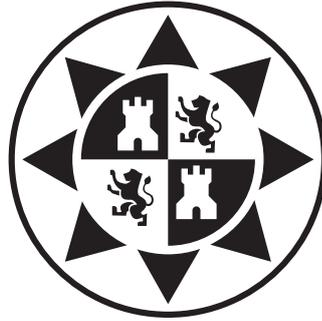


**Universidad Politécnica de Cartagena**

**E.T.S. Ingeniería Industrial**

**Departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación**



**Texto-Guía para la asignatura Ingeniería de los Sistemas de Producción  
3er Curso de la Titulación de Grado en Ingeniería Química**

# **Ingeniería de los Sistemas de Producción**

**MANUEL ESTREMS**

**Cartagena, 2011**



# Capítulo 1

---

## Índice general

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Índice general</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2. Introducción a los Sistemas de Producción</b>                    | <b>7</b>  |
| 2.1. Aproximación a la Ingeniería de los Sistemas de Producción . . .  | 7         |
| 2.2. Morfología de los procesos de fabricación . . . . .               | 8         |
| 2.3. Estructura básica . . . . .                                       | 8         |
| 2.3.1. Procesos básicos . . . . .                                      | 9         |
| 2.3.2. Categoría del proceso . . . . .                                 | 10        |
| 2.4. Flujo de material . . . . .                                       | 10        |
| 2.4.1. Estado del material . . . . .                                   | 10        |
| 2.4.2. Tipo de flujo . . . . .   | 10        |
| 2.5. Flujo de energía . . . . .  | 11        |
| 2.5.1. Flujo de energía en procesos básicos mecánicos . . . . .        | 11        |
| 2.5.2. Flujo de energía en procesos básicos térmicos . . . . .         | 12        |
| 2.5.3. Flujo de energía en procesos básicos químicos . . . . .         | 13        |
| 2.6. Flujo de información . . . . .                                    | 13        |
| 2.7. Tipos de sistemas avanzados de fabricación . . . . .              | 14        |
| <b>3. Metrología dimensional</b>                                       | <b>17</b> |
| 3.1. Introducción . . . . .  | 17        |
| 3.2. Plan de Calibración . . . . .                                     | 17        |
| 3.2.1. Definiciones . . . . .  | 18        |
| 3.3. Cualidades de un instrumento de medida . . . . .                  | 19        |
| 3.4. Relación entre tolerancia, incertidumbre y división de escala . . | 20        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 3.5.      | Errores en la medición . . . . .                           | 21        |
| 3.6.      | Medidas indirectas . . . . .                               | 23        |
| 3.6.1.    | Ley de propagación de varianzas . . . . .                  | 23        |
| 3.6.2.    | Calibración de un instrumento de medida . . . . .          | 23        |
| 3.6.3.    | Métodos de medida indirecta más usuales . . . . .          | 25        |
| 3.7.      | Rugosidad superficial . . . . .                            | 27        |
| 3.8.      | Problemas de metrología . . . . .                          | 28        |
| <b>4.</b> | <b>Fundamentos de los procesos de arranque de material</b> | <b>31</b> |
| 4.1.      | Introducción . . . . .                                     | 31        |
| 4.2.      | Generación de superficies . . . . .                        | 32        |
| 4.3.      | Formación de viruta . . . . .                              | 33        |
| 4.4.      | Geometría de corte . . . . .                               | 35        |
| 4.4.1.    | Influencia de los ángulos de corte en el funcionamiento    | 39        |
| 4.5.      | Fuerzas de corte . . . . .                                 | 39        |
| 4.5.1.    | Energía específica de corte . . . . .                      | 40        |
| 4.5.2.    | Fuerzas de fricción . . . . .                              | 41        |
| 4.6.      | Temperaturas de corte . . . . .                            | 42        |
| 4.7.      | Desgaste de herramientas . . . . .                         | 43        |
| 4.8.      | Materiales de herramienta . . . . .                        | 44        |
| 4.9.      | Maquinabilidad de materiales . . . . .                     | 45        |
| 4.10.     | Fluidos de corte . . . . .                                 | 45        |
| 4.11.     | Rugosidad superficial . . . . .                            | 46        |
| 4.12.     | Problemas de mecanizado . . . . .                          | 47        |
| 4.13.     | Cuestiones de examen . . . . .                             | 52        |
| <b>5.</b> | <b>Procesos de mecanizado convencional</b>                 | <b>55</b> |
| 5.1.      | Torneado . . . . .   | 55        |
| 5.2.      | Limado . . . . .   | 55        |
| 5.3.      | Cepillado . . . . .  | 55        |
| 5.4.      | Taladrado . . . . .  | 56        |
| 5.5.      | Fresado . . . . .  | 56        |
| 5.5.1.    | Fresado periférico . . . . .                               | 56        |
| 5.5.2.    | Fresado frontal . . . . .                                  | 56        |
| 5.6.      | Rectificado . . . . .                                      | 56        |
| <b>6.</b> | <b>Procesos de Mecanizado No Convencional</b>              | <b>59</b> |
| 6.1.      | Mecanizado por electroerosión . . . . .                    | 59        |
| 6.2.      | Mecanizado ultrasónico . . . . .                           | 60        |
| 6.3.      | Corte por chorro de agua . . . . .                         | 60        |
| 6.4.      | Mecanizado electroquímico . . . . .                        | 60        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>7. Procesos de conformado por deformación plástica</b>      | <b>63</b> |
| 7.1. Introducción . . . . .                                    | 63        |
| 7.2. Deformación permanente en metales . . . . .               | 63        |
| 7.3. Curva del ensayo de tracción . . . . .                    | 65        |
| 7.3.1. Modelización del material . . . . .                     | 66        |
| 7.3.2. Punto de inestabilidad . . . . .                        | 67        |
| 7.4. Trabajo de deformación . . . . .                          | 67        |
| 7.5. Laminación de chapa metálica . . . . .                    | 67        |
| 7.6. Tecnologías de transformación de chapa metálica . . . . . | 68        |
| 7.7. Problemas de deformación plástica . . . . .               | 69        |
| <br>   |           |
| <b>8. Proceso de conformado por fundición</b>                  | <b>73</b> |
| 8.1. Introducción . . . . .                                    | 73        |
| 8.2. Metal fundido . . . . .                                   | 74        |
| 8.3. Tecnologías de moldeo . . . . .                           | 76        |
| 8.4. Colada . . . . .  | 76        |
| 8.5. Solidificación . . . . .                                  | 76        |
| 8.6. Problemas de Fundición . . . . .                          | 77        |



## Capítulo 2

---

# Introducción a los Sistemas de Producción

### 2.1. Aproximación a la Ingeniería de los Sistemas de Producción

Uno de los hechos que ha diferenciado al hombre desde la Prehistoria, ha sido la capacidad de procesar o transformar los materiales que la naturaleza ha puesto a su disposición, para la elaboración de herramientas y útiles que le ayudaran a realizar ciertas funciones que no podría llevar a cabo directamente con su esfuerzo físico, o le resultaban pesadas o costosas. Aunque en el mundo animal hay ejemplos, éstos son escasos y muy pobre comparados con los del mundo hominal. De hecho una de las pruebas más contundentes para distinguir los artefactos del homo sapiens es la aparición de esculturas, pinturas, instrumentos musicales, etc. con restos de hace más de 40.000 años, lo que indica un cierto nivel de abstracción necesario para aplicar modelos de procesos de fabricación a distintos materiales y fuentes de energía.

Esta actividad del hombre de realizar útiles, máquinas, etc., recurriendo a su ingenio e inteligencia, tratando de cubrir las necesidades (primarias y secundarias) de los individuos o de la comunidad, así como las actividades propias de su naturaleza trascendente como el culto religioso y el sentido musical y estético más refinado, lleva consigo la utilización de una gran cantidad de recursos tanto humanos como materiales. De la conjunción de estos recursos dependerá la realización del producto final, actividad que pasa por tres fases:

- Fase de información, en la cual se lleva a cabo la adquisición de los conocimientos para la ejecución de los mismos, mediante un trabajo de investigación.
- Fase de diseño, que consiste en la concepción del producto de acuerdo con los requerimientos exigidos.
- Fase de fabricación, en que se efectúa la transformación de los materiales hasta obtener el producto terminado.

En esta tercera fase se inserta la Ingeniería de los Sistemas de Producción, pero sin olvidar aquellos aspectos de las fases iniciales que en cierta forma tienen repercusión sobre la misma.

Se ha de tener en cuenta también la mejora de la eficiencia en la actividad productiva que siempre se ha buscado a lo largo de toda la historia. Un ambiente competitivo, sea en lo militar o en lo económico, ha hecho de la búsqueda continua de mejorar la calidad y la productividad uno de los motores del progreso de la humanidad.

Una posible definición de Ingeniería de Fabricación podría ser la siguiente: **conjunto de conocimientos referentes a procesos de conformación de los materiales; a las máquinas, útiles, instrumentos y sistemas de fabricación utilizados; y a los controles y verificaciones necesarias para asegurar piezas y productos acordes con las normas y especificaciones establecidas, bajo criterios económicos y de rentabilidad.**

## 2.2. Morfología de los procesos de fabricación

Hay mucha variedad de procesos de fabricación debido a la experiencia de siglos que se ha traducido en múltiples formas disponibles para transformar y conformar los materiales.

Para seleccionar la mejor secuencia en la ruta de fabricación se necesita tener un amplio y fundamental conocimiento de los procesos de fabricación con sus posibilidades y limitaciones.

El objetivo de este tema es ofrecer una visión coherente y global de la estructura en la que todos los procesos están basados.

## 2.3. Estructura básica

El proceso se puede definir como el cambio en las propiedades de un objeto. Para ello interactúan el material con su información determinada, y la energía aplicada.

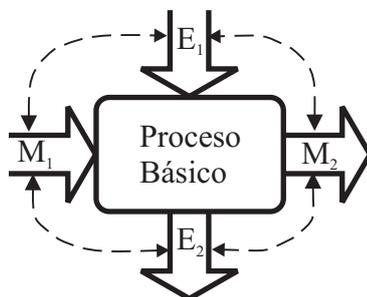


Figura 2.1: Esquema básico de un proceso de fabricación.

Todo objeto material tiene materia y forma, que son los principios constitutivos del ente en la teoría hilemórfica de la filosofía clásica. En nuestro caso a la forma es información sobre el objeto, como propiedades geométricas, físicas, características de funcionamiento, etc.

En la figura 2.1 viene representado un esquema en el que se puede observar la forma en que interactúan los distintos elementos.

El material  $M_1$  tiene una información determinada, entre la que se incluye si está dividido o está todo en un solo bloque. Durante el proceso se le aplica una energía para transformarlo en  $M_2$  en donde parte de esta energía se pierde, y parte del material también puede perderse en forma de desecho  $M_d$ . Además de la información en el material de salida, también hay una información de control que en función de datos recogidos en el material de entrada y salida, en la energía aportada y desechada. Esta información de control es utilizada para variar los parámetros del proceso con el fin de optimizar variables de coste, calidad y productividad.

### 2.3.1. Procesos básicos

Para obtener un componente, el material de entrada suele sufrir varias transformaciones. Cada una de estas unidades simples de transformación se le denomina proceso básico. De todos los procesos básicos de una cadena de transformación, hay uno que es el principal, el más crítico para los fines de la transformación. A este proceso se le llama proceso básico primario, el resto de procesos básicos son secundarios, y su objetivo es preparar el material para el proceso básico primario, o dar un acabado a la pieza después del proceso básico primario.

### 2.3.2. Categoría del proceso

Los procesos básicos se pueden distinguir tres categorías: mecánicos, térmicos y químicos. Según el tipo de transformación ocurrido en el material. La siguiente Tabla presenta los procesos básicos más frecuentes en cada una de estas categorías:

| MECÁNICOS            | TÉRMICOS       | QUÍMICOS                  |
|----------------------|----------------|---------------------------|
| Deformación plástica | Fundición      | Solución/disolución       |
| Fractura frágil      | Solidificación | Combustión                |
| Fractura dúctil      | Condensación   | Endurecimiento            |
| Flujo                | Calentamiento  | Precipitación             |
| Deformación elástica | Enfriamiento   | Transformación de fase    |
| Mezcla               | Evaporación    | Deposición electroquímica |
| Colocación           | ...            | Difusión                  |
| Transporte           |                | ...                       |
| ...                  |                |                           |

## 2.4. Flujo de material

### 2.4.1. Estado del material

Los procesos básicos se pueden clasificar según el estado del material:

- Sólido
- Granular
- Líquido
- Semisólido

### 2.4.2. Tipo de flujo

Según el tipo de flujo, los procesos se pueden clasificar en:

- Flujo directos: La masa del objeto de entrada en el proceso es la misma que la del objeto de salida. También se llaman flujos de conservación de masa.
- Flujo divergente: La masa del objeto de entrada se divide en dos objetos, uno de los cuales puede ser el producto de desecho. También se denominan procesos de reducción de masa.

- Flujo convergente: El proceso une dos objetos diferentes para formar uno sólo a la salida. También se conocen como procesos de unión.

Esta clasificación ha servido para ordenar los temas de esta asignatura.

## 2.5. Flujo de energía

Para el análisis del flujo de energía en los procesos de fabricación se van a estudiar por separado el flujo según las distintas categorías, y las distintas fuentes de energía utilizadas para cada tipo de procesos.

La primera distinción que se puede aplicar es que la energía se puede aplicar de modo directo o indirecto, en este último caso hay un medio de transferencia que es el que actúa realmente sobre la pieza, y que sirve de enlace entre la fuente de energía y la pieza correspondiente.

### 2.5.1. Flujo de energía en procesos básicos mecánicos

En este tipo de procesos la energía se suministra mediante:

- Movimiento relativo entre medio de transferencia sólido y el material de trabajo.
- Diferencia de presiones a través de la pieza
- Fuerzas de masa generadas en la pieza.

Para producir un efecto mecánico se pueden utilizar distintos tipos de energía. Las fuentes de energía suelen ser mecánica, la eléctrica, y la química, y térmicas:

Fuente de energía mecánica para Procesos Básicos (PB) mecánicos

- Energía de masa (cinética y potencial): Levantamiento de peso, compresión de un muelle.
- Presión en un medio: Colada centrífuga, onda de choque.
- Vacío: Colada por succión.

Fuente de energía eléctrica para PB mecánicos

- Descarga entre electrodos: onda de choque en medio fluido
- Campos electromagnéticos: inducción en conformado de tubos

- Efecto magnetoestrictivo: maquinado ultrasónico
- Efecto piezoeléctrico: maquinado ultrasónico

Fuente de energía química para PB mecánicos:

- Explosivos
- Detonación
- Deflagración en pistón. Esta sería una fuente indirecta de energía.

Fuente de energía térmica para PB mecánicos: Aprovecha la dilatación o contracción de materiales con la temperatura para producir esfuerzos mecánicos. Es muy frecuente usarlo la dilatación de gases como en la máquina de vapor.

### 2.5.2. Flujo de energía en procesos básicos térmicos

La temperatura del material se puede elevar aportando la energía directamente al material o a través de un medio de transferencia. En este segundo caso, según el estado del medio de transferencia, la transmisión de calor recibe distintos nombres:

- Sólido: Conducción.
- Líquido o gaseoso: Convección.
- Vacío: Radiación.

Fuentes de calor de origen mecánico: Son los que proceden de la fricción entre superficies, principalmente.

Fuentes de calor de origen eléctrico:

- Conducción eléctrica: resistencia eléctrica
- Inducción electromagnética: Corrientes parásitas.
- Descarga eléctrica: arco o chispa
- Calentamiento dieléctrico. Para deformar maderas y plásticos
- Haz de electrones.
- LASER.
- Antorcha de plasma.

Fuentes de calor basadas en la energía química: Se basan en reacciones exotérmicas, como la combustión de hidrocarburos, aluminotermia, ...

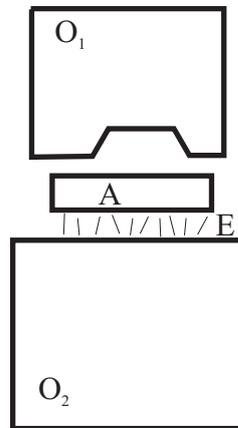


Figura 2.2: Elementos en la impresión de información.

### 2.5.3. Flujo de energía en procesos básicos químicos

Este tipo de procesos requiere un estudio profundo de las condiciones energéticas de las reacciones químicas involucradas en el proceso.

