



GRADO EN (TITULACIÓN)

TRABAJO FIN DE GRADO

2015 / 2016

*MODELIZACIÓN TÉRMICA DEL PROCESO DE DIAMANTADO*

**DOCUMENTO 3 : MEMORIA**

**DATOS DE LA ALUMNA O DEL ALUMNO**

NOMBRE: JON

APELLIDOS: JAUREGUI CANO

FDO.:

FECHA: 14/04/2016

**DATOS DEL DIRECTOR O DE LA DIRECTORA**

NOMBRE: IÑIGO

APELLIDOS: POMBO RODILLA

DEPARTAMENTO: INGENIERÍA MECÁNICA

FDO.:

FECHA: 14/04/2016

Anexo II



**DOCUMENTO 3: MEMORIA**

3.2. Definición de términos básicos.....	3
3.2.1. Nomenclatura.....	3
3.2.2. Parámetros básicos.....	4
3.3. Descripción del problema.....	6
3.4. Antecedentes .....	9
3.4.1. Proceso del rectificado.....	9
3.4.2. Tipos de muelas.....	11
3.4.3. Tipos de rectificado .....	15
3.4.4. Diamantado.....	20
3.4.5. Modelos numéricos en el diamantado.....	27
3.5. Alternativas .....	30
3.5.1. Estudio experimental.....	31
3.5.2. Modelización numérica.....	32
3.6. Solución adoptada .....	34
3.6.1. Marco teórico .....	34
3.6.1.1. Método de elementos finitos .....	34
3.6.1.2. MEF aplicado a la transferencia de calor .....	37
3.6.1.3. ANSYS y el Análisis Térmico .....	41
3.6.1.4. Creación del modelo .....	45
3.6.2. Marco metodológico .....	55
3.6.2.1. Medición de temperatura.....	55
3.6.2.2. Obtención de $R_d$ .....	57
3.6.2.3. Simulaciones a realizar .....	58
3.6.3. Técnicas y métodos .....	59
3.6.4. Procesamiento de datos.....	63
3.7. Resultados y conclusiones.....	64
3.7.1. Resultados experimentales de partida.....	64
3.7.2. Resultados de las simulaciones .....	68
3.7.3. Conclusiones.....	73
3.8. Líneas futuras .....	75

### 3.2. Definición de términos básicos

En este apartado se van a recoger y explicar todos los conceptos y símbolos utilizados a lo largo de los apartados del presente estudio, los cuales son indispensables para comprender todos los procesos llevados a cabo en el estudio.

#### 3.2.1. Nomenclatura

<i>Nombre</i>	<i>Parámetro</i>
<i>Profundidad de pasada [mm]</i>	$a_d$
<i>Diámetro muela al inicio del diamantado [mm]</i>	$d_s$
<i>Anchura efectiva de contacto entre muela y diamante [mm]</i>	$b_d$
<i>Velocidad de giro de la muela [rpm]</i>	$n_s$
<i>Avance axial del diamante [mm/rev]</i>	$S_d, f_d$
<i>Ratio de superposición</i>	$U_d$
<i>Velocidad de avance de la muela [m/min]</i>	$V_d$
<i>Velocidad periférica de la muela [m/s]</i>	$V_s$
<i>Angulo de inclinación entre muela y pieza en rectificado sin centros [°]</i>	$\theta$
<i>Avance transversal de la pieza en rectificado sin centros [m/min]</i>	$V_t$
<i>Diámetro de la huella en el diamante [mm]</i>	$d_w$
<i>Tiempo de diamantado</i>	$t_d$
<i>Rugosidad media final</i>	$Ra$
<i>Escaneo Electroquímico Microscópico</i>	SEM
<i>Método Elementos Finitos</i>	MEF
<i>Flujo de calor conducido [kW]</i>	$Q$
<i>Coefficiente de conductividad térmica en un material [w/m·K]</i>	$k$
<i>Coefficiente de convección [w/m<sup>2</sup>K]</i>	$h$
<i>Gradiente de temperatura [K]</i>	$\Delta T$
<i>Temperatura [K]</i>	$T$
<i>Coefficiente de emisividad</i>	$e$
<i>Constante de Stefan-Boltzmann [w/m<sup>2</sup>K]</i>	$\sigma$
<i>Potencia consumida en el proceso de diamantado [kW]</i>	$P$

Ratio de partición térmico	$R_d$
Área de contacto entre muela y diamante [ $\text{mm}^2$ ]	$A_d$
Densidad de flujo de calor en el proceso de diamantado [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]	$q_t$
Densidad de flujo de calor entrante en el diamante [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]	$q_d$
Análisis de energía dispersiva de rayos X	EDX

Tabla 1. Nomenclatura empleada en el estudio.

### 3.2.2. Parámetros básicos

Los principales parámetros utilizados en el siguiente estudio son los utilizados en todos los tipos de diamantados, estos parámetros son los siguientes:  $a_d$ ,  $d_s$ ,  $b_d$ ,  $n_s$ ,  $s_d$ ,  $U_d$ ,  $V_d$ , y  $V_s$ .

El primer parámetro que vamos a definir es la **profundidad de pasada de diamantado ( $a_d$ )**, parámetro que tiene importancia en la superficie final de la muela y en las fuerzas que sufre el diamante. En el siguiente estudio se han realizado dos tipos de configuraciones con distintas profundidades de pasada

El siguiente parámetro corresponde al **diámetro de la muela al inicio del diamantado ( $d_s$ )**. Este parámetro se utiliza para calcular la **velocidad de giro de la muela ( $n_s$ )**, utilizando la expresión inferior (ecuación 1), donde lo único que falta por definir es  $V_s$ , **siendo la velocidad de corte de la muela**.

$$n_s = \frac{V_s \cdot 60 \cdot 1000}{\pi \cdot d_s} \quad (1)$$

La **anchura efectiva de contacto entre diamante y la muela ( $b_d$ )**, la cual dependerá en gran medida de la geometría del diamante utilizado en el proceso. En el caso de los diamantes rectangulares como el utilizado en el presente estudio la anchura efectiva será la misma que la de las caras del diamante.

Un parámetro que tiene relación con el parámetro anteriormente explicado es el **ratio de superposición (*Overlap ratio*) ( $U_d$ )**, el cual indica el número de revoluciones de la muela que tarda en recorrer el diamante su anchura de

contacto real ( $b_d$ ). Se selecciona en función del proceso que se va a llevar a cabo con la muela, teniendo un valor entre 2 y 3 cuando el tipo de rectificado sea de desbaste, entre 3 y 4 cuando sea un rectificado de semiacabado y entre 6 y 8 cuando el rectificado sea un acabado; es decir, cuanto mayor sea el valor, mejor será el acabado y menor será la velocidad de avance ( $V_d$ ) de la muela; en cambio, cuando el acabado es más basto (desbaste), el valor de ( $U_d$ ) es bajo y la velocidad de avance ( $V_d$ ), al contrario, tiene un valor alto, ya que el diamantador tarda menos en recorrer el ancho de la muela, lo cual conducirá a un rápido deterioro del diamante con el correspondiente daño inducido en la muela y a tener que realizar ciclos de rectificado muy cortos entre diamantados. Por lo tanto, el valor de  $U_d$  condiciona la superficie de la muela abrasiva, teniendo que variar el valor de este dependiendo que se quiera obtener posteriormente en el diamantado o en el rectificado.

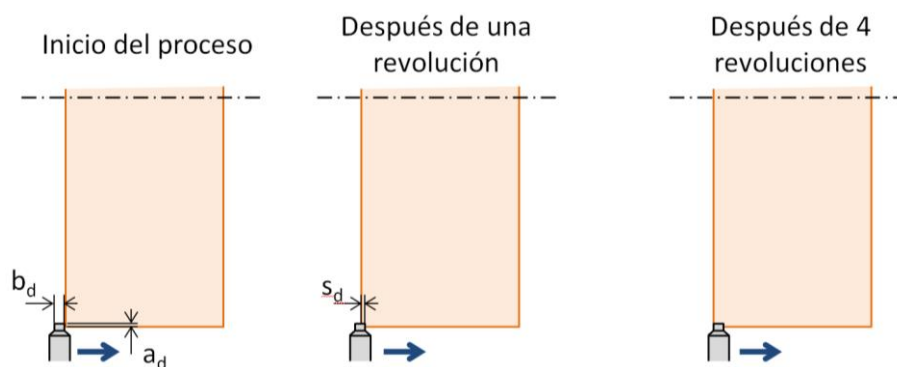


Figura 1. Representación gráfica del ratio de superposición.

En el caso de la Figura 1., el valor de  $U_d$ , sería 4, puesto que es el número de revoluciones que tarde el diamante en hacer pasar por un punto de la muela toda su anchura de contacto.

En la siguiente ecuación 2 se observa la relación entre los diferentes parámetros anteriormente expuestos, siendo  $S_d$  el avance axial del diamante.

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} = b_d \cdot \frac{n_s}{V_d} \quad (2)$$

Por último el parámetro que queda por definir es la **velocidad de avance axial ( $V_d$ )** es un parámetro que se debe determinar, el cual tendrá una gran influencia en la superficie de la muela a diamantar. Si se despeja este parámetro

de la expresión matemática anteriormente expuesta (ecuación 2), se obtiene la siguiente expresión (ecuación 3) que se utiliza para obtener el valor de  $V_d$  a emplear durante el proceso de diamantado.

$$V_d = b_d \cdot \frac{n_s}{U_d} \quad (3)$$

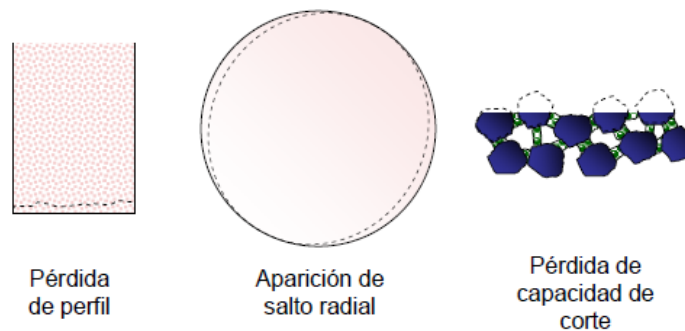
### 3.3. Descripción del problema

El rectificado engloba una serie de procesos de mecanizado que utilizan partículas abrasivas como medio de corte. Se trata de partículas muy duras que se emplean para modificar levemente la forma de una pieza mediante rozamiento. La herramienta utilizada en el proceso es denominada muela, la cual gira a gran velocidad para arrancar pequeñas partículas de la pieza a rectificar. Por lo tanto, se podría considerar que cada partícula o grano funciona como una herramienta de corte convencional, en base a lo cual podemos considerar el rectificado como un conjunto de muchos procesos de mecanizado desarrollándose al unísono.

Las principales características del rectificado son la gran **calidad superficial**, la posibilidad de **rectificar materiales muy duros** y la **gran precisión** que se puede alcanzar. Básicamente, el rectificado es una operación realizada en piezas que requieren medidas y tolerancias exigentes, ya sea dimensionales (diametral, longitudinal o angular), geométricas (concentricidad, paralelismo, perpendicularidad, etc.) o de acabado superficial (rugosidad, dirección del rayado, etc.). Debido a esto, el rectificado es un proceso que se sitúa al final del proceso de fabricación.

Como hemos señalado, uno de los principales problemas que aparecen en el rectificado es el desgaste de la muela. A medida que avanza el proceso y debido al gran rozamiento que soporta la muela puede sufrir tres tipos de desgaste: la pérdida de la capacidad de corte, la pérdida de su forma redonda o la deformación del perfil de corte. Debido a ese desgaste, pueden aparecer en el proceso de rectificado vibraciones que podrían dañar la pieza o empeorar el acabado final. Además podría registrarse un consumo excesivo de potencia debido a que la superficie de contacto no es óptima y ocasionar pérdida de

precisión en la pieza.



*Figura 2. Tipos de desgaste de la muela.*

Cuando la muela haya sufrido un desgaste excesivo o no admisible para el tipo de proceso que estemos llevando a cabo, será necesario diamantarla.

El presente trabajo está centrado en el proceso de diamantado que es una parte determinante dentro del proceso rectificador. Normalmente es un proceso complementario que se utiliza para recuperar la capacidad abrasiva de la muela cuando el desgaste debido al uso de la misma es excesivo. Es un proceso de vital importancia para el acabado final de las piezas a rectificar, ya que repercute en la muela y esta a su vez, en las piezas.

La mayoría de los estudios realizados sobre el rectificado sólo tienen en cuenta el desgaste de la muela, sin embargo en el siguiente estudio se va a perseguir el objetivo de analizar el diamantado y todos los agentes que actúan en él.

Para ello, se va a **determinar el flujo de calor entrante en el diamante durante el proceso, realizando un trabajo de modelización y procesamiento.** Mediante el cual permita determinar para un par muela-diamante determinado, unos parámetros de diamantado que no sólo maximicen la capacidad de arranque de material por parte de la muela y consigan el acabado superficial adecuado, sino que además minimicen el desgaste del diamante.

El desgaste del diamante no solo deriva en problemas a la hora de diamantar, sino que si el diamantado no es óptimo la geometría y superficie de la muela no serán las adecuadas. Esto puede derivar en imprecisiones geométricas en la muela abrasiva, rugosidades, así como vibraciones a la hora



de rectificar acarreado un mal acabado superficial. Teniendo en cuenta que el rectificado es un proceso industrial que se encuentra al final de la cadena de producción y sirve para darle un valor añadido a las piezas, estas imprecisiones son inadmisibles.

Debido al alto valor que tienen las piezas se deben tener todos los parámetros que afectan al rectificado analizados y totalmente controlados. Dentro de la literatura científico-técnica no hay información ni un modelo teórico capaz de analizar los factores de este proceso, mediante este estudio también se quiere aportar información para posteriores estudios. Ya que es un ámbito poco estudiado pero que en estos momentos está cobrando gran importancia dentro del rectificado.

Se ha observado que la naturaleza del desgaste es térmica, esto se debe a que durante el diamantado aparecen altas temperaturas y presiones en las áreas de contacto entre el diamante y la muela abrasiva. El diamante a partir de los 700°C, en presencia de oxígeno se grafitiza, con lo cual pierde sus propiedades mecánicas desprendiéndose al contactar con la muela abrasiva. Por ello, es muy importante hacer una modelización del proceso y ser capaces de ver cómo afectan los parámetros de diamanto al proceso. Ya que no siempre unos parámetros de corte menos agresivos provocan un menor desgaste.

Para poder analizar todos los parámetros que engloban al rectificado y poder crear un modelo teórico se va a utilizar el método de elementos finitos, puesto que es una herramienta muy potente y versátil. Ya que permite hacer un análisis completo y ver a cada instante los esfuerzos que sufre el diamante, sin necesidad de hacer un gran trabajo experimental. Sin embargo de un modo experimental solo seremos capaces de obtener datos en los puntos en los que estemos ubicando los instrumentos de medición.

Cabe destacar que la modelización del diamantado no exime de trabajo experimental sino que lo facilita y minimiza en gran medida. Puesto que una vez realizado el modelo se deberá verificar y ajustar mediante los resultados obtenidos experimentalmente. Obteniendo así un modelo teórico válido para poder decidir el tipo de diamante a utilizar según la operación que se desee

realizar.

### 3.4. Antecedentes

#### 3.4.1. Proceso del rectificado

Como hemos mencionado anteriormente el rectificado consiste en el conjunto de pequeños cortes producidos por partículas de material abrasivo. Estas partículas forman la herramienta, esta es un disco rotativo denominado muela y que al girar a gran velocidad modifican la forma o el acabado de la pieza a rectificar.

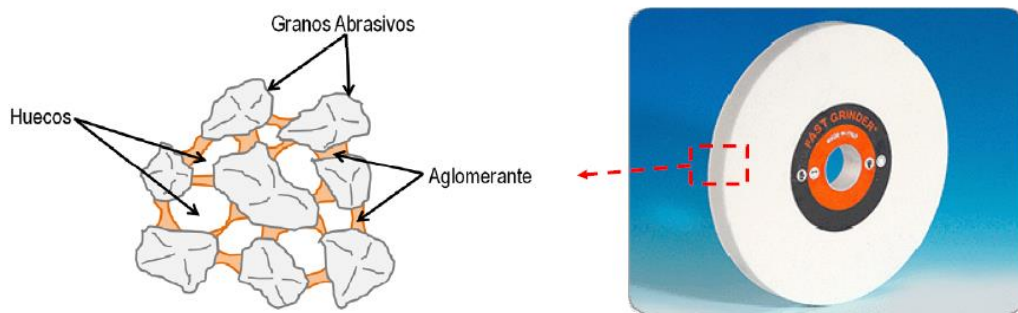


Figura 3. Granos de material abrasivo unidos por aglomerante.

Los filos de la herramienta son los granos de abrasivo, por lo que no existen filos de corte definidos. De esta manera se obtiene un proceso de mecanizado formado por infinidad de procesos de mecanizado a nivel microgeométrico que se dan de manera simultánea, es decir, cada grano abrasivo es encargado de arrancar una pequeña cantidad de material de pieza, de forma análoga a como lo haría un filo de corte en un proceso de fresado o torneado.

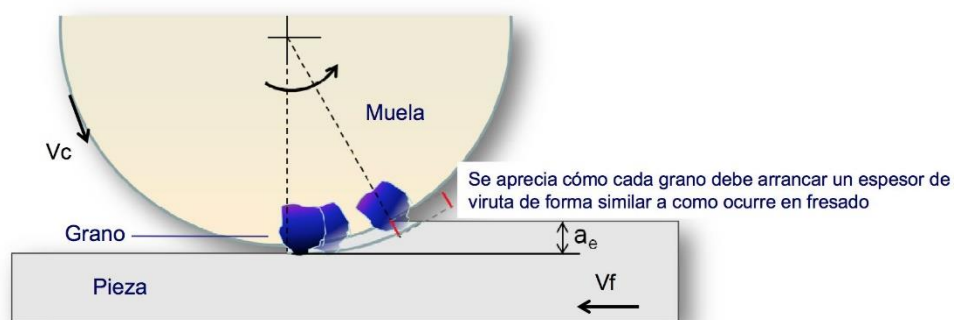


Figura 4. Acción de un grano sobre la pieza.

En la Figura 4. se puede observar la acción de un solo grano sobre la

pieza rectificada. Comparando lo que se muestra en la figura con el mecanizado con herramienta de filo definido, se puede comprobar lo siguiente: se trata de una herramienta con un ángulo de desprendimiento considerablemente negativo ( $\gamma$ ) y que tiene un ángulo de incidencia prácticamente nulo; por lo tanto es un proceso poco eficiente respecto a la energía consumida por volumen de material eliminado y a que las temperaturas que alcance la pieza tenderán a ser altas.

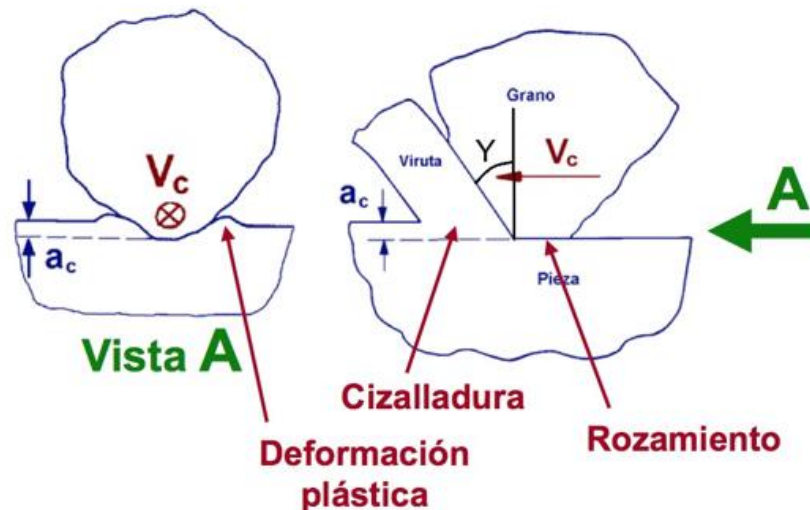


Figura 5. Detalle arranque material.

