

TEMA 5

ROZAMIENTO EN PROCESOS DE CORTE

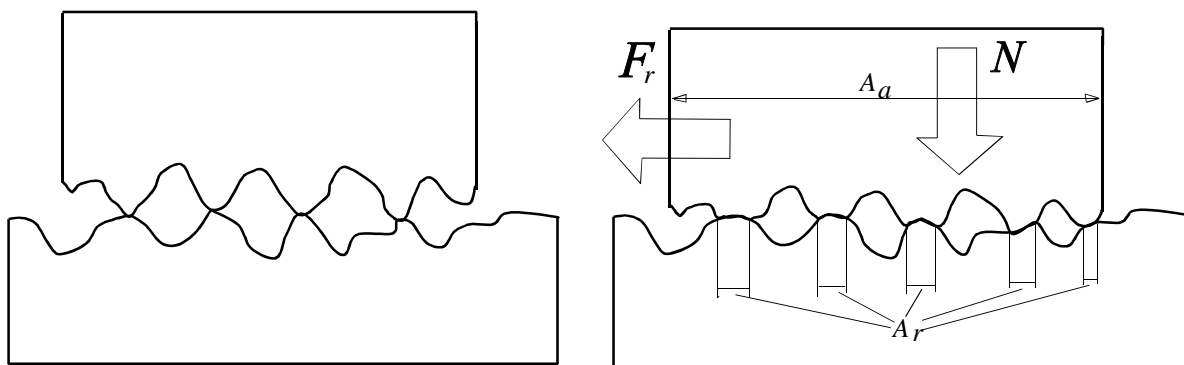
Leyes del rozamiento seco.

Las primeras leyes sobre el rozamiento seco (esto es, sin lubricación o con lubricación escasa) entre superficies planas fueron enunciadas por Amontons (1699) y establecen que *la fuerza F necesaria para que una superficie en movimiento (con velocidad constante) venza el rozamiento existente con el plano sobre el que desliza, es independiente del área ente ambas superficies ya que depende del área real de contacto existente (Primera ley); y que dicha fuerza de rozamiento es proporcional a la carga normal existente entre ambas superficies (Segunda ley).*

Posteriormente Coulomb (1875) verificó estas leyes e hizo la siguiente observación adicional: *el coeficiente de rozamiento es independiente de la velocidad de deslizamiento y del esfuerzo normal existente.*

Si se amplifica suficientemente la zona de contacto entre las dos superficies, supuestas éstas teóricamente planas y perfectamente pulidas, se aprecian importantes irregularidades. Si se aplica una carga normal N , las zonas en contacto experimentan fuertes deformaciones locales de carácter plástico y el área real de contacto A_r aumenta hasta ser capaz de soportar la carga aplicada; esto es:

$$A_r \propto \frac{N}{Y}$$



siendo Y la tensión unidireccional de fluencia del material de menor resistencia, de los dos que están en contacto. En la mayoría de las situaciones que se tienen entre superficies metálicas, siempre que N no sea excesivamente elevada, se cumple que $A_r \ll A_a$, designando por A_a al área aparente de contacto.

Debido a la fluencia experimentada en la zona de contacto, se producen microsoldaduras que originan un cierto nivel de adhesión entre las superficies en contacto. El inicio del

desplazamiento relativo entre ambas superficies requiere una cierta fuerza F , tangencial al plano teórico del contacto, para provocar el cizallado de las asperezas microsoldadas. Dicha fuerza de rozamiento vendrá dada por:

$$F = \tau_r A_r$$

siendo τ_r la tensión de rotura a cortadura del material menos resistente.

Por su parte de la segunda ley de Amontons (más conocida como ley de rozamiento de Coulomb), la fuerza F es proporcional a la carga normal N , esto es:

$$F = \mu N$$

donde el coeficiente de proporcionalidad μ recibe el nombre de *coeficiente de rozamiento de Coulomb*. Considerando las tres ecuaciones expuestas en el presente apartado, se tiene:

$$\tau_r A_r = \mu A_r Y$$

esto es:

$$\mu = \frac{\tau_r}{Y} \text{ cte}$$

ya que τ_r e Y son dos propiedades intrínsecas del mismo material.