## 2.6. Flujo de información

El término *flujo de información* cubre la impresión de forma geométrica en el material de trabajo. En la figura 2 se definen los elementos que intervienen: la pieza de trabajo  $A$ , los elementos de transferencia  $O_1$  y  $O_2$ , y el mecanismo de impresión e información  $E$ . En muchos casos uno de los elementos de transferencia no transmite información geométrica cumpliendo únicamente con la función de amarrar la pieza, mientras que el otro medio pasa a ser la Herramienta que sí transforma la geometría.

Habitualmente la geometría final de la pieza se genera a partir de la geometría de la herramienta y del patrón de movimientos entre la herramienta y la pieza.

Los principios básicos de creación de superficies se definen según la cantidad de información final de la pieza que posee la herramienta. De este modo se definen cuatro posibilidades:

- *Conformación libre*: La herramienta  $O_1$  no contiene información geométrica alguna de la pieza final. La geometría final se alcanza mediante principios internos de comportamiento de la pieza. Ej.: Torsión.
- *Conformado bidimensional*: El elemento de transferencia contiene un punto o un elemento de superficie de la geometría final deseada. La

integración de todos los elementos generados dará lugar a la geometría final. Como es lógico, para generar una superficie bidimensional se requieren al menos dos movimientos relativos entre la herramienta y la pieza. Ej.: Torneado.

- *Conformado unidimensional*: El medio de transferencia contiene una generatriz de la superficie final. Esta generatriz puede ser una línea o una superficie a lo largo de una línea. Para generar la superficie sólo se requiere un movimiento relativo entre la herramienta y la pieza. Ej.: Extrusión.
- *Conformación total*: El medio de transferencia contiene toda la información geométrica de la superficie final, lo que significa que no se necesita ningún movimiento relativo. Ej.: Colada.

El conocimiento de estos principios es muy útil para idear nuevos procesos, o encontrar el proceso más eficiente para generar una superficie determinada.

## 2.7. Tipos de sistemas avanzados de fabricación

La eficiencia de un proceso productivo está basada en satisfacer al cliente en calidad, precio y plazo. Estos tres parámetros están fuertemente relacionadas con variables de los procesos que la Ingeniería de Sistemas de Producción tratará de optimizar.

Por un lado la calidad se mide en por la perfección con la que se alcanzan las especificaciones reduciendo las variabilidades del producto mediante un proceso de mejora continua, a través del estudio y control de detalle de los flujos de material, energía e información. Para esto es muy útil lo estudiado en la sección anterior aplicando las leyes de la física con el fin de obtener productos cada vez más perfectos y, por lo tanto, de mayor valor añadido.

El precio lo impone el mercado, pero de éste depende el beneficio y rentabilidad de la fabricación ya que el beneficio es igual al precio de venta menos el coste, y éste último depende en gran medida del coste de fabricación.

Y el plazo lo limita la productividad del proceso, es decir, la cantidad de piezas por unidad de tiempo que se pueden producir. El coste depende fuertemente de la productividad ya que la amortización de las máquinas -que es una fracción importante del coste- exige una alta productividad.

Para incrementar la calidad y la productividad y reducir el coste se suelen acometer dos caminos: Introducir sistemas de producción más eficientes, e incrementar la automatización.

Los sistemas de fabricación actualmente existentes se suelen clasificar en tres tipos:

- Producción en masa.

El sistema de producción está organizado para productos muy específicos, reduciendo al máximo los tiempos de transporte entre máquinas, y automatizando todo lo que sea posible. En este sistema de producción se consiguen productos de bajo coste a base de obtener gran cantidad de productos que se coloquen fácilmente en el mercado. La automatización es fija. El layout de la fabrica es en línea según la secuencia de operaciones. Con este sistema de producción se fabrican los componentes mecánicos normalizados (tornillos, válvulas, etc.).

- Producción flexible

En este sistema de producción, los componentes de un producto se dividen por familias de piezas, y cada familia la realiza una célula de fabricación. Este sistema distribuye la responsabilidad en la calidad, con lo que se consiguen altas calidades, y productividades. La automatización de las células es más sencilla que la automatización total de la fábrica, al ser programable por ordenador. Las fabricas de coches y otros muchos productos de uso cotidiano siguen este sistema de fabricación que permite más variedad de producto que la producción en masa.

- Producción individualizada

En los talleres de trabajos variados en donde se hacen productos muy variados la máquinas están distribuidas en planta según el tipo de operaciones que realizan, con lo que el layout es departamental o funcional.

La evolución en los sistemas de fabricación depende del grado de automatización y su fiabilidad. Ya que ésta permite mayor productividad de productos cada vez más adaptados a las necesidades de cada usuario particular.



## Capítulo 3

---

# Metrología dimensional

### 3.1. Introducción

El objetivo del tema es un mejor manejo de la información de control geométrico de los procesos mediante la medición. De los procesos de medición:

- Depende la capacidad de hacer ajustes.
- Posibilita la división del trabajo, y la deslocalización de la fabricación.
- Cumplir especificaciones de producto, y la mejora continua de la Calidad.
- Incrementar la productividad. Se evitan retrabajos y operaciones de ensamblaje erróneas

Este tema ocupa el primer lugar del temario por su carácter de finalidad dentro de la «Ingeniería de Fabricación» pues se fabrica para satisfacer al cliente en calidad, precio y plazo.

### 3.2. Plan de Calibración

La información geométrica de una pieza viene dada por una serie de datos numéricos ordenados. Para que la pieza cumpla bien su función se requiere que todas las dimensiones tengan un rango de valores fuera de los cuales no se puede asegurar que la pieza cumpla su misión. Este rango se le suele denominar tolerancia de diseño.

Cuando se fabrica una pieza, antes de ponerla en servicio o de venderla se procede a la medición de cotas para comprobar que las dimensiones están dentro de las tolerancias permitidas en el diseño. Esta comprobación se realiza mediante un «instrumento de medida».

El instrumento de medida debe estar calibrado de forma adecuada para que la medida sea correcta. Si el proveedor y el cliente han quedado en unas dimensiones concretas, ambos hablarán el mismo lenguaje y sus medidas deben ser equivalentes. El punto de referencia común es el patrón mediante el cual se han calibrado sus respectivos instrumentos de medida.

### 3.2.1. Definiciones

*Patrones:* Son aquellos objetos o instrumentos que permiten materializar y reproducir las unidades de medida o los múltiplos y submúltiplos de ellas.

*Trazabilidad metrológica:* La propiedad del resultado de una medición o de un patrón por la que se puede relacionar con referencias determinadas, generalmente a patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas las incertidumbres determinadas.

*Diseminación de unidades:* Proceso que, en sucesivos escalones, tiene por objeto facilitar a empresas y organismos a partir de patrones primarios u otros aceptados como tales, patrones de nivel de precisión inferior.

Mediante un plan de calibración adecuado se puede tener controlado el grado de precisión de un instrumento.

Esta cadena incluye los siguientes patrones:

- Patrón Nacional. Es el patrón primario por encima del cual no hay ninguno.
- Patrón Nacional de referencia. Se usa para preservar el primario de posibles contingencias.
- Patrones de Calibración. Realizan la diseminación y abastecen a distintos sectores
- Patrones de Transferencia. Son móviles y establecen el enlace con los laboratorios locales.
- Patrones de Calibración de Laboratorio. Abastecen a una zona.
- Patrones Industriales. Cada taller tiene los suyos. Con ellos se calibran los instrumentos que realizan directamente la medida.

### 3.3. Cualidades de un instrumento de medida

A continuación se expone un extracto del vocabulario usado en metrología, relativo al instrumento de medida:

*Campo de medida:* Intervalo de valores que puede tomar la magnitud a medir con un instrumento de manera que el error de medida, operando dentro de las condiciones de empleo, sea inferior al máximo especificado para el instrumento. Un aparato puede tener varios campos de medida.

*Alcance:* Valor máximo del campo de medida.

*Escala:* Conjunto ordenado de signos en el dispositivo indicador que representan valores de la magnitud medida.

*División de escala:* Intervalo entre dos valores sucesivos de la escala. Hay instrumentos de división constante y de división variable

*Sensibilidad:* Se expresa por el cociente entre el incremento observado de la variable (en el lugar de apreciación) y el incremento correspondiente de la magnitud medida. Está relacionado con el sistema de amplificación usado para apreciar las diferencias de magnitud.

*Precisión:* Cualidad que caracteriza la aptitud de un instrumento para dar indicaciones próximas al valor verdadero de la magnitud medida, teniendo en cuenta tanto los errores sistemáticos como los aleatorios.

*Incertidumbre:* Ha sido práctica usual llamar precisión a la expresión cualitativa de los errores de medida. La tendencia moderna es emplear incertidumbre para la expresión cuantitativa.

*Repetitibilidad:* Grado de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas de la misma magnitud, obtenidos con el mismo método, por el mismo observador, con los mismos instrumentos de medida, en el mismo laboratorio y a intervalos de tiempo suficientemente cortos.

*Reproducibilidad:* Grado de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas de la misma magnitud y con el mismo método, pero en condiciones diferentes; por ejemplo, con diferentes instrumentos de medida, por diferentes observadores, en diferentes laboratorios, a intervalos de tiempo suficientemente grandes comparados con la duración de una medición, en diferentes condiciones de empleo de los instrumentos de medida, etc.

*Dispersión:* Grado de separación o diseminación que presentan las observaciones o medidas de una serie. Normalmente se estima en por el valor máximo absoluto de las desviaciones de dicha serie.

*Reversibilidad:* Diferencia de indicaciones de un instrumento de medida cuando se mide el mismo valor de la magnitud, bien creciendo o bien decreciendo ésta.

*Fiabilidad:* Facultad de un elemento, servicio o proceso para realizar una función requerida bajo condiciones establecidas.

*Sesgo o exactitud:* Proximidad del valor medio estimado por un instrumento tras una serie de medidas, al valor verdadero o preestablecido, realizadas sobre el mismo patrón, por el mismo operador y en el mismo lugar

Ejemplo de cálculo: Un instrumento para medida de longitudes entre 25 y 50 mm, tiene una escala en la que cada trazo representa 0.01 mm y se encuentra dibujado a una distancia de 2 mm del trazo contiguo. Se toman 20 medidas sobre un bloque patrón de 30 mm y se obtiene un valor medio de 30.03 mm.

Campo de medida =  $50 - 25 = 25$  mm Alcance = 50 mm División de escala = 0.01 mm Sensibilidad =  $2/0.01 = 200$  Sesgo: 0.03 mm

Todos los instrumentos de medida deben estar sometidos a un plan de calibración, que garantice la trazabilidad de sus medidas.

En un laboratorio de metrología debe haber un diagrama de niveles en el que estén incluidos todos sus instrumentos de medida. En este diagrama habría un nivel de referencia en el que estarían los instrumentos calibrados en laboratorios externos y son lo que calibran a algunos instrumentos de niveles inferiores. Todos los instrumentos del laboratorio deben ser trazables con ese nivel de referencia. Los instrumentos del último nivel son aquellos que son calibrados pero que no calibran ningún otro instrumento.

Todos los instrumentos deben poseer:

- Posición dentro del diagrama de niveles
- Fichero de instrucciones
- Archivo de datos. Histórico de todas sus calibraciones
- Etiquetas de calibración
- Carta de trazabilidad.

### 3.4. Relación entre tolerancia, incertidumbre y división de escala

En el control de una cota con su tolerancia, se ha de utilizar un instrumento capaz de comprobarla. Como no hay instrumento absolutamente preciso, se establece un intervalo de control para determinar si una pieza cumple la especificación. El ancho de este intervalo suele ser la tolerancia de diseño menos dos veces la incertidumbre de la medición, según la figura 3.1

Se recomienda que la relación entre la tolerancia de diseño y la incertidumbre del instrumento de medida con el que se compruebe guarde cierta relación:

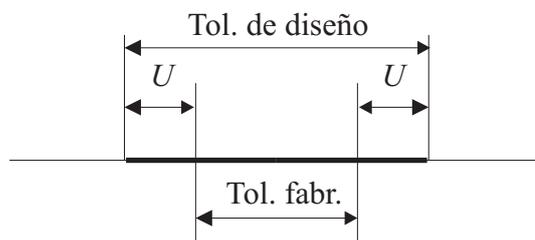


Figura 3.1: Tolerancia de fabricación

$$3 < \frac{T}{2U} < 10 \quad (3.1)$$

Razones técnicas por la derecha ya que se correría un alto riesgo de rechazar piezas válidas. Razones económicas por la izquierda, ya que el coste del instrumento de medida crece exponencialmente con la precisión del mismo. Este criterio también sirve al diseñador que debe establecer cotas e índices de calidad que sean realmente comprobables.

Por otra parte la división de escala del instrumento de medida debe guardar cierta relación con la división de escala del mismo:

Si  $\frac{U}{E} < 0,5$  Medida sencilla, muy repetitiva en la que es imposible tomar una medida fuera distinta de la dimensión real de la pieza.

Si  $1 \leq \frac{U}{E} < 8$  Medida de precisión. Se requiere tomar varias medidas, ya que se puede tener información de la medida real a partir de los distintos valores tomados.

Si  $\frac{U}{E} > 10$  División de escala muy desarrollada. A la medida tomada le sobra al menos un dígito.

### 3.5. Errores en la medición

Una medición no indica la magnitud exacta de una dimensión debido a imprecisiones tanto en la pieza a medir como en el instrumento de medida.

Sobre la precisión de fabricación de componentes mecánicos se suelen aplicar los principios de Causalidad y de Imperfección. El primero establece que todo error tiene una causa y que las mismas causas producen los mismos errores. Si las causas son conocidas, éstas producen una desviación que es por lo tanto corregible, por lo tanto, para eliminar los errores dimensionales o geométricos en procesos de mecanizado se necesita avanzar en el conocimiento (si es posible cuantitativo) de los factores que influyen en el proceso y las causas que han podido dar lugar a estos errores. El Principio de Imperfección establece que ningún fenómeno o sistema es totalmente perfecto ni

perfectamente conocido. Esto se traduce que siempre se podrá mejorar en los métodos de resolución de problemas de precisión en procesos de mecanizado con el fin de obtener mejores prestaciones de los componentes fabricados. Los errores corregibles se denominan errores sistemáticos o sesgos, el resto de errores son los aleatorios, sobre los cuales no se pueden tener ningún control.

Por un lado, la dimensión a comprobar en la medición no es entre dos puntos, sino entre dos planos, dos líneas, ... los cuales implican un error geométrico. De aquí que las medidas entre puntos de esas dos entidades sean entre puntos cuya distancia es una variable aleatoria con una distribución estadística desconocida con una media y una varianza.

Por otro lado se han de añadir los errores propios del instrumento de medida el cual habrá sido previamente sometido a un proceso de calibración que proporciona su exactitud y su incertidumbre global.

Estudiando conjuntamente los dos errores y suponiendo que las medidas siguen una distribución normal  $N(\mu, \sigma)$ , si se toman  $n$  medidas un estimador del valor real  $\mu$  y su desviación típica  $\sigma$  será:

$$\begin{aligned}\mu &\approx \bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \\ \sigma^2 &\approx s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}\end{aligned}\tag{3.2}$$

Como es lógico  $\bar{x}$  también será una distribución estadística normal  $N(\mu, \frac{\sigma}{\sqrt{n}})$ , pero lo que interesa saber es la información que  $\bar{x}$  nos ofrece sobre el valor real de la dimensión  $\mu$ . Para ello existe una distribución  $t$ -Student para determinar un intervalo de valores (intervalo de seguridad) entre los que se encuentra el valor real  $\mu$  con una probabilidad  $1 - \alpha$  (nivel de confianza). Así queda:

$$P_r \left( \bar{x} - t \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t \frac{s}{\sqrt{n}} \right) = 1 - \alpha\tag{3.3}$$

El valor de  $t$  se puede obtener mediante tablas en función de los grados de libertad  $n - 1$  y el nivel de confianza  $1 - \alpha$ .

Esta sería la forma de obtener la incertidumbre de una medición para un determinado nivel de confianza. Sin embargo, la distribución no suele ser Normal, y el valor medio del muestreo tampoco es una Normal alrededor del valor real, pues el instrumento de medida tiene en sí un sesgo. Los sistemas de medición industriales han establecido otros procedimientos para determinar las incertidumbres de las medidas.

## 3.6. Medidas indirectas

Para estimar el valor real de una medida en relación al patrón internacional correspondiente, se tiene que los errores de comparación se van propagando en cada una de las calibraciones. Lo que interesa al medidor es garantizar que el valor real está en un intervalo de seguridad (dado por el valor medio y la incertidumbre) con un nivel de confianza adecuado (dado por el factor de cobertura  $K$  de la incertidumbre).