Las principales **ventajas** del rectificado respecto a otros procedimientos de corte son la gran precisión, la elevada calidad superficial de las superficies obtenidas, y que por este procedimiento es posible mecanizar materiales muy duros (metales duros) y especialmente frágiles (cerámicas) que no pueden ser mecanizados por otro tipo de procesos como el fresado o el torneado. Con estas características, se trata, como previamente se ha mencionado, de un proceso con **bajas tasas de arranque de material**, no apto para procesos de desbaste y que se sitúa en las fases finales del proceso productivo aplicado solamente a cotas funcionales.

El rectificado tiene por finalidad mejorar las características dimensionales, geométricas y/o superficiales de aquellas zonas de la pieza que así lo requieran a partir de las especificaciones de los planos de la propia pieza. Por lo tanto, con el rectificado se pueden corregir: excentricidad, circularidad, rugosidad, etc. y por otro lado, llevar las dimensiones de una pieza a las tolerancias especificadas

según su diseño.

A partir de lo descrito 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, lo que conlleva que suponga el 25% del total de los gastos de mecanizado en los países industrializados.

### **3.4.2. Tipos de muelas**

Como bien se ha comentado al inicio de la introducción, las muelas abrasivas son las herramientas utilizadas en operaciones de rectificado, y en general, están compuestas por dos elementos: granos abrasivos y material de unión. La selección de la muela es crítica en la operación, del mismo modo que ocurre con las herramientas de torneado o fresado, por lo tanto, una elección adecuada de la misma será indispensable para llevar a cabo el proceso de manera satisfactoria. a la hora de elegir la mejor muela para una aplicación, debe atenderse a:

- **La geometría de la operación** (planeado, cilíndrico a través, sin centros, etc.)
- **La especificación de la muela:**
  - Tipo de material abrasivo
  - Tipo de aglomerante
  - Tamaño del grano abrasivo
  - Estructura
  - Grado o dureza de la muela

#### **Tipo de material abrasivo**

Los requerimientos básicos de un material abrasivo son la dureza (tiene que ser más duro que el material a mecanizar) y la resistencia al desgaste mecánico, químico y térmico (resistir altas temperaturas).

El material de grano se selecciona en función del material de pieza que se vaya a rectificar; los más habituales son la alúmina ( $Al_2O_3$ ) y el carburo de Silicio

(SiC) entre los **abrasivos convencionales** y el diamante y el CBN entre los **superabrasivos**.

### Tamaño del grano abrasivo

El tamaño del grano determina en gran medida el acabado superficial que se puede obtener. Si el tamaño de grano es grande, la muela se usará para desbaste, con un acabado superficial “pobre” y una resistencia al desgaste alta. En cambio, si el tamaño del grano es pequeño, la muela se usará para acabado, ya que actuará con gran precisión, por lo tanto, el acabado superficial será bueno.

Para determinar el tamaño de grano se utiliza un número que representa la densidad de rendijas de tamiz utilizado para clasificarlo. Los tamaños de grano son siempre números pares que se ajustan a una serie de números normalizados (ISO 6344).

A continuación, en la Figura 6. se muestran los tamaños de grano y el acabado superficial que conllevan.

Tamaño de grano	Acabado superficial
4, 6, 8, 10	Muy grosero
12, 14, 16, 20, 24	Grosero
30, 36, 46, 54, 60	Medio
70, 80, 90, 100, 120, 150	Fino
180, 220, 240, 280, 320, 400, 500, 600	Muy fino

Figura 6. Tamaño de grano y acabado superficial.

### Material de unión (aglomerante)

El aglomerante es el elemento que mantiene unidos los granos de abrasivo y deben ser capaces de soportar:

- Fuerzas de rectificado: para evitar pérdidas prematuras de grano.
- Temperaturas altas: para permitir liberar granos desafilados.

- Fuerzas centrífugas de rotación: para transmitir fuerzas entre el grano y el husillo.
- Ataques químicos: para disipar el calor generado en el proceso.

Existen diferentes tipos de aglomerante, siendo los vítreos (V), resinosos (B) y los metálicos los más comunes.

Lo ideal es un aglomerante que cuando el grano se rompa debido a la fuerza axial, se desprenda, pero que no se desprenda cuando esté cortando o rectificando. Si el aglomerante es muy duro, cuando el grano se rompa, no se desprenderá, por lo tanto, se quedará plano o liso y no arrancará el material debido.

### Estructura de la muela

La estructura indica la concentración volumétrica de granos en la muela. se emplean muelas abiertas para materiales blandos y dúctiles que producen virutas “rizadas” y cuando el volumen de viruta generado es grande. Sin embargo, se emplean muelas cerradas para materiales muy frágiles y cuando las áreas de contacto son pequeñas y cuando el volumen de viruta generado es pequeño.

La estructura se designa mediante un número que indica el grado de “apertura” de la muela. Dependiendo de la estructura de la muela, el tipo y el espaciado del grano es diferente, como se puede apreciar en la siguiente figura (Figura 7.):

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

Figura 7. Estructura de la muela.

Mediante la Figura 8. se aprecia la variación del espaciado del grano de la muela dependiendo de la estructura de esta.



Figura 8. Espaciado del grano de la muela.

### Grado o dureza de la muela

El grado o 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 o aglomerante sujeta a los granos.

Como se puede apreciar en la Figura 9., el grado o dureza de una muela se indica mediante una letra que va desde la A hasta la Z.

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

Figura 9. Grado o dureza de una muela.

Una vez conocidas las especificaciones de las muelas, la designación normalizada para muelas únicamente de material abrasivo convencional (la denominación de muelas de superabrasivo no está normalizada y depende de cada fabricante) será la siguiente:

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

Figura 10. Especificaciones de la muela.

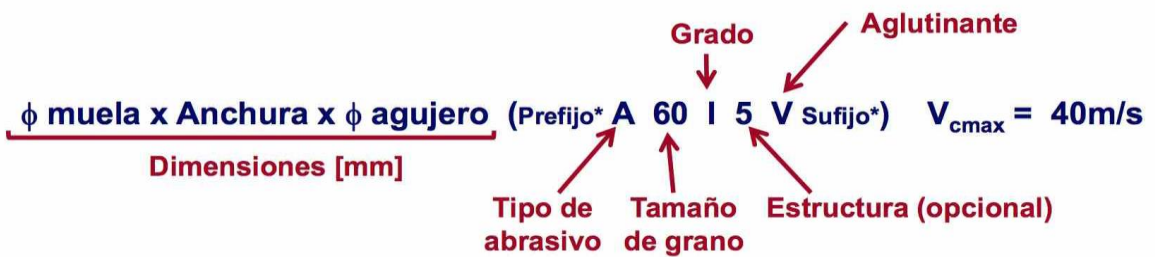


Figura 11. Ejemplo de designación de una muela.

### 3.4.3. Tipos de rectificado

Dependiendo de la geometría de la pieza a rectificar y de la disposición constructiva de las máquinas empleadas, podemos tener los siguientes tipos de proceso de rectificado: rectificado plano, rectificado cilíndrico y rectificado sin centros.

#### Rectificado plano

Este tipo de rectificado se emplea fundamentalmente para planear piezas y es el proceso de rectificado más difundido, el cual encuentra aplicación en casi todos los ámbitos del rectificado para la generación de superficies planas. La selección del medio abrasivo depende en particular de la naturaleza del material a ser mecanizado. En la Figura 4. 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 ( $v_f$  o  $v_d$ ). Por último, cabe destacar la profundidad de pasada ( $a_e$  o  $a_d$ ) que es la que determinará la cantidad de material eliminado por la muela en una pasada.

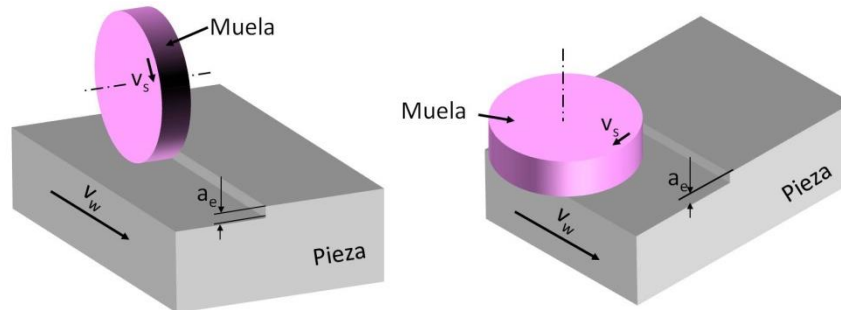


Figura 12. Rectificado plano

A la hora de rectificar se empleará una **rectificadora planeadora**, la cual consiste de un cabezal provisto de una muela y un carro longitudinal que se mueve en forma de vaivén en el que se coloca la pieza a rectificar. También puede colocarse sobre una plataforma magnética. Generalmente se utiliza para la eliminación rápida del material, aunque algunas máquinas pueden lograr una elevada precisión para rectificar por ejemplo matrices, calzos y ajustes con superficies planas.

### Rectificado cilíndrico

Este tipo de rectificado se emplea fundamentalmente para hacer el acabado de piezas de revolución que por ejemplo hayan sufrido un proceso de torneado anterior.

Existen dos tipos de rectificado cilíndrico: el rectificado cilíndrico exterior y el interior.

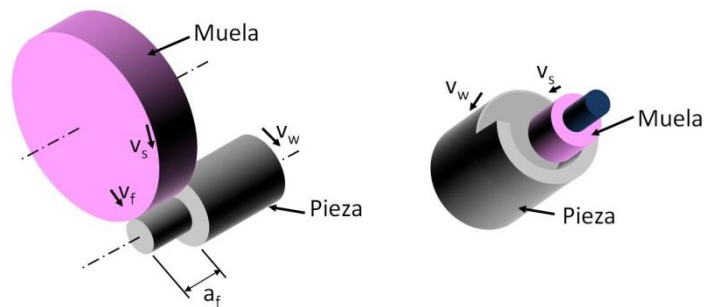


Figura 13. Rectificado cilíndrico

En el rectificado cilíndrico de exteriores (Figura 14.), las piezas de trabajo rotacionalmente simétricas normalmente son amarradas en la máquina por sus extremos mediante un contrapunto y un perro de arrastre y luego son trabajadas con desprendimiento de viruta mediante una muela abrasiva.

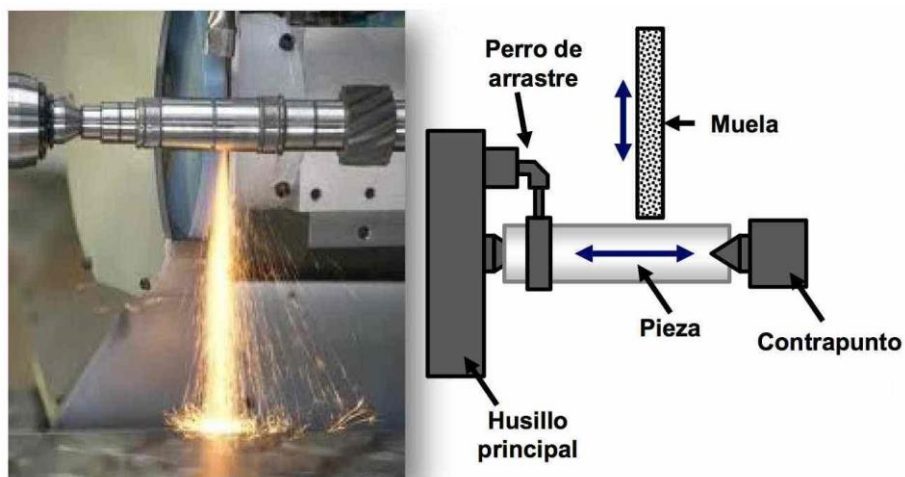
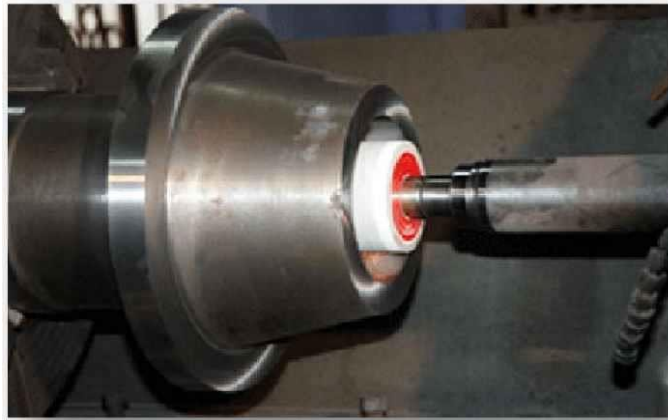


Figura 14. Rectificado cilíndrico de exteriores.

En el rectificado cilíndrico de interiores, se perfeccionan sobre todo las superficies funcionales interiores; la velocidad de rotación de la muela es elevada, trabajando esta en voladizo.

Los mayores inconvenientes que encontramos en este proceso son la dificultad de amarre y de suministro de fluido de corte a la pieza. Por otra parte cabe destacar que debido a que el diámetro exterior de las muelas abrasivas utilizadas se ve limitado fuertemente por el diámetro interior del sitio de rectificación, la durabilidad de la muela abrasiva es uno de los criterios más

importantes para la evaluación económica del proceso.



*Figura 15. Rectificado cilíndrico de interiores.*

### **Rectificado sin centros**

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.

El rectificado sin centros a través es un proceso de rectificado cilíndrico exterior para grandes series de componentes cilíndricos y debido a sus cortos tiempos de mecanizado (por pieza de trabajo) garantiza un nivel extremadamente alto de productividad y rentabilidad. La pieza de trabajo se apoya de manera centrada sobre una regla, en donde el avance longitudinal es llevado a cabo por una muela de regulación localizada en forma opuesta a la muela abrasiva. Mediante este proceso de rectificado se pueden alcanzar tolerancias de medidas particularmente altas, y adicionalmente, dependiendo de la calidad de la muela abrasiva, elevadas calidades de superficie. Debido a la fácil carga y descarga de la máquina (con piezas de trabajo), las piezas pueden ser concatenadas fácilmente en una línea de producción, lo cual hace posible un mecanizado completo de las piezas de trabajo en el espacio más estrecho posible y en un solo paso.

A continuación, en la Figura 16. se puede ver un esquema del proceso de

rectificado sin centros. La muela rectificadora es la encargada de eliminar el material de 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.

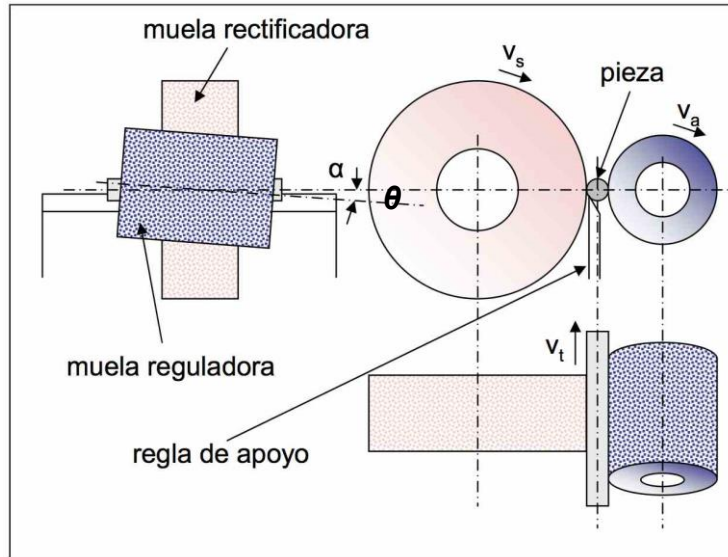


Figura 16. Parámetros principales del rectificado sin centros.

A la velocidad periférica de la muela ( $v_s$ ), se le suman el ángulo de inclinación del eje ( $\theta$ ), 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.

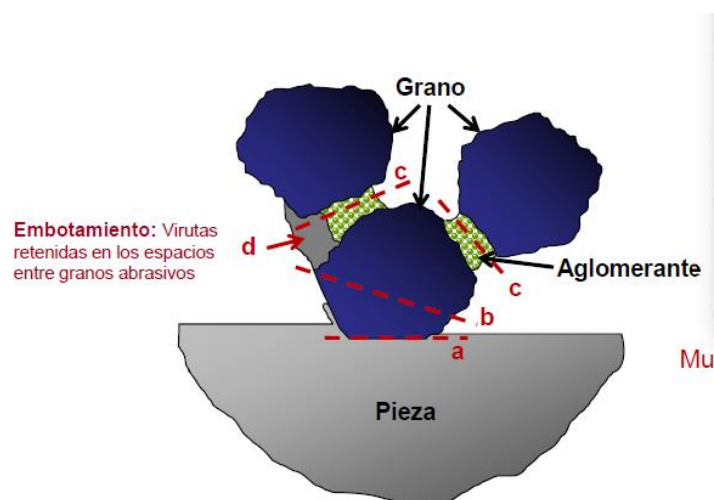
Para rectificar se empleará una **rectificadora sin centros**; este tipo de máquinas rectifican piezas cilíndricas de dimensiones pequeñas, como casquillos, bulones o pasadores y piezas cilíndricas de gran esbeltez. El mecanismo consta de dos muelas que giran en el mismo sentido, entre medio de las cuales se coloca la pieza, sin sujeción (por eso el mecanismo se denomina “sin centros”) que gira en sentido opuesto al de las muelas, impulsada por el movimiento de la muela de arrastre, que está inclinada un cierto ángulo de entre 1 y 5 grados, dependiendo de la dureza del material a rectificar y del diámetro de la pieza. Este tipo de rectificadoras posibilitan el uso de muelas de gran anchura sin deformar la pieza. Además se minimizan los tiempos de amarre y centrado de la pieza y no existen errores de centrado, por lo que la precisión es alta.

### 3.4.4. Diamantado

Cuando una muela sufre un desgaste excesivo, la solución es el diamantado de esta. El diamantado, como dice su nombre, es un proceso mediante el cual torneamos la muela con una herramienta de diamante de tal manera que se da la micro-rotura de granos para crear nuevos filos y se elimina el material embotado, es decir, la capa de abrasivo que está gastada se desprende y se obtiene una capa de abrasivo nueva. Gracias a este proceso se recupera la geometría de la muela y en el caso de que esta sea nueva se elimina el salto radial.

Como se ha mencionado anteriormente el diamantado es un proceso fundamental en el rectificado puesto que cuando una muela pierde su forma o se embota, pueden causar un aumento de la energía consumida en el rectificado, fallos en la geometría de la pieza a rectificar, vibraciones en el proceso debido al salto radial que puede aparecer en la muela. También es posible que la superficie de acabado en la pieza no sea la esperada (rugosidad excesiva, marcas superficiales, etc.) o tener una pérdida de precisión en el proceso. Por lo tanto los principales mecanismos de desgaste de la muela son los siguientes:

- Pérdida de filo de grano (a)
- Fractura/rotura de grano (b)
- Rotura de aglomerante (pérdida de granos útiles) (c)
- Embotamiento de la muela (d)



*Figura 17. Mecanismos de desgaste de muela*

Con lo descrito anteriormente vemos que el diamantado es un proceso totalmente necesario en el rectificado, estos son sus principales objetivos:

- Regeneración de la capacidad abrasiva, la cual se puede obtener de dos maneras;
  - o Micro-rotura de granos para crear fillos nuevos
  - o Eliminando el material embotado
- Recuperación de la geometría de la muela
- Eliminación del salto radial en el montaje

Existen diferentes tipos de diamantes para realizar el diamantado en función de su geometría dependiendo del proceso de rectificado, composición, características del material abrasivo o los parámetros de diamantado. A pesar de su importancia, el diamantado es un proceso poco estudiado y en el que nadie se para a analizar aspectos como el desgaste que sufre el diamante, el cual disminuye significativamente la calidad del rectificado, por lo tanto, la mejora de este se presenta como una oportunidad para mejorar el proceso.

En la industria se distinguen dos grandes grupos de diamantadores para muelas convencionales como son los diamantadores **fijos** y los **móviles**, los cuales se pueden observar en la siguiente Figura 18.