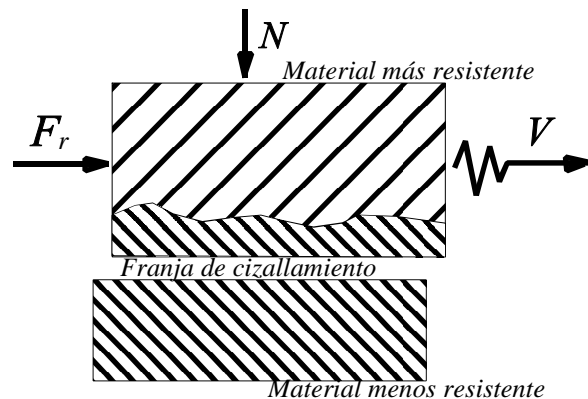
Si el valor N aumenta considerablemente (tal como ocurre en los procesos de corte), se llegará a que $A_r \approx A_a$ y entonces la fuerza de rozamiento podrá expresarse mediante:

$$F \approx \tau_r A_a$$

siendo, por tanto, F independiente de N y las leyes, anteriormente enunciadas, del rozamiento no se satisfacen.

En esta situación, en realidad no se rompen las uniones de adhesión generadas por el contacto sino que se genera una *franja de cizallamiento* en el material menos resistente de los dos.

Aquellas situaciones que satisfacen las leyes de Amontons-Coulomb se denominan de *rozamiento por deslizamiento*; mientras que el último caso expuesto se conoce como *rozamiento por adherencia*.



En particular, en los procesos de formación de la viruta, se ha observado que el coeficiente medio de rozamiento existente entre la viruta y la herramienta puede variar considerablemente y se ve afectado por los cambios en la velocidad de corte y en la geometría de la herramienta. Ello es atribuido a las muy elevadas presiones normales que se tienen en la zona de contacto viruta/herramienta; esto origina que el área real de contacto sea prácticamente igual al área de contacto aparente. Esto conduce a la hipótesis de rozamiento por adherencia entre la viruta y la cara de desprendimiento de la herramienta; pero si se observa con los medios apropiados el mecanismo de corte, puede apreciarse que a suficiente distancia de la arista de corte se tiene deslizamiento de la viruta.

Fenómenos térmicos en el corte.

La energía mecánica puesta en juego en los procesos de corte, puede descomponerse en los términos siguientes:

- energía de deformación elástica
- energía de deformación plástica
- energía de rozamiento

De ellos, el primero es almacenado por el material y no provoca la generación de calor. Los otros términos son de carácter disipativo, ya que las deformaciones plásticas provocan un rozamiento interno, y originan la transformación de la energía mecánica en calorífica. Esto hace que se tengan elevadas temperaturas en la zona de corte, lo cual incide en el aumento del desgaste de la herramienta.

En lo que respecta al fenómeno de generación de calor, pueden ser consideradas las tres zonas siguientes:

- zona de deformación primaria (1)
- zona de deformación secundaria (2)
- zona de rozamiento en incidencia (3)

La generación de calor en la zona 3 suele ser suficientemente menor que en las otras dos zonas, salvo en el caso de que la herramienta estuviese grandemente desgastada en su cara de incidencia. En general, el orden de magnitud de las cantidades de calor generado en unidad de tiempo es el siguiente:

$$\mathcal{Q}_1 > \mathcal{Q}_2 \gg \mathcal{Q}_3$$

y una primera aproximación al valor de cada uno de los términos es:

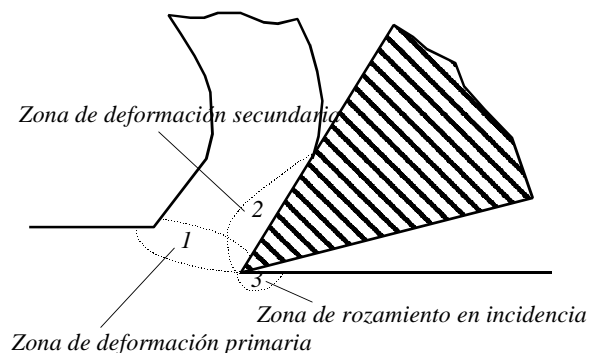
$$\mathcal{Q}_1 \cdot F_s V_s q_1 \quad (q_1 < 1)$$