### 3.6.1. Ley de propagación de varianzas

Cuando una variable aleatoria  $y$  depende de otras variables aleatorias  $x_i$  independientes unas de otras, suponiendo que todas siguen una ley de distribución Normal, se puede estimar la varianza de  $y$  determinando la media cuadrática de los errores debidos a cada una de las variables  $x_i$ :

$$u_y^2 = \left( \frac{\partial y}{\partial x_1} \right)_{\bar{x}_1}^2 u_{x_1}^2 + \cdots + \left( \frac{\partial y}{\partial x_n} \right)_{\bar{x}_n}^2 u_{x_n}^2 \quad (3.4)$$

Cuando alguna variable  $x_i$  es discreta (obtenida por muestreo) su varianza  $u_{x_i}$  se estimará por  $s_i$ , y  $\frac{\partial y}{\partial x_i}$  por  $\frac{1}{\sqrt{n_i}}$ .

Este es el medio más usual para obtener la incertidumbre de las medidas a partir de la propagación de errores en la cadena de calibración.

### 3.6.2. Calibración de un instrumento de medida

Calibrar un sistema medidor es hallar la desviación sistemática o corrección y la dispersión o incertidumbre del medidor al compararlo con un patrón de mayor precisión previamente calibrado.

En el proceso de calibración se realizan  $n_c$  medidas sobre un bloque patrón obteniendo un valor medio  $\bar{X}_c$  y un estimador de la desviación típica  $s_c$ .

El sesgo o error sistemático del instrumento  $\Delta X_c = X_0 - \bar{X}_c$ . Siendo  $X_0$  la medida nominal del bloque patrón.

La incertidumbre de la medida será calculada a partir de la incertidumbre asociada al bloque patrón  $U_0$  y aplicando la ley de propagación de varianzas:

$$\left( \frac{U}{K} \right)^2 = \left( \frac{U_0}{K_0} \right)^2 + s_c^2 \left( \frac{1}{n_c} + \frac{1}{n} \right) \quad (3.5)$$

Como se puede observar, la incertidumbre de la medida es mayor que la del patrón. Para obtener mayor precisión se requiere valores bajos de  $s_c$

y altos de  $n_c$ . Y cuanto mayor sea el número de medidas  $n$  menor será la incertidumbre.

Para simplificar el procedimiento se suele proceder a establecer la incertidumbre global del instrumento de medida para todo el campo de medida de éste. Para ello el sistema de calibración industrial (SCI) ha establecido el siguiente procedimiento:

1. Se escogen bloques patrón cuyas medidas van a representar el campo de medida del instrumento. Cada uno de estos bloques patrón tendrá una medida  $x_0$  y una varianza  $u_0$
2. Se establece el número de medidas calibradoras que se van a realizar sobre cada bloque patrón  $n_c$ .
3. Después de realizar las  $n_c$  medidas sobre cada bloque se obtienen valores medios  $\overline{x_{ci}}$  y las desviaciones típicas  $s_{ci}$  de las medidas realizadas.
4. Mediante un criterio de control (por ejemplo el de Chauvenet) se comprueban que las medidas realizadas pertenecen a la misma distribución estadística.
5. A partir de las desviaciones parciales en cada bloque patrón  $\Delta X_{ci} = X_0 - \overline{x_{ci}}$  se obtiene el sesgo global del instrumento  $\overline{\Delta X_c} = (\Sigma \Delta X_{ci})/n$
6. La incertidumbre local en la medida de cada bloque patrón será calculada a partir de la varianza. Es decir:

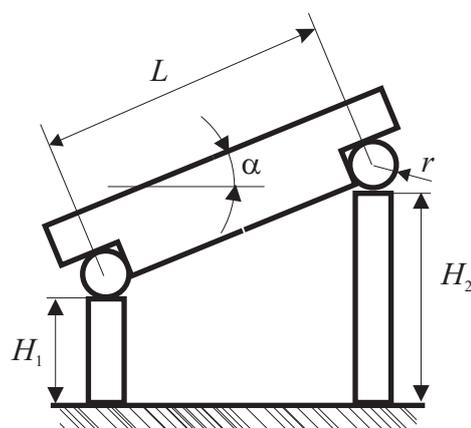
$$u_i^2 = u_0^2 + \frac{s_{ci}^2}{n_c} \quad (3.6)$$

$$U_i = K \cdot u_i \quad (3.7)$$

7. Para hallar la incertidumbre se calcula primero la desviación de la media en cada bloque patrón  $\delta_i = \overline{\Delta X_c} - \Delta X_{ci}$ . La incertidumbre global del instrumento será:

$$U^2 = \text{máx}\{\delta_i^2 + U_i^2\} \quad (3.8)$$

Las cualidades del instrumento en cuanto a la precisión quedarán representados por el sesgo  $\Delta X_c$  y la incertidumbre  $U$  indicando el factor de cobertura utilizado  $K$  entre paréntesis.

Figura 3.2: Regla de Senos para medir ángulo  $\alpha$ 

El criterio de Chauvenet, señalado en el punto 4 del procedimiento, consiste en rechazar las medidas (y por lo tanto volverlas a tomar) que se desvíen de la media más de una relación con el estimador de desviación típica. Ej.: Para una calibración realizada con  $n_c = 10$  una vez calculada la media  $\bar{x}_c$  y la desviación típica  $s_c$ , se rechazarán todos los valores  $x_i$  que cumplan  $|x_i - \bar{x}_c| > K_n s_c$  siendo  $K_n$  un valor tabulado que toma un valor de  $K_n = 1,96$  para  $n_c = 10$ .

### 3.6.3. Métodos de medida indirecta más usuales

Se exponen a continuación algunos métodos para la determinación de ángulos y radios de modo indirecto.

#### Regla de senos

$$\text{sen}\alpha = \frac{H_1 + d_1 - H_2 - d_2}{L} \quad (3.9)$$

#### Conicidad exterior

$$\text{tg}(\alpha/2) = \frac{M_1 - M_2}{2(L_1 + r_1 - L_2 - r_2)} \quad (3.10)$$

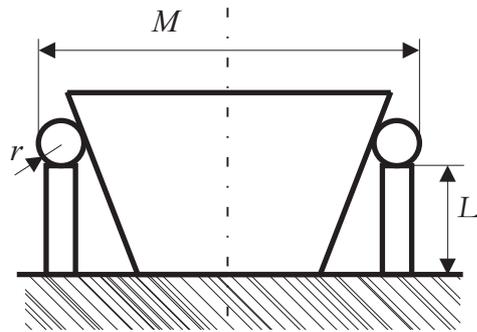


Figura 3.3: Método para medir conicidad exterior

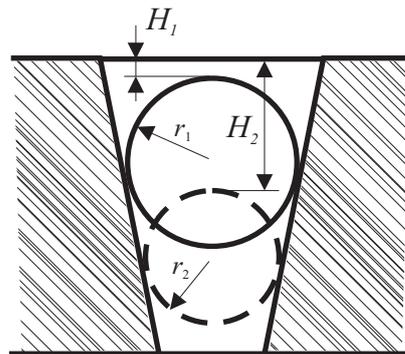


Figura 3.4: Método para medir conicidad interior

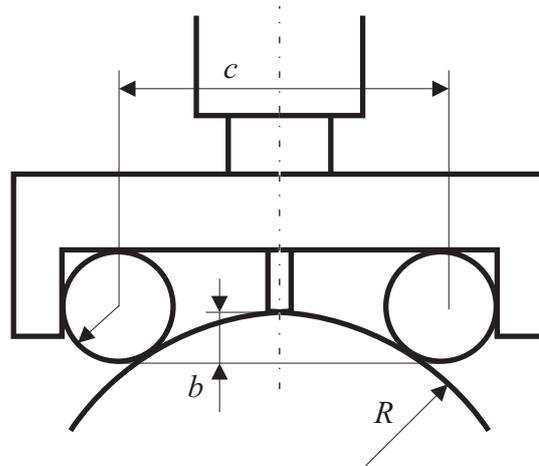


Figura 3.5: Funcionamiento de la sonda de rodillos fijos

### Conicidad interior

$$\operatorname{sen} \frac{\alpha}{2} = \frac{r_2 - r_1}{H_1 + r_1 - H_2 - r_2} \quad (3.11)$$

### Sonda de rodillos fijos

$$R = \frac{b^2 - 2rb + (c/2)^2}{b} \quad (3.12)$$

## 3.7. Rugosidad superficial

La rugosidad de una superficie se suele obtener mediante un rugosímetro que explora dicha superficie y obtiene un perfil de la superficie  $z(x)$  siendo  $x$  la dimensión de la longitud explorada. A partir de este perfil se definen los siguientes parámetros que caracterizan la rugosidad superficial.

- Longitud de exploración,  $L$ : Es la longitud del perfil geométrico explorado por el rugosímetro.
- Longitud básica,  $l$ : Es la longitud del perfil geométrico elegida para evaluar la rugosidad. Suele coincidir con la longitud de exploración.
- Línea media de perfil: Situada a una cota  $z_0$  es el valor medio de la función  $z$  a lo largo de la longitud básica  $l$ . Es la línea que divide al perfil efectivo, de manera que entre los límites de la longitud básica,

la suma de las áreas encerradas por encima de esta línea y el perfil efectivo, es igual a la suma de las áreas encerradas por debajo de ésta línea y el citado perfil, a nuestra línea de referencia. Se calcula de la siguiente forma:

$$z_0 = \frac{1}{l} \int_0^l z(x) dx \quad (3.13)$$

- Rugosidad media,  $R_a$ : Es la media de la desviación del perfil respecto a la línea media  $z_0$ . Su cálculo matemático sería:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x) - z_0| dx \quad (3.14)$$

- Rugosidad total o máxima,  $R_t$ : Es la desviación máxima entre pico y valle.

$$R_t = z_{max} - z_{min} \quad (3.15)$$

- Desviación típica,  $R_s$ : Es la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de la desviación del perfil respecto de su media.

$$R_s = \frac{1}{l} \sqrt{\int_0^l (z(x) - z_0)^2 dx} \quad (3.16)$$

Para caracterizar la rugosidad superficial se usará  $R_t$ ,  $R_a$ , o  $R_s$  dependiendo del fin para el cual se esté caracterizando. El más sencillo de calcular es  $R_t$ , pues no requiere el empleo de ningún cálculo especial. El más usado es  $R_a$  pues su medida es mucho más repetitiva que la de la rugosidad total, y es el parámetro cuya representación está normalizada. La desviación típica de alturas  $R_s$  es un valor más repetitivo que el valor de  $R_a$ , pero su cálculo no ha sido posible hasta la aparición de rugosímetros con salida digital, por lo que no está todavía muy extendido. En los estudios de mecánica de contacto se suele caracterizar la superficie por  $R_s$ .

### 3.8. Problemas de metrología

1. Para calibrar un instrumento de medida en un punto de su escala, se emplea un patrón de 30 mm e incertidumbre  $U_0 = 0,4$  mm ( $K_0 = 3$ ) obteniéndose los valores siguientes: 30.001, 29.992, 29.993, 29.999, 29.996, 30.001, 29.995, 29.997, 30.002, 29.994.

Una vez calibrado el instrumento se mide una pieza tres veces obteniéndose las medidas: 29.998, 30.001, 30.004.

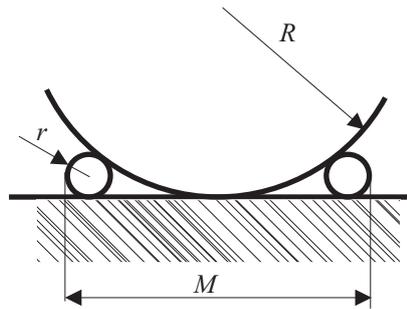
Se pide medida e incertidumbre de la pieza.

R:  $30,004 \pm 0,011$  mm ( $K=3$ )

2. Un taller va a mecanizar el exterior de un eje cilíndrico con dimensiones especificadas  $2R = 50 \pm 0,025$  mm. En la fase de preparación se mecaniza una pieza y se comprueba un radio situando ésta sobre un mármol y aproximándole dos varillas calibradas por ambos lados, tomando la cota  $M$  entre las partes externas de los rodillos.

Los rodillos tienen un radio de 10 mm con incertidumbre de  $2 \mu\text{m}$  con  $K = 2$ , y el aparato de medida tiene una incertidumbre de  $3 \mu\text{m}$  con  $K = 2$ . La cota  $M$  da un valor de 83.858 mm.

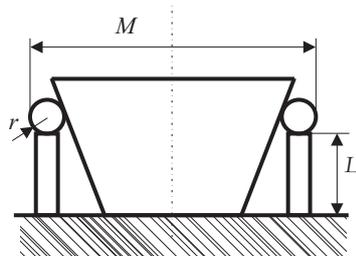
Calcular el radio de la pieza fabricada e incertidumbre del procedimiento.



R:  $D = 50,973 \pm 0,0214$  mm ( $K=2$ )

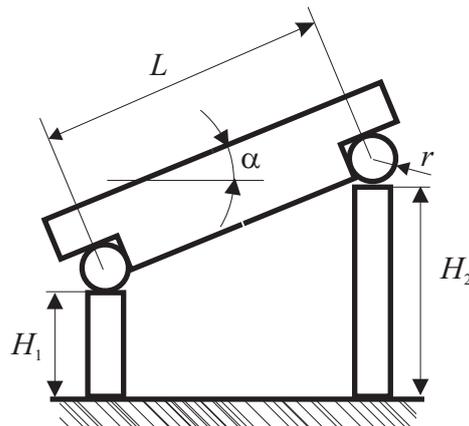
3. Calcular la conicidad del cono de la figura cuando  $M_1 = 100$ ,  $r = 8$ , y  $L_1 = 20$ . Si se toma otra medida con  $L_2 = 10$ , resulta que  $M_2 = 75$ . (Las unidades vienen en mm)

Si además se sabe que la incertidumbre de  $L$  es  $U_L = 0,006 + 0,001 \cdot L$  (con  $K_L = 2$ ), y que  $U_M = 0,02$  (con  $K_M = 2$ ). Determinar la incertidumbre de la medida de la conicidad para un  $K = 3$ .



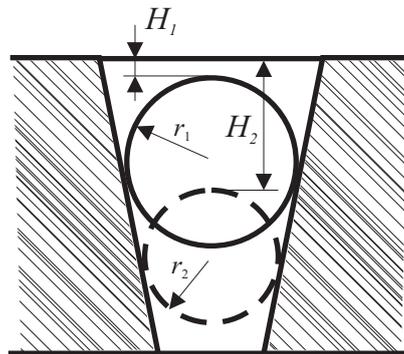
4. Se pretende medir un ángulo mediante una regla de senos y bloques patrón, tal como se muestra en la figura. Los datos numéricos son los siguientes:  $L = 50$ ;  $r = 10$ ;  $H_1 = 20$ ;  $H_2 = 42$ . Las incertidumbres son:  $U_r = 0,01$ ;  $U_{H_1} = 0,005$ ; y  $U_{H_2} = 0,007$ , todas con  $K = 2$ . Calcular  $\alpha$  y su incertidumbre en grados sexagesimales.

Todas las magnitudes longitudinales vienen en mm



R:  $\alpha = 0,45559 \pm 0,001959$  rad ( $K=2$ )

5. En la medida de una conicidad interior se han utilizado una sonda de profundidad y dos esferas calibradas tal como se indica en la figura. Si la incertidumbre del instrumento de medida es de  $U_H = 0,01$  y las de las esferas son  $U_R = 0,007 \times R$  calcular la conicidad y su incertidumbre en grados. Todas las unidades vienen en mm. Todas las incertidumbres se calculan con  $K = 2$



R:  $\alpha = 11,46 \pm 0,373^\circ$  ( $K=2$ )

## Capítulo 4

---

# Fundamentos de los procesos de arranque de material

### 4.1. Introducción

Los procesos de mecanizado por arranque de viruta están muy extendidos en la industria. En estos procesos, el tamaño de la pieza original circunscribe la geometría final, y el material sobrante es arrancado en forma de virutas. La cantidad de desecho va desde un pequeño porcentaje hasta un 70-90 % de la pieza original.

Comparando este tipo de fabricación con otros métodos para conseguir la geometría final se incluyen ventajas e inconvenientes según los casos.