- Diamantadores fijos:
  - o Diamantes monopunta (**B**)
  - o Diamantes multipunta (**A**)
- Diamantadores móviles:
  - o Moletas de diamante (**C**)



*Figura 18. Tipos de diamantes.*

Los **diamantadores monopunta** se puede decir que son los más simples en los cuales existen muchas diferentes geometrías las cuales dependerán de la máquina, de la muela y del proceso. Así mismo su tamaño viene determinado por el tamaño de la muela a diamantar. Es decir, por el diámetro de muela y por su anchura. Existen tablas en las que dependiendo de estos dos parámetros se obtiene el diamante monopunta a utilizar.

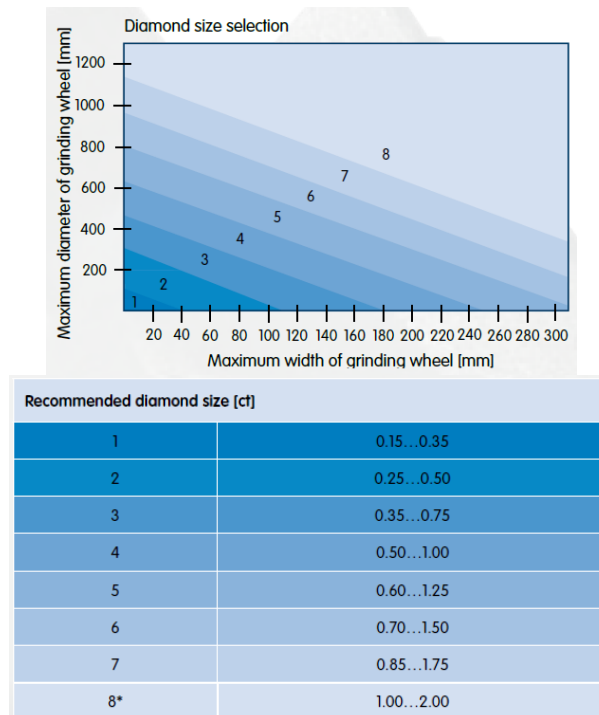


Figura 19. Ejemplo tabla selección diamante

Por otro lado, el posicionamiento de estos es muy importante de cara a una óptima ejecución del proceso. Normalmente, dicho posicionamiento viene dado por el propio utillaje de la máquina pero en caso de tener que mecanizar uno nuevo tendrá que cumplir unos ángulos, los cuales se exponen en la siguiente Figura 20.

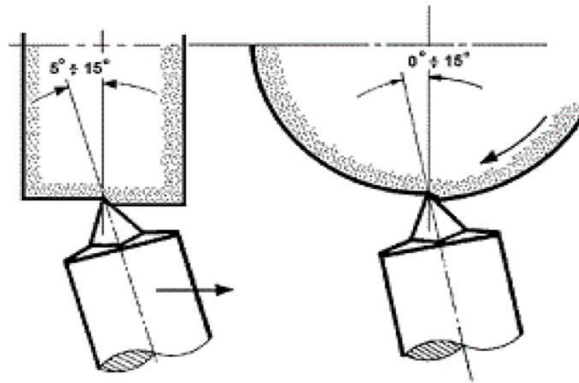


Figura 20. Ángulos de diamantado.

Con estos diamantes monopunta, y controlando los parámetros de diamantado, es posible modificar la superficie de la muela condicionando su comportamiento durante el rectificando. El desgaste de este tipo de diamante es relativamente alto si se compara con el resto como pueden ser los multipunta o las moletas.

Por todo esto, este tipo de diamantes monopunta se utilizan para diamantar muelas planas. No obstante, si se adecuan las condiciones y la posición y geometría del mismo, se pueden generar perfiles sencillos en la muela (Figura 20.).

Dentro de los **diamantadores multipunta** destacan dos tipos, los de **hoja** y los de **loseta plana**.

Los **diamantadores multipunta de hoja**, son similares a los anteriores pero con varios diamantes. Al igual que los monopunta, se utilizan para el diamantado de muelas planas y de muelas de perfiles simples. Pueden ser diamantes aglomerados o diamantes de aguja.

Por el contrario, los **diamantadores multipunta de loseta plana**, se emplean en operaciones de desbaste y son los diamantes más rentables en el diamantado de muelas. Sin embargo, el proceso no permite condicionar la superficie de la muela como con un monopunta, obligando únicamente a realizar operaciones de diamantado plano.





*Figura 21. Diamantador multipunta de hoja (izquierda) y diamantadores multipunta de loseta plana (derecha).*

Al mismo tiempo cabe destacar que las fuerzas son entre 5 y 8 veces mayores, de modo que el sistema de fijación es de gran importancia. La profundidad de pasada que se puede llevar oscilará entre 10 y 120 micras para muelas de alúmina convencionales.

Por último están las **moletas móviles** (moletas de superabrasivo) (Figura 22.), las cuales son de diamante o CBN y se emplean para diamantar en tres situaciones:

- Generación de muelas de perfil no plano.
- Procesos de diamantado no continuo.
- Diamantado de muelas de superabrasivo (diamante o CBN).



*Figura 22. Moletas móviles.*

Al igual que ocurre con las muelas los diamantes también sufren

desgaste, sin embargo, no se le presta la atención que se le presta al desgaste de la muela. Esto se debe a que en un principio se creía que el desgaste del diamante era despreciable y la influencia en la pieza final era nula.

Los factores que más influencia tienen en el desgaste son el tipo de muela abrasiva, características del diamante y tiempo de contacto entre muela y diamantador.

En el caso de la muela lo que más afecta al desgaste es la tenacidad y dureza del grano abrasivo, cuanto más duro sea el grano mayor desgaste habrá en la muela. El tamaño del grano también es un parámetro importante, cuanto mayor sea el tamaño del grano mayor será el desgaste.

Un desgaste excesivo del diamante puede generar incremento en las fuerzas de rectificado, vibraciones, marcas en la pieza, aumento de la rugosidad y/o rotura “catastrófica” del diamantador.

Para controlar y medir el desgaste de un diamantador existen varias técnicas que varían según el diamantador utilizado. Como ejemplo se va a analizar la forma de medir el desgaste en un diamante monopunta. El desgaste de un diamante monopunta se mide a partir del radio de la huella que se va quedando en el diamante tras sucesivas operaciones de diamantado. En la Figura 23. se ve la huella para el caso de un diamante monopunta.

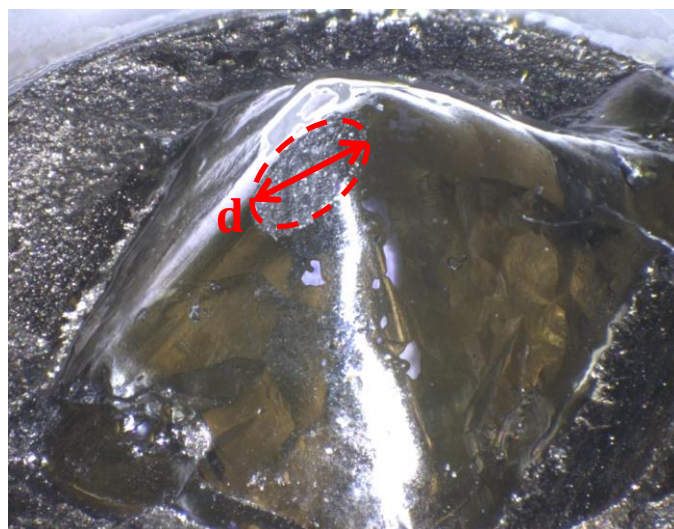


Figura 23. Huella de desgaste en diamante monopunta.

Una vez obtenemos el radio de la huella, para ello tendremos que utilizar un microscopio, se puede estimar de que forma se va a desgastar un diamante utilizando la siguiente gráfica.

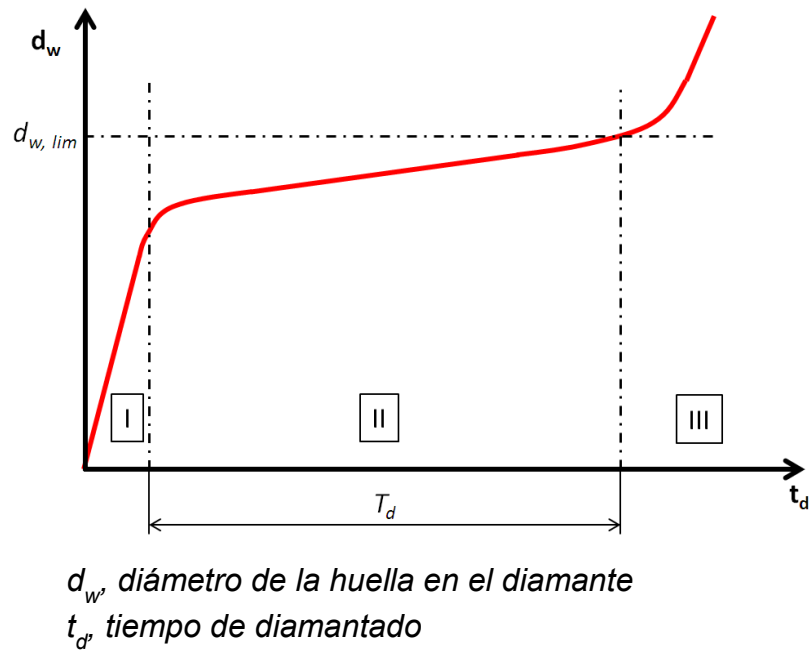


Gráfico 1. Desgaste del diamante.

Como se observa se pueden distinguir tres zonas de desgaste del diamante, a continuación se describen como actuara el diamante en cada una de ellas.

- Zona I:

Zona de rápido desgaste del diamante.

En condiciones adecuadas es de corta duración.

- Zona II:

Zona estacionaria de desgaste lineal.

Zona de trabajo del diamante en la práctica.

El límite suele situarse para un valor de  $d_w=0,6\text{mm}$  (Diamantes monopunta).

- Zona III:

Se produce un incremento muy acusado del desgaste.

Puede derivar en rotura del diamantador.

Como hemos pedido ver el desgaste del diamante es un parámetro de alta importancia y es necesario tenerlo acotado y saber debido a que se origina el desgaste. Este es de naturaleza térmica se debe a las altas temperaturas que se originan debido a la fricción entre la muela y el diamante. La metodología para estudiar el desgaste experimentalmente es costosa y no muy eficaz por eso se ha decidido realizar un análisis del estado del arte sobre la modelización numérica en el diamantado con el fin de estudiar el comportamiento del diamante más profundamente.

### 3.4.5. Modelos numéricos en el diamantado

Como hemos mencionado anteriormente se le ha prestado poca atención al proceso del diamantado a la hora de mejorar el rendimiento del rectificado. A principios de los 80 comenzaron los estudios sobre los parámetros del rectificado. Los primeros en realizar un estudio fueron Inasaki y Okamura [9], estos vieron que el parámetro que más afectaba al diamantado es el avance ( $f_d$ ). Concluyeron que cuanto más alto es el valor de  $f_d$ , mas alto resultara el valor de la rugosidad media final  $R_a$  en la superficie a diamantar. En su estudio, Inasaki y Okamura proponen utilizar un emisor de señales acústicas para monitorizar el proceso del diamantado. También vieron cómo se podía encontrar una relación para utilizar las señales acústicas en la medición de  $R_a$  en la superficie. En este trabajo no se tuvo en cuenta el desgaste del diamantador.

Coelho et al. [10], fue el siguiente en estudiar el diamantado, en este caso estudió la relación entre los parámetros de diamantado y el afilado de la muela para dos tipos de diamante, los diamantes monopunta y los diamantes sintéticos monocristal (MDD). Los resultados obtenidos confirman lo expuesto por Inasaki

y Okamura [9], estos hallaron una relación directa, para el caso de los diamantes monopunta, entre los parámetros de diamantado, el afilado de la muela y las señales acústicas. De acuerdo con sus resultados, el área frontal del rectificado (obtenida del producto entre  $f_d \cdot a_d$ ) es directamente proporcional al afilado de la muela y al nivel de RMS del emisor de señales acústicas. Se echa en falta de nuevo la consideración del desgaste del diamante en el estudio.

El primero en considerar la influencia directa de los parámetros  $f_d$  y  $a_d$  en el desgaste del diamante fue Shih et al. [11,12]. Utilizaron el ratio de desgaste de diamantado  $G_t$  como un indicador del desgaste. En el estudio llevado a cabo se utilizan muelas de carburo de silicio SiC y útiles de diamante. En la fase experimental utilizaron valores de  $a_d$  que iban entre 1-10 $\mu$ m, los resultados obtenidos demostraron que cuanto más grande era el valor de  $a_d$  menor era el desgaste del diamante. Los autores analizaron que esto podía ser debido a que al utilizar valores altos de  $a_d$  la muela podría sufrir pequeñas fracturas, siendo así más pequeño el desgaste sufrido por el diamante. La misma conclusión se obtiene con respecto a  $f_d$ , pero los autores adelantan que esto solo son válidos para el rango de parámetros que utilizan en su estudio.

En un segundo estudio [12], observan que las fuerzas a medida que avanza el proceso de diamantado se vuelven muy inestables. Esto se debe a que a lo largo del proceso se producen fracturas y micro fracturas en el diamantador, estas son identificadas mediante el uso de microscopios SEM. Un diamante desgastado con grandes superficies desgastadas (valores altos de  $b_d$ ), se convierte equivalente a usar valores altos de  $U_d$ , debido a que generara mayores fuerzas en el diamantado y una rugosidad más fina en la superficie de la pieza.

Mochida et al. [13] también analizo la influencia del afilado del diamantador en la superficie de contacto y la potencia de diamantado. Por una parte vieron que la potencia consumida en la cara desgastada era el doble que la del área afilada. Por otra parte, analizaron que la fuerza del rectificado se reduce y la rugosidad aumenta con el aumento de las fuerzas del diamantado. Sin embargo, la evolución del desgaste del diamante no fue estudiada para

diferentes condiciones de diamantado. Finalmente, los resultados experimentales muestran que las fuerzas del diamantado aumentan con respecto de  $f_d$  y  $a_d$ , concluyen que el desgaste del diamante está directamente relacionado con el aumento de estos dos parámetros.

En el siguiente estudio, realizado por Klocle y Linke[3,14], se desarrolla un modelo teórico para evaluar el daño producido en la muela por el diamante. En su trabajo se basan en la idea que el área de contacto entre la muela y el diamante depende mucho del desgaste de este último.

Posteriormente realizaron más trabajos basados en la influencia de los parámetros del diamante en el desgaste del diamante. Los resultados obtenidos corroboraron los obtenidos por Shih [11], estos decían que según aumentaba  $a_d$  se reducía el desgaste del diamante. Aunque las colisiones entre la muela y el diamantador son mayores cuando aumenta  $a_d$ , debido a esto aparecen fracturas en la estructura de la muela. La energía que se genera en la colisión es utilizada posteriormente para romper de unión y así reducir el calor generado. En cambio, cuando el valor de  $a_d$  se reduce, aparece el rozamiento entre la superficie del diamante y la muela, esto produce grandes cantidades de calor que ayudan a que el diamante sufra mayor desgaste.

Sin embargo, la influencia de  $f_d$  necesita un estudio más profundo. En un primer vistazo los resultados obtenidos por Linke y los obtenidos por Shih parecen totalmente opuestos. Pero esto se debe a que los rangos de valores utilizados para  $f_d$  son muy distintos en los dos casos. Shi utiliza valores de  $f_d$  entre 0.007 y 0.069mm, mientras que Linke usa valores entre 0.1 y 0.25mm. Debido a esto, la rotura de los puentes de unión se produce cuando el rango de  $f_d$  es alto, esto explica porque el desgaste aumenta en este rango de valores.

Analizando lo descrito anteriormente surge la idea de que las altas temperaturas y la generación de calor están directamente relacionadas con el desgaste del diamante. Anteriormente en los años ochenta Tkhangapsoev et al. [15] publicó un trabajo de investigación muy interesante sobre la relación entre las altas temperaturas y el desgaste del diamantador. Encontraron pruebas para demostrar que el desgaste comienza en una pequeña zona fracturada durante

los primeros diamantados. Esta zona va continuamente aumentando de tamaño durante los siguientes diamantados, también concluyeron que el calor generado produce daño en el diamante debido a la fatiga térmica.

Teniendo en cuenta la naturaleza térmica del desgaste del diamante, Coelho et al. [16] utilizando simulación numérica (MEF) propuso un modelo para estimar las temperaturas alcanzadas en el diamante, utilizando para ello distintos tipos de soporte del diamante. El modelo presentaba evidentes limitaciones y los resultados obtenidos estaban lejos de la realidad, esto era debido a la hipótesis utilizada para estimar el flujo de calor entrante en el diamante. De hecho, en la literatura científica publicada hasta la fecha no se ha encontrado nada que defina el flujo de calor entrante en el diamante. Las mediciones de temperatura expuestas en [16] solo se pueden utilizar para obtener un valor aproximado, ya que no se ha tenido en cuenta el desgaste que sufre el diamante. En cambio, el autor propone por primera vez utilizar materiales de alta conductividad y geometrías específicas para la fabricación del soporte del diamante y así reducir el desgaste sufrido por el diamante, este hecho es una gran contribución para los posteriores estudios.

Lo visto anteriormente deja claro que el desgaste del diamante es un tema de alto interés para la comunidad científica y para la industria, donde los altos costos de los útiles son debidos al desgaste de los diamantes.

### **3.5. Alternativas**

En este apartado se van a analizar las posibles alternativas que existen para poder resolver de una manera correcta el problema en el que se basa el estudio, es decir, determinar el flujo de calor entrante en el diamante durante el diamantado y la influencia de todos los parámetros del proceso en el desgaste del diamantador.

Para ello existen dos métodos o alternativas principales el estudio experimental o la modelización numérica. A continuación se van a explicar las principales ventajas y desventajas de cada método.

### 3.5.1. Estudio experimental

Para analizar un diamante por el método experimental lo primero en lo que se tiene que hacer hincapié es en el diseño y en la metodología que se va a seguir para realizarlo. Como soporte, es posible usar varios de los métodos estadísticos que ayudan a estimar la metodología a seguir, como puede ser la matriz de Hadamard.

Una matriz de Hadamard es una matriz cuadrada cuyos elementos son todos 1 ó -1 y cuyas filas y/o columnas son ortogonales entre sí. Se denominan así en memoria de Jacques Hadamard, matemático francés del siglo XX. Según su definición, una matriz de Hadamard  $H$  de orden  $n$  cumple  $H^T H = n \cdot I_n$ .

Entre sus propiedades fundamentales señalamos que ciertas operaciones elementales transforman una matriz de Hadamard en otra: permutación de filas o de columnas, multiplicación de una fila o de una columna por -1 o la transposición de la matriz.

Los primeros ejemplos de matrices de Hadamard son debidas a James Sylvester. Su construcción está basada en la propiedad siguiente:

Si  $H$  es una matriz de Hadamard de orden  $n$ , entonces la matriz es una matriz de Hadamard de orden  $2n$ .

$$\begin{pmatrix} H & H \\ H & -H \end{pmatrix}$$

*Figura 24. Matriz de Hadamard*

Las matrices de Hadamard se aplican a la resolución de problemas de muy diferentes áreas de las matemáticas, concretamente: obtención de determinantes maximales, detección de errores y corrección de códigos y problemas enmarcados en la teoría geométrica de los espacios de Banach. Por ello es un buen método a la hora de diseñar y establecer una metodología que oriente a la hora de analizar parámetros y así obtener unos resultados basados en métodos estadísticos.

Las principales ventajas del estudio experimental son la capacidad de



abarcar los principales parámetros del diamantado que son utilizados en el ámbito industrial. Si lo único que es necesario mejorar es un proceso industrial concreto, sería la mejor manera debido a la rápida obtención de resultados. Sin embargo si en un futuro el diamantador cambia de propiedades, la repetición de los ensayos sería necesaria.

El estudio experimental es muy sistemático y una vez definida la metodología solo es necesario tiempo para poder realizar todos los ensayos y analizarlos. Otra de las ventajas de este método es que en el inicio del estudio, cuando todos los parámetros son completamente desconocidos, se obtiene gran cantidad de información del proceso así es posible ajustar la realización de los ensayos para conseguir que los ensayos sean lo más óptimos posibles.