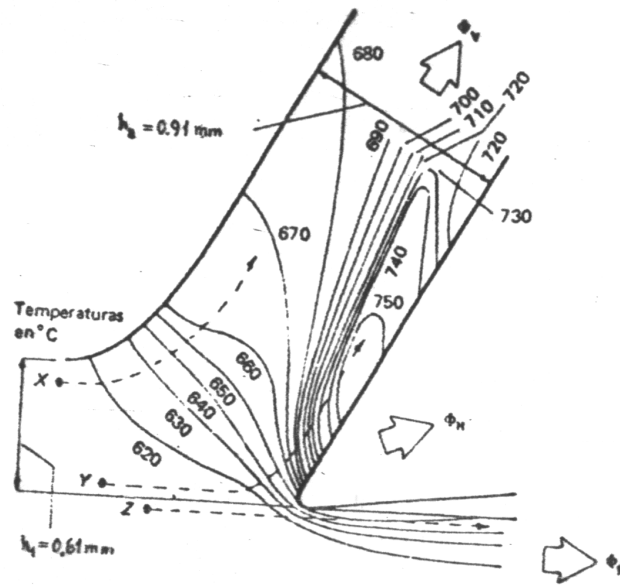
$$\mathcal{Q}_2 \cdot F_\gamma V_\gamma$$

$$\mathcal{Q}_3 \cdot F_c V_c q_3 \quad (q_3 \ll 1)$$

Recuérdese la descomposición de fuerzas y de velocidades efectuada para el modelos de corte ortogonal.

La figura adjunta, debida a Boothroyd (1963), muestra la distribución de temperatura de un proceso de corte ortogonal sobre acero de bajo contenido en carbono. La obtención de dicha distribución de temperaturas ha sido efectuada experimentalmente, mediante fotografía infrarroja, partiendo de la pieza con una temperatura de 611E C y bajo las siguientes condiciones de mecanizado: velocidad de corte de 0,38 m/s (23 m/min), ancho de corte de 6,35 mm y ángulo de desprendimiento de 30E.





Un punto **X** del material de la pieza, atraviesa la zona de deformación primaria, donde es calentado y pasa a continuación a pertenecer a la viruta.

Un punto **Y** pasa a través de ambas zonas de deformación, donde es calentado; finalmente es ligeramente enfriado a fin de que, eventualmente, la viruta homogeneice su temperatura.

Suponiendo la herramienta perfectamente afilada y con un ángulo de incidencia suficiente, un punto **Z** es calentado por conducción de calor proveniente de la zona de deformación primaria.

El calor total generado por unidad de tiempo, en este caso:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 \quad (\text{ya que se supone } \Phi_3 \text{ despreciable})$$

se elimina mediante:

$$\Phi = \Phi_H + \Phi_V + \Phi$$

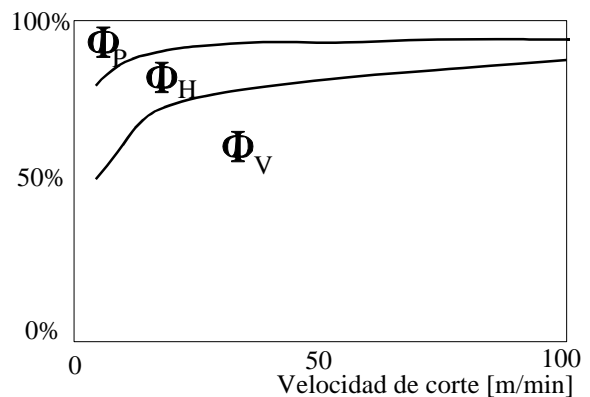
donde:

Φ_V = calor transportado por la viruta

Φ_V = calor conducido hacia la pieza

Φ_V = calor conducido hacia la hta.

y cuyos valores relativos se muestran en la siguiente figura, debida a Schmidt (1950). Esto es, el término más importante de eliminación de calor es el Φ_V , sobre todo al incrementar la velocidad de corte. A velocidades bajas es $\Phi_H > \Phi_V$ y al aumentar la velocidad pasa a ser $\Phi_H \cdot \Phi_V$; por su parte Φ_V se mantiene prácticamente constante para un amplio rango de valores de la velocidad de corte.



Fluidos de corte.