Entre las ventajas de este tipo de procesos de mecanizado, que son las razones por las que su uso está tan extendido, están:

- Se consigue una alta precisión dimensional en sus operaciones
- Pueden conseguir una amplia variedad de formas con pocas herramientas
- No cambia la microestructura del material por lo que conserva sus propiedades mecánicas
- Se consigue texturas superficiales convenientes para los distintos diseños
- Son procesos fáciles de automatizar siendo muy flexibles
- Requiere poco tiempo de preparación

Por otra parte, también tiene desventajas respecto a los otros procesos de fabricación, sobretodo respecto a los de conformado por deformación plástica y los de fundición:

- Genera material de desecho en muchos casos no reciclable
- Requieren una mayor energía de proceso
- Los tiempos de producción son elevados
- El tamaño de las piezas está limitado al permitido por la máquina herramienta
- Suelen ser poco económicos cuando el tamaño de lote es muy elevado

## 4.2. Generación de superficies

El principio de generación de superficies en este tipo de procesos es el bidimensional, ya que la geometría de la herramienta sólo posee información de un punto o elemento de superficie de la geometría final. Esto tiene como ventaja la flexibilidad para generar mucha variedad de superficies con la misma herramienta. Para generar la superficie se requieren al menos dos movimientos relativos entre la pieza y la herramienta.

La geometría de la pieza final se origina mediante la combinación de dos elementos: La geometría de la herramienta, y el patrón de movimientos relativos entre la pieza y la herramienta. Las máquinas herramienta son las encargadas de generar esos movimientos relativos aportando la energía necesaria al proceso.

De los dos movimientos relativos mínimos para generar la superficie, suele haber uno que es el que consume la mayor parte de la potencia de la máquina. Este movimiento se le suele denominar movimiento primario o de corte. El otro movimiento se usa combinado con el movimiento de corte para ayudarle a eliminar el material sobrante, este movimiento es llamado movimiento de avance.

Estos movimientos pueden ser a su vez lineales o circulares, pueden llevarlos la herramienta o las piezas indistintamente. Esto hace que haya mucha variedad de máquinas-herramienta para generar las superficies: A modo de ejemplo veamos cómo se combinan estas variables en las máquinas herramientas más usuales:

| Herramienta | Mov.  | Tipo mov. | Portador    |
|-------------|-------|-----------|-------------|
| Limadora    | $M_c$ | Lineal    | Herramienta |
|             | $M_a$ | Lineal    | Pieza       |
| Cepilladora | $M_c$ | Lineal    | Pieza       |
|             | $M_a$ | Lineal    | Herramienta |
| Torno       | $M_c$ | Circular  | Pieza       |
|             | $M_a$ | Lineal    | Herramienta |
| Fresadora   | $M_c$ | Circular  | Herramienta |
|             | $M_a$ | Lineal    | Pieza       |
| Taladradora | $M_c$ | Circular  | Herramienta |
|             | $M_a$ | Lineal    | Herramienta |

### 4.3. Formación de viruta

En el estudio de la formación de viruta se va a suponer que la herramienta es un diedro que desliza sobre la superficie que está generando. Esta superficie está un poco por debajo de la superficie de la pieza original, de forma que su movimiento provoca el desprendimiento de la viruta del material base. La intersección de los dos planos del diedro es una recta que es el filo  $S$  de la herramienta. Las dos caras de este diedro son:

- Cara de incidencia o flanco de la herramienta  $A_\alpha$ , que es el plano más cercano a la superficie generada
- Cara de desprendimiento  $A_\gamma$  que es el plano por el que desliza la viruta

Esta herramienta desliza sobre la superficie con una velocidad  $\vec{v}_c$  que es la velocidad de corte, se puede definir como la velocidad instantánea del movimiento de corte respecto la pieza y suele medirse en m/min.

Si esta velocidad es perpendicular al filo, se dice que el corte es ortogonal, en otro caso se dice que el corte es oblicuo. El corte ortogonal es más sencillo de estudiar que el corte oblicuo ya que se presenta un estado de deformación plana. La superficie generada por encima de la cual se elimina el material por la cara de desprendimiento es el plano de filo  $P_s$  y viene definido por el filo  $S$  y la velocidad de corte.

Otras definiciones de conceptos importantes son:

- Avance: Es el movimiento que agregado al de corte conduce a la eliminación progresiva de material. Suele medirse en mm/s, mm/rev, mm/diente, mm/pasada, . . . .

- Espesor de viruta sin deformar  $a_c$ : Es el espesor de la viruta medido perpendicular al filo y en un plano perpendicular al corte.
- Espesor de viruta deformado  $a_o$ : Es el espesor de viruta medido después del corte.
- Relación de corte  $r_c$ : es el cociente entre el espesor de viruta no deformado y el espesor de viruta deformado.  $r_c = \frac{a_c}{a_o} < 1$ .
- Ancho de viruta  $a_W$ : es el ancho de la viruta medido en la dirección del filo.
- Área de corte  $A_c$ : es el área perpendicular la velocidad de corte que es barrida por la herramienta.
- Área de avance  $A_f$ : es el área perpendicular a la velocidad de avance barrida por la herramienta.
- Tasa de arranque  $Z_W$ : Volumen de material de la pieza arrancado por unidad de tiempo. Tiene unidades de caudal.

Si se analizan los fenómenos ocurridos en torno al arranque de viruta se observaría que:

- La viruta cambia de color al desprenderse del material
- La cara de la viruta que ha estado en contacto con  $A_\gamma$  es lisa y brillante mientras que la otra es oscura y rugosa
- $a_o > a_c$  por lo que  $r_c < 1$  siempre
- La viruta es más dura y frágil que el material base
- Se producen grandes incrementos de temperatura en la zona de corte
- La forma de la viruta depende de la velocidad del material

El arranque de viruta en materiales dúctiles se produce mediante la deformación plástica que ocurre en una franja estrecha llamada plano de cizalladura. El material deformado desliza sobre la cara de desprendimiento venciendo fuerzas de rozamiento elevadas.

Se distinguen tres tipos básicos de viruta:

- Viruta discontinua: se produce cuando se mecanizan materiales frágiles, y con materiales dúctiles a velocidades muy bajas de corte. El corte se produce a base de pequeñas fracturas del material base.

- Viruta con protuberancias o corte con recrecimiento de filo: se produce en materiales muy dúctiles, o a velocidades de corte bajas. Cuando la fricción entre la viruta y la herramienta es muy alta, se produce una adhesión muy fuerte entre el material de la viruta y la superficie de la herramienta, con lo que la viruta empieza a deslizar, no directamente sobre la cara de desprendimiento sino sobre material adherido sobre ella. Este filo recrecido puede llegar a un tamaño en el cual se desprenda el material adherido sobre la pieza o sobre la viruta dejando en todo caso un acabado superficial muy deficiente.
- Viruta continua: Es el régimen normal de corte y es el que mejor acabado superficial deja. Para facilitar la evacuación, se suele disponer de un rompevirutas en la cara de desprendimiento.
- Viruta segmentada: En una viruta que tiene forma de diente de sierra, en la que unas bandas cortantes aparecen regularmente mientras que el material intermedio apenas ha sufrido deformación plástica. Sobre el mecanismo de su aparición no hay consenso en los estudios científicos. La teoría más aceptada es la inestabilidad termoplástica en materiales cuya resistencia cae drásticamente al alcanzar una temperatura determinada. Aleaciones de níquel y titanio cuando se mecanizan a alta velocidad presentan este tipo de viruta.

Hay materiales que pueden presentar los tres primeros regímenes de corte citados dependiendo de la velocidad de corte tomada.

## 4.4. Geometría de corte

Para estudiar la geometría de la herramienta se va a seguir el sistema de la recomendación ISO/DIS 3002. Esta norma establece un sistema de planos a partir de los cuales se van a definir los ángulos de corte.

La norma distingue entre geometría *herramienta en mano* y geometría *herramienta en uso*. El primer sistema se usa con fines de fabricación y afilado de herramientas, mientras que el segundo se define cuando la herramienta está realmente cortando. Esta es una forma de tener en cuenta los efectos de los grandes avances y los posicionamientos de las herramientas en las máquinas distintos de los normalizados. Lo único que puede distinguir un sistema de otro es la dirección de la velocidad resultante y la dirección de la sujeción en el montaje.

De este modo en un punto del filo  $O$  de la herramienta se puede definir un sistema de ejes cartesianos en el cual el eje  $OX$  sea la dirección del la

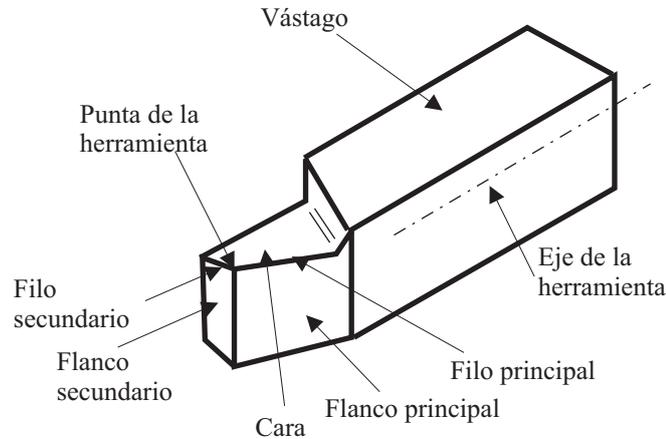


Figura 4.1: Nomenclatura en una herramienta de torneado

sujeción de la herramienta (en el caso del torno, la dirección del vástago) y como eje  $OY$  como el de la velocidad de corte. El eje  $OZ$  se obtendrá de los dos anteriores y suele coincidir con el eje  $Z$  del sistema de la máquina herramienta. Tanto el eje  $OX$  como el eje  $OZ$  son positivos en el sentido en el que la herramienta se aleja de la pieza. Este sistema de coordenadas es intrínseco a la máquina herramienta que es la que produce los movimientos relativos entre pieza y herramienta (eje  $OY$ ), y la que sujeta la herramienta (eje  $OX$ ). Con esta construcción se definen los siguientes planos herramienta en mano:

- Plano de referencia  $P_r$ : es el plano  $XOZ$  y es el que físicamente representa el plano perpendicular a la velocidad de corte
- Plano de trabajo  $P_f$ : contiene al eje  $OY$  y el movimiento de avance teórico. (En el cilindrado es el plano  $YOZ$  y en el refrentado  $YOX$ )
- Plano longitudinal  $P_L$ : Es el plano perpendicular a los dos anteriores. En condiciones normales (la  $v_c$  coincide con el eje  $OY$ ) contendría a la velocidad de corte y sería perpendicular al avance.

Junto a los planos anteriores se definen otros planos que tienen en cuenta la geometría de la herramienta, llamados *planos de situación*:

- Plano de filo  $P_s$ : Es el plano que contiene al filo  $S$  y a la velocidad de corte  $\vec{v}_c$ . Por contener a  $\vec{v}_c$  este plano es perpendicular a  $P_r$ .
- Plano normal  $P_n$ : el plano normal al filo  $S$ .

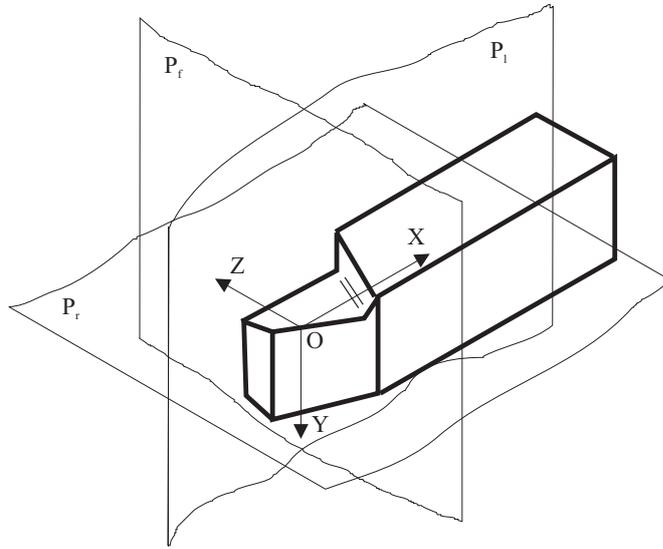


Figura 4.2: Definición de planos en una herramienta de torneado

- Cara de desprendimiento  $A_\gamma$ : es la cara de la herramienta por la que desliza el material situado por encima del plano de filo.
- Cara de incidencia  $A_\alpha$ : es la cara de la herramienta más cercana al plano del filo.

Los tres últimos planos son intrínsecos a la geometría de la herramienta y son independientes de su posición en la máquina herramienta.

Con este sistema de planos ya se pueden definir los ángulos de corte. Estos se representan con una letra griega y un subíndice que indica el plano sobre el cual se miden.

En el plano normal  $P_n$  se definen los siguientes ángulos:

- Ángulo de desprendimiento  $\gamma_n$ : es el que forman  $A_\gamma$  y  $P_r$
- Ángulo de incidencia  $\alpha_n$ : es el que forma  $A_\alpha$  y  $P_s$
- Ángulo de filo  $\beta_n$ : es el que forma  $A_\gamma$  y  $A_\alpha$  y es complementario a los dos anteriores

En el plano de referencia  $P_r$  se mide el ángulo de posición de filo principal  $\kappa_r$  que es el ángulo que hay entre  $P_s$  y  $P_f$ , medido sobre el  $P_r$ .

En el Plano de filo  $P_s$  se define el ángulo de inclinación de filo  $\lambda_s$  que es el formado entre  $S$  y  $P_r$ . Si  $\lambda_s = 0$  el corte es ortogonal.

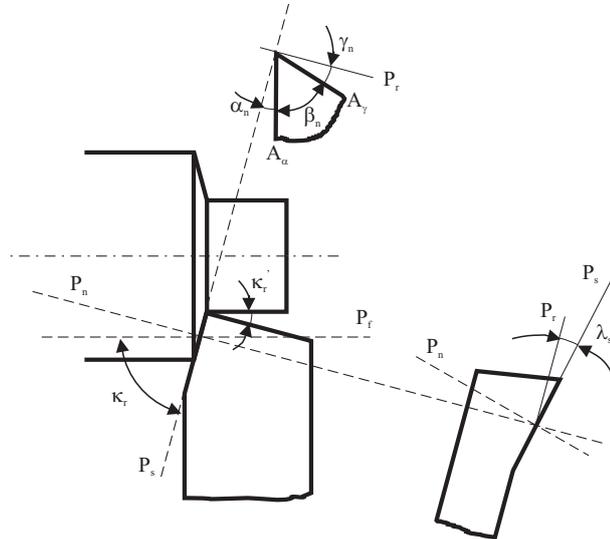


Figura 4.3: Geometría en una operación de cilindrado

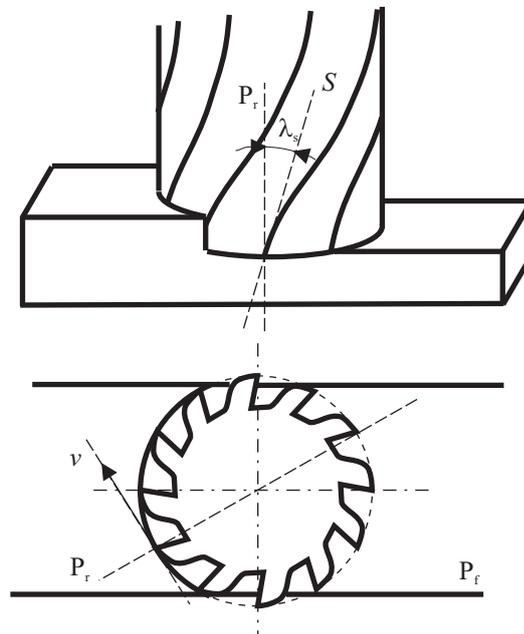


Figura 4.4: Geometría en una operación de fresado frontal

Cuando la herramienta termina en punta, suelen intervenir dos filos en el corte. El principal, que es el que mayor parte de carga lleva, y el secundario. Las magnitudes referidas al filo secundario se denominan colocando un símbolo ' después del símbolo. Así se denomina  $\kappa'_r, \dots$

Esta geometría puede cambiar en las condiciones de uso debido a la influencia de los avances o la desviación en el posicionamiento de la herramienta. En este caso se definen las mismas magnitudes añadiendo el subíndice  $e$  a las magnitudes definidas anteriormente:  $\gamma_{ne}, \kappa_{re}, \lambda_{se}$ , etc. La traslación de un sistema a otro se realiza mediante cálculos geométricos, a partir del nuevo posicionamiento del eje  $OY'$  en línea con la velocidad.

#### 4.4.1. Influencia de los ángulos de corte en el funcionamiento

Si el ángulo de desprendimiento  $\gamma_{ne}$  es grande las fuerzas de corte disminuyen pues el material se deforma menos plásticamente y la herramienta se desgasta mucho en la cara de desprendimiento al aumentar la fuerza de fricción, y la velocidad relativa de la viruta sobre la cara de la herramienta.