Una de las ventajas más importantes es que la influencia de cada parámetro es claramente apreciable en todo el proceso. Esto se debe a que cada parámetro tiene una función asignada y es posible analizarlos individualmente.

Por otro lado, al ser un método estadístico, tiene en cuenta todos los parámetros y esto tiene influencia en los resultados finales, es decir si uno de los parámetros introducidos es el color de la muela a diamantar provocará un cambio en los resultados. Esta es una de las principales desventajas de este método, el no poder distinguir si un parámetro es influyente en el desgaste del diamante o no.

Finalmente, otra de las desventajas las cuales es la culpable de rechazar este método es la gran cantidad de recursos (tiempo y económico) que hay que utilizar para que el estudio tenga suficiente validez. Cabe destacar que si el conocimiento de la base científica del proceso es bastante elevado la fase experimental podría ser de poca ayuda.

### **3.5.2. Modelización numérica**

En el caso de que el estudio se vaya a realizar mediante la modelización numérica la metodología y los pasos a seguir serán completamente diferentes al experimental. Hoy en día es un método en auge y esto es debido a la facilidad y rapidez con la que es posible obtener resultados contrastados.

Las principales ventajas de este método se centran en la facilidad con la que se puede modificar el ensayo realizado sin tener que emplear gran cantidad de recursos, y así poder analizar muchos casos sin utilizar muchos medios.

Al discretizar el diamantador se crea la posibilidad de recibir información de todo el proceso del diamantado, información tanto cualitativa como cuantitativa. La información es recibida para cada instante del proceso y esto hace que el detalle alcanzado en todas las áreas del diamantador sea muy elevado. Una vez recibido este flujo de información se puede realizar de una manera rápida el procesamiento de los datos para así obtener lo más rápido posible, resultados.

Sin embargo, no todo son ventajas. Dentro de las desventajas la que mayor influencia tiene a la hora de elegir un método u otro es la necesidad de contrastar el modelo numérico con trabajo experimental. Esto es necesario para poder ajustar totalmente la modelización del proceso a la realidad, para ello como ya se explicara más adelante se incluye un parámetro en la modelización que luego ayudará a realizar dicho ajuste.

Otro de los inconvenientes es que los software que se utilizan para realizar estas modelizaciones no son muy intuitivos y pueden resultar algo complicados. Uno de los software más utilizados es ANSYS, es el más utilizado debido a lo poco especializado que está en una especialidad en concreto.

Por último, hay que mencionar que para iniciar un proceso de modelización es necesario conocer previamente el proceso de diamantado. Sin ningún conocimiento previo no es posible introducir los parámetros mínimos necesarios para realizar un análisis.

Por todo esto, la mejor metodología a desarrollar consistiría en realizar un pequeño estudio experimental para acotar los parámetros principales dentro del proceso del diamantado. Después desarrollar un modelo numérico capaz de recrear cualquier tipo de proceso con el simple hecho de modificar varios parámetros.

### 3.6. Solución adoptada

Una vez analizadas las diferentes alternativas, en el siguiente apartado se van a plantear los fundamentos teóricos, la metodología a seguir y las técnicas y métodos utilizadas para poder determinar el flujo de calor entrante en un diamantador durante el proceso de diamantado de una muela.

Para ello se ha optado por utilizar la modelización numérica frente al método experimental. Esta elección, como ya se ha mencionado anteriormente, es debida a la multitud de opciones que permite abarcar el análisis numérico sin invertir muchos recursos materiales. Es decir sin tener que realizar ningún tipo de trabajo experimental, cabe destacar que para la validación total del modelo es necesario la realización de un estudio experimental que corrobore lo analizado en el modelo numérico.

Otra de las razones es que se puede adaptar el modelo numérico creado para un caso con gran facilidad, si hubiera un cambio de geometría, un cambio en las propiedades del material utilizado o en los parámetros de diamantado introducidos.

#### 3.6.1. Marco teórico

El método de modelización numérica más extendido hoy en día es el método de elementos finitos, el presente estudio se ha basado en este método de resolución numérica para el cumplimiento de los objetivos anteriormente planteados.

En el siguiente apartado se establecerán y desarrollarán las bases sobre las que se sustenta el Método de los Elementos Finitos (MEF), así como los aspectos fundamentales del software comercial ANSYS en lo que respecta al tratamiento de los problemas de carácter térmico.

##### 3.6.1.1. Método de elementos finitos

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un sólido continuo en un conjunto de pequeños **elementos** interconectados por una serie de puntos llamados **nodos**. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar

de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), gobernado por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no.

En cualquier sistema a analizar podemos distinguir entre:

- Dominio: Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema
- Condiciones de contorno: Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema (cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje,...)
- Incógnitas: Variables del sistema que se desea conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema (desplazamientos, tensiones, flujos de calor...)

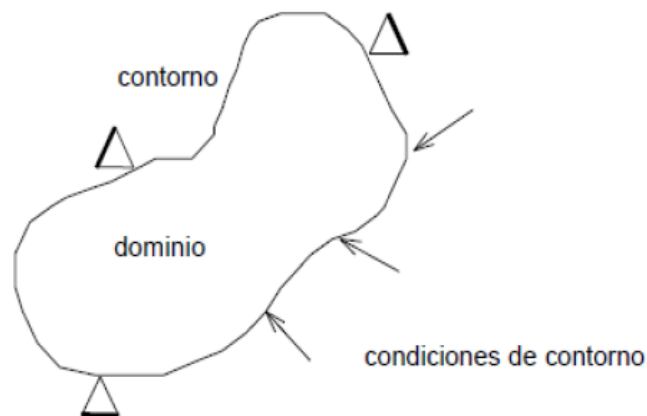


Figura 25. Sistema continuo.

En la Figura 25. se observa de una manera muy simplificada un sistema continuo, en el caso del estudio el sistema continuo lo formaría el diamantador.

Para solucionar el problema, el método de los elementos finitos supone el dominio discretizado en subdominios denominados elementos. El dominio se divide mediante puntos (en el caso lineal), mediante líneas (en el caso bidimensional) o superficies (en el tridimensional) imaginarias, de forma que el dominio total en estudio se aproxime mediante el conjunto de porciones

(elementos) en que se subdivide.

Los elementos se definen por un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre si los elementos. Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema.

En el caso de elementos estructurales estas incógnitas son los desplazamientos nodales, ya que a partir de éstos podemos calcular el resto de incógnitas que nos interesen: tensiones, deformaciones,... A estas incógnitas se les denomina grados de libertad de cada nodo del modelo. Los grados de libertad de un nodo son las variables que determinan el estado y/o posición del nodo.

A continuación vamos a analizar un pequeño ejemplo estructural basándonos en una celosía, para comprender el método.

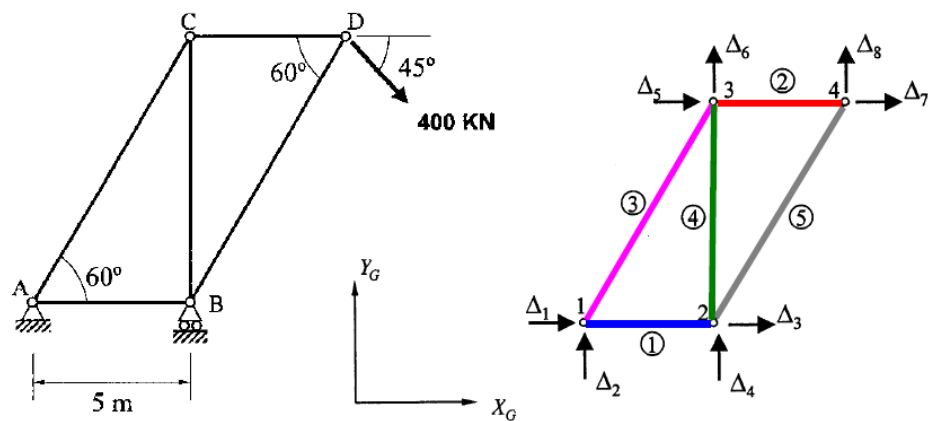


Figura 26. Discretización del medio continuo (celosía) en elementos finitos (barras) de propiedades conocidas ( $E$ ,  $A$ ,  $L$ )

En un cálculo estático como éste, se trata de resolver la ecuación  $\{F\}=[K]\{\Delta\}$ . Los vectores  $\{F\}$  y  $\{\delta\}$  contienen las fuerzas y desplazamientos de los grados de libertad del modelo:

$$\begin{pmatrix} F1 \\ F2 \\ F3 \\ F4 \\ F5 \\ F6 \\ F7 \\ F8 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \Delta1 \\ \Delta2 \\ \Delta3 \\ \Delta4 \\ \Delta5 \\ \Delta6 \\ \Delta7 \\ \Delta8 \end{pmatrix}$$

Donde en el ejemplo de la Figura 26,

$$\Delta1=\Delta2=\Delta4=0, F3=F5=F6=0, F7=400\cos(45), F8=-400\sin(45).$$

La matriz de rigidez de la celosía se calcula a partir de la matriz de rigidez de cada uno de los elementos barra en los que se ha discretizado. Y es que la rigidez de un elemento barra es conocida: su valor es  $k=EA/L$  en la dirección de la barra y  $k=0$  en la dirección perpendicular a la barra. Así, y teniendo en cuenta que los desplazamientos son los correspondientes a los grados de libertad de la Figura 26, la matriz de rigidez de la celosía es:

$$\begin{pmatrix} EA/L+EA/L*\cos^2\alpha & EA/L*\cos\alpha*\sin\alpha & (-)EA/L & 0 & 0 & (-)EA/L*\cos^2\alpha & (-)EA/L*\cos\alpha*\sin\alpha & 0 & 0 \\ EA/L*\cos\alpha*\sin\alpha & EA/L*\sin^2\alpha & 0 & 0 & 0 & (-)EA/L*\cos\alpha*\sin\alpha & (-)EA/L*\sin^2\alpha & 0 & 0 \\ (-)EA/L & 0 & EA/L+EA/L*\cos^2\alpha & EA/L*\cos\alpha*\sin\alpha & 0 & 0 & 0 & (-)EA/L*\cos^2\alpha & (-)EA/L*\cos\alpha*\sin\alpha \\ 0 & 0 & EA/L*\cos\alpha*\sin\alpha & EA/L+EA/L*\sin^2\alpha & 0 & 0 & (-)EA/L & (-)EA/L*\cos\alpha*\sin\alpha & (-)EA/L*\sin^2\alpha \\ (-)EA/L*\cos^2\alpha & (-)EA/L*\cos\alpha*\sin\alpha & 0 & 0 & EA/L+EA/L*\cos^2\alpha & EA/L*\cos\alpha*\sin\alpha & (-)EA/L & 0 & 0 \\ (-)EA/L*\cos\alpha*\sin\alpha & (-)EA/L*\sin^2\alpha & 0 & (-)EA/L & EA/L*\cos\alpha*\sin\alpha & EA/L+EA/L*\sin^2\alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (-)EA/L*\cos^2\alpha & (-)EA/L*\cos\alpha*\sin\alpha & (-)EA/L & 0 & EA/L+EA/L*\cos^2\alpha & EA/L*\cos\alpha*\sin\alpha \\ 0 & 0 & (-)EA/L*\cos\alpha*\sin\alpha & (-)EA/L*\sin^2\alpha & (-)EA/L & 0 & EA/L*\cos\alpha*\sin\alpha & EA/L*\sin^2\alpha \end{pmatrix}$$

Figura 27. Matriz de rigidez de la celosía.

Donde se observa por ejemplo que la barra 1 (entre los nodos 1 y 2) aporta una rigidez  $k=EA/L$  a los grados de libertad 1 y 3, y  $k=0$  a los grados de libertad 2 y 4 del sistema.

Una vez construida la ecuación estática del modelo, se resuelve y se obtienen como resultado las reacciones en los apoyos y los desplazamientos de los nodos. Esta es la forma de proceder del MEF para un caso estructural, a continuación se explicara para el caso concreto del análisis térmico, en el que se basa el presente trabajo.

### 3.6.1.2. MEF aplicado a la transferencia de calor

El método de los elementos finitos en general ha sido mayormente

aplicado desde el punto de vista estructural, sin embargo los avances en este campo han logrado incluir la transferencia de calor para lo cual se proponen dos tipos de análisis térmicos, uno “constante”, que no considera al tiempo como un factor en el análisis y el otro tipo es el análisis “transitorio”, en que las condiciones son variables en tiempo.

Para el caso del análisis térmico el método requiere solucionar ecuaciones matriciales relativamente grandes, dependiendo de la cantidad de elementos en los cuales se ha dividido el modelo en estudio. De esta forma se resuelven las incógnitas que describen el comportamiento en todo el modelo analizado.

Lo primero que se debe hacer es considerar las ecuaciones diferenciales y variacionales que rigen las condiciones de transferencia de calor. Dichas ecuaciones proveen la base para la solución de elementos finitos de un problema de transferencia de calor.

Las ecuaciones que gobiernan la transferencia de calor son las siguientes, y se consideran para un cuerpo tri-dimensional como se muestra en la figura 28. En el análisis de las condiciones en las cuales se produce la transferencia de calor, se asume que el material obedece a la ley de Fourier de conducción de calor.

$$q_x = -k_x \frac{\partial \theta}{\partial x}; \quad q_y = -k_y \frac{\partial \theta}{\partial y}; \quad q_z = -k_z \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

*Figura 28. Ley de Fourier*

Donde  $q_x$ ,  $q_y$  y  $q_z$  son los flujos de calor conducidos por unidad de área donde  $S_1$  corresponde a una superficie específica del volumen, y  $S_2$  es la superficie general del volumen,  $\theta$  es la temperatura del cuerpo,  $k_x$ ,  $k_y$  y  $k_z$  son las conductividades térmicas correspondientes a los ejes principales (x, y, z).

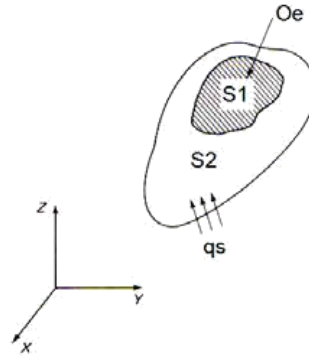


Figura 29. Cuerpo sujeto a transferencia de calor.

Considerando el equilibrio de flujo de calor en el interior del cuerpo se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = -q^B \quad (4)$$

Donde  $q^B$  es el tipo de calor generado por unidad de volumen. En las superficies del cuerpo las siguientes condiciones deben ser satisfechas:

$$\theta|_{S_1} = \theta_e \quad k_n \frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_{S_2} = q^S \quad (5),(6)$$

Donde  $\theta_e$  es la temperatura ambiente,  $k_n$  es la conductividad térmica del cuerpo,  $n$  denota la dirección de la normal a la superficie y  $q^S$  es el ingreso de flujo de calor en la superficie del cuerpo.

### Condiciones de contorno

Un número importante de supuestos se aplican para el uso de las ecuaciones antes planteadas. Una primera suposición es que los materiales son isotrópicos y de esta manera se pueden establecer las condiciones de conducción de calor en sólidos.

- **Temperatura**

La temperatura puede ser prescrita a nodos específicos y superficies del cuerpo, denotadas por  $S_1$  en la ecuación 5 y  $S_2$  en la figura 29.



- **Flujos de Calor**

La entrada de flujos de calor puede ser prescrita a nodos específicos y superficies del cuerpo, denotadas por  $S_1$  en la figura 29. Estas condiciones de contorno para flujos de calor son especificadas en la ecuación 6.

- **Convección**

Incluidas en la ecuación 6 son condiciones de contorno de convección:

$$q^S = h(\theta_e - \theta^S) \quad (7)$$

Donde  $h$  es el coeficiente de convección, el cual puede ser dependiente de la temperatura.

### **Condiciones Iniciales y Carga de la Temperatura**

La temperatura se establece en el análisis de transferencia de calor como un grado de libertad y se establece de dos formas, primero se le considera como una condición inicial o como una condición de contorno aplicada a un nodo específico o a un grupo de nodos que pueden estar establecidos por todos los elementos que componen el modelo en estudio.

Esto se establece de acuerdo a los antecedentes del estudio que se realiza, o también como una respuesta lograda mediante un análisis de transferencia de calor en estado estacionario, en forma análoga a como se establecen las condiciones iniciales en un análisis estructural donde se define el vector de desplazamiento y rotación en nodos específicos.

En el caso de modelos sólidos de geometría compleja el análisis estructural posee la ventaja de poder considerar por ejemplo un elemento de barra sólo con dos nodos y las condiciones de contorno se establecen en dichos nodos. En el caso de análisis de transferencia de calor, en general se debe considerar al modelo en estudio como un sólido con áreas donde se evalúa la respuesta de transferencia de calor. La otra consideración a tener en cuenta es la aplicación de la temperatura como una carga, ya sea definida en un nodo o un

grupo de ellos.

### 3.6.1.3. ANSYS y el Análisis Térmico

ANSYS es un software de simulación en el que se ha basado el presente estudio para llevar a cabo los análisis sobre el diamantador. Este software está desarrollado para funcionar bajo la teoría de elementos finitos, es por ello que se ha seleccionado para llevar a cabo el estudio.

Un análisis térmico en ANSYS, calcula la distribución de temperatura y relaciona cantidades térmicas en un sistema. Cantidades térmicas típicas de interés son, la distribución de temperatura, la suma de calor ganado o perdido, gradientes térmicos y flujos térmicos. Las bases para el análisis térmico en ANSYS es una ecuación de balance de calor obtenida desde los principios de la conservación de energía. La solución de elementos finitos calcula temperaturas nodales, y luego usa dichas temperaturas nodales para obtener otras cantidades térmicas. ANSYS puede modelar los tres modos fundamentales de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Ver figura 30.

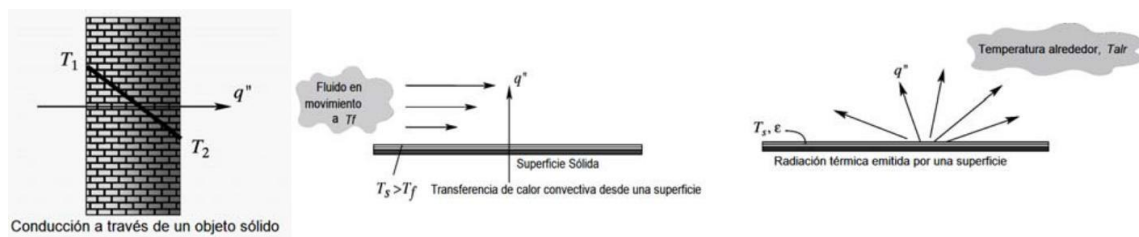


Figura 30. mecanismos de transferencia de calor a través de un sólido.

#### Conducción

Se analiza de acuerdo a la diferencia de temperaturas que se establezca en el modelo en estudio y se debe especificar la conductividad térmica y las temperaturas, ANSYS calcula la distribución de temperatura correspondiente a la pared del volumen en el cual se desea conocer dicha distribución.

La conducción tiene lugar a través del propio diamantador y entre sus superficies. La conducción a través del modelo se caracteriza por un “coeficiente de conducción” térmica. Su expresión viene dada por la ecuación (8), y establece la relación entre el flujo de calor,  $Q$ , y el gradiente de temperaturas,  $\Delta T$ , a través

del coeficiente de conductividad térmica del material,  $k$ .

$$Q = k \cdot \Delta T \quad (8)$$

En los cálculos se ha considerado un coeficiente de conducción variable con la temperatura.

### Convección

Se puede especificar convección como una carga en una superficie de un elemento sólido conductivo. Se debe especificar el coeficiente de convección de película y la temperatura en la superficie; ANSYS calcula la transferencia apropiada de calor a través de la superficie.