Como ya ha sido estudiado, durante el proceso de corte se genera una notable cantidad de calor, principalmente en las zonas de deformación primaria y secundaria. El calor generado en la *zona de deformación primaria* es debido a los procesos físicos que tienen lugar durante la deformación de la red cristalina del material y no puede por tanto ser reducido por otro procedimiento distinto del metalúrgico; es decir, logrando aleaciones de más fácil maquinabilidad. Por su parte el calor generado en la *zona de deformación secundaria* es debido al rozamiento existente entre la viruta y la cara de desprendimiento de la herramienta y puede ser reducido si se disminuye el coeficiente de rozamiento por medio de la *lubricación*.

Aún en el caso de disminuir el rozamiento en la cara de desprendimiento por empleo de un agente lubricante, la cantidad de calor generado en el corte, es importante y aunque existen medios *naturales* de eliminación de dicho calor -tales como la viruta, la herramienta y la pieza-, interesa que tal eliminación de calor se efectúe lo más rápidamente posible a fin de que la temperatura de los distintos elementos que intervienen en el corte no aumente excesivamente. Esto es especialmente crítico en la herramienta ya que la dureza de la misma disminuye con el aumento de la temperatura. Con todo ello se está sugiriendo el empleo de una acción de *refrigeración*.

Ambas acciones de *lubricación* y *refrigeración* se efectúan, en los procesos de mecanizado, mediante el empleo de los denominados *fluidos de corte*, cuyo empleo fue iniciado Taylor (1890). Además de estas dos acciones principales, en la actualidad se exige a los fluidos de corte que, en mayor o menor medida, efectúen las siguientes acciones complementarias:

- Prevención de la formación de filo recreado.
- Ayuda a la separación y evacuación de la viruta.
- Protección contra la corrosión.
- Lubricación de elementos de la máquina-herramienta.

Clasificación de los fluidos de corte.

Aceites de corte puros:

- Aceites minerales: Son obtenidos en la destilación fraccionada del petróleo y deben contener aditivos (azufre, grafito coloidal, bisulfuro de metileno, etc.) a fin de soportar elevadas presiones y fijarse mejor sobre las superficies metálicas.
- Aceites vegetales: Son sustancias orgánicas de larga cadena molecular, que se adhieren a las superficies metálicas formando una capa muy fina. Tienen escaso poder antisoldadura y son fácilmente oxidables. El más empleado es el aceite de colza.
- Aceites compuestos: Son mezclas de aceites minerales y vegetales con un 10 ÷ 30% de aceite vegetal. Tienen buenas características lubricantes y presentan ventajas económicas frente a los vegetales.

Fluidos de corte base agua:

<u>Emulsiones:</u>	Están constituidos por aceites minerales en suspensión acuosa (contenido en agua • 90%), añadiendo un elemento emulsionante que provoca la formación de la dispersión coloidal. Su aspecto suele ser lechoso y reciben el nombre de <i>taladrinas</i> .
<u>Soluciones:</u>	Son, como su nombre indica, soluciones de aceites en agua; generalmente se obtienen soluciones mejoradas añadiendo sulforinato de sosa.

Los *fluidos de corte base agua* son óptimos refrigerantes ya que su calor específico es próximo a 1 cal/g, mojan bien las superficies metálicas (al ser su tensión superficial menor que la del agua) y tienen buena conductividad térmica. Por su parte los *aceites de corte puros* son buenos lubricantes, pero su poder refrigerante es inferior al de los fluidos base agua, ya que su calor específico está alrededor de 0,5 cal/g y su conductividad térmica es aproximadamente 1/3 de la del agua. En general, los aceites son más caros que los fluidos base agua.

Selección del fluido de corte.

La eficacia de los fluidos de corte suele verse reducida al aumentar la velocidad de corte, a causa del menor tiempo de contacto del líquido con la zona del corte y al efecto de centrifugación, en aquellos procesos en los que el movimiento principal sea de rotación.

También el aumento del espesor de viruta indeformada, que conduce a mayores esfuerzos, suele reducir la eficacia de los fluidos de corte.

Ha sido comprobado experimentalmente que, en general, los fluidos de corte no influyen sobre las fuerzas de corte; pero si influyen, favorablemente, en el acabado superficial por su acción sobre el filo recrecido.