Si el ángulo de incidencia  $\alpha_{ne}$  es grande la herramienta puede fracturar su punta debido a las altas fuerzas de corte, pero cuanto más pequeño sea mayor desgaste sufrirá la punta aumentando las pérdidas por rozamiento de la herramienta con la superficie de la pieza.

El ángulo de inclinación de filo  $\lambda_{se}$  influye en la dirección de la viruta en su salida por la cara de desprendimiento. Toma valores positivos cuando echa la viruta fuera de la pieza. Y toma valores negativos cuando tiende a hacer chocar la viruta de nuevo con la pieza. Cuando se mecanizan materiales duros y frágiles se usan  $\lambda_{se} < 0$ .

Un ángulo de posición de filo  $\kappa_{re}$  distinto de  $90^\circ$  permite un mejor aprovechamiento de la longitud de filo sobre todo cuando se tiene limitada la profundidad de pasada. También se usa para evitar fuerzas de impacto al inicio del corte, suavizando la entrada de la herramienta en el corte.

### 4.5. Fuerzas de corte

Aunque el coste de la potencia consumida en una operación de mecanizado no es un factor económico importante habitualmente, es necesario su conocimiento para ser capaces de estimar la cantidad de potencia necesaria para realizar la operación debido a las limitaciones impuestas por la máquina disponible. La capacidad de estimar la potencia de una operación es importante sobretodo en las operaciones de desbaste ya que lo que interesa

es realizar la operación en el menor tiempo y en el menor número de pasadas posible. Por otra parte, las fuerzas de corte también intervienen en fenómenos como el calentamiento de la pieza y la herramienta, el desgaste de la herramienta, la calidad superficial y dimensional de la pieza, el diseño del amarre y utillajes necesarios, etc.

La interacción entre la herramienta, la viruta y la pieza, se traduce en una serie de presiones sobre la superficie de la herramienta. Este sistema de fuerzas y presiones se puede reducir a una fuerza resultante  $F$ . El momento resultante se puede despreciar ya que el área sobre el que se aplica la fuerza es muy pequeña. Una primera descomposición de esta fuerza es en dos direcciones ortogonales, una en la dirección de la velocidad de corte que será la fuerza de corte  $F_c$ , y la otra en la dirección perpendicular a la velocidad de corte que será la fuerza de empuje  $F_t$ . De las dos fuerzas, la única que consume potencia es  $F_c$ , siendo la función de  $F_t$  la de mantener la posición del filo de la herramienta en el plano el filo  $P_s$ .

#### 4.5.1. Energía específica de corte

Se define la *energía específica de corte*  $p_s$  como la energía necesaria para remover una unidad de volumen de material. Este valor relaciona la potencia  $P_m$  y la velocidad de arranque de material  $Z_w$ .

$$p_s = \frac{E_m}{V} = \frac{E_m/t}{V/t} = \frac{P_m}{Z_w} \quad (4.1)$$

Si se tiene el valor de  $p_s$  junto con el valor de la potencia disponible en la máquina, se puede calcular la tasa de arranque máxima de la operación, o sea, el volumen máximo de material que se puede arrancar por unidad de tiempo. Esta tasa de arranque tiene unidades de caudal, y se puede calcular integrando el producto escalar del área de barrido por la velocidad de barrido. De modo simplificado se puede usar el área de corte o el área de avance para su cálculo. Siendo el área de corte  $A_c$  el área barrida por la herramienta perpendicular a la velocidad de corte, y el área de avance  $A_f$  el área barrida por la herramienta perpendicular a la velocidad de avance.

$$Z_w = A_c \cdot v_c = A_f \cdot v_f \quad (4.2)$$

Por lo tanto, el valor de  $p_s$  también relaciona la fuerza de corte  $F_c$  y el área de corte  $A_c$ , por lo que también se le suele llamar *fuerza específica de corte*  $K_s$ .

$$p_s = \frac{P_m}{Z_w} = \frac{F_c \cdot v}{A_c \cdot v} = \frac{F_c}{A_c} \quad (4.3)$$

Los experimentos pueden decir cómo varía  $p_s$  con las condiciones de corte. En concreto, se va a estudiar el efecto de la velocidad de corte y del espesor de viruta sobre el valor de  $p_s$ .

A velocidades bajas, la energía específica de corte es muy alta, disminuyendo conforme aumenta la velocidad hasta un valor a partir del cual  $p_s$  permanece constante. Esto se debe al recrecimiento de filo que aparece a bajas velocidades de corte y cuando la fricción es alta. Normalmente se debe trabajar en el tramo en el que  $p_s$  es constante ya que también es la más económica.

$p_s$  disminuye al aumentar  $a_c$ , muchos fabricantes de herramientas proporcionan una expresión de esta variación. El aumento de  $p_s$  al disminuir  $a_c$  se debe al efecto de tamaño, ya que las fuerzas de fricción en la cara de incidencia y aplastamiento de la punta redondeada representan un porcentaje mayor en la energía consumida al disminuir  $a_c$ .

#### 4.5.2. Fuerzas de fricción

La fricción en las operaciones de mecanizado tiene ciertas peculiaridades que hacen que sus leyes sean distintas de las que siguen los fenómenos de fricción normales.

En el deslizamiento de la viruta sobre la cara de desprendimiento, las superficies están libres de capas de óxidos, ya que la cara de la viruta en contacto con la herramienta está recién creada y no ha tenido contacto con el aire sino con la cara de la herramienta, y la cara de desprendimiento ha estado rozando anteriormente con viruta ya desprendida que a los primeros metros ha dejado desnuda a la herramienta de cualquier capa de óxido. Esto hace que se establezcan uniones metálica entre los átomos de la viruta y los de la herramienta.

Por otra parte las presiones normales son elevadísimas, por encima de la tensión de fluencia de la pieza, por lo que el contacto entre superficies será pleno independientemente de las ondulaciones de la rugosidad.

La fuerza de rozamiento se puede medir a partir de la fuerza de corte y la de empuje.

Esto explica lo observado en los experimentos:

- La fuerza de rozamiento es independiente de  $\gamma_{ne}$
- Al aumentar  $\gamma_{ne}$  disminuye la fuerza de corte pero no la fuerza de rozamiento, que aumenta a curvarse menos la viruta y, por lo tanto, aumenta la velocidad de deslizamiento de la viruta sobre la herramienta aumentando de manera considerable el calentamiento y desgaste de la herramienta.

- La fuerza de rozamiento es menor cuanto más disimilares sean los materiales de la herramienta y de la pieza. De donde viene la importancia de recubrir bien los materiales de herramienta, con capas cerámicas, normalmente TiN.

## 4.6. Temperaturas de corte

Una de las limitaciones de los procesos de corte son las temperaturas alcanzadas durante el mecanizado. La potencia consumida en el corte se invierte en la deformación plástica de la viruta y en los distintos rozamientos. Estos trabajos se convierten en calor que se invierte en aumentar las temperaturas de la viruta, la herramienta y la pieza de trabajo. La herramienta pierde resistencia conforme aumenta su temperatura, aumentando su desgaste y por lo tanto disminuyendo su vida útil. Por otro lado, un calentamiento excesivo de la pieza de trabajo puede variar las propiedades del material debido a cambios microestructurales por efectos térmicos, también puede afectar a la precisión del mecanizado al estar mecanizando una pieza dilatada que a temperatura ambiente se puede contraer.

Aunque no se va a estudiar a fondo el fenómeno termodinámico, sí que conviene tener algunos conceptos claros respecto a la influencia de los distintos parámetros de corte en las temperaturas de la herramienta y en la pieza y, por lo tanto, en la economía y calidad del proceso.

### Generación de calor

La potencia consumida en una operación de corte  $P_m$  se convierte en calor principalmente por los siguientes mecanismos:

- Deformación plástica en la zona de cizalladura de la viruta. El calor generado por unidad de tiempo tiene un valor se puede calcular en función de la velocidad de cizallado y la fuerza de cizallado:  $P_s = F_s v_s$ .
- Fricción entre la viruta y la herramienta. El flujo de calor generado será  $P_f = F_r v_o$
- Fricción entre la herramienta y la pieza. Su valor, al igual que los anteriores será el producto de la fuerza de rozamiento por la velocidad relativa entre la herramienta y la pieza:  $P_{fw} = \tau_{sl} \cdot VB \cdot a_w \cdot v$ . Esta fuente de calor dependerá del desgaste  $VB$  que será nulo cuando la herramienta es nueva o está recién afilada.

## 4.7. Desgaste de herramientas

Desgaste es la pérdida de material por fricción que hace cambiar la geometría de la herramienta hasta llegar a inutilizarla.

Los mecanismos de desgaste en las operaciones de corte son principalmente tres:

- Adhesión: Debido a las microsoldaduras, los átomos de la superficie de la herramienta son arrastrados por la viruta.
- Abrasión: La pieza de trabajo contiene inclusiones de partículas muy duras que rayan la superficie de la herramienta.
- Difusión: A temperaturas elevadas, los átomos de aleación se difunden hacia donde existe menos concentración. Por este mecanismo la superficie de la herramienta se empobrece de elementos de aleación debilitándose.

Estos mecanismos se agravan cuando aumenta la temperatura, y cuando los materiales son más afines.

El desgaste en la herramienta de corte es de dos tipos principalmente:

- En la cara de desprendimiento se produce un cráter, normalmente en el punto donde la temperatura alcanza su máximo.
- En la cara de incidencia se produce un achaflanamiento de la punta debido al rozamiento de la herramienta con la superficie mecanizada.

El desgaste por craterización se caracteriza por los parámetros  $KT$ ,  $KM$ , y  $KB$ . Mientras que el desgaste en la cara de incidencia se caracteriza por  $VB$ , y por  $NB$ .

Para estimar la gravedad del desgaste se suele utilizar  $VB$  y  $KT$ . Un valor excesivo de  $VB$  produce inestabilidades en el contacto con vibraciones además de aumentar las pérdidas por fricción en la cara de incidencia. Un valor excesivo de  $KT$  aumentaría el riesgo de fractura de la punta de la herramienta.

La norma ISO TC29 establece unos valores máximos de  $VB$   $KT$  como criterio de vida de la herramienta, para cada tipo de material de herramienta. Entre las distintas especificaciones destaca la limitación de  $VB$  a un valor de 0.3 mm de valor medio a lo largo del filo, o a un valor máximo de 0.6 mm.

El valor  $VB$  sigue una evolución lineal con el tiempo, pero la pendiente de esa recta depende de la velocidad. Existe para una herramienta una relación entre el la velocidad de corte y el tiempo en que  $VB$  tarda en alcanzar el

valor de 0.3 mm (llamado vida de herramienta  $t$ ). Esta relación se aproxima mucho a la llamada *ley de Taylor* la cual establece que  $vt^n = C$ .  $C$  y  $n$  son obtenidos experimentalmente y dependen del material de la herramienta y de la pieza a mecanizar, geometría de corte, refrigeración, . . . .

La vida de la herramienta según  $KT$  depende de  $\gamma_{ne}$ . Debido a que a partir de un valor de  $\gamma_{ne}$  el desgaste puede ser catastrófico, por lo  $\gamma_n$  está limitado para los distintos tipos de materiales. Para los metales duros su valor suele ser de 3.5%, para los aceros rápidos su valor está comprendido entre 0% y 14% cuando mecaniza materiales duros, y entre 14% y 30% cuando mecaniza materiales dúctiles.

## 4.8. Materiales de herramienta

Ya se ha visto la importancia de las características del material de herramienta para establecer los parámetros de corte óptimos. En concreto, al material de herramienta se le va a pedir que tenga buenas propiedades a alta temperatura, de desgaste, resistencia, dureza y tenacidad. Además ha de tener poca afinidad química con la pieza de trabajo, y debe ser resistente a la corrosión. Para conseguir una combinación óptima de propiedades, se ha de llegar a un compromiso entre resistencia al desgaste y la tenacidad.

Los materiales de herramienta son variadísimos, y están en continua evolución. Aquí se van a clasificar en tres grandes grupos: Aceros rápidos (HSS), Metales duros (C), y Cerámicos (CC). El orden de citación ha sido el de resistencia al desgaste creciente, pero tenacidad decreciente.

Los aceros rápidos son aleaciones de  $Fe$ , se producen por fundición y tratamiento térmico. Se usan para herramientas monobloque y para corte interrumpido. Trabajan hasta temperaturas de 600  $dgC$ .

Los metales duros son carburos cementados en una matriz de cobalto, se producen por procedimientos pulvimetalúrgicos, se proporcionan en forma de plaquitas, ajustables a barras portaherramientas. Pueden trabajar hasta temperaturas de 1200  $^{\circ}C$ .

La norma ISO/TC29 ha clasificado estos materiales en tres grupos P (para mecanizar materiales dúctiles), M (para mecanizar materiales abrasivos), y K (para mecanizar materiales frágiles). Y los numera según la calidad que viene dada por su resistencia al desgaste de 01 a 50. Cuanto mayor es el número menor resistencia al desgaste tendrá.

Dentro del grupo de los materiales cerámicos se encuentran los cermetes, el Nitruro de Boro Cúbico (CBN), el diamante policristalino, . . . . Tiene la ventaja de que aguantan muy altas temperaturas (hasta 2000  $^{\circ}C$ ), tienen poca afinidad con los metales, y son muy duros. Tienen el inconveniente de

ser muy frágiles, tienen baja conductividad térmica, por lo que se calientan antes.

## 4.9. Maquinabilidad de materiales

El criterio para establecer que un material es más maquinable que otro puede obedecer a distintos criterios: la potencia requerida, la forma de la viruta, el acabado superficial, . . . . Sin embargo, el más usado es el de desgaste de la herramienta: un material es maquinable cuando desgasta poco la herramienta.

Los aceros se suelen alear con  $S$ ,  $Pb$ ,  $Te$ , . . . . A alta temperatura, forman inclusiones que lubrican la superficie entre la viruta y la herramienta.

Muchas aleaciones (aceros inoxidable, Aluminios aleados, . . .) tienen microestructuras con fases abrasivas que desgastan la herramienta.

## 4.10. Fluidos de corte

Los fluidos de corte tienen dos funciones:

- Refrigeración: Para disminuir las temperaturas de corte permitiendo trabajar a mayor velocidad, evitando los inconvenientes del incremento de temperatura que lleva consigo.
- Lubricación: Interponiéndose entre la viruta y la herramienta para disminuir las fuerzas de fricción y evitar el recrecimiento de filo

Debido a que al principio se utilizaba en operaciones de taladrado donde hay partes del filo que tienen una velocidad muy baja y por lo tanto susceptible de formar filo recrecido, a los fluidos de corte se les suele denominar *taladrinas*.

El mecanismo en el que el fluido se interpone entre la viruta y la herramienta es el de capilaridad, por lo que la taladrina debe tener muy baja tensión superficial, y requiere pesos moleculares muy bajos.

La acción del lubricante es esencialmente química, la taladrina contiene reactivos que se adhieren a la superficie que lubrican disminuyendo la adhesión viruta-herramienta y facilitando el deslizamiento. En lugar de usar reactivos en base a S o P se suelen utilizar compuestos clorados (tetracloruro de carbono  $CCl_4$ , cloroformo  $CHCl_3$ , tricloroetano  $CH_2Cl_2$ , . . .), pues aguantan mucho mejor las altas temperaturas que se producen en el torno.

Un inconveniente importante de las taladrinas es su toxicidad, lo que hace que esté sometido a reglamentos medioambientales muy estrictos.

La aplicación principal de las taladrinas es como refrigerante. Actualmente en las máquinas automáticas se puede inyectar el fluido a alta presión en la zona de contacto, gracias al carenado, sin las limitaciones de no ver directamente el corte o de las salpicaduras.

## 4.11. Rugosidad superficial

La rugosidad de una superficie se suele obtener mediante un rugosímetro que explora dicha superficie y obtiene un perfil de la superficie  $z(x)$  siendo  $x$  la dimensión de la longitud explorada. A partir de este perfil se definen los siguientes parámetros que caracterizan la rugosidad superficial.

