de la muela 2 para $q60$.

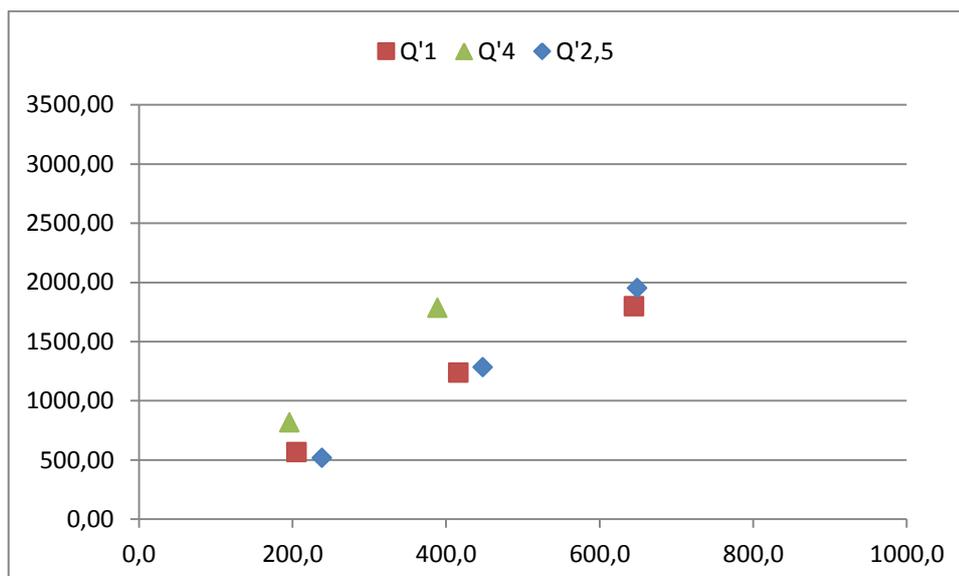


Figura 2.59. Desgaste de la muela 2 para $q80$.

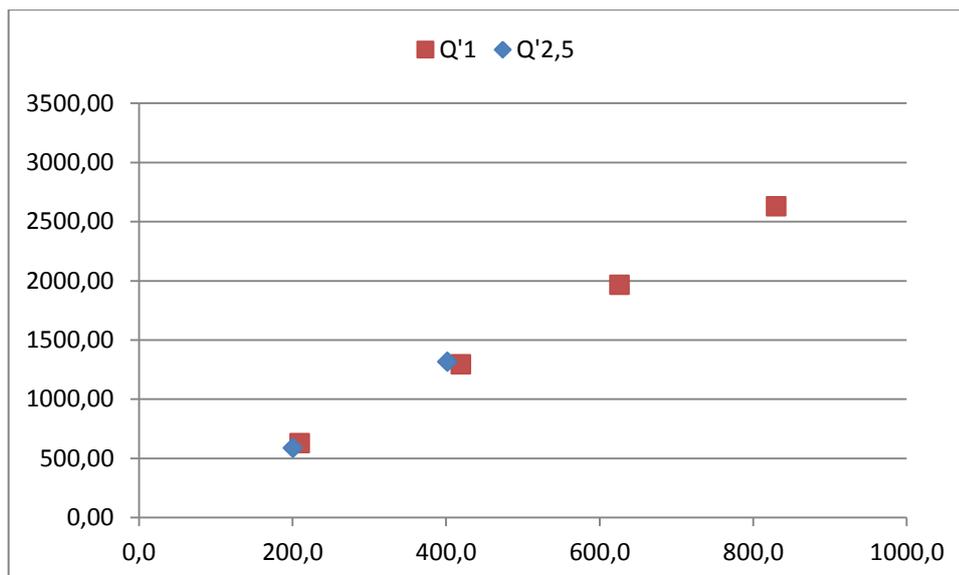


Figura 2.60. Desgaste de la muela 2 para q100.

Viendo los resultados, puede deducirse que, para esta muela en concreto y para una misma q , el aumento de Q' implica un desgaste mayor. Tal y como se muestra en la figura 2.61. destaca el valor de Gratio obtenido para un caudal de viruta $Q'4$ para un ratio de velocidades $q60$ siendo mucho mayor que los anteriores. Los desgastes producidos en la muela han sido muy grandes y se ha optado por no seguir midiéndolos. Se deduce de este ensayo que la muela esta defectuosa de fábrica.