La elección del tipo de fluido de corte a emplear depende principalmente de los siguientes factores:

Material de la herramienta:

- Aceros al carbono: emulsiones, ya que interesa más el efecto refrigerante.
- Aceros rápidos: depende del material a mecanizar y del mecanizado.
- Metales duros: emulsiones o se trabaja en seco.

Material de la pieza:

- Aceros: depende de la herramienta y del mecanizado.
- Fundición: suele trabajarse en seco.
- Aleaciones ligeras: en seco o con aceites sin azufre.
- Aleaciones de cobre: en seco o con aceites sin azufre.

Tipos de mecanizado:

En operaciones de corte a baja velocidad, tales como roscado, brochado y tallado se suelen usar aceites de corte.

En el rectificado es usual el empleo de emulsiones.

En el taladrado, aceites de baja viscosidad.

En el trabajo de acabado es general el empleo de aceites de corte.

Para mejorar la eficacia de los fluidos de corte a altas velocidades, se ha desarrollado el procedimiento de *pulverizado a alta presión* o *hi-jet*; mediante el cual el fluido es inyectado, detrás de la herramienta, entre la cara de incidencia y la superficie mecanizada.

En la tabla adjunta se muestran los aceites de corte adecuados para los distintos trabajos de mecanizado de diversos materiales.

	Brochado	Tallado engranajes	Taladrado escariado	Torneado	Fresado	Rectificado
Aluminio		3	2			3
Latón						
Bronce						
Cobre	1			2		5
Magnesio			5			
Monel	3			4		
Fundición	2					
Acero dureza < 30 kg	4			2		6
Acero dureza > 30 kg		3		4		9
Acero tratado					1	
Aleación de acero			10			11
Acero Stainless	7					9

1. Aceites grasos

2. Aceites solubles

3. Aceites grasos sulfurizados

4. Aceites minerales sulfurizados

5. Aceite mineral puro

6. Aceites de fuerte acción química

7. Aceites grasos sulfoclorados

8. Aceites con media acción química

9. Aceites solubles

10. Aceites solubles

11. Aceites solubles de débil acción química

Otra tabla de elección del fluido de corte se muestra a continuación en función de la maquinabilidad del material a mecanizar y de la operación:

Clave: M, aceite mineral puro. S, aceite mineral sulfurado. ML, mezcla de aceite mineral y aceite de manteca de cerdo. Los números indican el % de aceite de manteca de cerdo. E, emulsión de aceite soluble. La relación aceite-agua es la que se indica. K, queroseno. SL, aceite sulfurado de manteca de cerdo. Los números indican el % del mismo. Aire, chorro dirigido de aire comprimido.

Maquinabilidad: I, superior a 70 (acero). II, de 50-70 (acero). III, de 40-50 (acero). IV, inferior a 40 (acero). V, aproximadamente 50 (fundición). VI, superior a 100 (aleaciones de cobre). VII, de 70-100 (aleaciones de cobre). VIII, inferior a 70 (aleaciones de cobre). IX, de 20 a 50 (níquel y sus aleaciones). X, de 200-2000 (aluminio y sus aleaciones). XI y XII, (plásticos termoestables).