- Longitud de exploración,  $L$ : Es la longitud del perfil geométrico explorado por el rugosímetro.
- Longitud básica,  $l$ : Es la longitud del perfil geométrico elegida para evaluar la rugosidad. Suele coincidir con la longitud de exploración.
- Línea media de perfil: Situada a una cota  $z_0$  es el valor medio de la función  $z$  a lo largo de la longitud básica  $l$ . Es la línea que divide al perfil efectivo, de manera que entre los límites de la longitud básica, la suma de las áreas encerradas por encima de esta línea y el perfil efectivo, es igual a la suma de las áreas encerradas por debajo de ésta línea y el citado perfil, a nuestra línea de referencia. Se calcula de la siguiente forma:

$$z_0 = \frac{1}{l} \int_0^l z(x) dx \quad (4.4)$$

- Rugosidad media,  $R_a$ : Es la media de la desviación del perfil respecto a la línea media  $z_0$ . Su cálculo matemático sería:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x) - z_0| dx \quad (4.5)$$

- Rugosidad total o máxima,  $R_t$ : Es la desviación máxima entre pico y valle.

$$R_t = z_{max} - z_{min} \quad (4.6)$$

- Desviación típica,  $R_s$ : Es la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de la desviación del perfil respecto de su media.

$$R_s = \frac{1}{l} \sqrt{\int_0^l (z(x) - z_0)^2 dx} \quad (4.7)$$

Para caracterizar la rugosidad superficial se usará  $R_t$ ,  $R_a$ , o  $R_s$  dependiendo del fin para el cual se esté caracterizando. El más sencillo de calcular es  $R_t$ , pues no requiere el empleo de ningún cálculo especial. El más usado es  $R_a$  pues su medida es mucho más repetitiva que la de la rugosidad total, y es el parámetro cuya representación está normalizada. La desviación típica de alturas  $R_s$  es un valor más repetitivo que el valor de  $R_a$ , pero su cálculo no ha sido posible hasta la aparición de rugosímetros con salida digital, por lo que no está todavía muy extendido. En los estudios de mecánica de contacto se suele caracterizar la superficie por  $R_s$ .

## 4.12. Problemas de mecanizado

1. Una herramienta de torno con punta angular, donde  $\kappa_r = 60^\circ$  y  $f = 0,05$  mm/rev. ¿Cuál debe ser el ángulo de filo secundario para obtener una rugosidad media  $R_a = 3$   $\mu\text{m}$  bajo condiciones ideales?

R:  $\kappa_r = 15,57^\circ$

2. En una operación de mecanizado con corte ortogonal, el material sigue la ecuación de Lee-Shaffer ( $\phi + \beta - \gamma_{ne} = \pi/4$ ). Calcular la energía específica de corte sabiendo que si tensión media de cizalladura es  $\tau_s = 250$  MPa y que el ángulo de cizalladura es  $\phi = 20$ .
3. En una operación de torneado de un cilindro  $\phi 70 \times 300$  mm el avance es de 0.25 mm/rev y la velocidad de corte de 1 m/s. La fuerza de corte está limitada a 3 kN y la energía específica de corte del material es de 2000 MPa. Calcular:

- a) El tiempo de realización de la operación.
- b) La profundidad máxima de pasada.

R: 263.9 s; 6 mm

4. En una operación de taladrado con una broca de dos filos, la velocidad angular  $n_t = 300$  r.p.m., el avance es  $f = 0,2$  mm/rev, el ángulo de filo principal  $\kappa_r = 60^\circ$ , el diámetro de la broca es  $d_t = 12$  mm. Si la energía específica de corte del material que está cortando es  $p_s = 3000$  MPa.

Calcular:

- a) La tasa de arranque.
- b) El espesor de viruta no deformado.

c) El par motor de la taladradora.

R: 113.1 mm<sup>3</sup>/s; 0.087 mm; 10.8 N·m

5. Se pretende realizar un taladro con una broca de 15 mm de diámetro y ángulo de posición  $\kappa_r = 60^\circ$ . Sus dos filos pueden soportar espesores de viruta no deformados máximos de 0,2 mm y velocidades de corte máximas de 1.66 m/s. La potencia máxima que puede proporcionar la taladradora es de 4,5 kW, y la energía específica de corte viene dado por la siguiente expresión:

$$p_s = 2100 \left( \frac{a_c}{0,4} \right)^{0,29}$$

El resultado viene en MPa siendo  $a_c$  el espesor de viruta no deformado en mm

- a) Calcular el avance máximo.  
 b) Calcular la velocidad angular máxima en rpm para este avance teniendo en cuenta las limitaciones de velocidad y de potencia.
6. En una operación de cilindrado la vida de la herramienta obedece a la siguiente ecuación de Taylor  $t = v^{-0,3} f^{-0,8} a_p^{-0,1}$  estando  $v$ ,  $f$ , y  $a_p$  en unidades S.I.

Estimar el efecto en % sobre la vida de la herramienta, al duplicar la tasa de arranque incrementando:

- a) La velocidad.  
 b) El avance.  
 c) La profundidad de corte.

R: 87 %; 43 %; 7 %

7. En una operación de torneado, se reduce el diámetro de un cilindro  $\phi 40 \times 70$  a 35 mm. Primero mediante una pasada de desbaste hasta un diámetro de 36 mm y después mediante una pasada de acabado hasta el diámetro final. La herramienta tiene un radio de punta de 2 mm y el ángulo de posición de filo es  $\kappa_r = 75^\circ$ . La máquina tiene una potencia

máxima de 5 kW. La energía específica de corte viene dada en función del espesor de viruta mediante la siguiente expresión:

$$p_s = 3000 \left[ \frac{0,4}{a_c} \right]^{0,29}$$

viniendo  $a_{cmax}$  en mm, y  $p_s$  en MPa

Determinar:

- a) El avance máximo en la pasada de desbaste si la velocidad de corte es de 70 m/min.
  - b) El avance máximo en la pasada de acabado si la rugosidad superficial a conseguir es de  $R_a=5 \mu\text{m}$ .
8. Un redondo de 80 mm de diámetro se rebaja a en una pasada a 75 mm de diámetro a lo largo de una longitud de 150 mm. La energía específica de corte del material de trabajo es de 2000 MPa. El avance es de 0.25 mm/rev y la velocidad angular del husillo es de 300 rpm. Calcular:
- a) El tiempo de realización de la operación
  - b) El par motor y la potencia necesaria para realizar dicha operación.

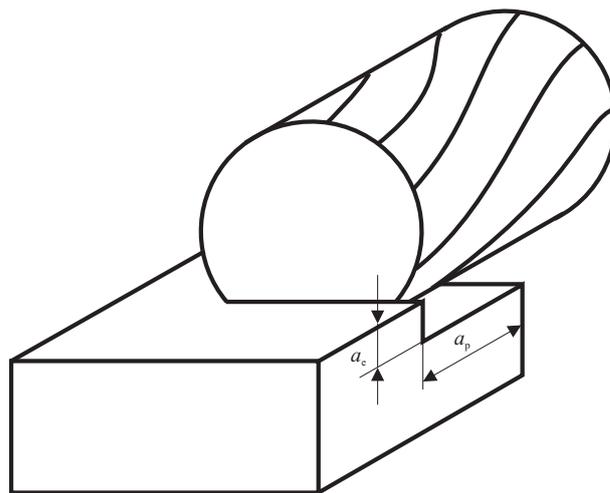


Figura 4.5: Fresado periférico

9. En una operación de escuadrado con fresa periférica (Figura 4.5), según el dibujo de la figura con  $a_p = 30$  mm y  $a_e = 5$  mm, la pieza tiene una longitud de 50 mm y una energía específica de corte  $p_s = 2000$  MPa. La fresadora tiene 10 dientes y un diámetro de 50 mm. Determinar el avance en mm/rev para que la rugosidad superficial sea  $R_t = 0,2 \mu\text{m}$ . Calcular en este caso el espesor máximo de viruta.

R: 2 mm/rev; 0.12 mm

10. Con los datos del problema anterior y sabiendo que la potencia máxima de la máquina es de 3 kW y la velocidad de la fresa es de 100 r.p.m. Determinar el avance máximo en mm/rev y el tiempo de mecanizado.

R: 6 mm/rev; 6.5 s

11. En un fresado periférico la fresa tiene 20 dientes y su diámetro es de 100 mm. La velocidad de rotación es de 5 rev/s, el avance 1.3 mm/s, la penetración 6 mm, y el ancho de la pieza de 50 mm. La relación entre el espesor máximo de viruta no deformado  $a_{cmax}$  y la energía específica de corte viene dado por:

$$p_s = 1,4 \left( 1 + \frac{2,5 \cdot 10^{-6}}{a_{cmax}} \right) \quad (4.8)$$

viniendo  $a_{cmax}$  en m, y  $p_s$  en GJ/m<sup>3</sup>.

Estimar:

- a) La tasa máxima de arranque.
  - b) La potencia mínima en kW requerida por la operación
12. En una operación de fresado periférico, la pieza de trabajo tiene un ancho de 75 mm, y una longitud de 200 mm, su espesor ha de rebajarse 5 mm en una pasada.
- a) ¿Qué velocidad de avance debe usarse si la potencia disponible para el corte es de 3 kW y la fuerza específica de corte es de 3.6 GH/m<sup>3</sup>?
  - b) Si la fresa tiene 100 mm de diámetro, un solo diente y la rugosidad máxima superficial ideal es de 1.5  $\mu\text{m}$ . ¿Cuál debe ser la velocidad de rotación mínima de la fresa?

- c) ¿Cuál es la velocidad de corte?
- d) ¿Y el tiempo de mecanizado?
13. En un fresado periférico la fresa tiene 20 dientes y su diámetro es de 200 mm. La velocidad de rotación es de 5 rev/s, el avance 1.3 mm/s, la penetración 6 mm, y el ancho de la pieza de 50 mm. La relación entre el espesor máximo de viruta no deformado  $a_{cmax}$  y la energía específica de corte viene dado por:

$$p_s = 1,4 \left( 1 + \frac{0,5 \cdot 10^{-6}}{a_{cmax}} \right) \quad (4.9)$$

viniendo  $a_{cmax}$  en m, y  $p_s$  en GJ/m<sup>3</sup>.

Estimar:

- a) La tasa máxima de arranque.
- b) La potencia mínima en kW requerida por la operación
14. En una operación de fresado periférico, se establecen las siguientes condiciones: velocidad de rotación es de 2.8 rev/s, el avance 2 mm/s, la penetración 10 mm, el ancho de la pieza de 50 mm, la longitud de la pieza 150 mm, el diámetro de la fresa 40 mm, n° de dientes de la fresa 10. La relación entre el espesor máximo de viruta no deformado  $a_{cmax}$  y la energía específica de corte viene dada por:

$$p_s = 3000 \left[ \frac{0,4}{a_{cmed}} \right]^{0,29} \quad (4.10)$$

viniendo  $a_{cmed}$  en mm, y  $p_s$  en MPa

Estimar:

- a) La potencia requerida por la máquina si tiene un rendimiento del 80 %
- b) Tiempo de mecanizado
15. En una operación de fresado periférico, la pieza de trabajo tiene un ancho de 75 mm y una longitud de 200 mm, y se ha de rebajar su

espesor 5 mm en una pasada. La fresa tiene 50 mm de diámetro y 3 dientes, la potencia nominal de la fresadora es de 3 kW y la energía específica de corte es de 3.6 GJ/m<sup>3</sup>.

Determinar:

- a) La máxima velocidad de avance.
- b) El tiempo de mecanizado de la pieza.

16. En una operación de fresado frontal, la profundidad de corte es 5 mm la velocidad de avance 0.67 mm/s, el ancho de la pieza 50 mm, y la fresa tiene 20 dientes con un diámetro de 800 mm. La velocidad de corte es de 1 m/s.

Calcular:

- a) Velocidad angular de la fresa
- b) Tasa de arranque máxima
- c) tiempo necesario para mecanizar 100 piezas de longitud 150 mm si el tiempo de carga y descarga es de 180 s.

### 4.13. Cuestiones de examen

1. ¿Cuándo se forma el filo recrecido o la viruta con protuberancias?
2. Defina el ángulo de inclinación de filo  $\lambda_s$ . ¿Cómo influye en el desprendimiento de la viruta?
3. Defina el plano de referencia efectivo en una operación de taladrado. ¿Qué ángulos se miden en este plano?
4. Defina el ángulo de posición de filo  $\kappa_r$ . ¿Qué indica el  $r$  del subíndice?
5. ¿Qué relación tiene el plano de referencia con el ángulo de inclinación de filo?. Influencia de éste en la extracción de viruta.
6. ¿Cómo se define el ángulo de inclinación de filo en una operación de fresado frontal?
7. Defina el plano de trabajo  $P_f$  en un punto del filo de herramienta. ¿Qué ángulo se mide a partir de este plano?

8. Define el ángulo de posición de filo  $\kappa_r$  e ilústralo en una operación de torneado.
9. Define el plano de referencia efectivo  $P_{fe}$  en un punto del filo de herramienta. ¿Qué ángulos se miden en este plano?
10. Define el ángulo de posición de filo principal efectivo  $\kappa_{re}$ . Ilustrarlo en una operación de fresado frontal.
11. Influencia del ángulo de posición de filo en el corte de metales con torno.
12. Define el ángulo de desprendimiento normal. ¿Cómo influye en las fuerzas de corte?
13. Define el plano de referencia efectivo en una operación de taladrado. ¿Qué ángulos se miden en este plano?
14. ¿Por qué el ángulo de desprendimiento normal suele tener un valor cercano a 0°?
15. Define el ángulo de incidencia normal. ¿Cómo influye en la vida de la herramienta?
16. Define el ángulo de inclinación de filo  $\lambda_s$ . ¿Cómo afecta al corte de metales?
17. Indica con una ilustración cómo se mide la profundidad de corte en una operación de cilindrado y en una operación de refrentado.
18. Influencia de la velocidad en la energía específica de corte.
19. ¿Qué parámetros se usan para estimar el desgaste de la herramienta en la cara de desprendimiento?
20. ¿Cómo se determina la ecuación de Taylor de vida de una herramienta mediante ensayos?
21. Papel de los aditivos de los fluidos de corte en su función de lubricante. ¿De qué tipos se usan?
22. ¿En qué consiste el desgaste por difusión?. ¿Que parte de la herramienta queda más afectada por este tipo de desgaste?
23. ¿Qué tipo de fricción es el que existe entre la viruta y la herramienta en la cara de desprendimiento?

24. Función del  $Cl_4C$  en el fluido de corte
25. ¿Qué información tenemos sobre un material de herramienta cuando nos dicen que tiene una calidad M30?
26. Características de las herramientas de corte cerámicas.
27. Ventajas de los metales duros frente a los aceros rápidos en su uso como materiales de herramienta.
28. ¿En qué consiste la maquinabilidad de un material? ¿De qué depende la de los aceros?
29. ¿Qué parámetros se utilizan con más frecuencia para cuantificar la calidad de acabado superficial?
30. ¿Qué parámetros se usan para evaluar el desgaste de una herramienta?
31. Calidades ISO de metales duros.
32. Diferencia entre el fresado periférico en concordancia y el fresado periférico en oposición.
33. ¿Cuáles son los regímenes óptimos que se pueden imprimir a la velocidad de corte?.
34. ¿Cómo se calcula la velocidad de corte de máxima eficiencia?.
35. Influencia del avance en la energía específica de corte.
36. ¿Cuándo puede no ser conveniente trabajar bajo condiciones de máxima eficiencia o rentabilidad?.
37. ¿En qué consiste el reavivado de una muela de rectificado?
38. Limitaciones al avance en una operación de mecanizado.

## Capítulo 5

---

# Procesos de mecanizado convencional

En esta lección se pretende que el alumno conozca los procesos de mecanizado convencional entre lo que deberá conocer en profundidad las características y posibilidades de los procesos enunciados en las siguientes secciones.

### 5.1. Torneado

Operaciones de cilindrado, refrentado, ranurado, roscado, mandrinado, torneado vertical y copiado

### 5.2. Limado

Movimiento de corte y de avance lineales, en donde el movimiento de corte lo lleva la herramienta.

### 5.3. Cepillado

Movimiento de corte y de avance lineales, en donde el movimiento de corte lo lleva la pieza. Se usa cuando las piezas son especialmente pesadas.

## 5.4. Taladrado

Movimiento primario circular, y de avance lineal, con el objeto de realizar agujeros cilíndricos. Características de la broca. Refrigeración. Desahogos.

## 5.5. Fresado

Movimiento primario circular, y de avance lineal, pero uno y otro tienen direcciones perpendiculares entre sí.

### 5.5.1. Fresado periférico

El movimiento primario es paralelo a la superficie generada. El espesor de viruta es variable. El sentido de la rotación distinguen dos tipos de fresado: en concordancia (la rotación lleva el sentido de la rodadura), y en oposición (la rotación es contraria a la rodadura). En oposición hay más vibraciones, en concordancia se desgasta más la herramienta.

### 5.5.2. Fresado frontal

El eje de rotación es perpendicular a la superficie generada. Es el más frecuente, para conseguir superficies planas. Tiene el inconveniente de la inestabilidad del voladizo de la herramienta y la curvatura de la superficie mecanizada.