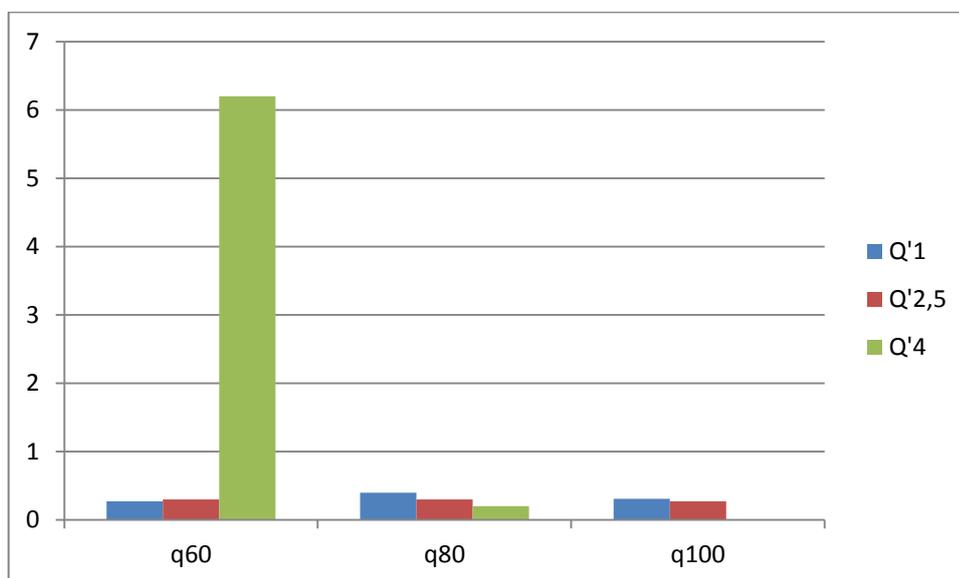


Figura 2.61. Variación del valor G en los ensayos realizados para la muela 2.

2.4.3. CONCLUSIONES GENERALES

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas del presente proyecto de rectificado cilíndrico exterior:

En este proyecto se ha llevado a cabo el análisis de dos muelas de rectificado con diferentes características constructivas en un entorno industrial. Para ello se han llevado a cabo ensayos experimentales en rectificado cilíndrico en *plongee* variando la relación de velocidades entre pieza y muela y la tasa de arranque de viruta del proceso.

Para cada prueba se han medido la potencia, desgaste y rugosidad a diferentes puntos de volumen específico de material mecanizado.

Para la primera muela se han obtenido las siguientes conclusiones:

- A medida que el caudal específico de viruta Q' es mayor, disminuye e_c . Esto se debe a que al aumentar el caudal de viruta Q' , aumentamos el tamaño de viruta arrancada por cada grano, mejorando la eficiencia energética del proceso.
- A medida que aumenta el valor de V_w' , e_c crece ligeramente debido al desgaste de la muela. Esto se puede ver claramente en todos los ensayos con un valor de $Q'=1$ mm³/mm., mientras que para el resto de casos, a diferentes tasas de arranque de viruta, como $Q'2,5$ y sobre todo $Q'4$ ocurre hasta cierta cantidad de material mecanizado donde e_c comienza a descender a causa del desprendimiento de los granos causado por el aumento de las fuerzas de rectificado.
- La rugosidad aumenta a medida que mecanizamos más material a causa de la pérdida de capacidad e corte de la muela. En algunos casos permanece estable o incluso disminuye ligeramente si el fenómeno de autodiamantado compensa los efectos de la pérdida de capacidad de corte.
- Una mayor Q' empeora la rugosidad de forma muy notable. El ratio de velocidades periféricas entre la pieza y la muela lo hace de forma mucho menos acusada, resultando en general, en una menor rugosidad a medida que aumenta Q . Esto se debe a un aumento del ratio de velocidades que hace que el espesor de viruta sea menor, lo que favorece un acabado con menor rugosidad. A medida que aumenta el valor de Q' el desgaste que sufre la muela aumenta de manera apreciable, lo que se refleja en el descenso del parámetro G .

Para la segunda muela se han obtenido las siguientes conclusiones:

- El comportamiento de la energía específica es similar, pero más constante que en la muela 1, e_c tiende a subir de forma menos pronunciada.
- La rugosidad es muy alta en todos los casos, y los valores son poco estables para tasas de arranque de viruta de Q^4 . Estos resultados se explican por el alto grado de desgaste de los granos de abrasivo. La rugosidad en general es algo peor que la muela 1 pese a ser de grano más fino.
- La rugosidad se mantiene más constante para valores de Q^1 y $Q^{2,5}$ $\text{mm}^3/\text{mm.s}$, mientras que para Q^4 la rugosidad crece rápidamente y es mucho más variable.
- El desgaste para todos los casos de Q' es excesivo para cualquier valor de q .
- Para valores mayores de Q' la energía específica es notablemente menor y con un comportamiento más estable. Esto se debe a que un aumento en la tasa de arranque de viruta favorece que el proceso de desgaste y autodiamantado de la muela se dé más rápidamente.
- Todos los ensayos realizados con esta muela se han tenido que terminar mucho antes de llegar a $V_w' 2000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ a causa de los elevados fenómenos vibratorios manifestados durante el proceso.