Operación	Acero				C.I.	Cobre				Ni	Al Mg	Plástico	
	I	II	II	IV		V	VI	VII	VIII			IX	X
Brochado severo	SL20 S ML40	SL40 S ML40	SL40 S ML40	SL40 S ML40	10:1E ML40 M	15:1E ML10 M	15:1E ML20 M	10:1E ML40 M	SL40 S ML40	ML20 10:1E K	- - -	- - -	
Brochado basto	SL10 S 15:1E	SL10 S 15:1E	SL20 S 10:1E	SL20 S 10:1E	10:1E ML40 M	15:1E ML10 M	15:1E ML20 M	10:1E ML40 M	SL40 S ML40	ML40 10:1E K	20:1E M Seco	10:1E M Seco	
Brochado fino	ML20 S M	SL10 ML20 S	SL20 ML40 S	SL20 ML40 S	10:1E M Seco	15:1E ML10 M	15:1E ML10 M	10:1E ML40 S	SL20 ML40 S	ML20 K Seco	20:1E M Seco	10:1E M Seco	
Roscado	S ML40 M	SL10 S ML20	SL20 S ML40	SL40 S ML40	10:1E Seco M	15:1E M ML20	10:1E M ML20	10:1E ML40 M	SL20 ML40 S	SL20 S ML40	20:1E K Aire	20:1E K Aire	
Roscado en máquinas automáticas	SL10 S ML20	SL10 S ML20	SL20 S ML40	SL40 S ML40	10:1E Seco M	15:1E ML20 M	10:1E ML40 M	10:1E ML40 M	SL10 S 10:1E	ML20 K M	30:1E K Aire	20:1E K Aire	
Tallado de engranajes por corte	SL10 S ML20	SL10 S ML40	SL20 S ML40	SL40 S ML40	10:1E Seco -	ML10 M Seco	ML10 M Seco	S ML20 M	SL40 S ML40	10:1E K Seco	30:1E Seco Aire	20:1E Seco Aire	
Tallado de engranajes por cepillado	S ML40 M	S ML40 M	SL20 S ML40	SL40 S ML40	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	
Escariado	15:1E S ML10	10:1E S ML20	10:1E SL20 ML40	10:1E SL40 ML40	20:1E ML20 M	15:1E M Seco	15:1E ML10 M	10:1E ML40 M	10:1E SL40 ML40	ML10 K M	20:1E Seco Aire	15:1E Seco Aire	
Taladrado	20:1E M10 M	15:1E ML10 M	10:1E ML20 M	10:1E S ML20	20:1E Seco M	15:1E M ML10	15:1E M ML10	10:1E ML20 M	ML20 S 10:1E	30:1E SL20 K	30:1E Seco Aire	15:1E Seco Aire	
Fresado	20:1E S ML10	15:1E S ML10	10:1E S ML20	10:1E S ML40	20:1E Seco M	15:1E M ML20	15:1E M ML20	10:1E M ML20	10:1E S ML40	30:1E Seco K	30:1E Seco Aire	Seco 30:1E Aire	
Mandrinado	20:1E S ML10	15:1E S ML10	10:1E SL10 S	10:1E SL20 S	20:1E M Seco	15:1E ML10 M	15:1E ML10 M	10:1E ML20 M	10:1E S ML10	30:1E K Seco	20:1E Aire Seco	20:1E Aire Seco	
Cepillado y planeado	30:1E S ML10	30:1E S ML10	30:1E S ML10	20:1E SL10 S	20:1E Seco M	15:1E ML10 M	15:1E ML10 M	10:1E ML20 M	10:1E S ML40	30:1E K Seco	30:1E Seco	Seco 30:1E	
Torneado	30:1E ML10 S	30:1E SL10 ML20	30:1E SL20 ML40	30:1E SL40 S	20:1E Seco	15:1E ML10 M	15:1E ML20 M	15:1E ML40 M	10:1E SL20 S	30:1E K Seco	30:1E Seco	Seco 30:1e	
Corte por sierra	30:1E 10:1E M	30:1E 10:1E M	20:1E 10:1E S	10:1E S M	20:1E Seco M	20:1E M Seco	20:1E M Seco	20:1E M Seco	10:1E S M	30:1E K M	30:1E M Seco	20:1E M Seco	
Rectificado de superficies planas	50:1E M Seco	50:1E M Seco	50:1E M Seco	30:1E ML10 Seco	30:1E M Seco	50:1E M Seco	50:1E M Seco	50:1E M Seco	SL20 30:1E M	SL20 ML20 M	70:1E M Aire	70:1E M Aire	
Rectificado de superficies curvas	SL10 ML10 M	SL10 ML10 M	SL20 ML20 M	SL40 ML40 M	ML10 M Seco	SL10 ML10 M	SL10 ML10 M	SL20 ML40 M	SL40 ML40 M	SL20 ML20 M	- - -	- - -	