## 5.6. Rectificado

Operación de corte con herramienta de filo no definido que consiste en granos de materiales cerámicos aglomerados para formar muelas abrasivas. Son importantes para conseguir tolerancias y rugosidades superficiales de alta calidad.

El corte del abrasivo es con un ángulo de desprendimiento muy negativo, de donde las fuerzas de corte son muy elevadas en relación al material eliminado.

Los abrasivos pueden ser naturales (Esmeril, corindón, cuarzo, ...) o artificiales (Alúmina, Carburo de Silicio, Diamante, ...). Se clasifican según la granulometría, la cual se indica mediante un número que representa el tamiz usado para su selección (en número de hilos por pulgada). A mayor número, más fino será el grano y menor rugosa será la superficie rectificada. Este número va de 10 a 1200.

El aglomerante puede ser caucho, silicato, resina, vidrio, etc.



## Capítulo 6

---

# Procesos de Mecanizado No Convencional

En esta lección se pretende que el alumno conozca los procesos de mecanizado no convencional entre lo que deberá conocer en profundidad las características y posibilidades de los procesos enunciados en las siguientes secciones. La aparición de nuevos materiales de altas prestaciones difíciles de mecanizar con los métodos tradicionales, ha forzado la aparición de nuevos procesos que utilizan fuentes de energía y métodos de transferencia muy variados. Se verá con más profundidad el mecanizado por electroerosión.

### 6.1. Mecanizado por electroerosión

Cuando una chispa salta entre un dos electrodos en un medio fluido, se formará una burbuja por vaporización de fluido y se fundirá superficialmente uno de los dos electrodos, bien el que tenga menor temperatura de fusión o el que tenga menor difusividad térmica. El colapso de la burbuja hará que la parte líquida del material fundido se desprenda del electrodo. La configuración de parámetros se hará para que la pieza a mecanizar sea el electrodo erosionado.

Para generar la chispa se someten los electrodos a una tensión alterna de alta frecuencia, para mantener la distancia entre electrodos se utiliza un servomecanismo, que para el movimiento en cuanto se detecta la descarga eléctrica. La rugosidad superficial dependerá del voltaje, intensidad y frecuencia de la corriente alterna.

Los electrodos suelen ser de grafito (fácilmente mecanizable y de alto punto de fusión), o de cobre (fácilmente mecanizable y, además, buen conductor de calor y de la electricidad, con una alta difusividad térmica).

Al eliminar las fuerzas de corte, este proceso ofrece posibilidades muy grandes para hacer operaciones que no se podría con mecanizado convencional, entre los que está las superaleaciones. También permite el mecanizado de ranuras usando hilos como electrodo, y huecos interiores mediante el uso de alambres curvados. Es muy usado en la fabricación de improntas en moldes de inyección de termoplásticos, ya que al disponer un electrodo con la forma geométrica compleja, éste puede generar múltiples copias.

## 6.2. Mecanizado ultrasónico

Herramienta vibratoria de alta frecuencia, con una oscilación perpendicular a la superficie mecanizada. Entre la herramienta y la superficie circula un fluido consistente en agua con abrasivo que es el que arranca microvirutas de la pieza base mediante los impulsos de las vibraciones. La vibración de la herramienta se consigue mediante corrientes eléctricas oscilantes sobre materiales que tiene propiedades, o bien magnetostrictivas o bien piezoeléctricas. Muy útil para conseguir micro-ranuras.

## 6.3. Corte por chorro de agua

El chorro por agua está muy extendido en operaciones de lavado de coches, por ejemplo. Si ese chorro lleva disuelto abrasivo fino, se puede convertir en una potente herramienta de corte de metales. Para ello los manguitos deben ser de materiales especiales ( para que no se desgasten excesivamente) y con diámetros muchos más finos (0.1 a 0.4 mm). Otras características del procesos son las altas presiones (400 MPa) para conseguir velocidades supersónicas de 900 m/s.

## 6.4. Mecanizado electroquímico

Desde Faraday se sabe que dos materiales cargados eléctricamente en un baño conductor, el polo positivo (ánodo) se disuelve gradualmente mientras que el polo negativo (cátodo) se mantiene inalterado. En este fenómeno se basa el mecanizado electroquímico, ya que la pieza a mecanizar pierde material dependiendo de su carga eléctrica y no de su dureza que suele limitar los pro-

cesos de mecanizado o abrasión. De este modo se mecanizan superaleaciones usadas en los álabes de turbinas de avión.



## Capítulo 7

---

# Procesos de conformado por deformación plástica

### 7.1. Introducción

El conformado por deformación plástica es el proceso más antiguo para la fabricación de piezas metálicas. El notable desarrollo tecnológico que han sufrido estos procesos hasta la actualidad permite disponer de una amplia variedad de técnicas adaptadas para las distintas aplicaciones, que abarcan desde productos que sirven como materia prima para otros procesos de fabricación hasta componentes finales.

### 7.2. Deformación permanente en metales

El enlace metálico que une los átomos con orbitales  $d$  tienen los electrones de estos orbitales compartidos por los distintos núcleos, circulando libremente a través de todo el material.

La temperatura del material afecta a la distancia media existente en los átomos: A mayor temperatura, mayor será la amplitud de la vibración de los átomos y, por lo tanto, mayor distancia entre ellos.

La forma de los átomos y la distancia entre ellos hace que el metal cristalice de una manera característica. El aluminio cristaliza cúbico centrado en caras, el titanio y el zinc cristaliza en hexagonal compacto, el hierro y el cobalto tienen formas alotrópicas, es decir, dependiendo de la temperatura

cristalizan en cúbico centrado en cuerpo a temperatura ambiente y cúbico centrado en caras a altas temperaturas.

Según la forma de cristalizar, el metal tendrá unos planos característicos de deslizamiento. El que más planos de deslizamiento tiene es el cúbico centrado en caras seguido del centrado en cuerpo y por último el hexagonal que sólo tiene un plano de deslizamiento.

Un metal está formado por granos microscópico, cada uno de los cuales es un cristal con miles de átomos y con una orientación determinada. La distinta orientación de los granos cuyo conglomerado forma el metal hace que el material tenga un comportamiento isotrópico a escala macroscópica.

Al deformar el metal siempre se encontrarán granos con planos cristalo-gráficos orientados en la dirección del cortante máximo que se deformarán permanentemente, mientras que los que no lo están rotarán hasta que se encuentren en la dirección para deformarse. Esto hace que el metal deformado esté internamente muy distorsionado, y los granos deformados aumenten sus imperfecciones cristalinas (dislocaciones). Se dice entonces que el material posee acritud.

Esta acritud hace que localmente muchas partículas se encuentren tensionadas, aunque globalmente el material se encuentre en equilibrio, son las tensiones residuales. Otro efecto de la acritud es el aumento de resistencia a la deformación permanente que se produce (endurecimiento), y la disminución de capacidad de deformación antes de la rotura (fragilización).

La acritud se puede eliminar manteniendo el metal a alta temperatura durante largo tiempo. Este aumento de temperatura aumenta la vibración de los átomos permitiendo una más rápida recolocación y reorganización de los átomos y granos (recristalización), aliviando las tensiones residuales. Este tratamiento térmico suele conocerse como recocido, o revenido.

Una característica propia del material es su temperatura de recristalización, definida como la temperatura a la cual el material alivia un 95% de sus tensiones residuales en una hora. Esta temperatura varía con la composición de la aleación, la cantidad de deformación (acritud) y con las transformaciones de fase que tengan que ocurrir. Esta recristalización se realiza en tres fases: Difusión de defectos cristalinos (cristalitas), alivio de tensiones, y crecimiento de grano (éste hace decrecer la resistencia del material). Habitualmente se estima que esta temperatura se encuentra entre un medio y un tercio de la temperatura de fusión.

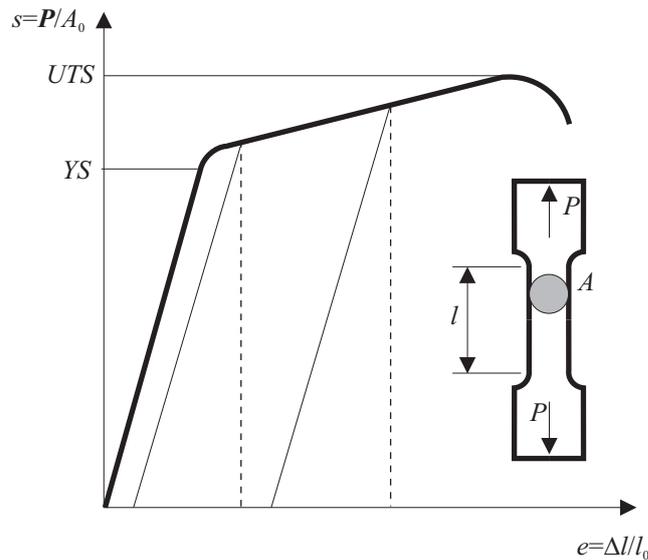


Figura 7.1: Curva de ensayo a tracción

### 7.3. Curva del ensayo de tracción

Un ensayo típico para la estimación de las propiedades plásticas de un material es el «Ensayo de tracción». Este ensayo consiste en estirar una probeta a una velocidad constante registrando la resistencia (fuerza) que opone al estiramiento. De aquí se obtiene una curva fuerza-incremento de longitud. La curva que habitualmente (Figura 7.1) se usa es la fuerza dividida el área de la sección inicial de la probeta frente al incremento de longitud dividido por la longitud inicial de la probeta. A uno y otro valor se le denomina tensión nominal  $s$  y deformación nominal  $e$  respectivamente.

Las tensiones y deformaciones nominales están referidos a valores geométricos iniciales, pero la tensión real depende del área actual que soporta la carga y la deformación real depende de la historia de las distintas deformaciones a las que ha sido sometida la probeta. Para relacionar los valores nominales con los reales se parte de la hipótesis de conservación de volumen durante el procesos de deformación. Esta hipótesis parte de que la densidad del material no cambia y por lo tanto el producto del área por la longitud en cualquier instante es igual al producto entre valores iniciales:

$$A_0 \cdot l_0 = A \cdot l \quad (7.1)$$

Por lo tanto la tensión real será:

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{P \cdot A_0}{A_0 \cdot A} = s \cdot (1 + e) \quad (7.2)$$

Del mismo como se procede con la deformación real.

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + e) \quad (7.3)$$

El uso de la deformación real tiene la ventaja adicional de que sus valores son aditivos.

Otro valor interesante es la velocidad de deformación en función de la velocidad lineal, ya que de este factor depende la curva de tracción en materiales deformados en caliente.

$$\dot{e} = \frac{de}{dt} = \frac{dl}{dt} \frac{1}{l_0} = \frac{v}{l_0} \quad (7.4)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\ln \frac{l}{l_0}}{t} = \frac{v}{l} \quad (7.5)$$

Los puntos característicos de esta curva son la resistencia a fluencia  $YS$  que limita la zona elástica y la tensión última  $UTS$  que indica la mayor fuerza que puede resistir un material para una tensión inicial dada.

### 7.3.1. Modelización del material

La curva de tracción suele tener una zona plástica mucho más amplia que la señalada en la figura 7.1, ya que la parte elástica es mucho más pequeña en relación al total de la dimensión de la  $UTS$  tanto en la parte de tensiones como en la de deformaciones. Por ello se suele aproximar el comportamiento del material mediante una curva exponencial en el que las abcisas son las deformaciones permanentes y las ordenadas son las tensiones de fluencia para cada deformación permanente. Su forma general será:

$$\sigma = C \cdot \varepsilon^n \cdot \dot{\varepsilon}^m \quad (7.6)$$

El exponente  $n$  indica el grado de endurecimiento por deformación, y el valor de  $m$  indica el endurecimiento por velocidad de deformación (en procesos en frío se suele considerar  $m = 0$ ).

Para ciertos cálculos esta curva exponencial se suele simplificar tomando un valor constante de la tensión de fluencia que será la media de la curva exponencial en el rango de valores que se vaya a usar.

$$\bar{Y} = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon \quad (7.7)$$

### 7.3.2. Punto de inestabilidad

En procesos de tracción o expansión o estiramiento se podría producir adelgazamientos, los cuales se convierten en los puntos más débiles de la pieza que se está deformando pudiendo ocurrir que toda la deformación plástica pase a concentrarse en esos puntos. Cuando esto ocurre se dice que el proceso ha entrado en fase de inestabilidad. Casos típicos son el acuellamiento en tracción, los cráteres en estiramiento plano, o la explosión de tubos a presión.

En el caso de la tracción unidimensional la inestabilidad ocurre cuando la deformación es tal que para una fuerza constante un punto se deforma plásticamente a costa de la recuperación elástica del resto de la pieza. Este fenómeno coincidiría con el máximo de la curva  $P - \varepsilon$ .

$$\frac{dP}{d\varepsilon} = 0 = \frac{d(\sigma \cdot A)}{d\varepsilon} = C\varepsilon^n(-A) + ACn\varepsilon^{n-1} \quad (7.8)$$

Por lo que la inestabilidad ocurre cuando la deformación alcanza el valor del exponente  $n$ .

## 7.4. Trabajo de deformación

Para el cálculo de fuerzas y potencias de proceso, el método más simple es mediante la obtención del trabajo de deformación homogénea. En el cual se calcula la deformación sufrida por el material considerando el estado final de éste, y a partir de la energía necesaria para llevar a cabo esta deformación, se mayor la energía necesaria multiplicándolo por factores que estimen la fricción y la irreversibilidad (o redundancia) del proceso.

$$\delta W = P\delta l = \sigma A\delta l = V\sigma\delta\varepsilon \quad (7.9)$$

Si el material sigue la ley exponencial.

$$\frac{w}{V} = \int_0^{\varepsilon_f} C\varepsilon^n d\varepsilon = \frac{C}{n+1} \varepsilon^{n+1} \quad (7.10)$$

## 7.5. Laminación de chapa metálica

La laminación es un proceso de conformado en el que el material es forzado a pasar entre dos elementos rotatorios por la fricción con uno de ellos. Es el proceso mediante el cual se genera la chapa metálica usada en multitud de aplicaciones, aunque también se sigue este proceso para generar otros perfiles como raíles de tren, vigas metálicas estructurales, perfilado de tubos, etc.

En el laminado se distinguen los procesos de laminado en caliente y en frío. Con el laminado en caliente se pueden obtener hasta espesores de 2 mm, para obtener espesores menores con la suficiente calidad superficial se requiere realizar el proceso en frío. En acero, el espesor más extendido es el de 0.6 mm que es el más usado para las carrocerías de la industria de automoción. En aluminio se obtienen espesores de centésimas de milímetros con acabado superficial excelente y tienen aplicaciones en la industria alimentaria e sanitaria.

En el laminado hay dos rodillos de los que uno posee la fuerza motriz y tiene un acabado superficial más irregular para que el rozamiento provoque el avance de la chapa. El diámetro de los rodillos influye decisivamente en las tensiones residuales que quedan en la chapa después de deformar en frío. Si los diámetros son excesivamente grandes genera unas tensiones residuales de tracción en la superficie que facilita la aparición de grietas, picaduras por corrosión, etc. Lo habitual es que en la superficie queden tensiones residuales de compresión que permitan el doblado y a la vez aumente su resistencia a la corrosión por picaduras y a la fatiga, ya que las propias tensiones residuales tienden a cerrar las pequeñas grietas que pudieran formarse, impidiendo su crecimiento.

El proceso de laminación en frío se realiza en varias etapas montadas en serie (el tren de laminación), y el producto final se enrolla en una bobina para facilitar el transporte y conservación de la misma. En las etapas finales de la laminación, cuando el espesor es muy pequeño, para que el diámetro del rodillo sea similar al espesor de la chapa, el movimiento se transmite a través de rodillos más rígidos que eviten la flexión por compresión.

## 7.6. Tecnologías de transformación de chapa metálica

Una de las características más importantes de la chapa metálica es su anisotropía. Las diferentes características que presenta en las distintas direcciones se puede aprovechar para obtener productos de mejor calidad. Por ejemplo, conseguir una buena resistencia a la deformación en la dirección perpendicular al plano de laminación permite que ésta no adelgace en un proceso de doblado presentando la zona doblada buena resistencia y rigidez. Esta es una propiedad que tienen las chapas de acero y titanio pero que no tienen las de aluminio, por ello el aluminio tiene un uso limitado en las carrocerías de los coches. Por otro lado, si las propiedades son distintas en las dos direcciones del plano de la chapa, a la hora de embutir es fácil que se

formen como orejas en los bordes, lo cual hace necesario añadir al proceso una operación de eliminación de material y enrasado de bordes.