La convección se produce entre las paredes libres del modelo y el ambiente. Se caracteriza por un coeficiente denominado “coeficiente de película”. Su expresión viene dada por la ecuación (9), y establece la relación entre el flujo de calor,  $Q$ , y la diferencia de temperatura entre el sólido,  $T_s$ , y el ambiente,  $T_{amb}$ , a través de un coeficiente de película o coeficiente de convección  $h$ .

$$Q = h (T_s - T_{amb}) \quad (9)$$

Para la convección libre con gases (aire) el coeficiente de convección se sitúa en el rango de 2 a 50  $w/m^2K$ . Como veremos más adelante se realizara un pequeño ajuste de valor según el tipo de material y el caso a analizar.

### Radiación

La radiación se produce entre las superficies libres del diamantador con el entorno. Se caracteriza por un coeficiente denominado “emisividad”. Su expresión viene dada por la ecuación (10), y establece la relación entre el flujo de calor,  $Q$ , y la diferencia entre las potencia cuarta de la temperatura del solido radiante,  $T_s$ , y la del entorno,  $T_{ent}$ , a través del coeficiente de emisividad,  $e$ , y la constante de Stefan-Boltzmann,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} w/m^2K$ .

$$Q = e \sigma (T_s^4 - T_{ent}^4) \quad (10)$$

En los cálculos realizados en este es trabajo se ha desestimado el efecto

de la radiación en el diamantador, esto es debido a estudios anteriores en los que se demostraba que no era influyente en el resultado final.

### Tipos y consideraciones de análisis térmicos

#### ○ Análisis térmico estacionario

Determina la distribución de temperaturas y otras cantidades térmicas bajo condiciones de carga “constante”. Una condición de carga de este tipo es una situación donde los efectos de almacenamiento de calor, variando sobre un periodo de tiempo pueden ser ignorados.

#### ○ Análisis térmico transitorio

Se define como un tipo de análisis térmico que calcula los efectos de cargas transitorias en un sistema, o bien es el análisis donde se determinan temperaturas y otras cantidades térmicas que varían respecto al tiempo. Se consideran dos tipos de análisis transitorio; lineal y no –lineal. El lineal es aquel en que las propiedades de los materiales permanecen constantes y el no-lineal asume que las propiedades de los materiales dependen de la variación de la temperatura.

Como la mayoría de las propiedades de los materiales varían con la temperatura se asume que casi todos los análisis térmicos ya sean constantes o transitorios son no-lineales. La primera forma y la más usada de especificar en función del tiempo, es dividiendo la curva carga versus tiempo en una cantidad finita de sub-pasos para un determinado paso carga, tal como se aprecia en la figura 31.

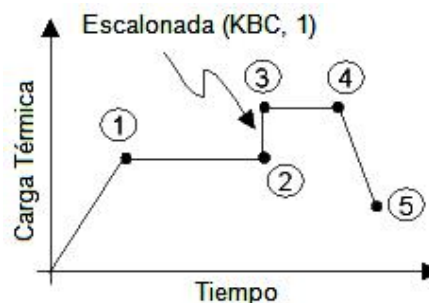


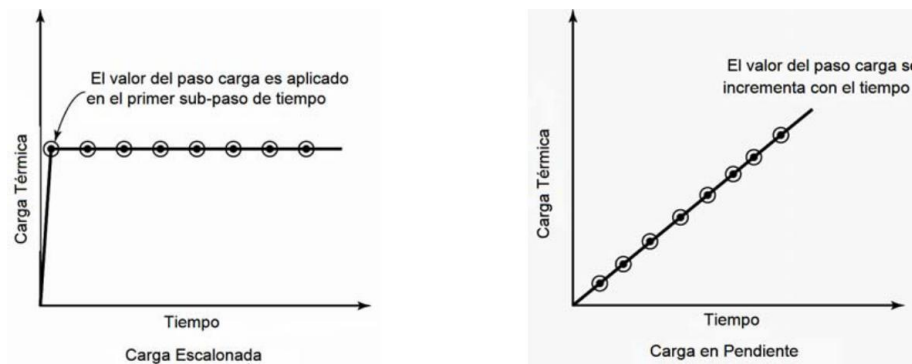
Figura 31. Aplicación de cargas térmicas.

#### ○ Cargas escalonadas

La aplicación de cualquier carga térmica se mantiene constante durante el periodo de tiempo en el cual se está considerando el análisis y es independiente de la cantidad de sub-pasos en los cuales se haya dividido el paso carga (carga térmica) determinado para el análisis.

- **Cargas en pendiente**

En este caso la aplicación de la carga térmica es gradualmente incrementada dependiendo de la cantidad de sub-pasos en los cuales se haya establecido el paso carga (carga térmica), hasta que se llega a su valor máximo aplicado en el análisis.



*Figura 32. Carga escalonada versus carga en pendiente.*

En la figura 32. las circunferencias representan la cantidad de sub-pasos en los cuales se ha establecido la aplicación del paso carga o carga térmica, durante un periodo de tiempo.

El análisis transitorio permite obtener respuestas usando los siguientes métodos:

- **Método completo**

Este método utiliza el sistema de matrices en forma completa para calcular respuestas transitorias. Es el más usado porque permite la consideración de todos los tipos de no-linealidades que pueden ser incluidas en los distintos análisis establecidos.

- **Método reducido**

Dicho método condensa el tamaño del problema usando matrices

reducidas y grados de libertad maestros. Después de que las temperaturas para los grados de libertad maestros han sido calculadas, ANSYS expande la solución al set original completo de grados de libertad.

### **Metodología de trabajo en ANSYS**

#### **○ Fase de Pre-Proceso**

Está definida de manera simple como la fase o etapa donde se procede a la construcción del modelo a analizar. Se puede sub-dividir de la siguiente manera: selección del tipo o tipos de elemento, propiedades geométricas, propiedades de los materiales de construcción, modelación o generación del modelo, mallado del modelo y aplicación de condiciones iniciales de análisis para el caso de análisis de transferencia de calor.

En esta fase es donde, a partir del modelo geométrico, se crean los elementos con sus respectivos nodos. En estos nodos se establecen las ecuaciones y con el posterior ensamble de todos los elementos se construye la matriz de rigidez global.

#### **○ Fase de Solución**

Fase en la cual se aplican las cargas que afectan al modelo. En el caso del análisis térmico se establecen temperaturas, convección, flujos de calor y radiación y, después de estas consideraciones se lleva a cabo la resolución del set de ecuaciones algebraicas lineales o no-lineales simultáneamente para obtener los resultados nodales.

#### **○ Fase de Post-Proceso**

Está establecida como la etapa o fase en donde se evalúa la respuesta encontrada en la etapa de solución. Hay un post-procesador que se suma al empleado habitualmente para revisar soluciones de un análisis térmico constante, en éste se lleva a cabo una revisión de resultados en puntos específicos del modelo.

### **3.6.1.4. Creación del modelo**

En el siguiente apartado se va a describir varias de las fases que se llevan

a cabo en el pre-procesado, y que tienen como fin la creación de la geometría que deseamos analizar y la introducción de todos los parámetros condicionantes para que la simulación se lleve a cabo de la manera más precisa posible.

### Obtención de la geometría

La geometría que se quiera generar en ANSYS se puede obtener por dos vías. La primera consiste en crear directamente la geometría en la interfaz del software mediante los comandos de dibujo que nos proporciona ANSYS. Esto es utilizado cuando el modelo a analizar es simple y no requiere de gran cantidad de trabajo de modelado.

El segundo método conlleva importar una geometría generada en otro software de diseño 3D. Este es utilizado cuando el modelo tiene geometrías complejas y sería imposible crearla utilizando ANSYS. Este método tiene bastantes ventajas pero es importante que la geometría que importemos sea luego posible mallarla y que la malla proporcione la solución correcta.

A menudo, pero no siempre, esta necesidad de mallado requiere modificaciones en la geometría importada. Estas modificaciones pueden ser la eliminación de operaciones, la idealización y/o la limpieza.

La eliminación de operaciones hace referencia al proceso de eliminación o borrado de operaciones geométricas que se consideran insignificantes para el análisis, como los redondeos externos, chaflanes, etc. Ver figura 33.

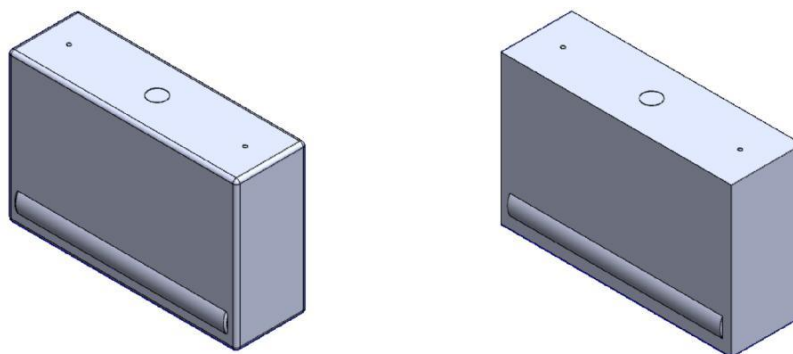


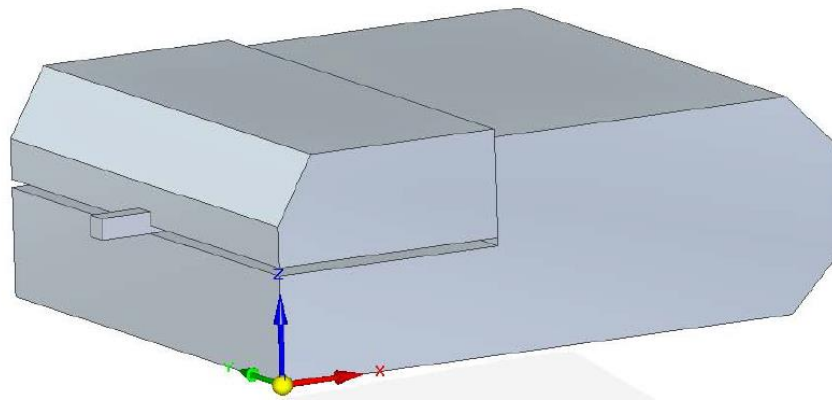
Figura 33. Eliminación de operaciones en un modelo 3D

La idealización presenta un ejercicio más “agresivo” que puede alejarse

de la geometría de CAD sólida como, por ejemplo, cuando se representan paredes con superficies lámina.

La limpieza resulta necesaria a veces porque la geometría convertible en malla debe cumplir unos requisitos de alta calidad muy superiores a los del modelo sólido. Para la limpieza se suelen utilizar las herramientas de control de calidad de la aplicación CAD para comprobar si hay problemas, como entidades múltiples, que el modelo de CAD pudiera tolerar, pero que harían muy difícil o imposible generar la malla.

En este trabajo debido a que la geometría a estudiar no era de gran complejidad se ha optado por crearla en la interfaz de ANSYS. Como podemos ver en la figura 34. la geometría del diamantador no tiene geometrías complejas.



*Figura 34. Geometría 3D del diamantador*

Una vez generada la geometría pasamos a definir las propiedades de cada material y el tipo de elemento utilizado en el mallado.

### **Propiedades de los materiales**

Las propiedades para materiales isotrópicos se especifican para cada pieza del modelo y se obtienen de acuerdo a la información entregada por el constructor. Se consideran propiedades definidas para ciertas temperaturas y depende del parámetro variaran en función de la temperatura o no.

Para cada caso que se vaya a analizar se contará con dos tipos de material, uno que no variara según el análisis a realizar, que será el diamante y otro, el soporte, que variara según la simulación que se realice.



Se utilizarán diamantes monopunta trapezoidales ( $1,5 \times 1,5 \times 4 \text{ mm}^3$ ) de la empresa *Element Six*, modelo **single-grit CVD (chemical vapour deposition) dresser** (Figura 35.), cuyas características y propiedades principales se mencionan a continuación.

- Muy denso
- Gran resistencia abrasiva y fuerza
- Extremadamente inerte químicamente
- Bajo coeficiente de expansión térmica
- La grafitización ocurre por encima de los  $700^\circ\text{C}$
- Muy alta resistencia al choque térmico
- Gran resistencia a la fractura y a la generación de virutas por rotura
- Tiene una superficie homogénea a lo largo de toda su superficie
- Se puede utilizar en cualquiera de sus direcciones sin que sufra modificación alguna en sus propiedades
- La estabilidad térmica que presenta es independiente a la orientación en la que se ponga el diamante a diamantar

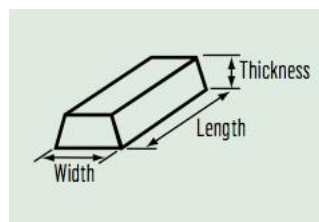


Figura 35. Diamante single-grit CVD.

Se puede observar que el diamante utilizado no es un diamante monopunta como el que se usa en el ámbito industrial. Esto es debido a que con esta geometría resulta más fácil medir temperaturas, puesto que este estudio se van a utilizar mediciones experimentales de temperatura y potencia de otro trabajo realizado anteriormente se utilizará el mismo. Las propiedades térmicas de este diamante se pueden observar en la tabla 2.

Para el soporte del diamante se va a optar por dos tipos de materiales, el acero y el cobre. Se ha elegido el acero por la gran integración que tiene en la industria y por ser un material fácil de encontrar y modelar.

En el caso del cobre se optará por trabajar con el debido a su conductividad térmica y a que también es fácil encontrarlo en el mercado. Así al ser un material común es sencillo realizar una comparación entre él y el acero.

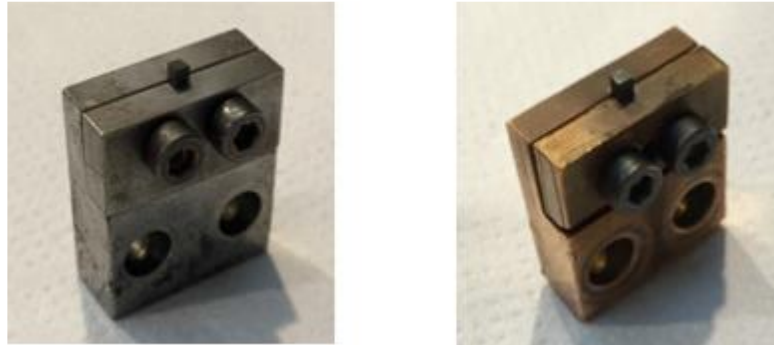


Figura 36. Soportes del diamante, acero (izquierda) cobre (derecha).

A continuación se puede observar en la tabla 2. las propiedades de los tres materiales utilizados.

Material	Conductividad térmica [W/m·K]	Calor específico [J/kg·K]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
Acero	$-0.031 \cdot T + 63.96$	460	7850
Cobre	$-0.066 \cdot T + 420.87$	389	8960
Diamante	$2 \cdot 10^6 \cdot T^{-1.15}$	$-2.2 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 4.65 \cdot T - 664.2$	3502

Tabla 2. Propiedades de los materiales.

### Tipo de elemento

Son especificados por la cantidad de nodos que los componen y por los grados de libertad que poseen. En el caso de los elementos usados para trabajar con problemas de transferencia de calor, se establece que los elementos poseen un solo grado de libertad en cada nodo, la temperatura. La generación de un

elemento sólido se define de acuerdo a su composición elemental la cual está establecida desde entidades geométricas tales como puntos, líneas, áreas y volúmenes. Considerando la geometría de las partes analizadas, se ha optado por el elemento SOLID70.

Este tiene una conductividad térmica en 3D. El elemento tiene ocho nodos con un solo grado de libertad en cada uno, la temperatura y se puede utilizar para un análisis 3D, estático o transitorio. La forma del elemento es capaz de adaptarse al gradiente térmico que le esté afectando. En caso de querer hacer un análisis estructural del sólido, se podría reemplazar el elemento por uno equivalente, por ejemplo SOLID185.

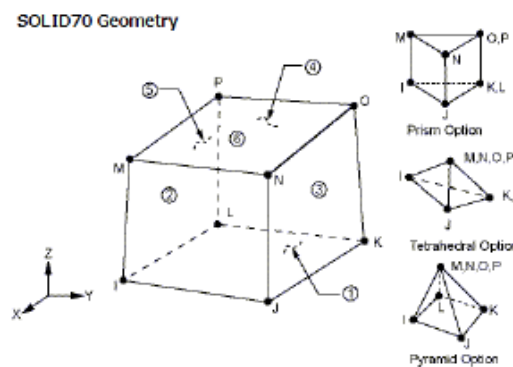


Figura 37. Elemento SOLID70

### Condiciones de contorno

A la hora de establecer las condiciones de contorno se pueden clasificar en dos grupos. Condiciones que van a permanecer constantes a lo largo de todo el análisis y condiciones iniciales que varíaran según vaya avanzando la simulación.

Como condición inicial se puede considerar la temperatura al inicio del análisis. Esta temperatura será la temperatura ambiente y la aplicaremos a todos los nodos de la geometría. El valor de esta temperatura dependerá de la ubicación de la rectificadora en la que se basa el estudio, para este caso tendrá un valor de 20°C.

A la hora de calcular el valor del flujo de calor entrante en el diamante ( $q_d$ ),

lo primero que hay que determinar es el área en el que ese flujo va a afectar ( $A_d$ ). Para ello, durante el diamantado se va a considerar la muela como un cilindro perfecto y así poder definir el área de contacto como el producto del avance ( $f_d$ ) y la profundidad de pasada ( $a_d$ ), como podemos ver en la ecuación 11.

$$A_d = a_d \cdot f_d \quad (11)$$

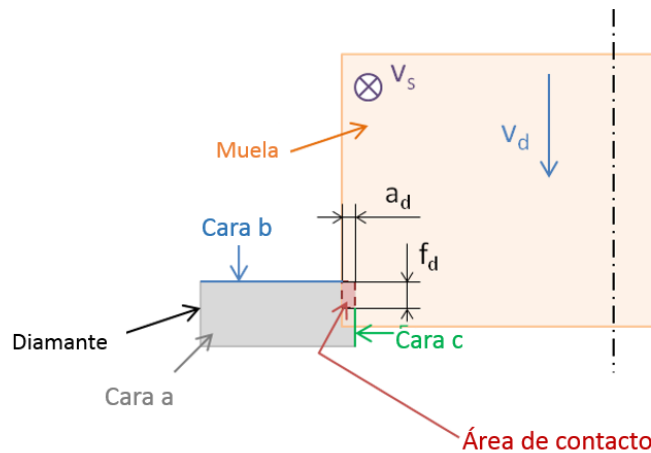


Figura 38. Zona de contacto entre muela y diamante

Para justificar la suposición del área de contacto se ha optado por analizar el desgaste en un diamante utilizado previamente en un estudio experimental. Como se observa en la figura 38., la imagen del desgaste de un diamante bajo un SEM. Los parámetros de diamantado utilizados para este estudio fueron  $a_d = 0.030$  mm,  $f_d = 150$  mm/rev and  $v_s = 32$  m/s.

La zona de impacto inicial entre el diamante y la muela está localizada en la cara a como se puede ver en la figura 39. aunque no es posible ver cómo avanza el desgaste a lo largo de los ensayos. Teniendo todo esto en cuenta, se puede confirmar que la hipótesis inicial de contacto entre el diamante y la muela es correcta.

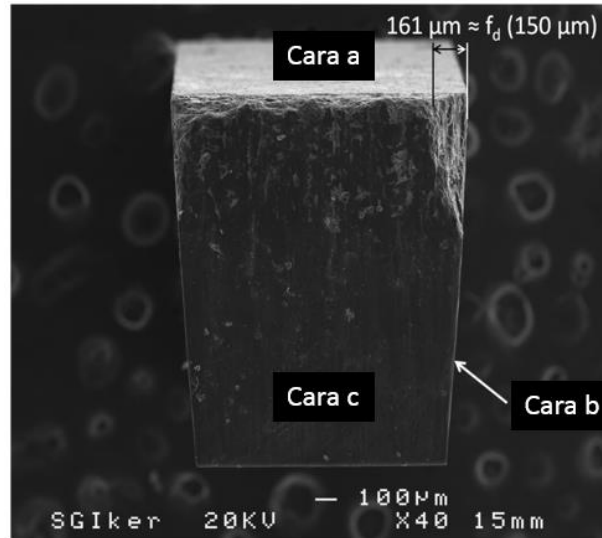


Figura 39. Imagen SEM del desgaste del diamante. Parámetros diamantado:  $a_d = 0.030 \text{ mm}$ ;  $f_d = 150 \text{ mm/rev}$ ;  $v_s = 32 \text{ m/s}$ .