Operación	Acero				C.I.	Cobre				Ni	Al Mg	Plástico	
	I	II	II	IV		V	VI	VII	VIII			IX	X
Brochado severo	SL20 S ML40	SL40 S ML40	SL40 S ML40	SL40 S ML40	10:1E ML40 M	15:1E ML10 M	15:1E ML20 M	10:1E ML40 M	SL40 S ML40	ML20 10:1E K	- - -	- - -	
Brochado basto	SL10 S 15:1E	SL10 S 15:1E	SL20 S 10:1E	SL20 S 10:1E	10:1E ML40 M	15:1E ML10 M	15:1E ML20 M	10:1E ML40 M	SL40 S ML40	ML40 10:1E K	20:1E M Seco	10:1E M Seco	
Brochado fino	ML20 S M	SL10 ML20 S	SL20 ML40 S	SL20 ML40 S	10:1E M Seco	15:1E ML10 M	15:1E ML10 M	10:1E ML40 S	SL20 ML40 S	ML20 K Seco	20:1E M Seco	10:1E M Seco	
Roscado	S ML40 M	SL10 S ML20	SL20 S ML40	SL40 S ML40	10:1E Seco M	15:1E M ML20	10:1E M ML20	10:1E ML40 M	SL20 ML40 S	SL20 S ML40	20:1E K Aire	20:1E K Aire	
Roscado en máquinas automáticas	SL10 S ML20	SL10 S ML20	SL20 S ML40	SL40 S ML40	10:1E Seco M	15:1E ML20 M	10:1E ML40 M	10:1E ML40 M	SL10 S 10:1E	ML20 K M	30:1E K Aire	20:1E K Aire	
Tallado de engranajes por corte	SL10 S ML20	SL10 S ML40	SL20 S ML40	SL40 S ML40	10:1E Seco -	ML10 M Seco	ML10 M Seco	S ML20 M	SL40 S ML40	10:1E K Seco	30:1E Seco Aire	20:1E Seco Aire	
Tallado de engranajes por cepillado	S ML40 M	S ML40 M	SL20 S ML40	SL40 S ML40	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	
Escariado	15:1E S ML10	10:1E S ML20	10:1E SL20 ML40	10:1E SL40 ML40	20:1E ML20 M	15:1E M Seco	15:1E ML10 M	10:1E ML40 M	10:1E SL40 ML40	ML10 K M	20:1E Seco Aire	15:1E Seco Aire	
Taladrado	20:1E M10 M	15:1E ML10 M	10:1E ML20 M	10:1E S ML20	20:1E Seco M	15:1E M ML10	15:1E M ML10	10:1E ML20 M	ML20 S 10:1E	30:1E SL20 K	30:1E Seco Aire	15:1E Seco Aire	
Fresado	20:1E S ML10	15:1E S ML10	10:1E S ML20	10:1E S ML40	20:1E Seco M	15:1E M ML20	15:1E M ML20	10:1E M ML20	10:1E S ML40	30:1E Seco K	30:1E Seco Aire	Seco 30:1E Aire	
Mandrinado	20:1E S ML10	15:1E S ML10	10:1E SL10 S	10:1E SL20 S	20:1E M Seco	15:1E ML10 M	15:1E ML10 M	10:1E ML20 M	10:1E S ML10	30:1E K Seco	20:1E Aire Seco	20:1E Aire Seco	
Cepillado y planeado	30:1E S ML10	30:1E S ML10	30:1E S ML10	20:1E SL10 S	20:1E Seco M	15:1E ML10 M	15:1E ML10 M	10:1E ML20 M	10:1E S ML40	30:1E K Seco	30:1E Seco	Seco 30:1E	
Torneado	30:1E ML10 S	30:1E SL10 ML20	30:1E SL20 ML40	30:1E SL40 S	20:1E Seco	15:1E ML10 M	15:1E ML20 M	15:1E ML40 M	10:1E SL20 S	30:1E K Seco	30:1E Seco	Seco 30:1e	
Corte por sierra	30:1E 10:1E M	30:1E 10:1E M	20:1E 10:1E S	10:1E S M	20:1E Seco M	20:1E M Seco	20:1E M Seco	20:1E M Seco	10:1E S M	30:1E K M	30:1E M Seco	20:1E M Seco	
Rectificado de superficies planas	50:1E M Seco	50:1E M Seco	50:1E M Seco	30:1E ML10 Seco	30:1E M Seco	50:1E M Seco	50:1E M Seco	50:1E M Seco	SL20 30:1E M	SL20 ML20 M	70:1E M Aire	70:1E M Aire	
Rectificado de superficies curvas	SL10 ML10 M	SL10 ML10 M	SL20 ML20 M	SL40 ML40 M	ML10 M Seco	SL10 ML10 M	SL10 ML10 M	SL20 ML40 M	SL40 ML40 M	SL20 ML20 M	- - -	- - -	