El parámetro más usado para estimar la anisotropía de la chapa es la relación entre las deformaciones plásticas en la dirección perpendicular al estirado y la del espesor de viruta. Este parámetro es el coeficiente de anisotropía  $R$  en una dirección determinada.

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln(W_f/W_0)}{\ln(t_f/t_0)} \quad (7.11)$$

en donde  $W$  es el ancho de la probeta y  $t$  es el espesor. Por lo tanto, después del estirado se tiene que  $W_f < W_0$  y que  $t_f > t_0$ . Cuanto mayor sea el coeficiente de anisotropía, más facilidad tendrá la chapa de ser doblada o embutida sin adelgazamientos.

Estimando los coeficientes de anisotropía a  $0^\circ$  de la dirección de laminación, y a  $45^\circ$  y a  $90^\circ$  se pueden obtener coeficientes de anisotropía característicos del material: Coeficiente de anisotropía medio  $R_m$  y el coeficiente de anisotropía plano  $R_p$ .

$$R_m = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (7.12)$$

$$R_p = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{2} \quad (7.13)$$

En el proceso de embutición hay un coeficiente que delimita el diámetro que se puede embutir de una chapa determinada ( $D_0$ ) respecto al diámetro del punzón ( $D_p$ ). Este coeficiente es la Relación Límite de Embutición (LDR). El defecto más habitual que puede presentar el producto cuando se embuten diámetros mayores es la rotura por adelgazamiento en la base. Para evitar este defecto conviene que el material tenga un coeficiente de anisotropía normal elevado. Para que en las orejas el producto sean pequeñas el coeficiente de anisotropía plano debe ser lo más próximo a 0.

$$\text{LDR} = \frac{D_0}{D_p} \quad (7.14)$$

Experimentalmente se ha estimado de forma general el valor que toma la LDR respecto a  $R_m$ .

## 7.7. Problemas de deformación plástica

1. En un ensayo de tracción sobre una probeta cilíndrica de acero inoxidable de  $l_0 = 50,8$  mm y sección  $A_0 = 35,8$  mm<sup>2</sup> se ha obtenido los

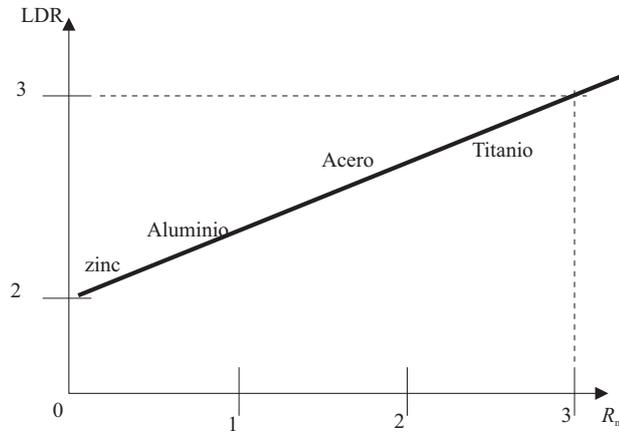


Figura 7.2: Relación entre la LDR y el coeficiente de anisotropía medio

siguientes datos:

| Carga (N) | $\Delta l$ (mm) |
|-----------|-----------------|
| 7208      | 0               |
| 11250     | 5.508           |
| 13500     | 2.03            |
| 16200     | 2.08            |
| 18900     | 10.16           |
| 20200     | 15.24           |
| 20700     | 21.8            |
| 13200     | 24.0            |

La sección de la zona fracturada era de  $A_{min} = 10,0 \text{ mm}^2$

Representar gráficamente la curva  $\sigma - \varepsilon$ . Calcular las constantes del comportamiento exponencial.

- En la figura se muestra una pieza producida por una extrusión directa. Determinar la fuerza necesaria para producirla. El material es un acero cuya ley de deformación plástica es  $\sigma = 650\varepsilon^{0,26} \text{ N/mm}^2$ .
- Determinar la potencia necesaria para el accionamiento de una prensa hidráulica capaz de comprimir en caliente un tocho cilíndrico de acero de 530 mm de diámetro, desde una longitud inicial de 150 mm hasta una final de 80 mm, a una velocidad de 0.1 mm/s

Supóngase que:

- El comportamiento del material sigue una ley del tipo  $\bar{Y} = 47 \text{ N/mm}^2$

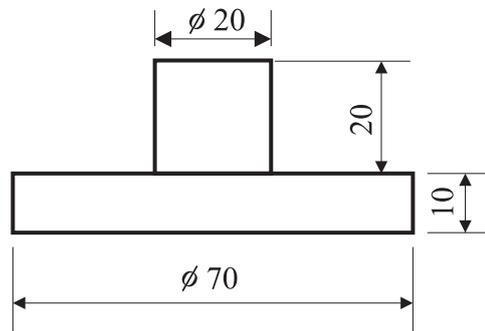
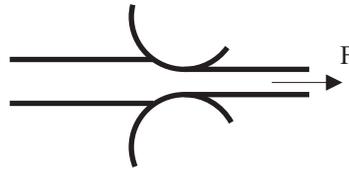


Figura 7.3: Extrusión directa

- El rendimiento global del sistema hidráulico-mecánico de la prensa es del 45 %
  - La velocidad relativa de acercamiento de las plataformas de la prensa es de 0.4 %
  - Los efectos de fricción y distorsión interna pueden introducir incrementos promedios de un 40 %
4. Se pretende realizar el estiramiento de un cilindro de  $\phi 20 \times 50$  mm hasta una longitud de 70 mm. El material sigue una ley de comportamiento plástico  $\sigma = 650\varepsilon^{0,22}$  N/mm<sup>3</sup>.
- a) ¿Cuál es la energía de deformación del proceso?
  - b) ¿Cuál es la fuerza máxima que se alcanza durante el proceso?.
5. En un proceso de estirado de chapa metálica se pretende reducir el espesor de un fleje de  $20 \times 1$  mm a 0.8 mm (sin reducción del ancho) mediante su paso entre dos rodillos. El metal tiene una tensión de fluencia de  $\sigma = 240 \cdot \varepsilon^{0,33}$  MPa. Las pérdidas por fricción y redundancia son el 30 % de la energía total del proceso.
- a) Calcular la fuerza necesaria para la realización del proceso
  - b) Determinar el aumento de resistencia a fluencia del fleje con la reducción de espesor
  - c) Calcular la productividad máxima del proceso cuando la potencia disponible en la máquina es de 5 kw



6. Determinar la potencia necesaria para el accionamiento de una trefiladora capaz de disminuir un alambre desde un diámetro  $D_1 = 6$  mm a un diámetro  $D_2 = 5$  mm en una sola etapa, y con una productividad de 5 m/s.

Supóngase que:

- El comportamiento del material sigue una ley del tipo  $\sigma = 745\varepsilon^{0,48}$  N/mm<sup>2</sup>
  - El rendimiento global del sistema mecánico de la máquina es del 70 %
  - Los efectos de fricción y distorsión interna pueden introducir incrementos promedios de un 50 %
7. Un tubo con un diámetro exterior  $D_1 = 60$  mm y espesor  $t_1 = 10$  mm es reducido a un diámetro  $D_2 = 50$  mm en un proceso de trefilado simple (aunque con un mandril interior). El material es cobre con  $\bar{\sigma} = 440\varepsilon^{0,3}$  N/mm<sup>2</sup>.
- a) ¿Cuál es la fuerza del proceso cuando el espesor final es  $t_2 = 7$  mm?
8. Calcular el coeficiente de anisotropía medio de una chapa de acero en el que se ha hallado que  $R_0=0.8$ ,  $R_{45}=1.5$ ,  $R_{90}=1.7$ . Calcular el diámetro máximo de chapa que se puede embutir para hacer un cuenco de 20 mm de diámetro interior. ¿Se formarán orejas?.

# Capítulo 8

---

## Proceso de conformado por fundición

### 8.1. Introducción

El conformado de metales por fundición es uno de los más antiguos. Básicamente consiste en la colada de un metal fundido en un molde con la forma deseada. Actualmente hay una gran variedad de piezas metálicas en automoción y en maquinaria que son fundidas.

Las ventajas e inconvenientes de este tipo de procesos se resume en la siguiente tabla:

| Ventajas                        | Inconvenientes                  |
|---------------------------------|---------------------------------|
| Ahorro energético global        | Poca flexibilidad               |
| Forma final de piezas complejas | Procedimientos artesanales      |
| Rapidez (salvo solidificación)  | Se deteriora la microestructura |
| Piezas de tamaño ilimitado      | Poros, oxidación,...            |

El proceso de conformado por fusión tiene las etapas descritas en la Figura 8.1.

La clasificación de los procesos de fundición se pueden clasificar de varios modos:

1. Según la fuente de energía usada en el horno para fundir el metal:

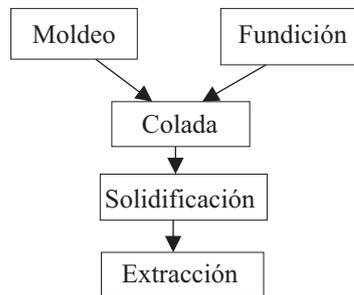


Figura 8.1: Proceso de conformado por fundición

- Combustión
  - Resistencia
  - Inducción electromagnética
  - Arco eléctrico
2. Según el permanencia del molde y el modelo:
    - Permanente (coquilla)
    - No permanente
      - Modelo permanente (moldeo en arena, en cáscara)
      - Modelo no permanente (moldeo a la cera perdida)
  3. Según el vertido:
    - Gravedad
    - Baja presión (0.1 ÷ 2 MPa)
    - Alta presión (15 ÷ 80 MPa)
  4. Según el tiempo de solidificación:
    - Rápida
    - Lenta

## 8.2. Metal fundido

Cada metal puro tiene una temperatura característica en la que pasa de estado sólido a estado líquido, absorbiendo una cantidad de calor (entalpía de cambio de fase). Cuando el metal es una mezcla de metales puros con distinta

temperatura de fusión, el cambio de fase no se produce en una determinada temperatura sino en un rango de temperaturas, salvo que la mezcla consista en unas proporciones determinadas que hacen que se comporte como un metal puro, a este punto se le llama eutéctico, y su punto de fusión está por debajo de la menor temperatura de fusión de los metales puros que componen la mezcla. Las aleaciones comerciales (salvo las del hierro) suelen tener composición eutéctica por las ventajas que comporta. Casos típicos son la aleación de Aluminio ( $T_f=660\text{ž}$ ) con Silicio al 12% que funde a 562ž. Otros casos son el de la fundición de hierro con un 4% de carbono, el bronce, el latón, el zamac, etc.

La fundición del metal se debe realizar en un recipiente (crisol) que debe tener consistencia suficiente a la temperatura máxima de fundición. Estos materiales suelen ser de naturaleza cerámica y se llaman refractarios. Estos materiales se clasifican según la reactividad que tienen con el metal fundido (caldo): son ácidos si son sensibles al contenido de azufre del caldo, o básicos si no lo son para el azufre pero sí para el carbono. Los refractarios ácidos suelen constar de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y óxidos de hierro, mientras que los básicos constan de óxidos de magnesio (magnesita) y suelen ser bastante más caros.

La chatarra se coloca en el crisol mezclada con una arenilla (fundente) que tiene diversas funciones durante la fundición:

- Limpia el metal fundido de impurezas, evitando que la pieza final tenga muchas inclusiones.
- Evita la oxidación del caldo pues forma una capa compacta (escoria) flotando sobre el caldo que aísla a éste del oxígeno y de otros gases.
- Ajuste de composición química del metal

Los fundentes también son susceptibles de reaccionar químicamente con el metal fundido y con el refractario de las paredes. Para evitar esta reactividad última el tipo de fundente (si ácido o básico) debe ser el mismo que el del refractario usado para construir el crisol.

Respecto a la temperatura del metal fundido, conviene que esté por encima de la temperatura de fusión para que no solidifique antes de tiempo durante la colada, pero no debe ser demasiado elevada pues podría dañar el molde y la absorción de gases (el  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ , ...) aumenta con la temperatura, tendiendo a la efervescencia.

### 8.3. Tecnologías de moldeo

Moldeo en arena, en cáscara, en coquilla, a la cera perdida. Fundición en molde metálico a baja y a alta presión. Estas técnicas de moldeo vienen ilustrados en las figuras adjuntas.

### 8.4. Colada

El flujo del metal fundido por los bebederos y canales de distribución viene dado por las ecuaciones de la mecánica de fluidos. Para conocer la presión y la velocidad de flujo basta la ecuación de Bernoulli (8.1) y continuidad (8.2), pues las pérdidas son muy pequeñas. El régimen de flujo conviene que sea de turbulencia moderada, ya que con el régimen laminar el metal fundiría en las paredes de los canales pudiendo obstruirlos, por ello el número de Reynolds (8.3 conviene que esté comprendido entre 2000 y 20.000.

$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{cte} \quad (8.1)$$

$$Q = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (8.2)$$

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\eta} \quad (8.3)$$

### 8.5. Solidificación

Velocidad de solidificación (Ecuación de Chvorinov). El tiempo de solidificación depende del tamaño de la pieza y de la superficie que dispone para transmitir el calor. Cuanto mayor sea la pieza, más tiempo de solidificación requerirá. Chvorinov (8.4) estableció una relación que puede ser orientativa a la hora de hacer pruebas a pequeña escala.

$$t_s = C \left( \frac{\text{Volumen}}{\text{Superficie}} \right)^2 \quad (8.4)$$

Contracción. La contracción de la pieza se produce en la solidificación y en el enfriamiento hasta la extracción, por lo que los modelos suelen ser de mayor tamaño que el deseado para las piezas finales.

La contracción puede tener efectos no deseados como los rechupes y poros que son imperceptibles desde el exterior, pero que debilitan mucho la pieza. Para evitar estos defectos se procura que la solidificación sea direccional y

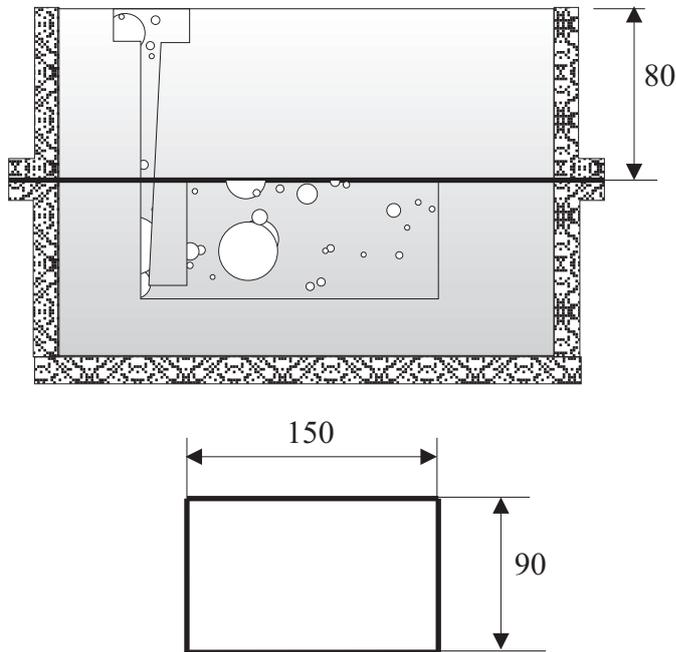


Figura 8.2: Proceso de conformado por fundición

siguiendo un frente conocido. Esto se consigue mediante pequeños depósitos que mantienen diertas zonas calientes y alimentan de metal fundido la pieza mientras se está produciendo la solidificación. Estos depósitos suelen tomar la forma de rebosaderos o mazarotas.

## 8.6. Problemas de Fundición

1. Un aluminio puro es vertido en un molde de arena. El nivel del metal en la artesa está 20 cm por encima del final del canal de alimentación. (El aluminio tiene una densidad de  $\rho=2385 \text{ Kg/m}^3$ , y una viscosidad de  $\eta=0.0013 \text{ Pa s}$ .) Calcular:
  - a) Rango de valores en el que se debe encontrar el diámetro del canal de alimentación al final de su trayecto. ( $N^{\circ}$  de Reynolds  $Re=\frac{vD\rho}{\eta}$ )
  - b) Determinar el caudal máximo al inicio de la colada.
2. En el molde de arena de la figura 8.2, calcular el peso muerto necesario para sostener la semicaja superior.
3. Estimar la fuerza de cierre para el proceso de fabricación de unos soldados de plomo por fundición a presión de 20 MPa. Cada soldado tiene

un área proyectada de  $5.000 \text{ mm}^2$ . ¿Cuántos se podrían fabricar en una inyección si la fuerza del pistón es de 1 MN?