Para calcular el valor del flujo de calor entrante en el diamante se va a utilizar un parámetro denominado ratio de partición térmico ( $R_d$ ). Este parámetro representa una fracción del flujo de calor generado durante el proceso y que posteriormente será transferido al diamante. Si se considera que toda la potencia consumida durante el diamantado se va a transformar en calor y ese calor se va a distribuir uniformemente por la zona de contacto, se obtiene el valor de la densidad del flujo de calor que será transferida al diamante.

$$q_d = R_d \cdot \frac{P}{a_d \cdot f_d} \quad (12)$$

A partir de la ecuación 12 la única incógnita sería el valor de  $R_d$ , la obtención y el uso de este parámetro se explicara más adelante. Para resolver la ecuación solo será necesario conocer el valor de la potencia consumida para cada caso a estudiar.

En las zonas libres del diamante y el soporte se va a considerar la transferencia de calor mediante convección natural como se puede ver en la ecuación 13. El coeficiente de convección depende de varios factores como el material empleado, la temperatura de la superficie ( $T_s$ ) o la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ). Para las condiciones de trabajo que se quieren simular los valores de  $h$  deberían de estar en el rango de  $10 \text{ W/m}^2$  a  $48 \text{ W/m}^2$ . Después de realizar un

pequeño análisis se ha decidido darle un valor de 20 W/m<sup>2</sup>.

$$-k \cdot \left(\frac{\partial T_s}{\partial n}\right)_{natural} = h \cdot (T_s - T_{amb}) \tag{13}$$

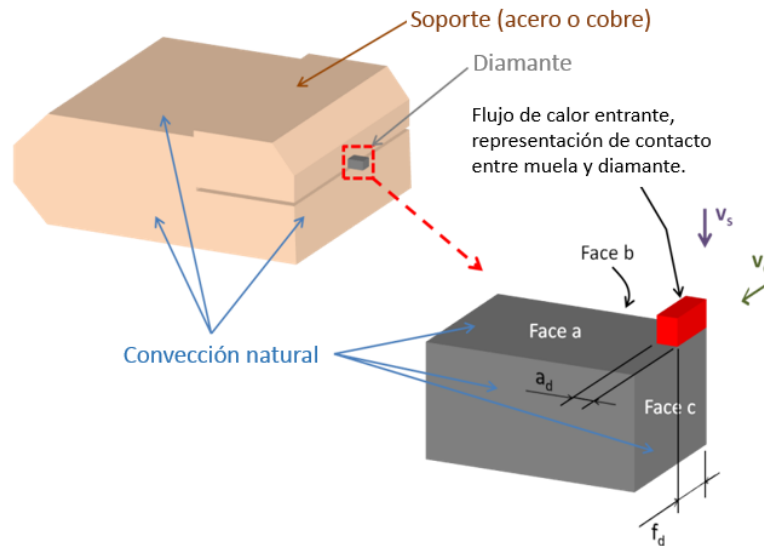


Figura 40. Condiciones de contorno en el modelo.

En el modelo se ha considerado un contacto perfecto entre el diamante y el soporte, teniendo en cuenta esta hipótesis el flujo de calor y la temperatura en los puntos de contacto entre el diamante y el soporte serán similares, como se puede ver en las ecuaciones 14 y 15.

$$k_{diamante} \cdot \left(\frac{\partial T_N}{\partial n}\right)_{diamante} = k_{soporte} \cdot \left(\frac{\partial T_N}{\partial n}\right)_{soporte} \tag{14}$$

$$T_n^{diamante} = T_n^{soporte} \tag{15}$$

En cuanto a la radiación, como ya se ha mencionado anteriormente no se ha tenido en cuenta, puesto que analizados varios estudios se ha llegado a la hipótesis que la influencia que genera en el modelo es inapreciable.

### Mallado

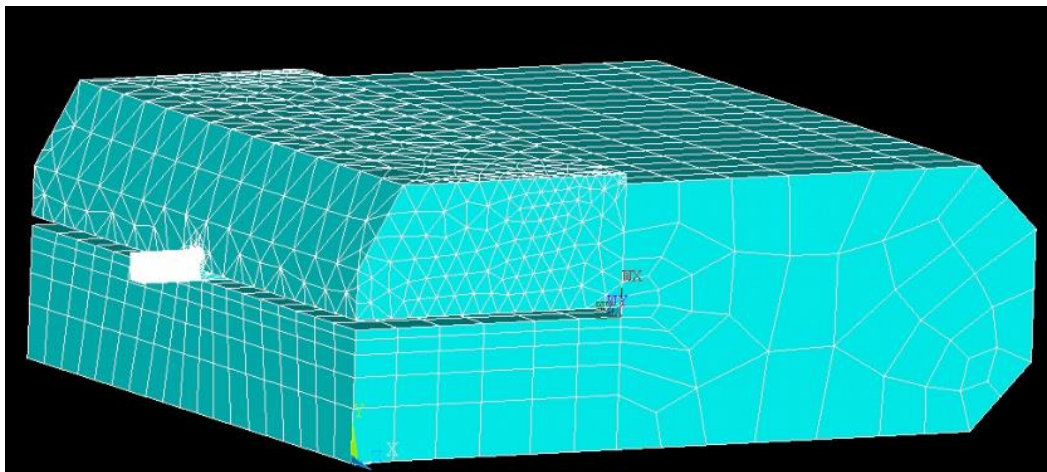
Para poder definir y encontrar una solución con el método de los elementos finitos se debe generar elementos a partir de una figura geométrica,

en este caso volumen. A este proceso se le denomina mallado y corresponde a la etapa final del trabajo en el pre-procesador.

Por lo tanto, se establece que para cada pieza que posea cualidades independientes genera mallados diferentes, dependiendo de la complejidad del volumen geométrico determinado para el desarrollo del análisis.

Donde más precisión se quiere obtener es en la zona de contacto entre el diamante y la muela, es por ello que se ha optado por hacer un mallado progresivo. Con el elemento que se va a utilizar se obtiene mayor precisión si el elemento tiene forma de hexaedro, es por eso que se va a hacer unas pequeñas superficies intermedias a la hora de hacer la transición entre diferentes tamaños de malla.

En el resto del modelo no se ha realizado un mallado tan preciso para poder reducir el tiempo de cálculo computacional. Así como podemos ver en la figura 41. el número de nodos en el diamante es mucho mayor que en el soporte.



*Figura 41. Mallado de la geometría.*

En el diamante el tamaño mínimo del elemento se ha establecido con un valor de 0.007mm, este valor va aumentando progresivamente a lo largo del diamante. Ver figura 42.

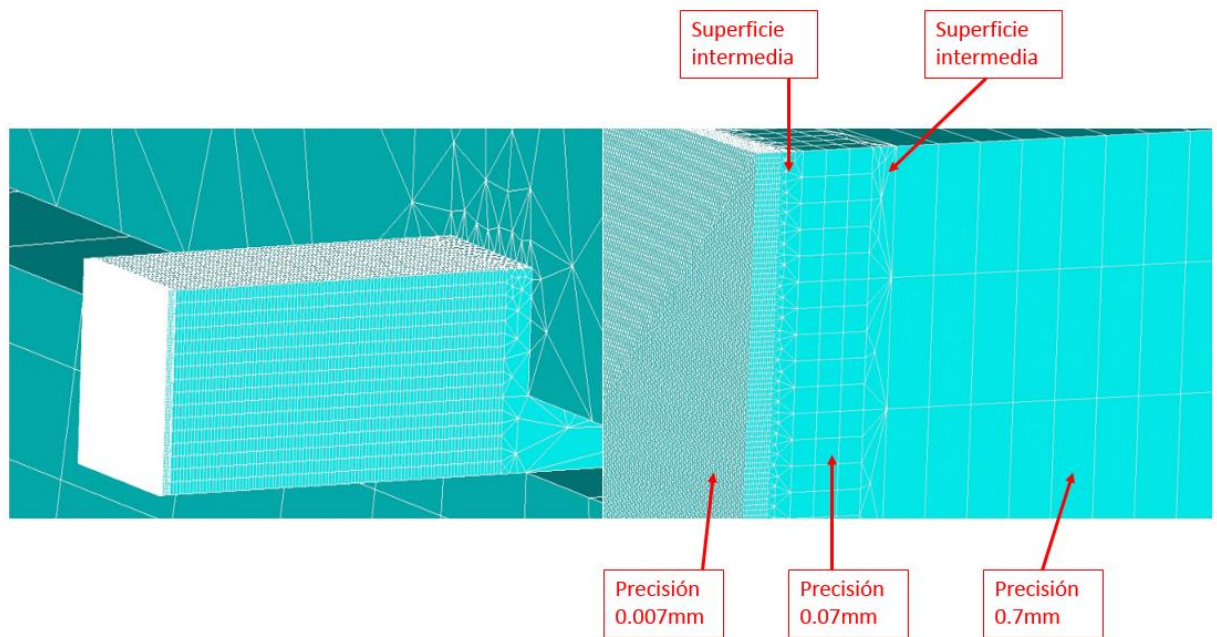


Figura 42. Mallado progresivo del diamante.

Para el mallado de las zonas con elementos en forma de hexaedro se genera la malla utilizando el barrido manual para así poder controlar todos los tamaños de mallado. En las zonas intermedias se genera la malla con el barrido automático y con un tamaño de elemento libre para que sea capaz de enlazar las dos mallas generadas anteriormente.

Para el caso del soporte ocurre algo similar, se ha optado por realizar un barrido automático pero estableciendo un tamaño de elemento grande y que el mallado no sea muy complejo.

### 3.6.2. Marco metodológico

En este apartado se va a exponer la manera de proceder para conseguir el objetivo del estudio. Para ello se analizará como medir las temperaturas, calcular el valor de  $R_d$  y la cantidad de simulaciones a realizar.

#### 3.6.2.1. Medición de temperatura

A la hora de hacer las mediciones de temperatura hay que basarse en el trabajo experimental previamente realizado en otro estudio realizado bajo el amparo del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UPV/EHU.



En ese estudio, como se observa ver en la figura 43. se ha utilizado un pirómetro laser para obtener las temperaturas en el diamante. Se ha optado por este método debido a que todos los ensayos realizados se han realizado sin taladrina y esto ha hecho que sea la mejor vía para la medición.

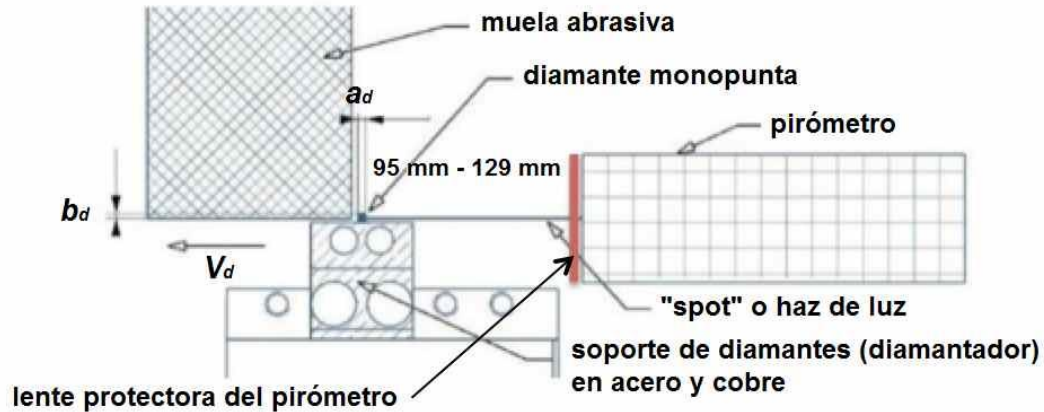


Figura 43. Esquema medición temperatura experimental.

El haz de luz del pirómetro incide como un punto sobre una de las caras del diamante, este será el punto de medición de la temperatura en nuestro modelo.

Debido a tener un modelo de elementos finitos es posible medir la temperatura para cada instante del proceso de diamantado en cada nodo del modelo.

El diámetro del punto de luz que incide en el diamante es de 0,6mm, teniendo en cuenta que en la cara en la que el punto de luz se ve reflejada hay una gran densidad de nodos, es necesario calcular la temperatura equivalente en el área del diámetro. Ver figura 44.

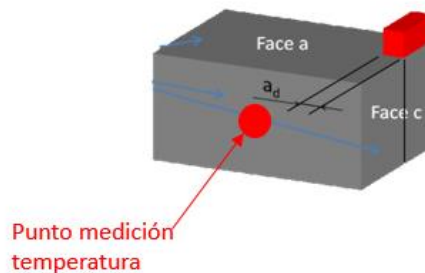


Figura 44. Área medición temperatura.

Después de haber realizado un pequeño estudio sobre este hecho se ha llegado a la conclusión que la temperatura media en todo el círculo varía menos que un 1% con respecto a la del nodo en el centro el círculo. Por lo tanto se ha optado por recoger las temperaturas de un solo nodo.

Las temperaturas se miden cada 0.1s para poder obtener una curva con el aumento de la temperatura en función del avance del proceso. Esta curva será distinta para cada simulación realizada y esto ayudará a comparar los distintos parámetros utilizados.

### 3.6.2.2. Obtención de $R_d$

Como se ha mencionado anteriormente para ajustar lo máximo posible a la realidad el modelo numérico se ha introducido un parámetro  $R_d$ . Este parámetro representa una fracción del flujo de calor generado durante el proceso y que posteriormente será transferido al diamante.

Para calcular el valor exacto de  $R_d$  se van a realizar simulaciones incluyendo valores de  $R_d$  entre 0.5 y 1. Las temperaturas obtenidas en cada simulación se compararán con las que se han obtenido experimentalmente en el anterior estudio ya mencionado. Mediante esta comparación se obtendrá una función de error para cada caso, el valor de  $R_d$  que minimice la función de error será el valido.

Para calcular esa función de error se utilizará la ecuación 16, donde  $i$  es un periodo de tiempo que variará 0.1s (desde 0 hasta  $n$ , siendo  $n$  el la longitud de la señal de temperatura experimental). Una vez que tengamos todas las

simulaciones para cada valor de  $R_d$ , se calculará el valor mínimo de una función polinómica para hallar el valor definitivo de  $R_d$ .

$$e(R_d) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{(T_{exp})_i - (T_{sim})_i}{(T_{exp})_i} \right)^2}{n}} \quad (16)$$

Una vez obtengamos el valor real se realizará una última simulación para comprobar que el ajuste del valor ha sido óptimo y así dar por validado el modelo para el caso que se esté analizando.

### 3.6.2.3. Simulaciones a realizar

Se realizarán un total de 8 casos de simulaciones de los cuales 4 serán para soporte de cobre y los 4 restantes para soporte de acero. En ellos se ha buscado representar los dos extremos del proceso de diamantado, es decir un proceso de acabado y uno de desbaste en los que varía el ratio de superposición ( $U_d$ ), siendo de valor 10 para el primero y 3 para el segundo. Teniendo en cuenta que la anchura real de contacto entre el diamante y la muela ( $b_d$ ) es de 1,5 mm, es decir, tiene un valor considerablemente alto, las velocidades de avance axial del diamante ( $V_d = 679$  mm/min y 204 mm/min) son lógicas; es decir, a pesar de que tienen un valor alto, estos valores no son desproporcionados.

Por otro lado, se ha optado por emplear dos profundidades de pasada en radio ( $a_d$ ) distintas, la menor de 15  $\mu$ m (para acabado) y la mayor de 30  $\mu$ m (para desbaste); de esta manera se intenta comprobar el efecto que tiene la cantidad de diámetro de muela eliminada con la temperatura alcanzada en el diamante, siendo a priori más perjudicial para el diamante una profundidad de pasada grande, ya que la cantidad de muela a eliminar es mayor.

Como se ha mencionado anteriormente para cada caso realizaremos simulaciones con valores de  $R_d$  entre 0.5 y 1, por lo tanto el número final de simulaciones será de 48 simulaciones. El tiempo de simulación variará según los parámetros de corte que se hayan seleccionado para esa simulación, para calcular el tiempo se usará la ecuación 17.

$$T_{sim} = \frac{e_m \cdot 60}{V_d} \quad (17)$$

Siendo  $e_m$  el espesor de la muela en mm. Calculando el valor sabiendo que la muela utilizada en los ensayos experimentales es de 20mm de espesor, para el caso de  $V_d = 679$  mm/min el tiempo de simulación será de 1.8s y para el de 204 mm/min 5.8s.

En la siguiente tabla se recogen los 8 tipos de simulaciones realizadas en el estudio.

No.	Material del soporte	$a_d$ [mm]	$U_d$	$v_d$ [mm/min]
1	Acero	0.015	3	679
2		0.015	10	204
3		0.030	3	679
4		0.030	10	204
5	Cobre	0.015	3	679
6		0.015	10	204
7		0.030	3	679
8		0.030	10	204

Tabla 3. Simulaciones a realizar.

### 3.6.3. Técnicas y métodos

#### Ajuste mallado diamante

Anteriormente se ha mencionado que el mallado del diamante se ha realizado de una manera progresiva, para poder seleccionar el tamaño de malla óptimo, es decir el mejor en cuanto a la comparación entre tiempo de simulación y error, se ha llevado a cabo un pequeño estudio.

Para ello se ha partido de la hipótesis que con el mallado más fino, el que mayor número de nodos tiene, el error es 0. Una vez establecida esta hipótesis se han realizado 4 simulaciones con tamaños de malla de 0.005, 0.007, 0.01 y 0.012 mm.

El tamaño de malla es el único parámetro que se ha modificado en las simulaciones, así el valor de  $R_d$  y los parámetros de diamantado utilizados no han variado en ninguna de las simulaciones.

Para la valoración del error se han tenido en cuenta dos parámetros. La temperatura máxima alcanzada y el tiempo de simulación. Para valorar cada simulación se ha calculado el porcentaje de error que se ha generado

proporcionalmente al aumento del tamaño de malla. Para calcular ese error se ha usado un cálculo percentil simple, como se puede observar en la ecuación 18.

$$e(\%) = \frac{T_0 - T_n}{T_0} \cdot 100 \quad (18)$$

Siendo  $T_0$  la temperatura máxima de la simulación con el mallado más pequeño y  $T_n$  la temperatura máxima de las simulaciones realizadas. En la siguiente tabla se puede ver un resumen de los cálculos de error y los tiempos de simulación para cada caso.

Tamaño malla [mm]	Error [%]	Tiempo simulación [min]
0.005	0	45
0.007	3.6	15
0.01	6.3	11
0.012	8.1	7.5

*Tabla 4. Parámetros tamaño malla en el modelo.*

Considerando la cantidad de simulaciones que se han de realizar en el estudio y analizando los porcentajes de error obtenidos se ha seleccionado el tamaño de malla de 0.007mm. Este tamaño como se ha mencionado anteriormente es para la zona de contacto entre la muela y el diamante, irá aumentando a medida que nos alejamos de esta zona.

### **Ajuste coeficiente convección**

Al igual que ocurre con el tamaño de malla, para el coeficiente de convección también se ha realizado un pequeño estudio. En este caso el estudio solo consta de dos simulaciones, ya que el coeficiente de convección para el caso en estudio puede variar entre 10-45 W/m<sup>2</sup>, esos dos serán los casos simulados.

La comparación en este caso solo afectará al error generado cuando se comparen las temperaturas máximas, y se calculará de la misma forma, siguiendo la ecuación 18.

Coeficiente convección h [W/m <sup>2</sup> ]	Error [%]
10	0
45	1

Tabla 5. Coeficiente convección.

Como se observa en la tabla 5. el error obtenido es mínimo ya que el efecto de la convección natural en el modelo comparada con el del flujo de calor entrante es despreciable. Por lo tanto, se ha optado por fijar un valor constante de h de 20 W/m<sup>2</sup>.

### Automatización de la simulación

Con el fin de facilitar el uso del modelo numérico desarrollado a lo largo de este estudio, se ha creado una programación mediante la cual la generación de una simulación es totalmente intuitiva y se pueda llevar a cabo sin tener ningún conocimiento previo del software.

Para ello, una vez introducido el código de la simulación el programa, y siguiendo el orden de funcionamiento de ANSYS (generación de la geometría, mallado y simulación), generará automáticamente una ventana emergente para decidir el tipo de material del soporte, pudiendo elegir entre 1 y 2 para acero y cobre respectivamente. Ver figura 45.

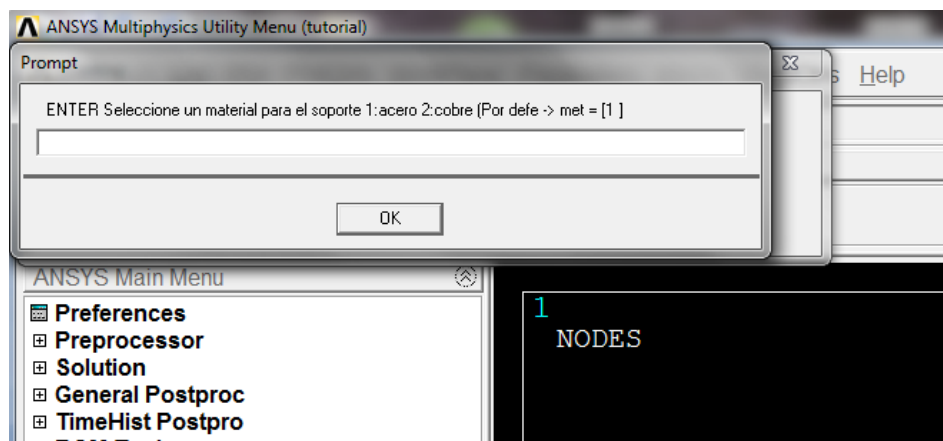


Figura 45. Ventana emergente tipo de material.

Como se observa en la figura 46, el siguiente paso una vez seleccionado el material será introducir los parámetros del diamantado, como son la

profundidad de pasada ( $a_d$ ) y la velocidad de avance ( $v_d$ ). Si no se introdujese ningún valor en el apartado se fijaran por defecto los valores de la prueba 1.

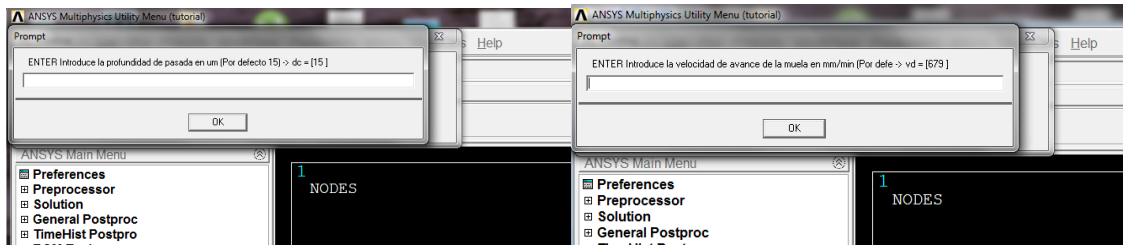


Figura 46. Ventanas de  $a_d$  y  $v_d$ .

Una vez introducidos estos valores se iniciará el mallado automático del modelo, cuando finalice solicitará dos nuevos valores por una lado la potencia consumida en el caso en el que se desee simular y segundo el valor de  $R_d$ . En las figuras 47. y 48. se pueden ver las ventanas emergentes.

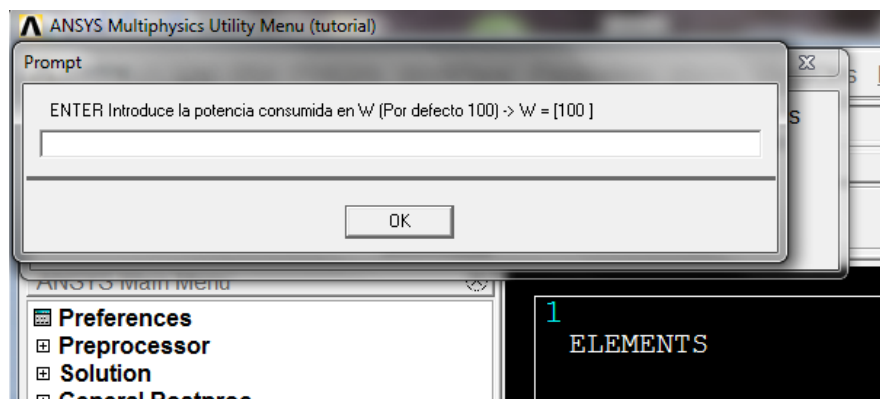


Figura 47. Potencia consumida.

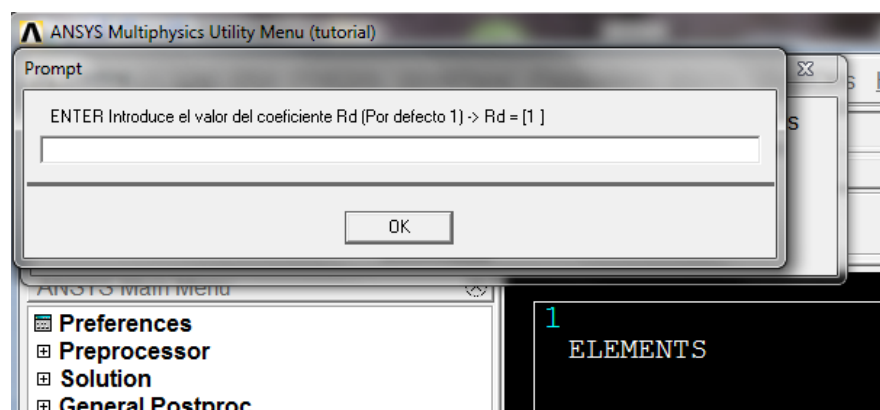


Figura 48. Valor de  $R_d$ .

Finalmente después de introducir todos los parámetros que se requieren,

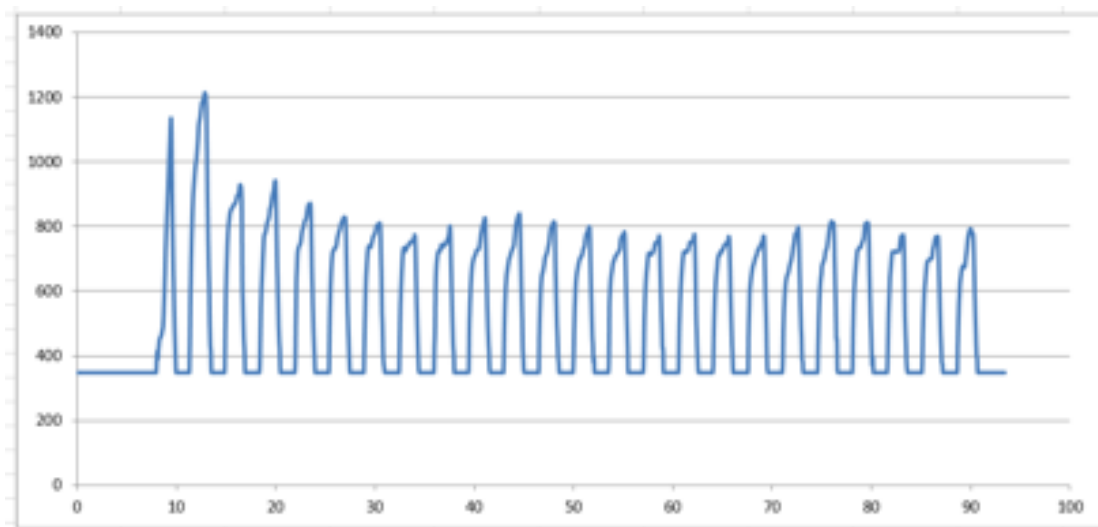
se iniciará la simulación. Una vez finalizada sólo quedará obtener los datos que sean necesarios y sean de interés para el estudio.

#### 3.6.4. Procesamiento de datos

Para el procesamiento de datos se van a utilizar dos herramientas, la primera es un software muy conocido como es la herramienta de Microsoft Office Excel.

Mediante esta herramienta se van a generar tablas y gráficos para facilitar la visualización de los resultados y poder así ver de una forma más clara la influencia de cada parámetro en el diamantado. También será útil para el cálculo de las funciones de error del valor  $R_d$ .

Este programa solo tiene un inconveniente y viene dado porque las señales térmicas a comparar no pueden tener más de 36000 puntos de medición, para resolver ese problema se han tomado varios valores intermedios de la señal y así ver reducida la extensión de la misma.



*Figura 49. Ejemplo señal experimental.*

La segunda herramienta que hemos utilizado para el postprocesado es el software MatLab. MatLab (abreviatura de *MATrix LABoratory*, "laboratorio de matrices") es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M).

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la



representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo, y también bastante conocido.

Esta herramienta se va a utilizar principalmente para el cálculo de las funciones polinómicas derivadas de la función de error de Rd. Y mediante una programación no muy compleja seremos capaces de obtener el valor máximo y mínimo de cada función para así poder lograr el valor Rd real.

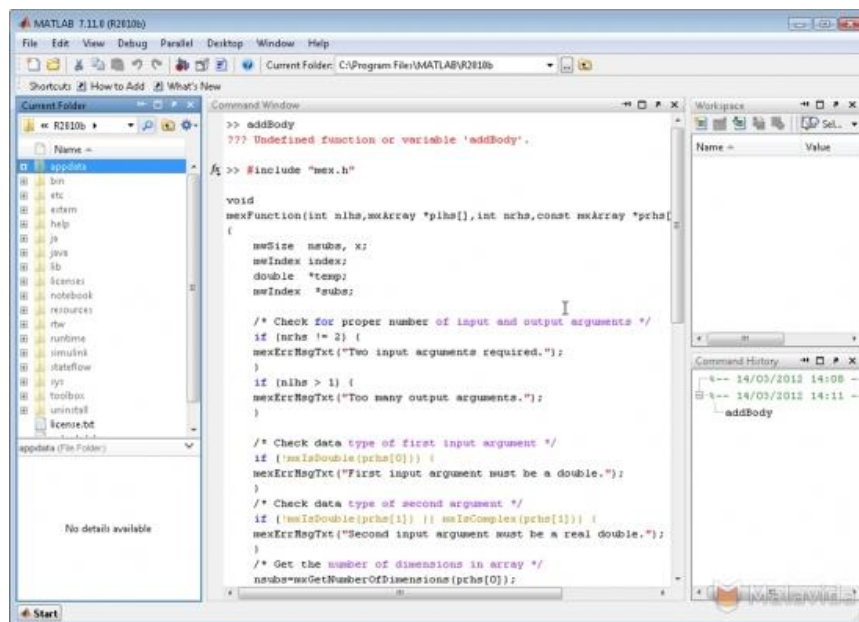


Figura 50. Interfaz de MatLab.

### 3.7. Resultados y conclusiones

En el siguiente apartado se expondrán los diferentes resultados obtenidos de los ensayos realizados para medición de temperaturas y potencias en el estudio experimental previamente realizado en el departamento, y más profundamente los obtenidos mediante las simulaciones del modelo numérico.

#### 3.7.1. Resultados experimentales de partida

A continuación se van a exponer los resultados experimentales más destacados obtenidos en el estudio previamente realizado. También se obtendrán pequeñas conclusiones relacionadas con ellos.

Para el análisis de los resultados experimentales se va optar por realizarlo en dos fases. En la primera se va a analizar el consumo de potencia para todos los casos ensayados, después se estudiarán las temperaturas obtenidas y finalmente se realizará una comparación entre la potencia consumida y la temperatura, para poder así obtener una relación entre ellas.

En la figura 51. se puede observar el consumo de potencia para el caso del soporte de acero. En el eje X está representada la profundidad de pasada y para cada profundidad de pasada los dos tipos de radio de superposición empleados. Sabiendo esto se han representado los ensayos del 1 al 4 correspondientes a la tabla 3.

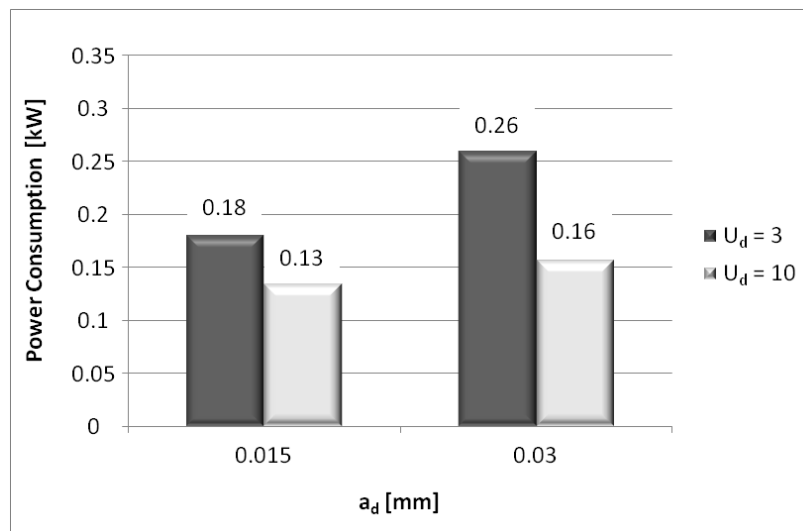


Figura 51. Consumo de potencia con soporte de acero.

Se puede observar que el aumento del consumo de potencia está directamente relacionado con el aumento del área de contacto entre la muela y el diamante ( $a_d \cdot f_d$ ). Como se ha mencionado anteriormente el principal mecanismo de eliminación de material es la fractura de enlaces, si el contacto entre la muela y el diamante incrementa, el número de enlaces que han de ser fracturados también aumenta, por lo tanto el consumo es mayor.

Los resultados para el caso del soporte de cobre se muestran en la figura 52. El gráfico es el mismo que el utilizado para los resultados del soporte de acero, en este se pueden ver los resultados para los casos del 5 al 8. Como se observa, los valores y la tendencia es similar a la obtenida previamente,

aumentando el consumo de potencia cuando el área de contacto entre la muela y el diamante aumentan.

Comparando los resultados del soporte de acero y cobre se puede ver que el consumo de potencia para el caso del soporte de cobre es mayor que para el clásico de acero (en torno a un 15-30%). Esto ocurre debido a que las temperaturas alcanzadas en el soporte de acero son más altas que en el de cobre, en consecuencia, el abrasivo de la muela se suaviza y el consumo disminuye. Esta hipótesis se confirma una vez analizadas las temperaturas obtenidas para cada caso.

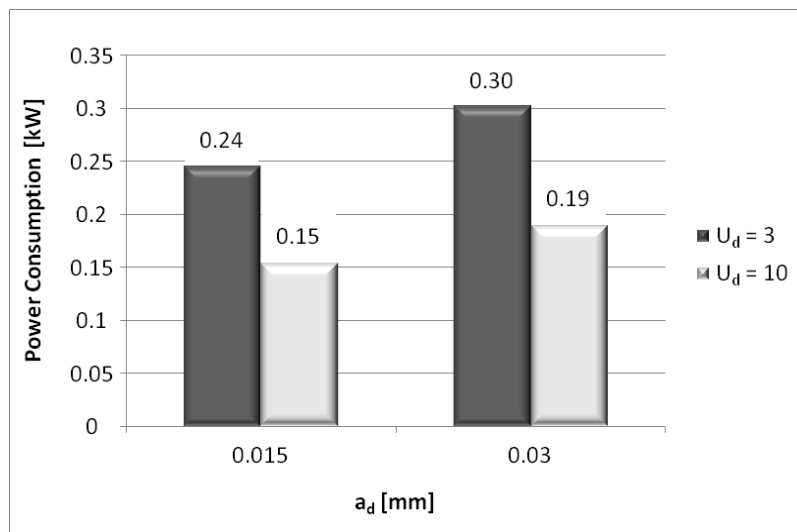


Figura 52. Consumo de potencia con soporte de cobre.

Para la realización de un análisis de las temperaturas, la figura 53. muestra las temperaturas para el soporte de acero dependiendo, nuevamente, de  $a_d$  y  $U_d$ . Los resultados obtenidos son coherentes con los consumos de potencias anteriormente expuestos, es decir, cuanto mayor es el consumo de potencia, mayor es la temperatura alcanzada. Estos resultados confirman la hipótesis que la temperatura está directamente relacionada con el consumo de potencia y con el área de contacto entre la muela y el diamante.

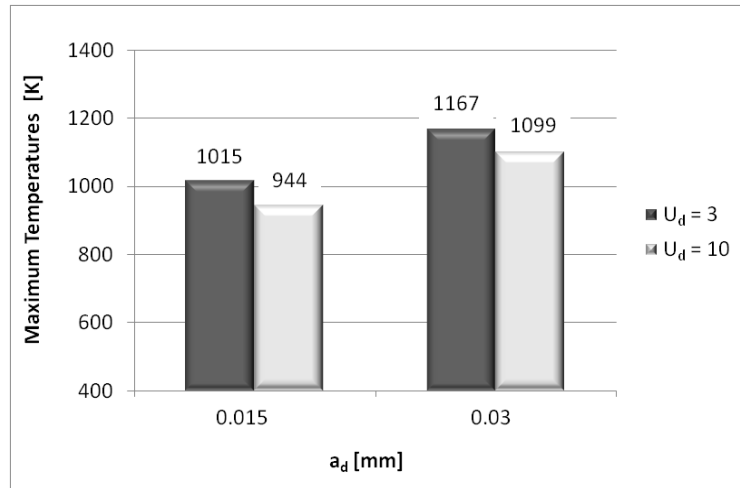


Figura 53. Temperaturas máximas en el soporte de acero.

Las mediciones obtenidas durante el diamantado con soporte de cobre son mucho menores que las obtenidas con el de acero. Para los casos 5 y 6 (con un  $a_d=0.015\text{mm}$ ) las temperaturas alcanzadas son menores que 623 K y por ello el pirómetro no es capaz de detectarlas. Para el ensayo 7, la temperatura es correcta pero para el 8, a pesar de que la temperatura alcanza un valor máximo de 672 K, en gran parte del ensayo la temperatura es muy pequeña para poder ser medida con el pirómetro.

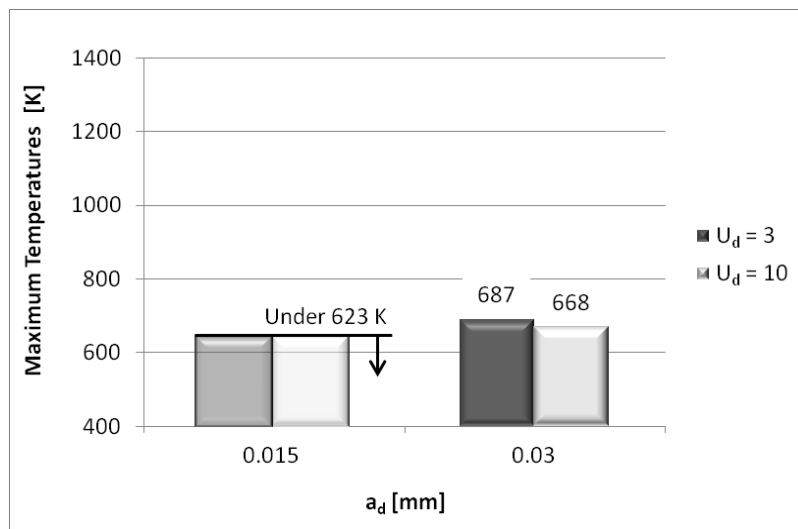


Figura 54. Temperaturas máximas en el soporte de cobre.

Una vez analizados los resultados, la conclusión que se obtiene es que a pesar de que el consumo de potencia para el caso del soporte de cobre es mayor, el uso de cobre para la construcción del soporte permite que las

temperaturas alcanzadas sean más bajas. Con esto se consigue que la vida útil del diamante sea más duradera en comparación con la del soporte de acero. En todos los casos analizados se puede ver que entre el soporte de acero y el de cobre las temperaturas han sufrido una bajada de un 35% aproximadamente. Sin embargo mediante el análisis de los resultados experimentales no podemos obtener ninguna relación entre la potencia consumida, la temperatura y el flujo entrante que afectan al proceso de diamantado. Este estudio experimental va a ser muy útil para poder entender los resultados que se van a analizar en el siguiente apartado, correspondientes a las simulaciones realizadas con un modelo numérico.

### 3.7.2. Resultados de las simulaciones

Al igual que en el análisis de los resultados experimentales, para los resultados de las simulaciones se va a realizar el análisis en dos fases. La primera va a consistir en un análisis de las temperaturas alcanzadas en el modelo y su distribución a través del diamantador, para ello se va a utilizar el postprocesador de ANSYS.

En la segunda fase se va a tratar la obtención de  $R_d$  para cada caso, haciendo un análisis profundo para un caso y una exposición de los resultados para todos los casos en estudio.

Siguiendo la hipótesis planteada en el caso experimental cuando analizamos las temperaturas máximas obtenidas en el diamante para el caso del soporte de acero, se puede ver como la temperatura y el flujo de calor a evacuar son más altos que para el soporte de acero.

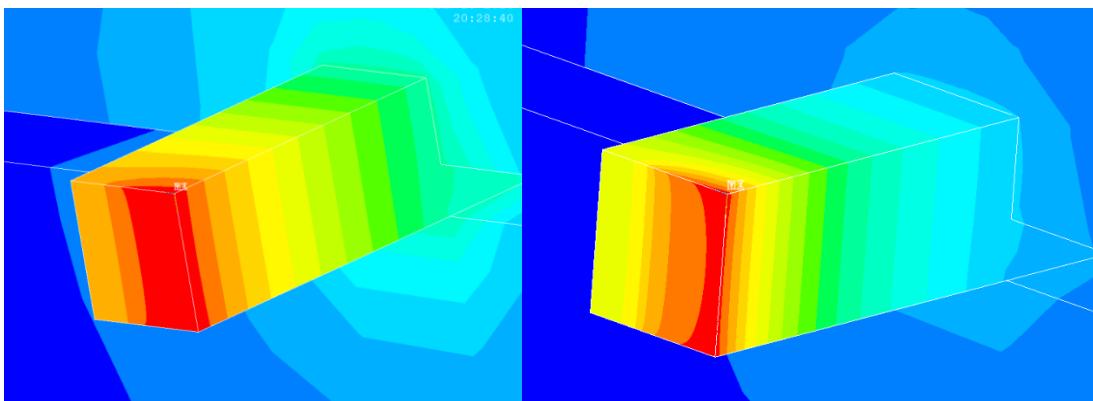


Figura 55. Diamante en soporte de acero (derecha) y diamante en soporte de cobre (izquierda).

En la figura 55. se observa como la concentración de calor en el diamante para el caso del soporte de acero es más elevada que para el cobre. Analizando el diamantador completo se aprecia a simple vista como el soporte de cobre es capaz de evacuar mejor el calor y reducir así la temperatura máxima alcanzada. Esto también provoca que la temperatura mínima alcanzada en el soporte de cobre sea un poco más elevada que en el caso del acero. Como se observa en la figura 56. en el soporte de acero las temperaturas están más concentradas en la zona cercana al contacto entre la muela y el diamante, mientras que en el de cobre está más extendida. Esto se debe como ya hemos mencionado anteriormente a la mejor conductividad térmica que posee el cobre frente al acero.

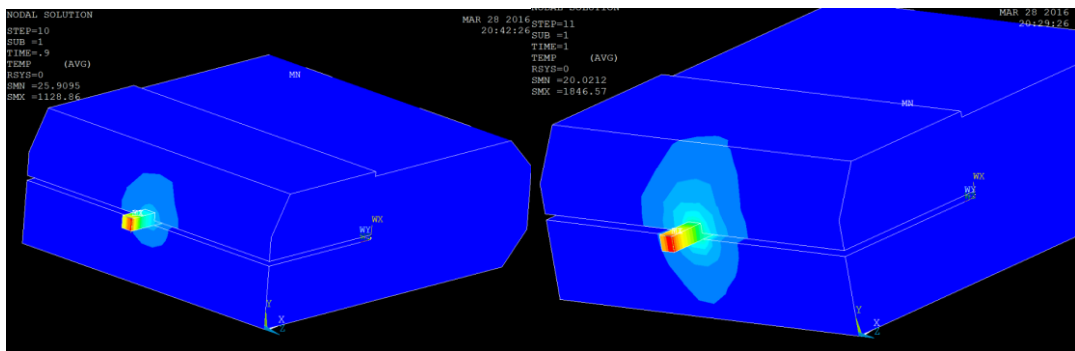


Figura 56. Diamantador de acero (derecha) y de cobre (izquierda).

Una vez analizados los modelos en el postprocesador de ANSYS, se puede verificar que las hipótesis planteadas para los casos experimentales concuerdan con las obtenidas en las simulaciones.

A continuación, se va a analizar los resultados obtenidos correspondientes a la cuantificación de  $R_d$ . Como se ha explicado anteriormente el principal objetivo es cuantificar el flujo de calor en el diamante para cada caso de diamantado. Para ello, se va a comparar los resultados experimentales con los resultados de los obtenidos en las simulaciones para diferentes valores de  $R_d$ . La comparación se llevará a cabo usando la función de error desarrollada en el apartado 3.6.2.3. *Obtención de  $R_d$* .

Para el caso del soporte de acero se va analizar el caso 3, para ello como se puede ver en la figura 57. los valores de las temperaturas para cada valor de Rd y la temperatura experimental.

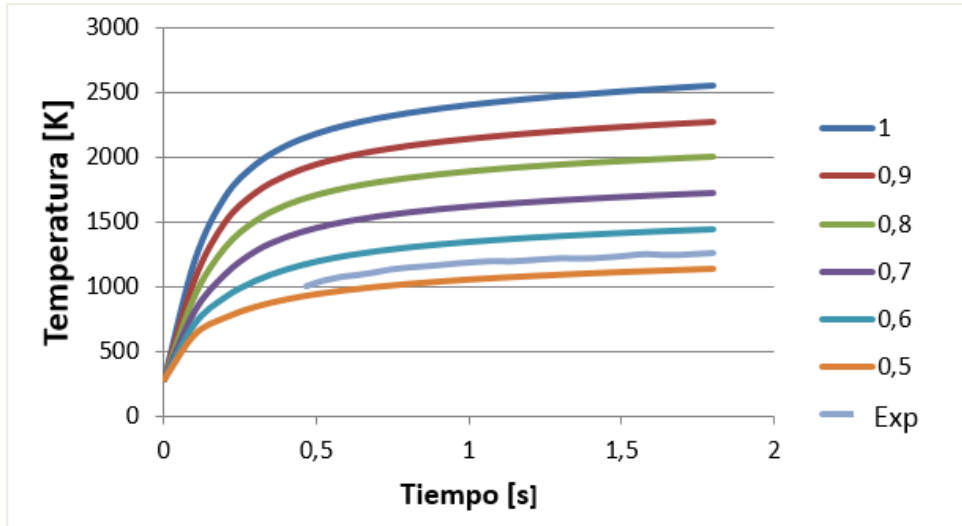


Figura 57. Resultados experimentales y simulados caso 3.

Mediante este gráfico podemos estimar que el valor de Rd se encontrara entre 0.5 y 0.6, pero para poder calcular el valor exacto de Rd se han utilizado las mediciones de las temperaturas y se ha calculado el error cuadrático para cada valor de Rd (0.5-1) y se ha obtenido la función polinómica como se puede ver en la figura 58.

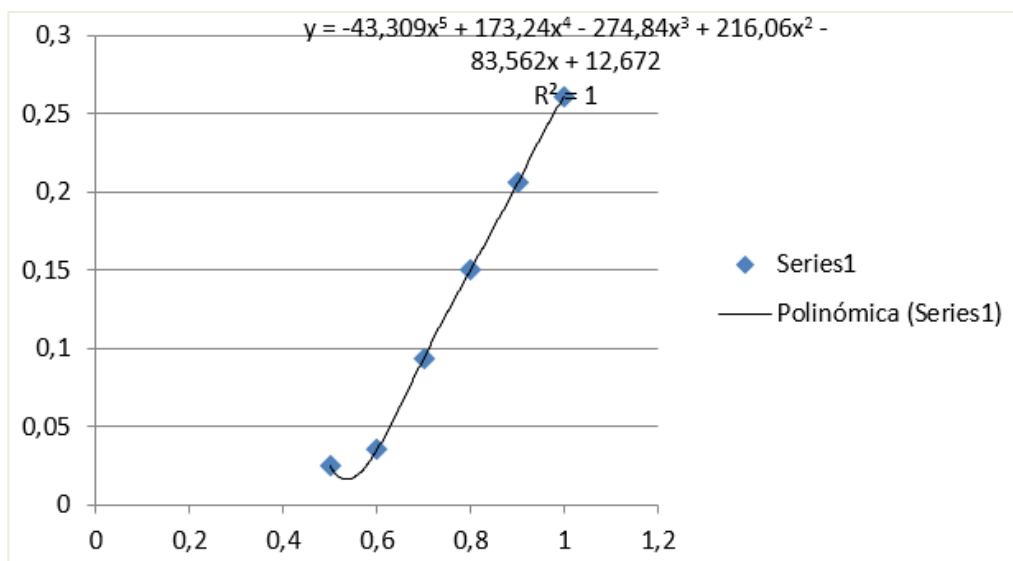


Figura 58. Función polinómica caso 3.

Una vez obtenida la función, mediante la herramienta MatLab se consigue el valor mínimo, en este caso el valor de  $R_d$  es de 0.54. Esta metodología se ha usado para los casos 1-4 correspondientes al soporte de acero. En la tabla 6. se muestran los valores de  $R_d$  y los de la densidad del flujo de calor ( $q_t$ ). Para su cálculo se ha usado la ecuación 19.

$$q_t = \frac{P}{a_d \cdot f_d} \quad (19)$$

Caso	$a_d$ [mm]	$U_d$	$v_d$ [mm/min]	$q_t$ [W/m <sup>2</sup> ]	$R_d$
1	0.015	3	679	0.024	0.93
2	0.015	10	204	0.059	0.97
3	0.030	3	679	0.017	0.54
4	0.030	10	204	0.035	0.76

Tabla 6. Resultados de  $R_d$  para casos 1-4.

Viendo los resultados obtenidos del parámetro  $R_d$  cuando utilizamos el soporte de acero, podemos sacar varias conclusiones. El parámetro que mas influye en el valor de  $R_d$  es la profundidad de pasada ( $a_d$ ), se puede ver que cuando  $a_d$  tiene un valor de 0.015mm,  $R_d$  tiene un valor alrededor de 0.9-0.95. Sin embargo, cuando  $a_d$  es 0.03mm, el valor de  $R_d$  se reduce hasta 0.54.

Si se analiza  $q_t$ , se observa que cuando la profundidad de pasada aumenta, la densidad del flujo de calor disminuye. Esto ocurre debido a que el arranque de material es más eficiente para valores altos del área de contacto puesto que la fricción durante el arranque de material no es tan relevante. La partición del calor es un fenómeno muy local, el aumento de la densidad del flujo de calor tiene mucha influencia en la partición de calor, reduciendo los ratios de calor significativamente. Con la profundidad de pasada ocurre algo similar, cuando el flujo de densidad aumenta el ratio de partición del calor se reduce.

En cuanto al soporte de cobre el procedimiento que se ha seguido es similar al utilizado con el soporte de acero, se va a analizar el caso 7, ya que los casos 5 y 6 como se ha explicado anteriormente no contienen medidas experimentales de las temperaturas debido a que el pirómetro no es capaz de medirlas. En la figura 59. se observa los valores de la temperatura para cada caso de  $R_d$  y el caso experimental.



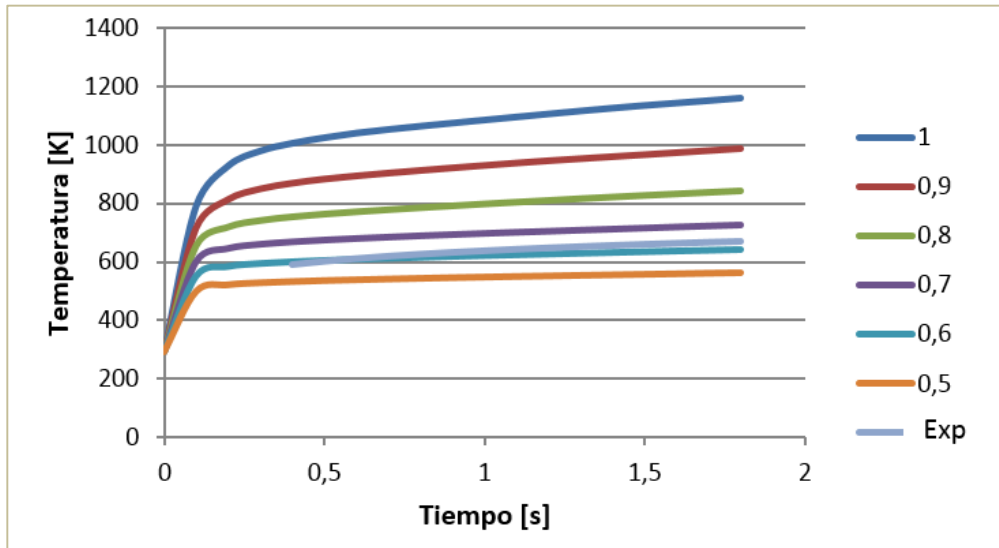


Figura 59. Resultados experimentales y simulados caso 7.

En este caso el valor de Rd se situará entre 0.6 y 0.7 como se ha realizado antes obtendremos la función polinómica (figura 60.) y finalmente el valor exacto de Rd.

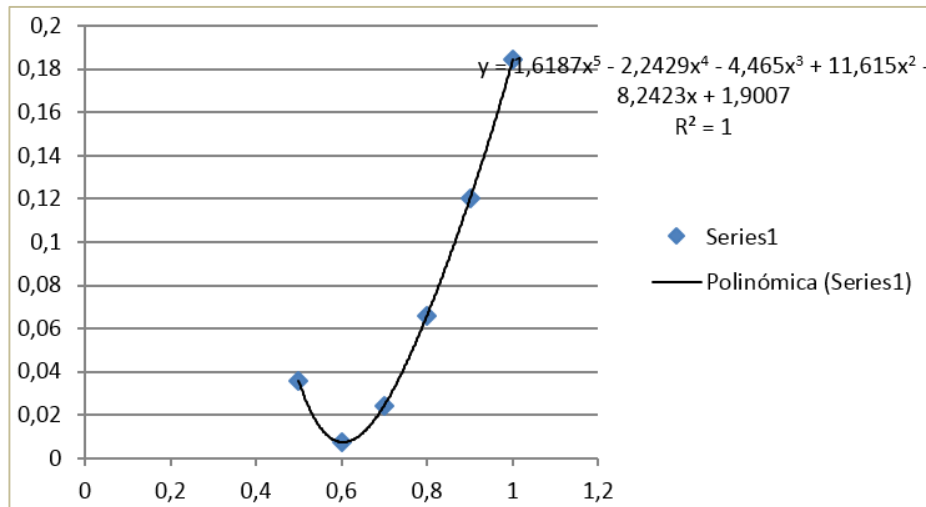


Figura 60. Función polinómica caso 7.

Obteniendo el valor mínimo de la función se consigue que Rd para el caso 7 vale 0.6. En la tabla 7. se puede ver el resumen de los resultados de  $q_t$  y Rd.

Caso	$a_d$ [mm]	$U_d$	$v_d$ [mm/min]	$q_t$ [W/m <sup>2</sup> ]	$R_d$
5	0.015	3	679	0.033	-
6	0.015	10	204	0.068	-
7	0.030	3	679	0.020	0.6
8	0.030	10	204	0.042	0.88

Tabla 7. Resultados de  $R_d$  para casos 5-8.

Los resultados obtenidos concuerdan con los anteriores, el aumento de la densidad del flujo de calor provoca la disminución del ratio de partición del calor. Los resultados de  $R_d$  para el caso de soporte de cobre son un poco más elevados que los obtenidos anteriormente (alrededor del 10-50%). Esta diferencia no es relevante como para explicar la enorme diferencia de temperatura encontrada en los resultados experimentales.

Analizando todos los resultados obtenidos se concluye que la partición del calor es un efecto muy local, que para una presión de contacto, velocidad relativa y un área de contacto, depende principalmente de los materiales en contacto, y no de la geometría y estructura del diamantador.

Todas las mediciones realizadas y las simulaciones hechas para cada caso de  $R_d$ , así como las gráficas y las funciones polinómicas pueden ser analizadas en el apartado 5 Anexos.

### 3.7.3. Conclusiones

En el siguiente apartado se mencionarán las diferentes conclusiones adquiridas una vez finalizados y analizados los resultados obtenidos, teniendo en cuenta los objetivos planteados al principio del estudio.

- Analizando la información obtenida en el estado del arte, es posible concluir que uno de los aspectos más importantes del diamante y de su desgaste es la temperatura alcanzada durante el proceso de diamantado. Esta hipótesis se ha visto corroborada mediante las

simulaciones obtenidas, en ellas se ha visto claramente que el parámetro más influyente es la temperatura alcanzada, teniendo menos repercusión la geometría del diamantador.

- Al comparar los soportes de acero y los soportes de cobre, como ya se preveía inicialmente se concluye que el soporte de cobre disipa mejor el calor que el de acero, ya que su coeficiente de conductividad térmica  $k$  es mayor que el del acero, por lo tanto consigue que el diamante no alcance las temperaturas de grafitización que son tan perjudiciales en el diamante, ya que provocan que pierda parte de las características que le distinguen de otros materiales, aumentando así su duración de vida. De este modo, se plantea una línea de investigación a seguir dado que con este soporte los resultados no se alejan en exceso del diamantado convencional con lubricante.
- Las mediciones de temperatura experimentales muestran que con el diamantador de cobre todas las temperaturas comparadas con las del diamantador de acero son alrededor de 400 K más bajas, sin embargo la potencia consumida para estos casos es mayor.
- Los resultados de  $R_d$  y los de estimación de la partición de calor han demostrado que el soporte del diamante no es tan influyente como lo es en la temperatura. Esto se debe a que es un fenómeno muy local que depende más de los materiales que estén en contacto que la estructura del diamantador.
- Como conclusión final en el estudio se ha desarrollado un modelo matemático capaz de dar resultados precisos de las temperaturas máximas obtenidas en el proceso de diamantado. Mediante este modelo es posible estimar la influencia de los parámetros de corte y así ajustarlos a las necesidades industriales dependiendo de las condiciones que se quiera obtener. Con esto conseguiremos tener controlado un proceso que hasta ahora era totalmente desconocido debido a los pocos estudios que es posible encontrar en la literatura científica referente al rectificado, y más concretamente al diamantado.

### 3.8. Líneas futuras

Como líneas futuras de investigación y continuando con lo desarrollado en este estudio, sería interesante crear un estudio similar al llevado a cabo pero esta vez analizando el desgaste que sufre el diamante. Para ello sería importante analizar la dilatación que sufre el diamantador con soporte de cobre respecto al de acero debido a la estructura del material.

Una vez medidas esas dilataciones, también se podría obtener mediciones del diamante para cada caso. Para esas medidas se podrían utilizar sistemas de medición como SEM (microscopio electrónico de barrido, el cual proporciona información de las formas, texturas y composición química de sus constituyentes, es decir, componentes superficiales que forman el diamante) y EDX, los cuales serán útiles para realizar una comparativa del desgaste del diamante para condiciones de trabajo diferentes, y poder arrojar de esta manera diferentes conclusiones, las cuales serán de gran ayuda para conseguir que el proceso sea más preciso.

Esta sería la parte experimental del estudio, pero también habría que complementarlo mediante la simulación del desgaste del diamante utilizando el método de los elementos finitos, y así poder obtener resultados sin invertir tantos recursos.

Como valoración final decir que el proceso de diamantado es un aspecto muy poco estudiado de la tecnología del rectificado, a pesar de que es un campo en el que es posible aumentar la productividad industrial del proceso. Debido a esto es un campo que permite gran capacidad de estudio y que en un futuro irá aumentando su importancia.